

การใช้พอลิแลกติกแอซิดและพอลิแลกติกแอซิดโคเอทิลีนเทอร์พทาเลต
สำหรับการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียแบบควบคุม



นาย ณัฐนัย จินตกานนท์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF POLYLACTIC ACIDS AND POLY(LACTIC ACID-CO-ETHYLENE
TEREPHTHALATE) FOR CONTROL RELEASING OF UREA FERTILIZER



Mr. Nattanaï Jintakanon

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้พอลิแลกติกแอซิดและพอลิแลกติกแอซิดโคเอทิลีนเทเรฟทาเลต
สำหรับการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียแบบควบคุม

โดย

นาย ณัฐนัย จินตกานนท์

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร.มณฑนา โอภาประกาศิต

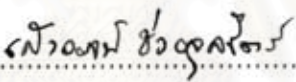
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปกรณ์ โอภาประกาศิต

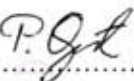
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุตจัน นารหนองบัว)

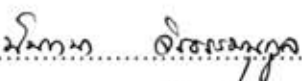
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.มณฑนา โอภาประกาศิต)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปกรณ์ โอภาประกาศิต)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. อติตย์สา เพ็ชรสุข)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทนา จิรธรรมนุกุล)

ณัฐชัย จินตกานนท์ : การใช้พอลิแลคติกแอซิดและพอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทเรฟทาเลตสำหรับการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียแบบควบคุม. (UTILIZATION OF POLYLACTIC ACIDS AND POLY(LACTIC ACID-CO-ETHYLENE TEREPHTHALATE) FOR CONTROL RELEASING OF UREA FERTILIZER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ดร.มัณฑนา โอภาสประกาศิต, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ. ดร. ปกรณ์ โอภาสประกาศิต, 74 หน้า

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการพัฒนาวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสำหรับปุ๋ยยูเรียด้วยเทคนิคการพ่นและจุ่มเคลือบ ทำการเคลือบสารละลายพอลิเมอร์ฐาน(โค)พอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมลงบนผิวของเม็ดปุ๋ย จากนั้นตรวจสอบคุณลักษณะต่างๆของวัสดุ ร้อยละสารเคลือบผิวที่สัมพันธ์กับชนิดของพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้นและจำนวนครั้งที่ทำการเคลือบ ตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของน้ำหนัก อัตราการปลดปล่อยยูเรียของปุ๋ยที่เคลือบลงในน้ำกลั่น วัดได้โดยการติดตามดัชนีหักเหของแสงของสารละลาย สันฐานวิทยาของผิวเคลือบพอลิเมอร์แสดงให้เห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เสถียรภาพทางความร้อนและโครงสร้างเคมีของผิวเคลือบตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA) และเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)

ผลของอัตราส่วนร้อยละสารเคลือบผิว / ปริมาณพอลิเมอร์ที่ใช้ แสดงให้เห็นว่าวิธีการจุ่มเคลือบมีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการพ่นเคลือบ นอกจากนี้การใช้เทคนิคการพ่นยังถูกจำกัดด้วยความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่เข้มข้นขึ้นและใช้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น พบว่าปริมาณร้อยละสารเคลือบผิวมากขึ้นเมื่อใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นมากขึ้นและใช้จำนวนครั้งการเคลือบเพิ่มขึ้น ผลจากภาพถ่าย SEM และอัตราการปลดปล่อยยูเรียแสดงให้เห็นว่าคุณภาพและความหนาของชั้นผิวเคลือบมีบทบาทสำคัญในการชะลออัตราการปลดปล่อยยูเรียผิวเคลือบที่มีรูพรุนและรอยแตกจำนวนมากได้จากการเคลือบด้วยพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำอย่าง PLA-1, PLA-2 และ PLA-3 ส่งผลให้อัตราการปลดปล่อยยูเรียของวัสดุดังกล่าวไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเพิ่มปริมาณของชั้นผิวเคลือบ ในทางตรงกันข้ามประสิทธิภาพในการชะลอการปลดปล่อยยูเรียจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มร้อยละสารเคลือบผิวเมื่อใช้พอลิแลคติกแอซิดทางการค้าและพอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทเรฟทาเลต เมื่อใช้พอลิเมอร์ผสมผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุดังกล่าวมีพฤติกรรมปลดปล่อยที่สอดคล้องกับพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ ผลจากการทดสอบ TGA ของชั้นผิวเคลือบที่เหลือหลังทำการละลายยูเรียออกจนหมดที่ได้จาก PLA-1, PLA-2 และโคพอลิเมอร์แสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าวัสดุตั้งต้น อย่างไรก็ตามก็ไม่สามารถสรุปได้ว่าเกิดเนื่องจากการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส การเกิดไฮโดรไลซิสในช่วงเวลาสั้นๆนั้นไม่น่าจะเป็นไปได้ เนื่องจากการเกิดไฮโดรไลซิสในช่วงเวลาสั้นๆที่ใช้ในการให้ยูเรียแพร่ออกหมดมีความเป็นไปได้น้อยมาก อีกทั้งการทดสอบด้วย FTIR ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีในระหว่างการปลดปล่อยยูเรีย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ลายมือชื่อนิสิต¹ จันทนา พท.ก
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2551ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม PGT

4972621523 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEY WORD: CONTROLLED-RELEASE / POLYLACTIC ACID / FERTILIZER / COPOLYESTER / ETHYLENE TEREPHTHALATE

NATTANAI JINTAKANON : UTILIZATION OF POLYLACTIC ACIDS AND POLY(LACTIC ACID-CO- ETHYLENE TEREPHTHALATE) FOR CONTROL RELEASING OF UREA FERTILIZER. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : MANTANA OPAPRAKASIT, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASST.PROF. PAKORN OPAPRAKASIT, Ph.D., 74 pp.

This study is aimed to develop controlled-release materials for urea fertilizer by spraying and dipping techniques. Solution of lactic acid-based (co)polymer and its blends were applied onto urea granulates surface. The material characteristics were then examined. Percent coated materials as a function of polymer types, molecular weight, concentrations and dose applications were examined by gravimetric analysis. Urea release rate of the coated fertilizer in water was measured by monitoring refractive index of the solutions. Morphology of the polymer coating surfaces was revealed by Scanning Electron Microscopy (SEM). Thermal stability and chemical structure of the coated materials were investigated by Thermo-gravimetric analyzer (TGA) and Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy.

Results on percent coated materials / amount of applied polymer ratio indicated that the dipping method has higher efficiency than the spraying process. Moreover, the use of spraying technique was limited by an increase in viscosity of polymer solutions when solutions with higher concentration or polymers with higher molecular weight were employed. It was found that higher percent coated materials were obtained when solutions with higher concentration were used and higher number of coating dose was applied. Results from SEM photographs and urea release rates showed that quality and thickness of coated layer play significant roles in retarding the urea release rate. Surface with large amount of cracks and pin-holes were obtained in materials coated with low molecular-weight polylactic acids, i.e. PLA-1, PLA-2 and PLA-3. As a result, their urea release rates were not dramatically different when the amount of coated layer was increased. In contrast, the efficiency in lowering of urea release was enhanced by increasing the percent coated materials when commercial polylactic acid and poly(lactic acid-co-ethylene terephthalate) copolymer were employed. When polymer blends were employed, the results showed that the materials releasing behaviors were in good correlation with the constituent polymers. Results from TGA experiments on the coated material residue after a complete urea release obtained from materials prepared from PLA-1, PLA-2 and copolymer showed lower thermal stability than the original materials. However, it is not conclusive that this is due to a hydrolysis of the materials, as hydrolytic degradation is unlikely to take place during this short total release time period. Also, results from FTIR showed no evidence of chemical structural change during the release.

Department : Material Science

Field of study : Applied Polymer Science and Textile Technology

Academic year : 2008

Student's signature *J. Nattanaai*

Principle Advisor's signature *M. Opaprasit*

Co-advisor's signature *P. Opaprasit*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับความช่วยเหลือ และการแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายชื่อดังนี้

1. อ. ดร. มณฑนา โอภาสประกาศิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหา และแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ แนวคิดที่เป็นประโยชน์ และตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
3. ผศ. ดร. ปกรณ์ โอภาสประกาศิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ แนวคิดที่เป็นประโยชน์ และตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
4. ผศ. ดร. นันทนา จิรธรรมนุกูล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ แนวคิดที่เป็นประโยชน์ และตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
5. ดร. อติยศสา เพ็ชรสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ แนวคิดที่เป็นประโยชน์ และตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
6. รศ. ดร. เจดศักดิ์ ไชยคุนา ที่ให้ความช่วยเหลืออนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย
7. บุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบคุณ บิดา มารดา พี่น้อง ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณเพื่อนและบุคคลอันเป็นที่รักที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงตามที่มุ่งหวัง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ ภาษาไทย	ง
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉู
สารบัญแผนภาพ	ฉุ
บทที่	
1. บทนำ	1
2. วารสารปริทรรศน์	2
2.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช (Nutrient)	2
2.2 การสูญเสียธาตุอาหารที่อยู่ในดิน	3
2.3 ปุ๋ย (Fertilizer)	3
2.4 ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled-release fertilizer)	4
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.6 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid)	10
2.7 พอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polylactic acid-co-ethylene terephthalate)	14
3. การทดลอง	16
3.1 วัสดุ สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ใช้งาน	16
3.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์	17
3.3 กระบวนการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ย	18
3.4 การสร้างกราฟมาตรฐาน(Calibration curve) จาก Urea Standard	20
3.5 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ	22
3.5.1 ทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution)	22
3.5.2 ตรวจสอบร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย (% Coated material)	23
3.5.3 ตรวจสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์	23
3.5.4 วิเคราะห์โครงสร้างเคมีของผิวเคลือบพอลิเมอร์	24
3.5.5 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	25
3.5.6 ตรวจสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ	25

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	26
4.1 การทดสอบปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการพ่นเคลือบ	26
4.2 การทดสอบปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์	38
4.3 การทดสอบปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการเคลือบด้วยความร้อน	44
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์และผิวเคลือบพอลิเมอร์	45
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	54
5.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2 ข้อเสนอแนะ	55
รายการอ้างอิง	56
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก. ข้อมูลดิบจากการทดลอง	59
ภาคผนวก ข. ข้อมูลเครื่องมือการทดสอบ	71
ภาคผนวก ค. ข้อมูลสารเคมี	73
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	74

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ระยะเวลาการเสื่อมสภาพของพอลิแล็กติกแอซิด เมื่อถูกแช่อยู่ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ	13
ตารางที่ 3.1	พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	16
ตารางที่ 3.2	สารเคมีและตัวทำละลายที่ใช้ในงานวิจัย	16
ตารางที่ 3.3	รายการเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	17
ตารางที่ 3.4	ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	17
ตารางที่ 3.5	ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย (2)	18
ตารางที่ 3.6	ความเข้มข้นของสารละลายยูเรียมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัย	20
ตารางที่ 4.1	ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่วัดจาก Ubbelohde viscometer	26
ตารางที่ 4.2	ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่วัดจาก Brookfield Viscometer	27
ตารางที่ 4.3	ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย (% Coated material) ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ โดยกระบวนการ พ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์	28
ตารางที่ 4.4	ประสิทธิภาพของการพ่นเคลือบ (%Efficiency) ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ โดยกระบวนการพ่นเคลือบ ด้วยสารละลายพอลิเมอร์	29
ตารางที่ 4.5	ประสิทธิภาพของการเคลือบ (%Efficiency) ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ โดยกระบวนการจุ่มลงใน สารละลายก่อนทำการไล่ตัวทำละลายออกในตุ๊กกลาง	38
ตารางที่ 4.6	ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย (% Coated material) ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ โดยกระบวนการ จุ่มลงในสารละลายก่อนทำการไล่ตัวทำละลายออกในตุ๊กกลาง	39
ตารางที่ 4.7	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเคมีและสมบัติทางความร้อนของผิวเคลือบพอลิเมอร์	39

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปประกอบ

หน้า

รูปที่ 2.1	กระบวนการการ Hydrolysis ของโคโคซาน	5
รูปที่ 2.2	กลไกการปลดปล่อยธาตุอาหารของเม็ดปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่เคลือบผิวด้วยพอลิซัลโฟน	6
รูปที่ 2.3	ร้อยละการแพร่ของธาตุไนโตรเจนผ่านผิวเคลือบพอลิเอทิลีน เทียบกับเวลาในหน่วยสัปดาห์	6
รูปที่ 2.4	ร้อยละการแพร่ของธาตุไนโตรเจนผ่านผิวเคลือบพอลิเอทิลีน เทียบกับเวลาในหน่วยสัปดาห์ (2) ...	7
รูปที่ 2.5	ร้อยละการแพร่ของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ผ่านผิวเคลือบผสมพอลิอะคริลิก- แอซิด โคอะคริลาไมด์และดินขาว	9
รูปที่ 2.6	กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด โดยใช้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีเป็นสารตั้งต้น	10
รูปที่ 2.7	กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด โดยใช้กรดแลคติกเป็นสารตั้งต้น	10
รูปที่ 2.8	กลไกการสังเคราะห์สารประกอบแลกไทด์	11
รูปที่ 2.9	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิดเปรียบเทียบกับ พอลิเมอรัชนิดอื่น	12
รูปที่ 2.10	กระบวนการการ Hydrolysis ของพอลิแลคติกแอซิด	12
รูปที่ 2.11	ปริมาณการสลายตัวของพอลิแลคติกแอซิด ในน้ำอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เทียบกับเวลา	13
รูปที่ 2.12	กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอรัประกอบ พอลิแลคติกแอซิด โคอทิลีนเทรฟทาเลต	14
รูปที่ 2.13	พื้นผิวของพอลิแลคติกแอซิด โคอทิลีนเทรฟทาเลต ก่อนและหลังเกิดการเสื่อมสภาพ	15
รูปที่ 2.14	น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิด โคอทิลีนเทรฟทาเลต เทียบกับเวลาการเกิด Hydrolysis ..	15
รูปที่ 3.1	เครื่องคัดแยกอนุภาคบนตะแกรงร่อน และตะแกรงร่อน	18
รูปที่ 3.2	กระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอรั	19
รูปที่ 3.3	กระบวนการเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอรัก่อนทำการไล่ตัวทำละลายออกในตัวกลาง	19
รูปที่ 3.4	กระบวนการเคลือบพอลิเมอรัด้วยความร้อน	20
รูปที่ 3.5	ความเข้มข้นสารละลายยูเรีย (ppm) เทียบกับค่า Refractive Index	21
รูปที่ 3.6	เครื่องแก้วสารแบบต่อเนื่อง และเครื่องวัดค่าการหักเหของแสง	22
รูปที่ 3.7	ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	24
รูปที่ 3.8	เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์	25
รูปที่ 3.9	กล้องจุลทรรศน์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
รูปที่ 4.1	รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า ของพื้นผิวปุ๋ยที่ไม่ผ่านการเคลือบ	29
รูปที่ 4.2	รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า ของพื้นผิวปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ	30
รูปที่ 4.3	ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่	31
รูปที่ 4.4	ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่ (2)	32
รูปที่ 4.5	ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่ (3)	33
รูปที่ 4.6	ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่ (4)	34
รูปที่ 4.7	ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่ (5)	35

รูปที่ 4.8 ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่ (6)	35
รูปที่ 4.9 ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่ (7)	36
รูปที่ 4.10 ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ เมื่อปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบถูกฝังอยู่ในดิน	37
รูปที่ 4.11 รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า ของพื้นผิวปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ (2)	40
รูปที่ 4.12 ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่ (8)	41
รูปที่ 4.13 ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่ (9)	42
รูปที่ 4.14 ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่น เทียบกับเวลาในหน่วยนาที่ (10)	43
รูปที่ 4.15 ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ เมื่อปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบถูกฝังอยู่ในดิน (2)	44
รูปที่ 4.16 สมการ Decomposition ของยูเรีย	44
รูปที่ 4.17 FTIR spectra วัสดุพอลิเมอร์	45
รูปที่ 4.18 TGA thermogram วัสดุพอลิเมอร์	49
รูปที่ 4.19 รูปถ่ายกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า ของผิวเคลือบพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว	53



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญแผนภาพ

แผนภาพ

หน้า

แผนภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการผลิต การทดสอบ และการวิเคราะห์คุณสมบัติของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ 22



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนอาหารของประชากรในหลายประเทศมีอัตราเพิ่มสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มที่จะขยายวงกว้างมากขึ้นในอนาคต ซึ่งเป็นผลจากการขยายตัวของเขตอุตสาหกรรมแทนที่เขตเกษตรกรรมและกสิกรรม ผ่นวกกับปัญหาสภาพภูมิอากาศที่แปรปรวน ฝนไม่ตกตามฤดูกาล อุทกภัยที่รุนแรง และอุณหภูมิของโลกที่สูงขึ้น ทำให้ไม่สามารถเพาะปลูกพืชได้ตามฤดูกาล และธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชในดินยังถูกทำลายอีกด้วย ดังนั้นการเพาะปลูกพืชในปัจจุบันจำเป็นต้องพึ่งพาเทคโนโลยีทางการเกษตร ได้แก่ ระบบชลประทานที่ทันสมัย การวางแผนการเพาะปลูกที่มีแบบแผนและเหมาะสม รวมถึงการใส่ธาตุอาหาร (ปุ๋ย) ที่จำเป็นต่อพืช ซึ่งมีทั้งชนิดที่เป็นปุ๋ยธรรมชาติและปุ๋ยเคมี ทั้งนี้มักนิยมใช้ปุ๋ยเคมีเนื่องจากมีแร่ธาตุมากกว่า แต่มีข้อเสียคือ ราคาแพงและมักก่อให้เกิดปัญหาดินเปลี่ยนแปลงสภาพ

การพัฒนาปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled-release fertilizer) ที่สามารถทยอยปลดปล่อยธาตุอาหารให้พืชด้วยปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตของพืชจึงได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ปุ๋ย ลดการสูญเสียปุ๋ยซึ่งมีราคาแพงไปกับสภาพแวดล้อมและปัจจัยภายนอกอื่นๆ รวมถึงลดความจำเป็นของการเติมปุ๋ยแต่ละครั้งในปริมาณที่มากเกินไปเพื่อให้มั่นใจว่าพืชได้รับธาตุอาหารเพียงพอได้ผลผลิตตามเวลาที่ต้องการ

การวิจัยพัฒนาปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่ผ่านมา มีทั้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสารที่ใช้ผลิต รวมถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเม็ดปุ๋ย โดยนำวัสดุจำพวกอินทรีย์ อนินทรีย์สาร เช่น แร่ดินเหนียว กำมะถัน แป้ง ไลโคซาน พอลิโพรไพลีน พอลิซัลโฟน และพอลิอะคริลิกแอซิด โคอะคริลาไมด์ เป็นต้น มาปิดคลุมเม็ดปุ๋ย ปุ๋ยที่พัฒนาขึ้นเหล่านี้จะมีความแข็งแรง ความคงทน และความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีผลิตและชนิดของวัสดุที่เลือกใช้ อย่างไรก็ตาม วัสดุพอลิเมอร์โดยทั่วไปจะให้คุณภาพของผิวเคลือบที่ดีกว่าวัสดุชนิดอนินทรีย์ งานวิจัยนี้เล็งเห็นประโยชน์การใช้พอลิเมอร์เป็นสารเคลือบผิวสำหรับพัฒนาปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย โดยพอลิเมอร์ที่สนใจคือพอลิแลกติกแอซิด ทั้งในรูปแบบของไฮโมพอลิเมอร์ โคพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากพอลิเมอร์ดังกล่าวสังเคราะห์จากกรดแลกติกที่ผลิตจากกระบวนการหมักบ่มแป้งและน้ำตาลด้วยจุลินทรีย์ และสามารถย่อยสลายได้ จึงจัดเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยมุ่งเน้นเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ปริมาณ ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นสารเคลือบผิว รวมถึงกระบวนการเตรียมต่อคุณภาพของผิวเคลือบ และประสิทธิภาพการปลดปล่อยของปุ๋ย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย โดยการเคลือบปุ๋ยยูเรีย ด้วยพอลิแลกติกแอซิดทั้งในรูปแบบของไฮโมพอลิเมอร์ โคพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ผสม
2. ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารเคลือบต่อสมบัติการแพร่ของยูเรีย
3. ศึกษาอิทธิพลของวิธีการเตรียมต่อประสิทธิภาพการปลดปล่อยของยูเรีย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

สามารถผลิตปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยยูเรียที่สามารถใช้งานได้จริง

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช (Nutrient)

พืชจำเป็นต้องได้รับแร่ธาตุในปริมาณและสัดส่วนที่เหมาะสมในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต โดยมีแร่ธาตุจำนวน 16 ชนิด (จากทั้งหมด 90 ธาตุ) ที่จำเป็นต่อพืช ซึ่งจำแนกเป็น 2 กลุ่มคือ แร่ธาตุหลัก (Macronutrient) จำนวน 9 ชนิด และแร่ธาตุเสริม (Micronutrient) จำนวน 7 ชนิด [1-2]

2.1.1 แร่ธาตุหลัก (Macronutrient)

แร่ธาตุหลักมีความจำเป็นอย่างมากในการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่

- ธาตุที่มีอยู่ในอากาศ คือ ไฮโดรเจน (H^+) ออกซิเจน (O_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)
- ธาตุที่มีอยู่ในดิน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

กลุ่ม 1 ประกอบด้วย ไนโตรเจน (NH_4^+ , NO_3^-) ฟอสฟอรัส ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}) และโพแทสเซียม (K^+) ซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่ไม่พอเพียงกับความต้องการของพืชที่ปลูก จึงต้องใส่ปุ๋ยเพิ่มเติม

กลุ่ม 2 ประกอบด้วย แคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และกำมะถัน (SO_4^{2-}) ซึ่งในดินมีธาตุดังกล่าวมากพอกับความต้องการของพืชอยู่แล้ว

2.1.2 แร่ธาตุเสริม (Micronutrient)

แร่ธาตุเสริมนี้ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ เหล็ก (Fe^{2+} , Fe^{3+}) แมงกานีส (Mn^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) โบรอน ($H_2BO_3^-$, $B(OH)_4^{2-}$) โมลิบดีนัม (MoO_4^{2-}) คลอรีน (Cl) และสังกะสี (Zn^{2+})

ธาตุอาหารในดินจะอยู่ในรูปแบบต่างๆ ดังนี้ [3]

1. ธาตุอาหารที่ละลายอยู่ในน้ำซึ่งแทรกตัวอยู่ในดิน ทั้งนี้พืชสามารถนำมาใช้งานได้ที่ทันที
2. ธาตุอาหารที่ปะปนกับดินในรูปของอนุภาค โดยพืชสามารถนำมาใช้งานได้ ก็ต่อเมื่อธาตุอาหารชนิดดังกล่าวละลายน้ำ หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพทางประจุไฟฟ้า
3. ธาตุอาหารที่ปะปนกับดินในรูปของอนุภาคผลึก ซึ่งพืชไม่สามารถนำมาใช้งานได้
4. ธาตุอาหารที่เกิดจากแบคทีเรีย โดยพืชสามารถนำมาใช้งานได้ ก็ต่อเมื่อธาตุอาหารชนิดดังกล่าวละลายน้ำ หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพทางประจุไฟฟ้า

2.2 การสูญเสียธาตุอาหารที่อยู่ในดิน

ธาตุอาหารที่อยู่ในดินสามารถสูญเสียได้จากกระบวนการต่างๆ ดังนี้ [3]

1. ถูกชะไปกับน้ำ
2. เปลี่ยนแปลงสถานะ อันเนื่องมาจาก
 - Fixation ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมี (ไม่ใช่ความร้อนร่วมในกระบวนการ) ที่เปลี่ยนธาตุอาหารจากสถานะแก๊สที่ละลายน้ำหรือสามารถเปลี่ยนสภาพทางประจุไฟฟ้าได้ ให้กลายเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำหรือไม่สามารถแลกเปลี่ยนสภาพทางประจุไฟฟ้าได้ [4]
 - การระเหิด เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของธาตุอาหารจากของแข็งเป็นแก๊ส เช่น กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ที่เป็นกระบวนการรีดิวซ์ไนเตรตให้อยู่ในรูปแก๊สไนโตรเจน
 - การถูกเผาไหม้ อุณหภูมิของการเผาไหม้อันเนื่องจากไฟป่าหรือเตรียมหน้าดิน จะทำลายธาตุอาหารและแบคทีเรียที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช
 - การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของธาตุเนื่องจากค่า pH ของดิน เช่น ฟอสฟอรัสเปลี่ยนเป็นสารผสมที่ไม่ละลายน้ำเมื่อดินที่มีค่า pH สูง
3. การกักเซาะของอากาศ ทำให้น้ำดินเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ
4. การสูญเสียที่มาจากมนุษย์และสัตว์ที่ทำการขุด ขนย้าย และเปลี่ยนแปลงด้วยสารเคมีต่างๆ

2.3 ปุ๋ย (Fertilizer)

ปุ๋ย หมายถึง สารหรือสิ่งที่ใส่ลงไปในดินเพื่อให้ธาตุอาหารแก่พืชโดยเฉพาะไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการ ส่งเสริมให้พืชเจริญเติบโตงอกงามดีและให้ผลผลิตสูงขึ้น โดยทั่วไปปุ๋ยแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยเคมี (ปุ๋ยวิทยาศาสตร์) ปุ๋ยอินทรีย์ได้จากการหมักซากพืช ซากสัตว์ และขยะเหลือทิ้งที่เป็นวัสดุตามธรรมชาติ แม้ว่าธาตุอาหารของพืชในปุ๋ยอินทรีย์จะน้อยกว่าปุ๋ยเคมี แต่ปุ๋ยอินทรีย์จะช่วยปรับปรุงดินให้โปร่งและร่วนซุยมากยิ่งขึ้น อีกทั้งไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมต่างจากปุ๋ยเคมี ที่สังเคราะห์จากแร่ธาตุต่างๆ หรือเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด ซึ่งไม่มีสมบัติปรับปรุงดินให้โปร่งและร่วนซุย นอกจากนี้หากใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณมากและติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน จะทำให้ดินเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็นกรด-เบส ส่งผลเสียต่อผลผลิตและต้นพืช [1, 3]

2.3.1 ปุ๋ยอินทรีย์ (Organic Fertilizer)

ปุ๋ยที่ได้จากการเปลี่ยนสภาพอินทรีย์สารต่างๆ ด้วยกรรมวิธีทางชีวภาพ ปุ๋ยอินทรีย์มีอยู่ 3 ประเภทคือ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยพืชสด

- ปุ๋ยคอก นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในบรรดาสวนผักและสวนผลไม้ โดยทั่วไปมีปริมาณธาตุอาหารค่านั่นคือไนโตรเจน (N) 0.5% ฟอสฟอรัส (P_2O_5) 0.25% และโพแทสเซียม (K_2O) 0.5% โดยประมาณ ปุ๋ยคอกใหม่ๆ จะมีปริมาณธาตุอาหารสูงกว่าปุ๋ยคอกที่เก็บไว้เป็นเวลานาน เนื่องจากธาตุอาหารที่ละลายง่ายจะถูกชะล้างออกไปหรือเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สสูญหายไป ดังนั้นจำเป็นต้องเก็บรักษาปุ๋ยคอกก่อนใช้งานอย่างระมัดระวัง เพื่อคงคุณภาพของปุ๋ยคอกไว้

- ปุ๋ยหมัก ได้จากการหมักเศษพืชต่างๆ เช่น หญ้าแห้ง ใบไม้ ฟางข้าว ให้เน่าเปื่อยก่อนนำไปใส่ลงในดินเพื่อผสมผลิติดอกมาเป็นปุ๋ย นิยมใช้กับพืชผักสวนครัวและไม้ดอกไม้ประดับต่างๆ

- ปุ๋ยพืชสด ได้จากการไถกลบพืชบำรุงดินตระกูลถั่วต่างๆ

2.3.2 ปุ๋ยเคมี (ปุ๋ยวิทยาศาสตร์)

ปุ๋ยที่ได้จากการผลิตหรือสังเคราะห์ทางอุตสาหกรรมจากแร่ธาตุต่างๆตามธรรมชาติ หรือเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ของโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด ปุ๋ยเคมีมีอยู่ 2 ประเภทคือ ปุ๋ยเดี่ยว (แม่ปุ๋ย) และปุ๋ยผสม

- ปุ๋ยเดี่ยว เป็นสารประกอบทางเคมี ที่มี N, P และ K เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยหนึ่งหรือสองธาตุ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบที่ผลิตเป็นแม่ปุ๋ยนั้นๆ เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต (N = 20%) ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (N : P = 13% : 46%) และปุ๋ยยูเรีย (N = 47%) เป็นต้น

- ปุ๋ยผสม ได้จากการผสมของปุ๋ยเดี่ยวหลายชนิด เพื่อให้มีปริมาณและสัดส่วนของธาตุอาหาร N, P และ K ตามที่ต้องการ

2.3.3 ปุ๋ยไนโตรเจน (N)

โดยปกติธาตุไนโตรเจนมีอยู่ในอากาศ แต่ทว่าพืชไม่สามารถนำแก๊สไนโตรเจนมาใช้ประโยชน์ได้ (ยกเว้นพืชตระกูลถั่วที่มีระบบรากพิเศษ) ธาตุไนโตรเจนในดินที่พืชนำมาใช้ประโยชน์ได้อยู่ในรูปของสารประกอบ เช่น แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และไนเตรตไอออน (NO_3^-) ที่เกิดจากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุในดิน หรือปุ๋ยที่เติมลงไป เช่น แอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) โซเดียมไนเตรต (NaNO_3) แอมโมเนียมฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$) แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) และยูเรีย ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) เป็นต้น

ธาตุไนโตรเจนจะช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ถ้าได้รับในปริมาณไม่เพียงพอต้นจะแคระแกร็น โตช้า ใบเหลือง ออกดอกออกผลช้า และผลผลิตไม่สมบูรณ์

2.3.4 ปุ๋ยฟอสฟอรัส (P)

ธาตุฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ต้องอยู่ในรูปฟอสเฟตไอออน (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) ที่ละลายน้ำ

ธาตุฟอสฟอรัสจะช่วยเร่งการเจริญเติบโตของต้นพืช ถ้าได้รับในปริมาณไม่เหมาะสมต้นจะแคระแกร็น ใบจะมีสีเขียวคล้ำจนถึงม่วง ส่วนรากจะหยุดการเจริญเติบโต ไม่ออกดอกและผล

2.3.5 ปุ๋ยโพแทสเซียม (K)

ธาตุโพแทสเซียมที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ต้องอยู่ในรูปของโพแทสเซียมไอออน (K^+) เท่านั้น

ธาตุโพแทสเซียมจะช่วยในการสร้างแป้งและน้ำตาลของพืช หากพืชขาดธาตุโพแทสเซียมไปผลจะลีบไม่หวาน และอาจถึงกับไม่ออกผล

2.4 ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled-release fertilizer)

ปุ๋ยที่ผลิตขึ้นเพื่อสามารถทยอยปลดปล่อยธาตุอาหารด้วยเวลาและปริมาณที่กำหนดไว้ ช่วยลดการสูญเสียปุ๋ยที่อาจถูกชะไปกับน้ำหรือเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส [5] ลดปัญหาดินเปลี่ยนสภาพความเป็นกรด-เบส เนื่องจากการใส่ปุ๋ยปริมาณมากเกินไป และลดปัญหาการดูดความชื้นของเมล็ดปุ๋ย การพัฒนาปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยในงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถจำแนกตามกระบวนการผลิตได้ ดังนี้

- **เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสารที่ใช้เป็นปุ๋ย**

เปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีให้ปุ๋ยละลายน้ำได้ช้าลง หรือจำเป็นต้องเกิดปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยา Hydrolysis ก่อนจึงสามารถละลายน้ำได้ ตัวอย่างเช่น ปุ๋ยแมกแอมป์ [$MgNH_4PO_4 \cdot nH_2O$ ($n=1, 6$)] ปุ๋ย Urea-Z (ผลิตจากยูเรียและเอซีทิลไฮดรอกไซด์) และปุ๋ย Ureaform (ผลิตจากยูเรียและฟอร์มัลดีไฮด์) ที่ใช้สำหรับควบคุมการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน เป็นต้น

- **เปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเม็ดปุ๋ย**

- การเคลือบเม็ดปุ๋ย เช่น โดยฉีดพ่นสารเคลือบผิวลงบนผิวของเม็ดปุ๋ย หรือจุ่มแช่เม็ดปุ๋ยลงในสารละลายเคลือบผิวก่อนทำให้สารเคลือบผิวแข็งตัวด้วยการไล่ตัวทำละลายออก

- การห่อหุ้มเม็ดปุ๋ย เช่น โดยให้มอนอเมอร์ของสารเคลือบผิวเกิดกระบวนการเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ห่อหุ้มผิวของเม็ดปุ๋ยที่ใช้เป็นแกนกลาง

- การอัดเป็นเม็ดหรือแท่งขนาดใหญ่ เช่น โดยนำสารละลายปุ๋ยหรือผงปุ๋ยขนาดเล็กละเอียดผสมกับสารเติมแต่งต่างๆ ก่อนอัดสารผสมปุ๋ยลงในแม่พิมพ์ร้อน หรืออัดรีดสารผสมปุ๋ยด้วยเครื่องรีดเกลียวหนอน (Extruder)

2.4.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

2.4.1.1 วัสดุธรรมชาติ ซึ่งจะแบ่งย่อยออกเป็น

- อินทรีย์สาร (Inorganic) อาทิเช่น ดินเหนียว หินฟอสเฟต กำมะถัน ดินขาว และไมก้า เป็นต้น [6-7]

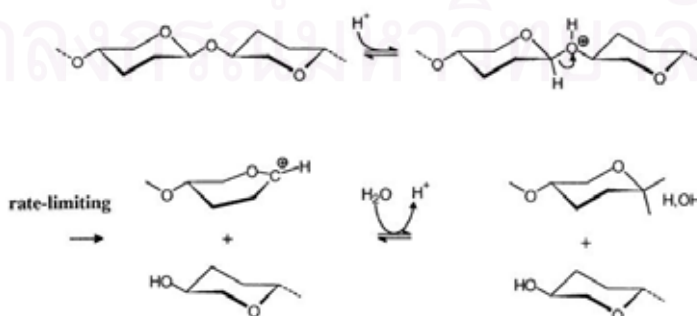
- อินทรีย์สาร (Organic) อาทิเช่น แป้ง ยางมะตอย พาราฟิน ซี้ผึ้ง และชันสน เป็นต้น [8]

2.4.1.2 วัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์ อาทิเช่น พอลิเอทิลีน [5] พอลิโพรไพลีน พอลิซัลโฟน และ พอลิอะคริลิกแอซิด โคอะคริลาไมด์ [9] เป็นต้น

2.4.2 กระบวนการปลดปล่อยของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆคือ

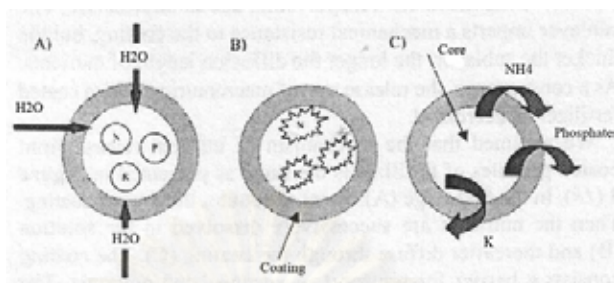
2.4.2.1 ผิวเคลือบของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดรูพรุนและรอยแตกของผิวเคลือบขึ้น ทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าไปละลายปุ๋ยที่อยู่ภายในผิวเคลือบออกมาได้ เช่น ไคโตซานที่สามารถเกิด Hydrolysis ได้ (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 : กระบวนการการ Hydrolysis ของไคโตซาน [10]

(หมายเหตุ : ในรูปได้ตัด Functional group ในตำแหน่งที่ 2, 3 และ 5 ออก)

2.4.2.2 ผิวเคลือบมีรูปพุนขนาดเล็กลอยอยู่โดยรอบเม็ดปุ๋ยแล้วตั้งแต่แรกซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิต ทำให้ควบคุมปริมาณน้ำที่จะแทรกผ่านเข้ามาภายในให้ลดปริมาณลง ทำให้ปริมาณปุ๋ยที่จะสูญเสียต่อการรดน้ำในหนึ่งครั้งลดลง และจะได้ปริมาณปุ๋ยที่ถูกปลดปล่อยออกมาต่อครั้งด้วยปริมาณที่คงที่ [11]



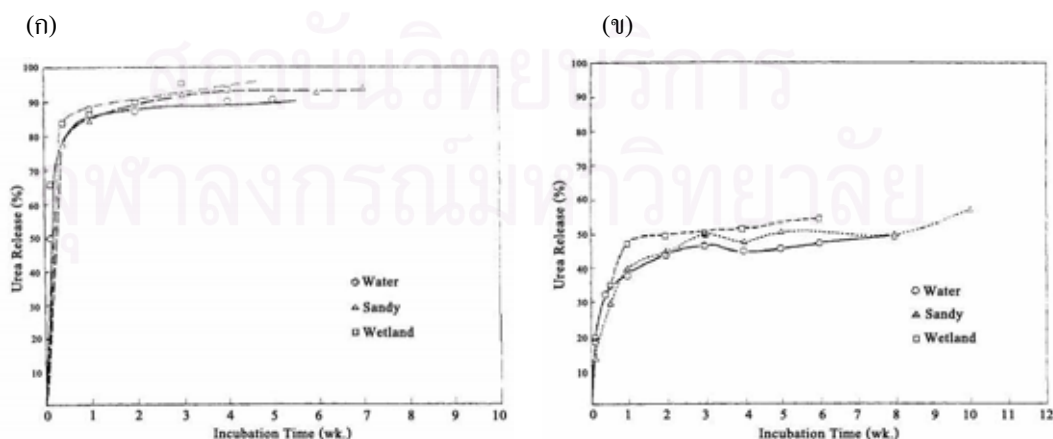
รูปที่ 2.2 : กลไกการปลดปล่อยธาตุอาหารของเม็ดปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่เคลือบผิวด้วยพอลิซัลโฟน

2.4.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อย

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยจะมีความแข็งแรง ความคงทน และความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้กรรมวิธีการผลิต วัสดุสำหรับเคลือบผิว ห่อหุ้มหรือเติมแต่ง นอกจากนี้ สภาพภูมิประเทศและอากาศของแต่ละพื้นที่ยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารอีกด้วย โดยอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าว จะกล่าวไว้ในหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

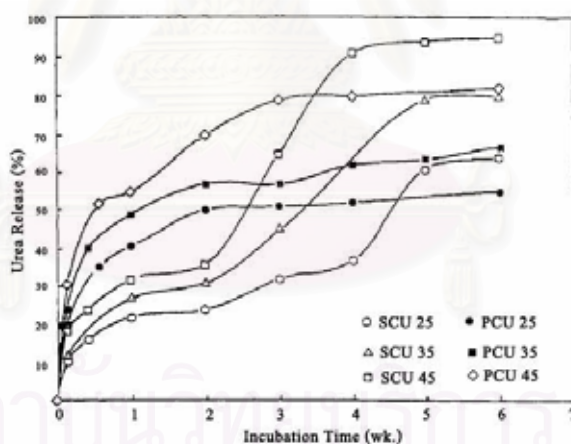
Salman และคณะ [5] ศึกษาการเคลือบปุ๋ยยูเรีย โดยการฉีดพ่นสารละลายพอลิเอทิลีนลงบนผิวของเม็ดปุ๋ย พบว่าเมื่อพ่นสารเคลือบความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก เป็นจำนวน 1 และ 2 ครั้ง จะได้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่มีร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย (% Coated material) เท่ากับ 2.78% และ 6.59% ตามลำดับ จากผลการติดตามปริมาณธาตุไนโตรเจนที่แพร่จากเม็ดปุ๋ยสู่ตัวกลางที่เป็นดินร่วน (ความชื้น 40%) ดินทราย (ความชื้น 15%) และน้ำกลั่น ดังรูปที่ 2.3 ก-ข



รูปที่ 2.3 : ร้อยละการแพร่ของธาตุไนโตรเจนผ่านผิวเคลือบพอลิเอทิลีน ที่มีร้อยละสารเคลือบผิวเป็น (ก) 2.78% และ (ข) 6.59% ที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส ในตัวกลางดินร่วน (□) ดินทราย (Δ) และน้ำกลั่น (○) เทียบกับเวลาในหน่วยสัปดาห์

แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่มีร้อยละสารเคลือบ 2.78% และ 6.59% มีอัตราเร็วในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนสู่ตัวกลางทั้งสามสูงมากในช่วงสัปดาห์แรก และลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อผ่านช่วงเวลาดังกล่าวไป แต่ทั้งนี้ ปุ๋ยที่มีร้อยละสารเคลือบ 6.59% จะยังมีปริมาณยูเรียคงเหลืออยู่มากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งมากกว่าปุ๋ยที่มีร้อยละสารเคลือบ 2.78% ซึ่งเหลือปริมาณยูเรียอยู่เพียงร้อยละ 15 - 20 โดยประมาณ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากชั้นผิวเคลือบที่มีร้อยละสารเคลือบสูง จะมีปริมาณรูพรุนบนผิวเคลือบน้อย และมีความสมบูรณ์ของชั้นผิวเคลือบมากกว่าชั้นผิวเคลือบที่มีร้อยละสารเคลือบต่ำ

งานวิจัยดังกล่าวยังศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีน (ที่ผลิตในงานวิจัย เลือกร้อยละสารเคลือบ 6.59%) เปรียบเทียบกับปุ๋ยที่เคลือบด้วยกำมะถัน (ปุ๋ยทางการค้าได้รับจาก Tennessee valley authority มีร้อยละสารเคลือบ 22.2%) ในตัวกลางดินร่วน (รูปที่ 2.4) ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แม้ปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนจะมีปริมาณร้อยละสารเคลือบน้อยกว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยกำมะถัน ก็สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ในอัตราที่ใกล้เคียงกัน โดยช่วงสามสัปดาห์แรกอัตราเร็วในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนสู่ตัวกลางของปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนจะสูงกว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยกำมะถัน แต่หลังจากสัปดาห์ที่สี่ไป จะพบว่าอัตราเร็วในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนสู่ตัวกลางของปุ๋ยที่เคลือบด้วยกำมะถันจะเพิ่มสูงขึ้น และสูงกว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนเมื่อผ่านช่วงเวลาดังกล่าวไป โดยคณะวิจัยได้อธิบายว่าเป็นผลจากการที่แบคทีเรียในดินทำการย่อยสลายผิวเคลือบกำมะถัน ทำให้เกิดรูพรุนบนผิวเคลือบมากขึ้น ต่างจากผิวเคลือบพอลิเอทิลีนที่แบคทีเรียไม่สามารถทำการย่อยสลายได้



รูปที่ 2.4 : ร้อยละการแพร่ของธาตุไนโตรเจนผ่านผิวเคลือบพอลิเอทิลีน ที่มีร้อยละสารเคลือบผิวเป็น 6.59% อุณหภูมิ 25 (●), 35 (■), 45 (◇) องศาเซลเซียส และผิวเคลือบกำมะถัน ที่มีร้อยละสารเคลือบผิวเป็น 22.2% อุณหภูมิ 25 (○), 35 (△), 45 (□) องศาเซลเซียส ในตัวกลางที่เป็นดินร่วน เทียบกับเวลาในหน่วยสัปดาห์

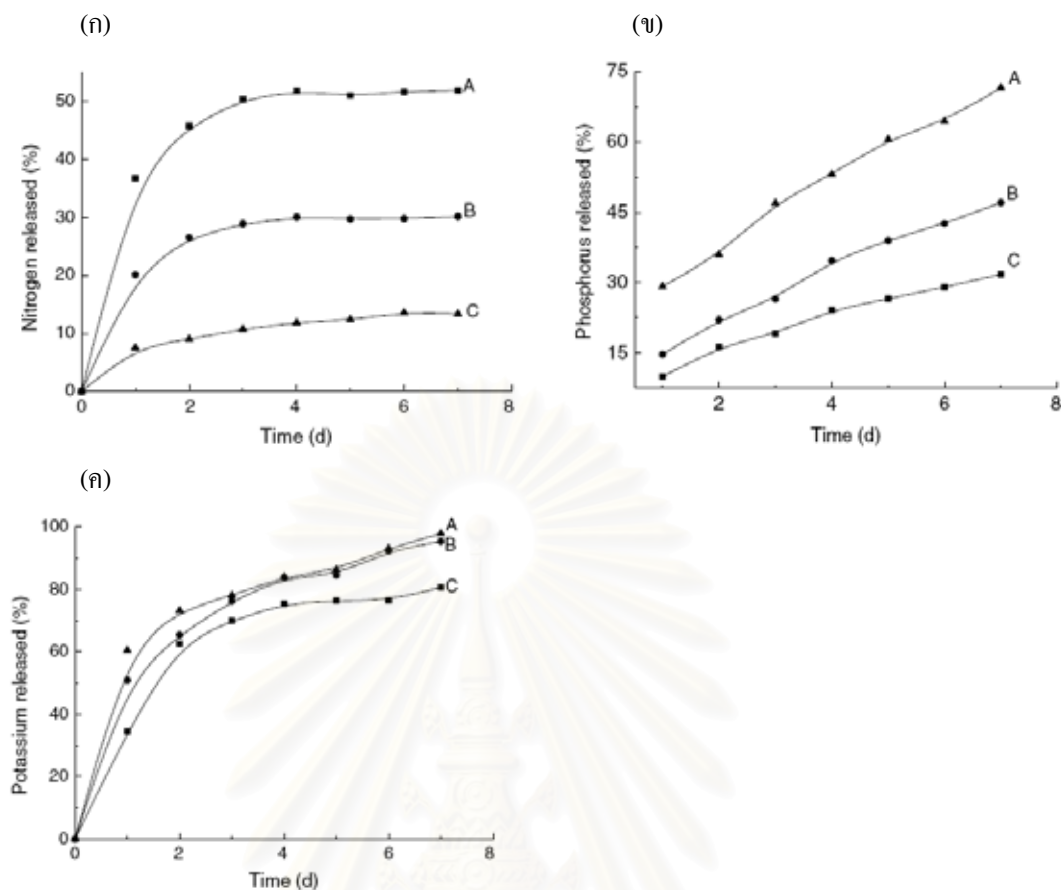
นอกจากนี้ผลการทดลองในรูปที่ 2.3 - 2.4 ยังแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของสภาวะแวดล้อมต่อความสามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย อันได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ และชนิดของตัวกลาง โดยรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าในตัวกลางที่เป็นดินร่วนปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยจะมีอัตราเร็วในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนสูงกว่าในตัวกลางที่เป็นดินทราย ทั้งนี้เนื่องมาจากดินร่วนมีค่าความชื้นสูงกว่าดินทราย จึงมีไอน้ำที่สามารถแทรกผ่านผิวเคลือบเข้าไปถึงเอาธาตุไนโตรเจนออกมาได้มากกว่า ประกอบกับสภาพ-

ตัวกลางดินร่วนที่มีความสามารถในการซึมน้ำสูงกว่าดินทราย ทำให้มีปริมาณน้ำตกค้างเพื่อตั้งธาตุไนโตรเจน ออกมามากกว่าอีกด้วย ส่วนในตัวกลางน้ำกลั่นที่ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยมีอัตราเร็วในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนต่ำกว่าในตัวกลางดินร่วนและดินทรายนั่น เป็นเพราะว่าในดินมีอากาศ แבקที่เรีย และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็คตรอนระหว่างอนุภาคได้ ซึ่งสิ่งที่ได้กล่าวมาจะช่วยส่งเสริมการสลายตัวของยูเรียไปเป็นธาตุไนโตรเจนให้เร็วขึ้น ทำให้อัตราเร็วในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนสู่ตัวกลางที่เป็นดินสูงกว่าตัวกลางที่เป็นน้ำ ส่วนรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าอัตราเร็วในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยทั้งสองชนิดสู่ตัวกลางดินร่วนจะเพิ่มสูงขึ้น ตามสภาพอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิจะช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายผิวเคลือบของแบคทีเรียในดิน และช่วยส่งเสริมการสลายตัวของยูเรียไปเป็นธาตุไนโตรเจนให้เร็วขึ้น

Hampichanchai [12] ศึกษาการเคลือบปุ๋ย NPK โดยฉีดพ่นสารละลายไคโตรซานความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนักลงบนเม็ดปุ๋ย พบว่าปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่ได้ มีความสามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารใกล้เคียงกับปุ๋ย NPK ที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ทั้งนี้ผู้วิจัยเชื่อว่ากรดเอซิดิก (เป็นตัวทำละลายไคโตรซาน) ได้ละลายผิวหุ้มเดิมของเม็ดปุ๋ย NPK ที่มีความทนทานต่อการแทรกผ่านของน้ำเช่นเดียวกับไคโตรซานออกไป โดยอ้างอิงจากผลของการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ระหว่างปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไคโตรซาน ในตัวกลางน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพบว่าปริมาณธาตุทั้งสามในปุ๋ยที่ไม่ผ่านการเคลือบจะคงเหลืออยู่มากกว่าปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไคโตรซาน ในทุกหน่วยเวลาที่ทำการเปรียบเทียบภายในเวลา 15 นาทีนับตั้งแต่เริ่มการทดสอบ และเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไคโตรซาน ปริมาณสารละลายที่ใช้พ่นเคลือบ และเลือกใช้ไคโตรซานที่มีค่า degree of deacetylation น้อยลง จะสามารถปรับปรุงการควบคุมธาตุอาหารให้ดีขึ้นได้

Liang และคณะ [9] ศึกษาการห่อหุ้มปุ๋ย NPK ด้วยสารผสมพอลิอะคริลิกแอซิด โคออะคริลาไมด์และดินขาว โดยใช้กระบวนการ Inversion suspension polymerization ในการห่อหุ้ม พบว่าอัตราเร็วในการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม สู่ตัวกลางน้ำกลั่นจะมีค่าสูงมากขึ้น เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในการทดสอบให้สูงขึ้น ตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ 7 วัน (รูปที่ 2.5) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสภาพแวดล้อมมีอุณหภูมิสูง ผิวเคลือบผสมส่วนดินขาวจะถูกเร่งให้เสื่อมสภาพ เกิดเป็นรูพรุนและรอยแตกบนผิวเคลือบ นอกจากนั้น อุณหภูมิยังช่วยส่งเสริมการสลายตัวของธาตุอาหารให้เข้ากับน้ำมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

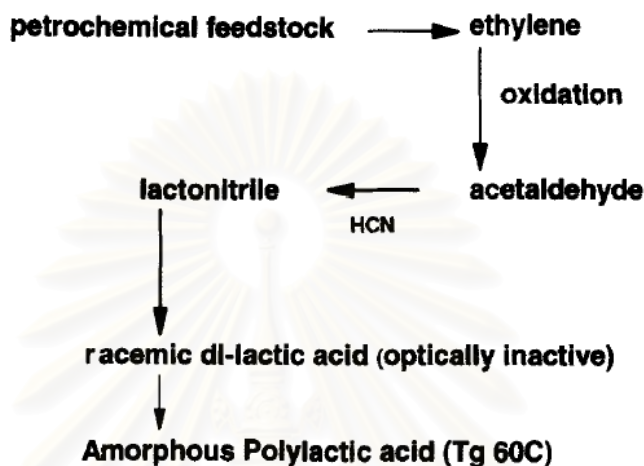


รูปที่ 2.5 : ร้อยละการแพร่ของ (ก) ธาตุไนโตรเจน (ข) ฟอสฟอรัส และ (ค) โพแทสเซียม ผ่านผิวเคลือบผสมพอลิอะคริลิกแอซิดโคอะคริลาไมด์และดินขาว ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 35 (A), 20 (B) และ 5 (C) องศาเซลเซียส

Otey และคณะ [13] ศึกษาการอัดเม็ดปุ๋ยยูเรีย ด้วยการผสมปุ๋ยเข้ากับน้ำแป้งเข้มข้น โดยใช้สัดส่วนแป้งต่อปุ๋ยยูเรีย 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 และ 40:60 ก่อนผ่านเข้าเครื่องรีดเกลียวหอนเปลี่ยนสภาพแป้งให้กลายเป็นเจลใสห่อหุ้มเม็ดปุ๋ย เมื่อนำปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่ได้ไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จะพบว่าปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่มีสัดส่วนแป้งต่อปุ๋ยยูเรียสูง จะมีปริมาณยูเรียคงเหลือ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์) มากกว่าปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่มีสัดส่วนแป้งต่อปุ๋ยยูเรียต่ำ เนื่องจากแป้งจะช่วยอุดซับป้องกันไม่ให้น้ำแทรกผ่านเข้ามาละลายปุ๋ยได้โดยง่าย

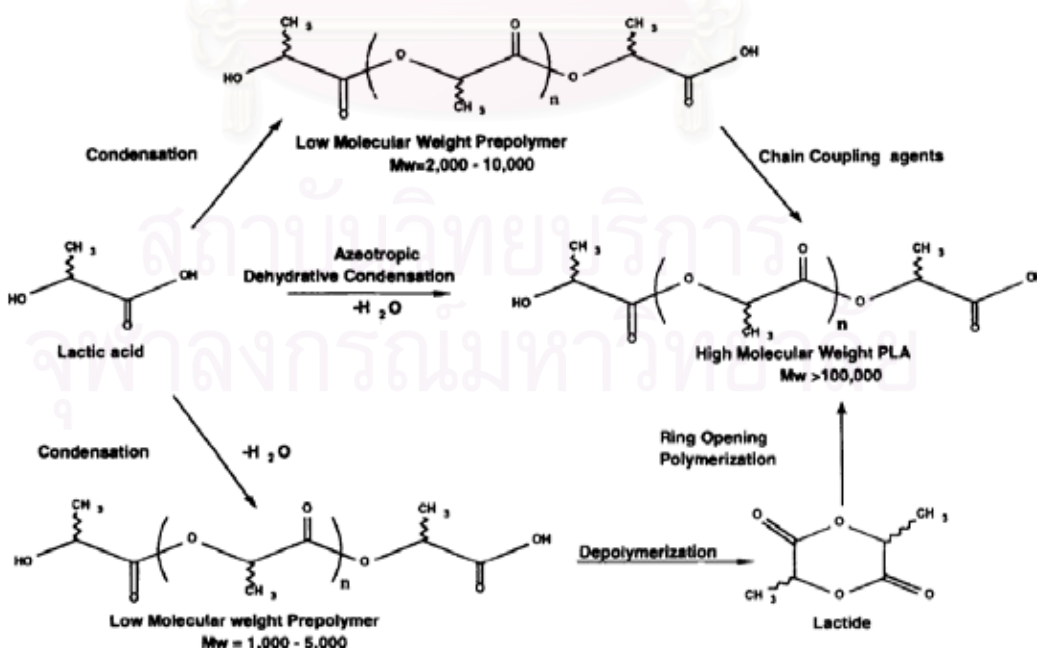
2.6 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid)

พัฒนาขึ้นโดยนักวิจัย Carothers ในปี ค.ศ. 1932 ด้วยกระบวนการสังเคราะห์จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (รูปที่ 2.6) และได้จดสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1954 ในนามของบริษัท DuPont ซึ่งในเวลานั้นถือว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงมากที่สุดในกลุ่มพอลิเมอร์ที่สามารถเชื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยา Hydrolysis แต่ด้วยเหตุผลด้านต้นทุนการผลิต จึงทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้ถูกจำกัดการใช้งานอยู่ในการแพทย์เพียงด้านเดียว



รูปที่ 2.6 : กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด โดยใช้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีเป็นสารตั้งต้น

จนกระทั่งช่วงปี ค.ศ. 1980 การพัฒนาจุลินทรีย์เฉพาะทาง (*Lactobacillus brevis*) ซึ่งมีความสามารถย่อยสลายโมเลกุลของแป้งและน้ำตาลให้กลายเป็นกรดแลคติก ($C_3H_5O_3$) ถูกนำมาใช้พัฒนาพอลิแลคติกแอซิดในเชิงการค้า ด้วยกระบวนการการสังเคราะห์ที่ใช้กรดแลคติกเป็นสารตั้งต้น ดังนี้ (รูปที่ 2.7) [14]



รูปที่ 2.7 : กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด โดยใช้กรดแลคติกเป็นสารตั้งต้น

- กระบวนการ Azeotropic dehydrative condensation

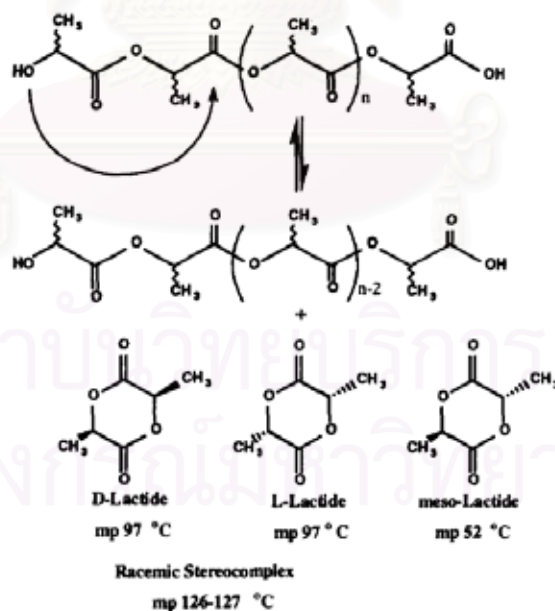
เป็นกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน โดยทำการเติมสาร Entrainer เข้าไปเพื่อป้องกันการผันกลับของปฏิกิริยา แต่มีข้อเสียคือจะสูญเสียพลังงานจำนวนมากในการสังเคราะห์ และสาร Entrainer ที่ใช้เป็นสารพิษ ทำให้พอลิเมอร์ไม่สามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์บรรจอาหาร หรือใช้ในทางการแพทย์ได้

- กระบวนการ Chain linking

เป็นกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน โดยจะทำการสังเคราะห์ให้ได้ แลคติกแอซิดพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลในระดับหนึ่ง ก่อนเติมสาร Chain coupling agents ลงไป เพื่อให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น

- กระบวนการเปิดวงแหวน (Ring-opening polymerization)

เป็นกระบวนการที่จะใช้ปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน สังเคราะห์แลคติกแอซิดพอลิเมอร์ขึ้นมา ก่อนทำการ Depolymerization แลคติกแอซิดพอลิเมอร์ให้เป็นสารประกอบแบบวงแหวนแลคไทด์ (Lactide) หลังจากนั้นนำแลคไทด์มาสังเคราะห์ต่อด้วยกระบวนการเปิดวงแหวนเป็นพอลิแลคติกแอซิด ถือเป็นกระบวนการผลิตที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากไม่เกิดการผันกลับของปฏิกิริยา และสามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ตามต้องการ

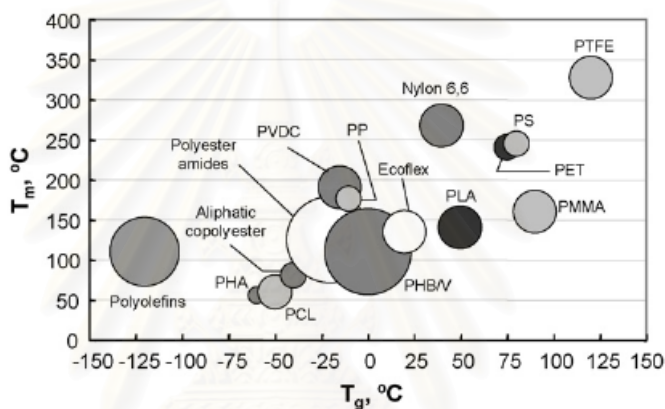


รูปที่ 2.8 : กระบวนการสังเคราะห์สารประกอบแลคไทด์

พอลิแลคติกแอซิด จัดเป็น Biodegradable polymer ที่มีสมบัติด้านต่างๆ ดังนี้ [14-16]

2.6.1 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

- ร้อยละของปริมาณผลึก (Degree of crystallinity) 37 %
- อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) 50-70 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) 170-180 องศาเซลเซียส
- ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) 30-50 เมกะปาสคาล
- โมดูลัสการโค้งงอ (Flexural modulus) 2.4-2.9 จิกะปาสคาล
- ไม่มีการซึมผ่านของน้ำ น้ำมัน และอากาศ
- ในกรณีที่เป็น Amorphous polymer จะมีความใสและความมันวาวสูงกว่า Oriented-Polyethylene terephthalate และ Oriented-Polypropylene

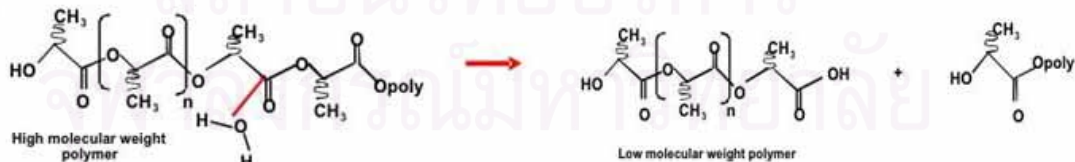


รูปที่ 2.9 : อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิดเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น [17]

2.6.2 การเสื่อมสภาพด้วยจุลชีพ (Biodegradation)

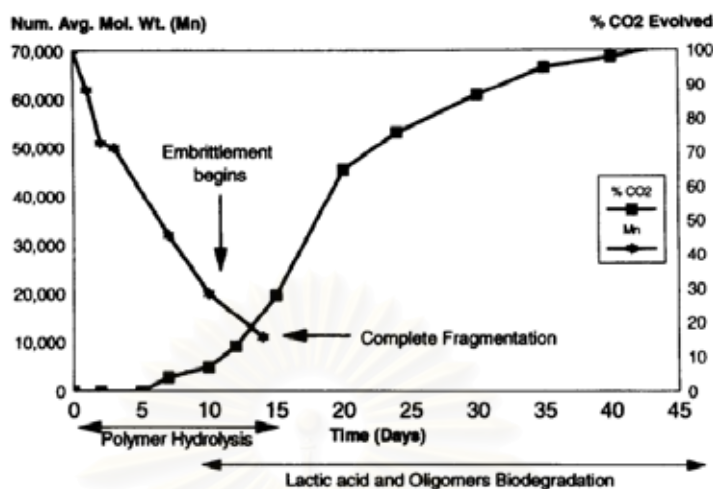
สมบัติเด่นของพอลิแลคติกแอซิดคือ สามารถเกิดการเสื่อมสภาพด้วยจุลชีพได้ด้วยกลไก ดังนี้

- สายโซ่พอลิเมอร์จะถูก Hydrolysis แยกออกเป็นสายโซ่สั้นลงและกรดแลคติก



รูปที่ 2.10 : กระบวนการการ Hydrolysis ของพอลิแลคติกแอซิด

- จุลชีพย่อยสลายโพลิโกลิเมอร์สายสั้นและกรดแลกติกเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ



รูปที่ 2.11 : น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลกติกแอซิด และร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการย่อยสลายโดยจุลชีพ ในน้ำอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เทียบกับเวลา(วัน)

รูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าพอลิแลกติกแอซิด ที่แช่ในน้ำอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เกิดการเสื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยา Hydrolysis กลายเป็นโพลิโกลิเมอร์และกรดแลกติก ภายใน 15 วัน จากนั้นการย่อยสลายโพลิโกลิเมอร์และกรดแลกติกโดยจุลชีพเกิดขึ้นในช่วงวันที่ 5 - 45 จะทำการสลายกรดแลกติกเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทั้งนี้ อัตราการสลายตัวของพอลิแลกติกแอซิดด้วยกระบวนการดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมตามที่ได้แสดงเอาไว้ในตารางที่ 2.1 [14]

ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาการเสื่อมสภาพของพอลิแลกติกแอซิดที่แช่ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature	Onset of fragmentation	Onset of biodegradation
4°C 40°F	64 months	123 months
13°C 55°F	25 months	48 months
25°C 77°F	6 months	11.4 months
30°C 86°F	4.4 months	8.5 months
50°C 122°F	1.5 months	2.9 months
60°C 140°F	8.5 days	16 days
70°C 158°F	1.8 days	3.5 days

*In water.

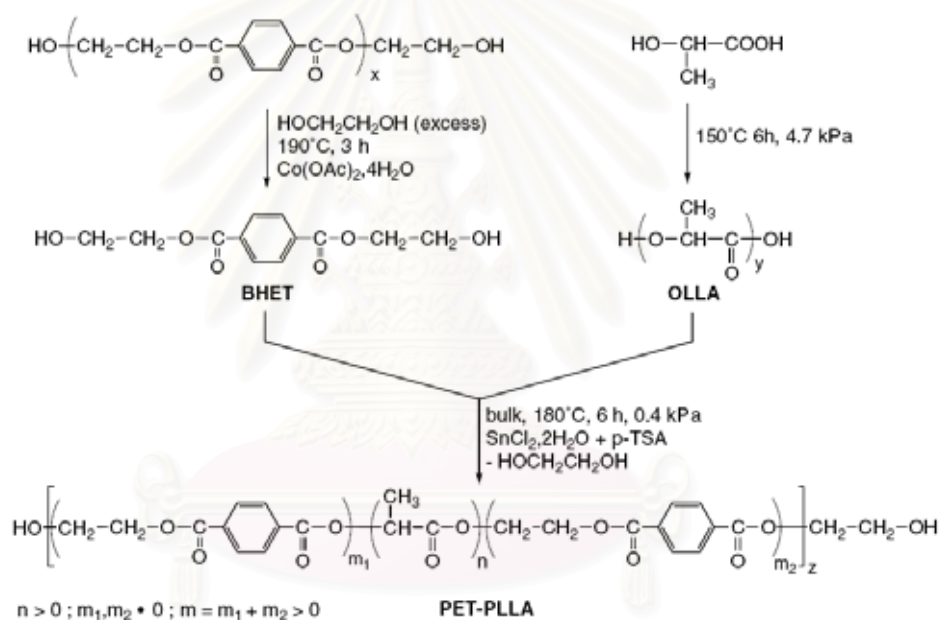
2.6.3 การนำไปใช้ประโยชน์ของพอลิแลกติกแอซิด

พอลิแลกติกแอซิดสามารถผลิตเพื่อเป็นสินค้าวางจำหน่ายได้หลากหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นจานใส่อาหาร แก้วน้ำ ซ้อน ส้อม ถุงหูหิ้ว แผ่นฟิล์มห่ออาหาร แผ่น CD ไปจนถึงวัสดุที่ใช้ในการแพทย์ต่างๆ [14] และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ เช่น การใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวกระดาษเพื่อป้องกันรอยขีดข่วน การนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อเพิ่มความสามารถในด้านการเสื่อมสภาพทางธรรมชาติให้แก่พอลิเมอร์ผสมนั้นๆ

2.7 พอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polylactic acid-co-ethylene terephthalate)

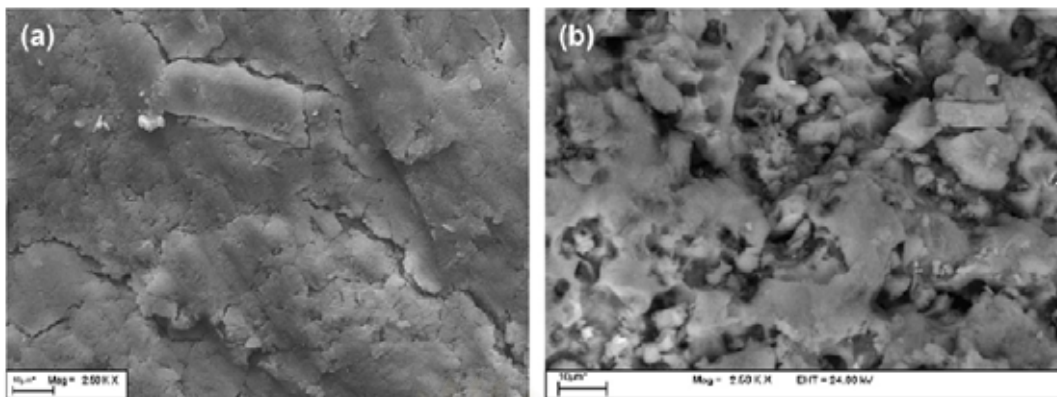
แนวความคิดการพัฒนาพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนเทเรฟทาเลตและแอโรแมติกเอสเทอร์ ผนวกสมบัติด้านการย่อยสลายได้ของเอทิลีนเทเรฟทาเลตเข้ากับสมบัติเชิงกลที่ดีของแอโรแมติกเอสเทอร์กำลังได้รับความสนใจ

Olewnik และคณะ [18] ศึกษาการพัฒนาพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทเรฟทาเลตด้วยปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน โดยใช้สารตั้งต้นระหว่างแลคติกแอซิดโอลิโกเมอร์ และบิส 2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต (ที่ได้จากกระบวนการ Recycle ขวดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต) โดยใช้ดีบุกคลอไรด์และพี-โทลูอินซัลโฟนิกแอซิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิการสังเคราะห์ 180 องศาเซลเซียส (รูปที่ 2.12) พบว่าสัดส่วนระหว่างแลคติกแอซิดโอลิโกเมอร์ ต่อบิส 2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต 80:20, 70:30, 60:40 และ 50:50 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้พอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทเรฟทาเลตแต่ละชนิดมีสมบัติความแข็งแรง และการเชื่อมสภาพด้วยจุลชีพแตกต่างกัน โดยสัดส่วน 70:30 จะแสดงผลความแข็งแรงและการเชื่อมสภาพด้วยจุลชีพเหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุด



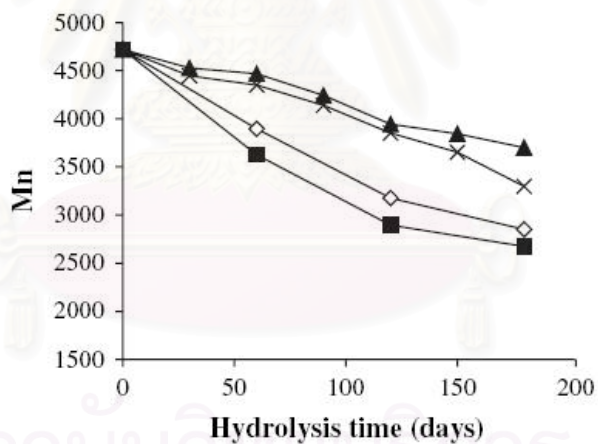
รูปที่ 2.12 : กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทเรฟทาเลต

Olewnik และคณะ [19] ศึกษาสมบัติการเชื่อมสภาพด้วยจุลชีพของพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทเรฟทาเลต (ในขั้นกลไก Hydrolysis) ที่พัฒนาด้วยปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน ระหว่างแลคติกแอซิดโอลิโกเมอร์กับบิส 2-ไฮดรอกซีเอทิลเทเรฟทาเลต ซึ่งพบลักษณะของการเชื่อมสภาพดังรูปที่ 2.13 และ 2.14



รูปที่ 2.13 : รูปถ่าย SEM พื้นผิวพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต (a) ก่อน และ (b) หลังแช่ในสารละลายเกลือของฟอสเฟอรัส (pH 7.40) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 180 วัน [19]

การเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต ขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลาย อุณหภูมิของสภาพแวดล้อม และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา Hydrolysis โดยรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิและค่า pH สูงขึ้น อัตราการสลายตัวของพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลตจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิและสถานะความเป็นเบสจะเร่งกลไกการย่อยสลายแบบ Hydrolysis ในสายโซ่โมเลกุลส่วนพอลิแลคติกแอซิดให้เร็วขึ้น



รูปที่ 2.14 : น้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต เทียบกับเวลาการเกิด Hydrolysis (วัน)

เมื่อ X, ■ แทนสารละลายเกลือของฟอสเฟอรัส (pH 7.40) ที่อุณหภูมิ 45, 60 องศาเซลเซียส

▲, ◇ แทนสารละลายเกลือของฟอสเฟอรัสจากมะนาว (pH 7.35) ที่อุณหภูมิ 45, 60 องศาเซลเซียส[19]

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุ สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ใช้งาน

3.1.1 พอลิเมอร์ (ตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

พอลิเมอร์	รายละเอียด
พอลิแลคติกแอซิด 1 (PLA-1)	สังเคราะห์ขึ้นเองในกลุ่มวิจัยด้วยกระบวนการ Polycondensation ($M_n \sim 8 \times 10^3$, PDI = 1.67)
พอลิแลคติกแอซิด 2 (PLA-2)	สังเคราะห์ขึ้นเองในกลุ่มวิจัยด้วยกระบวนการ Polycondensation ($M_n \sim 2 \times 10^4$, PDI = 1.25)
พอลิแลคติกแอซิด 3 (PLA-3)	สังเคราะห์ขึ้นเองในกลุ่มวิจัยด้วยกระบวนการ Polycondensation ($M_n \sim 3.5 \times 10^4$, PDI = 2.56)
พอลิแลคติกแอซิด ทางการค้า (Com-PLA)	NatureWorks® PLA polymer 4042D
พอลิแลคติกแอซิด โคอโพลิเมอร์เทรฟเทเลต (Copolymer)	สังเคราะห์ขึ้นเองในกลุ่มวิจัย ($\eta_{red} = 0.18$ dl/g)
PLA-3 / EVA Blend	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด 3 กับพอลิเอทิลีน-ไวนิลอะซิเตด
Com-PLA / EVA Blend	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดทางการค้ากับพอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตด
Copolymer / EVA Blend	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด โคอโพลิเมอร์เทรฟเทเลตกับพอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตด

3.1.2 ปุ๋ย

ปุ๋ยยูเรียทางการค้า Areka 46-0-0, Kyoku factory, Thailand

3.1.3 สารเคมี และตัวทำละลาย (ตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.2 สารเคมีและตัวทำละลายที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี / ตัวทำละลาย	รายละเอียด
ยูเรียมาตรฐาน (Urea Standard)	Riedel-de Haen®, 15604 Urea puriss
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	LAB-SCAN®
เฮกเซน (Hexane)	LAB-SCAN®
กรดไตรคลอโรอะซิติก (Trichloroacetic acid)	LAB-SCAN®
ฟีนอล (Phenol)	CARLO ERBA®, Code No. 451287
เมทานอล (Methanol)	ZEN POINT®

3.1.4 เครื่องมือ และอุปกรณ์ใช้งาน (ตารางที่ 3.3)

ตารางที่ 3.3 รายการเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์ใช้งาน	รายละเอียด
เครื่องวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง	ATAGO [®] , NAR-1T liquid
เครื่องแกว่งสารแบบต่อเนื่อง	Heidolph [®] , Rotamax 120
กล้องจุลทรรศน์	Olympus [®] , SZ40
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	JEOL [®] , JSM-6480 LV
ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)	Thermo Electron Corporation [®] , Nicolet 6700
เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA)	METTLER TOLEDO [®] , SDTA 851e
Ubbelohde Viscometer	Cannon Instrument Co., Viscometer No. 50B553
Brookfield Viscometer	SA [®] , Model RVT, Serial 111588 LR 99102
ตระแกรงร่อน (Sieve)	ENDECOTTS [®]
ปั๊มลม (Pump)	PUMA [®] , OL 1204
ปืนพ่นลมร้อน (Hot air gun)	BOSCH [®] , GHG 630 DCE
หัวฉีดสเปรย์ (Spray gun)	BEC [®] , Model F-75G

3.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์

ละลายพอลิเมอร์จำนวน 5 กรัม ด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงเอาไว้ในตารางที่ 3.4 เพื่อใช้ในการกระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์

พอลิเมอร์	ความเข้มข้น			
	4%	5%	10%	20%
พอลิแลกติกแอซิด 1	-	-	√	√
พอลิแลกติกแอซิด 2	-	-	√	√
พอลิแลกติกแอซิด 3	-	-	√	-
พอลิแลกติกแอซิด ทางการค้า	√	√	-	-
พอลิแลกติกแอซิด โคเอทิลินเทอร์พาทะเลต	√	-	-	√
PLA-3 / EVA Blend	√	-	-	-
Com-PLA / EVA Blend	√	-	-	-
Copolymer / EVA Blend	√	-	-	-

ใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมปริมาตร 50 มิลลิลิตร ละลายพอลิเมอร์จำนวนต่างๆ ให้ได้ความเข้มข้นตามที่แสดงเอาไว้ในตารางที่ 3.5 เพื่อใช้ในการกระบวนการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการใส่ตัวทำละลายออกในตุ๊กกลาง

ตารางที่ 3.5 ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการไล่ตัวทำละลายออกในตัวกลาง

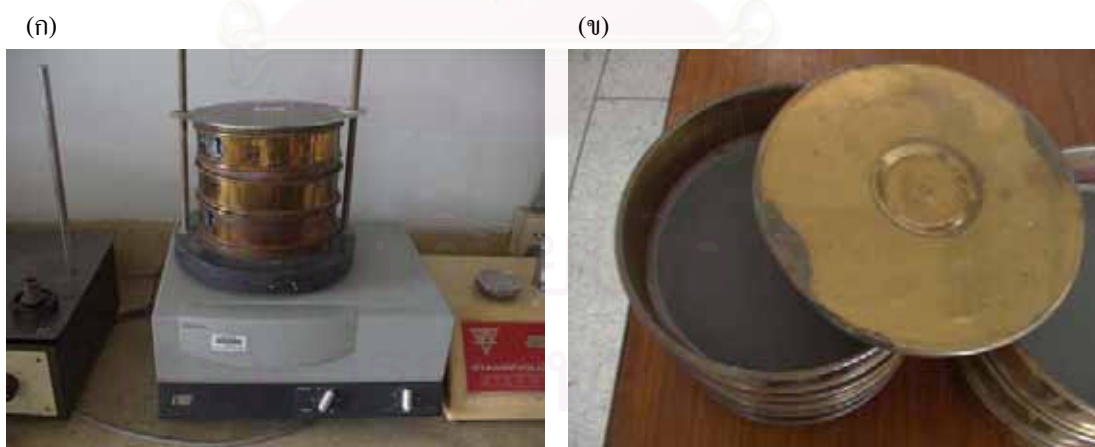
พอลิเมอร์	ความเข้มข้น					
	4%	5%	12%	20%	30%	40%
พอลิแลคติกแอซิด 1	-	-	-	√	-	-
พอลิแลคติกแอซิด 2	-	-	-	√	-	-
พอลิแลคติกแอซิด 3	-	-	-	√	-	√
พอลิแลคติกแอซิดทางการค้า	√	√	√	√	√	√
พอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทรฟทาเลต	√	√	-	√	√	√

โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายพอลิแลคติกแอซิด คลอโรฟอร์มผสมฟีนอลในสัดส่วน 60/40 โดยน้ำหนัก เป็นตัวทำละลายพอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทรฟทาเลต และคลอโรฟอร์มผสมเฮกเซนในสัดส่วน 50/50 โดยปริมาตรเป็นตัวทำละลายพอลิเมอร์ผสม

3.3 กระบวนการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ย

3.3.1 คัดแยกขนาดเม็ดปุ๋ยด้วยเครื่องคัดแยกอนุภาคบนตะแกรงร่อน (Sieve shaker) เพื่อแยกเม็ดปุ๋ยเป็นสองขนาดคือ 1.18-2.36 มิลลิเมตร และ 0.42-1.18 มิลลิเมตร (โดยใช้ตะแกรงร่อน 3 เบอร์คือ เบอร์ 8 ขนาด 2.36 มิลลิเมตร เบอร์ 16 ขนาด 1.18 มิลลิเมตร และเบอร์ 35 ขนาด 0.422 มิลลิเมตร)

3.3.2 อบเม็ดปุ๋ยขนาด 0.42-1.18 มิลลิเมตรที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น แล้วนำเม็ดปุ๋ยเก็บเอาไว้ในเดซีเคเตอร์เพื่อนำไปใช้ต่อไป



รูปที่ 3.1 : (ก) เครื่องคัดแยกอนุภาคบนตะแกรงร่อน (ข) ตะแกรงร่อน

3.3.3 ทำการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ยด้วยกระบวนการ 3 กระบวนการ ดังนี้

3.3.3.1 ฟันเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์

ฟันสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้นต่างๆที่เตรียมเอาไว้ (ดังตารางที่ 3.4) ด้วยหัวฉีดสเปรย์ เคลือบลงบนผิวของเม็ดปุ๋ยจำนวน 50 กรัม (ขนาด 0.42-1.18 มิลลิเมตร) ที่บรรจุ

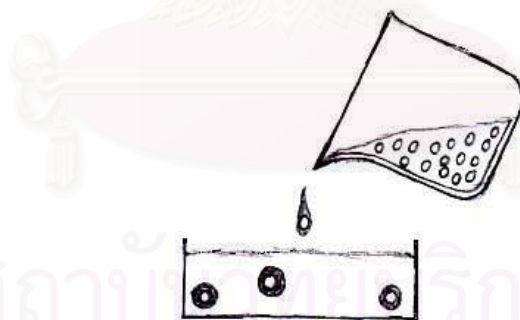
อยู่ในถังผสม ซึ่งสามารถกึ่งเกลี่ยให้เม็ดปุ๋ยภายในได้รับการเคลือบอย่างสม่ำเสมอ พร้อมกับใช้ปืนพ่นลมร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พ่นลงในถังผสมเพื่อให้ความร้อนไล่ตัวทำละลายออกควบคู่ไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 : กระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์
(ถึงผสมได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ. ดร. เจดศักดิ์ ไชยคุณา)

3.3.3.2 จุ่มในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการไล่ตัวทำละลายออกในตุ๊กกลาง

นำเม็ดปุ๋ยขนาด 0.42-1.18 มิลลิเมตร จำนวน 50 กรัม ใส่ลงในสารละลายพอลิเมอร์ที่เตรียมเอาไว้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร (ดังตารางที่ 3.5) แล้วจึงหยอดเม็ดปุ๋ยที่มีพอลิเมอร์เคลือบอยู่ลงในเมทานอลเพื่อไล่ตัวทำละลายออก ก่อนช้อนเม็ดปุ๋ยออกจากตุ๊กกลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 : กระบวนการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการไล่ตัวทำละลายออกในตุ๊กกลาง

นำปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น ตัวทำละลาย และตุ๊กกลางที่อาจตกค้างอยู่บนผิวเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบให้ระเหยออกไป ก่อนนำปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ได้เก็บเอาไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อนำไปตรวจสอบ และวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ในขั้นต่อไป

3.3.3.3 เคลือบพอลิเมอร์ด้วยความร้อน

ใส่ผงพอลิเมอร์จำนวน 0.25 กรัม ลงในหลุมบนแม่พิมพ์ (จำนวน 10 หลุม) แล้วใส่เม็ดปุ๋ยยูเรียขนาด 0.42-1.18 มิลลิเมตรจำนวน 0.5 กรัม เป็นชั้นกลาง จากนั้นโรยชั้นบนด้วยผงพอลิเมอร์จำนวน 0.25 กรัม นำแม่พิมพ์ไปให้ความร้อน 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาที เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเคลือบผิวเม็ดปุ๋ย ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 : กระบวนการเคลือบพอลิเมอร์ด้วยความร้อน

3.4 การสร้างกราฟมาตรฐาน(Calibration curve) จากสารละลายมาตรฐานยูเรีย

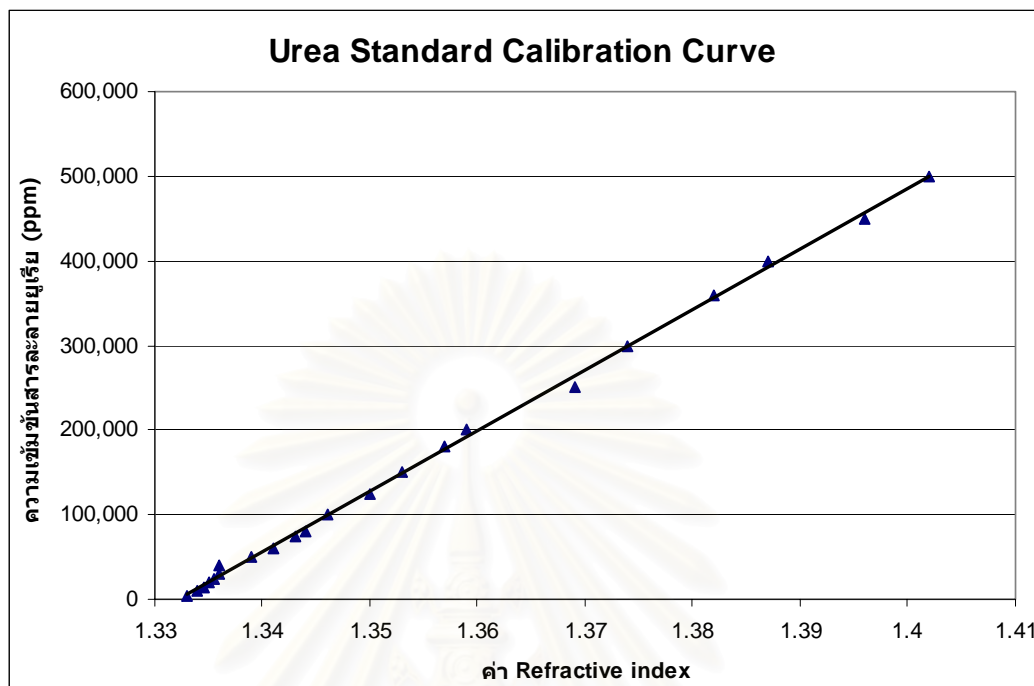
3.4.1 เตรียมสารละลายยูเรียมาตรฐาน โดยละลายยูเรีย 100 กรัม ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร แล้วจึงนำสารละลายมาตรฐานมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ความเข้มข้นของสารละลายยูเรียมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัย

ความเข้มข้น (%)	ปริมาณสาร (ppm)	ความเข้มข้น (%)	ปริมาณสาร (ppm)
50%	500,000	7.5%	75,000
45%	450,000	6%	60,000
40%	400,000	5%	50,000
36%	360,000	4%	40,000
30%	300,000	3%	30,000
25%	250,000	2.5%	25,000
20%	200,000	2%	20,000
18%	180,000	1.5%	15,000
15%	150,000	1.25%	12,500
12.5%	125,000	1%	10,000
10%	100,000	0.5%	5,000
8%	80,000		

3.4.2 วัดค่าดัชนีการหักเหของแสงของสารละลายยูเรียมาตรฐานความเข้มข้นต่างๆ ที่เตรียมจากข้อ 3.4.1 ด้วยเครื่องวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง

3.4.3 สร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหักเหของแสง (Refractive Index) กับ ความเข้มข้นของยูเรีย (ppm) ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 : ความเข้มข้นสารละลายยูเรีย (ppm) เทียบกับค่า Refractive Index

ทั้งนี้ สมการเชิงเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (รูปที่ 3.4) คือสมการที่ (3.1)

$$Y = 7,141,679.30 * X - 9,513,502.70 \quad (3.1)$$

เมื่อ : X คือ ค่า Refractive Index ที่วัดได้จากเครื่องวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง
Y คือ ความเข้มข้นสารละลายยูเรีย (ppm)

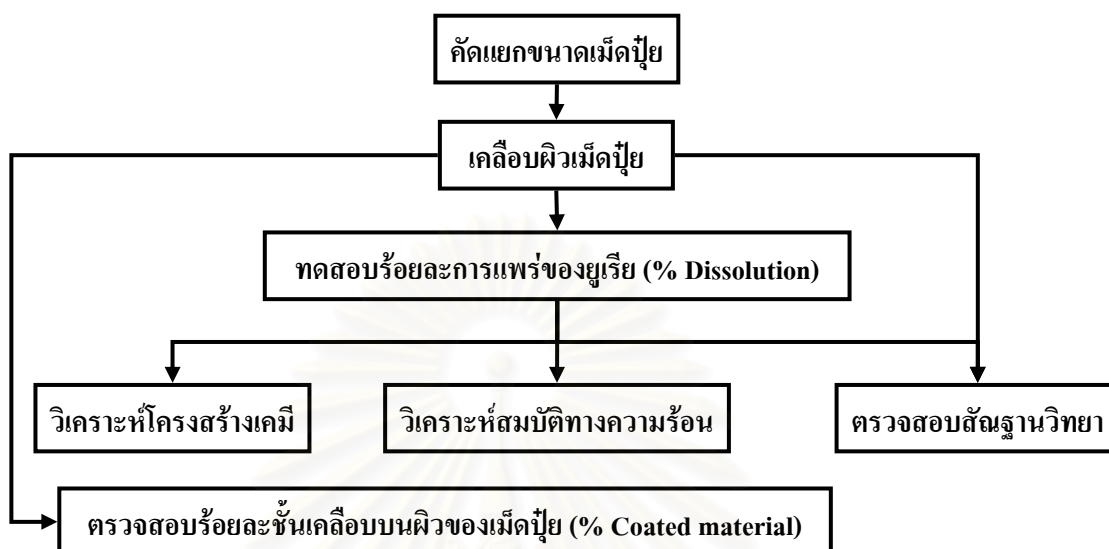
และสามารถแปลงสมการที่ (3.1) ให้เป็นสมการที่ใช้หาปริมาณร้อยละยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบได้ ดังสมการที่ (3.2)

$$P = \frac{100 * [(7,141,679.3 * X) - 9,513,502.7]}{[(W - (C/100 * W)) / V] * 1,000,000} \quad (3.2)$$

เมื่อ : P คือ ร้อยละยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ (%)
X คือ ค่า Refractive Index ที่วัดได้จากเครื่องวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง
W คือ น้ำหนักของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ใช้ในการทดสอบ (กรัม)
C คือ ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย (% Coated material)
V คือ ปริมาตรน้ำกลั่นที่ใช้ละลายปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ ในการทดสอบหาร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (มิลลิลิตร)

3.5 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

ขั้นตอนการเตรียม การทดสอบ และการวิเคราะห์สมบัติของปฏึกที่ผ่านการเคลือบในงานวิจัย แสดง ได้ดัง แผนภาพที่ 3.1



แผนภาพที่ 3.1 : ขั้นตอนการผลิต การทดสอบ และการวิเคราะห์คุณสมบัติของปฏึกที่ผ่านการเคลือบ

3.5.1 ทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution)

ตรวจสอบปริมาณยูเรียที่แพร่ผ่านผิวเคลือบออกมาสู่ตัวกลางที่เป็นน้ำกลั่น ด้วยเครื่องวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง โดยทดสอบประสิทธิภาพของปฏึกที่ผ่านการเคลือบด้วย 2 วิธีการ ดังนี้

3.5.1.1 แช่ปฏึกที่เคลือบจำนวน 10 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร เขย่าด้วยเครื่องแกว่งสารแบบต่อเนื่องที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที (ดังรูปที่ 3.6 ก) โดยระหว่างนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำกลั่นทุกๆ 30 วินาที ปริมาตร 10 ไมโครลิตรไปวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง (ดังรูปที่ 3.6 ข) และคำนวณร้อยละปริมาณยูเรียที่แพร่ผ่านผิวเคลือบด้วยสมการที่ (3.2)



รูปที่ 3.6 : (ก) เครื่องแกว่งสารแบบต่อเนื่อง (Heidolph[®], Rotamax 120)

(ข) เครื่องวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง (ATAGO[®], NAR-1T liquid)

3.5.1.2 ผสมปุ๋ยที่เคลือบจำนวน 5 กรัม เข้ากับกรวดเม็ดเล็กจำนวน 100 กรัม (กรวดมีขนาด 0.5-2 มิลลิเมตร) โดยผสมให้เม็ดปุ๋ยเกิดการกระจายตัวมากที่สุด แล้วนำไปใส่ในท่อ PVC ที่ปลายท่อด้านล่างปิดด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นรดด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตรทุกชั่วโมง เก็บน้ำรดที่ผ่านผ้าขาวบางไปตรวจสอบร้อยละ ปริมาณยูเรียด้วยเครื่องวัดค่าดัชนีการหักเหของแสง

3.5.2 ตรวจสอบร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย (% Coated material)

แช่ปุ๋ยที่เคลือบจำนวน 20 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร กวนจนยูเรียที่อยู่ภายในผิวเคลือบ ละลายหมด ล้างผิวเคลือบที่เหลือด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด แล้วแยกผิวเคลือบไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักผิวเคลือบ แล้วคำนวณหาร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย ตามสมการที่ (3.3)

$$C = (A/W)*100 \quad (3.3)$$

เมื่อ : C คือ ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย (% Coated material)

A คือ น้ำหนักผิวเคลือบที่เหลือจากการละลายยูเรียออกในน้ำกลั่น (กรัม)

W คือ น้ำหนักของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ใช้ในการทดสอบ (กรัม)

และร้อยละประสิทธิภาพการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ย ตามสมการที่ (3.4)

$$E = \frac{100*(A/W)*W_0}{B} \quad (3.4)$$

เมื่อ : E คือ ร้อยละประสิทธิภาพการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ย (% Efficiency)

W คือ น้ำหนักของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ใช้ในการทดสอบ (กรัม)

W_0 คือ น้ำหนักของปุ๋ยยูเรียก่อนผ่านการเคลือบ (กรัม)

A คือ น้ำหนักผิวเคลือบที่เหลือจากการละลายยูเรียออกในน้ำกลั่น (กรัม)

B คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบผิวเม็ดปุ๋ย (กรัม)

3.5.3 ตรวจสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์

ตรวจสอบความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบผิวด้วย Ubbelohde viscometer เพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์แต่ละชนิด และ Brookfield viscometer ซึ่งแสดงความแตกต่างระหว่างความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์แต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นสำหรับใช้เคลือบ

3.5.3.1 Ubbelohde viscometer

ละลายพอลิเมอร์จำนวน 0.1 กรัม ด้วยตัวทำละลายผสมปริมาตร 50 มิลลิลิตรของ 7% กรดไตรคลอโรอะซิติกในคลอโรฟอร์ม เทสารละลายลงใน Viscometer type C ความคมอุณหภูมิไว้ที่ 27 องศาเซลเซียส จับเวลาที่ใช้ในการไหลของสารละลายผ่านระยะแคปิลารีที่กำหนดไว้ ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับตัวทำละลาย จากนั้นคำนวณหาความหนืดตามสมการที่ (3.5)

$$\eta_{red} = [(t/t_0)-1]/c \quad (3.5)$$

เมื่อ : η_{red} คือ ความหนืด (Reduced viscosity) หน่วย dl/g
 t คือ เวลาที่วัดได้จากสารละลายพอลิเมอร์ (วินาที)
 t_0 คือ เวลาที่วัดได้จากตัวทำละลายที่ใช้ (วินาที)
 c คือ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ (g/ml)

3.5.3.2 Brookfield Viscometer

ละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายที่เหมาะสมปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยความเข้มข้นที่ต้องการ แล้วตรวจสอบด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer โดยเลือกใช้ Spindle เบอร์ 3 และเบอร์ 7 ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 1, 5, 10, 50 และ 100 รอบต่อนาที แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนืดตามสมการที่ (3.6)

$$\eta = Z * F \quad (3.6)$$

เมื่อ : η คือ ความหนืด (Centipoise / mPa*s)
 Z คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่อง Brookfield Viscometer
 F คือ Conversion Factors ที่ความเร็วรอบต่างๆ (แสดงเอาไว้ในภาคผนวก ข.)

3.5.4 วิเคราะห์โครงสร้างเคมีของผิวเคลือบพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

วิเคราะห์โครงสร้างเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เปรียบเทียบกับผิวเคลือบหลังการทดสอบร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย โดยนำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์บดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ในอัตราส่วน 0.001 ต่อ 1 แล้วอัดเป็นแผ่นกลมใสด้วยเครื่องอัด นำไปทำการวิเคราะห์โดยใช้ Resolution 2 cm^{-1} เวฟนัมเบอร์ ช่วง 4,000 ถึง 500 cm^{-1} 16 Consecutive scan ในบรรยากาศที่ปราศจากความชื้น



รูปที่ 3.7 : ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ThermoElectron Corporation®, Nicolet 6700)

3.5.5 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์

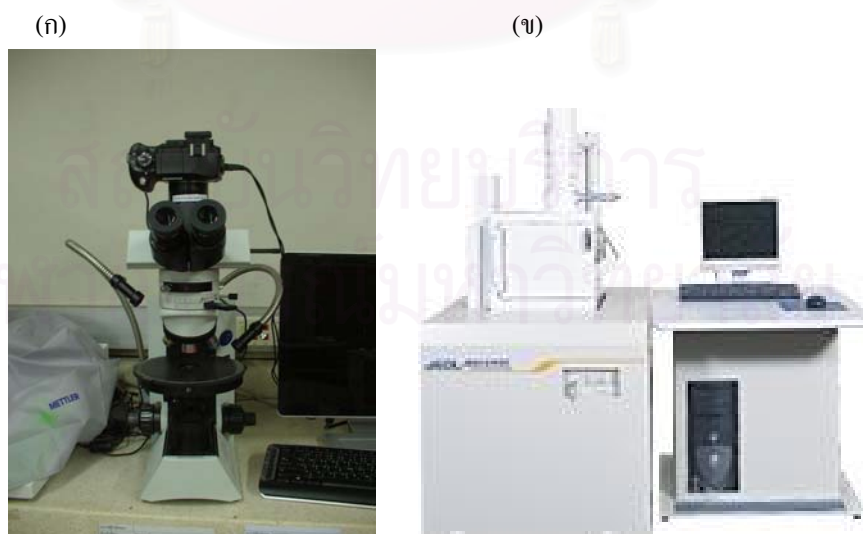
วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เปรียบเทียบกับผิวเคลือบหลังการทดสอบร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย บรรจุสารตัวอย่าง 4-5 มิลลิกรัมใน TGA crucible ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-1,000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (20 มิลลิลิตรต่อนาที)



รูปที่ 3.8 : เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (METTLER TOLEDO[®], SDTA 851e)

3.5.6 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบก่อนและหลังการทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ

ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100 เท่า กำลังไฟฟ้า 15 kV



รูปที่ 3.9 : (ก) กล้องจุลทรรศน์ (Olympus[®], SZ40)

(ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL[®], JSM-6480 LV)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ปฏิกิริยาที่เตรียมโดยการพ่นเคลือบ

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ด้วยข้อจำกัดด้านการละลายของโคพอลิเมอร์ในตัวทำละลายสำหรับเทคนิค GPC จึงไม่สามารถวิเคราะห์ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโคพอลิเมอร์ได้ ดังนั้นจึงวิเคราะห์ค่า Reduced viscosity เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบ

ตารางที่ 4.1 ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่วัดจาก Ubbelohde viscometer (หน่วย เดซิลิตร/กรัม)

พอลิเมอร์	น้ำหนัก (กรัม)	ความหนืด					ความหนืด เฉลี่ย
		1	2	3	4	5	
PLA-1 ($M_n \sim 8 \times 10^3$)	0.1001	0.11	0.10	0.09	0.11	0.11	0.10
PLA-2 ($M_n \sim 2 \times 10^4$)	0.0997	0.36	0.36	0.38	0.37	0.38	0.37
PLA-3 ($M_n \sim 3.5 \times 10^4$)	0.0999	0.70	0.73	0.72	0.71	0.73	0.72
Com-PLA	0.1088	1.02	1.00	1.02	1.02	1.02	1.02
Copolymer	0.1001	0.18	0.18	0.18	0.19	0.18	0.18

ค่า Reduced viscosity เฉลี่ยที่ได้จากการวัดจำนวน 5 ครั้ง (ตารางที่ 4.1) แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลตมีค่าอยู่ระหว่าง PLA-1 และ PLA-2 นอกจากนี้พอลิเมอร์ทั้งชนิดโพลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ในกลุ่มวิจัยมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า

น้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันของพอลิเมอร์ส่งผลโดยตรงต่อความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นสำหรับการพ่นเคลือบ เป็นผลให้พอลิเมอร์บางตัวไม่สามารถพ่นเคลือบลงบนเม็ดยูที่ความเข้มข้นสูงได้จากค่าความหนืดที่วัดด้วย Brookfield Viscometer (ตารางที่ 4.2) แสดงให้เห็นว่าสารละลายพอลิเมอร์ทุกชนิดมีสมบัติเป็น Shear thinning และเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบเดียวกัน พบว่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น และน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์สูงขึ้น สำหรับพอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด จะพบว่าค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงมากกว่าสารละลายพอลิเมอร์อื่น เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายด้วยค่าใกล้เคียงกัน

ด้วยข้อจำกัดด้านความหนืดของสารละลาย จึงทำให้ความเข้มข้นสูงสุดของ PLA1-3 Com-PLA Copolymer และพอลิเมอร์ผสมที่สามารถพ่นเคลือบลงบนเม็ดยูมีค่าแตกต่างกันตามลำดับดังนี้

- ความเข้มข้นมากกว่า 20% โดยน้ำหนัก สำหรับ PLA-1 และ PLA-2
- ความเข้มข้นประมาณ 20% โดยน้ำหนัก สำหรับ PLA-3 และ Copolymer
- ความเข้มข้นประมาณ 5% โดยน้ำหนัก สำหรับ Com-PLA
- ความเข้มข้นประมาณ 4% โดยน้ำหนัก สำหรับพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.2 ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่วัดจาก Brookfield Viscometer

พอลิเมอร์	ความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์ (%)	ความหนืด (Centipoise) ที่ความเร็วรอบ (R.P.M.)				
		1	5	10	50	100
PLA-1	20%	500	200	200	180	165
	10%	200	100	100	70	50
PLA-2	20%	750	500	400	360	295
	10%	350	200	200	150	90
PLA-3	20%	1,000	600	500	430	370
	10%	400	200	200	150	115
Com-PLA	20%	80,000	24,000	24,000	22,800	22,400
	5%	1,000	500	450	320	280
	4%	650	400	300	240	210
Copolymer	20%	750	400	250	280	240
	4%	100	-	-	-	-
PLA-3/EVA Blend	4%	400	200	200	160	120
Com-PLA/EVA Blend	4%	450	200	200	160	125
Copolymer/EVA Blend	4%	600	200	200	180	150

(เมื่อ - : ไม่สามารถวัดค่าความหนืดได้)

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.2 ทำให้สรุปได้ว่าความหนืดสูงสุดของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดและโคพอลิเมอร์ที่สามารถพ่นได้ด้วยหัวฉีดสเปรย์อยู่ที่ประมาณ 1,000 Centipoise (วัดด้วยอัตรา 1 R.P.M.) ซึ่งเป็นค่าความหนืดของสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดทางการค้าและพอลิแล็กติกแอซิด 3 ที่ความเข้มข้น 5% และ 20% โดยน้ำหนักตามลำดับ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่าความหนืดที่ความเข้มข้น 4% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม พบว่าความหนืดของสารละลายมีค่าในช่วง 400 - 600 Centipoise (วัดด้วยอัตรา 1 R.P.M.) แต่ไม่สามารถพ่นเคลือบด้วยความเข้มข้นสูงกว่า 4% โดยน้ำหนักได้ ทั้งนี้เป็นเพราะพอลิเอทิลีนไวโนลอะซีเตดมีสมบัติเป็นสารยึดระหว่างการพ่นเคลือบ สังเกตพบพอลิเมอร์รวมตัวติดอยู่บริเวณหัวฉีดสเปรย์ก่อนหลุดจากหัวฉีด ดังนั้นที่ความเข้มข้นสูงขึ้น การอุดตันของหัวฉีดจะมีมากขึ้น เป็นผลให้ไม่สามารถทำการพ่นเคลือบได้อย่างสม่ำเสมอ การสูญเสียพอลิเมอร์ผสมในระหว่างกระบวนการเตรียมปฏึกนี้เอง เป็นผลให้ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปฏึก (ตารางที่ 4.3) มีค่าน้อยกว่าปฏึกที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดทางการค้า และพอลิแล็กติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ใช้ความเข้มข้น และจำนวนครั้งการพ่นเคลือบใกล้เคียงกัน

ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปฏึก (% Coated material) เมื่อพ่นสารละลายพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นและจำนวนครั้งของการพ่น (ตารางที่ 4.3) แสดงให้เห็นว่า ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปฏึกจะมากขึ้นเมื่อจำนวนครั้งการพ่นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุย (% Coated material) ที่สัมพันธ์กับชนิดพอลิเมอร์ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ และจำนวนครั้งของการพ่นเคลือบ

พอลิเมอร์	ความเข้มข้น สารละลายพอลิเมอร์	ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุย (%Coated material)		
		เคลือบ 1 ครั้ง	เคลือบ 2 ครั้ง	เคลือบ 3 ครั้ง
PLA-1(Mn~8x10 ³ , Mw~1.3x10 ⁴)	10%	1.5%	3.5%	6.6%
	20%	2.1%	3.6%	6.4%
PLA-2(Mn~2x10 ⁴ , Mw~2.5x10 ⁴)	10%	2.8%	3.7%	5.4%
	20%	2.6%	4.4%	6.8%
PLA-3(Mn~3.5x10 ⁴ , Mw~8.9x10 ⁴)	10%	4.6%	6.1%	7.9%
Com-PLA (NatureWorks [®] , 4042D)	4%	2.3%	5.3%	6.8%
	5%	2.1%	5.4%	6.9%
Copolymer	4%	2.3%	3.3%	4.7%
	20%	-	-	9.2%
PLA-3 / EVA Blend	4%	-	-	0.9%
Com-PLA / EVA Blend	4%	-	-	1.6%
Copolymer / EVA Blend	4%	-	-	1.3%

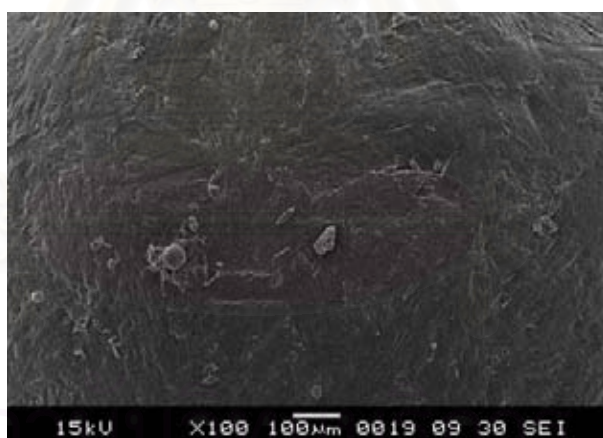
จากข้อจำกัดของความหนืดสูงสุดที่สามารถพ่นเคลือบได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ทำให้การศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุย ไม่สามารถทำได้ในช่วงความเข้มข้นที่กว้างนักในบางชนิดของพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามจากข้อมูลของ Copolymer ในตารางที่ 4.3 และความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยของปุยที่เคลือบด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า (รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป) แสดงให้เห็นว่าร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุยและคุณภาพของผิวเคลือบมีแนวโน้มที่สูงและดีขึ้นด้วยการใช้ความเข้มข้นสารละลาย (ความหนืด) ที่ไม่ต่ำจนเกินไป

นอกจากนี้ตารางที่ 4.3 ยังแสดงให้เห็นว่ามีเพียง Com-PLA และ Copolymer เท่านั้นที่สามารถเตรียมปุยเคลือบที่มีปริมาณผิวเคลือบสูงด้วยความเข้มข้นของสารละลายต่ำได้ ซึ่งหมายถึงการใช้ปริมาณพอลิเมอร์ลดลงได้

ประสิทธิภาพของการพ่นเคลือบ (%Efficiency) ซึ่งหาได้จากการเปรียบเทียบน้ำหนักผิวเคลือบพอลิเมอร์กับน้ำหนักเริ่มต้นของพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการตามสมการที่ 3.4 (ตารางที่ 4.4) แสดงให้เห็นว่าการพ่นเคลือบมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 15-40% ขึ้นอยู่กับชนิด น้ำหนักโมเลกุล และความเข้มข้นของสารละลาย โดยทั่วไปพบว่าประสิทธิภาพของการพ่นเคลือบจะดีขึ้นเมื่อความเข้มข้นสารละลายสูงขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพของการพ่นเคลือบด้วยพอลิเมอร์ผสมนั้นต่ำกว่าพอลิเมอร์อื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุย

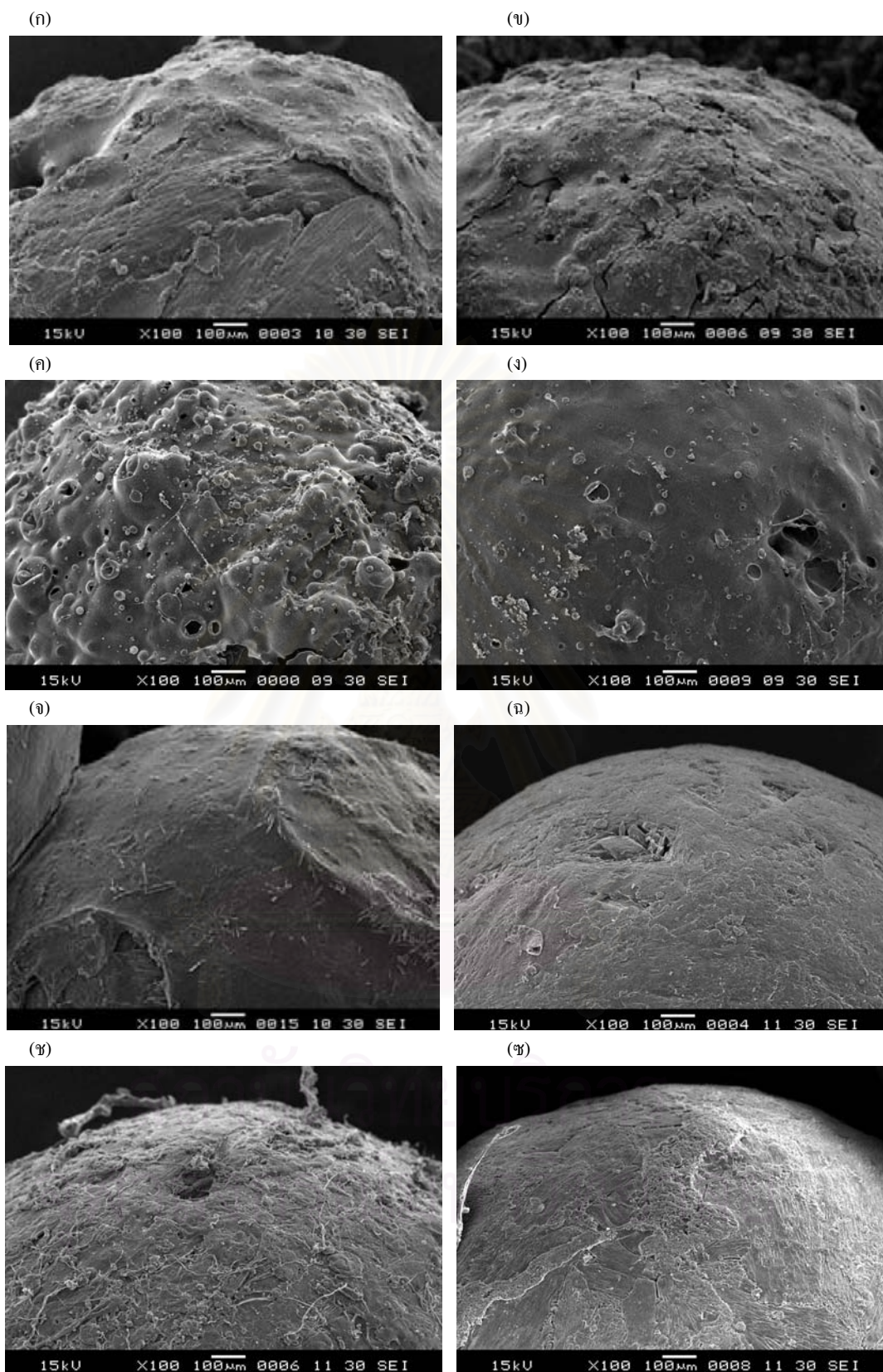
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของการพ่นเคลือบ (% Efficiency) ที่สัมพันธ์กับชนิดพอลิเมอร์ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ และจำนวนครั้งของการพ่นเคลือบ

พอลิเมอร์	ความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์	ประสิทธิภาพของการพ่นเคลือบ (%Efficiency)		
		เคลือบ 1 ครั้ง	เคลือบ 2 ครั้ง	เคลือบ 3 ครั้ง
PLA-1 (Mn ~ 8x10 ³)	10%	14.4%	17.8%	21.9%
	20%	20.6%	17.9%	21.5%
PLA-2 (Mn ~ 2x10 ⁴)	10%	27.8%	18.5%	18.1%
	20%	25.5%	21.9%	22.7%
PLA-3 (Mn ~ 3.5x10 ⁴)	10%	46.3%	30.4%	26.2%
Com-PLA (NatureWorks [®] , 4042D)	4%	22.5%	26.4%	22.4%
	5%	36.8%	28.3%	26.5%
Copolymer	4%	22.7%	18.6%	17.7%
	20%	-	-	15.7%
PLA-3 / EVA Blend	4%	-	-	5.1%
Com-PLA / EVA Blend	4%	-	-	8.3%
Copolymer / EVA Blend	4%	-	-	7.8%



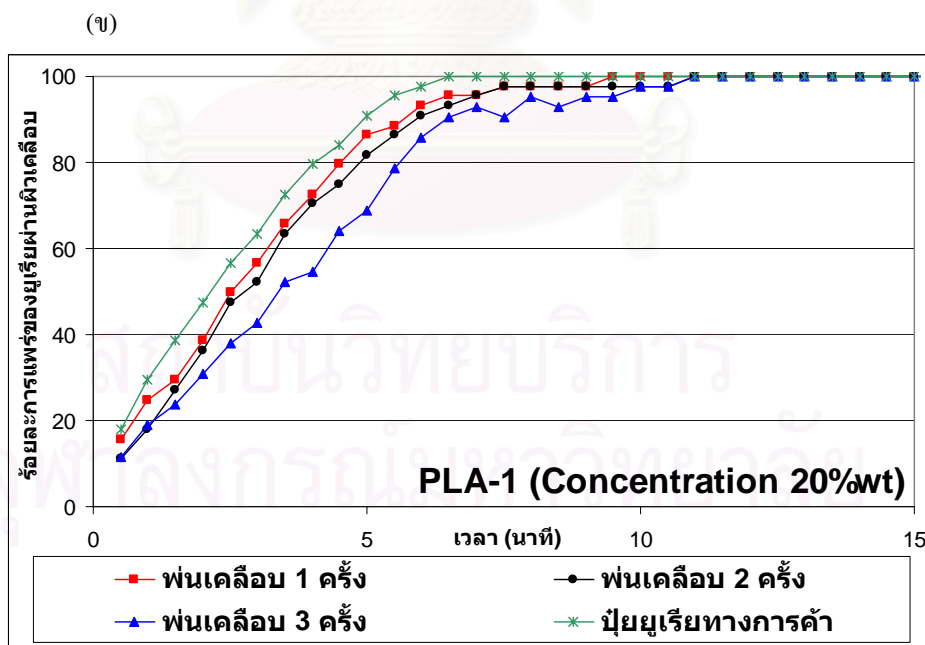
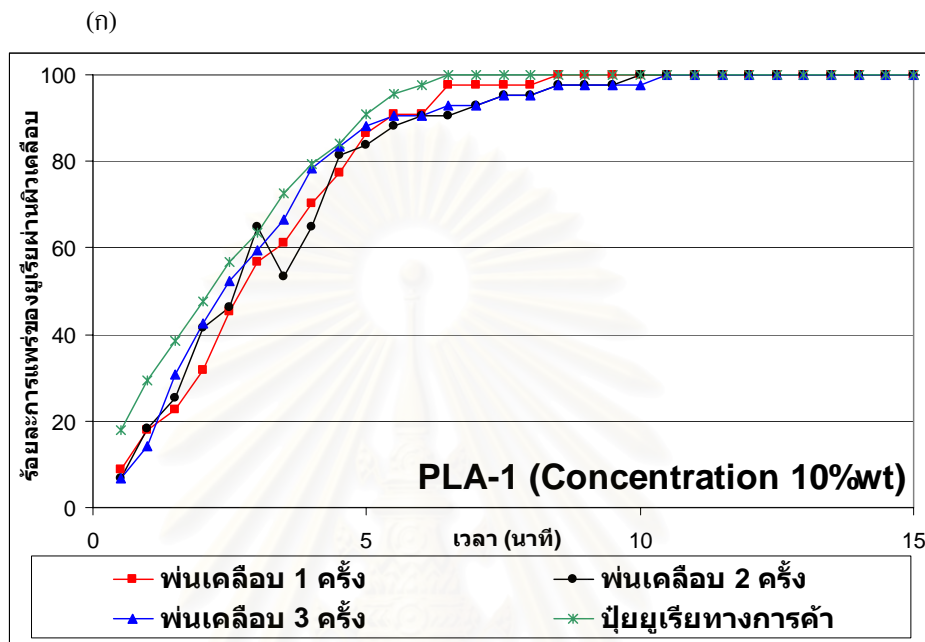
รูปที่ 4.1 : รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า ของพื้นผิวขุยมะพร้าวที่พ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์

รูปที่ 4.2 ก-ข แสดงสัณฐานวิทยาของผิวเคลือบ สังเกตพบว่าเม็ดปุ๋ยที่พ่นเคลือบด้วยสารละลายของพอลิแลคติกแอซิดที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ แม้ว่ามีความเข้มข้นของสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยใกล้เคียงกับพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า แต่ปรากฏรอยแตกมากกว่ามาก นอกจากนี้คุณภาพของผิวเคลือบที่ได้จากสารละลายพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า และพอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทรฟทาเลต มีลักษณะคล้ายกันคือค่อนข้างเรียบกว่าพอลิแลคติกแอซิด 1-3 สำหรับผิวเคลือบพอลิเมอร์ผสมนั้นพบว่าไม่ค่อยมีความสม่ำเสมอ มีลักษณะคล้ายเส้นใยที่ปกคลุมอย่างไม่สม่ำเสมอกรณี Com-PLA/EVA Blend (รูปที่ 4.2 ข) และมีรอยแตกกรณี Copolymer/EVA Blend (รูปที่ 4.2 ข) อาจเนื่องด้วยรอยแตกบนผิวของเม็ดปุ๋ยที่ต่ำกว่ามาก

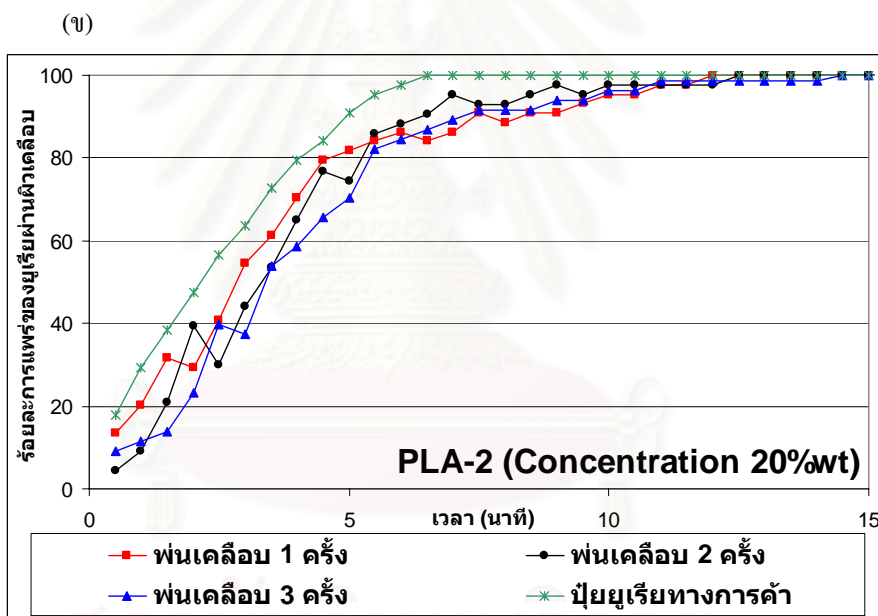
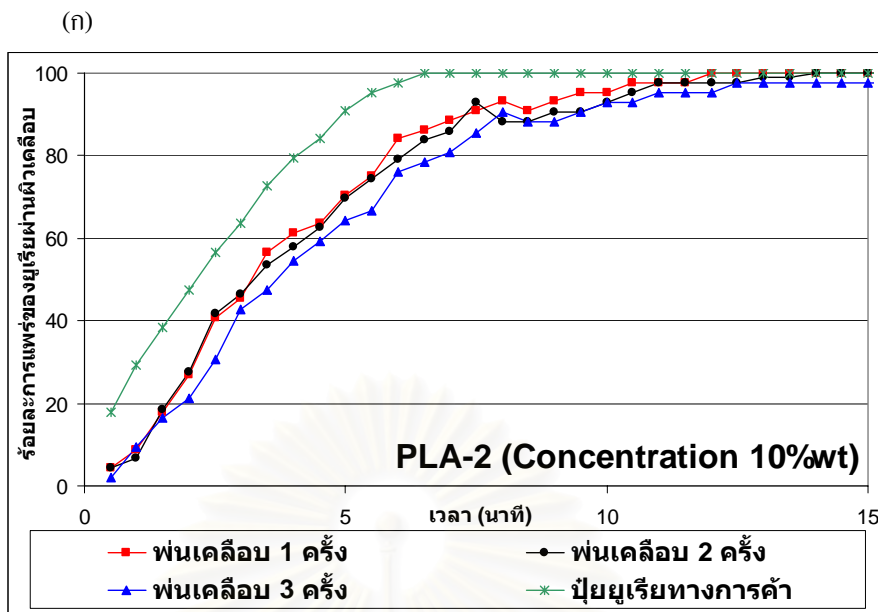


รูปที่ 4.2 : รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า ของพื้นผิวของฟิล์มที่ปั่นเคลือบ 3 ครั้ง ด้วยสารละลายความเข้มข้นสูงสุดของ : (ก) PLA-1 (6.4%), (ข) PLA-2 (6.8%), (ค) PLA-3 (7.9%), (ง) Com-PLA (6.9%), (จ) Copolymer (9.2%), (ฉ) PLA-3/EVA Blend (0.90%), (ช) Com-PLA/EVA Blend (1.59%) และ (ซ) Copolymer/EVA Blend (1.31%) ตามลำดับ

ประสิทธิภาพของการชะลอการปลดปล่อยปฏิกิริยาของปฏิกิริยาที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ แสดงด้วยค่าร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ที่เวลาทดสอบต่างๆ (ข้อมูลดิบจากการทดลองแสดงเอาไว้ในภาคผนวก ก.)



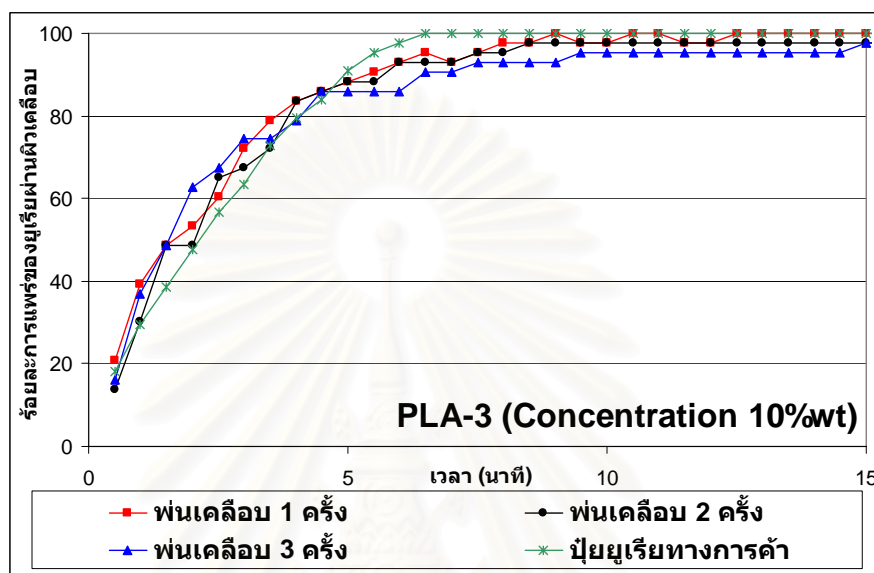
รูปที่ 4.3 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาทื) ของปฏิกิริยาที่ผ่านการเคลือบที่เตรียมโดยฟันเคลือบด้วยสารละลายพอลิแลกติกแอซิด 1 ความเข้มข้น : (ก) 10% (ข) 20% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.4 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาทื) ของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่เตรียมโดยฟันเคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด 2 ความเข้มข้น : (ก) 10% (ข) 20% โดยน้ำหนัก

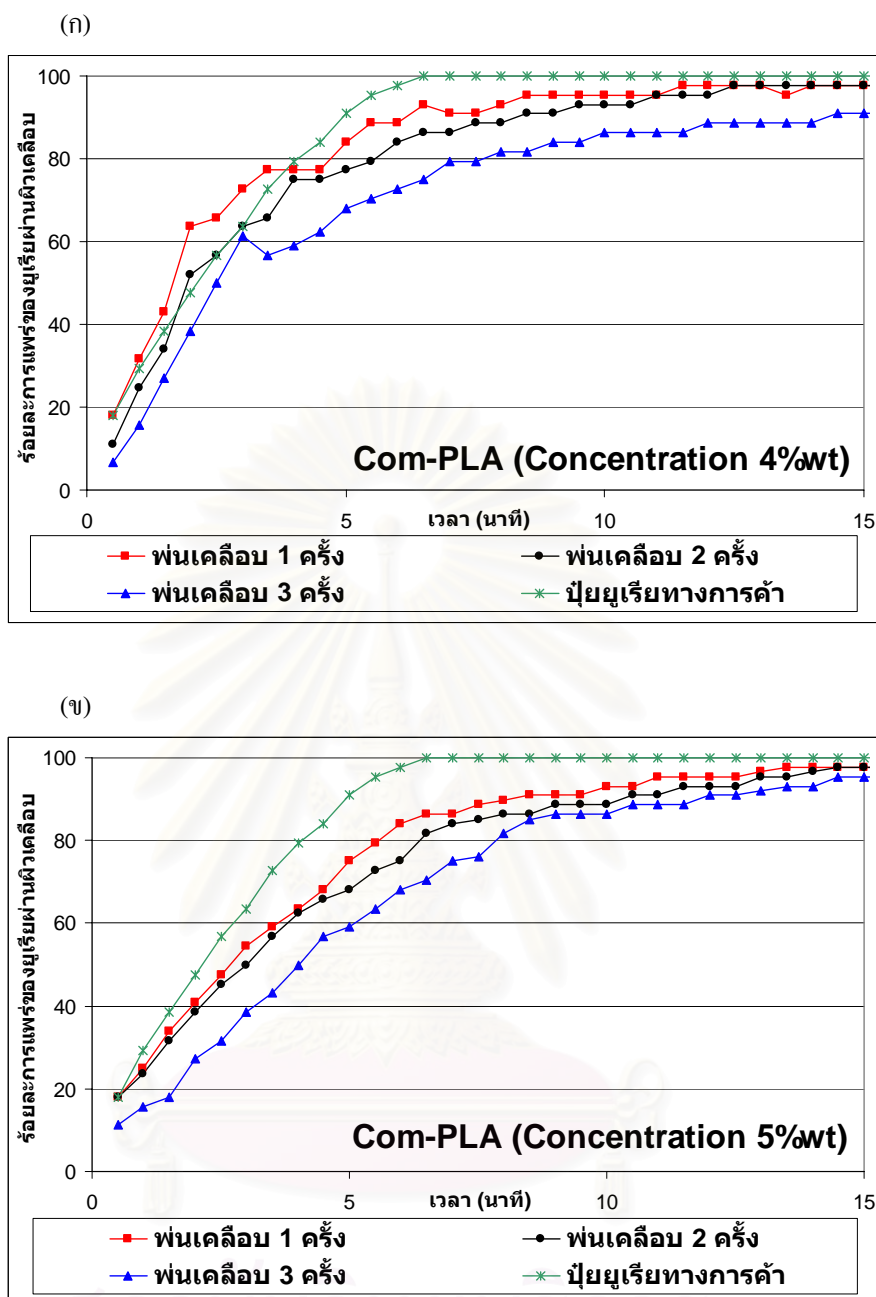
รูปที่ 4.3 - 4.6 แสดงประสิทธิภาพของการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียของปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิด 1-3 และพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า ตามลำดับ โดยทั่วไปพบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ต่ำ (รูปที่ 4.3 ก, 4.4 ก, 4.5 และ 4.6 ก) ความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยยูเรียสู่ตัวกลาง จะดีกว่าเมื่อฟันเคลือบด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น (รูปที่ 4.3 ข, 4.4 ข และ 4.6 ข) เป็นที่น่าสังเกตจากรูปที่ 4.3 ก ว่าชั้นผิวเคลือบที่หนาขึ้นด้วยการเพิ่มจำนวนครั้งการฟันเคลือบด้วยสารละลายความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก ไม่ช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันน้ำที่ผ่านเข้ามาละลายปุ๋ยได้ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิด 1 เป็น 20% โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.3 ข) จะเห็นได้ชัดว่าปุ๋ยยูเรียที่ฟันด้วยจำนวนครั้งหรือปริมาณชั้น-

ผิวเคลือบมากกว่า จะมีอัตราการปลดปล่อยที่ช้ากว่า ทั้งนี้เชื่อว่าพอลิแลกติกแอซิด 1 ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมาก ดังนั้นเมื่อพ่นเคลือบสารละลายที่มีความหนืดต่ำ ทำให้ตัวทำละลายสามารถระเหยออกได้ง่าย และพอลิเมอร์จะเกิดการแข็งตัวกลายเป็นผิวเคลือบที่ไม่สมบูรณ์ที่ซับซ้อนกันไปเรื่อยๆบนผิวของเม็ดปุ๋ย จนเกิดเป็นรูพรุน และรอยแตกตามชั้นของผิวเคลือบที่ซ้อนทับกัน (รูปที่ 4.2 ก) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้จะมีผลช่วยลดอัตราการระเหยของตัวทำละลายได้ส่วนหนึ่ง



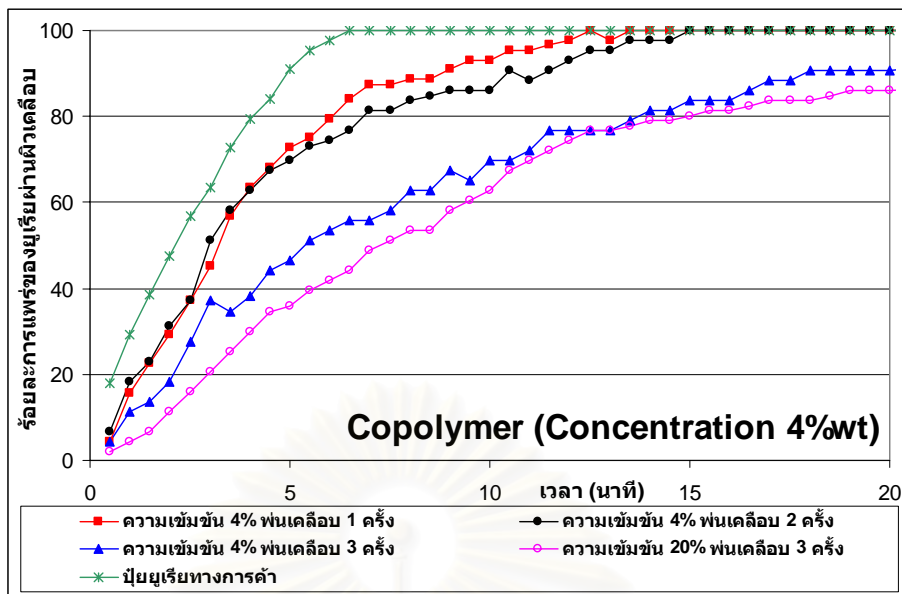
รูปที่ 4.5 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาทื) ของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่เตรียมโดยพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิแลกติกแอซิด 3 ความเข้มข้น 10% โดยน้ำหนัก

เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วของการปลดปล่อยยูเรียจากปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิแลกติกแอซิด 1-3 (รูปที่ 4.3-4.5) กับพอลิแลกติกแอซิดทางการค้า (รูปที่ 4.6) พบว่าในกรณีที่ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยใกล้เคียงกัน ลักษณะผิวเคลือบที่มีคุณภาพสูง (รูปที่ 4.2 ง) มีรอยแตกน้อย ของผิวเคลือบพอลิแลกติกแอซิดทางการค้าส่งผลให้สามารถชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีกว่า โดยพิจารณาจากร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบที่เวลา 5 นาที จากผิวเคลือบที่เตรียมด้วยสารละลายความเข้มข้นสูงสุดของพอลิแลกติกแอซิด 1-3 และพอลิแลกติกแอซิดทางการค้า ที่มีค่า 70-85% และ 60% ตามลำดับ

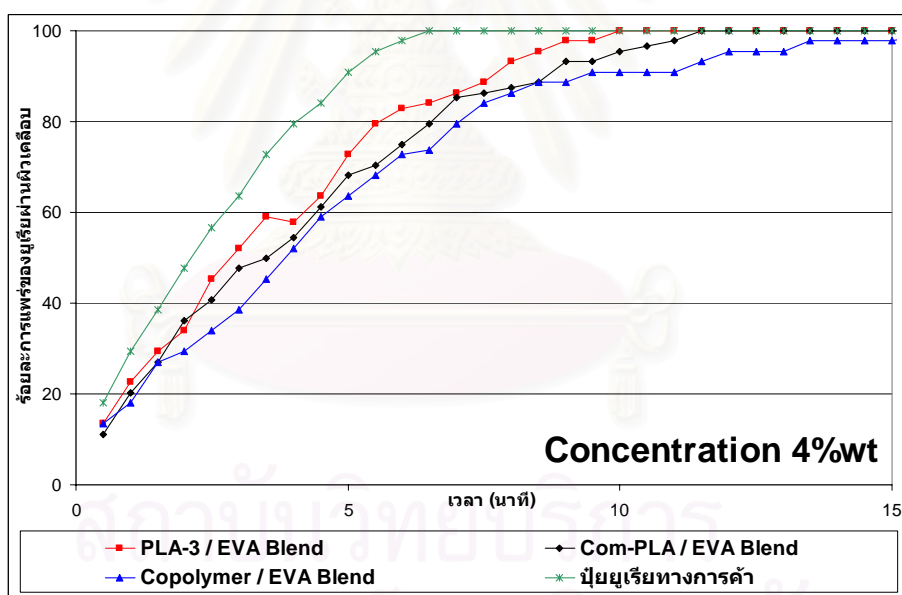


รูปที่ 4.6 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวหนังเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาทื) ของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่เตรียมโดยฟันเคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดทางการค้าความเข้มข้น : (ก) 4% (ข) 5% โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการควบคุมการปลดปล่อยยูเรีย ของเม็ดยูเรียที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต (รูปที่ 4.7) พบว่าร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวหนังเคลือบจะมีอัตราลดต่ำลงเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งการฟันเคลือบและความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ สอดคล้องกับผลของเม็ดยูเรียที่เคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า (รูปที่ 4.6) ประกอบกับลักษณะสัณฐานวิทยาของผิวเคลือบที่แสดงในรูปที่ 4.2 จ และ ง ตามลำดับ ที่ปรากฏรูพรุนบนชั้นผิวเคลือบน้อยกว่าผิวเคลือบอื่นๆ ทำให้สามารถกล่าวได้หากชั้นผิวเคลือบมีความสมบูรณ์ ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวหนังเคลือบจะถูกควบคุมโดยความหนาของชั้นผิวเคลือบ

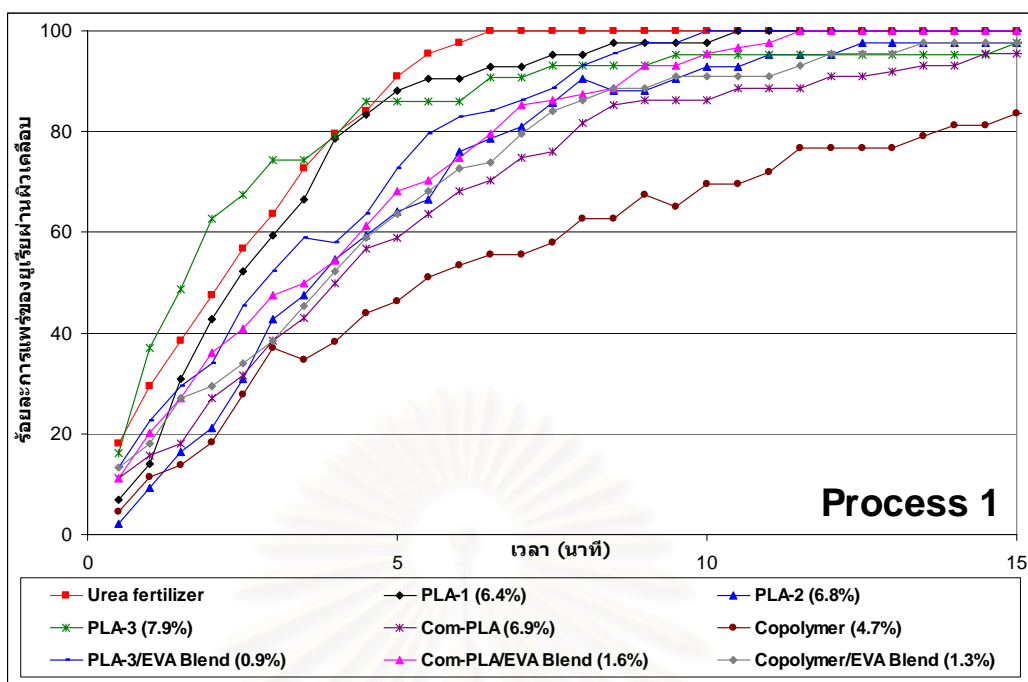


รูปที่ 4.7 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาทีก) ของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่เตรียมโดยฟันเคลือบด้วยสารละลายพอลิแลกติกแอซิด โคเอทิลีนเทรฟทาเลตความเข้มข้น 4% และ 20% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.8 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาทีก) ของปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่เตรียมโดยฟันเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน ไวนิลอะซีเตต กับพอลิแลกติกแอซิด 3 (■) พอลิแลกติกแอซิดทางการค้า (◆) และพอลิแลกติกแอซิด โคเอทิลีนเทรฟทาเลต (▲) (ความเข้มข้น 4% โดยน้ำหนัก จำนวน 3 ครั้ง)

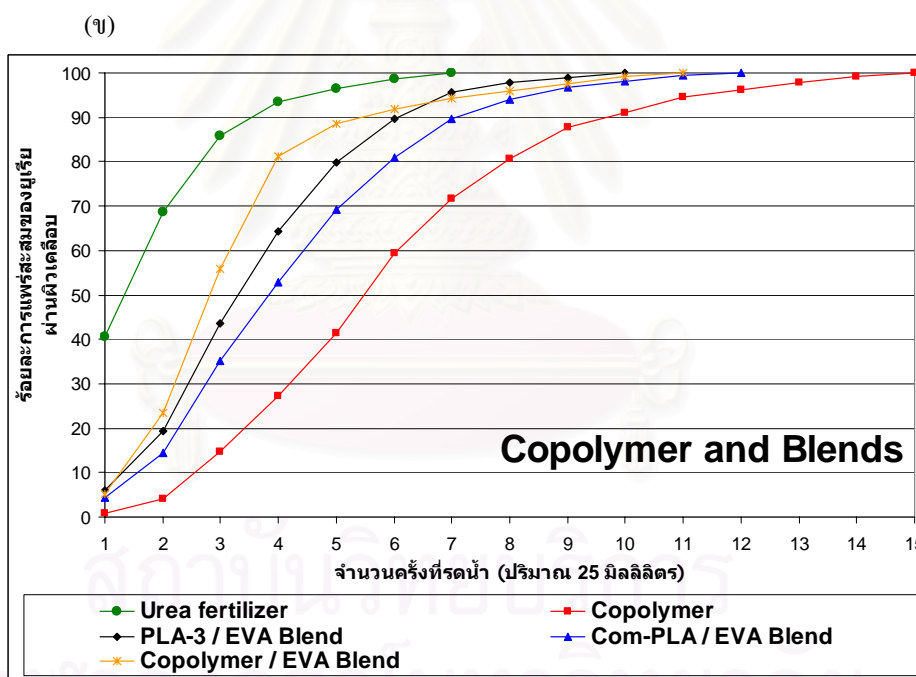
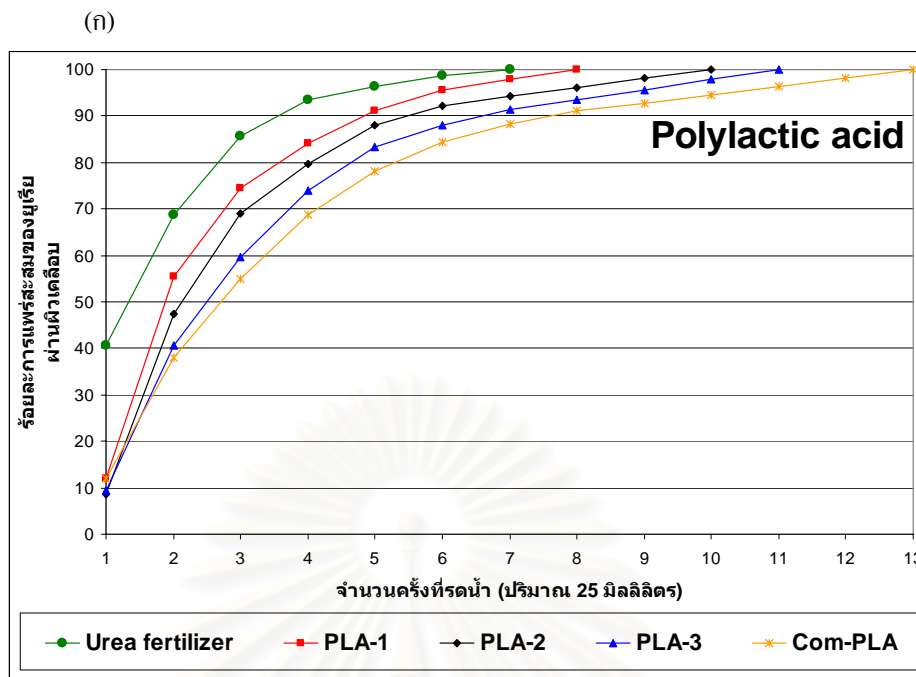
การควบคุมการปลดปล่อยของพอลิเมอร์ผสม (รูปที่ 4.8) สอดคล้องกับกรณีที่ไม่ได้ผสมด้วยพอลิเอทิลีน ไวนิลอะซีเตต นั่นคืออัตราเร็วของการปลดปล่อยยูเรียในพอลิเมอร์ที่ผสมกับพอลิแลกติกแอซิด 3 สูงกว่า Com-PLA Blend และ Copolymer Blend ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาที) ของปุ๋ยที่พ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ต่างๆ ที่มีร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยที่เตรียมด้วยความเข้มข้นสูงสุด และพ่นเคลือบ 3 ครั้ง

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยยูเรียของปุ๋ยที่พ่นเคลือบจำนวน 3 ครั้ง ด้วยสารละลายพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นสูงสุดที่ใช้ในการศึกษา รูปที่ 4.9 แสดงอัตราการปลดปล่อยยูเรียของสารเคลือบชนิดต่างๆ จะเห็นชัดเจนว่าการเคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทรฟทาเลตมีประสิทธิภาพการควบคุมการปลดปล่อยได้ดีที่สุด แม้ว่าร้อยละสารเคลือบมีค่าเพียง 4.7% เมื่อเทียบกับร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยประมาณ 6.9% ของพอลิแลคติกแอซิด 1-3 และพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า นอกจากนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าสารละลายพอลิเมอร์ผสมที่มีค่าร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยประมาณ 1% แต่มีความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยยูเรียดีกว่าพอลิแลคติกแอซิด 1-3 ทั้งนี้เชื่อว่าคุณภาพของผิวเคลือบที่ดีกว่ากรณีพอลิเมอร์ผสมด้วยพอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตต เมื่อเทียบกับผิวเคลือบที่มีรอยแตก รอยแยกของพอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (PLA 1-3) เป็นเพราะสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตต ที่มีความยืดหยุ่นสูง และมีความเป็นผลึกสูง

นอกจากติดตามการควบคุมการปลดปล่อยยูเรียโดยการนำปุ๋ยที่เคลือบผิวไปแช่ในน้ำกลั่นแล้ว การศึกษายังทดสอบด้วยการนำปุ๋ยที่เคลือบผิวผสมกับกรวด แล้วติดตามปริมาณยูเรียที่ปนมาในน้ำรดแต่ละครั้ง



รูปที่ 4.10 : ร้อยละการแพร่สะสมของยูเรียผ่านผิวเคลือบ เทียบกับจำนวนครั้งรดน้ำ เมื่อปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบถูกฝังอยู่ในดิน : (ก) โพลีแลคติกแอซิด 1, 2, 3 และทางการค้า (ข) โพลีแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลีแลคติกแอซิด 3 โพลีแลคติกแอซิดทางการค้า และโพลีแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลตกับเอทิลีน ไวนิลอะซิเตด

จากรูปที่ 4.10 ก-ข แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยโพลีแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลตมีประสิทธิภาพในการชะลอการปลดปล่อยยูเรียสูงสุด ทั้งนี้พบว่าปริมาณยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาแต่ละครั้งที่รดน้ำไม่แตกต่างกันนัก และน้อยกว่าเมื่อเทียบกับยูเรียที่ไม่เคลือบมาก สำหรับประสิทธิภาพของผิวเคลือบที่เป็นโพลี-

แลกดกแอซิดที่สังเคราะห์ขึ้นเอง (พอลิแลกดกแอซิด 1-3) และพอลิแลกดกแอซิดทางการค้าที่แสดงในรูปที่ 4.10 ก พบว่าปริมาณยูเรียในน้ำรดมีค่าสูงสุดในน้ำรดครั้งที่ 2 แล้วลดลงในครั้งต่อไป ทั้งนี้เชื่อว่าการรดน้ำเพียง 2 ครั้งสามารถทำลายผิวเคลือบพอลิเมอร์ที่มีรอยแตกแต่แรกอยู่แล้วให้แตกออก นอกจากนี้รูปที่ 4.10 ข ยังแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ผสม แม้ว่ามีร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยต่ำกว่าแต่ก็มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือดีกว่าพอลิแลกดกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ข้อสรุปดังกล่าวสอดคล้องกับกรณีทดสอบโดยการแช่น้ำ (รูปที่ 4.9)

4.2 ปุ๋ยที่เตรียมโดยการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์

จากที่กล่าวมาข้างต้น คุณภาพผิวเคลือบและปริมาณชั้นเคลือบผิวที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการปลดปล่อย แต่ด้วยข้อจำกัดของความหนืดที่แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลาย ส่งผลต่อความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถพ่นด้วยหัวฉีดสเปรย์ได้ ผนวกกับประสิทธิภาพ (%Efficiency) ของวิธีพ่นเคลือบที่ต่ำ ($\leq 40\%$ โดยประมาณ) การศึกษาจึงมีแนวคิดที่ปรับปรุงวิธีการเคลือบโดยเลือกใช้การหยดเม็ดปุ๋ยที่แช่อยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ลงในตัวทำละลายที่ไม่สามารถละลายพอลิเมอร์ เพื่อให้ปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ ตกตะกอน (Precipitation) ลงมา

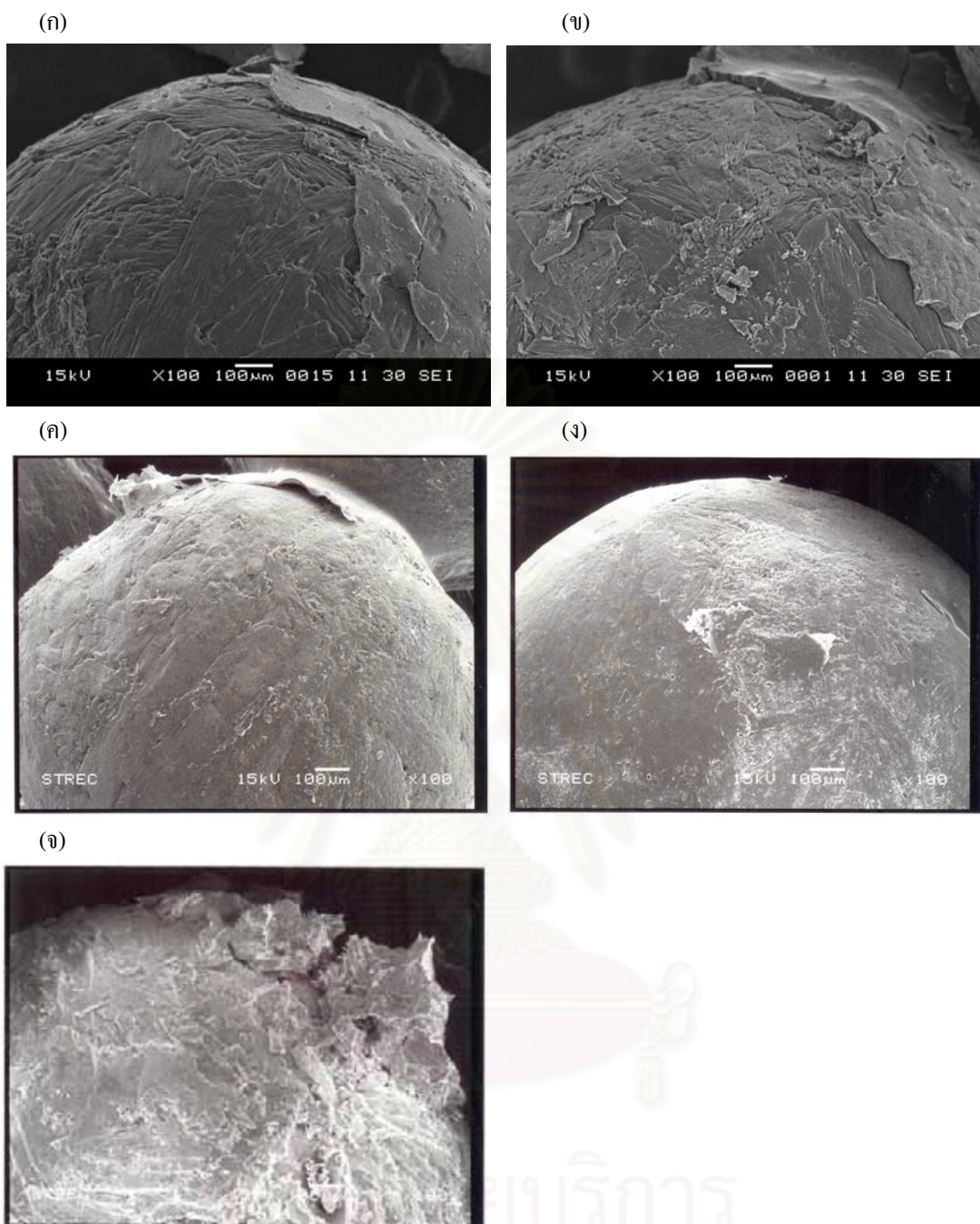
ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพของการเคลือบ (% Efficiency) ที่สัมพันธ์กับชนิดพอลิเมอร์ และความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

พอลิเมอร์	ความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์	ประสิทธิภาพของการเคลือบ (% Efficiency)
PLA-1 ($M_n \sim 8 \times 10^3$)	20%	44.1%
PLA-2 ($M_n \sim 2 \times 10^4$)	20%	44.9%
PLA-3 ($M_n \sim 3.5 \times 10^4$)	20%	58.6%
	40%	50.9%
Com-PLA (NatureWorks [®] , 4042D)	4%	62.2%
	5%	63.0%
	12%	69.9%
	20%	70.7%
	30%	86.3%
Copolymer	40%	90.4%
	4%	65.5%
	5%	71.0%
	20%	40.4%
	30%	51.7%
	40%	66.1%

ประสิทธิภาพของการเคลือบ (ตารางที่ 4.5) ของปุ๋ยที่เตรียมโดยวิธีการใหม่นี้มีค่าสูงกว่ากรณีพ่นเคลือบมาก (ตารางที่ 4.4) นอกจากนี้ตารางที่ 4.5 แสดงได้ชัดว่าสามารถพัฒนาปุ๋ยเคลือบที่มีร้อยละสารเคลือบที่สูงขึ้นได้ โดยเพิ่มความเข้มข้น ทั้งนี้พบว่ากรณีพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงอย่างพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า ความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถเตรียมปุ๋ยด้วยวิธีใหม่คือ 40% โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงกว่านี้จะไม่สามารถหยดเม็ดปุ๋ยเป็นเม็ดๆได้

ตารางที่ 4.6 ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย (% Coated material) ที่สัมพันธ์กับชนิดพอลิเมอร์ และความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

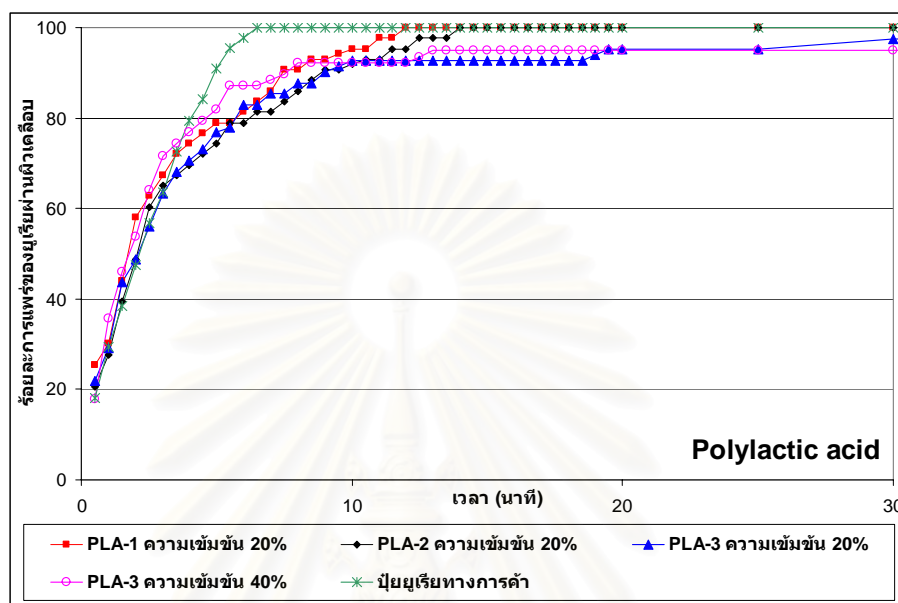
พอลิเมอร์	ความเข้มข้น สารละลายพอลิเมอร์	ร้อยละสารเคลือบบนผิว ของเม็ดปุ๋ย (%Coating)
PLA-1 (Mn ~ 8×10^3)	20%	8.8%
PLA-2 (Mn ~ 2×10^4)	20%	9.0%
PLA-3 (Mn ~ 3.5×10^4)	20%	9.7%
	40%	17.8%
Com-PLA (NatureWorks [®] , 4042D)	4%	3.0%
	5%	3.2%
	12%	7.0%
	20%	13.3%
	30%	18.3%
Copolymer	40%	22.8%
	4%	3.3%
	5%	4.0%
	20%	6.2%
	30%	9.9%
	40%	16.6%



รูปที่ 4.11 : รูปถ่าย SEM กำลังขยาย 100 เท่า ของพื้นผิวปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ โดยใช้ความเข้มข้นสูงสุด : (ก) PLA-1 (8.8%), (ข) PLA-2 (9.0%), (ค) PLA-3 (17.8%), (ง) Com-PLA (22.8%), (จ) Copolymer (16.6%)

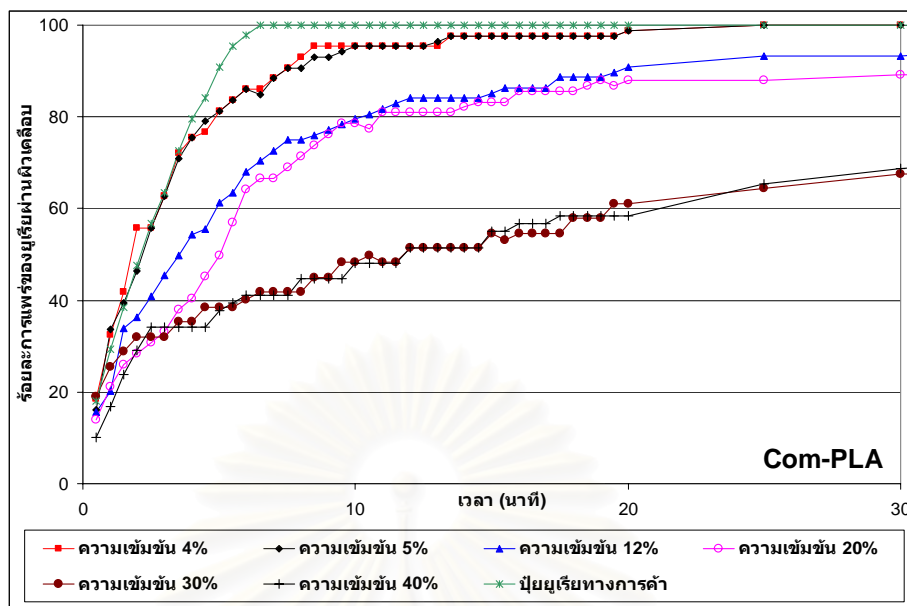
รูปที่ 4.11 ก-จ แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของผิวเคลือบ สังเกตพบว่าเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ความหนืดสูง ค่าร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยก็จะสูงตามไปด้วย (รูปที่ 4.11 ง) อีกทั้งคุณภาพของผิวเคลือบที่ได้ก็จะมีความสม่ำเสมอและเรียบเนียนมากกว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ความหนืดต่ำ

ประสิทธิภาพของการชะลอการปลดปล่อยของปฏิกิริยาของปฏิกิริยาที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ แสดงด้วยค่าร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวหนังเคลือบ (% Dissolution) ที่เวลาทดสอบต่างๆ (ข้อมูลดิบจากการทดลองแสดงเอาไว้ในภาคผนวก ก.)



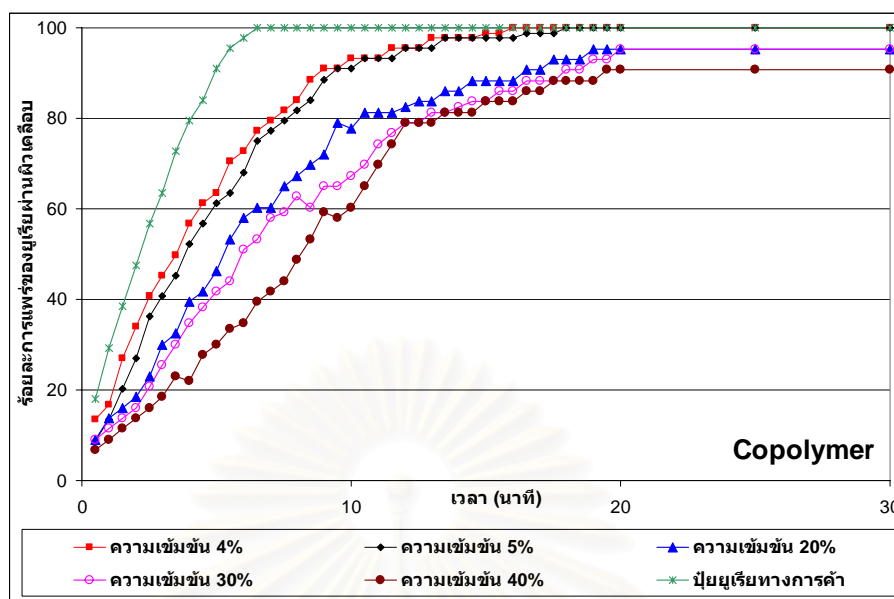
รูปที่ 4.12 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวหนังเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาทื) ของปฏิกิริยาที่จุ่มลงในสารละลายพอลิแลคติกแอซิด 1, 2, 3 ความเข้มข้น 20% และ 40% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อบุหรี่ที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด 1, 2, 3 แม้จะมีร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวหนังเคลือบต่ำกว่าปฏิกิริยาทางการค้า แต่กลับไม่เห็นผลที่มาจากตัวแปรชนิดและความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์อย่างเด่นชัด อีกทั้งยังพบว่าช่วง 20 นาทืแรกของการทดสอบ ปฏิกิริยาที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด 3 ความเข้มข้น 40% โดยน้ำหนัก กลับมีอัตราการแพร่ของยูเรียผ่านผิวหนังเคลือบสูงกว่าความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก ซึ่งขัดแย้งกับปริมาณร้อยละสารเคลือบบนผิวของเมื่อบุหรี่ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวหนังเคลือบระหว่างรูปที่ 4.3 - 4.5 กับรูปที่ 4.12 พบว่าแม้ร้อยละการแพร่ของยูเรียที่เคลือบด้วยกระบวนการใหม่นี้จะมีค่าสูงกว่า (ตารางที่ 4.3 และ 4.6) แต่ความสามารถชะลอการปลดปล่อยยูเรียใกล้เคียงกัน จึงเชื่อว่าเป็นผลจากสารละลายพอลิแลคติกแอซิด 1-3 มีความหนืดต่ำ เมื่อทำการผสมเข้ากับเมื่อบุหรี่ขดลงในตัวกลางแล้ว จะเกิดการแพร่แยกออกจากเมื่อบุหรี่มากกว่าจะรวมติดเป็นเนื้อเดียวรอบเมื่อบุหรี่ ผิวเคลือบที่ได้จึงมีรูพรุนและรอยแตกขนาดใหญ่ ทำให้แม้จะมีปริมาณผิวเคลือบมากกว่าก็ยังควบคุมการปลดปล่อยได้ในระดับใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.11 ก-ค)



รูปที่ 4.13 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาที) ของปุ๋ยที่จุ่มลงในสารละลายพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า ความเข้มข้น 4%, 5%, 12%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนัก

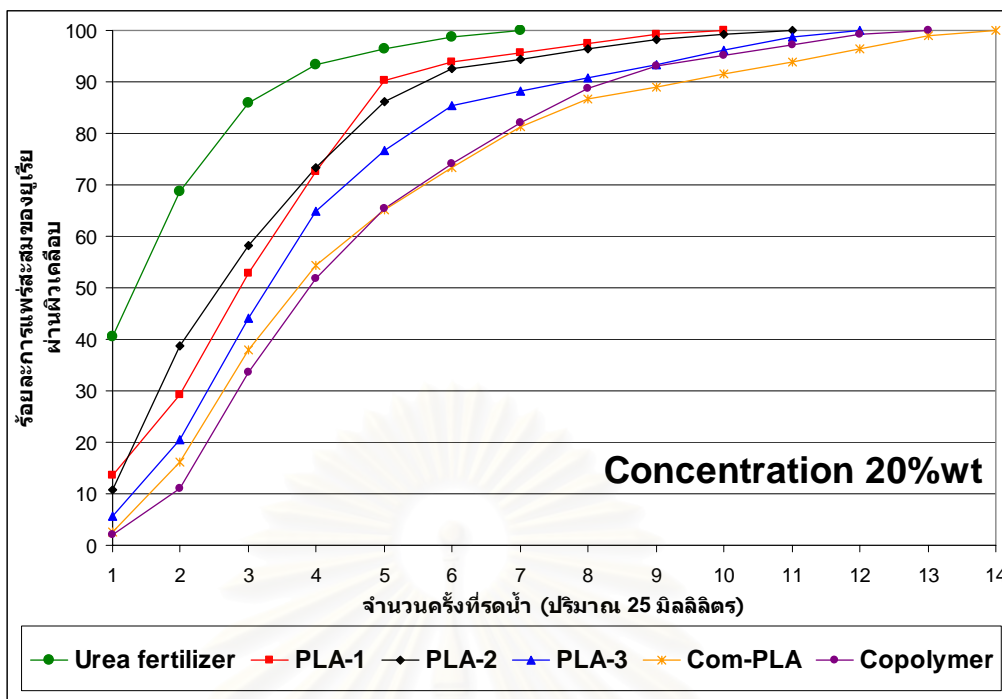
รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า จะมีร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบต่ำกว่าปุ๋ยยูเรียทางการค้าอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ลักษณะสันฐานวิทยาของผิวเคลือบที่แสดงในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบมีความสมบูรณ์มากกว่าการเคลือบด้วยพอลิเมอร์อื่น โดยหากพิจารณาตารางที่ 4.5 จะพบว่าเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดทางการค้าเพียงชนิดเดียว ที่มีประสิทธิภาพของการเคลือบเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับปริมาณร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย (ตารางที่ 4.6) ทั้งนี้เชื่อว่าเป็นผลจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดทางการค้าที่สูงมากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น (ตารางที่ 4.1) จึงมีความหนืดสูงกว่าสารละลายพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ความเข้มข้นเดียวกัน (ตารางที่ 4.2) ดังนั้นเมื่อหยดเม็ดปุ๋ยที่ห่อหุ้มด้วยสารละลายพอลิเมอร์ลงในตัวกลาง ผิวเคลือบสามารถยึดติดรอบผิวของเม็ดปุ๋ยได้อย่างสมบูรณ์มากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.13 กับรูปที่ 4.6 พบว่าปุ๋ยที่ผลิตจากสารละลายความเข้มข้น 4-5% โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบสามารถชะลอกการปลดปล่อยยูเรียดีกว่า แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย $\geq 12\%$ อัตราการปลดปล่อยยูเรียของผิวเคลือบช้าลงกว่ากรณีไม่เคลือบมาก (รูปที่ 4.13) และความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดทางการค้าที่เหมาะสมต่อกระบวนการเตรียมปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบด้วยการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ คือความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากมีอัตราการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบเทียบเท่ากับความเข้มข้น 40% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับในด้านปริมาณสารที่ใช้แล้ว จะเห็นว่าสารละลายพอลิแลคติกแอซิดทางการค้าความเข้มข้น 30% โดยน้ำหนัก จะใช้สารพอลิเมอร์ในปริมาณที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.14 : ร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ (นาที) ของปุ๋ยที่จุ่มลงในสารละลายพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต ความเข้มข้น 4%, 5%, 20%, 30% และ 40% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.14 แสดงร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ในน้ำกลั่น ของเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต ซึ่งจะมีอัตราการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบต่ำกว่าปุ๋ยยูเรียทางการค้าอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบให้มากขึ้นเช่นเดียวกับในสารละลายพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะลอการปลดปล่อยยูเรียของปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายความเข้มข้น 20% และ 40% โดยน้ำหนัก พบว่าผิวเคลือบด้วยพอลิแลคติกแอซิดทางการค้าสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิแลคติกแอซิด 3 - 1 ตามลำดับ

อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาจากการทดสอบโดยนำปุ๋ยเคลือบด้วยพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก มาผสมกับกรวดแล้วติดตามปริมาณยูเรียในน้ำรด (รูปที่ 4.15) พบว่าผิวเคลือบจากพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า และพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลตมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก อีกทั้งดีกว่าพอลิเมอร์อื่นอย่างเห็นได้ชัด

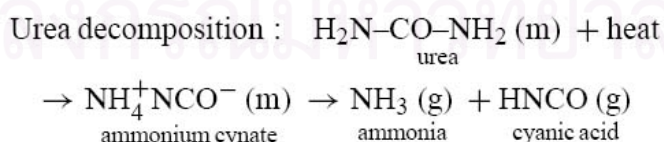


รูปที่ 4.15 : ร้อยละการแพร่สะสมของยูเรียผ่านผิวเคลือบ เทียบกับจำนวนครั้งรดน้ำ เมื่อปุ๋ยเคลือบด้วยสารละลายพอลิแลคติกแอซิด และพอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทรฟเทเลตที่ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก

4.3 ปุ๋ยที่เตรียมโดยการเคลือบด้วยความร้อน

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาข้างต้น คุณภาพผิวเคลือบและปริมาณชั้นเคลือบผิวที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการปลดปล่อย แต่ด้วยข้อจำกัดต่างๆที่ทำให้กระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ และการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ ไม่สามารถใช้สารละลายพอลิเมอร์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ (ตารางที่ 4.4 และ 4.5) การศึกษาจึงมีแนวคิดที่ปรับปรุงวิธีการเคลือบโดยการหลอมพอลิเมอร์ให้เหลวเพื่อเคลือบลงบนผิวของเม็ดปุ๋ยโดยตรงขึ้นมา

ในการทดลองเบื้องต้นได้เลือกใช้ผงพอลิแลคติกแอซิด 3 แต่เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมพอลิแลคติกแอซิดสูงถึง 180 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิสลายตัวของยูเรีย เป็นผลให้ผิวเคลือบเกิดรูพรุนที่สามารถมองได้ด้วยตาเปล่าจำนวนมาก เนื่องจากการแทรกออกของแก๊สที่เกิดจากการเปลี่ยนสภาพของยูเรียขึ้น (รูปที่ 4.16)



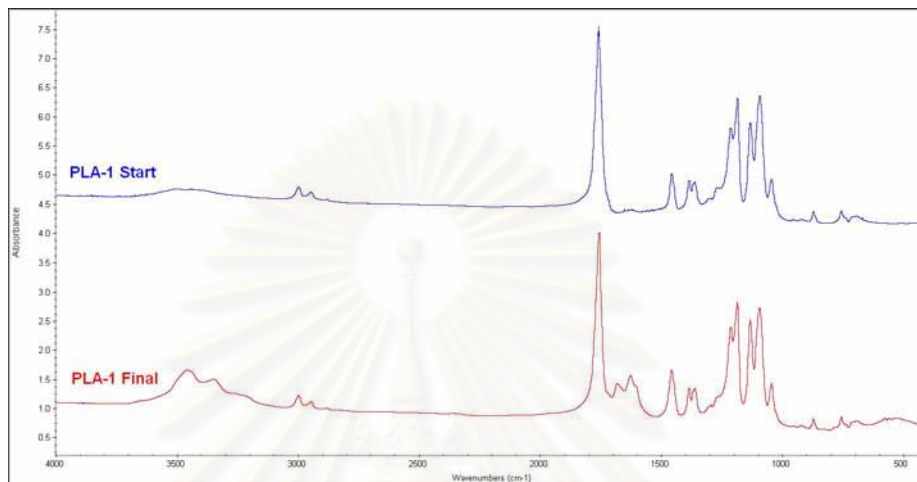
รูปที่ 4.16 : สมการสลายตัวของยูเรียด้วยความร้อน (อุณหภูมิ ~ 133 องศาเซลเซียส) [20]

แม้จะไม่ได้ทำการตรวจสอบปริมาณยูเรียที่ไม่เกิดการสลายตัว แต่ด้วยสภาพของผิวเคลือบที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก จึงสามารถกล่าวได้ว่าปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบไม่สามารถผลิตได้จากวิธีนี้

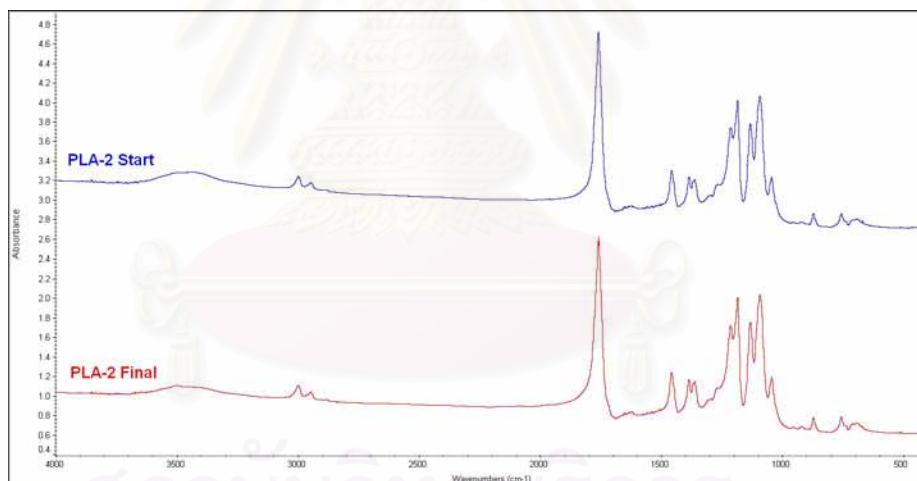
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างเคมีและเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์และฟิวเคิลือบ

โครงสร้างเคมีและเสถียรภาพทางความร้อนที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ตามลำดับ ของพอลิเมอร์เปรียบเทียบกับฟิวเคิลือบที่ผลิตจากการทดสอบร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ย แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

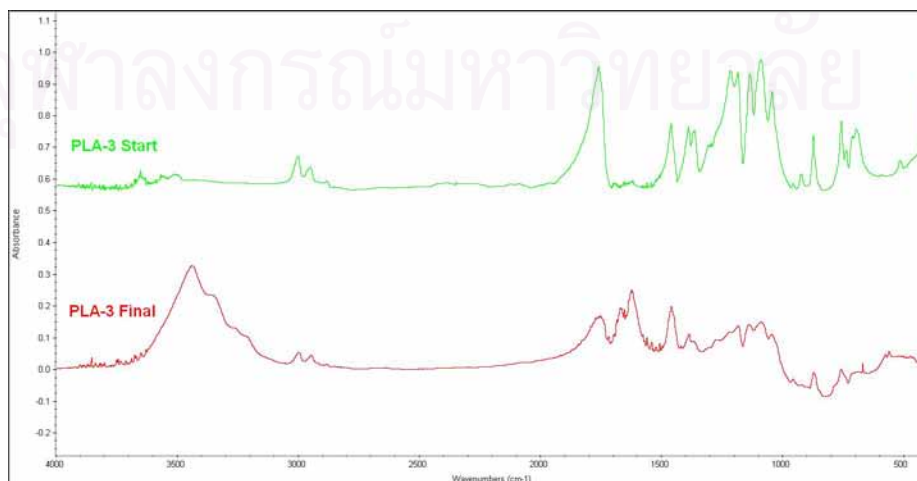
(ก)



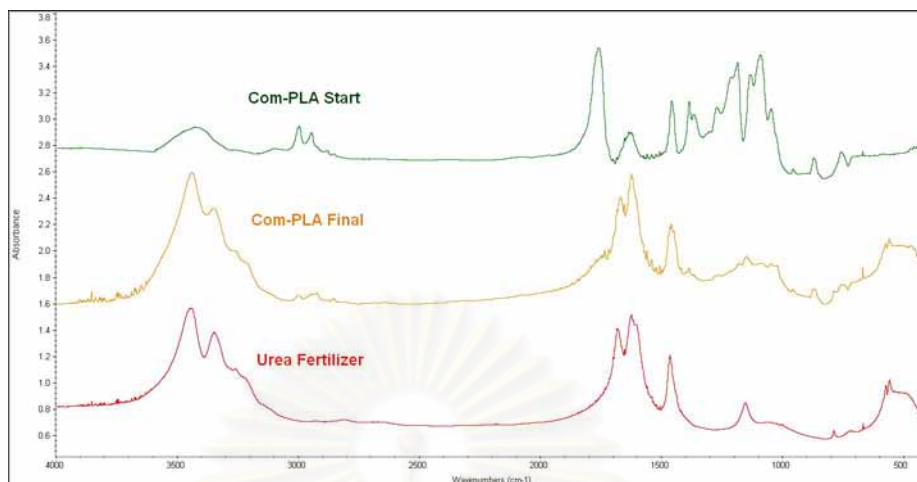
(ข)



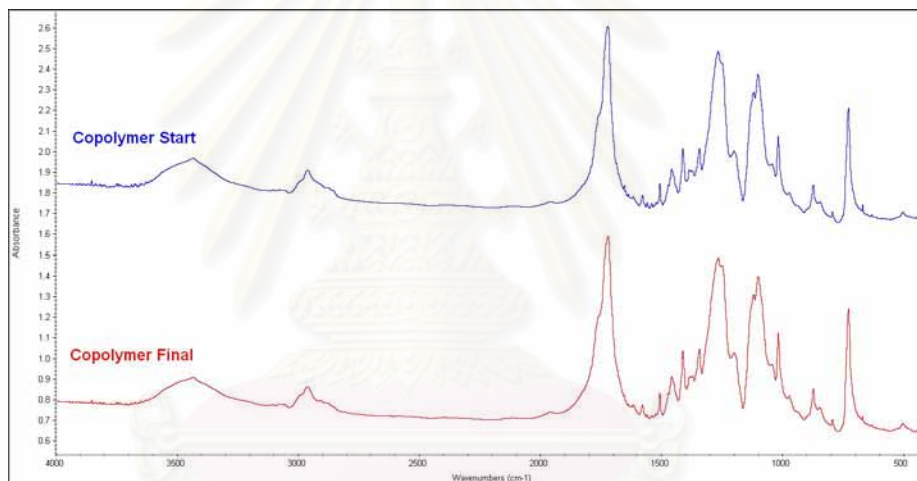
(ค)



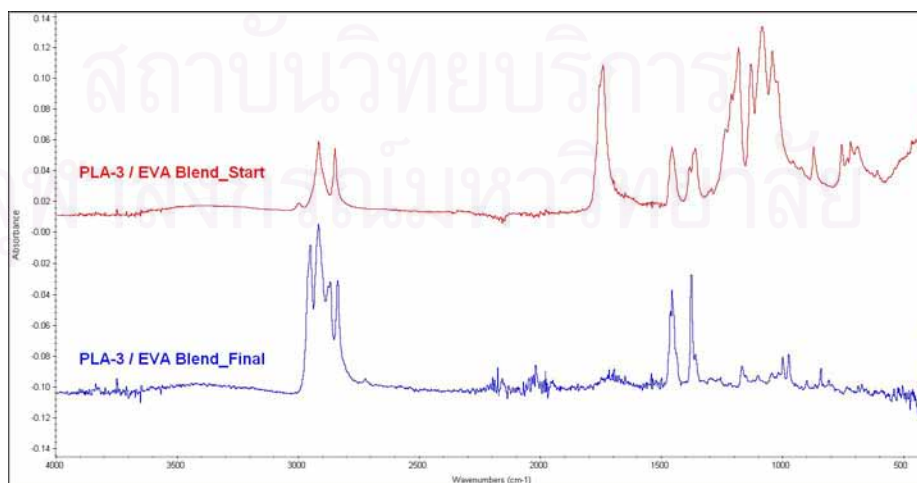
(ง)



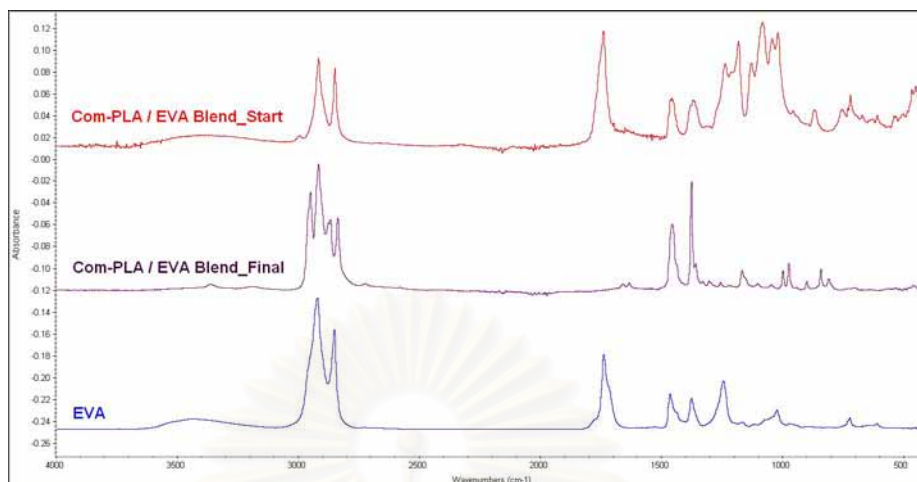
(จ)



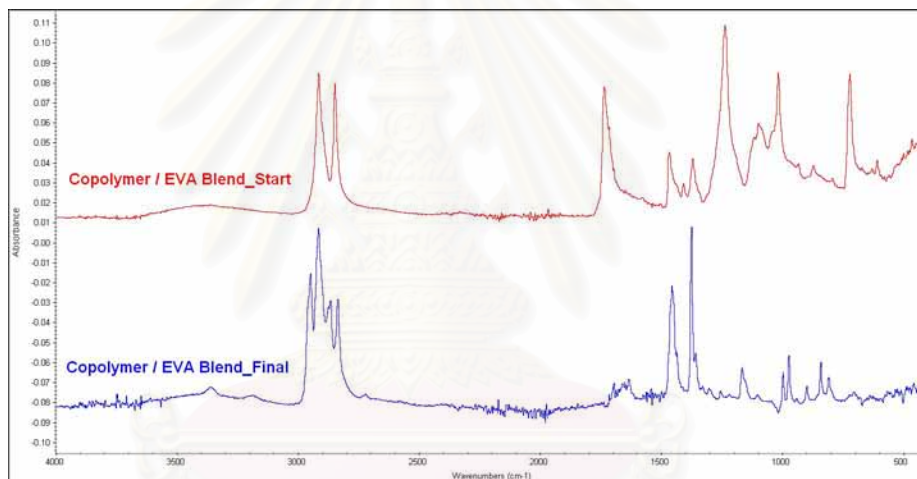
(ฉ)



(ง)



(ข)



รูปที่ 4.17 : FTIR spectra ของพอลิเมอร์ (รูปบน) และฟิวเคลือบ (รูปล่าง) หลังทำการทดสอบร้อยละสารเคลือบ ในปีที่พื้นเคลือบด้วย (ก) PLA-1, (ข) PLA-2, (ค) PLA-3, (ง) Com-PLA, (จ) Copolymer, (ฉ) PLA-3 / EVA Blend, (ช) Com-PLA / EVA Blend, (ซ) Copolymer / EVA Blend

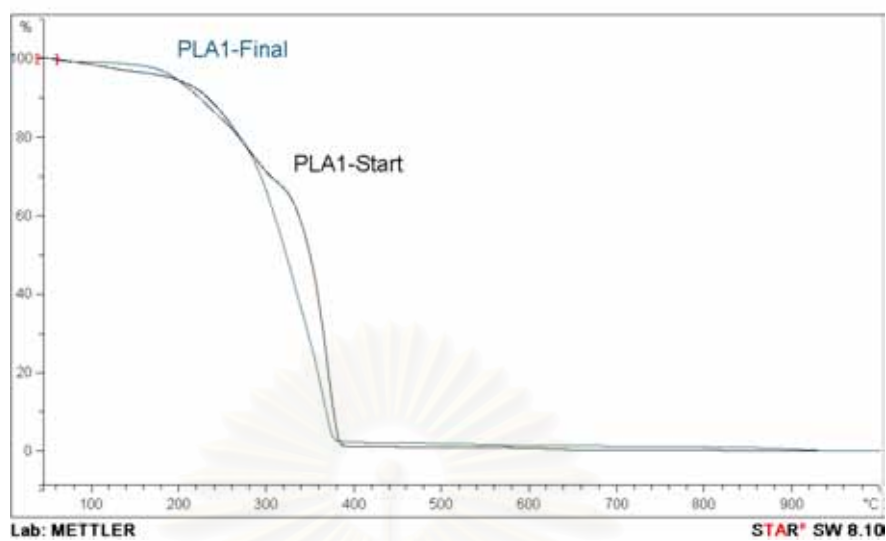
เมื่อพิจารณาช่วงการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญจาก FTIR spectra (ตารางที่ 4.7) ของพอลิเมอร์ก่อน และหลังใช้งานเป็นฟิวเคลือบ (เตรียมโดยพื้นเคลือบ) พบว่า Spectra ทั้งสองของพอลิแลคติกแอซิด 1 - 2 (รูปที่ 4.17 ก-ข) และพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต (รูปที่ 4.17 จ) ไม่แตกต่างกัน แต่พบความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดในกรณีพอลิแลคติกแอซิด 3 (รูปที่ 4.17 ค), พอลิแลคติกแอซิดทางการค้า (รูปที่ 4.17 ง) และพอลิเมอร์ผสมทั้ง 3 ชนิด (รูปที่ 4.17 ฉ-ซ) ไม่พบความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเคมีจากพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ อย่างพอลิแลคติกแอซิด 1-2 และพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต ทำให้เชื่อว่าด้วยระยะเวลาไม่นานที่ฟิวเคลือบแช่อยู่ในน้ำกลั่นระหว่างการทดสอบหาร้อยละสารเคลือบ ไม่ส่งผลให้พอลิเมอร์ดังกล่าวเกิดการไฮโดรไลซิสของสายโซ่โมเลกุลมากนัก

ตารางที่ 4.7 หมู่ฟังก์ชันสำคัญ และ Wavenumber ของพอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟ-
เทเลต ยูเรีย และพอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตดที่ปรากฏบน FTIR spectra

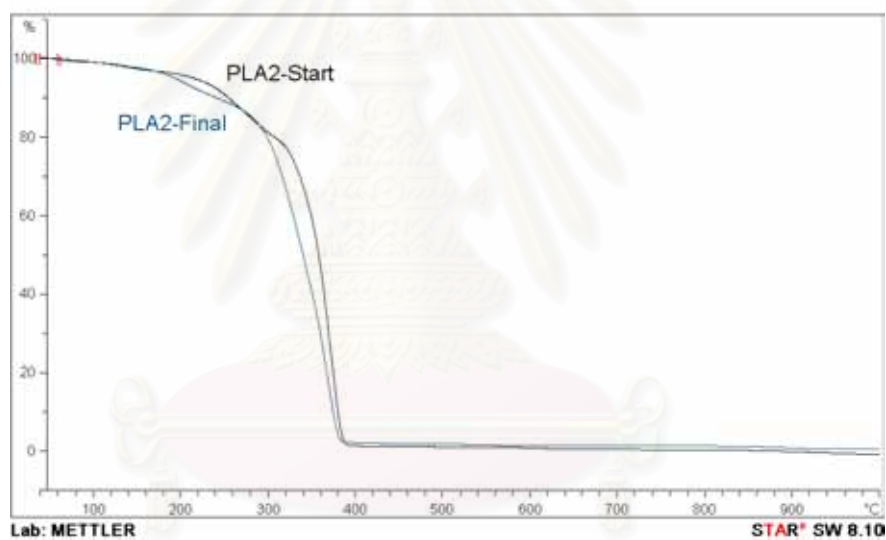
ชนิด	หมู่ฟังก์ชัน	Wavenumber (cm ⁻¹)
พอลิแลคติกแอซิด	-C-H stretching	3,000-3,110
	-C=O stretching	1,600-1,950
	-C-O-C- stretching	1,070-1,280
	-(C=O)-O- stretching	1,070-1,280
พอลิแลคติกแอซิด โคเอทิลีนเทรฟเทเลต	-C-H stretching	3,000-3,110
	-C=O stretching	1,600-1,950
	-C=C- stretching (Aromatic ring)	1,500 / 1,600
	-C-O-C- stretching	1,070-1,280
	-(C=O)-O- stretching	1,070-1,280
ยูเรีย	-N-H stretching	2,700-3,800
	-C=O stretching	1,700-1,800
	-C-N stretching	1,000-1,400
พอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตด	C-H stretching (Alkane)	2,800-3,000
	-C=O stretching	1,600-1,950
	-C-O-C- stretching	1,070-1,280

สำหรับกรณีของ FTIR spectra ของผิวเคลือบพอลิแลคติกแอซิด 3 พอลิแลคติกแอซิดทางการค้า (รูปที่ 4.17 ก-ง) พบการดูดกลืนในช่วง Wavenumber ต่างๆที่ใกล้เคียงกับหมู่ฟังก์ชันของยูเรียและพอลิเมอร์ จึงกล่าวได้ว่าความแตกต่างระหว่าง Spectra เกิดจากปริมาณยูเรียที่คงเหลือปนอยู่ในผิวเคลือบ แต่ในกรณี FTIR spectra ของผิวเคลือบพอลิเมอร์ผสม สังเกตพบว่าส่วนใหญ่ช่วงการดูดกลืนหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching รวมถึงลักษณะการดูดกลืนในช่วง 500-1,300 ที่เป็นลักษณะ Fingerprint ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟเทเลตหายไป อย่างไรก็ตามไม่อาจสรุปได้ว่าผิวเคลือบของพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยเฉพาะพอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตดเนื่องจากไม่สอดคล้องกับผลของ TGA ในรูปที่ 4.18 ก-ข จะเห็นได้ว่า TGA thermogram ของพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด และผิวเคลือบมีลักษณะที่ผนวกทั้งของพอลิเอทิลีนไวนิลอะซีเตด และพอลิเมอร์ที่นำมาผสม โดยมีเสถียรภาพทางความร้อนอยู่ระหว่างพอลิเมอร์คู่ผสม ทำให้เชื่อว่าผิวเคลือบของพอลิเมอร์ประกอบด้วยพอลิเมอร์สองชนิด แต่เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมเหล่านี้มีลักษณะเป็น Immiscible blend เป็นผลให้มีการกระจายตัวของแต่ละชนิดพอลิเมอร์บนผิวเคลือบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นผลการวิเคราะห์จึงขึ้นอยู่กับวิธีสุ่มตัวอย่าง

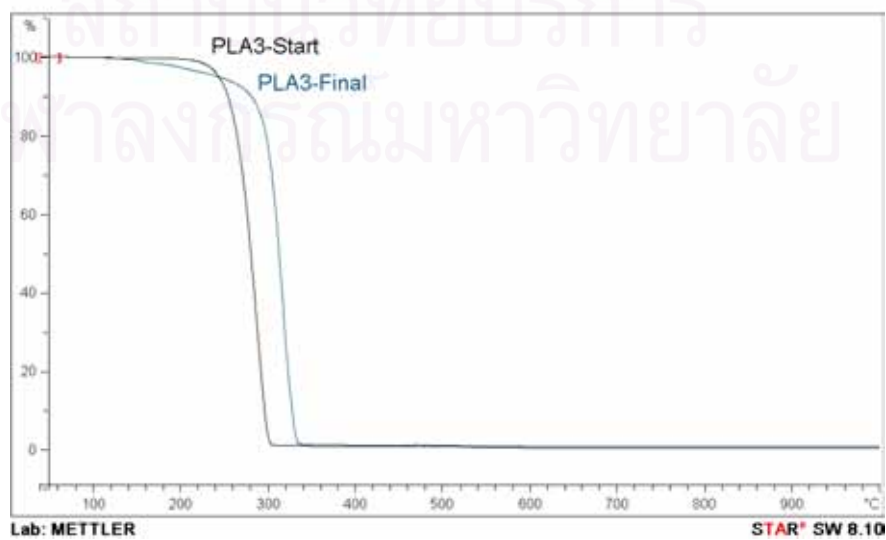
(ก)



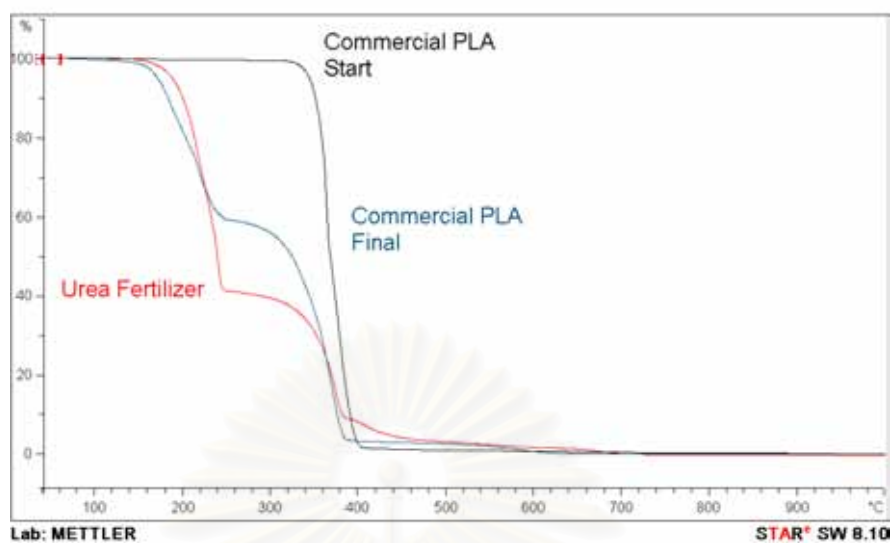
(ข)



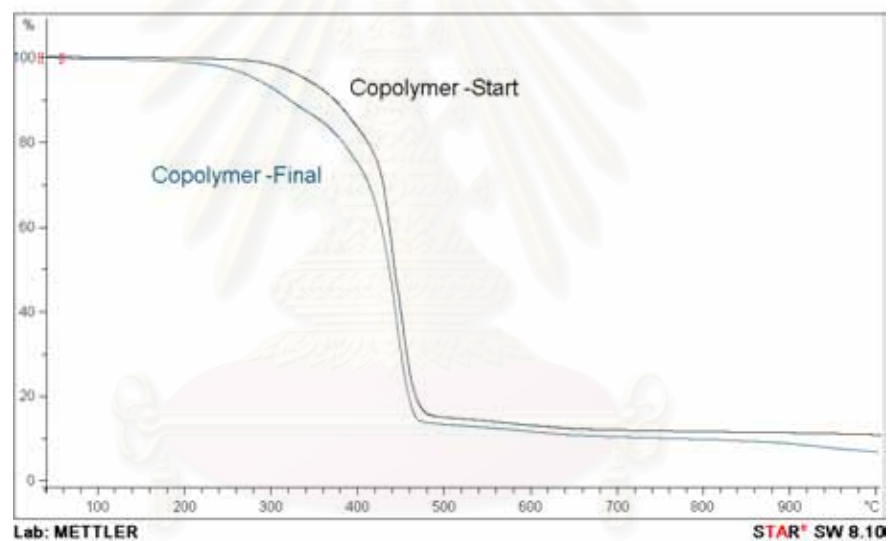
(ค)



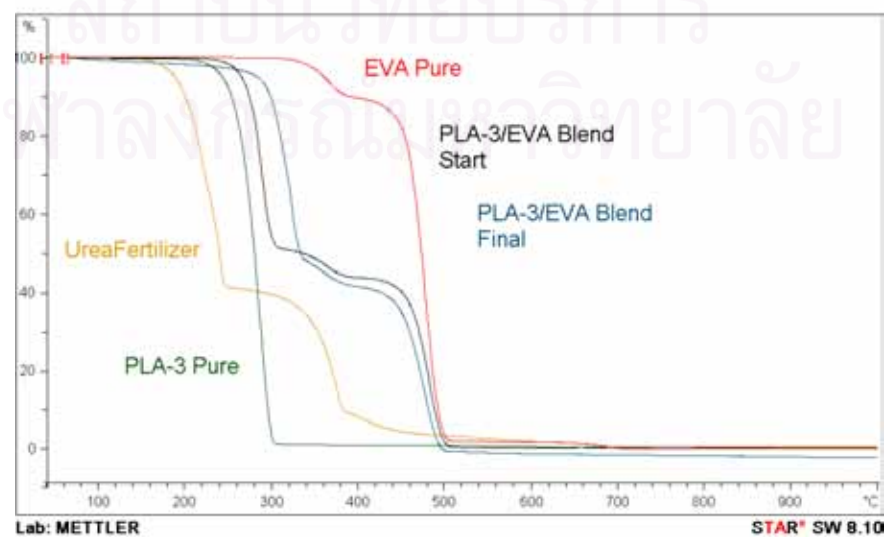
(ง)



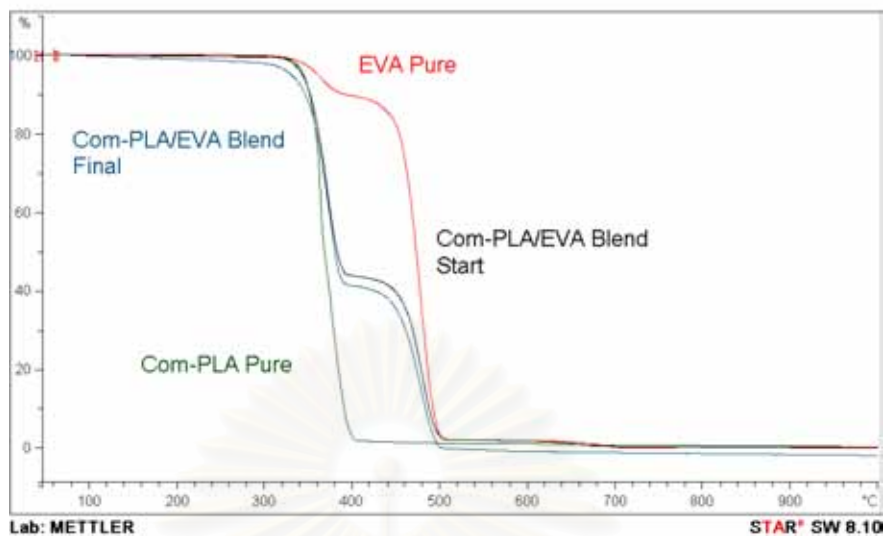
(จ)



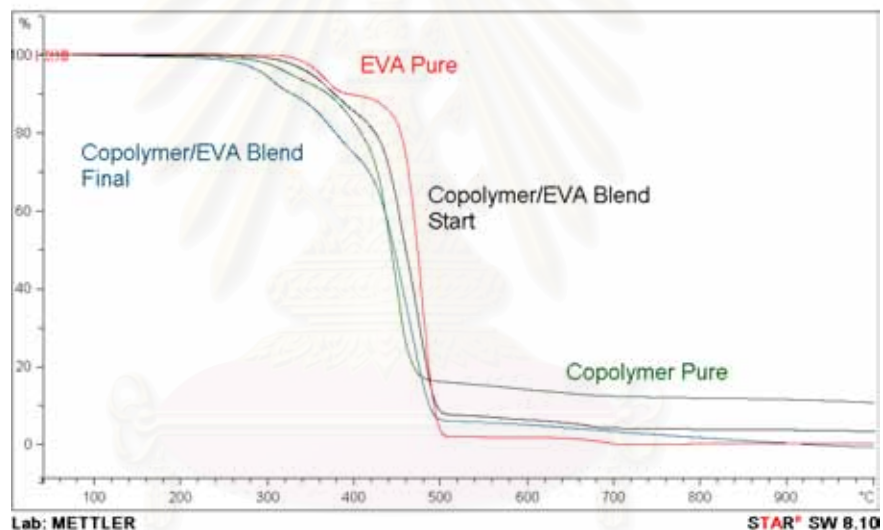
(ฉ)



(ง)



(จ)



รูปที่ 4.18 : TGA thermogram วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการเตรียมปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบ และผิวเคลือบพอลิเมอร์หลังจากทำการทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ เมื่อ (ก) PLA-1, (ข) PLA-2, (ค) PLA-3, (ง) Com-PLA, (จ) Copolymer, (ฉ) PLA-3/EVA Blend, (ช) Com-PLA/EVA Blend, (ซ) Copolymer/EVA Blend

เมื่อเปรียบเทียบ TGA thermogram ของพอลิเมอร์และผิวเคลือบ พบว่าโดยทั่วไปเทอร์โมแกรมของผิวเคลือบมีเสถียรภาพต่างจากของพอลิเมอร์ที่ใช้เล็กน้อย ยกเว้นกรณีผิวเคลือบของพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า (รูปที่ 4.18 ง) ที่มีลักษณะเทอร์โมแกรมต่างจากของพอลิแลคติกแอซิดทางการค้ามาก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากเทอร์โมแกรมของยูเรีย และ FTIR spectra (รูปที่ 4.17 ง) ทำให้สรุปได้ว่าเกิดเนื่องจากยูเรียที่คงเหลืออยู่ นอกจากนี้สังเกตได้ว่าผิวเคลือบของพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำอย่างพอลิแลคติกแอซิด 1-2 พอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลต และพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิดโคเอทิลีนเทรฟทาเลตมีเสถียรภาพทางความร้อนน้อยกว่าของพอลิเมอร์เริ่มต้น ในขณะที่ผิวเคลือบของพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ได้แก่พอลิแลคติกแอซิด 3 พอลิเมอร์-

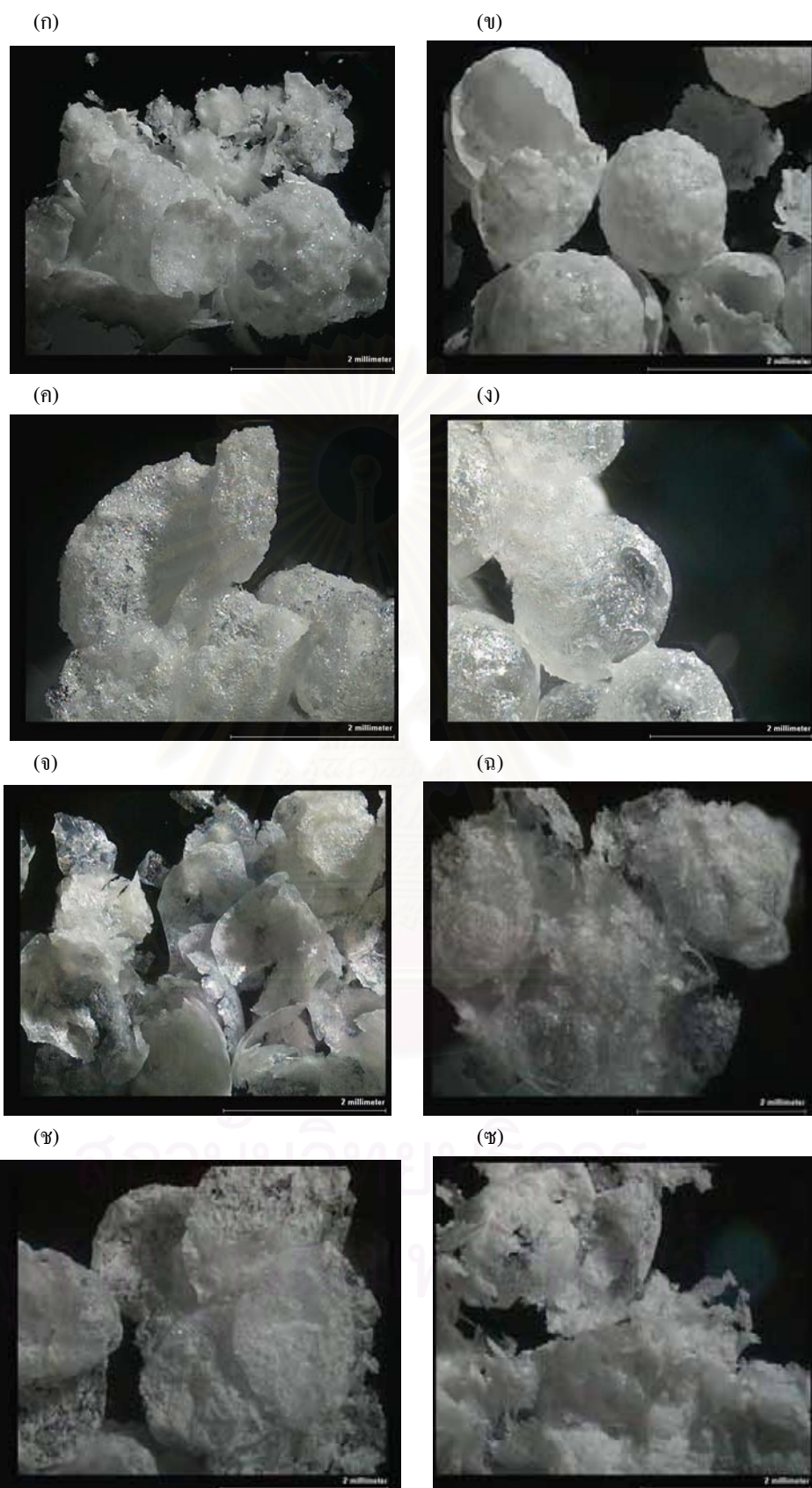
ผสมของพอลิแลคติกแอซิด 3 และพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า มีเสถียรภาพทางความร้อน-ไกล์เคียงหรือดีกว่าพอลิเมอร์เริ่มต้น จากข้อมูลดังกล่าวอาจสรุปได้ว่าพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำเกิดการไฮโดรไลซิสได้บ้าง แต่เมื่อมีความเป็นไปได้อาจมีอยู่เรียบนอยู่บ้างบางส่วน จึงไม่สามารถหาข้อสรุปได้อย่างแน่ชัด

4.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์

สัณฐานวิทยาของผิวเคลือบพอลิเมอร์หลังทดสอบร้อยละสารเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ก-ข

รูปที่ 4.19 ก-ข แสดงผิวเคลือบที่มีลักษณะการแตกออกแตกต่างกันตามชนิดพอลิเมอร์ พบว่าพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูงผิวเคลือบจะยังคงรูปอยู่ได้มาก โดยพบลักษณะผิวเคลือบที่ขรุขระของพอลิแลคติกแอซิด 3 (รูปที่ 4.19 ค) และผิวเคลือบที่มีลักษณะทรงกลมเกือบสมบูรณ์ในกรณีพอลิแลคติกแอซิดทางการค้า (รูปที่ 4.19 ง) ขณะที่ผิวเคลือบของพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ และพอลิเมอร์ผสมที่เกิดการแยกเฟสแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ เมื่อพิจารณาจาก SEM ของผิวเคลือบของเม็ดปุ๋ยที่พบรอยแตกจำนวนมากในพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำตั้งแต่แรก (รูปที่ 4.2) ดังนั้นเมื่ออยู่เรียทำปฏิกิริยากับน้ำที่ซึมและแพร่ผ่านผิวเคลือบตามรอยแตก จะเกิดเป็นแอมโมเนียมไอออน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดันผิวเคลือบให้แตกออกมากขึ้น จนในที่สุดแตกเป็นชิ้นเล็กๆ ตามสมการที่ (4.1)





รูปที่ 4.19 : รูปถ่ายกำลังขยาย 40 เท่า ของคิวบ์ฟั่นเคลือบหลังทดสอบร้อยละสารเคลือบ : (ก) PLA-1 (6.4%), (ข) PLA-2 (6.8%), (ค) PLA-3 (7.9%), (ง) Com-PLA (6.9%), (จ) Copolymer (9.2%), (ฉ) PLA-3/EVA Blend (0.9%), (ช) Com-PLA/EVA Blend (1.6%), (ซ) Copolymer/EVA Blend (1.3%)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มจำนวนครั้งการพ่นในการเคลือบเม็ดปุ๋ย ด้วยวิธีการพ่นเคลือบ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการจุ่มเคลือบ

5.1.2 เมื่อพิจารณาจากการคำนวณค่าประสิทธิภาพของการเคลือบ พบว่ากระบวนการจุ่มเคลือบมีประสิทธิภาพมากกว่ากระบวนการพ่นเคลือบ ทั้งนี้ในกรณีกระบวนการพ่นเคลือบพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งการพ่นเคลือบจะทำให้อัตราการสูญเสียปริมาณสารละลายพอลิเมอร์สูงขึ้น แม้ว่าปริมาณร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม

5.1.3 จากความหนืดที่วัดด้วย Brookfield Viscometer แสดงให้เห็นว่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นและเลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นผลให้เกิดข้อจำกัดในการเตรียมด้วยวิธีการพ่นเคลือบ โดยความหนืดสูงสุดของสารละลายพอลิเมอร์ที่สามารถพ่นได้ด้วยหัวฉีดสเปรย์อยู่ที่ประมาณ 1,000 Centipoise (วัดด้วยอัตรา 1 R.P.M.)

5.1.4 ปุ๋ยเคลือบที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยสามารถชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีกว่าปุ๋ยยูเรียปกติ โดยอัตราเร็วในการปลดปล่อยยูเรียจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณร้อยละสารเคลือบบนผิวของเม็ดปุ๋ยและความสมบูรณ์ของชั้นผิวเคลือบตามปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ โดยทั่วไปพบว่า ความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียไม่สอดคล้องกับปริมาณผิวเคลือบที่อยู่บนเม็ดปุ๋ย โดยเฉพาะในกรณีปุ๋ยที่เตรียมจากพอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอย่างพอลิแลคติกแอซิด 1 แต่ในกรณีที่ใช้พอลิแลคติกแอซิดทางการค้าพบว่าเมื่อปริมาณร้อยละสารเคลือบมากขึ้น ปุ๋ยที่เตรียมได้จะสามารถชะลอการปลดปล่อยได้ดีกว่า ทั้งนี้จากฐานวิทยาศาสตร์แสดงให้เห็นว่าชั้นผิวเคลือบของพอลิแลคติกแอซิดทางการค้าสมบูรณ์มากกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในกรณีชั้นเคลือบที่มีรอยแตกมาก แม้จะมีปริมาณชั้นเคลือบมากขึ้นก็ไม่สามารถชะลอการปลดปล่อยได้ดี

- โคพอลิเมอร์และพอลิแลคติกแอซิด โดยทั่วไปพบว่าความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียของโคพอลิเมอร์ใกล้เคียงกับพอลิแลคติกแอซิดทางการค้ามาก แม้ว่าจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เชื่อว่าเป็นผลจากโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน

- พอลิเมอร์ผสม พบว่าความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยจะสอดคล้องกับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม กล่าวคืออัตราเร็วการปลดปล่อยยูเรียในพอลิเมอร์ที่ผสมกับพอลิแลกติกแอซิด 3 จะสูงกว่าพอลิแลกติกแอซิดทางการค้าและพอลิแลกติกแอซิดโคเอทิลีนเทเรฟทาเลตตามลำดับ และยังพบว่าแม้จะมีปริมาณชั้นผิวเคลือบน้อย แต่กลับมีความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยสูงกว่าพอลิแลกติกแอซิด 1 - 3 ทั้งนี้เชื่อว่าเพราะสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเอทิลีนไวนิลอะซิเตดที่มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นผลึกสูง

5.1.5 ผลจาก FTIR Spectra และ TGA Thermogram ไม่สามารถบอกได้ว่าผิวเคลือบพอลิเมอร์เกิดการ Hydrolysis หลังผ่านการใช้งาน เนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่าอาจมียูเรียปนอยู่บนผิวเคลือบ ทำให้ผลของ FTIR Spectra และ TGA Thermogram ไม่ได้มาจากผิวเคลือบพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียว

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การที่น้ำสามารถแทรกผ่านชั้นผิวเคลือบเข้ามาละลายยูเรียออกจากเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบได้นั้น เป็นผลจากความไม่สมบูรณ์ของชั้นผิวเคลือบ ไม่ได้มาจากการที่ชั้นผิวเคลือบเกิดการเสื่อมสภาพด้วยปฏิกิริยา Hydrolysis ดังนั้นหากสามารถทำให้ชั้นผิวเคลือบมีความสมบูรณ์มากขึ้นก็จะสามารถผลิตปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ โดยสามารถทำได้จากการเลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น การเพิ่มจำนวนครั้งการพ่นเคลือบ ไปจนถึงการเปลี่ยนพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับพอลิแลกติกแอซิดให้มีสมบัติความแข็งแรงและยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น

5.2.2 กระบวนการผลิตโดยการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้จากการปรับเปลี่ยนรายละเอียดในกระบวนการผลิต อาทิเช่น การลด-เพิ่มอุณหภูมิของระบบ การลด-เพิ่มแรงดันที่ใช้ในการพ่นสารละลายพอลิเมอร์ การเปลี่ยนตัวทำละลายพอลิเมอร์ (เพื่อลดอัตราการระเหยออกของตัวทำละลาย) ตลอดจนการพัฒนาถึงผสมที่ใช้ในกระบวนการให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.2.3 กระบวนการผลิตโดยการจุ่มในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการใส่ตัวทำละลายออกในตัวกลาง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้จากการปรับเปลี่ยนรายละเอียดในกระบวนการผลิต อาทิเช่น การเปลี่ยนตัวกลางที่สามารถดึงตัวทำละลายออกจากสารละลายพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยที่ตัวทำละลายต้องไม่เกิดปฏิกิริยากับยูเรีย (เพื่อป้องกันการละลายของยูเรียในระหว่างการผลิต)

รายการอ้างอิง

- [1] สำนักงานกลาง หอรัษฎากรพิพัฒน์ พระบรมมหาราชวัง. 2537. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน ฉบับเฉลิมพระเกียรติในโอกาสฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี. เล่มที่ 18. ชุดสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. หน้า 183-214 (ISBN-974-8185-28-1)
- [2] Robert E. 2005. White Principles and Practices of Soil Science, the soil as a natural resource (4th edition). Blackwell Science (ISBN 0632064552)
- [3] Yongyuth O. 1985. Fertilizer process and using method. Thaiwattanapanich
- [4] Raymond M. and Roy D. 1990. SOILS an Introduction to Soils and Plant Growth, 6th ed. Prentice-Hall International
- [5] Salman O., Hovakeemian G. and Khraishi N., Polyethylene-Coated Urea.2 Urea Release as Affected by Coating Material. Soil Type and Temperature. Ind. Eng. Chem. Res. 28 (1989) : 633-638
- [6] Hepburn C. and Arizal R., Slow-release Fertilizers Based on Natural Rubber. British Polymer Journal 20 (1988) : 487-491
- [7] Hudson P., Abrasion Resistant Coating for Fertilizer. United States Patent 5466274 (1995)
- [8] Al-Zahrani S., Utilization of Polyethylene and Paraffin Waxes as Controlled Delivery System for Different Fertilizer. Ind. Eng. Chem. Res. 39 (2000) : 367-371
- [9] Liang R., Liu M. and Wu L., Controlled Release NPK Compound Fertilizer with the Function of Water Retention. Reactive and Functional Polymers 67 (2007) : 769-779
- [10] Varum K., Ottoy M. and Smidsrod O., Acid Hydrolysis of Chitosans. Carbohydrate Polymer 46 (2001) : 89-98
- [11] Tomaszewska M. and Jarosiewicz A., Use of Polysulfone in Controlled-Release NPK Fertilizer Formulation. J. Agricultural and Food Chemistry 50 (2002) : 4634-4639
- [12] Hanpichanchai P. 2002. Controlled Release of Granular Fertilizer Using Chitosan Coating. Master's Thesis. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

- [13] Otey F., Trimmell D., Westhoff R. and Shasha B., Starch Matrix for Controlled Release of Urea Fertilizer. J. Agricultural and Food Chemistry 32 (1984) : 1095-1098
- [14] Lunt J., Large-scale Production. Properties and Commercial Applications of Polylactic acid Polymers. Polymer Degradation and Stability 59 (1998) 145-152
- [15] Mark J. 2007. Physical Properties of Polymer Handbook Second Edition. Springer Science and Business Media. Page 423-446 (ISBN-13:978-0-387-31235-4, ISBN-10:0-387-31235-8)
- [16] Scheirs J. and Long T. 2003. Modern Polyester. John Wiley & Sons Ltd. England. Page 253 (ISBN 0-471-49856-4)
- [17] Lim L., Auras R. and Rubino M. 2008. Processing technologies for poly(lactic acid). Progress in Polymer Science. journal homepage: www.elsevier.com/locate/ppolysci : Elsevier Ltd.
- [18] Olewnik E., Czerwinski W., Nowaczyk J., Sepulchre M., Tessier M., Salhi S. and Fradet A., Synthesis and structural study of copolymers of L-lactic acid and bis(2-hydroxyethyl terephthalate). European Polymer Journal 43 (2007) : 1009–1019
- [19] Olewnik E., Czerwinski W. and Nowaczyk J., Hydrolytic degradation of copolymers based on L-lactic acid and bis-2-hydroxyethyl terephthalate. Polymer Degradation and Stability 92 (2007) : 24-31
- [20] Schaber P., Colson J., Higgins S., Thielen D., Anspach B. and Brauer J., Thermal decomposition (pyrolysis) of urea in an open reaction vessel. Thermochimica Acta 424 (2004) : 131–142



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. ข้อมูลดิบจากการทดลอง

ตาราง 1 ก. : กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) จาก Urea Standard

ความเข้มข้น (กรัมในน้ำกลั่น100ml)	ค่า RefractiveIndex
50	1.402
45	1.396
40	1.387
36	1.382
30	1.374
25	1.369
20	1.359
18	1.357
15	1.353
12.5	1.35
10	1.346
8	1.344
7.5	1.343
6	1.341
5	1.339
4	1.336
3	1.336
2.5	1.3355
2	1.335
1.5	1.3345
1	1.334
0.5	1.333
0	-

ตาราง 1 ข. : การทดสอบร้อยละการละลายของยูเรีย ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อแช่ปุ๋ยในน้ำกลั่น

เวลา(นาที)	Urea
0	-
0.5	1.34
1	1.345
1.5	1.349
2	1.353
2.5	1.357
3	1.36
3.5	1.364
4	1.367
4.5	1.369
5	1.372
5.5	1.374
6	1.375
6.5	1.376
7	1.376
7.5	1.376
8	1.376
8.5	1.376
9	1.376
9.5	1.376
10	1.376
10.5	1.376
11	1.376
11.5	1.376
12	1.376
12.5	1.376
13	1.376
13.5	1.376
14	1.376
14.5	1.376
15	1.376
15.5	1.376
16	1.376

ตาราง 1 ค.1 : การทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อแช่
 ปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบในน้ำกลั่น ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ความ
 เข้มข้น 4%

เวลา (นาที)	Com-PLA			Copolymer		
	เคลือบ 1	เคลือบ 2	เคลือบ 3	เคลือบ 1	เคลือบ 2	เคลือบ 3
0.5	1.337	1.34	1.335	1.334	1.335	1.334
1	1.343	1.346	1.339	1.339	1.34	1.337
1.5	1.347	1.351	1.344	1.342	1.342	1.338
2	1.355	1.36	1.349	1.345	1.3455	1.34
2.5	1.357	1.361	1.354	1.3485	1.348	1.344
3	1.36	1.364	1.359	1.352	1.354	1.348
3.5	1.361	1.366	1.357	1.357	1.357	1.347
4	1.365	1.366	1.358	1.36	1.359	1.3485
4.5	1.365	1.366	1.3595	1.362	1.361	1.351
5	1.366	1.369	1.362	1.364	1.362	1.352
6	1.369	1.371	1.364	1.367	1.364	1.355
7	1.37	1.372	1.367	1.3705	1.367	1.356
8	1.371	1.373	1.368	1.371	1.368	1.359
9	1.372	1.374	1.369	1.372	1.369	1.361
10	1.373	1.374	1.37	1.373	1.369	1.362
11	1.374	1.374	1.37	1.374	1.37	1.363
12	1.374	1.375	1.371	1.375	1.372	1.365
13	1.375	1.375	1.371	1.375	1.373	1.365
14	1.375	1.375	1.371	1.376	1.374	1.367
15	1.375	1.375	1.372	1.376	1.375	1.368
20	1.376	1.376	1.373	1.376	1.375	1.371
25	1.376	1.376	1.373	1.376	1.375	1.373
30	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.373
35	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.374
40	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.375
45	1.376	1.376	1.375	1.376	1.375	1.375
50	1.376	1.376	1.375	1.376	1.375	1.375
55	1.376	1.376	1.375	1.376	1.375	1.375
60	1.376	1.376	1.375	1.376	1.375	1.375
120	1.376	1.376	1.376	1.376	1.375	1.375
420	1.376	1.376	1.376	1.376	1.375	1.375

ตาราง 1 ค.2 : การทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อแช่
 ปล่อยให้ผ่านการเคลือบในน้ำกลั่น ในปีที่ผ่านการเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ความ
 เข้มข้น 4% (ต่อ)

เวลา(นาที)	PLA-3/EVA	Com-PLA/EVA	Copolymer/EVA
	Blend	Blend	Blend
0.5	1.338	1.337	1.338
1	1.342	1.341	1.34
1.5	1.345	1.344	1.344
2	1.347	1.348	1.345
2.5	1.352	1.35	1.347
3	1.355	1.353	1.349
3.5	1.358	1.354	1.352
4	1.3575	1.356	1.355
4.5	1.36	1.359	1.358
5	1.364	1.362	1.36
5.5	1.367	1.363	1.362
6	1.3685	1.365	1.364
6.5	1.369	1.367	1.3645
7	1.37	1.3695	1.367
7.5	1.371	1.37	1.369
8	1.373	1.3705	1.37
8.5	1.374	1.371	1.371
9	1.375	1.373	1.371
9.5	1.375	1.373	1.372
10	1.376	1.374	1.372
10.5	1.376	1.3745	1.372
11	1.376	1.375	1.372
11.5	1.376	1.376	1.373
12	1.376	1.376	1.374
13.5	1.376	1.376	1.375
15.5	1.376	1.376	1.3755
16	1.376	1.376	1.376
60	1.376	1.376	1.376
150	1.376	1.376	1.376
420	1.376	1.376	1.376

ตาราง 1 ง. : การทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อแช่ปุ๋ย
 ที่ผ่านการเคลือบในน้ำกลั่น ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ความ
 เข้มข้น 5%

เวลา(นาที)	Com-PLA		
	เคลือบ 1	เคลือบ 2	เคลือบ 3
0.5	1.34	1.34	1.337
1	1.343	1.3425	1.339
1.5	1.347	1.346	1.34
2	1.35	1.349	1.344
2.5	1.353	1.352	1.346
3	1.356	1.354	1.349
3.5	1.358	1.357	1.351
4	1.36	1.3595	1.354
4.5	1.362	1.361	1.357
5	1.365	1.362	1.358
6	1.369	1.365	1.362
7	1.37	1.369	1.365
8	1.3715	1.37	1.368
9	1.372	1.371	1.37
10	1.373	1.371	1.37
11	1.374	1.372	1.371
12	1.374	1.373	1.372
13	1.3745	1.374	1.3725
14	1.375	1.3745	1.373
15	1.375	1.375	1.374
16	1.375	1.375	1.375
17	1.376	1.375	1.375
17.5	1.376	1.375	1.375
18.5	1.376	1.376	1.375
19	1.376	1.376	1.375
20	1.376	1.376	1.375
25	1.376	1.376	1.375
30	1.376	1.376	1.375
40	1.376	1.376	1.376
60	1.376	1.376	1.376
420	1.376	1.376	1.376

ตาราง 1 จ. : การทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อแช่ปุ๋ย
 ที่ผ่านการเคลือบในน้ำกลั่น ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ความ
 เข้มข้น 10%

เวลา (นาทึ)	PLA-1			PLA-2			PLA-3		
	เคลือบ 1	เคลือบ 2	เคลือบ 3	เคลือบ 1	เคลือบ 2	เคลือบ 3	เคลือบ 1	เคลือบ 2	เคลือบ 3
0.5	1.336	1.335	1.335	1.334	1.334	1.333	1.341	1.338	1.339
1	1.34	1.34	1.338	1.336	1.335	1.336	1.349	1.345	1.348
1.5	1.342	1.343	1.345	1.34	1.34	1.339	1.353	1.353	1.353
2	1.346	1.35	1.35	1.344	1.344	1.341	1.355	1.353	1.359
2.5	1.352	1.352	1.354	1.35	1.35	1.345	1.358	1.36	1.361
3	1.357	1.36	1.357	1.352	1.352	1.35	1.363	1.361	1.364
4	1.363	1.36	1.365	1.359	1.357	1.355	1.368	1.368	1.366
5	1.37	1.368	1.369	1.363	1.362	1.359	1.37	1.37	1.369
6	1.372	1.371	1.37	1.369	1.366	1.364	1.372	1.372	1.369
7	1.375	1.372	1.371	1.371	1.369	1.366	1.372	1.372	1.371
8	1.375	1.373	1.372	1.373	1.37	1.37	1.374	1.373	1.372
9	1.376	1.374	1.373	1.373	1.371	1.369	1.375	1.374	1.372
10	1.376	1.375	1.373	1.374	1.372	1.371	1.374	1.374	1.373
11	1.376	1.375	1.374	1.375	1.374	1.372	1.375	1.374	1.373
12	1.376	1.375	1.374	1.376	1.374	1.372	1.374	1.374	1.373
13	1.376	1.375	1.374	1.376	1.3745	1.373	1.375	1.374	1.373
14	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.373	1.375	1.374	1.373
15	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.373	1.375	1.374	1.374
16	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.373	1.375	1.374	1.374
17	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.373	1.375	1.3745	1.374
18	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.3745	1.374
19	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.3745	1.374
20	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.3745	1.374
25	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.3745	1.374
30	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.3745	1.374
35	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.3745	1.374
40	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.3745	1.374
45	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.375	1.374
50	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.375	1.375
60	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.375	1.375
420	1.376	1.375	1.374	1.376	1.375	1.374	1.375	1.375	1.375

ตาราง 1 ฉ. : การทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อแช่ปุ๋ย
ที่ผ่านการเคลือบในน้ำกลั่น ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์ความ
เข้มข้น 20%

เวลา (นาที)	PLA-1			PLA-2			Copolymer
	เคลือบ 1	เคลือบ 2	เคลือบ 3	เคลือบ 1	เคลือบ 2	เคลือบ 3	เคลือบ 3
0.5	1.339	1.337	1.337	1.338	1.334	1.336	1.333
1	1.343	1.34	1.34	1.341	1.336	1.337	1.334
1.5	1.345	1.344	1.342	1.346	1.341	1.338	1.335
2	1.349	1.348	1.345	1.345	1.349	1.342	1.337
2.5	1.354	1.353	1.348	1.35	1.345	1.349	1.339
3	1.357	1.355	1.35	1.356	1.351	1.348	1.341
3.5	1.361	1.36	1.354	1.359	1.355	1.355	1.343
4	1.364	1.363	1.355	1.363	1.36	1.357	1.345
4.5	1.367	1.365	1.359	1.367	1.365	1.36	1.347
5	1.37	1.368	1.361	1.368	1.364	1.362	1.3475
6	1.373	1.372	1.368	1.37	1.37	1.368	1.35
7	1.374	1.374	1.371	1.37	1.373	1.37	1.353
8	1.375	1.375	1.372	1.371	1.372	1.371	1.355
9	1.375	1.375	1.372	1.372	1.374	1.372	1.357
10	1.376	1.375	1.373	1.374	1.374	1.373	1.359
11	1.376	1.376	1.374	1.375	1.374	1.374	1.362
12	1.376	1.376	1.374	1.376	1.374	1.374	1.364
13	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.374	1.365
14	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.374	1.366
15	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.3745	1.3665
20	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.3745	1.369
30	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.3745	1.3705
40	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.3745	1.372
50	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.3745	1.372
60	1.376	1.376	1.374	1.376	1.375	1.3745	1.373
120	1.376	1.376	1.374	1.376	1.3745	1.3745	1.373
180	1.376	1.376	1.374	1.376	1.3745	1.3745	1.374
240	1.376	1.376	1.374	1.376	1.3745	1.3745	1.374
300	1.376	1.376	1.374	1.376	1.3745	1.3745	1.374
360	1.376	1.376	1.374	1.376	1.3745	1.3745	1.374
420	1.376	1.376	1.374	1.376	1.3745	1.3745	1.375

ตาราง 1 ข.1 : การทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อแช่
 ปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบในน้ำกลั่น ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการจุ่มในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการได้
 ตัวทำละลายออกในตัวกลาง

เวลา(นาที)	PLA-1	PLA-2	PLA-3	
	20%	20%	20%	40%
0.5	1.343	1.341	1.341	1.339
1	1.345	1.344	1.344	1.346
1.5	1.351	1.349	1.35	1.35
2	1.357	1.353	1.352	1.353
2.5	1.359	1.358	1.355	1.357
3	1.361	1.36	1.358	1.36
3.5	1.363	1.361	1.36	1.361
4	1.364	1.362	1.361	1.362
4.5	1.365	1.363	1.362	1.363
5	1.366	1.364	1.3635	1.364
6	1.367	1.366	1.366	1.366
7	1.369	1.367	1.367	1.3665
8	1.371	1.369	1.368	1.368
9	1.372	1.371	1.369	1.368
10	1.373	1.3715	1.37	1.368
11	1.374	1.372	1.37	1.368
12	1.375	1.373	1.37	1.368
13	1.375	1.374	1.37	1.369
14	1.375	1.375	1.37	1.369
15	1.375	1.375	1.37	1.369
20	1.375	1.375	1.371	1.369
30	1.375	1.375	1.372	1.369
40	1.375	1.375	1.372	1.369
50	1.375	1.375	1.373	1.37
60	1.375	1.375	1.373	1.37
120	1.375	1.375	1.373	1.37
180	1.375	1.375	1.373	1.371
240	1.375	1.375	1.373	1.371
300	1.375	1.375	1.373	1.371
360	1.375	1.375	1.373	1.371
420	1.375	1.375	1.373	1.371

ตาราง 1 ข.2 : การทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อแช่
 ปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบในน้ำกลั่น ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการจุ่มในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการได้
 ตัวทำละลายออกในตัวกลาง (ต่อ)

เวลา(นาที)	Com-PLA					
	4%	5%	12%	20%	30%	40%
0.5	1.34	1.339	1.339	1.338	1.338	1.335
1	1.346	1.3465	1.341	1.341	1.34	1.337
1.5	1.35	1.349	1.347	1.343	1.341	1.339
2	1.356	1.352	1.348	1.344	1.342	1.3405
2.5	1.356	1.356	1.35	1.345	1.342	1.342
3	1.359	1.359	1.352	1.346	1.342	1.342
3.5	1.363	1.3625	1.354	1.348	1.343	1.342
4	1.3645	1.3645	1.356	1.349	1.343	1.342
4.5	1.365	1.366	1.3565	1.351	1.344	1.342
5	1.367	1.367	1.359	1.353	1.344	1.343
6	1.369	1.369	1.362	1.359	1.3445	1.344
7	1.37	1.37	1.364	1.36	1.345	1.344
8	1.372	1.371	1.365	1.362	1.345	1.345
9	1.373	1.372	1.366	1.364	1.346	1.345
10	1.373	1.373	1.367	1.365	1.347	1.346
11	1.373	1.373	1.368	1.366	1.347	1.346
12	1.373	1.373	1.369	1.366	1.348	1.347
13	1.373	1.3735	1.369	1.366	1.348	1.347
14	1.374	1.374	1.369	1.3665	1.348	1.347
15	1.374	1.374	1.3695	1.367	1.349	1.348
20	1.3745	1.3745	1.372	1.369	1.351	1.349
30	1.375	1.375	1.373	1.3695	1.353	1.352
40	1.375	1.375	1.374	1.37	1.345	1.353
50	1.375	1.375	1.375	1.37	1.355	1.354
60	1.375	1.375	1.375	1.371	1.356	1.354
90	1.375	1.375	1.375	1.372	1.357	1.357
150	1.375	1.375	1.376	1.373	1.359	1.358
240	1.375	1.375	1.376	1.374	1.361	1.36
300	1.375	1.375	1.376	1.374	1.362	1.36
360	1.375	1.375	1.376	1.374	1.363	1.36
420	1.375	1.375	1.376	1.374	1.363	1.361

ตาราง 1 ข.3 : การทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อแช่
 ปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบในน้ำกลั่น ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการจุ่มในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการได้
 ตัวทำละลายออกในตัวกลาง (ต่อ)

เวลา(นาที)	Copolymer				
	4%	5%	20%	30%	40%
0.5	1.338	1.336	1.336	1.336	1.335
1	1.3395	1.338	1.338	1.337	1.336
1.5	1.344	1.341	1.339	1.338	1.337
2	1.347	1.344	1.34	1.339	1.338
2.5	1.35	1.348	1.342	1.341	1.339
3	1.352	1.35	1.345	1.343	1.34
3.5	1.354	1.352	1.346	1.345	1.342
4	1.357	1.355	1.349	1.347	1.3415
4.5	1.359	1.357	1.35	1.3485	1.344
5	1.36	1.359	1.352	1.35	1.345
6	1.364	1.362	1.357	1.354	1.347
7	1.367	1.366	1.358	1.357	1.35
8	1.369	1.368	1.361	1.359	1.353
9	1.372	1.371	1.363	1.36	1.3575
10	1.373	1.372	1.3655	1.361	1.358
11	1.373	1.373	1.367	1.364	1.362
12	1.374	1.374	1.3675	1.366	1.366
13	1.375	1.374	1.368	1.367	1.366
14	1.375	1.375	1.369	1.3675	1.367
15	1.3755	1.375	1.37	1.368	1.368
20	1.376	1.376	1.373	1.373	1.371
35	1.376	1.376	1.373	1.373	1.372
45	1.376	1.376	1.374	1.373	1.373
55	1.376	1.376	1.374	1.374	1.373
60	1.376	1.376	1.374	1.374	1.373
80	1.376	1.376	1.374	1.374	1.374
120	1.376	1.376	1.374	1.374	1.374
150	1.376	1.376	1.374	1.374	1.374
240	1.376	1.376	1.375	1.375	1.374
360	1.376	1.376	1.375	1.375	1.375
420	1.376	1.376	1.375	1.375	1.375

ตาราง 1 ฉ. : การทดสอบร้อยละการแพร่ของยูเรียผ่านผิวเคลือบ (% Dissolution) ด้วยกระบวนการละลายออกเมื่อปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบถูกฝังอยู่ในดิน ในปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบที่ผลิตจากกระบวนการจุ่มในสารละลายพอลิเมอร์ก่อนทำการได้ตัวทำละลายออกในตัวกลาง

ครั้งที่รดน้ำ	PLA-1_20%	PLA-2_20%	PLA-3_20%	Com-PLA_20%	Copolymer_20%
1	1.339	1.337	1.334	1.333	1.333
2	1.34	1.345	1.337	1.337	1.336
3	1.344	1.341	1.34	1.34	1.342
4	1.342	1.339	1.339	1.338	1.34
5	1.341	1.338	1.336	1.336	1.338
6	1.334	1.335	1.335	1.335	1.336
7	1.333	1.333	1.333	1.335	1.3355
8	1.333	1.333	1.333	1.334	1.335
9	1.333	1.333	1.333	1.333	1.334
10	1.3325	1.3325	1.333	1.333	1.333
11	1.332	1.3325	1.333	1.333	1.333
12	1.332	1.332	1.3325	1.333	1.333
13	1.332	1.332	1.332	1.333	1.3325
14	1.332	1.332	1.332	1.3325	1.332
15	1.332	1.332	1.332	1.332	1.332
16	1.332	1.332	1.332	1.332	1.332
17	1.332	1.332	1.332	1.332	1.332
18	1.332	1.332	1.332	1.332	1.332
19	1.332	1.332	1.332	1.332	1.332
20	1.332	1.332	1.332	1.332	1.332

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข. ข้อมูลเครื่องมือการทดสอบ

ตาราง 2 ก. : ค่า Conversion Factors ที่ใช้กับเครื่อง Brookfield Viscometer (SA®, LR 99102)

Model	RV		RV		RV		RV		RV		RV		RV	
Spindle Number	1		2		3		4		5		6		7	
	R	F	R	F	R	F	R	F	R	F	R	F	R	F
	0.5	200	0.5	800	0.5	2k	0.5	4k	0.5	8k	0.5	20k	0.5	80k
	1	100	1	400	1	1k	1	2k	1	4k	1	10k	1	40k
	2	50	2	200	2	500	2	1k	2	2k	2	5k	2	20k
	2.5	40	2.5	160	2.5	400	2.5	800	2.5	1.6k	2.5	4k	2.5	16k
	4	25	4	100	4	250	4	500	4	1k	4	2.5k	4	10k
	5	20	5	80	5	200	5	400	5	800	5	2k	5	8k
* R=R.P.M.	10	10	10	40	10	100	10	200	10	400	10	1k	10	4k
F=Factor	20	5	20	20	20	50	20	100	20	200	20	500	20	2k
K=1,000	50	2	50	8	50	20	50	40	50	80	50	200	50	800
	100	1	100	4	100	10	100	20	100	40	100	100	100	400

ตาราง 2 ข. : ปีมล (PUMA®)

ปริมาณลมที่เก็บได้	4 ลิตร
กำลังของเครื่อง	1/2 แรงม้า
อัตราแรงดันอากาศ	8 Bar

ตาราง 2 ค. : ปีนพ่นลมร้อน (BOSCH®)

กำลังไฟฟ้า	2,000 วัตต์
ปริมาณลมที่ปล่อยออกมา	150-500 ลิตร/นาที
อุณหภูมิของลมร้อน	50-630 °C
ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ	± 10%

ตาราง 2 ง. : หัวฉีดสเปรย์ (BEC®)

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด	1.5 มิลลิเมตร
ปริมาณส่วนที่เก็บสาร	400 มิลลิกรัม

รูป 2 ก. : ถังผสม (ได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ. ดร. เจดศักดิ์ ไชยคุณา)



รูป 2 ข. : ถังผสมที่ทำการซ่อมแซมเพื่อใช้ในการงานวิจัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. ข้อมูลสารเคมี

ตาราง 3 ก. : คลอโรฟอร์ม (Chloroform, LAB-SCAN[®])

Assay (GC)	99.80%
Boiling point	61.2 °C
Evaporation residue	0.001%

ตาราง 3 ข. : เฮกเซน (Hexane, LAB-SCAN[®])

Assay (GC)	99.00%
Boiling point	80.7 °C
Evaporation residue	0.001%

ตาราง 3 ค. : กรดไตรคลอโรอะซิติก (Trichloroacetic acid, LAB-SCAN[®])

Assay (GC)	99.00%
Melting point	56.3 °C

ตาราง 3 ง. : ฟีนอล (Phenol, CARLO ERBA[®])

Assay (GC)	98.50%
Melting point	40.5 °C

ตาราง 3 จ. : เมทานอล (Methanol, ZEN POINT[®])

Assay (GC)	100%
Boiling point	64.7 °C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ญัฐนัย จินตกานนท์ เกิดวันที่ 28 มีนาคม 2526 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา- วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาค- ปลายปีการศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้น ของปีการศึกษา 2551 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย