

รหัสโครงการ SUT7-712-62-12-09



รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้พอลิแล็กติกแอซิดพลาสติกชีวภาพสำหรับการเกษตร

Application of Polylactic Acid Bioplastic for Agriculture

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รหัสโครงการ SUT7-712-62-12-09

รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้พอลิแล็กติกแอซิดพลาสติกชีวภาพสำหรับการเกษตร

Application of Polylactic Acid Bioplastic for Agriculture

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทิมา ตีประเสริฐกุล

รองศาสตราจารย์ ดร. ปราณีย์ ชุมสำโรง

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2564

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย โดยงานวิจัยการประยุกต์ใช้พอลิแล็กติกแอซิดพลาสติกชีวภาพสำหรับการเกษตรนี้ เป็นส่วนหนึ่งของชุดโครงการวิจัยนวัตกรรมผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลัง ภายใต้แผนบูรณาการมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์ ที่มีเป้าหมายหลักเพื่อส่งเสริมและสนับสนุนเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ การดำเนินงานวิจัยนี้คงไม่สามารถ ลุล่วงได้หากขาดผู้ช่วยวิจัย ทีมนักศึกษาโครงการของสาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์ เครื่องมือและวิเคราะห์วิทยาศาสตร์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผู้สนใจอ่านรายงานวิจัยฉบับนี้จะได้รับความรู้ และนำไปใช้ ประโยชน์ได้ ซึ่งจะเป็นส่วนช่วยพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องของประเทศต่อไป

ปราณี ชุมสำโรง
จันทิมา ดีประเสริฐกุล
คณะผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการประยุกต์ใช้พอลิแล็กติกแอซิดซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพในงานด้านการเกษตร โดยอาศัยความสามารถการแพร่ผ่านพอลิแล็กติกแอซิดในการทำปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยและความสามารถในการแตกสลายของพอลิแล็กติกแอซิดภายใต้การใช้งาน โดยทำการเตรียมในรูปของปุ๋ยเคลือบ อนุกรมเบรนบรรจุปุ๋ย และอนุกรมฟิล์มบรรจุปุ๋ย โดยใช้พอลิแล็กติกแอซิดเป็นสารเคลือบ แผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์ม ซึ่งออกแบบให้มีโครงสร้าง (morphology) และความหนาที่แตกต่างกัน นอกจากนี้มีการนำยางธรรมชาติและการใช้สารเติมแต่งมาผสมเพื่อปรับความสามารถการปลดปล่อยของพอลิแล็กติกแอซิด โดยการศึกษาความสามารถของพอลิแล็กติกแอซิดในการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารสำหรับพืชและความสามารถในการแตกสลายทางชีวภาพของพอลิแล็กติกแอซิดในน้ำที่สภาวะควบคุมต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อาศัยการวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่าพีเอช โดยเปรียบเทียบกับเม็ดปุ๋ยที่ปราศจากการเคลือบ พบว่า เมื่อใช้พอลิแล็กติกแอซิดเคลือบเม็ดปุ๋ยในรูปปุ๋ยเคลือบ เกิดการปลดปล่อยธาตุอาหารหมดภายใน 1 ชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งจากการศึกษาสัณฐานวิทยาเห็นลักษณะการเคลือบเม็ดปุ๋ยที่ไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมยางธรรมชาติในรูปของแผ่นเมมเบรนทำเป็นถุงบรรจุปุ๋ย ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นใยที่มีช่องว่างและรูพรุนจำนวนมาก เกิดการปลดปล่อยธาตุอาหารมากกว่า 87%ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงเท่านั้น แสดงถึงธาตุอาหารสามารถไหลผ่านช่องว่างและรูพรุนต่าง ๆ ของแผ่นเมมเบรนได้ เมื่อใช้พอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่มีการเติมและมีการเติมสารเติมแต่งในรูปแผ่นฟิล์มทำถุงบรรจุปุ๋ย พบการปลดปล่อยธาตุอาหารน้อยมากในช่วง 7 วันแรก และเริ่มการปลดปล่อยเพิ่มเมื่อเข้าสู่วันที่ 10 และต่อเนื่องไป และที่ 31 วัน อนุกรมบรรจุปุ๋ยทั้งสามปลดปล่อยธาตุอาหาร 98, 97 และ 73% ซึ่งในรูปของแผ่นฟิล์มช่วยชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ โดยการเติมสารเติมแต่งในปริมาณสูงช่วยชะลอได้นานที่สุด ทั้งนี้ การเติมสารเติมแต่งน่าจะช่วยสร้างรูพรุนขนาดเล็กทำให้ลดแรงดันภายในถุงทำให้ไม่เกิดการแตกขาดของถุงฟิล์ม และธาตุอาหารแพร่ผ่านถุงฟิล์มได้ และพบว่า การปลดปล่อยธาตุอาหารจะช้าลงเมื่อแช่ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเทียบกับที่ 50 องศาเซลเซียส โดยที่เวลา 90 วัน อนุกรมบรรจุปุ๋ยทั้งสาม ปลดปล่อยธาตุอาหารเพียง 82, 47 และ 45% ตามลำดับ โดยอนุกรมที่มีสารเติมแต่งในปริมาณสูงช่วยชะลอได้นานที่สุด ส่วนการแตกสลายของพอลิแล็กติกแอซิดซึ่งผ่านการไฮโดรไลซิสได้กรด พบว่า ที่ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงแรกกรดเกิดขึ้นในปริมาณ

น้อย และเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง กรดจะเพิ่มในอัตราที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดจะพบกรดในอัตราสูงเมื่อแช่เป็นระยะเวลา 68 วัน ขณะที่ 35 องศาเซลเซียส การไฮโดรไลซิสของฟิล์มเกิดขึ้นน้อยมากแม้ในระยะเวลา 90 วัน



Abstract

The use of polylactic acid (PLA) bioplastic in agricultural application was studied in this research work. Based on diffusion through PLA and biodegradability of PLA, it is used to produce controlled released fertilizer (CRF). By varying structure and thickness, PLA was prepared as coating material, membrane bag and film bag for controlled released fertilizer. In addition, natural rubber (NR) and an additive (X) were mixed to improve the release ability of PLA. Electrical conductivity and pH measurements were employed to study the release ability and biodegradability via hydrolysis under controlled condition at 50°C. Morphology, thickness, fertilizer release ability as well as hydrolytic degradation of the CRF as compared to bare fertilizer were elucidated. It was found that the PLA coated fertilizer fully released nutrient within one hour. From SEM micrographs, defects were clearly observed on PLA coating. In the membrane form, PLA and PLA mixed with NR were used. Both showed the fibrous structure with many voids and pores. These membrane bags containing fertilizer released nutrient more than 87% within 24 hours. It indicated that nutrient can flow through voids and pores of the membrane bag. When PLA with and without the addition of additive (X) used for the film bag, the nutrient release was minute over the first seven days of immersion. The high nutrient release was noticed on day 10 and continued onward. At 31 immersion days, all film bags showed the nutrient release at 50°C of 98, 97, and 73% for the PLA film, PLA-X (0.005%) and PLA-X (0.01%), respectively. The film with additive of 0.01% showed the slowest release. The presence of additive helps generate small pores inside the film by which lowering the pressure buildup inside the film during immersion. That reduces the film cracking and nutrient can still diffuse through film. Under 90-day immersion at 35°C, all films released nutrient only 82, 47, and 45%, respectively. Still the film with the highest amount of additive prolonged the release the most. Biodegradability of PLA via hydrolysis

was studied. At 50°C, the carboxylic acids as the hydrolytic product were slightly detected at the beginning of immersion. Later the acids increase significantly. For membrane forms, high amounts of acids were clearly observed on immersion day 68. At 35°C and 90 days of immersion, the hydrolysis of the films hardly occurred.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป..	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิด (Conceptual Framework).....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิเมอร์และการควบคุมการปลดปล่อย.....	5
2.2 กลไกการปลดปล่อย	6
2.3 การเสื่อมสลายโดยไฮโดรไลซิส (Degradation by Hydrolysis).....	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	8
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	8
3.2 การเตรียมสารละลายสารเคลือบและปฏิกิริยาควบคุมการปลดปล่อย.....	8
3.2.1 การเตรียมสารละลายพอลิแล็กติกแอซิด	9
3.2.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยางธรรมชาติ	9
3.2.3 การเตรียมสารละลายระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและสาร X.....	10
3.3 การเตรียมปฏิกิริยาควบคุมการปลดปล่อย.....	10

3.3.1	การเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยในรูปปุ๋ยเคลือบ.....	10
3.3.2	การเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยในรูปแผ่นเมมเบรน.....	11
3.3.3	การเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยในรูปแผ่นฟิล์ม.....	12
3.4	การตรวจสอบโครงสร้างและสมบัติสารเคลือบ แผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์ม.....	13
3.4.1	การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	13
3.4.2	สมบัติการดึง.....	13
3.4.3	การวิเคราะห์อัตราการไหลของน้ำ.....	13
3.4.4	การเสื่อมสลายเมื่อแช่ในน้ำ.....	14
3.5	การตรวจสอบและวิเคราะห์ความสามารถการปลดปล่อยปุ๋ย.....	17
3.5.1	การวิเคราะห์ความเป็นกรดเบส (pH) และสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity).....	17
3.5.2	ความสามารถการปลดปล่อยปุ๋ย.....	17
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล.....		18
4.1	โครงสร้างและสมบัติสารเคลือบ แผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์ม.....	18
4.1.1	สัณฐานวิทยา.....	18
4.1.2	สมบัติการดึง.....	21
4.1.3	อัตราการไหลของน้ำ.....	22
4.1.4	การแตกสลายเมื่อแช่ในน้ำ.....	24
4.2	การตรวจสอบและวิเคราะห์ปุ๋ย.....	31
4.2.1	ความเป็นกรดเบส (pH) และ สภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity, EC).....	31
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....		53
บรรณานุกรม		
ภาคผนวก		
	ผลงานตีพิมพ์.....	59
	ประวัตินักวิจัย.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 เกรดของพอลิแล็กติกแอซิดและความเข้มข้นที่ใช้เตรียม9

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างพอลิแล็กติกและน้ำยางธรรมชาติของสารละลายพอลิเมอร์ ..10

ตารางที่ 3.3 ปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดและผง X สำหรับเตรียมแผ่นฟิล์ม NXp12

ตารางที่ 4.1 สมบัติแรงดึงของแผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์มสำหรับบรรจุปุ๋ย.....22

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนา น้ำหนัก และอัตราการไหลของน้ำของแผ่นเมมเบรน PLA และ PLA/NRL24

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ณ เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 90 วัน.....29

ตารางที่ 4.4 ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 35 °C.....30

ตารางที่ 4.5 สรุปค่าความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-1631

ตารางที่ 4.6 สรุปค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ใส่ PLA, ปุ๋ย NPK 16-16-16 และปุ๋ยเคลือบด้วย PLA.....36

ตารางที่ 4.7 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอเมื่อแช่ถุงเมมเบรนบรรจุปุ๋ยแบบต่าง ๆ.....38

ตารางที่ 4.8 สรุปค่าการปลดปล่อยสารอาหารของถุงเมมเบรนบรรจุปุ๋ยแบบต่าง ๆ38

ตารางที่ 4.9 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอ (ปริมาตร 50 มิลลิลิตร) ที่แช่ปุ๋ยที่ปริมาณต่าง ๆ.....39

ตารางที่ 4.10 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ช่วงเวลา 240 นาทีแรก.....42

ตารางที่ 4.11 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เป็นเวลา 31 วัน.....43

ตารางที่ 4.12 สรุปค่าการปลดปล่อยธาตุอาหารของถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เป็นเวลา 31 ที่อุณหภูมิ 50 °C45

ตารางที่ 4.13 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เวลา 240 นาที ที่อุณหภูมิ 35°C49

ตารางที่ 4.14 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เป็นเวลา 90 วัน ที่อุณหภูมิ 35°C.....51

ตารางที่ 4.15 สรุปค่าการปลดปล่อยสารอาหารของถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ในน้ำปราศจากไอออน.....52

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของวัสดุโลหะ เซรามิกซ์และพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการควบคุมการปลดปล่อย5

รูปที่ 2.2 ไฮโดรไลซิสของพอลิเอสเทอร์ ภายใต้สภาวะเบสและกรด7

รูปที่ 3.1 การพ่นสารละลายพอลิเมอร์ลงบนแผ่นเทฟลอน และถุงเมมเบรนบรรจุตัวอย่าง.....11

รูปที่ 3.2 ถุงฟิล์มสำหรับบรรจุตัวอย่าง (NXp).....12

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของน้ำ (a) กรวยกรองสุญญากาศ (b) แผ่นเมมเบรน13

รูปที่ 4.1 ไมโครกราฟ SEM ภาพตัดขวางของเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ โดยใช้ความเข้มข้นที่ (ก) 10% และ (ข) 20% (กำลังขยาย 30 เท่า).....19

รูปที่ 4.2 ไมโครกราฟ SEM ของพื้นผิวปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการจุ่มลงในสารละลาย.....19

รูปที่ 4.3 ไมโครกราฟ SEM ของพื้นผิวปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการจุ่มลงในสารละลาย.....19

รูปที่ 4.4 ไมโครกราฟ SEM ของพื้นผิว (ด้านบน) และภายใน (ด้านล่าง) ของแผ่นเมมเบรน PLA ที่ความหนา (ก) 0.05 และ (ข) 0.1 มิลลิเมตร20

รูปที่ 4.5 ไมโครกราฟ SEM ของพื้นผิวแผ่นเมมเบรน (ก) PLA, (ข) PLA/NRL 97:3, (ค) PLA/NRL 95:5 และ (ด) PLA/NRL 90:10 ที่เตรียมได้ ที่กำลังขยาย 200 เท่า.....21

รูปที่ 4.6 ความหนา (ก) และน้ำหนัก (ข) ของแผ่นเมมเบรน PLA และ PLA/NRL ที่จำนวนรอบการพ่นต่าง ๆ23

รูปที่ 4.7 อัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน PLA และ PLA/NRL ที่จำนวนรอบการพ่นต่าง ๆ.....23

รูปที่ 4.8 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C.....25

รูปที่ 4.9 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิด ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C ช่วง 4 ชั่วโมงแรก26

รูปที่ 4.10 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C.....26

รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดที่เวลาต่าง ๆ ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C27

รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิด ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C ในช่วง 60 วันแรก (ขยายช่วงระยะเวลาแรกของรูปที่ 4.11).....28

รูปที่ 4.13 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ณ เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 90 วัน	28
รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% เป็นเวลา 90 วัน ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 35 °C	31
รูปที่ 4.15 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าพีเอชของน้ำดีไอที่แช่ปุ๋ยกับปริมาณปุ๋ย (ก) ปุ๋ย NPK 16-16-16 และ (ข) ปุ๋ยยูเรีย	32
รูปที่ 4.16 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ปุ๋ยกับปริมาณปุ๋ย (ก) ปุ๋ย NPK 16-16-16 (หน่วยมิลลิซีเมนส์/เซนติเมตร) และ (ข) ปุ๋ยยูเรีย (หน่วยไมโครซีเมนส์/เซนติเมตร)	33
รูปที่ 4.17 ค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ PLA, ปุ๋ย NPK 16-16-16 และปุ๋ยเคลือบด้วย PLA	35
รูปที่ 4.18 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงเมมเบรน PLA, PLA/NRL(97:3) และ PLA/NRL(90:10) บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16	38
รูปที่ 4.19 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอ (ปริมาตร 50 มิลลิลิตร) ที่แช่ปุ๋ยกับปริมาณปุ๋ย	39
รูปที่ 4.20 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ช่วงเวลา 240 นาทีแรก	40
รูปที่ 4.21 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ระยะเวลา 31 วัน	41
รูปที่ 4.22 ความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารของถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 31 วัน	44
รูปที่ 4.23 แผนภาพแสดงการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์ม NXp0.005% และ NXp0.01%	46
รูปที่ 4.24 แผนภาพแสดงการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์ม PLA	46
รูปที่ 4.25 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ช่วงเวลา 240 นาทีแรก ที่อุณหภูมิ 35°C	48
รูปที่ 4.26 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เป็นเวลา 90 วัน ที่อุณหภูมิ 35°C	48
รูปที่ 4.27 ความสามารถในการปลดปล่อยสารอาหารของถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ในน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 90 วัน ที่อุณหภูมิ 35°C	49

บทที่ 1

บทนำ

ขณะที่ประชากรโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการผลิตผลทางการเกษตรเพื่อผลิตเป็นอาหารเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความจำเป็นที่ต้องเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตทางการเกษตร ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม ปลูกพืชเศรษฐกิจต่าง ๆ หลายชนิด อาทิเช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง มีการใช้ปุ๋ยเพื่อให้พืชเหล่านี้เจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตสูง อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยโดยส่วนใหญ่ที่ใช้มักสูญเสียธาตุอาหารไปกับสิ่งแวดล้อมเร็วกว่าที่พืชจะนำไปใช้ประโยชน์ ทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้ อีกทั้งมีสารตกค้างที่สามารถนำไปสู่มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย นอกจากนี้ ยังทำให้เกษตรกรสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายที่ต้องให้ปุ๋ยหลายครั้งต่อวงจรชีวิตของพืช ขณะที่การสร้างธาตุอาหารตามธรรมชาติเกิดขึ้นน้อยและมีการชะล้างธาตุอาหารของพืชออกไปจากดินมาก ทำให้ธาตุอาหารพืชในดินไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช จึงจำเป็นต้องให้ธาตุอาหารพืชเพิ่มโดยการเติมปุ๋ย ปุ๋ยส่วนใหญ่ที่ใช้กันทั่วไปในการเกษตรประกอบด้วยธาตุอาหารหลัก 3 ชนิด คือ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ส่วนปุ๋ยบางชนิด มีการเติมธาตุอาหารรอง เช่น แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) และโลหะอื่น ๆ ซึ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช อย่างไรก็ตาม พืชสามารถดูดซึมปุ๋ยไปใช้ได้ 50% ของปุ๋ยที่ใส่ลงไป การสูญเสียของปุ๋ยส่วนใหญ่เกิดจากการไหลบ่า การชะล้างของผิวดิน และการระเหยของปุ๋ย (Nouh และคณะ, 2017; Abraham และ Pilla, 1995; The Food and Agriculture Organisation, 1983; Greenwood, 1981) ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะพัฒนาแนวทางต่าง ๆ เพื่อใช้ปุ๋ยให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในทางการเกษตร

การทำปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อย (Controlled-release fertilizers, CRFs) และปุ๋ยชนิดปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ (slow released fertilizer) เป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจศึกษาและพัฒนาเป็นอย่างมากเพื่อลดการสูญเสียธาตุอาหารในปุ๋ยและชะลอการให้ธาตุอาหารแก่พืชขณะเติบโต ทำให้เกิดการใช้ปุ๋ยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามมาตรฐานยุโรป EN 13266 ได้ระบุข้อกำหนดในการเรียกปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยหรือปุ๋ยปลดปล่อยอย่างช้าว่า ปุ๋ยนั้นจะต้องปลดปล่อยธาตุอาหาร (nutrient) ไม่เกิน 15% ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง และไม่เกิน 75% ในระยะเวลา 28 วัน (European Standard EN 13266, 2001)

การทำปุ๋ยเหล่านี้สามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การเคลือบเม็ดปุ๋ยด้วยพอลิเมอร์ การผสมปุ๋ยกับสารอินทรีย์ การผสมปุ๋ยกับสารอินทรีย์ การทำไฮโดรเจล เป็นต้น ตัวอย่างปุ๋ยในทางการค้าที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ ได้แก่ ปุ๋ยที่มีชื่อทางการค้าว่า “Meister 70” (Chen และคณะ, 2008) เคลือบด้วยพอลิโอฟินส์ Nutricote® เคลือบด้วยเทอร์โมพลาสติก และ Osmocote® เคลือบด้วยเทอร์โมเซต (Adams และคณะ, 2013) พอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบเหล่านี้เป็นชนิดที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงอาจ

ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมและสร้างมลภาวะต่อไปในอนาคต มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มนุษย์ และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ดังนั้นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบเม็ดปุ๋ย พอลิแล็กติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่มีการใช้งานหลายแพร่หลาย เช่น ภาชนะบรรจุอาหาร แผ่นพลาสติกคลุมดิน ฟิล์มใช้ในการเกษตร และถุงขยะ (RAPA และคณะ 2011). น้ํายางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และยังเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือก PLA และน้ํายางธรรมชาติมาใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวเพื่อช่วยชะลอการปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยไปยังพืช และสามารถเสื่อมสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradation) อนึ่ง พอลิแล็กติกแอซิดสามารถสังเคราะห์จากกรดแล็กติกที่ผลิตขึ้นจากการใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบตั้งต้นของงานวิจัยในกลุ่มมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อหาแนวทางการประยุกต์ใช้พอลิแล็กติกแอซิดซึ่งสามารถเตรียมจากกรดแล็กติกที่ผลิตขึ้นโดยใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ ในด้านการส่งผลต่ออัตราการปล่อยสารอาหารจากปุ๋ยอินทรีย์ไปยังพืชทางการเกษตร

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มุ่งศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้พอลิแล็กติกแอซิดซึ่งสามารถเตรียมจากกรดแล็กติกที่ผลิตขึ้นโดยใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ ในการชะลอการปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยที่ใช้ทางการเกษตร โดยมีขอบเขตของโครงการดังนี้

1. เตรียมพอลิแล็กติกแอซิดเป็นชั้นเคลือบปุ๋ยเพื่อควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร โดยศึกษาอัตราการลดลงของสารอาหารสำหรับพืชที่อยู่ในปุ๋ยโดยวิธีจำลองสภาวะในห้องทดลอง
2. พัฒนาถุงบรรจุปุ๋ยจากพอลิแล็กติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ ตรวจสอบลักษณะการแพร่หรือการซึมผ่านของน้ำ และอัตราการลดลงของสารอาหารสำหรับพืชที่อยู่ในปุ๋ยโดยวิธีจำลองสภาวะในห้องทดลอง

1.3 ทฤษฎี สมมติฐาน หรือกรอบแนวความคิด (Conceptual Framework)

1. การใช้พอลิแล็กติกแอซิดกอดอัดผสมกับปุ๋ย นั้นอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า พอลิแล็กติกแอซิดอาจช่วยยึดปุ๋ยไว้ด้วยกันและเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพแตกออกอย่างช้า ๆ สารอาหารจากปุ๋ยส่งไปยังพืชในอัตราที่ช้าลงกว่าเดิม

2. การผลิตฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิแล็กติกแอซิดจะยอมให้น้ำซึมผ่านและพอลิแล็กติกแอซิดเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพอย่างค่อยเป็นค่อยไปและมีช่องว่างให้ธาตุอาหารถูกแพร่ออกมาอย่างช้า ๆ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ด้านเศรษฐกิจ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้มันสำปะหลังด้วยการนำมาใช้ผลิตไบโอพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิด และการใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยช่วยให้การใช้ปุ๋ยเกิดประโยชน์สูงสุด

2. ด้านสิ่งแวดล้อม เป็นการใช้ประโยชน์ไบโอพลาสติกพอลิแล็กติกแอซิดเพื่อผลิตปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยในงานทางเกษตร เมื่อสิ้นสุดการใช้งาน ไบโอพลาสติกไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหรือส่งผลกระทบต่อปริมาณขยะ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเคลือบปุ๋ยเพื่อช่วยควบคุมการปลดปล่อยเป็นแนวทางที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยใช้พอลิเมอร์เป็นวัสดุเคลือบ ในปัจจุบันจะเลือกใช้พอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากวัตถุดิบฐานชีวภาพ (bio-based polymers) เช่น แป้ง เซลลูโลส หรือน้ำมันพืช หรือจากพลาสติกชีวภาพ (bioplastics) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การเลือกใช้วัสดุเคลือบดังกล่าวเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าพอลิเมอร์ที่ได้จากปิโตรเลียม จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพสำหรับเคลือบหรือผสมกับปุ๋ยเพื่อให้มีอัตราการปล่อยสารอาหารจากปุ๋ยอย่างช้า ๆ พบว่า มีการใช้ พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (poly(3-hydroxybutyrate), PHB) โดยแบ่งเป็นการผลิตเป็นฟิล์มเคลือบปุ๋ยยูเรีย การผสมกับปุ๋ยยูเรียแล้วอัดเม็ด การปล่อยสารอาหารอาศัยหลักการย่อยสลายของ PHB โดยจุลินทรีย์ในดินซึ่งจะแตกสลายอย่างช้า ๆ และสารอาหารจากปุ๋ยถูกปล่อยออกมาตามการสลายไปของ PHB (Volova, T.G., Prudnikova, S.V., Boyandin, A.N., 2016) Boyandin และคณะ (2017) พบว่า การเคลือบด้วย PHB จะทำให้การปล่อยสารอาหารจากปุ๋ยช้ากว่ากรณีไม่เคลือบ Liu และคณะ (2018) ได้ใช้พอลิยูรีเทนที่เตรียมจากไบโอพอลิออล (biopolyol) เพื่อเคลือบปุ๋ยยูเรีย โดยที่มีการเติมและไม่เติมอนุภาคนาโนซิลิกาเพื่อลดความเป็นรูพรุนของผิวเคลือบ พบว่าการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียให้ช้าลงได้ Yang และคณะ (2013) เตรียมพอลิยูรีเทนคอมโพสิตที่มีการใช้วัตถุดิบจากตอซังข้าวโพดและขนไก่ในการทำชั้นเคลือบปุ๋ยยูเรีย ซึ่งสามารถช่วยลดการปลดปล่อยและดูดซับน้ำได้จาก Calabria และคณะ (2012) ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและโพรตีนสกัดจากถั่วในการหลอมผสมกับปุ๋ย NPK ได้เป็นคอมโพสิต และทดสอบการปล่อยธาตุอาหาร พบว่า NPK มีการลดลงช้ากว่ากรณีที่ไม่ได้เตรียมเป็นคอมโพสิต พอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพชนิดที่มีการศึกษากันชนิดต่อมา คือ พอลิเมอร์ดูดซับน้ำที่มีฐานมาจากแป้ง (starch-based superabsorbent) (Qiao, D. et al. 2016) สำหรับเคลือบปุ๋ยยูเรีย ร่วมกับการใช้เอทิลเซลลูโลส โดยพอลิเมอร์เคลือบอยู่ชั้นนอกสุดและเอทิลเซลลูโลสเคลือบอยู่ด้านใน นอกจากนี้ ยังมีการใช้ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างร่างแหกักเก็บปุ๋ยไว้ในโครงสร้าง โดยไฮโดรเจลเตรียมจากพอลิอะคริลิกแอซิด [Tyliszczak, B. et al. 2009] หรือเซลลูโลส (Mohammadi-Khoo, S. et al. 2016) เมื่อไฮโดรเจลดูดซับน้ำ สารอาหารละลายน้ำและแพร่ออกจากไฮโดรเจลตามการออกแบบโครงสร้างร่างแหที่แตกต่างกันของไฮโดรเจล

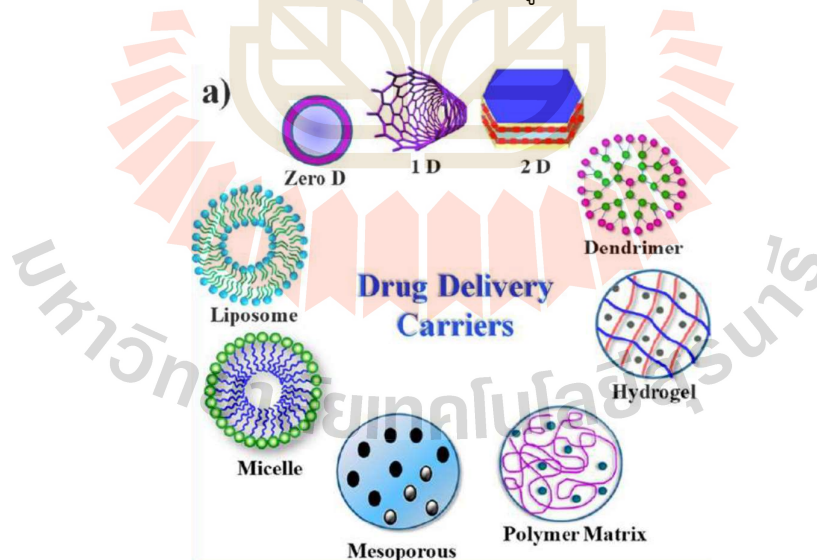
พอลิแล็กติกแอซิด [Poly(lactic acid), PLA] เป็นพลาสติกชีวภาพ ประเภทพอลิเอสเทอร์ชนิดอะลิฟาติกสายโซ่ตรง (linear aliphatic polyester) สังเคราะห์จากกรดแล็กติก (lactic acid) ซึ่งสามารถได้จากกระบวนการหมักแป้งซึ่งเป็นทรัพยากรที่สามารถเกิดขึ้นใหม่ทดแทนได้ (renewable

resources) พอลิแล็กติกแอซิดมีค่าอุณหภูมิหลอม (T_m) ในช่วง $150 - 190^\circ\text{C}$ อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ในช่วง $50-60^\circ\text{C}$ ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้ทดแทนพลาสติกที่ได้จากปิโตรเลียมอย่างกว้างขวาง เพราะพอลิแล็กติกแอซิด สามารถเตรียมได้จากพืช สามารถเสื่อมสลายได้ทางชีวภาพและไม่เป็นพิษ

2.1 พอลิเมอร์และการควบคุมการปลดปล่อย

การควบคุมการปลดปล่อย (controlled release system) เป็นวิธีการถ่ายโอนสารในปริมาณและระยะเวลาที่ควบคุมภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่ถูกออกแบบมา นำมาใช้ประโยชน์ เช่น ยา ปุ๋ย เป็นต้น เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้สาร ประหยัดเวลาและพลังงาน พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เพื่อการควบคุมการปลดปล่อยอย่างกว้างขวาง สามารถเตรียมเพื่อให้มีโครงสร้างที่หลากหลายได้ นอกเหนือจากชนิดของพอลิเมอร์แล้ว โครงสร้างจะเป็นตัวกำหนดที่สำคัญในการควบคุมการปลดปล่อยสาร

โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยมีหลายรูปแบบ Biswas และคณะ (Biswas, Shukla et al. 2019) ได้รวบรวมโครงสร้างวัสดุโลหะ เซรามิกซ์และพอลิเมอร์ที่มีใช้ในยาที่ควบคุมการปลดปล่อย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มักพบมีการใช้ในปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย ได้แก่ พอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix) ซึ่งอาจเป็นแบบชั้นเคลือบ (coating) แบบผสม หรือแบบคอมโพสิตกับวัสดุอื่น โครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดมีโซ (mesoporus structure) และไฮโดรเจล (hydrogel) ซึ่งจากรูป จะเห็นว่า สาร (ยา ปุ๋ย เป็นต้น) จะถูกบรรจุภายในโครงสร้าง แล้วอาศัยกลไกการปลดปล่อยทำให้สารนั้นออกสู่ภายนอก



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของวัสดุโลหะ เซรามิกซ์และพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ในการควบคุมการปลดปล่อย

2.2 กลไกการปลดปล่อย

การปลดปล่อยสาร หรือในที่นี้การปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled release fertilizer, CRF) จะอาศัยการถ่ายโอนของเหลวและไอ (liquid and vapor water) ระหว่างภายนอกและภายในชั้นเคลือบ ซึ่งสามารถอธิบายโดยการแพร่ (diffusion) เมื่อปุ๋ยเคลือบอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ศึกษา (น้ำ หรือ ดิน เป็นต้น) จะเริ่มจากการ wetting เป็นระยะเวลาหนึ่ง เมื่อถึงจุดอิ่มตัวจากน้ำ จะเกิดการปลดปล่อยปุ๋ย น้ำที่แพร่ผ่านเข้าไปจะละลายปุ๋ยและปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก โดยพื้นฐาน การแพร่สามารถอธิบายด้วยสมการของ Fick ดังต่อไปนี้

Fick's 1st law : ภายใต้สภาวะคงตัว (steady state)

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

Fick's 2nd law : ภายใต้การเปลี่ยนแปลงเวลา (transient state)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

โดยที่ J : ฟลักซ์การแพร่ (diffusion flux)

D : สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient or diffusivity)

C : ความเข้มข้นของสาร

x : ตำแหน่ง (ระยะทาง)

t : เวลา

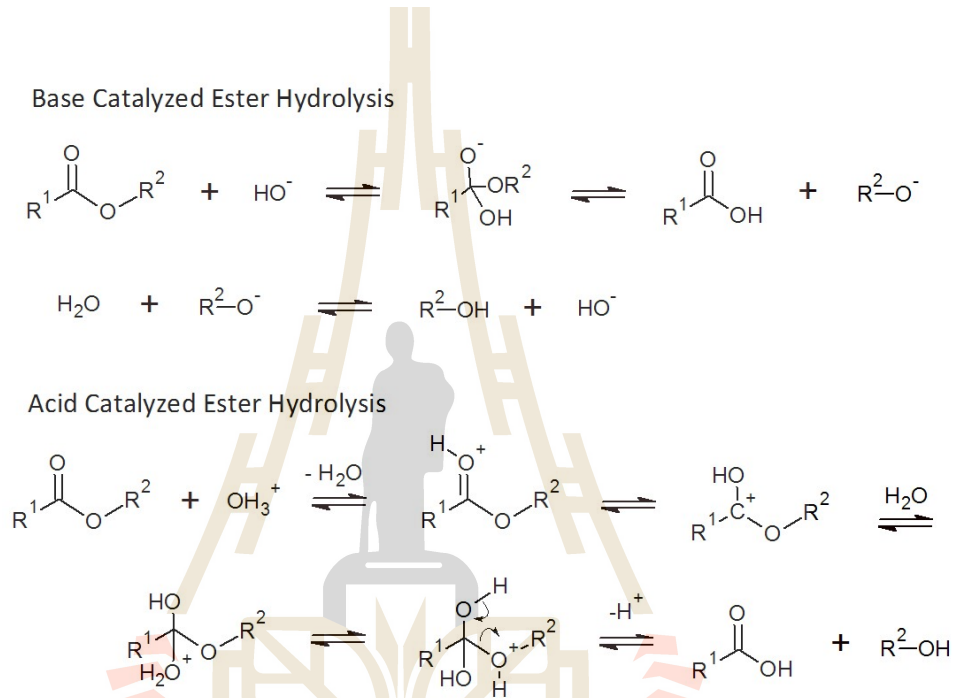
จากข้างต้น ความสามารถในการแพร่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้กันผ่าน อันตรกิริยาระหว่างวัสดุกันผ่านกับตัวแพร่ เป็นต้น

2.3 การเสื่อมสลายโดยไฮโดรไลซิส (Degradation by Hydrolysis)

พอลิเล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถเกิดการเสื่อมสลายได้ภายใต้การฝังกลบ การแช่ในน้ำที่สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม จากการศึกษาของปราณีและคณะ เรื่องการไฮโดรไลซิสของพอลิเล็กติกแอซิดที่เติมและไม่เติมยางธรรมชาติ โดยแช่ขึ้นทดสอบในน้ำที่อุณหภูมิ 58°C (Pongputthiphat, W., Phopin, W., Insawang, W., & Chumsamrong, P., 2017). พบว่าแท่งขึ้นทดสอบพอลิเล็กติกแอซิดที่มีความหนาเท่ากับ 3.2 mm เริ่มเกิดการเสื่อมสภาพภายหลังการแช่

18 วัน มีการสูญหายของน้ำหนักของขึ้นทดสอบ ในขณะที่ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 30 วัน พื้นผิวพอลิแล็กติกแอซิดเกิดการหลุดออกเป็นชิ้นเล็ก

การไฮโดรไลซิสของพอลิเอสเตอร์ในสภาวะที่มีเบสหรือกรด สามารถแสดงได้ดังขั้นตอนในรูปที่ 2.2 (polymerdatabase.com, 2020) ในสภาวะที่ pH เท่ากับ 7 ไฮโดรไลซิสจะเกิดได้ช้า จากรูปจะเห็นว่า เมื่อไฮโดรไลซิสดำเนินไป จะทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงและได้กรดและอัลกอฮอล์เพิ่มขึ้น ซึ่งกรดนี้จะช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (autocatalysis) ต่อเนื่องต่อไป



รูปที่ 2.2 ไฮโดรไลซิสของพอลิเอสเตอร์ ภายใต้สภาวะเบสและกรด

การเลือกใช้พอลิแล็กติกแอซิดในการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย เพราะ พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพชนิดหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบทางการเกษตร (ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น) ซึ่งสามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ สามารถเสื่อมสลายได้ทางชีวภาพโดยผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และชีวมวล) และพืชสามารถใช้น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นวัฏจักรเพื่อผลิตผลผลิตทางการเกษตรต่อเนื่องไป จัดเป็นรูปแบบเศรษฐกิจ BCG (Bio, Circular, and Green Economy) ที่สอดคล้องกับสถานการณ์โลกปัจจุบัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในทางปฏิบัติ การออกแบบการทดลองเริ่มจากแนวคิดการใช้พอลิแล็กติกแอซิดเคลือบเม็ดปุ๋ย ปรับปรุงความสามารถการแพร่ผ่านของชั้นเคลือบด้วยการทำพอลิเมอร์ผสม ปรับให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุน (เมมเบรน) ใช้ในรูปถุงบรรจุปุ๋ย และพอลิเมอร์เตรียมในรูปแผ่นฟิล์มใช้ในรูปถุงบรรจุปุ๋ย ซึ่งสามารถแสดงเป็นขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมวัสดุเพื่อเคลือบปุ๋ย การเคลือบปุ๋ยด้วยเทคนิคต่าง ๆ การตรวจสอบโครงสร้างและสมบัติของชั้นเคลือบ การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ย และการทดสอบการเสื่อมสลายของปุ๋ยเคลือบภายใต้การไฮโดรไลซิส

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) ซื้อมาจาก บ. NatureWorks LLC เกรด 4043D ($M_w \approx 150,000$ g/mol) และเกรด 3052D ($M_w \approx 115,000$ g/mol)
2. น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia natural rubber latex) ซื้อมาจาก บ.ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ทำการอบให้แห้ง โดยเทน้ำยางลงใน Petri disk นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C อบจนยางแห้ง (ประมาณ 48 ชั่วโมง) โดยสังเกตจากความใส
3. ปุ๋ยเคมี NPK สูตร 16 - 16 - 16 ตรากะต่าย (บริษัท เจียไต๋ จำกัด)
4. ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46 - 0 - 0 ตรากะต่าย (บริษัท เจียไต๋ จำกัด)
5. คลอโรฟอร์ม (บริษัท CARLO ERBA)
6. กากพ่นสี (spray gun HI-TOP รุ่น F-71) ขนาดหัวพ่น 1.5 มิลลิเมตร

3.2 การเตรียมสารละลายสารเคลือบและปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

งานวิจัยนี้ ทำการเตรียมสารเคลือบปุ๋ย 3 ชนิด คือ 1. พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) 2. สารผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยางธรรมชาติ (PLA/NR) และ 3. สารผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและสาร X (PLA-X) โดยใช้เทคนิคการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย 3 แบบหลัก คือ การฉีด/จุ่มเคลือบเป็นปุ๋ยเคลือบ การสเปรย์เป็นแผ่นเมมเบรนเพื่อทำถุงใส่ปุ๋ย และการระเหยเป็นแผ่นฟิล์มเพื่อทำถุงใส่ปุ๋ย การตรวจสอบลักษณะและสมบัติของสารเคลือบทำโดยการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอน สมบัติการดึง รวมทั้งความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ย และความสามารถในการเสื่อมสลายได้

อนึ่ง งานวิจัยนี้เริ่มจากการทำการเตรียมเม็ดปุ๋ยเคลือบโดยการหลอมพอลิแล็กติกแอซิดและเคลือบเม็ดปุ๋ยบนลูกกลิ้ง โดยควบคุมอุณหภูมิ เวลาในการเคลือบและความเร็วลูกกลิ้ง เมื่อนำเม็ดปุ๋ยเคลือบที่ได้ทดสอบการปลดปล่อย สังเกตเห็นว่า การปลดปล่อยปุ๋ยเกิดจากการแตก (disintegration) ของเม็ดปุ๋ยเคลือบเป็นหลัก จึงปรับวิธีการเพื่อให้ได้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยได้

3.2.1 การเตรียมสารละลายพอลิแล็กติกแอซิด

การฉีดเคลือบ

เตรียมสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดโดยละลายเม็ด PLA ในคลอโรฟอร์ม กวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณของ PLA 5 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักปุ๋ย

การจุ่มเคลือบ

สำหรับการจุ่มเคลือบ เตรียมสารละลายพอลิแล็กติกแอซิดโดยละลายเม็ด PLA ในคลอโรฟอร์ม ที่ความเข้มข้น 10% และ 20% กวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็ว 290 รอบต่อนาที ดัง

ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เกรดของพอลิแล็กติกแอซิดและความเข้มข้นที่ใช้เตรียม

พอลิเมอร์	ความเข้มข้น	
	10%	20%
3052D	✓	-
3052D	-	✓
4043D	✓	-
4043D	-	✓

3.2.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยางธรรมชาติ

สารละลายพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยางธรรมชาติ (ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร) ถูกเตรียมโดยละลายพอลิแล็กติกแอซิดและน้ำยางธรรมชาติที่อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.2 ในคลอโรฟอร์ม ชั้นแรกเทน้ำยางลงในขวดแก้วที่มีคลอโรฟอร์มแล้ว กวนด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นใส่เม็ด PLA ลงในขวดที่มีสารละลายยางธรรมชาติ กวนต่ออีก 3 ชั่วโมง ด้วยความเร็ว 290 รอบต่อนาทีและให้ความร้อน 40°C ได้สารละลาย PLA/NR ใสสีเหลือง

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างพอลิแล็กติกและน้ำยางธรรมชาติของสารละลายพอลิเมอร์

สารละลายพอลิเมอร์	พอลิแล็กติกแอซิด (wt%)	น้ำยางธรรมชาติ (wt%)
PLA	100	-
PLA/NRL 97:3	97	3
PLA/NRL 95:5	95	5
PLA/NRL 90:10	90	10

3.2.3 การเตรียมสารละลายระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและสาร X

เตรียมสารละลาย X ที่ความเข้มข้น 1% (w/V) โดยละลายสาร X ปริมาณ 1 กรัมด้วยน้ำดีไอ (deionized water) ในขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 100 ml ทำการปรับปริมาตร จากนั้นเปิดสารละลาย X นี้ 20 ml ใส่ในขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยเอทานอล เขย่าจนเป็นสารละลายเนื้อเดียว (เรียก สารละลาย X)

เตรียมสารละลายระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและสารละลาย X โดยผสมสารละลาย X ปริมาตร 0.5 ml ในคลอโรฟอร์ม ปริมาตร 91.94 ml ในขวดแก้วปิดฝา กวนผสมที่ความเร็วรอบ 250 rpm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม PLA ปริมาณ 10 กรัม ให้ความร้อนที่ 50°C กวนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นหยุดให้ความร้อนและกวนต่อที่อุณหภูมิห้องอีก 6 ชั่วโมง ได้สารละลายระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและสาร X (เรียก สารละลาย PLA-X)

3.3 การเตรียมปฏิกิริยาควบคุมการปลดปล่อย

3.3.1 การเตรียมปฏิกิริยาควบคุมการปลดปล่อยในรูปปฏิกิริยาเคลือบ

การฉีดเคลือบ

ใส่เม็ดปฏิกิริยาปริมาณ 10 กรัมลงในโถผสม ให้ความร้อนโถผสมที่ 65-90°C โดยเครื่องเป่าลมร้อน ฉีดสารละลายต่าง ๆ ด้วยเข็มฉีดยาที่ปริมาตร 0.2-0.4 มิลลิลิตรต่อหนึ่งครั้งฉีด จะได้เม็ดปฏิกิริยาเคลือบด้วย PLA, PLA-b-NR หรือ PLA-X ความหนาของชั้นสารเคลือบควบคุมด้วยปริมาตรของสารละลายที่ใช้

การจุ่มเคลือบ

คัดแยกปฏิกิริยาเรียกขนาดให้มีขนาดที่เท่ากัน นำมาอบเม็ดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที เพื่อไล่ความชื้น แล้วนำเม็ดปฏิกิริยาเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อนำไปใช้ต่อไป ทำการเคลือบผิวปฏิกิริยาเรียกในกระบวนการจุ่มในสารพอลิเมอร์ก่อนทำการใส่ตัวทำละลายออกในตัวกลาง นำเม็ดปฏิกิริยาขนาดที่เท่ากัน จำนวน 10 กรัม กับ 20 กรัม ใส่ลงในสารละลายพอลิเมอร์ที่เตรียมเอาไว้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (ตั้ง

ตารางที่ 3.1) แล้วจึงหยอดเม็ดปุ๋ยที่มีพอลิเมอร์เคลือบอยู่ลงในเมทานอลเพื่อไล่ตัวทำละลายออก ก่อน ตักเม็ดปุ๋ยออกจากตัวกลาง แล้วนำปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ ความชื้น ตัวทำละลายและตัวกลางที่อาจตกค้างอยู่บนผิวเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบให้ระเหยออกไป นำปุ๋ย ที่ผ่านการเคลือบที่ได้เก็บเอาไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อนำไปตรวจสอบ และวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ในขั้น ต่อไป

3.3.2 การเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยในรูปแบบแผ่นเมมเบรน

นำสารละลายแบบต่าง ๆ คือ PLA, PLA/NR, PLA-X ที่ได้ใส่ในกาฟนของหัวฉีดสเปรย์ และทำ การพ่นลงบนแผ่นเทฟลอนขนาด 30x30 ตร.ซม. ในทิศทางแนววนอน (ดังแสดงในรูปที่ 3.1) โดยฉีดพ่น ไป-กลับ จำนวน 20 และ 40 รอบ เพื่อปรับความหนาของแผ่นเมมเบรน โดยใช้แรงดันลมเท่ากับ 2 บาร์ ทั้งนี้ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างหัวฉีดและแผ่นเทฟลอนเท่ากับ 20 ซม. แผ่นเมมเบรนที่ได้นำมาบรรจุ ปุ๋ย ปริมาณ 1 กรัม ขนาดสูง 3x7 ซม. ได้เป็นถุงปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย



รูปที่ 3.1 การพ่นสารละลายพอลิเมอร์ลงบนแผ่นเทฟลอน และถุงเมมเบรนบรรจุปุ๋ยตัวอย่าง

3.3.3 การเตรียมปฏิกิริยาควบคุมการปลดปล่อยในรูปแบบฟิล์ม

แผ่นฟิล์มจากสารละลาย X

ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มจากสารละลายแบบต่าง ๆ คือ PLA, PLA/NR, PLA-X ที่เตรียมได้ โดยเทสารละลายด้วยปริมาตรที่กำหนด (ปรับตามความหนาแผ่นฟิล์มที่ต้องการ) ลงบนจานเพาะเชื้อในตู้ดูดควัน (fume hood) ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

แผ่นฟิล์มจากผง X

นอกเหนือจากการเตรียมแผ่นฟิล์มผ่านสารละลาย ในกรณีการเติมสาร X ได้มีการใช้สาร X ในรูปของผง (powder) โดยมีวิธีการเตรียม ดังนี้ นำ X มาบดด้วยครกหิน จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh (150 micron) เก็บ X ที่ผ่านตะแกรงร่อนในถุงซิปล็อคและเก็บในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งผง X ลงในขวดแก้วที่มีฝาปิด เติมคลอโรฟอร์ม ปิดฝาขวด นำไป sonicate 10 นาที จากนั้นนำเม็ด PLA เติมลงในขวด โดยมีปริมาณสารที่ใช้ดังแสดงใน ตารางที่ 3.3 กวนด้วยความเร็ว 250 รอบต่อ นาที และให้ความร้อน 50°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จึงทำการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม PLA-X powder composite (NXp) โดยเทลงบนจานเพาะเชื้อแก้ว ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มาตัดให้ได้สี่เหลี่ยมขนาด 6 x 7 cm. ทำเป็นถุงด้วยเครื่องซีลถุง (Sealing Machine) จะได้ถุงฟิล์มสำหรับบรรจุตัวอย่างขนาด 3 x 7 cm. ใส่ตัวอย่างถุงละ 4 กรัม และซีลปิดปากถุงให้สนิท ถุงบรรจุตัวอย่างแสดงใน

รูปที่ 3.2 ถุงฟิล์มสำหรับบรรจุตัวอย่าง (NXp)

ตารางที่ 3.3 ปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดและผง X สำหรับเตรียมแผ่นฟิล์ม NXp

แผ่นฟิล์ม	PLA (g)	ผง X (g)	CHCl ₃ (ml)
PLA	10	-	91.94
NXp0.005%	9.9995	0.0005	91.94
NXp0.01%	9.9990	0.0010	91.94



รูปที่ 3.2 ถุงฟิล์มสำหรับบรรจุตัวอย่าง (NXp)

3.4 การตรวจสอบโครงสร้างและสมบัติสารเคลือบ แผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์ม

3.4.1 การศึกษาสัณฐานวิทยา

นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาศึกษาสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวและภาพตัดขวางด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JEOL, JSM6010 ความต่างศักย์ 5 kV เคลือบตัวอย่างด้วยทอง

3.4.2 สมบัติการดึง

ทำการทดสอบสมบัติการดึงแผ่นเมมเบรน PLA/NR และแผ่นฟิล์ม PLA-X ที่เตรียมได้ ตามมาตรฐาน ASTM D882-18 ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (27°C) โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (Instron, รุ่น 5565) ด้วย load cell ขนาด 5 kN อัตราเร็วในการดึง 50 mm/min ขนาดของชิ้นทดสอบเท่ากับ 15 X 150 X 0.2 มม. เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสของยังค์ (Young's modulus) และระยะยืดที่จุดขาด (elongation at break)

3.4.3 การวิเคราะห์อัตราการไหลของน้ำ

อัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนทำการทดลองโดยตัดแผ่นเมมเบรนเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 ซม. และวางแผ่นเมมเบรนบนกรวยกรองสุญญากาศ ภายใต้แรงดัน 1.25 cmHg (ดังแสดงในรูปที่ 3.3) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (27°C) นทท 9 2



(a)



(b)

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของน้ำ (a) กรวยกรองสุญญากาศ (b) แผ่นเมมเบรน

3.4.4 การเสื่อมสลายเมื่อแช่ในน้ำ

เตรียมชิ้นทดสอบในรูปของแผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์ม ใส่ลงในขวด เติมน้ำดีไอ 250 มิลลิลิตร ปิดฝา นำเข้าตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C บันทึกการเปลี่ยนแปลง ภายในระยะเวลา 90 วัน เก็บน้ำตัวอย่างมาวัดค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า (ตามหัวข้อ 3.4.1) และทำการไทเทรตเพื่อหาปริมาณกรดที่เกิดขึ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้ การตรวจสอบการเสื่อมสลายเมื่อแช่ในน้ำซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำโดยนำชิ้นทดสอบใส่ลงในขวดแก้วขนาดความจุ 500 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 5 ลงในขวดแก้วจนได้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำและชิ้นทดสอบเท่ากับ 50:1 โดยมวล จากนั้นแช่ขวดแก้วที่มีการบรรจุชิ้นทดสอบลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 50 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการแตกสลายทางชีวภาพของพลาสติกภายใต้สภาวะที่มีอากาศในมาตรฐาน ASTM D5338 และ ISO 14855 การตรวจสอบการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยวัดค่า pH ของน้ำปราศจากไอออนด้วยเครื่อง pH meter และทำการดึงน้ำตัวอย่างออกมาทำการไทเทรตเพื่อติดตามหมู่ปลายสายโซ่ทุก ๆ 3 วันและเมื่อครบ 30 วันจะทำการตรวจสอบการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทุก ๆ 7 วัน ทุกครั้งที่ทำการดึงน้ำตัวอย่างออกมามีการเติมน้ำเข้าในเท่ากับปริมาตรที่ดึงออกมาทำการตรวจสอบการเสื่อมสลายโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นระยะเวลา 90 วัน การคำนวณหาความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group) โดยใช้ความสัมพันธ์

จำนวนโมลหมู่คาร์บอกซิลิก = จำนวนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์

$$C_a \times V_a = C_b \times V_b \quad (3.1)$$

โดยที่ C_a = ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group)

C_b = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)

V_b = ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ได้จากการไทเทรต อ่านค่าจากบิวเรตต์เมื่อถึงจุดสมมูล

V_a = ปริมาตรของน้ำแช่ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด ทราบได้เพราะว่าเราเปิดต่อน้ำแช่ด้วยปริมาตร 10 ml ใส่ลงในขวดรูปชมพู่

ทำการตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของน้ำแช่แผ่นฟิล์มพอลิแล็กติก แอซิดทั้งสองความหนาด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter) โดยมีลำดับวัดค่าแสดงดัง ตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ลำดับการตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

ลำดับการวัดค่า EC	นาที	วัน
1	0	-
2	1	-
3	3	-
4	5	-
5	7	-
6	10	-
7	15	-
8	20	-
9	25	-
10	30	-
11	40	-
12	50	-
13	60	-
14	70	-
15	80	-
16	90	-
17	100	-
18	110	-
19	120	-
20	130	-
21	140	-

ลำดับการวัดค่า EC	นาที	วัน
22	150	-
23	160	
24	170	-
25	180	-
16	210	-
17	240	-
28	-	3
29	-	6
30	-	9
31	-	12
32	-	15
33	-	18
34	-	21
35	-	24
36	-	30
37	-	33
38	-	40
39	-	47
40	-	54
41	-	61
42	-	68
43	-	75
44	-	82
45	-	89

3.5 การตรวจสอบและวิเคราะห์ความสามารถการปลดปล่อยปุ๋ย

การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ย จะอาศัยการวิเคราะห์ผ่านค่าความเป็นกรดเบส (pH) และสภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity, EC) เมื่อทำการแช่ปุ๋ยที่เตรียมได้ในน้ำดีไอที่ระยะเวลาต่าง ๆ

3.5.1 การวิเคราะห์ความเป็นกรดเบส (pH) และสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

การวิเคราะห์ความเป็นกรดเบสและสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอ (Deionized water) ที่แช่ปุ๋ยตัวอย่าง โดยชั่งปุ๋ยตัวอย่างปริมาณ 10 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำดีไอ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร และนำขวดรูปชมพู่แช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ $37 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ และเก็บน้ำตัวอย่างที่ 1, 3, 5, 7 และ 10 วัน มาวัดด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ ยี่ห้อ Hana รุ่น HI99121 และเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ทำการทดลองซ้ำสามครั้ง

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอ ปุ๋ย NPK สูตร 16-16-16 และปุ๋ยยูเรีย (urea fertilizer) ทำโดยการสร้างกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวกับ ปริมาณปุ๋ย โดยนำปุ๋ย NPK สูตร 16-16-16 และปุ๋ยยูเรีย มาละลายในน้ำดีไอปริมาณ 100 และ 200 มิลลิลิตร วัดค่าที่ได้

ถุงเมมเบรนบรรจุปุ๋ยและถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ย

การวิเคราะห์สภาพการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ที่แช่ปุ๋ยตัวอย่าง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างปุ๋ยตัวอย่างและน้ำปราศจากไอออนเท่ากับ 1 : 50 นำขวดแก้วที่บรรจุน้ำ ปราศจากไอออนและปุ๋ยตัวอย่างแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50°C วัดค่าการนำไฟฟ้าของ น้ำตัวอย่างที่ 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30 นาที หลังจากนั้นวัดค่าการนำไฟฟ้าทุก 10 นาทีจนครบ 4 ชั่วโมง และ 1, 2, 3, 5, 7, 10, 17, 24, 31, 76, และ 90 วัน

3.5.2 ความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ย

เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุอาหาร (% Nutrient release) ที่วัดได้จากค่าการนำไฟฟ้าของ ตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ถุงเมมเบรนบรรจุปุ๋ย (Lubkowski et al. 2015) คำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ Nutrient release} = \frac{\sigma_t \times 100}{\sigma_F} \quad (3.2)$$

โดยที่ σ_t คือ ค่าการนำไฟฟ้า ณ เวลาใดใด σ_F คือ ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ ปุ๋ย 1 กรัมในน้ำ 50 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 26.69 mS/cm (ข้อมูลแสดงไว้ในบทที่ 4)

บทที่ 4

ผลและการอภิปราย

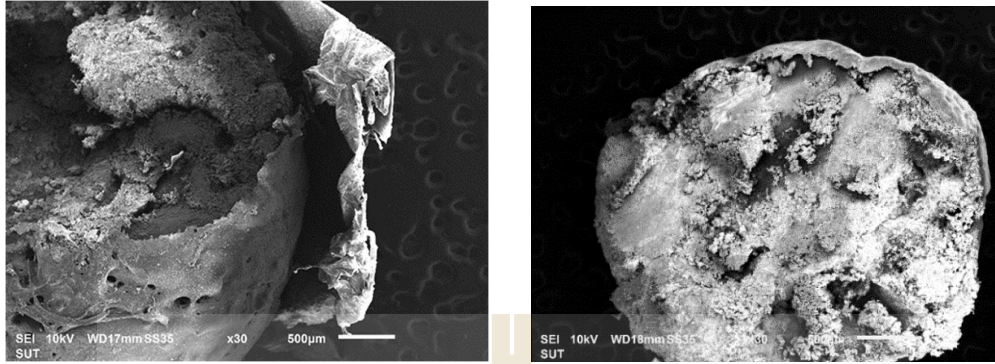
ในบทนี้จะแสดงผลและอภิปรายผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างและสมบัติของสารเคลือบแผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์ม รวมทั้งการวิเคราะห์ความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ย เมื่อมีการใช้สารเคลือบปุ๋ยชนิดพอลิแล็กติกแอซิด พอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ และพอลิแล็กติกแอซิดกับสาร X ที่เตรียมด้วยเทคนิคการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยแบบต่าง ๆ ตามลำดับ

4.1 โครงสร้างและสมบัติสารเคลือบ แผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์ม

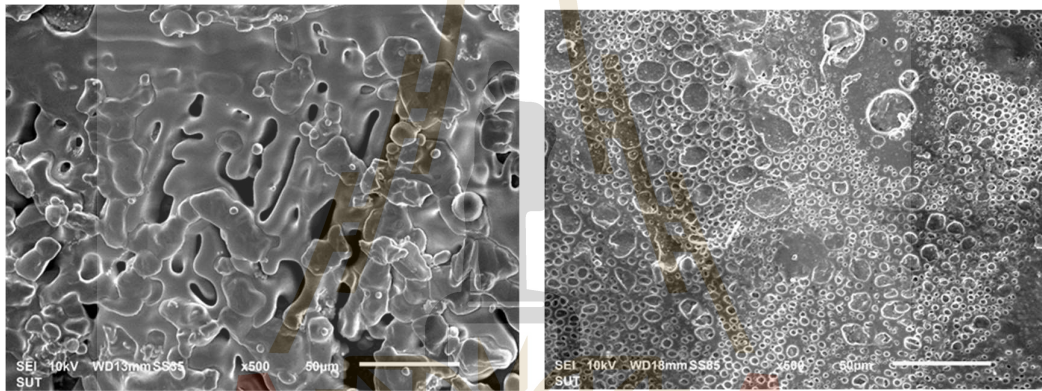
จากการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยด้วยวิธีการที่ต่างกัน วิธีการตรวจสอบโครงสร้างจะอาศัยเทคนิคการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สมบัติเชิงกลจะใช้สมบัติแรงดึง ส่วนความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ยจะศึกษาภายใต้สภาวะการแช่น้ำดีไอเป็นหลัก

4.1.1 สัณฐานวิทยา

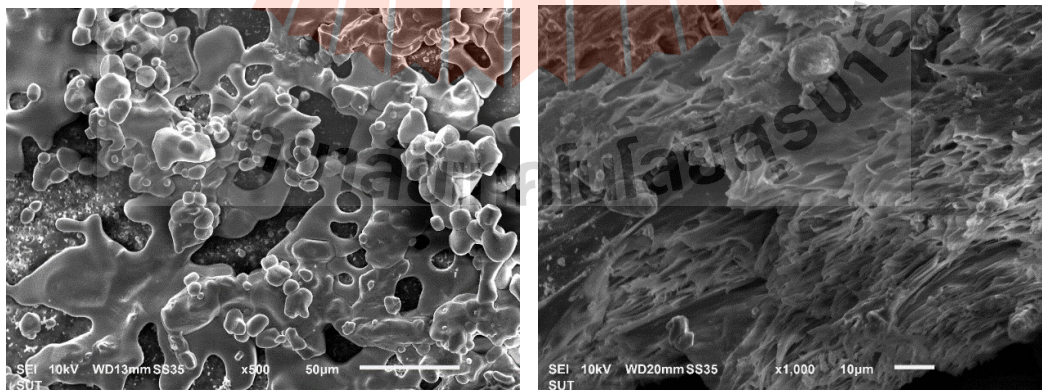
รูปแบบปุ๋ยเคลือบ การจุ่มเคลือบนี้ อาศัยการ precipitation ในตัวไม่ทำละลาย (non-solvent) ในการคงรูปสารเคลือบบนปุ๋ย อัตราการ precipitation ควรแตกต่างกันเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายต่างกัน สัณฐานวิทยาของปุ๋ยเคลือบด้วยพอลิแล็กติกแอซิด (เกรด 4043D) เตรียมที่ความเข้มข้น 10 และ 20% ที่ได้ แสดงดังรูป รูปที่ 4.1- รูปที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่า ความหนาของชั้นเคลือบที่ได้แตกต่างกันเล็กน้อย ที่ 10% จะมีความหนาน้อยกว่า ความหนาไม่สม่ำเสมอ เมื่อพิจารณาบนพื้นผิว ที่ 10% มีช่องว่าง ลึก ขนาดใหญ่ ขณะที่ที่ 20% มีช่องว่างเล็กกระจายทั่วไป ข้อจำกัดที่สำคัญในการทำชั้นเคลือบเม็ดปุ๋ย คือ ชั้นเคลือบจะไม่ครอบคลุมปุ๋ยโดยรอบทั้งหมด (imperfection) เมื่อทดสอบการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยเคลือบ (เกรด 4043D และ เกรด 3052D) เตรียมที่ความเข้มข้น 10 และ 20% ด้วยการวัดค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ปุ๋ยละลายออกหมดภายในระยะเวลาเพียงหนึ่งชั่วโมง ไม่ให้ข้อมูลการปลดปล่อยผ่านชั้นเคลือบที่แท้จริง



รูปที่ 4.1 ไมโครกราฟ SEM ภาพตัดขวางของเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ โดยใช้ความเข้มข้นที่ (ก) 10% และ (ข) 20% (กำลังขยาย 30 เท่า)

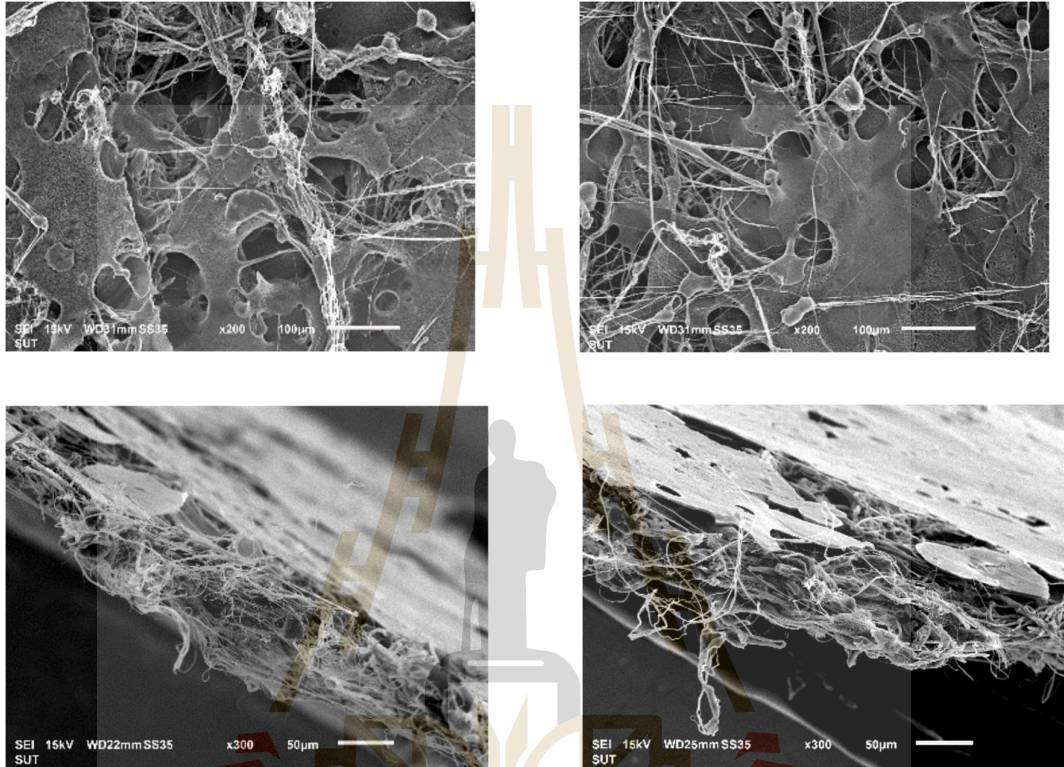


รูปที่ 4.2 ไมโครกราฟ SEM ของพื้นผิวปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ โดยใช้ความเข้มข้นที่ (ก) 10% และ (ข) 20% (กำลังขยาย 500 เท่า)



รูปที่ 4.3 ไมโครกราฟ SEM ของพื้นผิวปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการจุ่มลงในสารละลายพอลิเมอร์ โดยใช้ความเข้มข้นที่ (ก) 10% และ (ข) 20% (กำลังขยาย 1,000 เท่า)

รูปแบบแผ่นเมมเบรน สัณฐานวิทยาของแผ่นเมมเบรน PLA ที่ปรับจำนวนรอบการพ่นสเปรย์ ให้ได้ความหนาที่ 0.05 และ 0.1 มิลลิเมตร แสดงรูปที่ 4.4 จะเห็นโครงสร้างภายในมีลักษณะเป็นเส้นใย และบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นแผ่นต่อเนื่องที่มีช่องว่างกระจายตัวอยู่

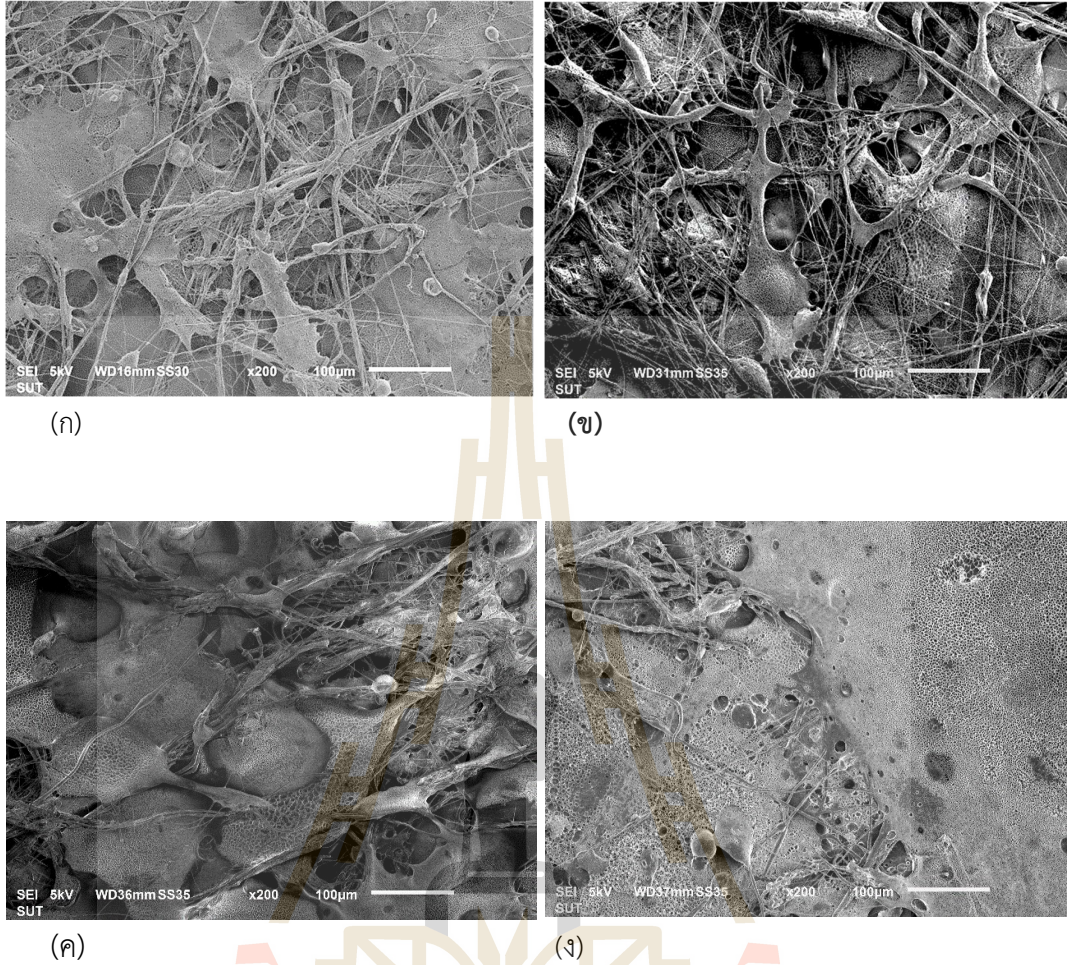


(ก) ความหนา 0.05 mm

(ข) ความหนา 0.1 mm

รูปที่ 4.4 ไมโครกราฟ SEM ของพื้นผิว (ด้านบน) และภายใน (ด้านล่าง) ของแผ่นเมมเบรน PLA ที่ความหนา (ก) 0.05 และ (ข) 0.1 มิลลิเมตร

สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแผ่นเมมเบรน PLA และ PLA/NRL ที่ปริมาณน้ำยางธรรมชาติต่างกัน ที่จำนวนรอบการพ่น 20 และ 40 ครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่า แผ่นเมมเบรน PLA ประกอบด้วยเส้นใยและช่องว่าง และลักษณะดังกล่าวเพิ่มขึ้นที่ PLA/NRL 97:3 อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางธรรมชาติเป็นที่ PLA/NRL 95:5 ลักษณะเส้นใยและช่องว่างลดลง นอกจากนี้ ยังพบลักษณะโครงสร้างคล้ายโฟมในเนื้อวัสดุ



รูปที่ 4.5 ไมโครกราฟ SEM ของพื้นผิวแผ่นเมมเบรน (ก) PLA, (ข) PLA/NRL 97:3, (ค) PLA/NRL 95:5 และ (ง) PLA/NRL 90:10 ที่เตรียมได้ ที่กำลังขยาย 200 เท่า

4.1.2 สมบัติการดึง

แผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์มที่เตรียมเพื่อนำมาบรรจุถูกนำมาทดสอบสมบัติแรงดึง เพื่อทราบถึงความทนต่อแรงดึง หากฉีกขาดได้ง่าย จะไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ประโยชน์

รูปแบบแผ่นเมมเบรน เมื่อทำการวัดสมบัติแรงดึงแผ่นเมมเบรน PLA ที่ความหนา 0.05 และ 0.1 มิลลิเมตร ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ได้ผลดังรวบรวมในตารางที่ 4.1 พบว่า เมมเบรนที่ความหนา 0.05 มิลลิเมตร มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าความหนา 0.1 มิลลิเมตร

รูปแบบแผ่นฟิล์ม เมื่อทำการวัดสมบัติแรงดึงแผ่นฟิล์ม PLA และ PLA-X ได้ผลดังรวบรวมในตารางที่ 4.1 แผ่นฟิล์ม PLA-X มีสมบัติแรงดึงสูงกว่าแผ่นฟิล์ม PLA ทั้งด้านความแข็งแรง ความต้านทานต่อแรงดึงและความเหนียว

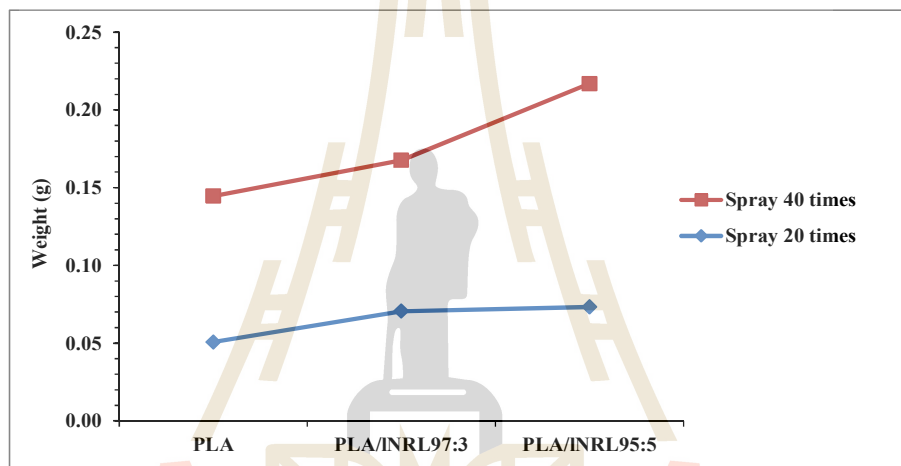
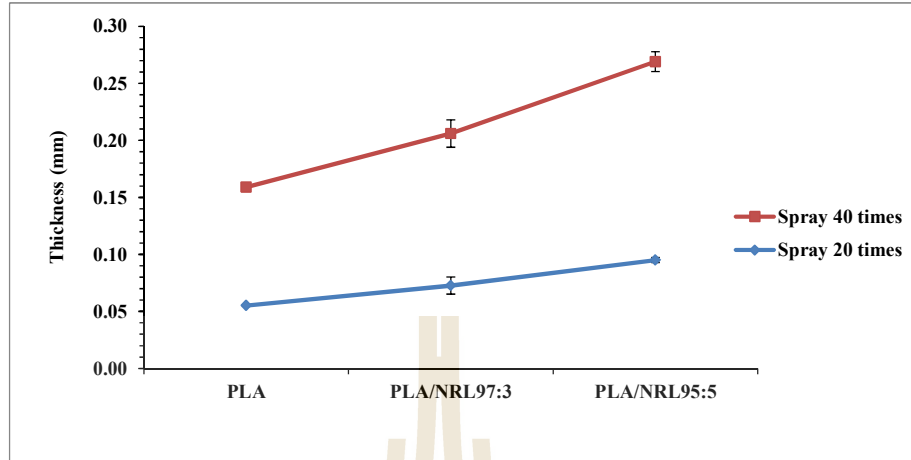
ตารางที่ 4.1 สมบัติแรงดึงของแผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์มสำหรับถุงบรรจุปุ๋ย

ตัวอย่าง	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Toughness (J/m ³)
แผ่นเมมเบรน PLA 0.05 mm	0.17±0.02	2.21±0.33	2.59±0.26	-
แผ่นเมมเบรน PLA 0.1 mm	0.10±0.01	1.47±0.21	2.23±0.50	-
แผ่นฟิล์ม PLA	0.33±0.01	16.80± 1.99	240.73± 16.47	1935.27± 145.40
แผ่นฟิล์ม PLA-X	0.64±0.06	19.73± 4.02	265.59± 22.55	2701.15± 270.71

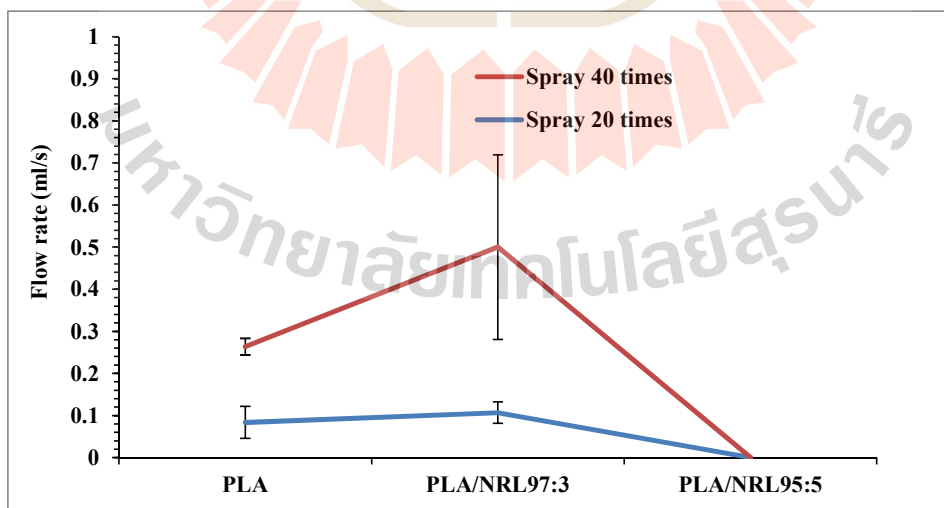
แผ่นฟิล์มมีความทนต่อแรงดึงสูงกว่าแผ่นเมมเบรน อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นเมมเบรนเพียงพอสำหรับนำมาบรรจุปุ๋ยและใช้งาน ไม่ฉีกขาดโดยง่าย

4.1.3 อัตราการไหลของน้ำ

รูปแบบแผ่นเมมเบรน แผ่นเมมเบรนที่เตรียมจาก PLA, PLA/NRL 97:3 และ PLA/NRL 95:5 มีความหนาและน้ำหนักแตกต่างกันตามจำนวนรอบการปั่น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และเมื่อนำมาทดสอบอัตราการไหลของน้ำ ได้ผลดังรูปที่ 4.7 ซึ่งค่าต่าง ๆ ได้รวบรวมในตารางที่ 4.2 เมื่อจำนวนรอบการปั่นเพิ่มขึ้น ความหนาและน้ำหนักของแผ่นเมมเบรนเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการผสมน้ำยางธรรมชาติ ทำให้แผ่นเมมเบรนมีความหนาและน้ำหนักเพิ่มขึ้นเช่นกัน ขณะที่อัตราการไหลผ่านของน้ำมีค่าสูงขึ้นเมื่อผสมน้ำยางธรรมชาติที่ PLA/NRL 97:3 แต่ไหลผ่านไม่ได้ที่ PLA/NRL 95:5 ที่เป็นเช่นนี้สอดคล้องกับสัญญาณวิทยาของแผ่นเมมเบรนที่เตรียมได้ซึ่งมีลักษณะเส้นใยและช่องว่างที่น้อยลง การมีปริมาณยางเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้การดูดซับน้ำของเมมเบรนลดลง ทำให้การซึมผ่านเกิดได้ยากขึ้น



รูปที่ 4.6 ความหนา (ก) และน้ำหนัก (ข) ของแผ่นเมมเบรน PLA และ PLA/NRL ที่จำนวนรอบการพ่นต่าง ๆ



รูปที่ 4.7 อัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน PLA และ PLA/NRL ที่จำนวนรอบการพ่นต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนา น้ำหนัก และอัตราการไหลของน้ำของแผ่นเมมเบรน PLA และ PLA/NRL

จำนวน รอบการ พ่น สารละลาย พอลิเมอร์	ความหนา (มม.)			น้ำหนัก (กรัม)			อัตราการไหลของน้ำ (ml/s)		
	PLA	PLA/ NRL 97:3	PLA/ NRL 95:5	PLA	PLA/ NRL 97:3	PLA/ NRL 95:5	PLA	PLA/ NRL 97:3	PLA/ NRL 95:5
20	0.055 ±0.00069	0.073 ±0.0076	0.095 ±0.00217	0.0507	0.071	0.0733	0.08 ±0.37859	0.15 ±0.25166	N/A
40	0.104 ±0.00134	0.133 ±0.0121	0.174 ±0.00871	0.094	0.097	0.1436	0.18 ±0.200	0.39 ±0.21947	N/A

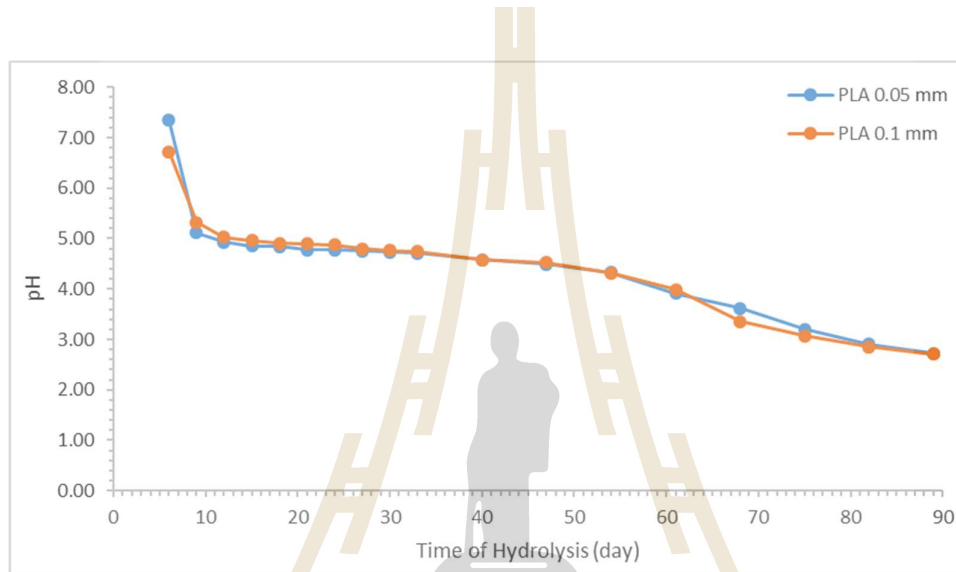
4.1.4 การแตกสลายเมื่อแช่ในน้ำ

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเอสเทอร์ที่สามารถเกิดการเสื่อมสลายโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสได้ ทั้งนี้ระหว่างการดำเนินไปของไฮโดรไลซิสจะเกิดกรดที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) ซึ่งจะทำให้หน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ได้ พอลิแล็กติกแอซิดที่เตรียมในรูปแบบชั้นเคลือบ แผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์มถูกนำมาแช่ในน้ำดีไอ อย่างไรก็ตาม พบว่า กรณีชั้นเคลือบปุ๋ย มีการรั่วออกของปุ๋ยเมื่อแช่ภายในระยะเวลาไม่นาน แสดงถึง การเคลือบเม็ดปุ๋ยมีความไม่สมบูรณ์ (imperfections) เกิดข้อบกพร่อง (defects) ทำให้ปุ๋ยละลายออกมาได้ ไม่สามารถบันทึกผลการเสื่อมสลายของพอลิแล็กติกแอซิดในรูปแบบชั้นเคลือบได้ จึงทำการทดสอบการแตกสลายของเม็ดพอลิแล็กติกแอซิด (PLA pellets) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

รูปแบบแผ่นเมมเบรน การเสื่อมสลายของแผ่นเมมเบรน PLA ในน้ำดีไอที่อุณหภูมิ 50°C ภายในระยะเวลา 90 วัน การติดตามการเสื่อมสลายอาศัยค่าความเป็นกรดเบส สภาพการนำไฟฟ้า และปริมาณกรดที่เกิดขึ้นโดยใช้การไทเทรต ผลแสดงดังรูป 4.8 – 4.10 ค่า pH ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดถูกวัดทุก ๆ 3 วันในช่วง 30 วันแรกและถูกวัดทุก ๆ 7 วันในช่วง 60 วันหลังจนครบ 90 วัน ค่า pH ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดถูกวัดทุก ๆ 3 วันในช่วง 30 วันแรกและถูกวัดทุก ๆ 7 วันในช่วง 60 วันหลังจนครบ 90 วัน

ผลการเปลี่ยนแปลงของค่า pH แสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเมื่อแช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดได้เพียง 3 วัน ค่า pH ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดทั้งสองความหนา มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดและในช่วง 60 วันแรกของการทดลองค่า pH ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดทั้งสองความหนามีแนวโน้มลดลงไม่ต่างกัน การลดลงของค่า pH เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิแล็กติกแอซิด เกิดโดยโมเลกุลของน้ำเข้าไปสลายพันธะเอส

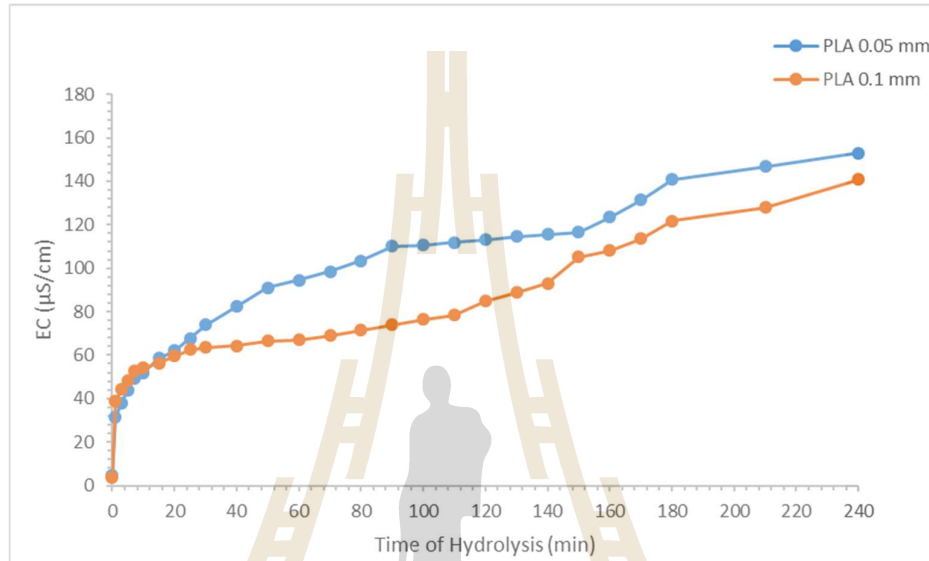
เทอร์ทำให้สายโซ่ขาดเป็นหมู่คาร์บอกซิลิกตรงปลายสายโซ่จึงทำให้มีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น เมื่อการทดลองดำเนินไปถึงวันที่ 68 ของการทดลอง พบว่า ค่า pH ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดทั้งสองความหนา มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดอีกครั้ง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของหมู่คาร์บอกซิลิกที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจึงทำให้แตกสลายได้เร็วขึ้น โดยแผ่นเมมเบรนทั้งสองความหนาให้ผลแตกต่างกันน้อยมาก กล่าวได้ว่า ความหนาของแผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดที่ใช้ไม่ส่งผลต่อการแตกสลายอย่างมีนัยสำคัญ



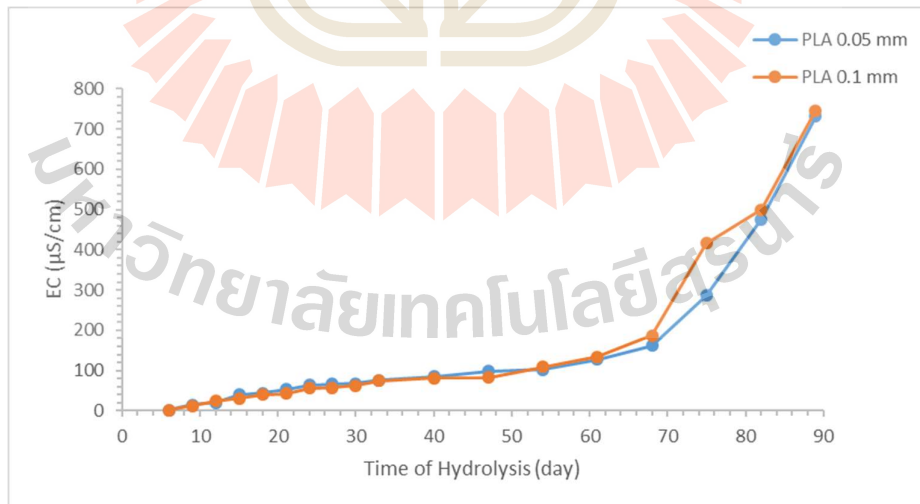
รูปที่ 4.8 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C

ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดถูกวัดทุก ๆ 3 วัน ในช่วง 30 วันแรกและถูกวัดทุก ๆ 7 วันในช่วง 60 วันหลังจนครบ 90 วัน จากผลการตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้าของน้ำแช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดในช่วง 4 ชั่วโมงแรก แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออน (หน่วยเป็นไมโครซีเมนส์/เซนติเมตร) ที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดทั้งสองความหนา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่ต่างกันและผลการตรวจสอบจากผลการตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดในช่วง 90 วัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าในช่วง 60 วันแรกค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดทั้งสองความหนา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ แต่เมื่อการทดลองดำเนินไปถึงวันที่ 68 พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดทั้งสองความหนาเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการนำไฟฟ้าขึ้นกับจำนวนไอออน การแตกตัวได้ไอออนอันเกิดจากการแตกสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิแล็กติกแอซิดเกิดโดยโมเลกุลของน้ำเข้าไปสลายพันธะเอสเทอร์

เกิดเป็นไฮโดรเนียมไอออน (hydronium ions) และไฮดรอกไซด์ไอออน (hydroxide ions) โดยที่ไฮดรอกไซด์ไอออนจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้มีจำนวนไอออนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการแตกสลายของพอลิแล็กติกแอซิดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านการไฮโดรไลซิสมาระยะเวลาหนึ่ง นั่นคือ การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นเมื่อมวลโมเลกุลของพอลิแล็กติกแอซิดน้อยลงนั่นเอง โดยแผ่นเมมเบรนที่มีความหนา 0.1 mm มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าที่ความหนา 0.05 mm



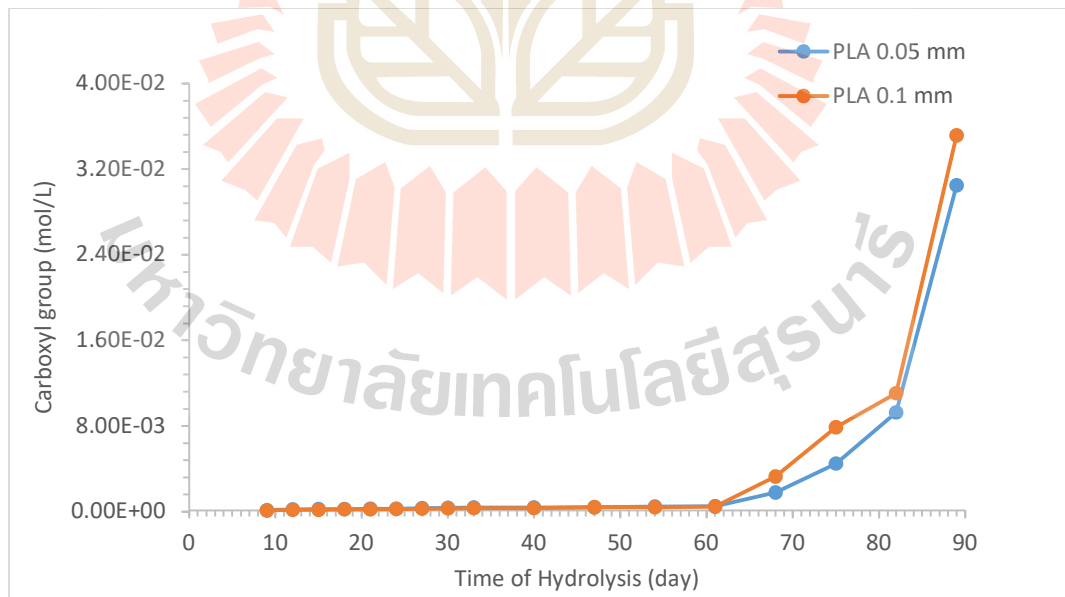
รูปที่ 4.9 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิด ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C ช่วง 4 ชั่วโมงแรก



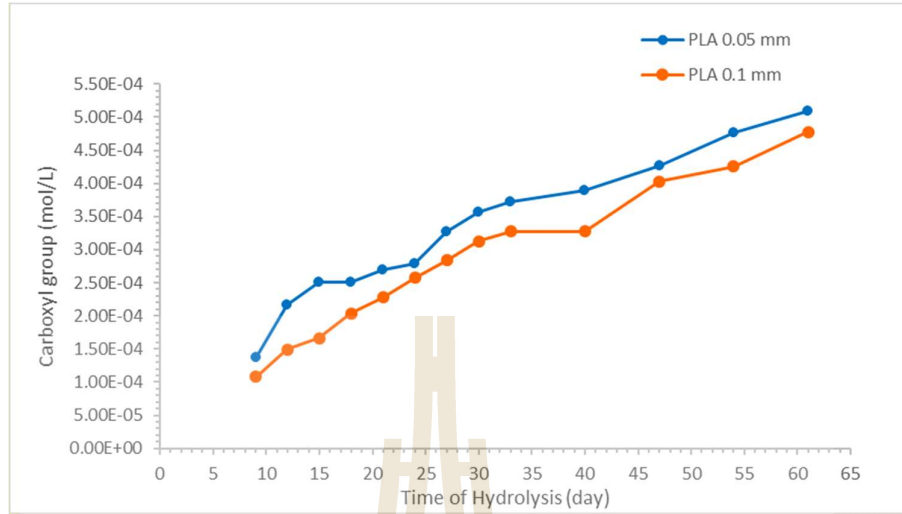
รูปที่ 4.10 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิด ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C

ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิกของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิด ถูกวัดทุก ๆ 3 วันในช่วง 30 วันแรกและถูกวัดทุก ๆ 7 วันในช่วง 60 วันหลังจนครบ 90 วัน ทุกครั้งที่ทำการดึงน้ำตัวอย่างออกมามีการเติมน้ำดีไอเข้าไปเท่ากับปริมาตรที่ดึงออกมา

จากผลการตรวจสอบความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิกในน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดที่อุณหภูมิ 50 °C แสดงได้ดังรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิกในน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 60 วันแรก ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิกในน้ำปราศจากไอออนที่ทั้งสองความหนา มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แสดงในรูปที่ 4.12 เนื่องจากการเสื่อมสลายโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิแล็กติกแอซิดจะเกิดโดยพันธะเอสเทอร์ถูกไฮโดรไลซิสโดยโมเลกุลของน้ำทำให้สายโซ่ขาดได้หมู่ปลายสายโซ่เป็นหมู่คาร์บอกซิลิกจึงทำให้มีความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิกมากขึ้น แต่เมื่อการทดสอบดำเนินถึงวันที่ 68 ของการทดลอง พบว่าเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิกในน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดทั้งสองความหนา มีการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกเร่งด้วยจำนวนของหมู่คาร์บอกซิลิกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แตกสลายได้เร็วขึ้นและการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นในตัวเอง (Autocatalysis) โดยแผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความหนามาก (มวลมาก) ให้ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลิกมากกว่า

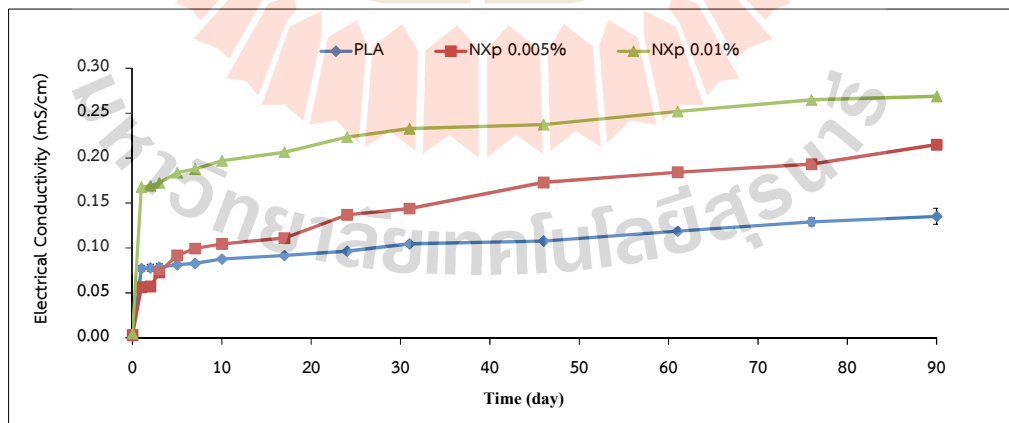


รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดที่เวลาต่าง ๆ ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่แผ่นเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิด ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 °C ในช่วง 60 วันแรก (ขยายช่วงระยะเวลาแรกของรูปที่ 4.11)

รูปแบบแผ่นฟิล์ม การเสื่อมสลายของแผ่นฟิล์ม PLA ในน้ำดีไอที่อุณหภูมิ 35°C ภายในระยะเวลา 90 วัน จากผลการตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp 0.005% และ NXp 0.01% ที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่า ถุงฟิล์ม NXp 0.01% มีค่าการนำไฟฟ้า (หน่วยเป็นมิลลิซีเมนส์/เซนติเมตร) สูงที่สุด รองลงมาคือถุงฟิล์ม NXp 0.005% และถุงฟิล์ม PLA ตามลำดับ ผง X (ในรูปของ NXp) ที่เติมลงในฟิล์มจะแตกตัวออกเป็นไอออนทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ถุงฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผง X ที่อยู่ในผิวฟิล์ม นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเวลาในการแช่ถุงฟิล์มเพิ่มขึ้น ตารางที่ 4.3 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp 0.005% และ NXp 0.01% ที่อุณหภูมิ 35°C



รูปที่ 4.13 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ณ เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 90 วัน

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ณ เวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 90 วัน

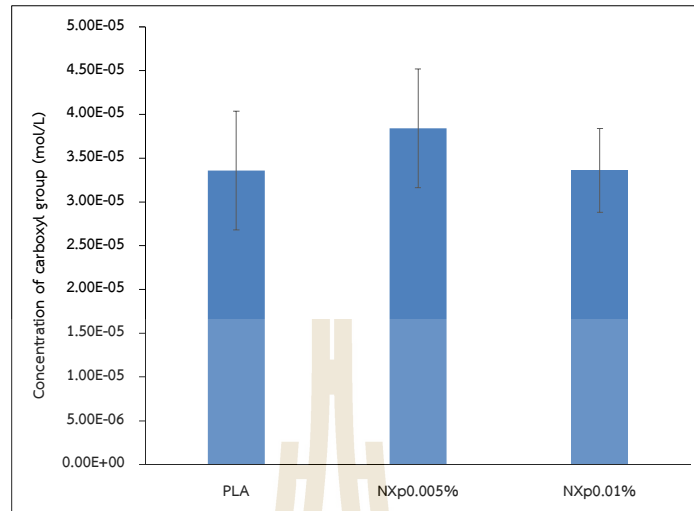
เวลา (วัน)	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่าง (mS/cm)		
	PLA	NXp 0.005%	NXp 0.01%
0	0.0018 ±0.00013	0.0030 ±0.00361	0.0048 ±0.00455
1	0.0769 ±0.00346	0.0563 ±0.06102	0.1679 ±0.05523
2	0.0778 ±0.00389	0.0572 ±0.06058	0.1694 ±0.05779
3	0.0784 ±0.00396	0.0728 ±0.05989	0.1724 ±0.05919
5	0.0812 ±0.00156	0.0917 ±0.06336	0.1838 ±0.05027
7	0.0828 ±0.00198	0.0994 ±0.06901	0.1880 ±0.05492
10	0.0876 ±0.00191	0.1046 ±0.07064	0.1970 ±0.05209
17	0.0916 ±0.00177	0.1109 ±0.07050	0.2064 ±0.05511
24	0.0964 ±0.00177	0.1368 ±0.08026	0.2232 ±0.05161
31	0.1046 ±0.00163	0.1438 ±0.08690	0.2327 ±0.04837
46	0.1076 ±0.00085	0.173 ±0.05134	0.2372 ±0.04934
61	0.1185 ±0.00042	0.1841 ±0.04667	0.2519 ±0.05120
76	0.1289 ±0.00438	0.1932 ±0.04688	0.2649 ±0.04911
90	0.1352 ±0.00898	0.215 ±0.05374	0.2688 ±0.05243

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp 0.01% สังเกตเห็นว่าเมื่อเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำดีไอมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ถุงฟิล์มชนิดต่าง ๆ มีค่าพีเอชในช่วง 6 – 7

ตารางที่ 4.4 ค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 35 °C

เวลา (วัน)	ค่าพีเอชของน้ำตัวอย่าง		
	PLA film	NXp 0.005% film	NXp 0.01% film
0	7.43 ± 0.35	7.02 ± 0.40	6.92 ± 0.15
1	6.19 ± 0.04	7.23 ± 0.40	6.37 ± 0.15
2	6.23 ± 0.12	6.64 ± 0.27	6.59 ± 0.27
3	6.46 ± 0.04	6.97 ± 0.33	7.00 ± 0.49
5	6.93 ± 0.45	7.03 ± 0.12	6.67 ± 0.06
7	6.98 ± 0.18	6.68 ± 0.09	7.22 ± 0.21
10	6.84 ± 0.04	6.92 ± 0.14	6.70 ± 0.06
17	7.13 ± 0.12	7.25 ± 0.08	7.57 ± 0.35
24	7.50 ± 0.28	7.14 ± 0.17	7.23 ± 0.11
31	7.20 ± 0.04	7.88 ± 0.25	7.57 ± 0.36
46	7.58 ± 0.38	6.79 ± 0.11	7.35 ± 0.47
61	7.55 ± 0.11	7.51 ± 0.11	7.21 ± 0.10
76	7.06 ± 0.19	7.64 ± 0.34	7.21 ± 0.22
90	7.27 ± 0.07	7.16 ± 0.12	7.67 ± 0.38

จากผลการตรวจสอบความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิกในน้ำดีไอที่แช่ฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp 0.01% หลังจากแช่ในน้ำดีไอ ที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 90 วัน พบว่าค่าความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิกในตัวอย่างน้ำทั้งสามตัวอย่งนั้นมีค่าประมาณ 3×10^{-5} mol/L ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.5 จากค่าพีเอชและค่าความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิกในน้ำดีไอที่แช่ฟิล์มทั้งสามชนิด แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิการทดสอบที่ 35 °C ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดได้ช้า



รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% เป็นเวลา 90 วัน ของการทดสอบปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 35 °C

ตารางที่ 4.5 สรุปค่าความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxyl group) ของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16

	ความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิลิก (mol/L)
PLA	0.0000336 ±6.78823E-06
NXp0.005%	0.0000384 ±6.78823E-06
NXp0.01%	0.0000336 ±0.0000048

4.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์ปุ๋ย

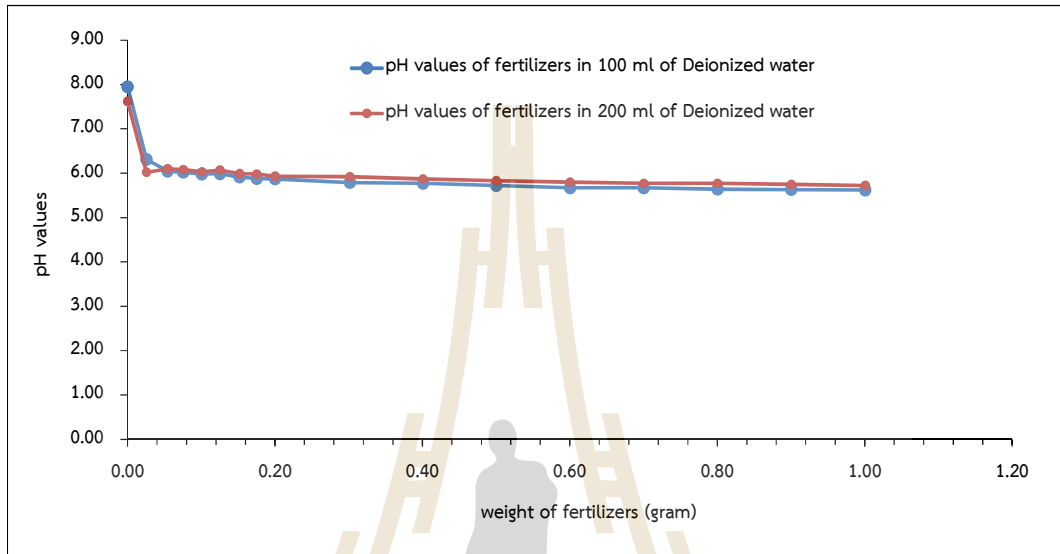
ในการตรวจสอบความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ย ทำในรูปปุ๋ยเคลือบ และถุงบรรจุปุ๋ย โดยถุงบรรจุนี้ทำจากแผ่นเมมเบรนและแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้

4.2.1 ความเป็นกรดเบส (pH) และ สภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity, EC)

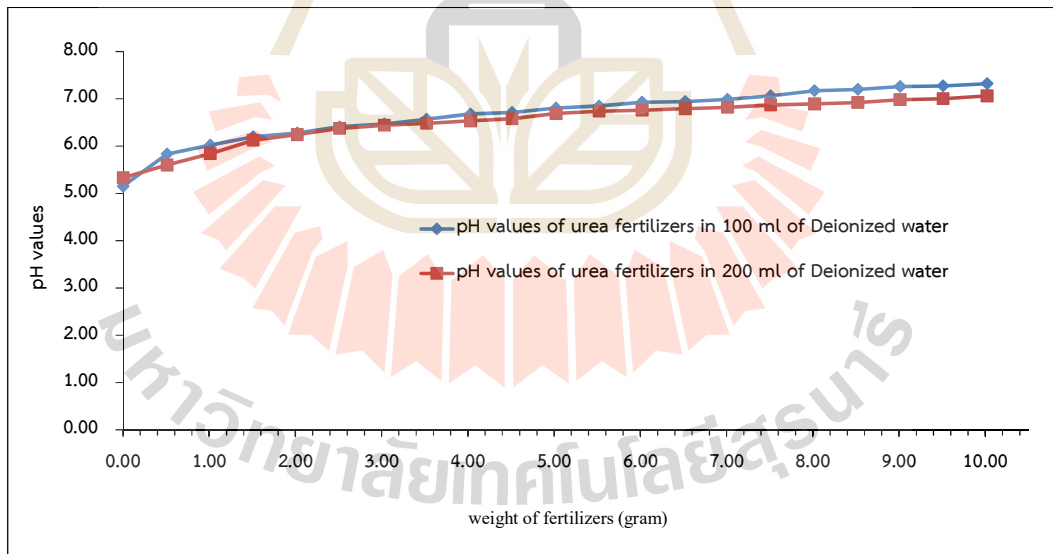
กราฟมาตรฐาน

เบื้องต้น ทำการสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าพีเอชและปริมาณปุ๋ยทั้งชนิดปุ๋ย NPK 16-16-16 และปุ๋ยยูเรียในน้ำดีไอ โดยใช้ปริมาตรน้ำดีไอที่ 100 และ 200 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่ง

จะเห็นได้ว่า ค่าพีเอชของปุ๋ย NPK 16-16-16 ค่อนข้างคงที่เท่ากับ 6 ทั้งสองปริมาณที่ใช้ ขณะที่ปุ๋ยยูเรีย ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น จากค่าพีเอช 6 จนถึง 7 ทั้งสองปริมาณที่ใช้ การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณปุ๋ย (ความเข้มข้น) เกิดขึ้นน้อย



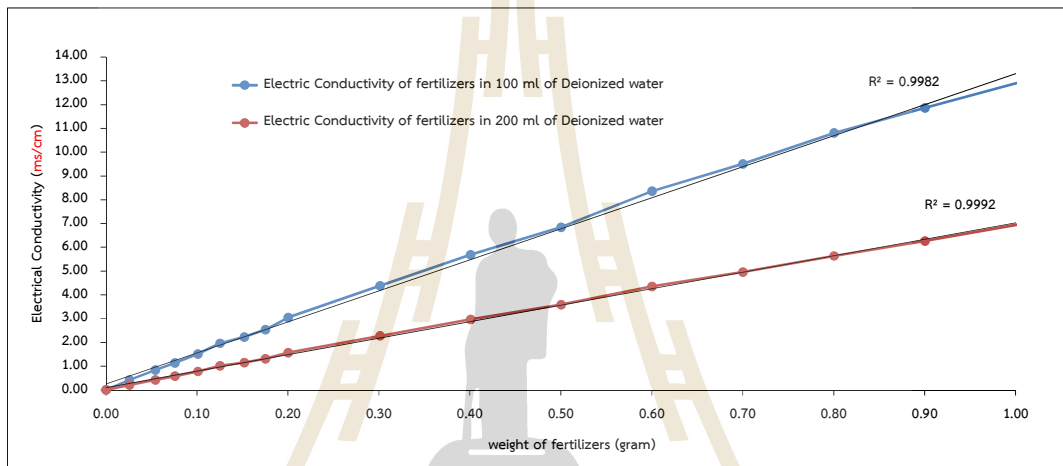
(ก)



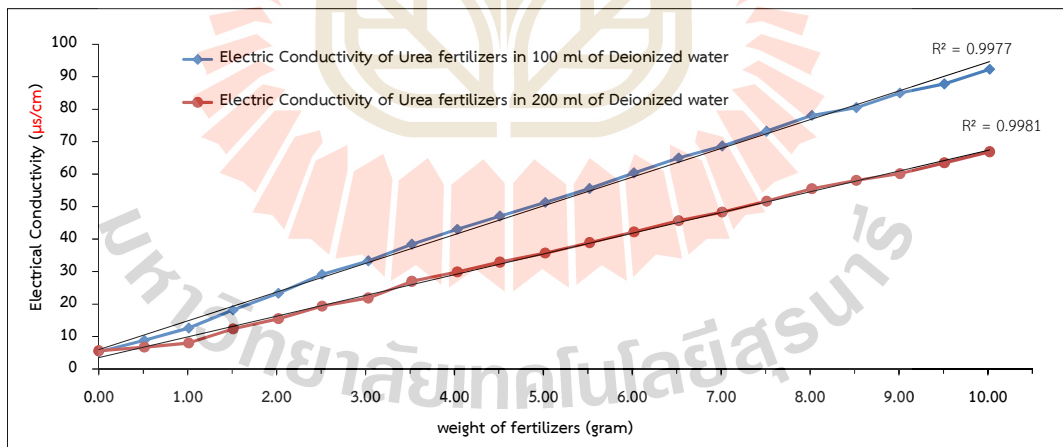
(ข)

รูปที่ 4.15 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าพีเอชของน้ำดีไอที่แช่ปุ๋ยกับปริมาณปุ๋ย (ก) ปุ๋ย NPK 16-16-16 และ (ข) ปุ๋ยยูเรีย

นอกจากค่าพีเอช ได้ทำการสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับปริมาณปุ๋ยในน้ำดีไอ โดยใช้ปริมาตรน้ำดีไอที่ 100 และ 200 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าการนำไฟฟ้าของปุ๋ย NPK 16-16-16 ในน้ำดีไอเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น ทั้งสองปริมาตรที่ใช้ โดยมีค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้น 1 กรัม/100 มิลลิลิตร (1% w/v) เท่ากับ 12.90 mS/cm และจะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้นเท่ากัน ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน (ที่ปริมาณปุ๋ยเดียวกัน เมื่อใช้ปริมาตรน้ำดีไอ 100 ml จะมีความเข้มข้นเป็นสองเท่าของเมื่อใช้ปริมาตรน้ำดีไอ 200 ml) ขณะที่ปุ๋ยยูเรีย ค่าการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้น 1 กรัม/100 มิลลิลิตร (1% w/v) เท่ากับ 12.62 μ S/cm (น้อยมาก) และที่ความเข้มข้น 10%



(ก)



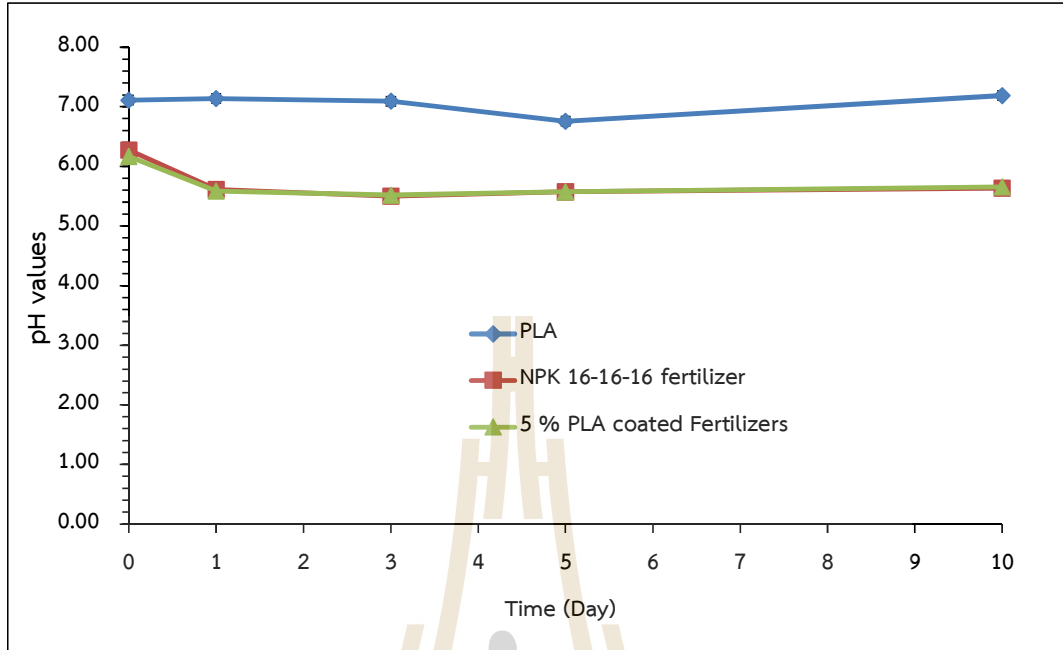
(ข)

รูปที่ 4.16 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ปุ๋ยกับปริมาณปุ๋ย (ก) ปุ๋ย NPK 16-16-16 (หน่วยมิลลิวินาที/เซนติเมตร) และ (ข) ปุ๋ยยูเรีย (หน่วยไมโครวินาที/เซนติเมตร)

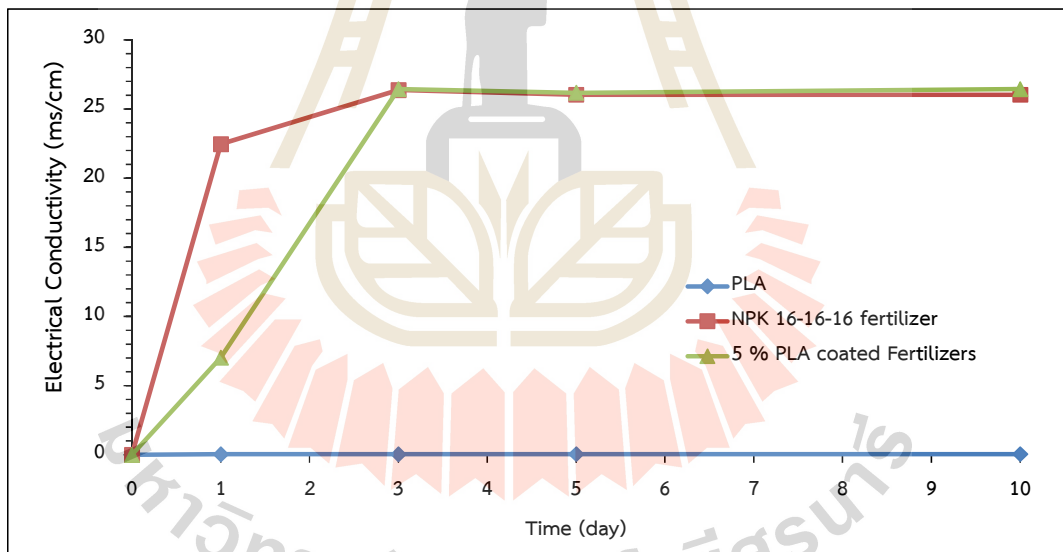
w/v ซึ่งเป็นความเข้มข้นสูงสุดที่ทดสอบ ได้ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ $92.30 \mu\text{S}/\text{cm}$ หรือ $92.30 \times 10^{-3} \text{ mS}/\text{cm}$ (ค่าน้อยมาก) การที่ปุ๋ยยูเรียนำไฟฟ้าได้น้อยมาก เนื่องจากเมื่อละลายน้ำ ไม่แตกตัวให้ออนตอนที่ปุ๋ย NPK เมื่อละลายน้ำ ส่วนของโพแทสเซียม (K) แตกตัวเป็นไอออนได้เมื่อละลายน้ำ ทำให้นำไฟฟ้าได้ ดังนั้น ในการศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ย จึงเลือกใช้ปุ๋ย NPK 16-16-16 ในการศึกษาต่อไป

ปุ๋ยเคลือบ

การทดลองการปลดปล่อยปุ๋ยในรูปแบบปุ๋ยเคลือบที่เตรียมจากสารละลาย PLA ที่ความเข้มข้น 5% ทำโดยแช่น้ำดีไอ และเพื่อเปรียบเทียบได้ทำการแช่เม็ด PLA และปุ๋ย NPK 16-16-16 ในน้ำดีไอ และวัดค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า รูปที่ 4.17 (ก) ค่าพีเอชของน้ำดีไอที่แช่ PLA มีค่าประมาณ 7 และค่าพีเอชไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาในการแช่เม็ด PLA เพิ่มขึ้น ชี้ให้เห็นว่า PLA ไม่เกิดการแตกตัว การเสื่อมสภาพ (degrade) ไม่เกิดการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ในระยะเวลา 10 วันของการแช่น้ำดีไอ ขณะที่ ค่าพีเอชของน้ำดีไอที่แช่ปุ๋ย NPK 16-16-16 และปุ๋ยเคลือบด้วย PLA 5% ลดลงจาก 7 เป็น 5.63 หลังจากแช่ได้หนึ่งวัน ค่าพีเอชของน้ำดีไอที่แช่ปุ๋ย NPK 16-16-16 และปุ๋ยเคลือบด้วย PLA 5% มีค่าคงที่เมื่อแช่ได้สามวัน การที่ค่า pH ของน้ำดีไอลดลงนั้น มาจากปุ๋ยละลายในน้ำดีไอ ทำให้น้ำดีไอมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.17 (ข) แสดงค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของน้ำดีไอที่แช่ PLA, ปุ๋ย NPK 16-16-16 และปุ๋ยเคลือบด้วย PLA จะเห็นว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ PLA มีค่าน้อยมาก อยู่ที่ $0.04125 \pm 2.757 \text{ mS}/\text{cm}$ เมื่อแช่ทิ้งไว้ 1 วัน (ระบบเข้าสู่สมดุล ค่านี้แตกต่างจากเมื่อเริ่มแช่ 0 วัน) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อแช่ทิ้งไว้ 10 วัน ส่วนค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ปุ๋ย NPK 16-16-16 มีค่าสูงและเข้าสู่ค่าคงที่ที่ $27 \text{ mS}/\text{cm}$ (ความเข้มข้น เท่ากับปุ๋ย 1 กรัมต่อน้ำปราศจากไอออน 50 มิลลิลิตร) เมื่อแช่ได้ 3 วัน ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ปุ๋ยเคลือบด้วย PLA 5% เป็นไปในลักษณะเดียวกับปุ๋ย NPK 16-16-16 ซึ่งเข้าสู่ค่าคงที่ที่ $27 \text{ mS}/\text{cm}$ เมื่อแช่ได้ 3 วันเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยเคลือบด้วย PLA แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าในลักษณะเดียวกันกับปุ๋ย คาดว่าเกิดจากการเคลือบที่ไม่สมบูรณ์ มีช่องว่าง ทำให้น้ำแพร่เข้าไปละลายปุ๋ยออกมาได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 ค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ PLA, ปุ๋ย NPK 16-16-16 และปุ๋ยเคลือบด้วย PLA

ตารางที่ 4.6 สรุปค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่ใส่ PLA, ปุ๋ย NPK 16-16-16 และปุ๋ยเคลือบด้วย PLA

เวลา (วัน)	ค่าพีเอชน้ำตัวอย่าง			ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่าง (mS/cm)		
	PLA pellet	NPK 16-16-16	5 % PLA coated fertilizers	PLA pellet	NPK 16-16-16	5 % PLA coated fertilizers
0	7.11 ±0.76	6.27 ±0.08	6.17 ±0.42	0.00271	0.00271	0.00271
1	7.14 ±0.71	5.62 ±0.04	5.59 ±0.015	0.04125 ±2.757	22.45 ±1.90	7.026667 ±1.025
3	7.09 ±0.41	5.50 ±0.01	5.52 ±0.043	0.04140 ±0.141	26.37 ±0.416	26.43333 ±0.513
5	6.76 ±0.53	5.57 ±0.005	5.57 ±0.006	0.04795 ±1.767	26.03 ±0.251	26.16667 ±0.378
10	7.19 ±0.37	5.64 ±0.006	5.65 ±0.006	0.04860 ±4.101	26.03 ±0.493	26.43333 ±0.416

ถุงบรรจุปุ๋ยจากแผ่นเมมเบรน

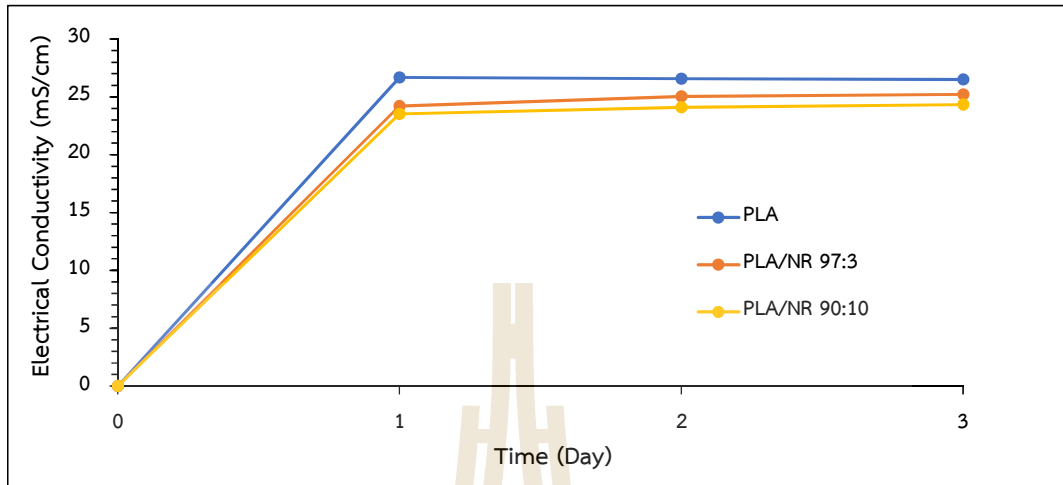
การทดลองการปลดปล่อยปุ๋ยในรูปแบบแผ่นเมมเบรน ทำโดยเตรียมถุงบรรจุปุ๋ยจากแผ่นเมมเบรนที่เตรียมได้ แล้วนำถุงดังกล่าวแช่ในน้ำดีไอ ติดตามค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ได้ผลดังรวบรวมในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.7 สังเกตเห็นว่า เมื่อพิจารณาจากการนำไฟฟ้า ถุงเมมเบรนที่เตรียมจาก PLA นั้น ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นและคงที่ที่ 26 mS/cm เมื่อแช่ได้เพียง 1 วันเท่านั้น ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าของถุงเมมเบรนที่มียางธรรมชาติผสมกับพอลิแล็กติกแอซิด PLA/NRL(97:3) และ PLA/NRL(90:10) เพิ่มขึ้นและคงที่ในวันที่ 2 ของการทดลอง เมื่อคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยสารอาหาร (% Nutrient release) ที่วัดได้จากค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ถุงเมมเบรนบรรจุปุ๋ย ตามสมการที่ 3.2 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8 สังเกตเห็นว่าค่าการปลดปล่อยสารอาหารของถุงเมมเบรน PLA มีค่าสูงสุดที่ 98% และคงที่ตั้งแต่วันที่ 1 ของการทดลอง จนถึงวันที่ 3 ของการทดลอง และค่าการปลดปล่อยสารอาหารของถุงเมมเบรน PLA/NRL(97:3) และ PLA/NRL(90:10) ในวันที่ 3 ของการทดลอง มีค่าสูงสุดที่ 93% และ 90% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการผสมยางธรรมชาติมีส่วนช่วยชะลอการปลดปล่อยได้ 5-8% อย่างไรก็ตาม การปลดปล่อยธาตุอาหารของแผ่นเมมเบรนทั้งสาม สูงกว่า 87% ภายในเวลาเพียงหนึ่งวันเท่านั้น

หากพิจารณาโครงสร้างแผ่นเมมเบรน (รูปที่ 4.4 และ 4.5) จะเห็นลักษณะเส้นใย ช่องว่างและรูพรุนบนพื้นผิวจำนวนมาก ซึ่งนอกจากการแพร่ผ่านเนื้อพอลิเมอร์แล้วธาตุอาหารสามารถไหลผ่านช่องว่างและรูพรุนได้นั่นเอง ทำให้ชะลอการปลดปล่อยได้น้อย

ข้อมูลเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุอาหาร (% Nutrient release) ที่วัดได้จากค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ถุงเมมเบรนบรรจุปุ๋ย (Lubkowski et al. 2015) คำนวณตามสมการ (3.2)

$$\% \text{ Nutrient release} = \frac{\sigma_t \times 100}{\sigma_F}$$

โดยที่ σ_t คือ ค่าการนำไฟฟ้า ณ เวลาใดใด σ_F คือ ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ปุ๋ย 1 กรัมในน้ำ 50 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 26.69 mS/cm แสดงในรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.9



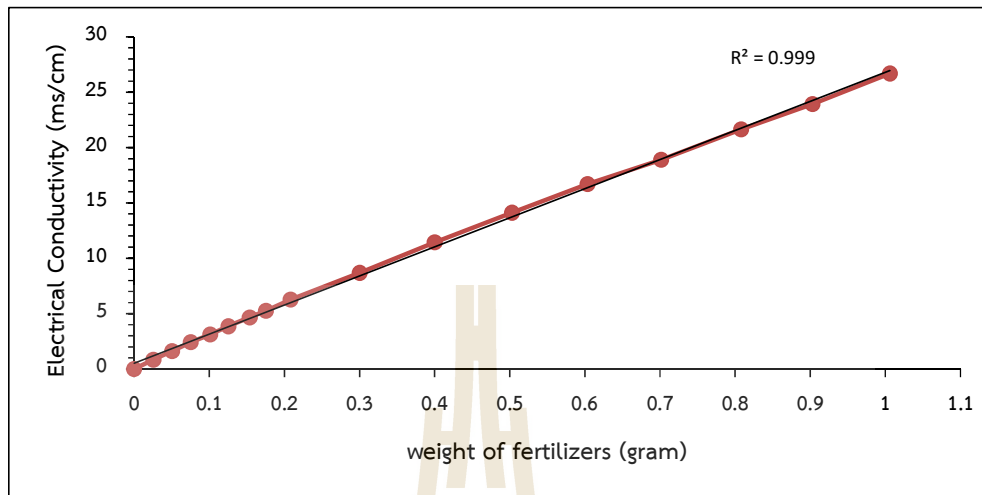
รูปที่ 4.18 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงเมมเบรน PLA, PLA/NRL(97:3) และ PLA/NRL(90:10) บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16

ตารางที่ 4.7 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอเมื่อแช่ถุงเมมเบรนบรรจุปุ๋ยแบบต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่าง (ms/cm)		
	PLA	PLA/NR 97:3	PLA/NR 90:10
0	0.001 ± 8.3865E-05	0.001 ± 0.001	0.002 ± 0.001
1	26.667 ± 0.058	24.200 ± 0.173	23.533 ± 0.513
2	26.567 ± 0.288	25.033 ± 0.351	24.100 ± 0.300
3	26.500 ± 0.173	25.200 ± 0.173	24.333 ± 0.321

ตารางที่ 4.8 สรุปค่าการปลดปล่อยสารอาหารของถุงเมมเบรนบรรจุปุ๋ยแบบต่าง ๆ

เวลา (วัน)	ค่าการปลดปล่อยธาตุอาหาร(%)		
	PLA	PLA/NR 97:3	PLA/NR 90:10
0	0.003 ± 0.000	0.005 ± 0.002	0.007 ± 0.003
1	98.765 ± 0.214	89.630 ± 0.642	87.160 ± 1.901
2	98.395 ± 1.069	92.716 ± 1.301	89.259 ± 1.111
3	98.148 ± 0.641	93.333 ± 0.642	90.123 ± 1.191

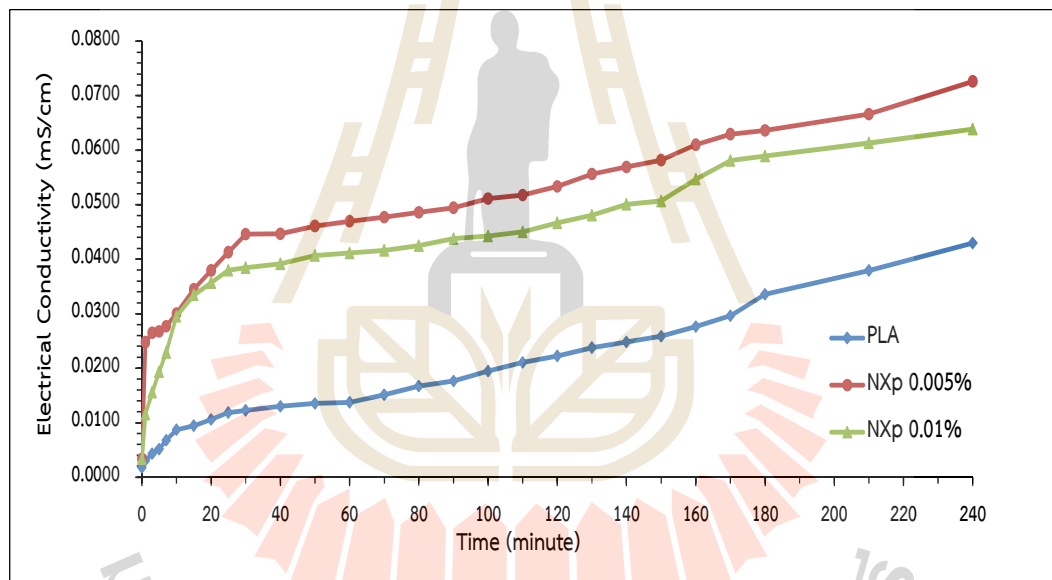


รูปที่ 4.19 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอ (ปริมาตร 50 มิลลิลิตร) ที่แช่ปุ๋ยกับปริมาณปุ๋ย
ตารางที่ 4.9 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอ (ปริมาตร 50 มิลลิลิตร) ที่แช่ปุ๋ยที่ปริมาณต่าง ๆ

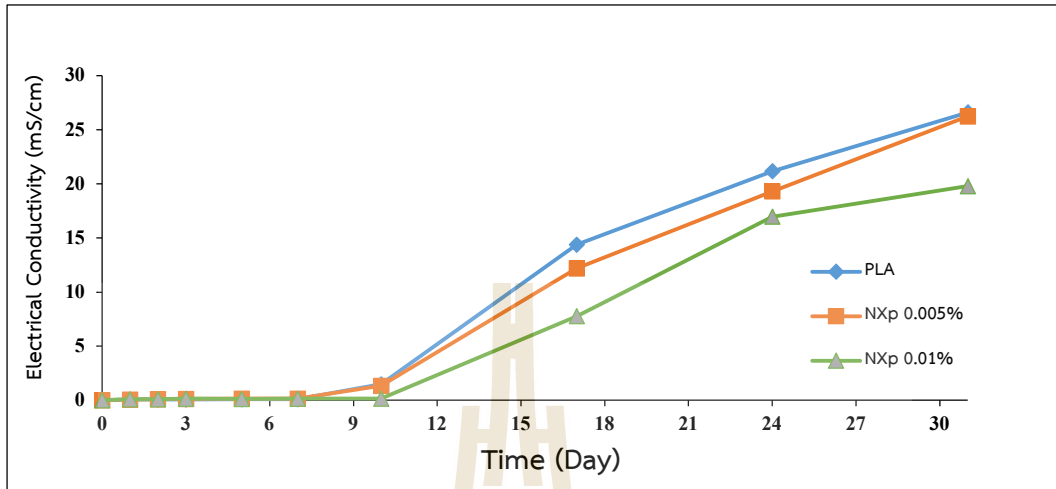
ปริมาณปุ๋ย (กรัม)	ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำ (mS/cm)
0	0.00105
0.0257	0.859
0.0506	1.625
0.0756	2.414
0.1012	3.13
0.1255	3.85
0.1540	4.68
0.1754	5.26
0.2085	6.28
0.3004	8.68
0.4002	11.45
0.5033	14.13
0.6037	16.7
0.7018	18.91
0.8080	21.64
0.9031	23.93
1.0064	26.69

ถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยชนิด NXp

จากรูปที่ 4.20 สังเกตเห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ใน 240 นาที ที่อุณหภูมิ 50°C เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการแช่ตัวอย่างถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยเพิ่มขึ้น โดยค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม NXp0.005% และถุงฟิล์ม NXp0.01% มีค่าสูงกว่าถุงฟิล์ม PLA ทั้งนี้ เนื่องจากผง X ในฟิล์ม NXp0.005% และ NXp0.01% ละลายน้ำได้ ทำให้ถุงฟิล์มที่บรรจุปุ๋ยเกิดรูพรุน ปุ๋ยที่อยู่ภายในถุงฟิล์มสามารถไหลผ่านออกได้ ขณะที่ถุงฟิล์ม PLA จะอาศัยการแพร่เพียงอย่างเดียว ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์ม NXp0.005% และ NXp0.01% สูงกว่าปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์ม PLA อย่งไรก็ตาม เมื่อแช่ทิ้งไว้ที่ระยะเวลาานาน 31 วัน (แสดงในรูปที่ 4.21) ค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 240 นาทีนี้ถือว่าน้อยมาก



รูปที่ 4.20 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ช่วงเวลา 240 นาทีแรก



รูปที่ 4.21 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ระยะเวลา 31 วัน

รูปที่ 4.21 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ระยะเวลา 31 วัน พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยทั้งสามตัวอย่างในช่วง 7 วันแรกมีค่าน้อย และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างที่แช่ปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์มทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 10 ของการแช่และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาแช่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA และ NXp0.005% มีค่าสูงกว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม NXp0.01% สาเหตุที่ให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA และ NXp0.005% มีค่าสูงกว่าน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม NXp0.01% อาจเป็นเพราะว่าถุงฟิล์ม PLA เกิดการ cracks จากแรงดันที่เกิดภายในถุงฟิล์มและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Boonmee และคณะ, 2016 และ Oertli, 1980) ทำให้มีรอยแตกซึ่งรอยแตกนั้นอาจจะมีความกว้างกว่ารูพรุนที่เกิดจากการละลายของผง X (Pasian, 2013) จึงทำให้ปุ๋ยภายในถุงฟิล์ม PLA แพร่ผ่านออกได้เร็ว ในขณะที่ถุงฟิล์ม NXp0.005% และ ถุงฟิล์ม NXp0.01% มีรูพรุน ทำให้ความดันภายในที่เกิดขึ้นในถุงฟิล์มมีค่าน้อย ความหนาแน่นของรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ X มากขึ้น จึงส่งผลให้แรงดันภายในถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยลดลงตามความหนาแน่นของรูพรุน ลดการเกิดการแตกของถุงฟิล์มได้ ช่วยชะลอการแพร่ของปุ๋ยออกจากถุงฟิล์มได้ดีมากขึ้น จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่แช่ถุงฟิล์ม NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ยมีค่าต่ำกว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่แช่ปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์ม PLA และ NXp0.005% ข้อมูลค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp 0.01% บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ถูกรวบรวมใน ตารางที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ช่วงเวลา 240 นาทีแรก

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่าง (mS/cm)		
	PLA	NXp0.005%	NXp0.01%
0	0.0018± 0.00071	0.0034± 0.00298	0.0034± 0.00173
1	0.0030± 0.00133	0.0248± 0.01022	0.0116± 0.00702
3	0.0043± 0.00230	0.0265± 0.01088	0.0156± 0.01162
5	0.0051± 0.00197	0.0268± 0.01110	0.0193± 0.01538
7	0.0068± 0.00115	0.0277± 0.01123	0.0229± 0.01747
10	0.0087± 0.00072	0.0300± 0.01285	0.0295± 0.02652
15	0.0095± 0.00110	0.0344± 0.01366	0.0334 ±0.02721
20	0.0106± 0.00201	0.0379± 0.01587	0.0357± 0.02773
25	0.0118± 0.00156	0.0413± 0.01927	0.0380± 0.02946
30	0.0122± 0.00181	0.0446± 0.02237	0.0385± 0.03003
40	0.0130± 0.00236	0.0447± 0.02237	0.0391± 0.02960
50	0.0135± 0.00276	0.0461± 0.02301	0.0407± 0.03036
60	0.0137± 0.00284	0.0470± 0.02336	0.0411± 0.03039
70	0.0151 ±0.00504	0.0477 ±0.02312	0.041 6±0.02999
80	0.0167 ±0.00708	0.0486 ±0.02370	0.0425 ±0.03036
90	0.0176 ±0.00834	0.0494 ±0.02436	0.0437 ±0.03127

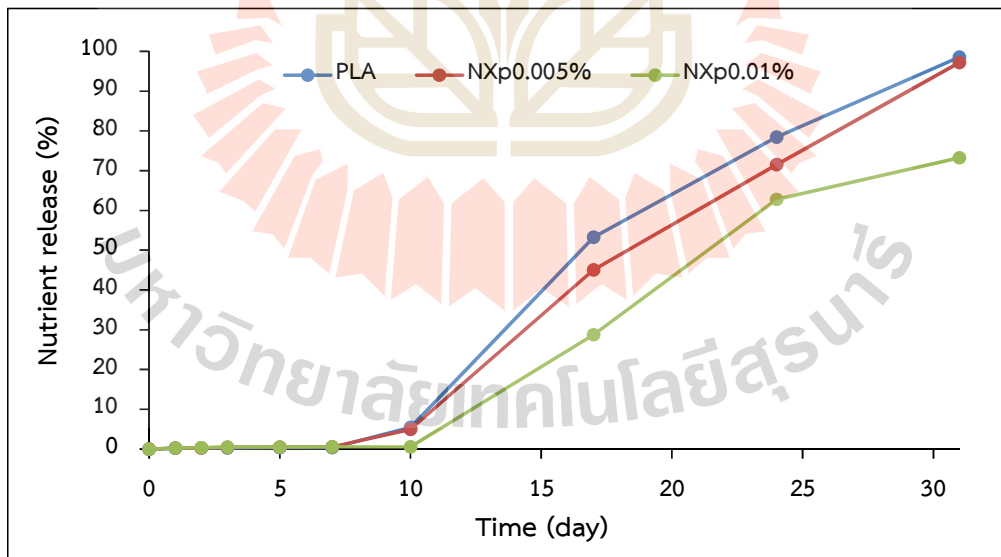
100	0.0195 ±0.01112	0.0512± 0.02643	0.0443 ±0.03109
110	0.0211 ±0.01338	0.0518 ±0.02613	0.0450 ±0.03177
120	0.0018 ±0.01511	0.0034 ±0.02625	0.0034 ±0.03337
130	0.0030 ±0.01736	0.0248± 0.02759	0.0116 0.03365
140	0.0043 ±0.01862	0.0265 0.02886	0.0156 ±0.03593
150	0.0051 ±0.01995	0.0268 ±0.02956	0.0193 ±0.03646
160	0.0068 ±0.02231	0.0277 ±0.02727	0.0229 ±0.03509
170	0.0087 ±0.02537	0.0300 ±0.02943	0.0295 ±0.03366
180	0.0095 ±0.02594	0.0344 ±0.03038	0.0334 ±0.03377
210	0.0106 ±0.02610	0.0379 ±0.03213	0.0357 ±0.03371
240	0.0118 ±0.02527	0.0413 ±0.03230	0.0380 ±0.03266

ตารางที่ 4.11 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เป็นเวลา 31 วัน

เวลา (วัน)	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่าง (mS/cm)		
	PLA	NXp0.005%	NXp0.01%
0	0.0018 ±0.00071	0.0034 ±0.00298	0.0034 ±0.00173
1	0.0523 ±0.02448	0.0742 ±0.04735	0.0768 ±0.03483
2	0.0650 ±0.02455	0.0807 ±0.03798	0.0960 ±0.04085
3	0.0701 ±0.02278	0.1118 ±0.04083	0.1351 ±0.04909

5	0.0822 ±0.03467	0.1321 ±0.04904	0.1281 ±0.04295
7	0.0907 ±0.03628	0.1483 ±0.04742	0.1412 ±0.04649
10	1.4834 ±2.38736	1.3371 ±1.72722	0.1489 ±0.04639
17	14.3833 ±3.13965	12.1700 ±0.26870	7.7700 ±5.63659
24	21.1700 ±4.40194	19.3000	16.9600
31	26.6067 ±2.80678	26.2300	19.7800

จากรูปที่ 4.22 แสดงค่าการปลดปล่อยธาตุอาหารของถุงฟิล์ม PLA, NXp 0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย สังเกตได้ว่าอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของถุงฟิล์ม NXp 0.01% มีค่าต่ำกว่า ถุงฟิล์ม PLA และ NXp 0.005% ภายในระยะเวลาการทดลอง 31 วันพบว่าถุงฟิล์ม PLA และ NXp 0.005% ปลดปล่อยธาตุอาหารถึง 98% และ 97% ลำดับ ในขณะที่ถุงฟิล์ม NXp 0.01% ปลดปล่อยธาตุอาหาร ได้เพียง 73% ตารางที่ 4.12 สรุปค่าการปลดปล่อยธาตุอาหารของถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เป็นเวลา 31 ที่อุณหภูมิ 50 °C

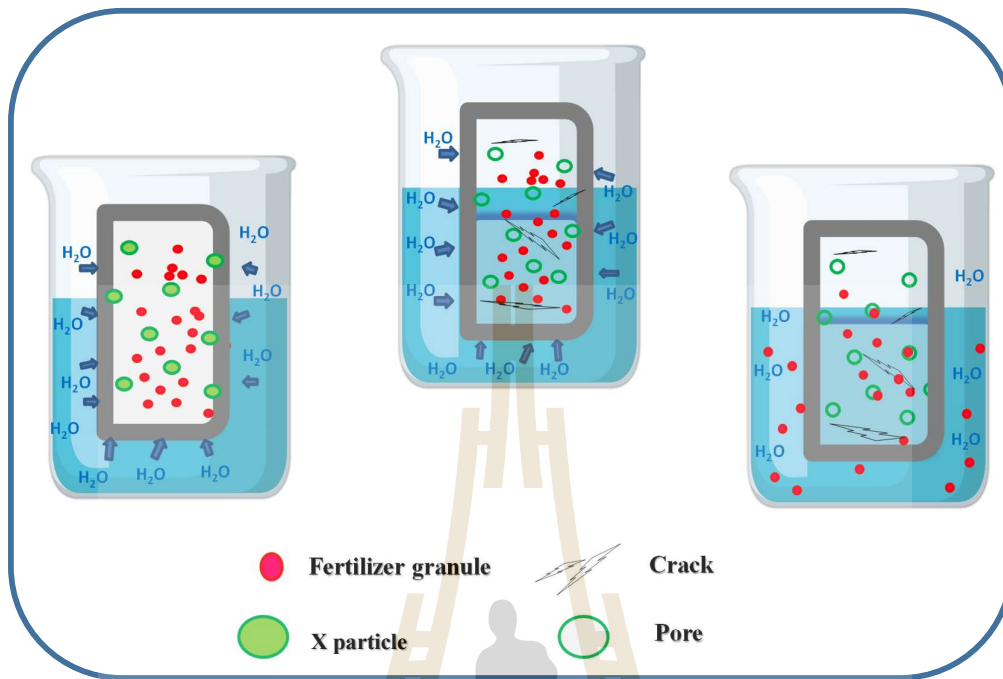


รูปที่ 4.22 ความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารของถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 31 วัน

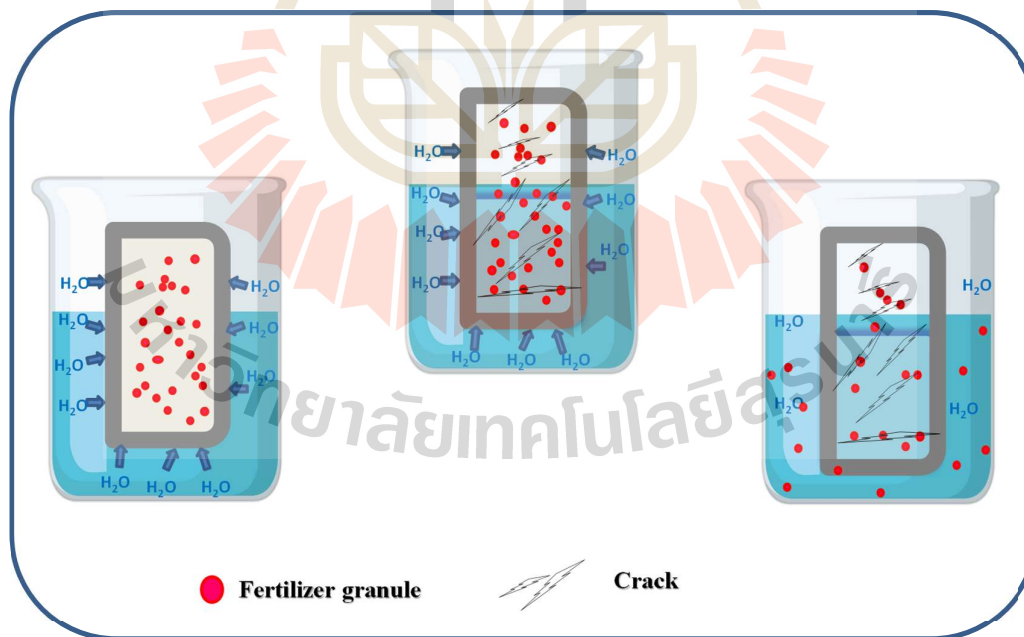
ตารางที่ 4.12 สรุปค่าการปลดปล่อยธาตุอาหารของถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เป็นเวลา 31 ที่อุณหภูมิ 50 °C

เวลา (วัน)	ค่าการปลดปล่อยธาตุอาหาร (%)		
	PLA	NXp0.005%	NXp0.01%
0	0.006 ±0.00265	0.012 ±0.01105	0.012 ±0.00641
1	0.194 ±0.09067	0.275 ±0.17538	0.284 ±0.12901
2	0.241 ±0.09091	0.299 ±0.14067	0.355 ±0.15129
3	0.260 ±0.08436	0.414 ±0.15121	0.500 ±0.18183
5	0.305 ±0.12842	0.489 ±0.18162	0.474 ±0.15907
7	0.336 ±0.13438	0.549 ±0.17563	0.523 ±0.17220
10	5.494 ±8.84207	4.952 ±6.39710	0.551 ±0.17183
17	53.272 ±11.62835	45.074 ±0.99519	28.778 ±20.87628
24	78.407 ±16.30349	71.481	62.815
31	98.543 ±10.39549	97.148	73.259

การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์ม NXp0.005% และ NXp0.01% เริ่มจากน้ำจะละลายผง X ที่ผิวฟิล์ม เกิดรูพรุน น้ำซึมเข้าไปในถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยและละลายปุ๋ยภายในถุงฟิล์มเกิดแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ขึ้นภายในถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ย สารละลายปุ๋ยจะไหลออกจากถุงฟิล์มผ่านรูพรุนที่ผิวถุงฟิล์ม นอกจากนั้นแรงดันออสโมติกยังทำให้เกิดรอยแตก (Crack) ที่ผิวถุงฟิล์มและยังทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น (Pasian, 2013) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.23 ส่วนการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์ม PLA นั้น เริ่มจากน้ำจะแทรกซึมผ่านถุงฟิล์ม PLA เข้าไปละลายปุ๋ยภายในถุงฟิล์มเกิดแรงดันออสโมติกภายในถุง ฟิล์ม PLA เกิดรอยแตก สารละลายปุ๋ยจึงสามารถไหลผ่านออกมาได้ด้วยกลไกการแพร่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 แผนภาพแสดงการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์ม NXp0.005% และ NXp0.01%



รูปที่ 4.24 แผนภาพแสดงการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่บรรจุในถุงฟิล์ม PLA

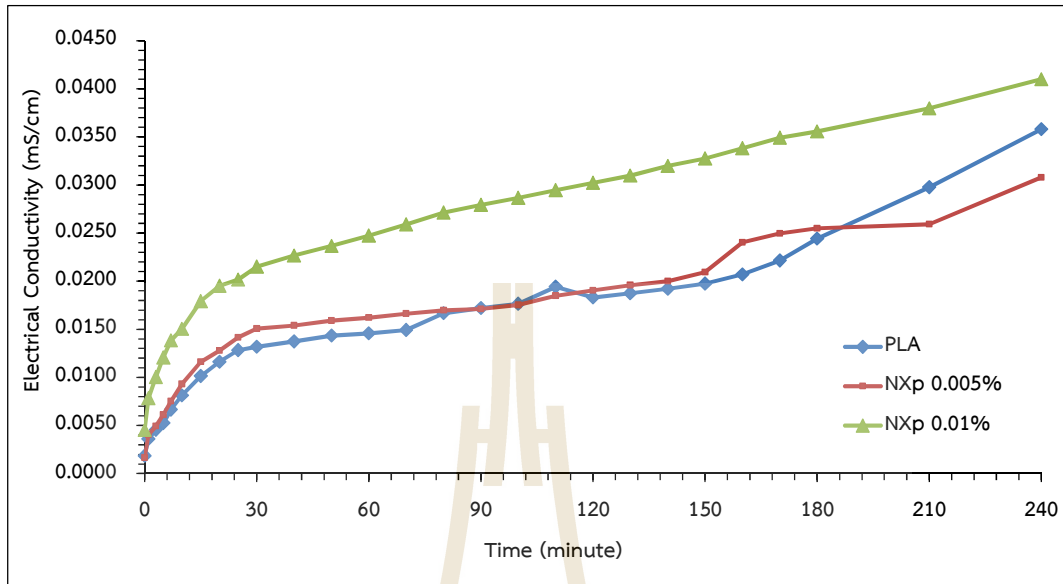
ถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยชนิด NXp ที่ 35 °C

นอกจากทำการแช่ที่อุณหภูมิ 50°C แล้ว ได้ทำการติดตามวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% บรรจุปุ๋ย ที่อุณหภูมิ 35 °C โดยในการแช่ 240 นาทีแรก สังเกตพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ถุงฟิล์มทั้งสามชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและยังพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดีไอที่แช่ถุงฟิล์มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ X เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.25

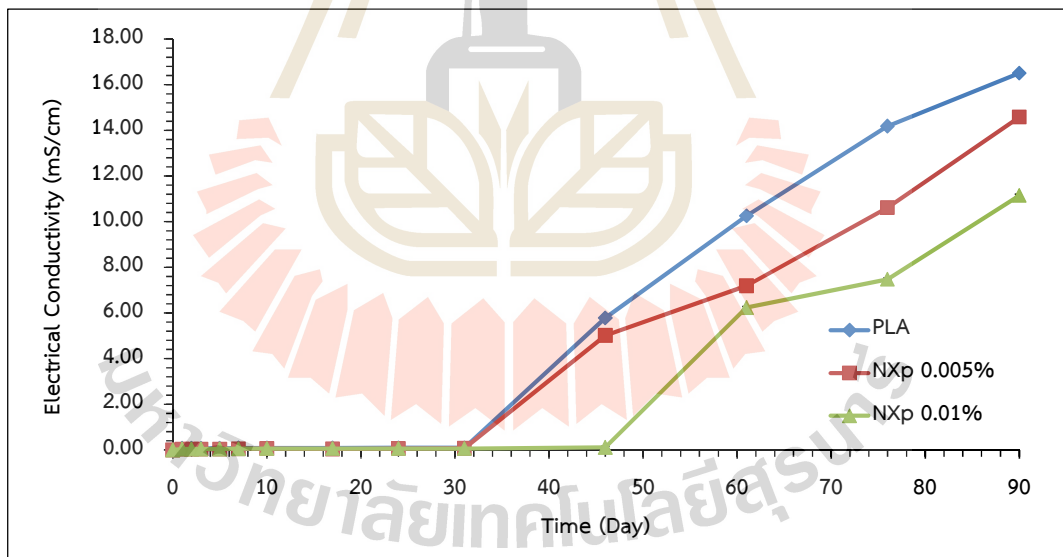
รูปที่ 4.26 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ระยะเวลา 90 วัน ที่อุณหภูมิ 35 °C พบว่าหลังจากที่แช่ถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยได้ 30 วัน ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ถุงฟิล์ม PLA และ NXp0.005% เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจน ส่วนค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ถุงฟิล์ม NXp0.01% เพิ่มขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัดหลังจากแช่ถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยในน้ำดีไอประมาณ 46 วัน ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำดีไอที่แช่ถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยทั้งสามชนิดเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากธาตุอาหารที่อยู่ในถุงฟิล์มไหลออกมาตามรอย crack และรูพรุนของถุงฟิล์มที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาในการแช่มากขึ้น ทำให้รอย crack และรูพรุนมีขนาดใหญ่และมีจำนวนมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 จึงส่งผลธาตุอาหารแพร่ออกมาได้มากส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ที่ระยะเวลาต่าง ๆ รวบรวมในตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14

เมื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุอาหาร (%Nutrient release) ของถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยทั้งสามชนิด พบว่า ภายในระยะเวลาการทดลอง 90 วัน ถุงฟิล์ม PLA ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาได้ถึง 82% ส่วนถุงฟิล์ม NXp 0.005% และ NXp 0.01% ปลดปล่อยธาตุอาหารที่ 49% และ 45% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ ตารางที่ 4.15 ซึ่งให้เห็นว่า ถุงฟิล์ม NXp 0.005% และ NXp 0.01% ช่วยชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยออกไปได้

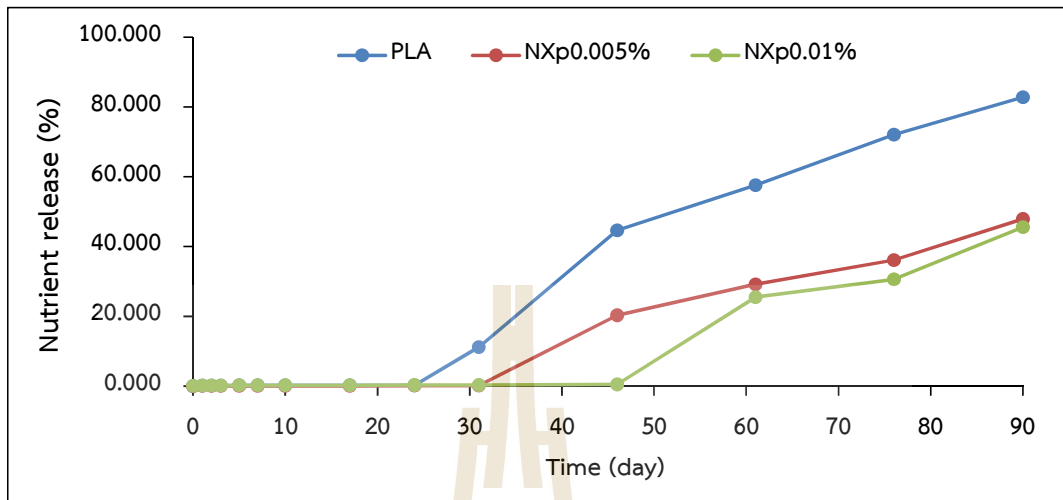
หากเปรียบเทียบความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารที่อุณหภูมิ 35°C (รูปที่ 4.27) กับ 50°C (รูปที่ 4.22) พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำ การปลดปล่อยธาตุอาหารของถุงฟิล์มจะช้ากว่าที่อุณหภูมิสูง โดยถุงฟิล์ม NXp 0.005% และ NXp 0.01% ช่วยชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยได้นานกว่า



รูปที่ 4.25 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ช่วงเวลา 240 นาทีแรก ที่อุณหภูมิ 35°C



รูปที่ 4.26 ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เป็นเวลา 90 วัน ที่อุณหภูมิ 35°C



รูปที่ 4.27 ความสามารถในการปลดปล่อยสารอาหารของถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ในน้ำปราศจากไอออน เป็นเวลา 90 วัน ที่อุณหภูมิ 35°C

ตารางที่ 4.13 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เวลา 240 นาที ที่อุณหภูมิ 35°C

เวลา (นาที)	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่าง (mS/cm)		
	PLA	NXp 0.005%	NXp 0.01%
0	0.0018 ±0.00027	0.0017 ± 0.00023	0.0045 ±0.00079
1	0.0036 ±0.00480	0.0040 ± 0.00038	0.0078 ±0.00123
3	0.0045 ±0.00682	0.0049 ±0.00062	0.0100 ±0.00076
5	0.0052 ±0.00591	0.0061± 0.00141	0.0121 ±0.00203
7	0.0067 ±0.00680	0.0075 ±0.00279	0.0139 ±0.00264
10	0.0081 ±0.00373	0.0093 ±0.00431	0.0150 ±0.00357
15	0.0101 ±0.00438	0.0116 ±0.00503	0.0179 ±0.00380
20	0.0116 ±0.00465	0.0128 ±0.00540	0.0195 ±0.00303
25	0.0128 ±0.00566	0.0142 ±0.00534	0.0202 ±0.00342
30	0.0132 ±0.00504	0.0151 ±0.00553	0.0215 ±0.00354

40	0.0137 ±0.00453	0.0154 ±0.00573	0.0227 ±0.00426
50	0.0143 ±0.00413	0.0159 ±0.00594	0.0237 ±0.00449
60	0.0146 ±0.00401	0.0162 ±0.00605	0.0247 ±0.00448
70	0.0149 ±0.00413	0.0166 ±0.00550	0.0259 ±0.00447
80	0.0167 ±0.00387	0.0170 ±0.00534	0.0271 ±0.00472
90	0.0172 ±0.00384	0.0171 ±0.00511	0.0279 ±0.00532
100	0.0177 ±0.00381	0.0175 ±0.00559	0.0287 ±0.00497
110	0.0194 ±0.00395	0.0185 ±0.00704	0.0295 ±0.00552
120	0.0183 ±0.00361	0.0190 ±0.00766	0.0302 ±0.00560
130	0.0188 ±0.00373	0.0196 ±0.00848	0.0310 ±0.00544
140	0.0192 ±0.00357	0.0200 ±0.00919	0.0320 ±0.00576
150	0.0198 ±0.00378	0.0209 ±0.00986	0.0328 ±0.00598
160	0.0207 ±0.00388	0.0240 ±0.00921	0.0338 ±0.00550
170	0.0221 ±0.00339	0.0250 ±0.00827	0.0349 ±0.00530
180	0.0244 ±0.00355	0.0255 ±0.00884	0.0356 ±0.00532
210	0.0298 ±0.00329	0.0259 ±0.00943	0.0380 ±0.00758
240	0.0358 ±0.00283	0.0308 ±0.00099	0.0410 ±0.00721

ตารางที่ 4.14 สรุปค่าการนำไฟฟ้าของน้ำค่าการนำไฟฟ้าของน้ำปราศจากไอออนที่แช่ถุงฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 เป็นเวลา 90 วัน ที่อุณหภูมิ 35°C

เวลา (วัน)	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่าง (mS/cm)		
	PLA	NXp 0.005%	NXp 0.01%
0	0.0020 ±0.00008	0.0017 ±0.00021	0.0045 ±0.00111
1	0.0760 ±0.00095	0.0305 ±0.01694	0.0419 ±0.01072
2	0.0768 ±0.00100	0.0362 ±0.01832	0.0428 ±0.01074
3	0.0776 ±0.00396	0.0379 ±0.01904	0.0440 ±0.01105
5	0.0815 ±0.00075	0.0389 ±0.01935	0.0492 ±0.01356
7	0.0837 ±0.00070	0.0604 ±0.01969	0.0589 ±0.02213
10	0.0867 ±0.00045	0.0627 ±0.02041	0.0613 ±0.02301
17	0.0903 ±5E-05	0.0506 ±0.01451	0.0654 ±0.02580
24	0.0944 ±0.00015	0.0694 ±0.02131	0.0677 ±0.02571
31	0.1020 ±1.33845	0.0753 ±0.01966	0.0702 ±0.02701
46	5.7933 ±3.755	5.0247 ±4.34164	0.1208 ±0.06746
61	10.2600 ±3.85	7.1910 ±4.58912	6.2437 ±3.74531
76	14.19 ±3.47	10.620 ±4.05172	7.485 ±4.61741
90	16.51 ±3.77	14.5866 ±0.89803	11.155 ±3.96687

ตารางที่ 4.15 สรุปค่าการปลดปล่อยสารอาหารของถุขฟิล์ม PLA, NXp0.005% และ NXp0.01% ที่บรรจุปุ๋ย NPK 16-16-16 ในน้ำปราศจากไอออน

เวลา (วัน)	ความสามารถในการปลดปล่อยสารอาหาร(%)		
	PLA	NXp0.005%	NXp0.01%
0	0.008 ±0.00046	0.005 ±0.00412	0.018 ±0.00451
1	0.151 ±0.00548	0.071 ±0.07861	0.171 ±0.04374
2	0.153 ±0.00577	0.081 ±0.08761	0.175 ±0.04384
3	0.169 ±0.00548	0.086 ±0.09281	0.179 ±0.04510
5	0.192 ±0.00433	0.089 ±0.09539	0.201 ±0.05537
7	0.200 ±0.00404	0.091 ±0.09723	0.240 ±0.09034
10	0.213 ±0.00260	0.097 ±0.10245	0.250 ±0.09391
17	0.223 ±0.00029	0.043 ±0.05602	0.267 ±0.10531
24	0.238 ±0.00087	0.116 ±0.11759	0.276 ±0.10496
31	11.176 ±7.72594	0.133 ±0.12844	0.287 ±0.11023
46	44.653 ±21.67499	20.327 ±21.60769	0.493 ±0.27533
61	57.592 ±22.22336	29.156 ±28.51319	25.484 ±15.28696
76	72.082 ±20.02988	36.09524 ±33.37509	30.551 ±18.84656
90	82.776 ±21.76157	47.90476 ±41.56762	45.531 ±16.19130

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การใช้พอลิแล็กติกแอซิดในการทำปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย ทั้งในรูปสารเคลือบ เมมเบรนหรือแผ่นฟิล์ม ช่วยชะลอการปล่อยสารอาหารแก่พืชได้แตกต่างกัน

เมื่อใช้พอลิแล็กติกแอซิดเคลือบเม็ดปุ๋ยในรูปปุ๋ยเคลือบ เกิดการปลดปล่อยธาตุอาหารหมดภายใน 1 ชั่วโมงเท่านั้น จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบรอยแยกซึ่งเป็นข้อบกพร่องบนชั้นเคลือบ ทำให้น้ำเข้าละลายธาตุอาหารแล้วไหลผ่านรอยแยกเหล่านั้นออกมาได้ง่าย

ในรูปแผ่นเมมเบรน การใช้พอลิแล็กติกแอซิดผสมกับยางธรรมชาติในการทำปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย ให้ผลไม่แตกต่างจากการใช้พอลิแล็กติกแอซิดเพียงตัวเดียว โดยปลดปล่อยสารอาหารปริมาณไม่น้อยกว่า 87% เพียงระยะเวลาหนึ่งวัน จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าเมมเบรน ประกอบด้วยเส้นใย มีรูพรุนและช่องว่างจำนวนมาก ธาตุอาหารสามารถไหลผ่านรูพรุนและช่องว่างทำให้ชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ไม่นาน การผสมยางธรรมชาติเพื่อปรับความสามารถการแพร่ผ่านส่งผลน้อย

การเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดในรูปแผ่นฟิล์มมาใช้ทำถุงบรรจุปุ๋ย พบว่า การปลดปล่อยธาตุอาหารน้อยมากในช่วง 7 วันแรก และเริ่มการปลดปล่อยเพิ่มเมื่อเข้าสู่วันที่ 10 และต่อเนื่องไป และเมื่อแช่ไว้ 31 วัน จะปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาที่ 98% เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งลงในแผ่นฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณ 0.005 และ 0.01% โดยน้ำหนัก พบลักษณะการปลดปล่อยเช่นเดียวกับเมื่อไม่มีการเติม โดยปลดปล่อยธาตุอาหารที่ 97 และ 73% ตามลำดับ เมื่อแช่ไว้ 31 วัน ซึ่งในรูปของแผ่นฟิล์มช่วยชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ โดยการเติมสารเติมแต่งในปริมาณสูงช่วยชะลอได้นานที่สุด ทั้งนี้การเติมสารเติมแต่งน่าจะช่วยสร้างรูพรุนขนาดเล็กให้ลดแรงดันภายในถุงทำให้ไม่เกิดการแตกขาดของถุงฟิล์ม และธาตุอาหารแพร่ผ่านถุงฟิล์มได้ เมื่อพิจารณาการปลดปล่อยที่อุณหภูมิ 35°C และ 50°C การปลดปล่อยธาตุอาหารเกิดได้ช้าที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่เวลา 90 วัน ถุงฟิล์มบรรจุปุ๋ยทั้งสามปลดปล่อยธาตุอาหารเพียง 82, 47 และ 45% ตามลำดับ โดยถุงฟิล์มที่มีสารเติมแต่งในปริมาณสูงช่วยชะลอได้นานที่สุด

สำหรับการแตกสลายของพอลิแล็กติกแอซิดผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส อาศัยการติดตามปริมาณกรดคาร์บอกซิลิกที่เกิดขึ้นเมื่อแช่ในน้ำ พบว่า ที่ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงแรกกรดเกิดขึ้นในปริมาณน้อย และเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง กรดจะเพิ่มในอัตราที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับเมมเบรนพอลิแล็กติกแอซิดจะพบกรดในอัตราสูงเมื่อแช่เป็นระยะเวลา 68 วัน ขณะที่ 35 องศาเซลเซียส การไฮโดรไลซิสของฟิล์มเกิดขึ้นน้อยมากแม้ในระยะเวลา 90 วัน

จากงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า สามารถใช้พอลิแล็กติกแอซิดในการทำปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยได้ โดยจะช่วยชะลอการปลดปล่อยได้ผ่านชั้นพอลิเมอร์ (อาจในรูปของสารเคลือบหรือฟิล์ม) และอาศัยการเติมสารเติมแต่งในเนื้อพอลิเมอร์เพื่อช่วยลดความดันภายใน ทำให้การแพร่ผ่านเกิดขึ้นได้ดีขึ้น และจากลักษณะการปลดปล่อยที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการแช่ไว้ในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งอาจเป็นผลจากการแพร่ของธาตุอาหารและการเกิดไฮโดรไลซิสของพอลิแล็กติกแอซิดทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงขณะแช่ ทำให้เห็นว่าหากใช้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันน่าจะช่วยออกแบบปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยอย่างเป็นระบบได้

บรรณานุกรม

- Abraham, J. and V. N. Rajasekharan Pillai (1996). "Membrane-encapsulated controlled-release urea fertilizers based on acrylamide copolymers." *Journal of Applied Polymer Science* **60**(13): 2347-2351.
- Adams, C., Frantz, J., Bugbee, B. (2013). Macro- and micronutrient-release characteristics of three polymer-coated fertilizers: Theory and measurements. *J. Plant Nuts. Soil. Sci.* 176:76-88.
- Bertin, D. E., et al. (2011). "Analysis of the product granulometry, temperature and mass flow of an industrial multichamber fluidized bed urea granulator." *Powder Technology* **206**(1): 122-131.
- Biswas, A., et al. (2019). "Biomaterials for Interfacing Cell Imaging and Drug Delivery: An Overview." *Langmuir* **35**(38): 12285-12305.
- Boonmee, C. (2016). "Degradation of Poly(lactic acid) under Simulated Landfill Conditions." *Environment and Natural Resources Journal* 14(2): 1-9.
- Boyandin, A.N., Kazantseva, E.A., Varygina, D. E., Volova, T. G. (2017). Constructing slow-release formulations of ammonium nitrate fertilizer based on degradable poly(3-hydroxybutyrate). *J. Agric. Food Chem.* 65:6745-6752.
- Calabria, L., Vieceli, N., Bianchi, O., Boff de Oliveira, R.V., do Nascimento Filhoa, I., Schmidt, V. (2012) Soy protein isolate/poly(lactic acid) injection-molded biodegradable blends for slow release of fertilizers. *Ind Crops Prod.* 36: 41-46.
- Chen, D., Freney, J. R., Rochester, L., Constable, G.A., Mosier, A.R., Chalk, P.M. (2008). Evaluation of a polyolefin coated urea (Meister) as a fertilizer for irrigated cotton. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 81:245-254.

European Standard EN 13266. 2001. Slow-release fertilizers determination of the release of the nutrients-method for coated fertilizers. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

Greenwood, D. J. (1981). "Fertilizer use and food production: World scene." *Fertilizer research* 2(1): 33-51.

Lubkowski, K., et al. (2015). "Controlled-Release Fertilizer Prepared Using a Biodegradable Aliphatic Copolyester of Poly(butylene succinate) and Dimerized Fatty Acid." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63(10): 2597-2605.

Mohammadi-Khoo, S., Moghadam, P. N., Fareghi, A. R., Movagharneshad, N. (2016). Synthesis of a cellulose-based hydrogel network: Characterization and study of urea fertilizer slow release. *J. Appl. Polym. Sci.*, 13, 42935. DOI: 10.1002/APP.42935.

Nouh, S. A., Algabary, D. N. H, Shaari, K. K, Ahmed, A. O. M. (2017). " Study the Effect of Granular Urea Fertilizer Coated by Biodegradable Materials (Starch/ Polyvinyl Alcohol /Glycerol). ." *Red sea university Journal of Basic and Applied Science*, 2 (1): 99-114.

Pasian, C. (2013, Oct 11) Controlled-Release Fertilizers in the Production of Container-Grown Floriculture Crops. Jan 13, 2020. Retrieved from <https://ohioline.osu.edu/factsheet/HYG-1260>.

Pongputthiphat, W., Phopin, W., Insawang, W., & Chumsamrong, P. (2017). Hydrolytic Degradation of Polylactic acid and High Toughness Polylactic acid. In The First Materials Research Society of Thailand International Conference. (1st MRS Thailand International Conference) (pp. 230-235). 31 October – 3 November 2017, Chiang Mai, Thailand]

polymerdatabase.com (2020, March 6). Hydrolysis of Polyesters. Retrieved from <https://polymerdatabase.com/polymer%20chemistry/Hydrolysis%20Mechanism.html>

Qiao, D., Liu, H., Yu, L., Bao, X., Simon, G.P., Petinakis, E., Chen, L. (2016). Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer. *Carbohydr. Polym.* 147 (2016) 146–154

Râpă, M., et al. (2011). "Biodegradable alternative to plastics for agriculture application." *Romanian Biotechnological Letters* 16: 59-64.

Tyliszczak, B., Polaczek, J., Pielichowski, J., Pielichowski, K. (2009). Preparation and properties of biodegradable slow-release PAA superabsorbent matrixes for phosphorus fertilizers. *Macromol. Symp.* 279:236–242.

Volova, T.G., Prudnikova, S.V., Boyandin, A.N. (2016). Biodegradable poly-3 hydroxybutyrate as a fertilizer carrier. *J. Sci. Food Agric.* 96:4183-4193.

Yang Y C, Tong Z H, Geng Y Q, Li Y C, Zhang M. 2013. Biobased polymer composites derived from corn stover and feather meals as double-coating materials for controlled-release and water-retention urea fertilizers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61 (34): 8 166-8 174.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัย

Wachirabhorn Pongputtipat, Sureelak Rodthong, Pranee Chumsamrong, and Chantima Deeprasertkul, **Polylactic acid Membrane for Controlled Release Fertilizer**

Application.In Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-10), Aug 6th – 7th, 2020, Bangkok, Thailand, p.188-192.



Polylactic acid membrane for controlled release fertilizer application

Wachirabhorn Pongputtipat, Sureelak Rodthong, Pranee Chumsamrong, and Chantima Deeprasertkul¹

¹School of Polymer Engineering, Institute of Engineering, and ²Center of Excellence in Microbial Technology for Agricultural Industry, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

Phone +66 4422 4434, Fax +66 4422 4605, E-Mail: chantima@sut.ac.th

Abstract

The present study aims to produce polylactic acid (PLA) membrane for controlled release application. Using spraying technique, the membranes of 0.05 mm and 0.1 mm thickness were prepared. Morphology, tensile test, and release ability of the membrane were conducted. SEM micrographs showed the connected fibrous and porous structure inside the membrane. The tensile strength and Young's modulus of the membrane were lower than typical PLA film. As for controlled release fertilizer, the PLA membrane containing NPK fertilizer immersed in deionized water showed a similar release to the bare fertilizer. The results suggest that the membrane with this micro size of fibrous and porous structure cannot effectively slow down the fertilizer diffusion process.

Keywords: Polylactic acid; controlled release fertilizer; membrane;

1. Introduction

Bioplastics have become viable to wide range of applications e.g. packaging, medical, and agricultural applications, as they can be produced from renewable resources and are environmentally friendly materials. Controlled release fertilizer is one field of bioplastics being used in agricultural applications. Slow or controlled release fertilizer (CRFs) are developed to effectively release the plant nutrient components and to overcome the loss of fertilizer by surface runoff, leaching and vaporization [1]. The CRFs are commonly produced by coating fertilizer granules with polymers. However, most conventional polymers used for coating fertilizer cannot degrade in soil. This non-degradable polymers in turn become a threat to environment, plants and water. Biodegradable plastics have been studied for CRF applications [2-4]. Besides of coating, controlled release application could be produced based on other approaches, e.g. membrane, host-guest, and mixture, etc. [5-7]. Among bioplastics, polylactic acid (PLA) is most popularly used. In this work, PLA membranes were prepared for controlled release application. As PLA does not dissolve in water, it

is designed to enclose the fertilizer and to slow release the fertilizer nutrients via small channels. Morphology, mechanical properties, as well as the fertilizer release ability via electrical conductivity measurement of the membrane were studied. The prolong and/or slow release of drug and fertilizer in a controlled fashion would make a great use of drug and fertilizer over a period of time.

2. Materials and methods

2.1 Materials

Polylactic acid with 4043D grade from NatureWorks LLC was used. Chloroform AR grade (CARLO ERBA Reagents) was used. NPK 16-16-16 fertilizer was purchased from Chia Tai Co., Ltd.

2.2 Preparation of solutions and fabrication of PLA membrane.

The PLA solutions with a concentration of 10 % w/v were prepared by dissolving PLA in chloroform and stirring at 290 rpm at 40 °C for 6 hours until a homogeneous solution was formed. The PLA solutions

were sprayed on Teflon substrate with a pneumatic spray gun. With air pressure fixed at 30 psi, the distance between a spray nozzle and the substrate was kept at 20 cm. By varying the number of layer-by-layer deposition cycles, the PLA membranes with controlled thickness of 0.05 mm and 0.1 mm were obtained. Thickness of membrane or coated film affects the release rate. In general, the thickness of coated film used for controlled release fertilizer is in the range of 20-100 μm [8, 9].

A PLA membrane bag with a size of $3 \times 7 \text{ cm}^2$ was prepared. One gram of fertilizer granules was loaded to the membrane bag. The membrane bag was heat sealed. The PLA membrane bag containing NPK fertilizer for release test was shown in Figure 1.



Figure 1 PLA membrane bag containing NPK fertilizer.

2.3 Scanning Electron Microscopy (SEM) Analysis

Morphological properties of PLA membrane were observed using a scanning electron microscope (JEOL, JSM6010). Acceleration voltage of 15 keV was used to collect SEM images of the samples. The membrane surfaces of specimens were coated with gold before analysis.

2.4 Tensile testing

A universal testing machine (Instron, 5565 model) with a load cell of 5 kN was employed. Tensile test of PLA membranes was performed according to ASTM D882. A crosshead speed of 12.5 mm/min was used. At least five specimens were tested and tensile properties were determined.

2.5 Electrical conductivity measurement

The release ability was done by electrical conductivity (EC) measurement. Correlation of EC (in mS/cm) and fertilizer concentration ([F] in g/100 ml) was made. Linear calibration curve, $EC = 13.5[F]$, was obtained. Ten grams of fertilizer granules were placed into glass bottle with 500 ml deionized water and kept in a water bath incubator at $50 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ in three replicates. At a specified period of time, the EC of the sample medium was measured using EC meter. EC data of fertilizer granules were collected at 1, 3, 5, 7, 10, 17, and 24 days. Same procedure was performed on PLA membrane bag containing NPK fertilizer.

The release ability of membrane was compared to PLA film. PLA film was casted from solution and used for bag. Clear PLA film bag was loaded with NPK fertilizer and heat sealed. Electrical conductivity was thus monitored after immersion as mentioned above.

3. Results and discussion

3.1 Morphology of PLA membrane

Under the specified conditions, the PLA membranes with controlled thickness of 0.05 and 0.1 mm are obtained. The thickness of the membranes used for bag containing fertilizer is shown in Table 1.

Table 1 Thickness of PLA membrane prepared.

Sample No.	Thickness of PLA membrane (mm)	
	PLA 0.05 mm	PLA 0.1mm
1	0.053 \pm 0.0058	0.103 \pm 0.0058
2	0.053 \pm 0.0058	0.097 \pm 0.0058
3	0.057 \pm 0.0058	0.100
4	0.057 \pm 0.0058	0.093 \pm 0.0058
5	0.060	0.103 \pm 0.0058

The morphology of the 0.05 mm PLA and 0.1 mm PLA membranes are shown in Figure 2. The interconnected microfibers and voids structure inside the membrane with pores on membrane surface are observed.

were sprayed on Teflon substrate with a pneumatic spray gun. With air pressure fixed at 30 psi, the distance between a spray nozzle and the substrate was kept at 20 cm. By varying the number of layer-by-layer deposition cycles, the PLA membranes with controlled thickness of 0.05 mm and 0.1 mm were obtained. Thickness of membrane or coated film affects the release rate. In general, the thickness of coated film used for controlled release fertilizer is in the range of 20-100 μm [8, 9].

A PLA membrane bag with a size of $3 \times 7 \text{ cm}^2$ was prepared. One gram of fertilizer granules was loaded to the membrane bag. The membrane bag was heat sealed. The PLA membrane bag containing NPK fertilizer for release test was shown in Figure 1.



Figure 1 PLA membrane bag containing NPK fertilizer.

2.3 Scanning Electron Microscopy (SEM) Analysis

Morphological properties of PLA membrane were observed using a scanning electron microscope (JEOL, JSM6010). Acceleration voltage of 15 keV was used to collect SEM images of the samples. The membrane surfaces of specimens were coated with gold before analysis.

2.4 Tensile testing

A universal testing machine (Instron, 5565 model) with a load cell of 5 kN was employed. Tensile test of PLA membranes was performed according to ASTM D882. A crosshead speed of 12.5 mm/min was used. At least five specimens were tested and tensile properties were determined.

2.5 Electrical conductivity measurement

The release ability was done by electrical conductivity (EC) measurement. Correlation of EC (in mS/cm) and fertilizer concentration ([F] in g/100 ml) was made. Linear calibration curve, $EC = 13.5[F]$, was obtained. Ten grams of fertilizer granules were placed into glass bottle with 500 ml deionized water and kept in a water bath incubator at $50 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ in three replicates. At a specified period of time, the EC of the sample medium was measured using EC meter. EC data of fertilizer granules were collected at 1, 3, 5, 7, 10, 17, and 24 days. Same procedure was performed on PLA membrane bag containing NPK fertilizer.

The release ability of membrane was compared to PLA film. PLA film was casted from solution and used for bag. Clear PLA film bag was loaded with NPK fertilizer and heat sealed. Electrical conductivity was thus monitored after immersion as mentioned above.

3. Results and discussion

3.1 Morphology of PLA membrane

Under the specified conditions, the PLA membranes with controlled thickness of 0.05 and 0.1 mm are obtained. The thickness of the membranes used for bag containing fertilizer is shown in Table 1.

Table 1 Thickness of PLA membrane prepared.

Sample No.	Thickness of PLA membrane (mm)	
	PLA 0.05 mm	PLA 0.1mm
1	0.053 \pm 0.0058	0.103 \pm 0.0058
2	0.053 \pm 0.0058	0.097 \pm 0.0058
3	0.057 \pm 0.0058	0.100
4	0.057 \pm 0.0058	0.093 \pm 0.0058
5	0.060	0.103 \pm 0.0058

The morphology of the 0.05 mm PLA and 0.1 mm PLA membranes are shown in Figure 2. The interconnected microfibers and voids structure inside the membrane with pores on membrane surface are observed.

Clearly, both 0.05 and 0.1 mm-thick membranes have similar morphology. It is expected that thicker membrane would prolong the release of fertilizer. It is noted that spraying rate and solvent evaporation rate govern the morphology. High humidity (more than 30-40%) very often provides porous structure [10, 11].

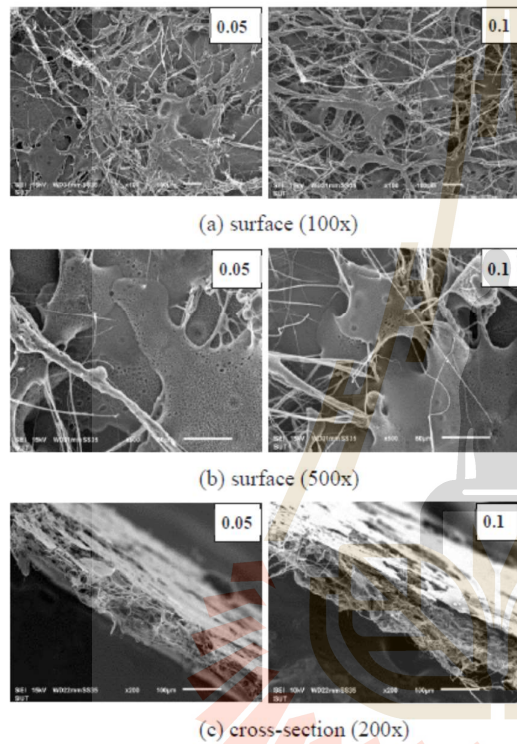


Figure 2 SEM image of 0.05 mm PLA (left) and 0.1 mm PLA (right) membranes : (a) surface (100x) (b) surface (500x) and (c) cross-section (200x).

3.2 Tensile properties of PLA membrane

Tensile stress-strain curves of PLA with different thicknesses are shown in Figure 3(a). Both the 0.05 mm PLA and 0.1 mm PLA membranes showed brittle behavior. The tensile mechanical properties of these PLA membranes are presented in Figure 3. It was observed that the tensile strength, Young's modulus and elongation at break decrease as the thickness of PLA membrane increased. The tensile properties of the membrane was lower than that of casted PLA film (0.33 ± 0.01 GPa, $16.80 \pm$

1.99 MPa, and $240.73 \pm 16.47\%$, respectively, crosshead speed of 50 mm/min). As known for PLA, the brittleness is a major drawback in various applications. Nevertheless, the PLA membrane is strong and tough enough for packing and handling of the controlled release application. It is that PLA membrane bag containing fertilizer can be fabricated, heat-sealed, handled under applied force even immersed in water without breaking.

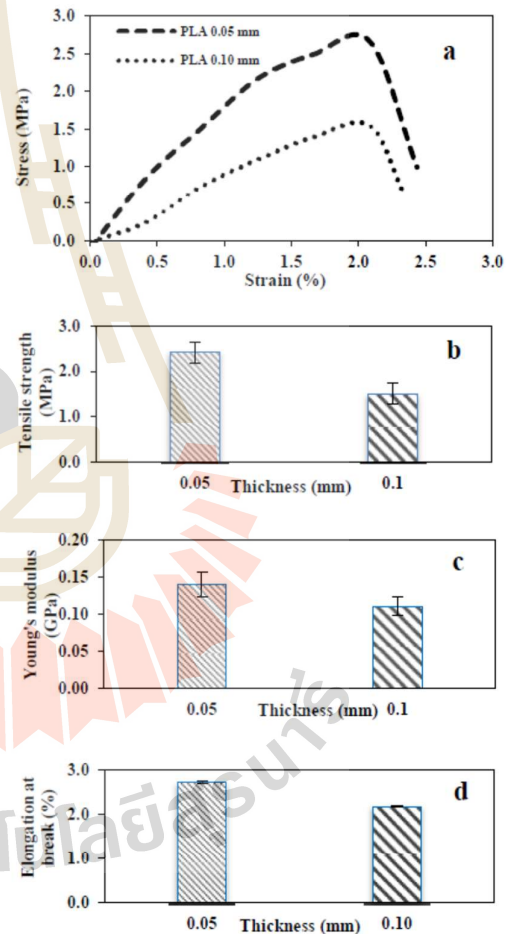


Figure 3 Tensile test of PLA membrane with different thicknesses: (a) stress-strain curve, (b) tensile strength, (c) Young's Modulus, and (d) elongation at break.

3.3 Electrical conductivity analysis

The release of water-soluble nutrient components of the fertilizer was monitored with electrical conductivity meter. Electrical conductivity (EC) of the 0.05 mm PLA and 0.1 mm PLA membrane bags containing NPK fertilizer and NPK fertilizer granules in aqueous medium over 24-day period is shown in Figure 3. As seen, the EC of aqueous medium for NPK fertilizer reached its maximum of 27 mS/cm in one day of immersion. While the EC of aqueous medium for the 0.05 mm PLA and 0.1 mm PLA membrane bags containing NPK fertilizer were 25.50 and 22.43 mS/cm, respectively. The membranes show slightly lower EC than NPK granules. Immersion days onward until 24 days of experiment, slightly change in EC of aqueous medium of immersed PLA membrane bags containing NPK fertilizer was observed. The 0.05 mm membrane slightly increased and reached 27 mS/cm within 10 days. It is noted that the 0.1 mm-thick membrane has not reached the maximum of 27 mS/cm. The PLA membrane bags are not effective to slow down the release of fertilizer. The results suggest that the membranes with fibrous and porous structure are not suitable for the application of controlled release NPK fertilizer under immersion.

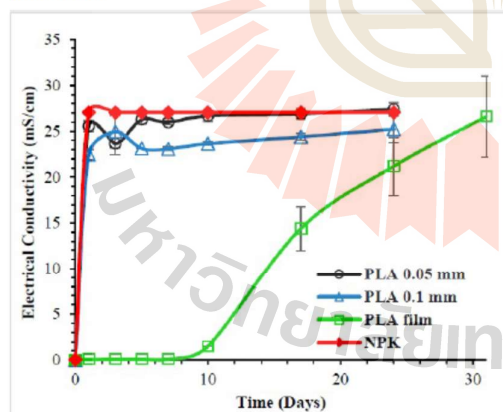


Figure 4 Electrical conductivity of the 0.05 mm PLA and 0.1 mm PLA membrane bag containing NPK fertilizer and NPK fertilizer in aqueous medium.

For comparison, fertilizer containing bag was fabricated from solvent casted PLA film. It was found that the immersed PLA film bag containing fertilizer showed insignificant release over first ten days, then increased to 27 mS/cm upon 31 days at 50°C. Small cracks was observed on the PLA film bag, possibly resulting of high internal water/vapor pressure and PLA hydrolysis process. Clearly, transport mechanism in film differs from membrane. Physical interaction among polymer, water and fertilizer are present. Solubility and diffusivity among them govern the transport process. Water can easily penetrate in and dissolve fertilizer, then dissolved fertilizer mainly penetrates out of the PLA membrane via voids and pores. While water must be absorbed and diffuse in to dissolve fertilizer, then the dissolved fertilizer must be absorbed and diffuse out through the PLA film. The process of fertilizer release of PLA membrane differs from that of PLA film, resulting in different release rates.

4. Conclusion

The 0.05 mm and 0.1 mm-thick PLA membranes were successfully fabricated by spraying technique with a pneumatic spray gun. The membranes with interconnected microfibrils with voids and porous structure were obtained. The tensile properties of the 0.05 mm PLA membrane was larger than that of 0.1 mm. The PLA membrane bags containing NPK fertilizer immersed in aqueous medium at 50°C showed similar release rate to bare fertilizer as measured by electrical conductivity.

5. References

1. Greenwood, D. J., *Fertilizer research* **1981**, 2 (1): 33-51.
2. Boyandin, A.N.; Kazantseva, E.A.; Varygina, D. E.; Volova, T. G. *J. Agric. Food Chem.* **2017**, 65:6745-6752.
3. Calabria, L.; Vieceli, N.; Bianchi, O.; Boff de Oliveira, R.V.; do Nascimento Filhoa, I.; Schmidt, V. *Ind. Crops Prod.* **2012**, 36: 41-46.
4. Qiao, D.; Liu, H.; Yu, L.; Bao, X.; Simon, G.P.; Petinakis, E.; Chen, L. *Carbohydr. Polym.* **2016**, 147:146-154.
5. Biswas, A.; Shukla, A.; Maiti, P. *Langmuir* **2019**, 35(38): 12285-12305.
6. Liu, L.; Shen, T.; Yang, Y.; Gao, B.; Li, Y.C.; Xie, J.; Tang, Y.; Zhang, S.; Wang, Z.; Chen, J. *J. Agric. Food Chem.* **2018**, 66(43): 11265-11272.
7. Zhou, L.; Cai, D.; He, L.; Zhong, N.; Yu, M.; Zhang, X.; Wu, Z. *ACS Sustain Chem. Eng.* **2015**, 3(4): 645-653.
8. Trinha, T.; KuShaaria, K.; Basita, A.; Azeema, B.; Shuib, A. *APCBEE Procedia.* **2014**, 8: 146 – 150
9. Ahmad, N.; Fernando, W.; M.H. Uzir, M. *J. Biosystemeng.* **2015**, 129: 78-86.
10. Agarwal, S.; Jiang, S.; Greiner, A., Chapter 4 - Nanofibrous Structures. In *Electrospinning: Nanofabrication and Applications*, Ding, B.; Wang, X.; Yu, J., Eds. William Andrew Publishing: 2019; pp 93-122.
11. Park, J.Y.; Lee, I.H. *J. Polym. Res.* **2011**, 18 (6): 1287-1291.

ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ(ภาษาไทย) นางสาวจันทิมา ดีประเสริฐกุล
(ภาษาอังกฤษ) Miss Chantima Deeprasertkul
2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
3. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์
111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์/โทรสาร 044-22 4434/044-22 4220
E-mail chantima@sut.ac.th
4. ประวัติการศึกษา
Ph.D (Macromolecular Science) Case Western Reserve University, USA.
วท.ม. (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล ประเทศไทย
วท.บ. (วิทยาศาสตร์เคมี) มหาวิทยาลัยมหิดล ประเทศไทย
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
Polymer rheology
Polymer melts, blends and suspensions
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 6.1 งานวิจัยที่ดำเนินการเสร็จสิ้น
 - 6.1.1 โครงการ การศึกษาความไม่สม่ำเสมอของการไหลของพอลิเมอร์ผสมในกระบวนการอัดรีด
แหล่งทุนสนับสนุน: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
 - 6.1.2 โครงการ ผลของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของยางและปริมาณของแข็งต่อความหนืดของน้ำยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรม (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
 - 6.1.3 โครงการ การคัดเลือกแบคทีเรียที่มีศักยภาพในการผลิตพอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอท (พีเอชเอ) จากแป้งมันสำปะหลังและน้ำตาลจากอ้อย แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: ผู้ร่วมวิจัย)
 - 6.1.4 โครงการ การศึกษาผลของสารก่อผลึกต่อการตกผลึกของพอลิแลกติกแอซิด แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ)

6.1.5 โครงการ การศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ)

6.1.6 โครงการ การเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ)

6.1.7 โครงการ ผลของลักษณะจำเพาะระดับโมเลกุลต่อวิทยากระแสนของนาโนคอมโพสิทระหว่างพอลิเอทิลีนและนาโนซิลิกา แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ)

6.1.8 โครงการ ปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของพลาสติกชีวภาพผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและยางธรรมชาติภายใต้กระบวนการอัดรีด แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ)

6.1.9 โครงการ การประยุกต์ใช้พอลิแล็กติกแอซิดพลาสติกชีวภาพสำหรับการเกษตร แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ)

6.1.10 โครงการ ผลของสารเติมแต่งต่อสมบัติและการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พอลิแล็กติกแอซิด แหล่งทุนสนับสนุน: ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีจุลินทรีย์เพื่ออุตสาหกรรมเกษตร ภายใต้กลุ่มวิจัยอาหารและพลาสติกชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (สถานภาพ: ผู้ร่วมโครงการ)

6.2 งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

-

7. ผลงานทางวิชาการ

Wachirabhorn Pongputtipat, Sureelak Rodtong, Pranee Chumsamrong, and Chantima Deprasertkul, **Green Approach for Thermoformable Poly(lactic acid) Bioplastic Film** In Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-11), July 1–2, 2021, Bangkok, Thailand, p.119-123.

Wachirabhorn Pongputtipat, Sureelak Rodthong, Pranee Chumsamrong, and Chantima Deprasertkul, **Poly(lactic acid) Membrane for Controlled Release Fertilizer Application.** In Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-10), Aug 6th – 7th, 2020, Bangkok, Thailand, p.188-192.

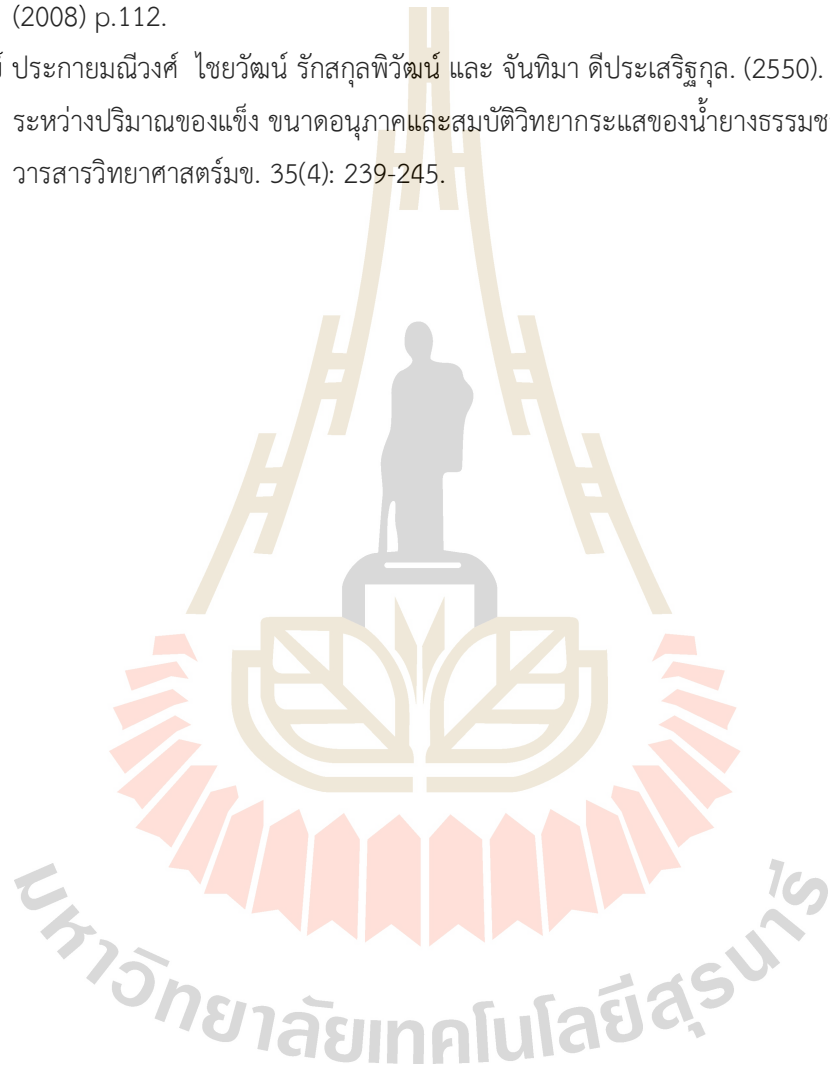
Keavalin Jitkokkrud, Warirat Duangpalai and Chantima Deprasertkul, Thermoplastic Polyolefin Elastomers under High Shear Flow. In Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-9), June 13th – 14th, 2019, Bangkok,

Thailand, p.124-127.

- Orrathai Chamnan, Nanwarinparch Pucknansawhet and Chantima Deeprasertkul, Microphase Separation on Thermal/Dynamic Mechanical Properties of Olefin Block Copolymer- Thermoplastic Elastomers. In Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-8), June 14th – 15th, 2018, Bangkok, Thailand, p.188-191.
- Jenjira Phuengphaitoon, Watcharee Worrawong and Chantima Deeprasertkul, Effect of Viscosity Ratio on Patterning and Extrudate Swell of Extruded Core-Shell Polymer Products. In *Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-7)*, June 1st – 2nd, 2017, Bangkok, Thailand, p.165-169.
- Phatthakan Phattanuwat and Chantima Deeprasertkul, Linear Viscoelastic Behavior of Olefin Multiblock Copolymers: Influence of Temperature and Equilibration Time. *Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)*, June 30th-July 1st, 2016, Bangkok, Thailand, p.181-184.
- Anan Sookbanthoeng, Phornsuda Phanjamnonk and Chantima Deeprasertkul, “Comparative Study on Shear Flow of Olefin Multiblock Copolymers,” *Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-5)*, June 18th-19th, 2015, Bangkok, Thailand, p.182-185.
- Ratchanok Thanaman and Chantima Deeprasertkul, “Effect of molecular characteristics and silica nanoparticles on viscoelastic properties of filled polyethylene melts,” *Proceedings of The Pure and Applied Chemistry International Conference 2012 (PACCON 2012)*, Chiang Mai, Thailand, January 11-13 (2012) p 1140-43.
- B. Suksut and C. Deeprasertkul, “Effects of Nucleating Agents on Physical Properties of Poly(lactic acid) and Its Blend with Natural Rubber,” *J Polym Environ* (2011) 19(1) 288-296.
- Ratchanok Thanaman, and Chantima Deeprasertkul, “Linear Viscoelastic Properties of Nanosilica Filled Polyethylene Melts,” *Proceedings of The 5th International Workshop for East Asian Young Rheologists*, Pusan National University, Pusan, Korea, January 21-23 (2010).
- Patcharaporn Somdee, Buncha Suksut, and Chantima Deeprasertkul, “Physical Study on Toughening of Polylactic acid with Natural Rubber,” *Proceedings of The*

Pure and Applied Chemistry International Conference 2009 (PACCON 2009), Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, January 14-16 (2009), p310-313.
J. Sridee, C.Ruksakulpiwat, and C. Deeprasertkul, "Flow Behavior of Natural Rubber Latex Concentrates : Effect of Volume Fraction and Temperature," Proceedings of The 42nd IUPAC World Polymer Congress, Taipei, Taiwan, June 29-July 4, (2008) p.112.

พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์ และ จันทิมา ดีประเสริฐกุล. (2550). ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็ง ขนาดอนุภาคและสมบัติวิทยากระแสของน้ำยางธรรมชาติ. วารสารวิทยาศาสตร์ร่มช. 35(4): 239-245.



1. ชื่อ(ภาษาไทย) นางปราณี ชุมสำโรง
(ภาษาอังกฤษ) Mrs.Pranee Chumsamrong
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน: 3.7302.00725.09.1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ (044)22-4438 โทรสาร (044)22-4220
E-mail: pthongnoi@sut.ac.th
5. ประวัติการศึกษา
2544. Ph.D. (Polymer Science and Technology), University of Manchester.
Institute of Science and Technology (UMIST), UK
2540. M.Sc. (Polymer Science and Technology), University of Manchester
Institute of Science and Technology (UMIST), UK
2538. วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับ 1, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
- Toughness Improvement of Bioplastics
- Polymer Blends and Composites
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ : ระบุ
สถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้
ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอโครงการวิจัย เป็นต้น
 - 7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย :-
 - 7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย
 1. โครงการ: การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติที่มี
ในประเทศไทย แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการ
ดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ:หัวหน้าโครงการวิจัย)
 2. โครงการ: การเตรียมน้ำยางธรรมชาติกราฟท์ด้วยอะคริลิกสำหรับใช้เป็นกาวชนิด
สัมผัส แหล่งทุนสนับสนุน: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ผลการ
ดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ:หัวหน้าโครงการวิจัย)

3. โครงการ: การผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านทรนารายณ์กับพอลิเอสเตอร์เรซินแบบไม่อิมิตัว แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
4. โครงการ: การศึกษาผลของสภาวะการเตรียมที่มีต่อสมบัติการยึดติดของน้ำยางธรรมชาติกราฟท์ด้วยนอร์มอลบิวทิลอะคริเลตและเมทิลเมทาคริเลต แหล่งทุนสนับสนุน: ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
5. โครงการ: การกราฟท์น้ำยางธรรมชาติด้วยไกลซิดิลเมทาคริเลตและเมทิลเมทาคริเลต แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
6. โครงการ: การศึกษาเบื้องต้นการเตรียมพอลิแลคติกแอซิด จากกรดแลคติก แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
7. โครงการ: การศึกษาการใช้เส้นใยป่านทรนารายณ์เสริมแรงอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
8. โครงการ: การสังเคราะห์ การตรวจสอบสมบัติและการใช้ประโยชน์ลิกโคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
9. โครงการ: การพัฒนาบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่มีความเสถียรทางความร้อนและความทนแรงกระแทกดี แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
10. โครงการ: การพัฒนาพอลิเมอร์คอมโพสิตสีเขียวเพื่อใช้ในงานด้านการเกษตรภายใต้ชุดโครงการ การวิจัยและพัฒนาวัสดุคอมโพสิตชีวภาพเพื่ออุตสาหกรรม การแพทย์ และอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหาร แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 90 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. โครงการ: การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติที่มีในประเทศไทย แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
2. โครงการ: การเตรียมน้ำยางธรรมชาติกราฟท์ด้วยอะคริลิกสำหรับใช้เป็นกาวชนิดสัมผัส แหล่งทุนสนับสนุน: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
3. โครงการ: การศึกษาผลของสภาวะการเตรียมที่มีต่อสมบัติการยึดติดของน้ำยางธรรมชาติกราฟท์ด้วยนอร์มอลนิวทิลอะคริเลตและเมทิลเมทาคริเลต แหล่งทุนสนับสนุน: ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. โครงการ: การกราฟท์น้ำยางธรรมชาติด้วยไกลซีดีลเมทาคริเลตและเมทิลเมทาคริเลต แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
5. โครงการ: การผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยป่านครนารายณ์กับพอลิเอสเตอร์เรซินแบบไม่อิมตัว แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
6. โครงการ: การศึกษาเบื้องต้นการเตรียมพอลิแลคติกแอซิด จากกรดแลคติก แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
7. โครงการ: การศึกษาการใช้เส้นใยป่านครนารายณ์เสริมแรงอีพอกซีเรซินที่ปรับปรุงด้วยยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
8. โครงการ: การสังเคราะห์ การตรวจสอบสมบัติและการใช้ประโยชน์บล็อกโคพอลิเมอร์ ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและยางธรรมชาติ แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)
9. โครงการ: การพัฒนาบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่มีความเสถียรทางความร้อนและความทนแรงกระแทกดี แหล่งทุนสนับสนุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 100 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ

โครงการ: การพัฒนาพอลิเมอร์คอมโพสิทสีเขียวเพื่อใช้ในงานด้านการเกษตร ภายใต้ชุดโครงการ: การวิจัยและพัฒนาวัสดุคอมโพสิทชีวภาพเพื่ออุตสาหกรรม การแพทย์ และอุตสาหกรรมการเกษตรและอาหาร แหล่งทุนสนับสนุน: สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผลการดำเนินงานคิดเป็นร้อยละ 90 ของโครงการ (สถานภาพ: หัวหน้าโครงการวิจัย)

7.5 ผลงานทางวิชาการ

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ:

1. **Chumsamrong, P.** (2004). Polymeric Materials by Atom Transfer Radical Polymerization (ATRP). *Suranaree J. Sci. Technol.* 11(3):166-178.
2. **Chumsamrong, P.** and Monprasith, O. (2007). Preparation, Adhesive Performance and Stability of Natural Rubber Latex grafted with n-butyl acrylate (BA) and methyl methacrylate (MMA). *Suranaree J. Sci. Technol.* 14(3):269-276.
3. **Chumsamrong, P.** and Mondobyai, J. (2008). Preparation, Adhesive Performance and Stability of Natural Rubber Latex grafted with n-butyl acrylate (BA) and methyl methacrylate (MMA). *Adv. Mater. Res.* 47-50:1149-1152.
4. Srisuwan, S. and **Chumsamrong, P.** (2010). Effects of Weave Type and Fiber Content on Physical Properties of Sisal Fiber/Epoxy Composites. *Adv. Mater. Res.* 123-125:1139-1142.
5. Songprateepkul, S. and **Chumsamrong, P.** (2010). Studies of Natural Rubber Grafted with Acrylic monomers. *Adv. Mater. Res.* 123-125:1263-1266.
6. Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., **Chumsamrong, P.** and Ruksakulpiwat, Y. (2010). Mechanical Properties of Polylactic acid and Natural rubber blends using Vetiver grass fiber as Filler. *Adv. Mater. Res.* 123-125:1167-1170.
7. Prasoetsopha, N., **Chumsamrong, P.** and Suppakarn, N. (2011). Effects of type and concentration of initiator on grafting of acrylic monomers onto depolymerized natural rubber. *Adv. Mater. Res.* 264-265:565-570.
8. Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., **Chumsamrong, P.** and Ruksakulpiwat, Y. (2011). Glycidyl methacrylate grafted natural rubber: Synthesis, characterization, and mechanical property. *J. Appl. Polym. Sci.* 122(5):3152-3159.
9. Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., **Chumsamrong, P.** and Ruksakulpiwat, Y. (2012). "Effect of glycidyl methacrylate grafted natural rubber on physical properties of polylactic acid and natural rubber blends". *J Appl. Polym. Sci.*, vol. 125, p. 745-754.
10. Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., **Chumsamrong, P.** and Ruksakulpiwat, Y. (2014). Effects of Vetiver Grass Fiber on Soil Burial Degradation of Natural rubber and Polylactic Acid Composites. *Intern. Polymer Processing.* 29:379-388.
11. Srisuwan, S., **Chumsamrong, P.**, and Ruksakulpiwat, Y. (2015). Physical Properties of Poly (lactic acid)/Hydroxyl Terminated Natural Rubber Blends. *Macromol. Symp.*, 354(1):118.

12. Pongputtipat, W., Ruksakulpiwat, Y., **Chumsamrong, P.** (2016). *Effect of poly(D-lactic acid) on physical properties of poly(lactic acid)/natural rubber blends*. Suranaree J. Sci. Technol. 23(2):129-134.
13. Srisuwan, S., Ruksakulpiwat, Y., **Chumsamrong, P.** (2018). Synthesis of Natural Rubber-Based Toughening Agents for Poly(lactic acid). Suranaree J. Sci. Technol. 25(4):419-430.
14. Srisuwan, S., Ruksakulpiwat, Y., **Chumsamrong, P.** (2021). Effect of triblock copolymers based on liquid natural rubber and low molecular weight poly(lactic acid) on physical properties of poly(lactic acid)/natural rubber blend. Polym. Bull. 78, 1253–1273 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03158-8>

วารสารวิชาการระดับชาติ

1. ยุพาพร. รักสกุลพิวัฒน์. กษมา จารุกำจร. จันทิมา ดีประเสริฐกุล. นิธินาถ. ศุภกฤษฎี. ปราณี ชุมสำโรง. วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ (2547). เส้นใยธรรมชาติ... ทางเลือกใหม่สำหรับโพลีเมอร์เชิงประกอบ. วิศวกรรมสาร. 57 (683). 44.

ประชุมสัมมนาวิชาการระดับนานาชาติ

1. **Chumsamrong, P.** and Kluengsamrong, J. (2004). Banana fibres: Extraction and Potential Use as Reinforcement for Polypropylene. The Third Thailand Materials Science and Technology Conference, Bangkok, Thailand, 391.
2. Sutapan, W., Kluengsamrong, J., Ruksakulpiwat, Y., Jarukamjorn, K., Suppakarn, N. and **Chumsamrong, P.** (2004). Studies of Thermal Properties and Surface Characteristic of Pretreated Jute Fibers by Boiling and Soxhlet Extraction. 30th Congress on Science and Technology of Thailand, Bangkok, Thailand, 175.
3. **Chumsamrong, P.**, Wongkrazo, S. and Monprasith, O. (2005). Poly(butyl acrylate) Grafted Natural Rubber Latex: Preparation and Film Formation. 31st Congress on Science and Technology of Thailand, Nakorn Ratchasima, Thailand, 242.
4. **Chumsamrong, P.**, Sutapan, W., Kiaw-on, S. and Tonukoon, W. (2005). Influence of Alkali Treated Rossells Fibers on The Tensile Properties of Unsaturated Polyester Resin. 31st Congress on Science and Technology of Thailand, Nakorn Ratchasima, Thailand, 234.
5. Prasoetsopha, N., **Chumsamrong, P.** and Suppakarn, N. (2009). Effects of type and concentration of initiator on grafting of acrylic monomers onto depolymerized natural rubber. International Conference on Advance in Materials and Processing Technologies (AMPT 2009), Kuala Lumpur, Malaysia, 70.

6. Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., **Chumsamrong, P.** and Ruksakulpiwat, Y. (2009). The study of grafting glycidyl methacrylate onto natural rubber. International Conference on Advance in Materials and Processing Technologies (AMPT 2009), Kuala Lumpur, Malaysia, 70.
7. Prasoetsopha, N., **Chumsamrong, P.** and Suppakarn, N. (2009). Physical Properties of Modified Natural Rubber/Epoxy Resin Blends. 11th Pacific Polymer Conference 2009 (PPC11), Cairns, Australia, P388.
8. Srisuwan, S. and **Chumsamrong, P.** (2010). Effects of Fiber orientation and fiber content on physical properties of sisal fiber/ epoxy composites. Pure and Applied Chemistry International Conference, Ubon Ratchathani, Thailand, 464.
9. Srisuwan, S., Prasoetsopha, N., **Chumsamrong, P.** and Suppakarn, N. (2013). The Effects of Alkalized and Silanized Sisal Fibers on Mechanical Properties of Natural Rubber Modified Epoxy Resin. 11th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symphosia, Phuket, Thailand, p.192-196.
10. Srisuwan, S., Ruksakulpiwat, Y., **Chumsamrong, P.** (2016). The preparation of Poly(lactic acid)-block-Natural Rubber-block-Poly(lactic acid) from Hydroxyl Terminated Natural rubber and Poly(lactic acid) Prepolymer. Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-6); June 30-July 1, 2016;. Pathumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, p.1366-1370.
11. Pongputtipat, W., Ruksakulpiwat, Y. **Chumsamrong, P.** (2016). Toughness and thermal properties of poly(lactic acid)/natural rubber/poly(D-lactic acid) blends: Before and after annealing. The 2016 Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2016). p.1366-1370.
12. Phopin, W., Insawang, P., Pongputthiphath, W., **Chumsamrong, P.** (2017). Hydrolytic Degradation of Polylactic acid and High Toughness Polylactic acid. The First Materials Research Society of Thailand International Conference (1st MRS Thailand International Conference), October 31 – November 3, The Empress Convention Center, Chiang Mai, Thailand.
13. Pongputtipat, W., Rodthong, S., **Chumsamrong, P.**, Deeprasertkul, C. (2020). Polylactic acid membrane for controlled release fertilizer application. Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-10); Online Conference, p.188-192.
14. Pongputtipat, W., Rodthong, S., **Chumsamrong, P.**, Deeprasertkul, C. (2021). Green Approach for Thermoformable Poly(lactic acid) Bioplastic Film. . Proceedings of International Polymer Conference of Thailand (PCT-11); Online Conference, p.125-129.

