



โครงการวิทยาศาสตร์ ประเภททดลอง
เรื่อง การพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพผสมแร่ซีโอไลต์
เพื่อควบคุมการการปลดปล่อยปุ๋ยในถุงเพาะชำ

โดย

- | | |
|-------------------|--------|
| ๑.นายนนทวัฒน์ | ปิติจะ |
| ๒.นายประเสริฐ | พอชัย |
| ๓.นางสาวภุมรินทร์ | บุษบา |

ครูที่ปรึกษา

- | | |
|---------------|-------------|
| ๑.นางสาวคณทรี | สุทธี |
| ๒.นางสาวญาณิ | เหล่าเมธากร |

โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษา ลำปางลำพูน
รายงานฉบับนี้เป็นส่วนประกอบของโครงการวิทยาศาสตร์
ประเภททดลอง ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6
เนื่องในงานมหกรรมความสามารถทางศิลปหัตถกรรม วิชาการ และเทคโนโลยีของนักเรียน
ปีการศึกษา 2568 วันที่ 11 กันยายนพ.ศ.2568



เรื่อง เรื่องการพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพผสมแร่ซีโอโลต์

เพื่อควบคุมการการปลดปล่อยปุ๋ยในถุงเพาะชำ

โดย

นายพนนทวัจน์	ปิติจะ
นายประเสริฐ	พอชัย
นางสาวกมลรัตน์	บุษบา

ครูที่ปรึกษา	๑.นางสาวคณทรี	สุทธนี
	๒.นางสาวญาณิ	เหล่าเมธากร

ชื่อโครงการ การพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพผสมแร่ซีโอไลต์เพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยในถุงเพาะชำ

ผู้จัดทำโครงการ ๑.นายณนทวัจน์ ปิติจะ
 ๒.นายประเสริฐ พอชัย
 ๓.นางสาวภุมรินทร์ บุชบา

ครูที่ปรึกษา ๑.นางสาวคนตรี สุทธานี
 ๒.นางสาวญาณิ เหล่าเมธากร

อีเมลครูที่ปรึกษา ๑.Kontree.cu@gmail.com ๒.laomethakorn8107@gmail.com

โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย อำเภอเมืองลำปาง จังหวัดลำปาง

ปีการศึกษา 2568

บทคัดย่อ

จากโครงการการศึกษาการพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพผสมแร่ซีโอไลต์เพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยในถุงเพาะชำ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาปริมาณแร่ซีโอไลต์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพ เนื่องจากถุงเพาะชำที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีปัญหาการกำจัดหลังจากการใช้งาน ก่อให้เกิดขยะพลาสติกตกค้าง คณะผู้จัดทำจึงสนใจศึกษาแผ่นฟิล์มชีวภาพ ที่สามารถย่อยสลายได้ โดยใช้วัสดุในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มที่มีส่วนประกอบของขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการคั้นน้ำอ้อย และมีส่วนประกอบของแร่ซีโอไลต์ที่มีผลต่อการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพและการปลดปล่อยปุ๋ย โดยในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอน ตอนที่ 1 ศึกษาปริมาณแร่ซีโอไลต์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป โดยใช้ปริมาณของแร่ซีโอไลต์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.00 ,0.50 ,1.00 ,1.50 ,2.00 และ 2.50 g ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง 20g. ผงอ้อย 5g และกลีเซอรอล 20ml. พบว่าปริมาณแร่ซีโอไลต์ที่สามารถขึ้นรูปได้คือ 0.00 ,0.50 ,1.00 และ 1.50 g ปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปที่สุดคือ 1.00 g ตอนที่ 2 ทดสอบคุณสมบัติเชิงกายภาพและเคมี โดยนำสูตร Z0 Z1 Z2 Z3 ที่มีปริมาณแร่ซีโอไลต์ 0.00, 0.50 ,1.00 และ 1.50 g ตามลำดับ นำไปทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ หลักเกณฑ์เฉพาะในการตรวจสอบเพื่ออนุญาตสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพอลิเอทิลีนเรซิน (มอก.816/2556) และนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการปลดปล่อยปุ๋ย ซึ่งสูตรที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ Z3 เนื่องจากมีปริมาณแร่ซีโอไลต์เหมาะสมในการปลดปล่อยปุ๋ยได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้ดีที่สุด โดยยังคงคุณสมบัติทางกายภาพเหมาะสมต่อการขึ้นรูปและการใช้งาน

คำสำคัญ : แร่ซีโอไลต์, การปลดปล่อยปุ๋ย, แผ่นฟิล์มชีวภาพ, ถุงเพาะชำ

Project Development of a Zeolite-Based Biodegradable Film as an Alternative to Conventional Plastic Seedling Bags

Subject Chemical or Chemistry

Authors Nontawat Pitija
Prasert Phorchai
Pummarinrat Bussaba

School Bunyawat Witthayalai School

Advisor Kontree Sutthanee
Yanee Laomethakorn

Academic year 1/2025

Abstract

This research aims to develop a biodegradable biofilm containing zeolite minerals to control fertilizer release in seedling bags. The objectives are to determine the optimal composition for film formation and identify the appropriate zeolite content for effective nutrient release into the soil. Sugarcane bagasse, an agricultural waste product, was used as the base material, with zeolite added to enhance both structural integrity and fertilizer release properties. The study addresses environmental concerns related to the disposal of conventional plastic seedling bags, which contribute to long-lasting plastic waste.

The experiment consisted of two parts. In the first part, films were prepared with varying amounts of zeolite: 0.00, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, and 2.50 g. Mix with 20 g of tapioca starch, 5 g of cane sugar powder, and 20 ml of glycerol. Films could be successfully formed with up to 1.50 g of zeolite, and the optimal composition was found at 1.00 g. In the second part, four selected formulations (Z0–Z3) were tested for their physical properties and fertilizer release performance. The Z3 formulation, containing 1.50 g of zeolite, showed the most efficient controlled-release behavior while maintaining suitable physical characteristics, indicating its potential for sustainable agricultural use.

Keywords: Zeolite, Biodegradable Film, Fertilizer Release, Seedling Bag

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิทยาศาสตร์ เรื่อง การศึกษาอัตราส่วนในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มเพาะชำ ประกอบด้วย การดำเนินงานหลายขั้นตอน นับตั้งแต่การศึกษา ค้นคว้าข้อมูล การทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลอง จนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดระยะเวลาดังกล่าว คณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำในด้านต่างๆ ตลอดจนได้รับกำลังใจจากบุคคลหลายท่าน คณะผู้จัดทำตระหนักและซาบซึ้งในความกรุณาจากทุกท่านเป็นอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณทุกท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ คุณครูคณิตรี สุทธิณี และคุณครูญาณิ เหล่าเมธากร ครูที่ปรึกษาโครงการวิทยาศาสตร์ ผู้ให้ความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความเมตตาช่วยเหลือโครงการนี้ให้ถูกต้องตามหลักการ ขอขอบพระคุณ นายนิรันดร์ หมั่นสุข ผู้อำนวยการโรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย และรองผู้อำนวยการโรงเรียนทั้ง 4 ฝ่าย ที่ได้ ส่งเสริมสนับสนุนให้มีกิจกรรมโครงการ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้ปกครอง ตลอดจนถึง ผู้ที่เกี่ยวข้องกับโครงการทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้กำลังใจ และมีส่วนช่วยเหลือให้โครงการฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายที่สุด คณะผู้จัดทำโครงการหวังว่า โครงการฉบับนี้จะเป็นประโยชน์กับผู้สนใจไม่มากนักน้อย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
สมมติฐาน	1
ขอบเขตการศึกษา	2
ตัวแปรที่ศึกษา	2
ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการทดลอง	6
บทที่ 4 ผลการทดลอง	10
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	13
เอกสารอ้างอิง	17
ภาคผนวก	18

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงปริมาณส่วนประกอบในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มเพาะชำ	8
ตาราง 2 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม	10
ตาราง 3 เกณฑ์การประเมินแผ่นฟิล์มชีวภาพ	10
ตาราง 4 แสดงผลการวัดความหนาของแผ่นฟิล์ม	11
ตาราง 5 แสดงผลการต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม	11
ตาราง 6 แสดงผลการซึมผ่านของน้ำ	12
ตาราง 7 แสดงผลการปลดปล่อยปุ๋ย	12

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากจังหวัดลำปางมีการทำเหมืองแร่ดินขาวจึงได้ค้นพบแร่ซีโอไลต์ที่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน และอ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของจังหวัดลำปาง นิยมนำมาใช้ประโยชน์หลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น การแปรรูปเพื่อผลิตน้ำอ้อยซึ่งขานอ้อยเป็นวัสดุทางชีวภาพที่ไม่ได้ถูกนำกลับไปใช้ประโยชน์หลังจากกระบวนการคั้นน้ำอ้อย ก่อให้เกิดเป็นขยะอินทรีย์

ถูงเพาะชำที่นิยมใช้ในปัจจุบันไม่สามารถย่อยสลายได้ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทางคณะผู้จัดทำจึงเล็งเห็นถึงปัญหาและได้มีแนวคิดที่จะพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพที่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นถูงเพาะชำที่ย่อยสลายเองได้และมีคุณสมบัติในการปลดปล่อยปุ๋ย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาปริมาณแร่ซีโอไลต์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีของแผ่นฟิล์มชีวภาพ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสมในการปลดปล่อยปุ๋ยในดิน

1.3 สมมติฐาน

- 1.3.1 การเพิ่มปริมาณแร่ซีโอไลต์ จะทำให้แผ่นฟิล์มมีความแข็งแรง แต่หากเกินค่าความเหมาะสมแผ่นฟิล์มจะไม่สามารถขึ้นรูปได้
- 1.3.2 ปริมาณแร่ซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้นในสูตรผสมของแผ่นฟิล์มชีวภาพ จะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีมีแนวโน้มดีขึ้น
- 1.3.3 เมื่อปริมาณซีโอไลต์มากขึ้น อัตราการหน่วงปุ๋ยจะเพิ่มขึ้น

1.4 ตัวแปรที่ศึกษา

- ตัวแปรต้น : ปริมาณของแร่ซีโอไลต์, แผ่นฟิล์มชีวภาพ
- ตัวแปรตาม : คุณสมบัติของแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ลักษณะ ความหนา การต้านแรงดึง การปลดปล่อยปุ๋ย และการซึมผ่านของน้ำ
- ตัวแปรควบคุม : ขนาดของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง ปริมาณน้ำ ปริมาตรดิน เครื่องมือ Soil test kit และอุณหภูมิและเวลาในการอบ

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาคุณสมบัติแผ่นฟิล์มชีวภาพที่มีส่วนประกอบของแป้งมันสำปะหลัง น้ำปุ๋ย แร่ซีโอไลต์ กลีเซอรอล และชานอ้อย นำไปอบเป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานมอก.816/2556

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 1.6.1 การขึ้นรูปได้ คือ สามารถลอกออกจากแม่พิมพ์ได้โดยเนื้อวัสดุไม่ขาดออกจากกันและเนื้อวัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน
- 1.6.2 แผ่นฟิล์มชีวภาพ คือ วัสดุแผ่นบางที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ผลิตจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ เช่น แป้ง หรือเส้นใยพืช
- 1.6.3 การปลดปล่อยปุ๋ย คือ กระบวนการที่สารอาหารจากปุ๋ยค่อย ๆ ถูกปล่อยออกจากแผ่นฟิล์มสู่สิ่งแวดล้อมหรือรากพืช
- 1.6.4 สมบัติเชิงกล คือ คุณสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงความแข็งแรง ทนทาน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1. สามารถขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานมอก.816/2556
- 1.7.2. เพื่อทราบปริมาณที่ดีที่สุดของแร่ซีโอไลต์ในการขึ้นรูปและหน่วงปุ๋ย
- 1.7.3. สามารถลดปริมาณขยะอินทรีย์และขยะพลาสติก

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพผสมแร่ซีโอไลต์เพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยในถุงเพาะชำ มีวัตถุประสงค์ คือ 1) เพื่อศึกษาหาปริมาณแร่ซีโอไลต์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพ 2) เพื่อศึกษาหาคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีของแผ่นฟิล์มชีวภาพ และ 3) เพื่อศึกษาหาปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสมในการปลดปล่อยปุ๋ยในดิน คณะผู้จัดทำได้ศึกษาเอกสารเอกสารที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 ฟิล์มชีวภาพในงานเกษตรกรรม

2.2 ซีโอไลต์กับการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย

2.3 การใช้ผงอ้อยในฟิล์มชีวภาพ

2.4 การผสมผสานซีโอไลต์และผงอ้อยในฟิล์มเพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย

2.1 ฟิล์มชีวภาพในงานเกษตรกรรม

ฟิล์มชีวภาพ (biodegradable film) คือวัสดุจากธรรมชาติหรือพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ มักผลิตจากแป้ง ไคโตซาน เซลลูโลส หรือพอลิแลกติกแอซิด (PLA) ซึ่งนอกจากจะลดปัญหาขยะพลาสติกแล้ว ยังสามารถปรับแต่งให้มีคุณสมบัติเฉพาะ เช่น การควบคุมการปลดปล่อยได้ด้วย (Siripatrawan & Harte, 2553)

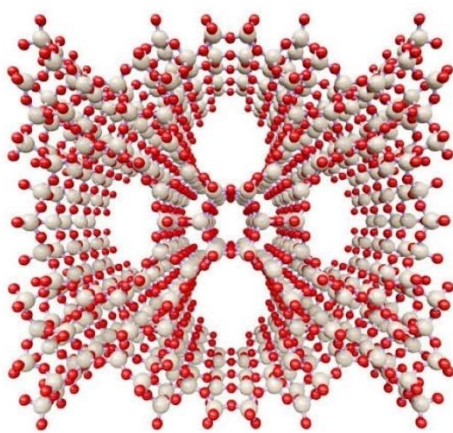
งานวิจัยของ Zare et al. (2563) ศึกษาฟิล์มชีวภาพจากพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ผสมวัสดุเสริมเติม เช่น ไฟเบอร์ แร่ดิน และนาโนซีโอไลต์ เพื่อพัฒนาฟิล์มที่มีความสามารถในการปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ พบว่าฟิล์มที่ผสมสารดูดซับมีความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนได้มากกว่าฟิล์มธรรมดา

2.2 ซีโอไลต์กับการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย

ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นแร่ธาตุในกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้างรูพรุนระดับนาโนเมตรและมีสมบัติการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity) สูง ทำให้สามารถดูดซับไอออนของธาตุอาหารพืช เช่น แอมโมเนียม (NH_4^+) และโพแทสเซียม (K^+) และค่อย ๆ ปลดปล่อยออกมาได้อย่างช้า ๆ

ภาวณี ตาลเถื่อน (2556) ศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไนโตรเจนในแก๊สผสมสังเคราะห์ด้วยซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 4A พบว่าซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับด้วยสารละลาย LiCl มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สสูง และโครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการดูดซับและปล่อยสารอาหารได้อย่างต่อเนื่อง

Sun et al. (2564) พัฒนาแผ่นฟิล์ม PVA ผสมซีโอไลต์เพื่อควบคุมการปล่อยไนโตรเจน พบว่าฟิล์มที่ผสมซีโอไลต์สามารถลดอัตราการชะล้างของปุ๋ย และยืดเวลาการปล่อยไนโตรเจนออกไปได้นานถึง 15 วัน เทียบกับฟิล์มธรรมดาที่หมดภายใน 5 วัน



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของแร่ซีโอไลต์

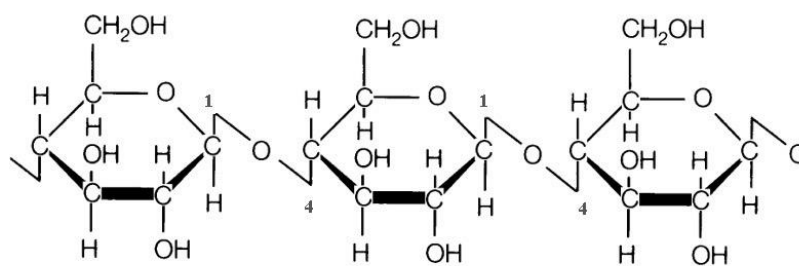
ที่มา : chemwatch (2565)

2.3 การใช้ผงอ้อยในฟิล์มชีวภาพ

ผงอ้อย (bagasse powder) หรือเยื่ออ้อยที่เหลือจากกระบวนการคั้นน้ำ เป็นวัสดุที่อุดมไปด้วยเซลลูโลส ลิกนิน และเอมิเซลลูโลส ซึ่งมีบทบาทเป็นตัวเสริมแรงในพอลิเมอร์ ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น

Abdelhamid (2562) รายงานว่าการเติมผงอ้อยลงในฟิล์ม PVA/starch ทำให้ค่าความต้านแรงดึง (tensile strength) เพิ่มขึ้นจาก 12.3 MPa เป็น 18.5 MPa และยังช่วยลดอัตราการดูดซึมน้ำ ทำให้ฟิล์มมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อนำไปใช้ในพื้นที่ชื้น

Xu et al. (2565) ศึกษาการใช้เยื่ออ้อยร่วมกับแป้งและกลีเซอรอล พบว่าฟิล์มที่มีเยื่ออ้อยสัดส่วน 5–15% มีโครงสร้างสม่ำเสมอ ไม่เปราะง่าย และสามารถย่อยสลายได้ภายใน 60 วันในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ



cellulose (เซลลูโลส)

ภาพที่ 2.3 โครงสร้างเซลลูโลส

ที่มา: food network solution (2557)

2.4 การผสมผสานซีโอไลต์และผงอ้อยในฟิล์มเพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย

จากการศึกษาโดย Zare et al. (2563) และ Sun et al. (2564) พบว่าการนำซีโอไลต์มาใช้ร่วมกับพอลิเมอร์ชีวภาพจะช่วยชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหาร ส่วน Keshk และ Abdelhamid (2562) ยืนยันว่าผงอ้อยช่วยเสริมความแข็งแรงของฟิล์ม ดังนั้นเมื่อใช้วัสดุทั้งสองร่วมกันในแผ่นฟิล์มชีวภาพจะได้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยอย่างช้า ๆ ในการเพาะปลูก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

โครงงานเรื่อง การพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพผสมแร่ซีโอไลต์เพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยในถุงเพาะชำ มีวัตถุประสงค์คือ 1) เพื่อศึกษาหาปริมาณแร่ซีโอไลต์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพ 2) เพื่อศึกษาหาคุณสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมี และ 3) เพื่อศึกษาหาปริมาณซีโอไลต์ที่เหมาะสมในการปลดปล่อยปุ๋ยในดิน โดยมีวิธีดำเนินการทดลองดังนี้

3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือพิเศษ

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- 1) แท่งแก้วคนสาร
- 2) เทอร์โมมิเตอร์
- 3) ตู้อบลมร้อน ควบคุมอุณหภูมิ
- 4) ถาดอบเทปลอนขนาด 12x17x1 เซนติเมตร
- 5) ปีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 6) ปีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 7) ปีกเกอร์ ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 8) ปีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 9) หลอดทดลอง
- 10) กระดาษไคร่งอบ
- 11) กรวยกรอง
- 12) กระบอกตวง

3.1.2 เครื่องมือพิเศษ

- 1) เครื่องชั่งสารเคมี (Balance)
- 2) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Magnetic Hotplate Stirrer)
- 3) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
- 4) ไมโครมิเตอร์ (Micrometer)

3.2 สารเคมี

- 1) แร่ซีโอไลต์
- 2) ปุ๋ยยารามีร่าสูตร 16-16-16
- 3) น้ำกลั่น
- 4) กลีเซอรอล
- 5) แป้งมันสำปะหลังตราปลาไทย
- 6) ผงอ้อยบดละเอียด

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 ขั้น 1 การเตรียมส่วนประกอบของแผ่นฟิล์มชีวภาพ

1) การเตรียมผงอ้อย

- 1.1 นำขานอ้อย ล้างด้วยน้ำสะอาด และตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ
- 1.2 นำขานอ้อยอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นจากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่น
- 1.3 ร่อนด้วยตะแกรงความละเอียด 80 เมส

2) การเตรียมซีไอไลต์

2.1 นำซีไอไลต์อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเพื่อไล่ความชื้น

ขั้นที่ 2 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพ

2.1 เตรียมสารละลายน้ำปุย ที่ความเข้มข้น 200 ppm ปริมาตร 800 มิลลิลิตร

2.2 กำหนดปริมาณส่วนประกอบของแผ่นฟิล์ม

สูตรแผ่นฟิล์มชีวภาพ	ส่วนประกอบ				
	น้ำปุย (mL)	แป้ง (g)	ผงอ้อย (g)	กลีเซอรอล (mL)	ซีไอไลต์ (g)
Z0 (ตัวควบคุม)	200	5	0.5	5	0
Z1	200	5	0.5	5	0.5
Z2	200	5	0.5	5	1.0
Z3	200	5	0.5	5	1.5
Z4	200	5	0.5	5	2.0

ตาราง 1 แสดงปริมาณส่วนประกอบในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มเพาะชำ

2.3 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสด้วยเครื่อง Hotplate Magnetic Stirrer

เป็นเวลา 30 นาที

2.4 เทสารผสมลงบนถาดพิมพ์ขนาด 36x26x1.5 เซนติเมตร

2.5 อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง หรือแห้งสนิท

2.6 ลอกแผ่นฟิล์มออกจากถาดพิมพ์ให้เป็นแผ่น จากนั้นใช้เครื่องปิดผนึกสำหรับปิดผนึกแผ่นฟิล์มชีวภาพ

3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพ

1) วัดความหนาของแผ่นฟิล์ม

1.1 นำแผ่นฟิล์มตัวอย่าง ขนาด 2x2 เซนติเมตร วัดความหนาด้วยเครื่องมือไมโครมิเตอร์ (Micrometer)

1.2 วัดซ้ำทั้งหมด 3 รอบ และหาค่าเฉลี่ย

2) ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม

2.1) ทดสอบการต้านแรงดึง

2.1.1 ตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างขนาดกว้าง 5 cm. ยาว 10 cm.

2.1.2 นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างใส่ในเครื่อง Universal Testing Machine

2.1.3 อ่านค่าแรงดึงโดยใช้โปรแกรม TrapeziumX

2.2) ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

2.2.1. ตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างขนาด 10x10 เซนติเมตร

2.2.2. นำแผ่นฟิล์มตัวอย่างวางบนปากกรวยกรองที่ตั้งอยู่ในกระบอกตวง โดยให้แผ่นฟิล์มทำหน้าที่เสมือนแผ่นกรอง

2.2.3. หยดน้ำกลั่นจากบิวเรตต์ลงบนบริเวณกลางแผ่นฟิล์มตัวอย่าง

2.2.4. สังเกตและบันทึกระยะเวลาในการซึมผ่านของน้ำ

3) ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของแผ่นฟิล์ม

3.1) ทดสอบการปลดปล่อยปุ๋ย

3.1.1 นำไปฝังลงดิน ลักษณะเป็นดินร่วน และฝังแผ่นฟิล์มให้มีความลึกประมาณ 8-10 เซนติเมตร

3.1.2. นำตัวอย่างดิน 1 กรัม เติมน้ำกลั่น 8 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ดินตกตะกอน

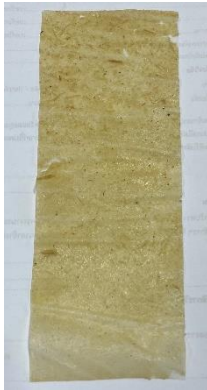
3.1.3. ใช้หลอดหยดดูดของเหลว และเติมสาร activator 2 หยด หลังจากนั้นเติมสาร solution รอให้สารละลายเปลี่ยนสีเป็นเวลา 1 นาที

3.1.4.อ่านค่าแถบสีโดยใช้แอป Colar Gear Lifeและบันทึกผล

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพ

สูตร					
Z0 (ควบคุม)	Z1 (0.5 g)	Z2 (1.0 g)	Z3 (1.5 g)	Z4 (2.0 g)	Z5 (2.5 g)
					

ตาราง 2 แสดงผลการทดลองการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

เกณฑ์/สูตร	การยึดเกาะต่ำต่อ แม่พิมพ์	ไม่มีรอยแตร้าว	การกระจายตัว ของวัสดุสม่ำเสมอ	ความเหนียว เหมาะสม	ยืดหยุ่น เหมาะสม	ผิวเรียบ
1	x	✓	✓	x	x	✓
2	✓	✓	✓	x	✓	x
3	✓	✓	✓	✓	✓	x
4	✓	✓	✓	✓	x	x
5	x	x	x	✓	x	x
6	x	x	x	x	x	x

ตาราง 3 เกณฑ์การประเมินแผ่นฟิล์มชีวภาพ

นิยามศัพท์เฉพาะ

ความเหนียว คือ ความสามารถของวัสดุในการทนต่อแรงดึงหรือแรงฉีก ก่อนฉีกขาด

ความยืดหยุ่น คือ ความสามารถของแผ่นฟิล์มในการ ยืดหรือเปลี่ยนรูป เมื่อมีแรงมากระทำ แล้วสามารถคืนสภาพเดิม ได้เมื่อแรงถูกยกออก

4.2 การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มชีวภาพ

สูตร	ความหนาที่วัดได้ (mm)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
1	0.12	0.15	0.13	0.13
2	0.15	0.17	0.12	0.15
3	0.17	0.15	0.19	0.17
4	0.18	0.19	0.19	0.19

ตาราง 4 แสดงผลการวัดความหนาของแผ่นฟิล์ม

4.3 การต้านทานต่อแรงดึง

สูตร	ขนาดของแผ่นฟิล์ม (cm)		แรงดึงก่อนขาด (N)
	ความกว้าง	ความยาว	
1	4	10	10.00
2	4	10	11.80
3	4	10	14.40
4	4	10	18.20

ตาราง 5 แสดงผลการต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นฟิล์ม

4.4 การซึมผ่านของน้ำ

สูตร	ขนาดของแผ่นฟิล์ม (cm)		เวลาที่ใช้
	ความกว้าง	ความยาว	
1	10	10	17 ชม. 05 น.
2	10	10	17 ชม. 11 น.
3	10	10	17 ชม. 21 น.
4	10	10	17 ชม. 29 น.

ตาราง 6 แสดงผลการซึมผ่านของน้ำ

4.5 การปลดปล่อยปุ๋ย

สูตร	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5	วันที่ 6	วันที่ 7	วันที่ 8	วันที่ 9	วันที่ 10
	ปริมาณธาตุอาหารในดิน (mg/L)									
สูตร 1 (ควบคุม)	≈10	≈10	≈10	≈10	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0
สูตร 2	≈50	≈50	≈50	≈10	≈10	≈10	≈0	≈0	≈0	≈0
สูตร 3	≈50	≈50	≈10	≈10	≈10	≈10	≈10	≈10	≈0	≈0
สูตร 4	≈50	≈10	≈10	≈10	≈10	≈10	≈10	≈10	≈10	≈10

ตาราง 7 แสดงผลการปลดปล่อยปุ๋ย

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

5.1.1 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพ

การเพิ่มปริมาณสารเติมเต็มในฟิล์มชีวภาพต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อรักษาคุณสมบัติของฟิล์มในแง่ของผิวสัมผัส ความยืดหยุ่น และความสามารถในการลอกออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งสูตร Z0 Z1 Z2 เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงสร้างฟิล์มที่มีความสมบูรณ์และการใช้งานจริง

5.1.2 การวัดความหนา

ผลการศึกษานี้จึงแสดงให้เห็นว่า การเติมซีโอไลต์สามารถเพิ่มความหนาของฟิล์มได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเป็นผลมาจากกลไกการกระจายตัวของของแข็งที่มีปฏิสัมพันธ์กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ชีวภาพ โดยเฉพาะในระบบที่มีพลาสติไซเซอร์อย่างกลีเซอรอล ซึ่งช่วยให้ซีโอไลต์สามารถแทรกตัวได้ดีและก่อตัวเป็นโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น

5.1.3 การต้านแรงดึง

การเติมแร่ซีโอไลต์ในปริมาณที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มแรงต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างพอลิเมอร์ หากเติมมากเกินไปจะเกิดการรวมตัวของอนุภาค ทำให้กระจายตัวไม่ดีและส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของฟิล์ม

5.1.4 การซึมผ่านของน้ำ

การเติมแร่ซีโอไลต์ในสูตรฟิล์มชีวภาพส่งผลต่อการชะลอการซึมผ่านของน้ำ โดยมีหลักฐานเชิงกลไกสนับสนุนว่าซีโอไลต์ทำหน้าที่เป็นทั้งวัสดุดูดซับและตัวเพิ่มความซับซ้อนของเส้นทางแพร่ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการต้านทานการซึมผ่านของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีโอไลต์ที่เติม

5.1.5 การปลดปล่อยปุ๋ย

การเติมแร่ซีโอไลต์ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น 1.5 กรัม (Z3) มีประสิทธิภาพสูงสุดในการควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนจากฟิล์มชีวภาพในลักษณะที่ชะลอได้และเสถียร เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระบบเกษตรกรรมที่ต้องการการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างต่อเนื่อง ลดการสูญเสียจากการชะล้าง และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยในระยะยาว

5.2 การอภิปรายผล

5.2.1 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพ

แผ่นฟิล์มชีวภาพที่ผลิตจากสูตร Z0 ถึง Z2 มีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบเนียน ไม่มีรอยแตกร้าว และยังคงความโปร่งใสได้ดี โดยสีฟิล์มเปลี่ยนจากเหลืองน้ำตาลในสูตร Z0 ไปเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นในสูตร Z1 และ Z2 ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง เช่น ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเกิดขึ้นในระบบฟิล์มชีวภาพที่มีส่วนผสมของแป้งและโปรตีน (García et al., 2562) โดยปฏิกิริยานี้ส่งผลต่อสีโดยไม่ลดทอนคุณสมบัติทางกลของฟิล์มแต่อย่างใด

แผ่นฟิล์มในสูตร Z0 Z1 Z2 สามารถลอกออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างสมบูรณ์ ไม่มีการติดหรือเสียหาย ซึ่งบ่งชี้ว่าคุณสมบัติของฟิล์มทั้งในเชิงโครงสร้างและความยืดหยุ่นเหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูป โดยที่แรงยึดเกาะระหว่างฟิล์มกับแม่พิมพ์อยู่ในระดับที่สามารถจัดการได้ดี (Jiménez et al., 2555)

สำหรับสูตร Z3 พบว่าผิวฟิล์มเริ่มมีรอยแตกร้าวและความไม่สม่ำเสมอของผิว ซึ่งแสดงถึงความเปราะบางที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ เนื่องจากปริมาณสารเติมเต็มหรือส่วนประกอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างของฟิล์มไม่สามารถรักษาความสมบูรณ์ได้เต็มที่ (Rachtanapun et al., 2556) ถึงแม้ว่าฟิล์มยังคงสามารถลอกออกจากแม่พิมพ์ได้ แต่คุณภาพโดยรวมลดลง

ในสูตร Z4 และ Z5 ลักษณะผิวฟิล์มเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน คือมีผิวขรุขระ รอยแตกร้าวจำนวนมากขึ้น และผิวไม่สม่ำเสมอ รวมถึงไม่สามารถลอกฟิล์มออกจากแม่พิมพ์ได้ ส่งผลให้ฟิล์มเสียหายขณะถอด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่า การเติมสารเติมเต็มในปริมาณสูงเกินไป ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นก้อน และความเปราะในโครงสร้างฟิล์ม ส่งผลต่อสมบัติทางกลและแรงยึดเกาะกับแม่พิมพ์ (Thakur et al., 2558)

5.2.2 การวัดความหนาแผ่นฟิล์ม

จากการทดลองพบว่า ความหนาของแผ่นฟิล์มชีวภาพเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแร่ซีโอโลต์ที่เติมเข้าไป โดยสูตร Z0 มีความหนาน้อยที่สุด และสูตรที่มีซีโอโลต์ Z2 กรัมนี้อาจมีความหนาที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าแร่ซีโอโลต์ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (filler) ที่แทรกตัวอยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ ทำให้เนื้อฟิล์มมีความหนาแน่นและมวลรวมเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความหนาโดยรวมของแผ่นฟิล์ม (Li et al., 2562)

นอกจากนี้ แร่ซีโอโลต์ยังมีโครงสร้างรูพรุนที่สามารถดูดซับน้ำไว้ภายใน ทำให้ฟิล์มแห้งช้าลง เกิดการสะสมของสารละลายบริเวณผิวมากขึ้น จึงส่งผลให้ฟิล์มหนาขึ้นหลังการอบแห้ง (Sun et al., 2564) อย่างไรก็ตาม การเติมแร่ซีโอโลต์ในปริมาณสูงเกินไป เช่น 1.50 กรัม อาจทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาค ส่งผลให้ความหนาเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ (Kumar et al., 2565)

5.2.3 การต้านแรงดึง

จากผลการทดลองพบว่า การเติมแรชีโอไลต์ในแผ่นฟิล์มชีวภาพในปริมาณ 0.00, 0.50, 1.00 และ 1.50 กรัม สูตร Z1–Z4 ตามลำดับ ส่งผลต่อแรงต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์ม โดยค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณชีโอไลต์ที่ใส่ในช่วงที่เหมาะสม และลดลงเมื่อเติมมากเกินไป แผ่นฟิล์มสูตร Z1 ที่ไม่มีชีโอไลต์มีแรงดึงต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีสารเสริมแรงภายในพอลิเมอร์ โครงสร้างจึงอ่อนตัวและต้านแรงได้น้อย การเติมชีโอไลต์ 0.50 กรัม ในสูตร Z2 ช่วยเพิ่มแรงดึงได้บางส่วน เนื่องจากชีโอไลต์ทำหน้าที่เสริมโครงสร้างและยับยั้งการเคลื่อนตัวของโซ่พอลิเมอร์ได้บางส่วน ส่วนสูตร Z3 ที่เติมชีโอไลต์ 1.00 กรัม ให้ค่าแรงดึงสูงที่สุด เนื่องจากเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ ทำให้วัสดุแข็งแรงและต้านแรงดึงได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 1.50 กรัม ในสูตร Z4 ค่าแรงดึงลดลงเนื่องจากการจับตัวของอนุภาคชีโอไลต์เป็นกลุ่ม ทำให้กระจายตัวไม่สม่ำเสมอและเกิดจุดอ่อนในฟิล์ม

5.2.4 การซึมผ่านของน้ำ

จากผลการทดลองพบว่าแผ่นฟิล์มชีวภาพที่มีองค์ประกอบของแรชีโอไลต์ในระดับที่แตกต่างกันส่งผลต่อระยะเวลาในการซึมผ่านของน้ำอย่างชัดเจน โดยสูตร Z1 ซึ่งไม่มีชีโอไลต์ ใช้เวลาการซึมผ่าน 17.11 ชั่วโมง ขณะที่สูตร Z4 ซึ่งมีชีโอไลต์ 1.50 กรัม ใช้เวลา 17.5 ชั่วโมง แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างปริมาณแรชีโอไลต์กับความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ

แรชีโอไลต์มีโครงสร้างผลึกแบบสามมิติและมีรูพรุนระดับนาโนเมตร ทำหน้าที่เสมือนสารลดการแพร่ (diffusion barrier) ที่เพิ่มความซับซ้อนของเส้นทางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำภายในเมทริกซ์พอลิเมอร์ เมื่อเติมชีโอไลต์ในระดับที่เหมาะสมลงในเนื้อฟิล์ม จะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานการซึมผ่าน (permeation resistance) โดยการลดช่องว่างของเมทริกซ์ และเพิ่ม tortuosity ซึ่งทำให้โมเลกุลน้ำต้องอ้อมผ่านโครงสร้างของแรก่อนจะทะลุผ่านฟิล์มได้ (Thakur et al., 2558; Li et al., 2562)

นอกจากนี้ ชีโอไลต์ยังมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างรูพรุน ส่งผลให้การแพร่ของน้ำภายในฟิล์มชะลอลง และยืดระยะเวลาในการซึมผ่านออกไป (Zare et al., 2563) คุณสมบัติเหล่านี้เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้สูตรที่มีปริมาณชีโอไลต์สูงมีค่าการซึมผ่านต่ำกว่า แม้ค่าความแตกต่างจะอยู่ในระดับหลักนาทีกว่า แต่แสดงถึงแนวโน้มที่ชัดเจนของผลเชิงกลไก

5.2.5 การปลดปล่อยปุ๋ย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณแร่ซีโอไลต์ที่เติมในแผ่นฟิล์มชีวภาพส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจน โดยสูตร Z0 (ไม่มีซีโอไลต์) แสดงลักษณะการปลดปล่อยแบบรวดเร็วและหมดลงภายใน 4 วัน ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานในระบบที่ต้องการการปลดปล่อยระยะยาว

สูตร Z1–Z3 ซึ่งมีการเติมซีโอไลต์ในระดับที่เพิ่มขึ้น แสดงการควบคุมการปลดปล่อยที่ดีขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะ Z2 และ Z3 ที่มีการปลดปล่อยต่อเนื่อง และใน Z3 สามารถรักษาระดับไนโตรเจนได้คงที่ตลอด 10 วัน แสดงถึงศักยภาพของซีโอไลต์ในการชะลอและควบคุมการแพร่ของธาตุอาหาร

กลไกการควบคุมนี้เกิดจากโครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ที่ทำหน้าที่ดูดซับและปลดปล่อยไนโตรเจนผ่านช่องว่างระดับนาโนเมตร ซึ่งช่วยเพิ่มความซับซ้อนของเส้นทางการแพร่ (Li et al., 2562; Zare et al., 2563) อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความคงตัวของโครงสร้างฟิล์มและลดการปลดปล่อยอย่างรวดเร็วในช่วงต้น (Thakur et al., 2558)

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรศึกษาปริมาณแร่ซีโอไลต์ในขอบเขตของปริมาณที่จำเพาะต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มชีวภาพ

5.3.2 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

5.3.3 การขึ้นรูปเป็นถุงเพาะชำ สำหรับทดลองใช้งานจริงกับต้นกล้าในโรงเรือน

เอกสารอ้างอิง

ปิยะธิดา แสงทอง และอารีรัตน์ ภูวดล. (2563). ซีโอไลต์: สมบัติและการประยุกต์ใช้ทางการเกษตร (ออนไลน์).

สืบค้นจาก: <https://agri-zeolite.or.th/article123> [12 มกราคม 2568]

ศิริรณาสายใจ และณัฐวุฒิ บรรเจิด. (2562). คุณสมบัติการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มชีวภาพที่ผลิตจากขานอ้อยและกลีเซอรอล. วารสารการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, 11(2), 60–67. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, นครสวรรค์ (ออนไลน์).

สืบค้นจาก: https://so03.tci-thaijo.org/index.php/VRU_RD/article/view/XXXXX [20 เมษายน 2567]

สมชาย ใจดี, วิภา วัฒนะ และกิตติพงศ์ มั่นคง. (2561). การศึกษาคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังเสริมเส้นใยธรรมชาติ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 26(3), 45–52. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่ (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <https://cmuj.cmu.ac.th/xxxx> [15 กุมภาพันธ์ 2568]

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ มอก.816-2556: ถู่งเพาะชำจากพลาสติก (ออนไลน์). กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

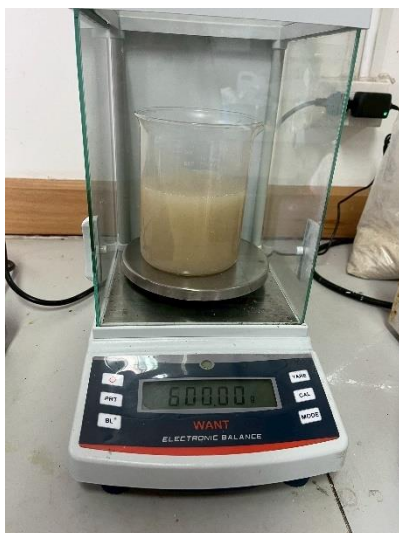
สืบค้นจาก: https://www.tisi.go.th/standard/fullpdf/816_2556.pdf [28 ธันวาคม 2567]

Li, Y., Liu, C. และ Wang, L. (2562). Effect of zeolite on the physical properties of starch-based films. Carbohydrate Polymers, 224(1), 115167. Elsevier, ประเทศเนเธอร์แลนด์ (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115167> [10 มกราคม 2568]

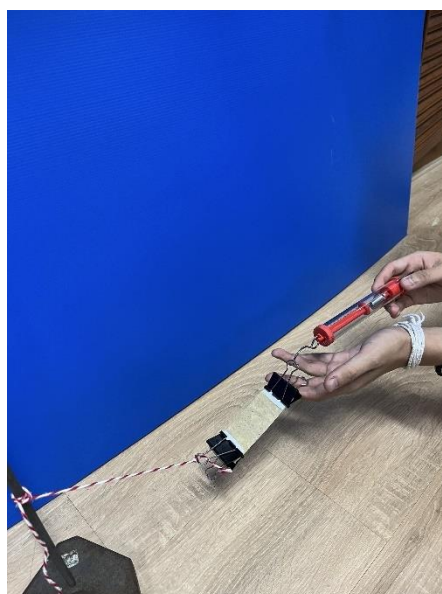
Thakur, R., Janes, M. E. และ Thakur, M. (2558). Influence of fillers on mechanical and barrier properties of starch-based biocomposites: A review. Carbohydrate Polymers, 132(1), 216–225. Elsevier, ประเทศเนเธอร์แลนด์ (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.06.075> [18 พฤษภาคม 2567]

Zare, Y. และ Rhee, K. Y. (2563). A two-step approach for water absorption and diffusion coefficient of polymer nanocomposites. Polymer Testing, 81(1), 106229 (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106229> [23 กุมภาพันธ์ 2568]

ภาคผนวก



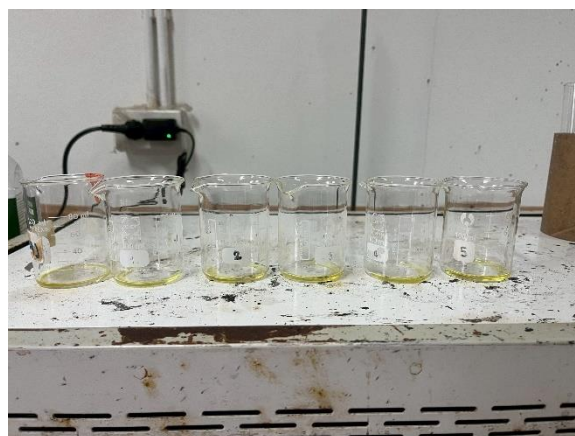
ภาพที่ 1 สังเคราะห์แผ่นฟิล์มชีวภาพ



ภาพที่ 2 การทดสอบการต้านต่อแรงดึง



ภาพที่ 3 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำ



ภาพที่ 4 การทดสอบการปลดปล่อยปุ๋ย