

พฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะจาก
โซเดียมอัลจิเนตเชื่อมโยงโครงสร้าง

RELEASING BEHAVIOR OF NUTRIENTS IN SEEDING
MEDIA FROM STRUCTURALLY CROSSLINKED SODIUM
ALGINATE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

พฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะจาก
โซเดียมอัลจิเนตเชื่อมโยงโครงสร้าง

RELEASING BEHAVIOR OF NUTRIENTS IN SEEDING
MEDIA FROM STRUCTURALLY CROSSLINKED SODIUM
ALGINATE



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

149010

18 S.A. 2560

b. 12878645
f.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RELEASING BEHAVIOR OF NUTRIENTS IN SEEDING
MEDIA FROM STRUCTURALLY CROSSLINKED SODIUM
ALGINATE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

พฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะจาก
โซเดียมอัลจิเนตเชื่อมโยงโครงสร้าง

Releasing Behavior of Nutrients in Seeding Media from
Structurally Crosslinked Sodium Alginate

ชื่อนักศึกษา

นางสาวณิชฐา	เหียง	รหัสนักศึกษา	56050448
นางสาวจริญญา	สวนสวรรค์	รหัสนักศึกษา	56050451
นางสาวฐิตินันท์	น้ำทองสกุล	รหัสนักศึกษา	56050480

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2559





อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผศ.ดร.บรรจง บุญชม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ ประธานกรรมการ	
ดร.ณวสิทธิ์ โชติแสง กรรมการ	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ.ดร.บรรจง บุญชม กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	พฤติกรรมการณ์ปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะจากโซเดียมอัลจิเนตเชื่อมโยงโครงสร้าง			
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชนิษฐา	เหิง	รหัสนักศึกษา	56050448
	นางสาวจริญญา	สวนสรรค์	รหัสนักศึกษา	56050451
	นางสาวฐิตินันท์	น้ำทองสกุล	รหัสนักศึกษา	56050480
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)			
ภาควิชา	เคมี			
คณะ	วิทยาศาสตร์			
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)			
ปีการศึกษา	2559			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ			
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.บรรจง บุญชม			

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุเพาะ จากโซเดียมอัลจิเนตเชื่อมโยงโครงสร้าง ซึ่งวัสดุเพาะเตรียมโดย ชั้นแรกผสมโซเดียมอัลจิเนตกับสูตรปุ๋ยที่เตรียมจากสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตต และสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจน จากนั้นขึ้นรูปเป็นวัสดุเพาะและนำไปเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 โมลาร์ หรือสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตความเข้มข้นประมาณ 1 โมลาร์ แล้วศึกษาสภาพการละลายของวัสดุเพาะในน้ำกลั่น นอกจากนี้ยังศึกษาพฤติกรรมการณ์ปลดปล่อยธาตุอาหาร (แคลเซียม แมกนีเซียม และฟอสฟอรัส) จากวัสดุเพาะ โดยตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (AAS) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 422.7 และ 285.2 นาโนเมตร ตามลำดับ และตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนด้วยวิธีกรดแอสคอบิก โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-vis) ที่ความยาวคลื่น 880.0 นาโนเมตร ผลการทดสอบสภาพการละลายแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของส่วนที่ละลายน้ำได้ง่ายของวัสดุเพาะที่มีการเชื่อมโยงลดลงและมีส่วนที่ละลายน้ำได้ยากเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรปุ๋ย ผลการศึกษาพฤติกรรมการณ์ปลดปล่อยพบว่าแคลเซียมไอออนมีการปลดปล่อยปริมาณมากในช่วงแรกและลดลงจนกระทั่งคงที่ ในขณะที่แมกนีเซียมและฟอสเฟตไอออนมีการปลดปล่อยออกมาในปริมาณน้อยอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้การศึกษาเบื้องต้นของประสิทธิภาพของวัสดุเพาะ ทำได้โดยการสังเกตการเจริญเติบโตของผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica* Forsk. Var. *reptan*) ในเจลดินวิทยาศาสตร์ พบว่า วัสดุเพาะสูตรเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ มีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ : แคลเซียมคลอไรด์, แคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตต, วัสดุเพาะ, อัลจิเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Releasing Behavior of Nutrients in Seeding Media from Structurally Crosslinked Sodium Alginate		
Students	Miss Kanita	Yeung	Student ID 56050448
	Miss Charinya	Suansan	Student ID 56050451
	Miss Thitinan	Namthongsakun	Student ID 56050480
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2016		
Advisor	Asst.Prof.Dr. Pathavuth	Monvisade	
Co-advisor	Asst.Prof.Dr. Banjong	Boonchom	

Abstract

This research studied on the preparation of seeding media from structurally crosslinked sodium alginate. The seeding media was firstly prepared by the mixing of sodium alginate and fertilizer formulation prepared by the mixing of calcium magnesium acetate solution and diammonium hydrogen phosphate solution. After that, the seeding media was shaped and then crosslinked using 2 M and 4 M calcium chloride solution or ~1 M calcium magnesium acetate solution. The solubility in distilled water of seeding media was studied. In addition, the releasing behavior of nutrients (calcium, magnesium and phosphorus) from the seeding media was also investigated. The amounts of calcium and magnesium ions released from the seeding media were measured by atomic absorption spectrophotometer at wavelength of 422.7 and 285.2 nm, respectively. Furthermore, the amount of phosphorus in form of phosphate ion was measured by ascorbic acid method using UV-Visible spectrophotometer at wavelength 880.0 nm. The solubility results showed that the well soluble part of the crosslinked seeding media decreased while hardly soluble part increased, compared to fertilizer formulation. The releasing behavior results exhibited that the amount of calcium ions release was relatively high at initial stage and subsequently declined until it was constant. While, the releases of magnesium and phosphate ions were linearity but relatively low amount. Moreover, the preliminary studied of efficiency of seeding media was carried out by observation in the growth of water convolvulus (*Ipomoea aquatic Forsk. Var. reptan*) in aqua crystal gel. It was found that seeding media crosslinked by 4 M calcium chloride solution showed the most effective formulation.

Keywords : Calcium chloride, Calcium Magnesium Acetate, Seeding Media, Alginate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคคลหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์ของโครงการพิเศษนี้ ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทธารุช มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และ ผศ.ดร.บรรจง บุญชม อาจารย์ที่ปรึกษาพร้อมโครงการพิเศษ ในการให้ความรู้และคำปรึกษา อบรมและแนะนำให้ทำงานอย่างมีระเบียบรอบคอบ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือและตรวจทาน ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้มีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ และ ดร.ณวลลิตี โชติแสง อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจทานและเสนอแนะความคิดเห็น เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในโครงการพิเศษเล่มนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือฯ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก และให้คำแนะนำ ทั้งในด้านการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ การใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ และสารเคมีในการทดลอง อาทิเช่น การขอยืมอุปกรณ์ และการเบิกสารเคมี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว สำหรับกำลังใจในการทำงาน ขอขอบพระคุณพี่ ๆ ปริญญาโทและปริญญาเอกในหน่วยงานวิจัยการสังเคราะห์พอลิเมอร์และวัสดุเฉพาะทาง สำหรับการให้คำปรึกษา ช่วยเหลือเมื่อเกิดปัญหา และขอบคุณเพื่อน ๆ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้ประสบผลสำเร็จ หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ชนิษฐา เหยิง
จริญญา สวนสรรค์
ฐิตินันท์ น้ำทองสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วัสดุเพาะกล้า.....	3
2.2 ปุ๋ย.....	3
2.2.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช.....	3
2.2.2 หน้าที่ของธาตุอาหารของพืช.....	3
2.2.2.1 หน้าที่สำคัญของธาตุอาหารหลัก.....	3
2.2.2.2 หน้าที่สำคัญของธาตุอาหารรอง.....	4
2.2.2.3 หน้าที่สำคัญของธาตุอาหารเสริม.....	4
2.2.3 ประเภทของปุ๋ย.....	5
2.2.3.1 ปุ๋ยอินทรีย์.....	5
2.2.3.2 ปุ๋ยเคมี.....	6
2.2.4 สูตรปุ๋ย.....	6
2.2.4.1 การบ่งบอกปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยเคมี.....	7
2.2.5 การจำแนกปุ๋ยเคมีตามความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารของพืช..	7
2.2.5.1 ปุ๋ยละลายเร็ว.....	7
2.2.5.2 ปุ๋ยกึ่งละลายช้าละลายเร็ว.....	7
2.2.5.3 ปุ๋ยละลายช้า.....	7
2.2.5.4 ปุ๋ยเคลือบ.....	8
2.2.5.5 หลักการปลดปล่อยของยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน.....	11
2.2.5.6 หลักการปลดปล่อยของปุ๋ยเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์.....	11
2.2.5.7 การสูญเสียปุ๋ยเคมีไปจากดิน.....	13
2.3 ไฮโดรเจล.....	15
2.3.1 การจำแนกประเภท.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1.1 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตามลักษณะการสังเคราะห์.....	15
2.3.1.2 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตามการเชื่อมโยงของโครงสร้าง	18
2.3.2 วิธีเตรียมไฮโดรเจล	18
2.3.2.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslinking).....	18
2.3.2.2 การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking).....	19
2.3.2.3 การเชื่อมขวางโดยการใช้รังสี (Radiation crosslinking)	21
2.3.3 สมบัติของไฮโดรเจล.....	21
2.4 กัมธรรมชาติ.....	23
2.4.1 อัลจิเนต.....	23
2.5 ระบบเชื่อมโยง.....	25
2.5.1 การเชื่อมโยงด้วยประจุ.....	25
2.5.1.1 การเชื่อมโยงประจุแบบโมโนวาเลนต์.....	25
2.5.1.2 การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์.....	25
2.5.1.3 การเชื่อมโยงประจุแบบไตรวาเลนต์.....	25
2.5.2 แคลเซียมคลอไรด์.....	25
2.5.2.1 ลักษณะจำเพาะ	25
2.5.2.2 ประโยชน์แคลเซียมคลอไรด์.....	26
2.5.2.3 ความเป็นพิษของแคลเซียมคลอไรด์.....	26
2.5.2.4 ข้อควรระวังการใช้	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	32
3.1 สารเคมี.....	32
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	32
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย.....	33
3.3.1 สารละลายอัลจิเนตความเข้มข้น 7 %w/v	33
3.3.2 สารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตความเข้มข้น 1 โมลาร์.....	33
3.3.3 สารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 1 โมลาร์.....	33
3.3.4 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 โมลาร์	33
3.3.5 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต	33
3.3.6 สารละลายแอสคอบิกรีเอเจนต์	34
3.4 ขั้นตอนการเตรียมแม่พิมพ์ซิลิโคน	34
3.5 ขั้นตอนการเตรียมสูตรปุ๋ย	34
3.6 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเพาะ	34
3.6.1 การเตรียมวัสดุเพาะเชื่อมโยงโดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 4.0 โมลาร์.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.2 การเตรียมวัสดุเพาะเชื่อมโยงโดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์.....	35
3.6.3 การเตรียมวัสดุเพาะเชื่อมโยงโดยใช้แคลเซียมแมกนีเซียมไอออน	35
3.7 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของสูตรปุ๋ย.....	35
3.7.1 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FTIR.....	35
3.7.2 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์...	35
3.7.3 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค X-ray fluorescence .	35
3.8 การตรวจวิเคราะห์	36
3.8.1 การทดสอบการปลดปล่อยธาตุอาหารในวัสดุเพาะ	36
3.8.1.1 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุเพาะ.....	36
3.8.1.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุเพาะ.....	36
3.8.1.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตไอออนที่ปลดปล่อยออกมา..จากวัสดุเพาะ	37
3.8.2 การหาปริมาณธาตุอาหารทั้งหมดที่สามารถละลายน้ำได้ของวัสดุเพาะ.....	38
3.9 การศึกษาสภาพการละลายของสูตรปุ๋ย	38
3.10 การศึกษาประสิทธิภาพเบื้องต้นของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งใน	39
เจลดินวิทยาศาสตร์.....	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	40
4.1 การเตรียมสูตรปุ๋ย	40
4.1.1 ร้อยละผลผลิต	40
4.1.2 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FTIR ...	41
4.1.3 ผลการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD	41
4.1.4 ผลการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค XRF	42
4.2 การเตรียมและลักษณะทางกายภาพของวัสดุเพาะ	42
4.3 สภาพการละลายของปุ๋ยและผลของการเชื่อมโยง.....	43
4.3.1 สภาพการละลายของปุ๋ย	43
4.3.2 ผลของการเชื่อมโยงต่อสภาพการละลายของปุ๋ย	44
4.4 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะ.....	45
4.4.1 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนของวัสดุเพาะ	45
4.4.1.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน	46
4.4.1.2 การคำนวณปริมาณแคลเซียมไอออนที่ปลดปล่อยของวัสดุเพาะ ...	46
4.4.1.3 ผลของการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนของวัสดุเพาะ	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยแมกนีเซียมไอออนของวัสดุเพาะ.....	49
4.4.2.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน.....	49
4.4.2.2 การคำนวณปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่ปลดปล่อยของวัสดุเพาะ.	50
4.4.2.3 ผลของการปลดปล่อยแมกนีเซียมไอออนของวัสดุเพาะ	50
4.4.3 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของวัสดุเพาะ.....	51
4.4.3.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของฟอสฟอรัส.....	52
4.4.3.2 การคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสของวัสดุเพาะ	53
4.4.3.3 ผลของการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของวัสดุเพาะ.....	53
4.5 การหาปริมาณธาตุอาหารในวัสดุเพาะ.....	55
4.6 การศึกษาประสิทธิภาพเบื้องต้นของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก.....	64
ภาคผนวก ข.....	66
ภาคผนวก ค.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างการเคลือบปุ๋ยด้วยพอลิเมอร์ของ PE:EVA กััระยะเวลาในการปลดปล่อย	11
4.1 องค์ประกอบวัสดุเพาะ	40
4.2 องค์ประกอบธาตุในสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้	42
4.3 ค่าน้ำหนัก, เส้นผ่านศูนย์กลาง, ปริมาตร และความหนาแน่นเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของวัสดุเพาะแต่ละสูตร	43
4.4 ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสของวัสดุเพาะแต่ละสูตรในอัตราการ	
หยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที	55
4.5 ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสของวัสดุเพาะแต่ละสูตรในอัตราการ	
หยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การสลายตัวของชั้นกัมมะถันที่เคลือบบนเม็ดปุ๋ยก่อนที่จะมีการปลดปล่อย.....	9
2.2 การสลายตัวของชั้นกัมมะถันและพอลิเมอร์ที่เคลือบบนเม็ดปุ๋ยยูเรีย.....	9
2.3 กลไกการปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจนผ่านชั้นเคลือบ	11
2.4 กลไกการปลดปล่อยปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์	12
2.5 กราฟแสดงการปลดปล่อยแบบสะสม (Accumulative release) ของธาตุอาหารจากปุ๋ย.... เม็ดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์	13
2.6 โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ.....	16
2.7 โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย	16
2.8 โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบกราฟต์บนพื้นผิว	16
2.9 โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก.....	17
2.10 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธี Complex coacervation.....	18
2.11 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด Carboxymethylcellulose	19
2.12 ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเติมสารเชื่อมขวาง	19
2.13 ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธี Chemical grafting.....	20
2.14 ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธี Radiation grafting	21
2.15 ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธี Radiation crosslinking	21
2.16 การพองตัวของไฮโดรเจลเมื่อโมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปภายในโครงสร้าง	21
2.17 อันตรกิริยาของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล.....	22
2.18 ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธี Radiation crosslinking	23
2.19 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model).....	24
4.1 กราฟ FTIR ของสูตรปุ๋ย.....	41
4.2 กราฟ XRD ของสูตรปุ๋ย.....	42
4.3 ลักษณะทางกายของวัสดุเพาะ	43
4.4 แผนภูมิวงกลมแสดงสภาพการละลายของปุ๋ยที่เตรียมได้.....	44
4.5 แผนภูมิวงกลมแสดงสภาพการละลายของวัสดุเพาะที่มีการเชื่อมโยง.....	45
4.6 กราฟมาตรฐานสารละลายแคลเซียมไอออน.....	46
4.7 พฤติกรรมการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนของอัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที	48
4.8 พฤติกรรมการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนของอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที	49
4.9 กราฟมาตรฐานสารละลายแมกนีเซียมไอออน.....	50
4.10 พฤติกรรมการปลดปล่อยแมกนีเซียมไอออนของวัสดุเพาะ เมื่อใช้อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะสูตรต่าง ๆ.....	51

สารบัญญรูป (ต่อ)

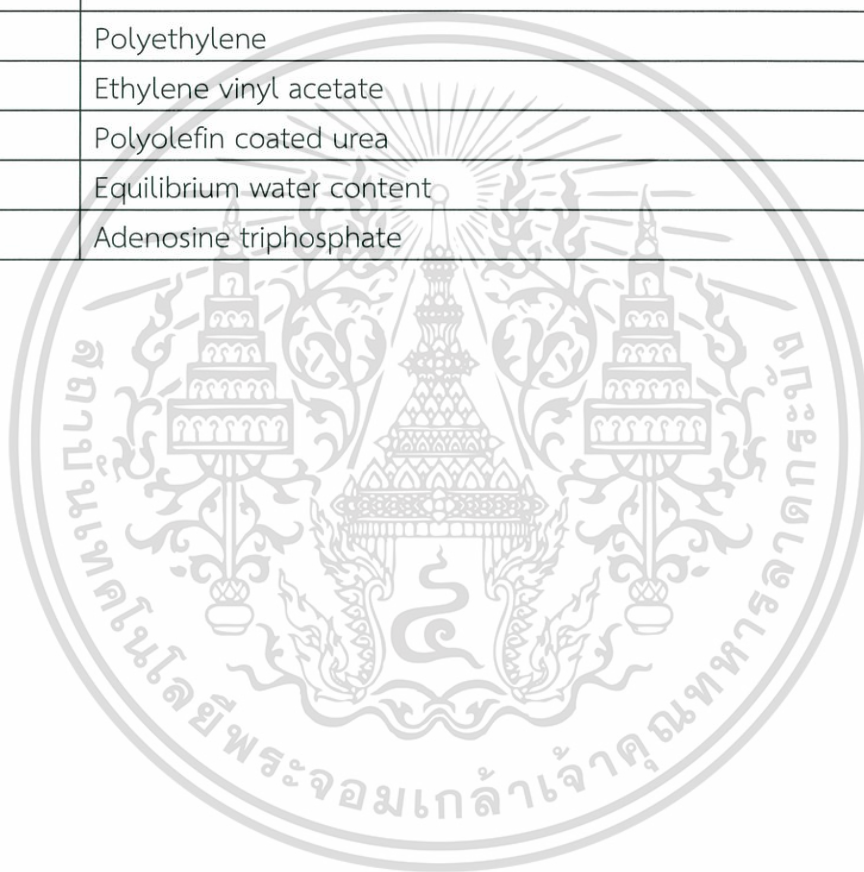
รูปที่	หน้า
4.11 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออน.....	53
4.12 พฤติกรรมการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตไอออนของวัสดุเพาะ เมื่อใช้อัตราการหยด น้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะสูตรต่าง ๆ	54
4.13 กราฟแสดงอัตราการเจริญเติบโตของผักบุ้ง.....	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
P ₂ O ₅	Diphosphorus pentaoxide
K ₂ O	Potassium oxide
TE	Trace Element
IBDU	Isobutylidene diurea
CRF	Controlled released fertilizers
PAPR	Partial acidulation phosphate rock
SCU	Sulfur-coated urea
PE	Polyethylene
EVA	Ethylene vinyl acetate
POCU	Polyolefin coated urea
EWC	Equilibrium water content
ATP	Adenosine triphosphate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เกษตรกรรมของไทยมีการเปลี่ยนรูปแบบจากการผลิตเพื่อบริโภคในครัวเรือนเป็นหลักมาเป็นการผลิตเพื่อจำหน่าย เกษตรกรจึงมีการนำสารเคมีไม่ว่าจะเป็นสารกำจัดศัตรูพืช ปุ๋ย รวมไปถึงวัสดุเพาะมาใช้เพื่อเพิ่มผลผลิต ซึ่งปัจจุบันวัสดุเพาะมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร วัสดุเพาะมีอยู่หลายชนิด เช่น พีทมอส (Peat moss) เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) และเพอร์ไลท์ (Perlite) เป็นต้น โดยวัสดุเพาะที่นิยมใช้ในเชิงการค้าทั่วไปคือ พีทมอส ซึ่งเป็นอินทรีย์วัตถุจากธรรมชาติ ที่เกิดจากการแยกชั้นและจับตัวกันอย่างช้า ๆ ของกลุ่มหินแร่ ทั้บถมกันมานานเป็นระยะเวลาหลายพันปี พบมากในแถบสภาพอากาศหนาว พีทมอสมีลักษณะโครงสร้างโปร่ง ช่องว่างอากาศสูง สามารถเก็บความชื้นได้ดี สามารถอุ้มน้ำไว้แต่จะไม่ม่น้ำจนแฉะ มีความเป็นกรดอ่อน ๆ (pH ต่ำ) ปราศจากวัชพืช เป็นวัสดุที่ไม่เป็นแหล่งสะสมของโรคและแมลง จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เพาะปลูกต้นกล้า โดยช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การงอก ส่งผลให้ต้นกล้าสมบูรณ์ แข็งแรง และช่วยในการเจริญเติบโต [1] โดยปกติพีทมอสที่ขายตามท้องตลาดทั่วไปจะมีการใส่ปุ๋ยเพื่อเพิ่มธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของราคา เนื่องจากไม่สามารถผลิตได้เองในประเทศ จึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศเท่านั้น ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้พีทมอสเป็นสารจากธรรมชาติที่ใช้เวลาในการเกิดยาวนานทำให้มีโอกาสที่จะหมดไปได้ในอนาคต จึงมีความสนใจหาวัสดุทางธรรมชาติภายในประเทศมาทดแทนวัสดุนำเข้า ทำให้มีการศึกษาพัฒนาวัสดุเพาะให้มีสมบัติใกล้เคียงหรือดีกว่าเพื่อนำมาทดแทนการใช้พีทมอส

ไฮโดรเจล (Hydrogels) มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก มีสมบัติการบวมตัวในน้ำได้ดี สามารถกักเก็บสารไว้ภายในเพื่อทำการปลดปล่อย และยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารได้ ไฮโดรเจลจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น จากงานวิจัยของ ภูษิต จันทาวุฒิ ศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยสารออโรฟอสเฟตในรูปของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินเต/กัวร์กัม [2] เนื่องจากอัลจินเตสามารถอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี มีโครงสร้างทางเคมีเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถเกิดเจลได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับสารที่มีประจุบวกเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารที่อยู่ภายในได้ ทำให้ลดปัญหาการสูญเสียธาตุอาหารในกระบวนการชะล้างที่ส่งผลให้พืชได้รับแร่ธาตุน้อยลงหรืออาจได้รับแร่ธาตุในเวลาสั้น ๆ ทำให้ต้องมีการเติมปุ๋ยเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งซึ่งเป็นสาเหตุของต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุเพาะจากโซเดียมอัลจินเตผสมกับสูตรปุ๋ยที่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาของสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตและสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต แล้วเชื่อมโยงวัสดุเพาะด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตต เพื่อทำให้วัสดุเพาะเกิดโครงร่างตาข่ายที่แข็งแรง สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ จากนั้นศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะโดยใช้อัตราการหยดน้ำที่ต่างกัน คือ 4 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1

การคำนวณต้นทุนการผลิตวัสดุเพาะ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาที่ ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตรและ 285.2 นาโนเมตรตามลำดับ และตรวจวัดปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนด้วยวิธี Ascorbic acid ใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (UV-vis) ที่ความยาวคลื่น 880.0 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งโดยนำไปทดลองปลูกในเจลดินวิทยาศาสตร์ ซึ่งวัสดุเพาะนี้จะสามารถช่วยเกษตรกรลดต้นทุนในการผลิตลงอีกทั้งยังเป็นการลดการนำเข้าฟืทมอสจากต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุเพาะจากโซเดียมอัลจิเนต
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมสูตรปุ๋ยที่มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช
- 2) เตรียมวัสดุเพาะจากโซเดียมอัลจิเนต โดยมีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตต เป็นสารเชื่อมโยง
- 3) ปรับเปลี่ยนชนิดและความเข้มข้นของสารเชื่อมโยง คือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์, 4 โมลาร์ และสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตความเข้มข้นประมาณ 1 โมลาร์
- 4) นำวัสดุเพาะมาทดสอบการปลดปล่อยแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนที่อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที หรือ 20 มิลลิลิตรต่อนาที โดยตรวจวัดปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร และ 285.2 นาโนเมตร ตามลำดับ
- 5) นำวัสดุเพาะมาทดสอบการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนด้วยเครื่อง UV-vis ที่ความยาวคลื่น 880.0 นาโนเมตร
- 6) ทดสอบการเพาะปลูกในเจลดินวิทยาศาสตร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมวัสดุเพาะที่บรรจุปุ๋ยที่มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชได้
- 2) ทราบถึงพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเพาะกล้า

วัสดุที่ใช้เพาะโดยปกติ หมายถึง ดินที่ใช้เพาะเมล็ด ซึ่งมีสมบัติที่เหมาะสมกับการงอกและการเจริญเติบโตของกล้าพืช สำหรับดินที่มีสมบัติเหมาะสมในการใช้เพาะเมล็ดพืช ควรมีลักษณะคือ ดินจะต้องโปร่งมีอากาศถ่ายเทดี อุ้มน้ำได้มากพอสมควรและระบายน้ำได้ง่าย มีธาตุอาหารสำหรับพืชเพียงพอในช่วงอายุของกล้าพืชตามปกติ คือ ประมาณ 30 – 45 วัน มีน้ำหนักเบาหรือค่อนข้างเบาสามารถเคลื่อนย้ายและหีบยกได้สะดวก ปราศจากโรคแมลงหรือสารอื่นใดที่เป็นพิษและไม่เป็นกรดหรือด่างจัดจนทำให้กล้าพืชไม่เจริญเติบโตเท่าที่ควร

สำหรับวัสดุที่ใช้เพาะเมล็ด โดยทั่วไปมักจะใช้ดินซึ่งอาจนำมาจากหน้าดินในแปลงปลูกพืช ดินขุยไผ่ ดินปุ๋ยหมักหรือไปไม้ผุ หรืออาจนำมาผสมกับวัสดุอื่นให้มีสมบัติในการงอกของเมล็ดและการเจริญของกล้าพืชดีขึ้น วัสดุเพาะกล้าจึงมีบทบาทโดยตรงต่อคุณภาพต้นกล้าโดยวัสดุเพาะกล้าที่ดีจะทำให้กล้าที่เพาะเจริญเติบโตโดยไม่มีการชะงัก

2.2 ปุ๋ย

ปุ๋ย หมายถึง สารหรือสิ่งที่ใส่ลงไปในดิน เพื่อให้ปลดปล่อยธาตุอาหารพืช โดยเฉพาะพวก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่พืชยังขาดอยู่ให้พืชได้รับอย่างเพียงพอ พืชสามารถเจริญเติบโตงอกงามดี และให้ผลผลิตสูงขึ้น ปุ๋ยแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยเคมี

2.2.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

พืชและสัตว์ต้องประกอบด้วยโปรโตพลาสซึม (Protoplasm) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้ชีวิตดำรงอยู่ได้ อย่างไรก็ตามสัตว์ต้องอาศัยพืชในการดำรงชีวิต ในขณะที่พืชดำรงชีวิตอยู่ได้เองโดยไม่ต้องอาศัยสัตว์เลยก็ได้ เมื่อพืชได้รับแสงแดด น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และธาตุอาหารที่จำเป็นอย่างครบถ้วน วัตถุดิบดังกล่าวที่พืชได้รับนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในเซลล์พืช ซึ่งทำให้พืชสามารถดำรงชีวิตและแพร่พันธุ์ออกไปอย่างกว้างขวางได้

คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถันเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโปรตีนและสารที่ให้พลังงาน ธาตุอื่น ๆ ที่จำเป็นอีก 10 ธาตุ คือ โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โบรอน โมลิบดีนัมและคลอรีน มีความสำคัญต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาต่าง ๆ ในพืช ซึ่งทำให้พืชเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงได้ พืชได้รับธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนจากอากาศและน้ำ ส่วนธาตุอื่น ๆ นั้นได้มาจากดิน ความเข้มข้นของธาตุอาหารต่าง ๆ ในพืช ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ หลายชนิด ดังนั้นความเข้มข้นของธาตุอาหารในพืชจึงแตกต่างกันไป แล้วแต่ชนิดของพืชและปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ

2.2.2 หน้าที่ของธาตุอาหารของพืช

2.2.2.1 หน้าที่สำคัญของธาตุอาหารหลัก

1) ธาตุไนโตรเจน (N) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกรดอะมิโน โปรตีน นิวคลีโอไทด์ (Nucleotide) และคลอโรฟิลล์ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีความสำคัญมากต่อกระบวนการการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตาบอลิซึมของพืช พืชเมื่อขาดไนโตรเจนจะแคระแกร็น โตช้า ใบเหลือง โดยเฉพาะใบล่าง ๆ จะแห้งร่วงหล่นเร็ว ทำให้แลดูต้นโกร๋น การออกดอกออกผลจะช้า และไม่ค่อยสมบูรณ์นัก ดินโดยทั่ว ๆ ไป มักจะมีไนโตรเจนไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช ดังนั้นเวลาปลูกพืชจึงควรใส่ปุ๋ยคอก หรือปุ๋ยเคมี เพิ่มเติมให้กับพืชด้วย

2) ธาตุฟอสฟอรัส (P) มีหน้าที่เกี่ยวกับการถ่ายเทพลังงานซึ่งเป็นกระบวนการทางสรีรวิทยาที่สำคัญอย่างยิ่ง นอกจากนั้นยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (ATP) นิวคลีโอไทด์และฟอสโฟลิปิดอีกด้วย พืชเมื่อขาดฟอสฟอรัสจะมีต้นแคระแกร็น ใบมีสีเขียวคล้ำ ใบล่าง ๆ จะมีสีม่วงตามบริเวณขอบใบ รากของพืชชะงักการเจริญเติบโต พืชไม่ออกดอกและผล

3) ธาตุโพแทสเซียม (K) จำเป็นต่อการเคลื่อนที่ของธาตุอาหารและสารบางชนิดในพืช ควบคุมการเปิดปิดของปากใบ และเป็นธาตุที่กระตุ้นให้เอ็นไซม์ทำงาน พืชเมื่อขาดโพแทสเซียมจะมีต้นแคระแกร็นและมีสีเขียวซีด ใบแก่อาจมีจุดแห้งตายหรือขอบใบแห้ง ใบอ่อนจะมีจุดประสีแดงหรือสีเหลืองระหว่างเส้นใบ และผิวใบเป็นมันลื่นมากกว่าปกติ

2.2.2.2 หน้าที่สำคัญของธาตุอาหารรอง

1) ธาตุกำมะถัน (S) มีหน้าที่เกี่ยวกับการสร้างโปรตีนและส่วนประกอบของกรดอะมิโนบางชนิดที่เป็นองค์ประกอบในโปรตีน และโคเอ็นไซม์ (Co-enzyme) พืชเมื่อขาดกำมะถันจะทำให้ต้นพืชมีการเจริญเติบโตช้าลง เกิดอาการเหลืองทั้งต้น ซึ่งมักจะเกิดกับใบอ่อนก่อน

2) ธาตุแคลเซียม (Ca) มีหน้าที่เกี่ยวกับความแข็งแรงของเนื้อเยื่อของเซลล์พืชเป็นส่วนประกอบของแคลเซียมเพคเตต (Calcium pectate) และเป็นธาตุที่กระตุ้นให้เอ็นไซม์บางชนิดทำงาน พืชเมื่อขาดแคลเซียมจะทำให้พืชมีลำต้นแคระแกร็น ใบอ่อนมีสีเหลืองซีด

3) ธาตุแมกนีเซียม (Mg) มีหน้าที่ในกระบวนการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นประโยชน์และเป็นส่วนประกอบของคลอโรฟิลล์ นอกจากนั้นยังเป็นตัวกระตุ้นในเอ็นไซม์ทำงาน เช่นเดียวกับแคลเซียม พืชเมื่อขาดแมกนีเซียมจะทำให้ใบพืชมีสีเหลือง ขอบใบและบริเวณระหว่างเส้นใบมีสีเหลืองเห็นได้ชัด

2.2.2.3 หน้าที่สำคัญของธาตุอาหารเสริม

1) ธาตุเหล็ก (Fe) เป็นส่วนประกอบของ เหล็กพอร์ไฟริน (Iron porphyrine) และ เฟอร์ดอกซิน (Ferredoxin) ซึ่งเป็นสารที่สำคัญในกระบวนการถ่ายเทอิเล็กตรอนของพืช พืชเมื่อขาดเหล็กจะมีใบสีเหลืองซีด มักจะมีใบหนา เล็กและหยาบกระด้าง

2) ธาตุแมงกานีส (Mn) มีหน้าที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และรีดักชัน (Reduction) ในกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน และเป็นตัวกระตุ้นให้เอ็นไซม์ทำงาน พืชเมื่อขาดแมงกานีสจะมีสีเหลืองระหว่างเส้นใบ พืชมีลำต้นแคระแกร็น

3) ธาตุสังกะสี (Zn) มีหน้าที่เกี่ยวกับกระบวนการเมตาบอลิซึมของออกซิน (Auxine) ซึ่งเป็นสารที่ควบคุมการเจริญเติบโตของพืช ยังมีหน้าที่ในการสร้างนิวคลีโอไทด์และส่วนประกอบของเอ็นไซม์ ดีไฮโดรจีเนสอีกด้วย ลักษณะการขาดธาตุสังกะสีจะปรากฏให้เห็นค่อนข้างชัดเจนในพืชบางชนิด

4) ธาตุทองแดง (Cu) มีหน้าที่เกี่ยวกับการสร้างลิกนิน (Lignin) และเป็นส่วนประกอบของเอ็นไซม์ Ascorbic acid oxidase พืชเมื่อขาดธาตุทองแดง ใบอ่อนจะมีสีเหลืองและตายไป พืชผักที่ขาดทองแดงใบจะหยด ม้วน และไม่เต่งน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) ธาตุโบรอน (Br) มีหน้าที่เกี่ยวกับการสร้าง การใช้ และการเคลื่อนย้าย นิวคลีโอไทด์ซึ่งเป็นสารที่สำคัญมากในกระบวนการต่าง ๆ ทางสรีรวิทยาของพืช เช่น กระบวนการที่ก่อให้เกิดพลังงาน พืชเมื่อขาดโบรอน บริเวณที่กำลังเจริญเติบโตจะตาย ตาอ่อนที่เพิ่งเกิดจะแตกเป็นกระจุก

6) ธาตุโมลิบดีนัม (Mo) มีหน้าที่เกี่ยวกับการสร้างโปรตีนในพืชต่าง ๆ และการตรึงไนโตรเจนจากอากาศของพืชตระกูลถั่ว พืชตระกูลถั่วที่ขาดโมลิบดีนัมจะมีใบสีเขียวซีดถึงเหลืองเจริญเติบโตช้า ส่วนพืชที่ไม่ใช่ตระกูลถั่วจะมีใบซีดและมีจุดสีน้ำตาลบนใบ

7) ธาตุคลอรีน (Cl) มีหน้าที่ช่วยให้ประจุไฟฟ้าในเซลล์พืชเป็นกลางและเซลล์มีความเต่งน้ำ พืชที่ขาดคลอรีนอย่างรุนแรงจะมีสีเหลืองและแห้งตายบนบริเวณใบ ปลายใบจะเหี่ยวและตายในเวลาต่อมา การเจริญเติบโตของพืชจะถูกจำกัด [4]

2.2.3 ประเภทของปุ๋ย

2.2.3.1 ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยพวกนี้ ได้แก่ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด และวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด ซึ่งเป็นพวกอินทรีย์สาร

1) ปุ๋ยคอก โดยทั่วไปแล้ว ถ้าคิดราคาต่อหน่วยธาตุอาหารพืช จะมีราคาแพงกว่าปุ๋ยเคมี แต่ปุ๋ยคอกช่วยปรับปรุงดินให้โปร่งและร่วนซุย ทำให้การเตรียมดินง่าย การตั้งตัวของต้นกล้าเร็ว ทำให้มีโอกาสรอดได้มาก นาข้าวที่เป็นดินทราย เช่น ดินภาคอีสาน การใช้ปุ๋ยคอก หรือปุ๋ยอินทรีย์อื่น ๆ เท่าที่จะหาได้ในบริเวณใกล้เคียง จะช่วยให้การดำนาง่าย ข้าวตั้งตัวได้ดี และเจริญเติบโตงอกงามอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากดินทรายพวกนี้มีอินทรีย์วัตถุต่ำมาก การใส่ปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยอินทรีย์ลงไป จะทำให้ดินอุ้มน้ำและปุ๋ยได้ดีขึ้น การปักดำกล้าทำได้ง่ายขึ้น เพราะหลังทำเทือกแล้ว ดินจะไม่อัดกันแน่น ปุ๋ยคอกมีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมค่อนข้างต่ำ โดยหยาบ ๆ แล้วมีไนโตรเจนประมาณ 0.5% N ฟอสฟอรัส 0.25% P_2O_5 และโพแทสเซียม 0.5% K_2O ปุ๋ยขี้ไก่ และขี้เป็ด จะมีปริมาณธาตุอาหารสูงกว่าขี้หมู และขี้หมูจะมีปริมาณธาตุอาหารสูงกว่าขี้วัว และขี้ควาย ปุ๋ยคอกใหม่ๆ จะมีปริมาณธาตุอาหารสูงกว่าปุ๋ยคอกที่เก่าและเก็บไว้นาน ทั้งนี้เนื่องจากส่วนของปุ๋ยที่ละลายได้ง่ายจะถูกชะล้างออกไปหมด บางส่วนก็กลายเป็นก๊าซสูญหายไป ดังนั้นการเก็บรักษาปุ๋ยคอกอย่างระมัดระวังก่อนนำไปใช้ จะช่วยรักษาคคุณค่าของปุ๋ยคอกไม่ให้เสื่อมคุณค่าอย่างรวดเร็ว การเก็บรักษาปุ๋ยคอกอาจทำได้ เช่น นำมากองรวมกันเป็นรูปผาซี แล้วอัดให้แน่น ถ้าอยู่ภายใต้หลังคาก็ยิ่งดี ถ้าอยู่กลางแจ้ง ควรหาจากหรือทางมะพร้าวคลุมไว้ด้วยก็จะดี ปุ๋ยคอกที่ได้มาใหม่ ๆ และยังคงอยู่ ถ้าจะใส่ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตชนิดธรรมดา (20% P_2O_5) ลงไปด้วยสักเล็กน้อย ก็จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจน โดยการระเหิดกลายเป็นก๊าซได้เป็นอย่างดี ถ้าเลี้ยงสัตว์อยู่ในคอกควรใช้แกลบ ขี้เลื่อย หรือฟางข้าว รองพื้นคอก ให้ดูดซับปุ๋ยไว้ เมื่อฟางข้าวอืดตัวด้วยปุ๋ย ก็รองเพิ่มเป็นชั้น ๆ เมื่อสะสมไว้มากพอ ก็ลอกเอาไปกองเก็บไว้ หรือนำไปใส่ในไร่นาโดยตรงเลยก็ได้ อัตราปุ๋ยคอกที่ใช้นั้นไม่เคร่งครัด เหมือนกับปุ๋ยเคมี ปกติแนะนำใส่อัตรา 1-4 ตันต่อไร่ โดยใส่ค่อนข้างมากในดินเหนียวจัด หรือดินทรายจัด หลังจากใส่ปุ๋ยคอกแล้วถ้ามีการ ไถหรือพรวนดินกลบลงไปในดิน อย่างไรก็ตามก็ดียังช่วยให้ปุ๋ยเป็นประโยชน์แก่พืชได้เร็วและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2) ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพวกนี้ก็ ได้แก่ปุ๋ยที่เราได้จากการหมักเศษพืช เช่น หญ้าแห้ง ใบไม้ ฟางข้าว ฯลฯ ให้เน่าเปื่อยเสียก่อน จึงนำไปใส่ในดินเป็นปุ๋ย ปุ๋ยเทศบาลที่บรรจุถุงขายในชื่อของปุ๋ยอินทรีย์เบอร์ต่างๆ นั้น ก็คือ ปุ๋ยหมัก ได้จากการนำขยะจากในเมือง พวกเศษพืช เศษอาหารเข้าเอกรวมกันเป็นชั้นเป็นตอน จนกลายเป็นปุ๋ย ปุ๋ยหมักสามารถทำเองได้ โดยการกรองสุมเศษพืชสูงชันจากการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นดิน 30-40 ซม. แล้วโรยปุ๋ยคอกผสมปุ๋ยเคมีสูตรเสมอ 15-15-15 ประมาณ 1-1.5 กิโลกรัมต่อเศษพืชหนัก 1,000 กิโลกรัม เสร็จแล้วก็กองเศษพืชซ้อนทับลงไปอีก แล้วโรยปุ๋ยคอกผสมปุ๋ยเคมี ทำเช่นนี้เรื่อยไปเป็นชั้นๆ จนสูงประมาณ 1.5 เมตร ควรมีการรดน้ำ แต่ละชั้นเพื่อให้มีความชุ่มชื้น และเป็นการทำให้มีการเนาเปื่อยได้เร็วขึ้น กองปุ๋ยหมักนี้ทิ้งไว้ 3-4 สัปดาห์ ก็ทำการกลับกองปุ๋ยครั้งหนึ่ง ถ้ากองปุ๋ยแห้งเกินไปก็รดน้ำ ทำเช่นนี้ 3-4 ครั้ง เศษพืชก็จะเนาเปื่อยเป็นอย่างดีและมีสภาพเป็นปุ๋ยหมักนำไปใช้ใส่ดินเป็นปุ๋ยให้กับพืชที่ปลูกได้ เศษหญ้า และใบไม้ต่าง ๆ ถ้าเก็บรวบรวมกองสุ่มไว้แล้วทำเป็นปุ๋ยหมัก จะดีกว่าเผาทิ้งไป ปุ๋ยหมักจะช่วย ปรับปรุงดินให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้นและ ปลูกพืชเจริญงอกงามดีเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะพืชผักสวนครัว และไม้ดอกไม้ประดับ

3) ปุ๋ยพืชสด เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการปลูกพืชบำรุงดิน ซึ่งได้แก่ พืชตระกูลถั่วต่างๆ แล้วทำการไถกลบ เมื่อพืชเจริญเติบโตมากที่สุด ซึ่งเป็นช่วงที่กำลังออกดอก พืชตระกูลถั่วที่ควรใช้เป็นปุ๋ยพืชสด ควรมีอายุสั้น มีระบบรากลึก ทนแล้ง ทนโรคและแมลงได้ดี เป็นพืชที่ปลูกง่าย และมีเมล็ดมาก ตัวอย่างพืชเหล่านี้ ได้แก่ ถั่วพุ่ม ถั่วเขียว ถั่วลาย ปอเทือง ถั่วขอ ถั่วแปบ และโสน เป็นต้น

2.2.3.2 ปุ๋ยเคมี เป็นปุ๋ยที่ได้มาจากการผลิตหรือสังเคราะห์ทางอุตสาหกรรม จากแร่ธาตุต่าง ๆ ที่ได้ตามธรรมชาติ หรือเป็นผลพลอยได้ของโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด ปุ๋ยเคมีมีอยู่ 2 ประเภท คือ แม่ปุ๋ยหรือปุ๋ยเดี่ยว และปุ๋ยผสม

1) ปุ๋ยเดี่ยวหรือแม่ปุ๋ย ได้แก่ ปุ๋ยพวกแอมโมเนียมซัลเฟต โปแทสเซียมคลอไรด์ ฯลฯ ซึ่งเป็นสารประกอบทางเคมี มีธาตุอาหารปุ๋ยคือ N หรือ P หรือ K เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยหนึ่งหรือสองธาตุ แล้วแต่ชนิดของสารประกอบที่เป็นแม่ปุ๋ยนั้น ๆ มีปริมาณของธาตุอาหารปุ๋ยที่คงที่ เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต มีไนโตรเจน 20% N ส่วนโปแทสเซียมไนเตรต มีไนโตรเจน 13% N และโปแทสเซียม 46% K_2O อยู่ร่วมกันสองธาตุ

2) ปุ๋ยผสม ได้แก่ ปุ๋ยที่มีการนำเอาแม่ปุ๋ยหลาย ๆ ชนิดมาผสมรวมกัน เพื่อให้ปุ๋ยที่ผสมได้ มีปริมาณ และสัดส่วนของธาตุอาหาร N P และ K ตามที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ปุ๋ย ที่มีสูตรหรือเกรดปุ๋ย เหมาะที่จะใช้กับพืชและดินที่แตกต่างกัน ปุ๋ยผสมนี้มีขายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป เพราะนิยมใช้กันมาก ปัจจุบันเทคโนโลยีในการทำปุ๋ยผสมได้พัฒนาไปไกลมาก สามารถผลิตปุ๋ยผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ มีการบั่นเป็นเม็ดขนาด สม่ำเสมอสะดวกในการใส่ลงไปในไร่นา ปุ๋ยพวกนี้เก็บไว้นาน ๆ ไม่จับกันเป็นก้อนแข็ง

2.2.4 สูตรปุ๋ย

สูตรปุ๋ย แสดงด้วยตัวเลข 3 ตัว โดยมีขีดคั่นกลาง เป็นตัวเลขที่ใช้บอกสัดส่วนปริมาณธาตุอาหารหลัก 3 ชนิดของปุ๋ยได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโปแทสเซียม ตามลำดับ เช่น ปุ๋ยกระสอบละ 100 กิโลกรัม สูตร 46-0-0 แสดงว่าจะมีส่วนผสมเนื้อธาตุไนโตรเจน 46 กิโลกรัม, ปุ๋ย 16-20-0 แสดงว่าจะมีส่วนผสมของเนื้อธาตุไนโตรเจน 16 กิโลกรัมและเนื้อธาตุฟอสฟอรัส 20 กิโลกรัม ปุ๋ย 15-15-15 แสดงว่าจะมีส่วนผสมเนื้อธาตุไนโตรเจน 15 กิโลกรัมและเนื้อธาตุฟอสฟอรัส 15 กิโลกรัมและเนื้อธาตุโปแทสเซียม 15 กิโลกรัม ปุ๋ยบางชนิดจะมีธาตุอาหารรองหรือบางครั้งเรียกว่า “จุลธาตุ” อยู่ด้วยและมักจะต่อท้ายสูตรปุ๋ยด้วย “TE” ซึ่งมาจากคำว่า Trace Element หมายถึง จุลธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4.1 การบ่งบอกปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยเคมี

บนฉลากปุ๋ยเคมีทุกชนิดจะระบุปริมาณธาตุอาหารหลักเป็นตัวเลข 3 จำนวนเรียงกันเรียกว่า “สูตรปุ๋ย” โดยตัวเลขจะหมายถึง % โดยน้ำหนักของไนโตรเจน-ฟอสฟอรัส-โพแทสเซียม หรือ เอ็น-พี-เค เรียงตามลำดับ ตัวอย่างเช่น ปุ๋ยสูตร 13-0-46 แสดงว่ามีไนโตรเจน 13% ไม่มีฟอสฟอรัส และมีโพแทสเซียม 46% สำหรับธาตุอาหารอื่น ๆ ในปุ๋ยเคมี โดยขึ้นกับผู้ผลิตว่าจะระบุหรือไม่ แต่อย่างก็ตาม หากระบุจะเขียนบอกบนฉลากปุ๋ยว่ามีธาตุอะไรบ้าง และมีเท่าไร

2.2.5 การจำแนกปุ๋ยเคมีตามความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารของพืช

ปุ๋ยเคมีส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบที่สามารถละลายน้ำ และปลดปล่อยธาตุอาหารพืชเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ทันที เช่น ปุ๋ยไนโตรเจนที่อยู่ในรูปไนเตรตและแอมโมเนียม แต่มีปุ๋ยเคมีบางชนิดที่มีความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชได้ในปริมาณน้อย หรือในการผลิตปุ๋ยเคมีได้มีการควบคุมการปลดปล่อยหรือการละลายโดยกรรมวิธีต่าง ๆ เพื่อป้องกันการสัมผัสระหว่างปุ๋ยกับน้ำในดิน ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้มีการละลายหรือปลดปล่อยธาตุอาหารพืชน้อยลง และเพื่อลดการสูญเสียปุ๋ยเคมีที่ไต่ลงสู่ดินอันเนื่องมาจากกระบวนการชะล้าง หรือการตรึงธาตุอาหาร เป็นต้น ดังนั้นการพิจารณาประเภทปุ๋ยเคมี โดยใช้หลักเกณฑ์ความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชให้แก่พืชแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

2.2.5.1 ปุ๋ยละลายเร็ว

ปุ๋ยละลายเร็ว เป็นปุ๋ยที่มีสมบัติละลายน้ำได้ดี พืชสามารถดูดไปใช้ได้ทันที และในปริมาณไม่น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ หลังจากใส่ปุ๋ยลงดิน เช่น ปุ๋ยที่อยู่ในรูปปุ๋ยเม็ด สูตร 15-15-15 13-13-21 และ 12-24-12 เป็นต้น และปุ๋ยที่อยู่ในรูปปุ๋ยเกล็ด และปุ๋ยผง จะละลายน้ำได้ดี สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยทางใบฉีดพ่นแก่พืชได้ เช่น ปุ๋ยเกล็ดสูตร 16-20-0, 10-50-10 และ 10-20-30 เป็นต้น

2.2.5.2 ปุ๋ยกึ่งละลายช้าละลายเร็ว

ปุ๋ยกึ่งละลายช้าละลายเร็ว เป็นปุ๋ยที่มีเนื้อปุ๋ยบางส่วนละลายน้ำได้ดี และบางส่วนละลายน้ำได้ยาก เช่น ปุ๋ยฟอสเฟต ซึ่งมีสัดส่วนของเนื้อปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ดีมากกว่าปุ๋ยฟอสเฟตที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ยาก โดยมีการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตในรูปพอลิฟอสเฟตที่เกิดจากการใช้กรดอินทรีย์ เช่น กรดกำมะถัน ในปริมาณสมมูลที่เพียงพอสำหรับปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมไตรฟอสเฟตในหินฟอสเฟตแต่เพียงบางส่วน ปุ๋ยฟอสเฟตประเภทนี้จะมีหรือเรียกตามกรรมวิธีการผลิตว่า การเติมหินฟอสเฟตที่ผ่านการทำปฏิกิริยาเคมีกับกรดบางส่วน (Partial acidulation phosphate rock) มีสูตร 0-15-0

2.2.5.3 ปุ๋ยละลายช้า

ปุ๋ยละลายช้า เป็นปุ๋ยเคมีที่ละลายน้ำได้อย่างช้า และปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ เช่นกัน มีการแบ่งปุ๋ยละลายช้าออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) ปุ๋ยละลายช้าตามธรรมชาติ เป็นปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารพืชอย่างช้า ๆ ตามสมบัติของปุ๋ยนั้น ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดปุ๋ยและสมบัติของดิน เช่น ระดับความชื้นในดิน อุณหภูมิดิน ปฏิกริยาดินและจุลินทรีย์ในดิน ปุ๋ยละลายช้ามีหลายชนิด ดังนี้คือ

- ปุ๋ยยูเรียฟอร์ม (Urea form) เป็นปุ๋ยอินทรีย์สังเคราะห์ที่ประโยชน์ของธาตุ

อาหารที่พืชจากปุ๋ยขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ที่จะช่วยในการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปุ๋ยไอโซบิวทิลิดีน (Isobutylidene diurea) มีชื่อย่อว่า IBDU เป็นปุ๋ยอินทรีย์สังเคราะห์ที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างยูเรียกับสารไอโซบิวทิลอัลดีไฮด์ (Isobutyraldehyde) โดยมีไนโตรเจนประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

- ปุ๋ยผสมที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในรูปแบบแมกนีเซียม แอมโมเนียมฟอสเฟต (Magnesium ammonium phosphate) และมีชื่อทางการค้าว่า Mag-Amp มีสูตร 8-40-0-14 (Mg) หรือ Mag Amp with K 7-40-6-12 (Mg) ประโยชน์ของธาตุอาหารพืชที่ปลดปล่อยจากปุ๋ยขึ้นอยู่กับความละเอียดของเม็ดปุ๋ยและบทบาทของการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

- ปุ๋ยหินฟอสเฟต เป็นปุ๋ยเคมีสังเคราะห์ที่ละลายน้ำได้น้อยมาก โดยละลายได้ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ย ประโยชน์ของธาตุอาหารพืชจากปุ๋ยชนิดนี้ขึ้นกับระดับความเป็นกรดและขนาดของอนุภาคปุ๋ย

2) ปุ๋ยที่ผลิตโดยกรรมวิธีการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารพืช (Controlled released fertilizers, CRF) เป็นปุ๋ยเคมีที่ผ่านกรรมวิธีโดยการเคลือบเม็ดปุ๋ยด้วยสารเคลือบที่ไม่ละลายน้ำ หรือน้ำซึมผ่านเข้าไม่ได้โดยจะต้องรอให้สารเคลือบที่หุ้มเม็ดปุ๋ยนั้นอ่อนตัวหรือสลายตัวก่อน เม็ดปุ๋ยจึงสามารถละลายออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ สารที่ใช้ในการเคลือบมีหลายประเภท เช่น สารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปสารพอลิเมอร์ในกลุ่มเรซิน เม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารนี้เมื่อสัมผัสกับน้ำในดิน น้ำในดินจะค่อย ๆ ซึมผ่านเปลือกที่หุ้มเม็ดปุ๋ย และละลายปุ๋ยนั้นเป็นสารละลายของเกลือที่เข้มข้นภายในเปลือกที่หุ้มเม็ดปุ๋ยแต่ละเม็ดทำให้เกิดความดันออสโมซิส (Osmotic pressure) ขึ้นภายใน และมีผลทำให้เปลือกหรือสารเคลือบนั้นแตกร้าว เม็ดปุ๋ยค่อย ๆ ละลายออกสู่ดินอย่างต่อเนื่องและเป็นระยะเวลาาน ปุ๋ยเคมีประเภทนี้ ได้แก่ ปุ๋ยออสโมคอสสูตรต่าง ๆ นอกจากนี้สารเคลือบที่ใช้เคลือบเม็ดมีหลายชนิด เช่น ซิมีน กัมมะถัน และพอลิเอทิลีน เป็นต้น

กรรมวิธีการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชอีกวิธีหนึ่งคือการหยุดยั้งหรือชะลอการแปรรูปของไนโตรเจน โดยป้องกันมิให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งจะใช้สาร Nitrification inhibitor ได้แก่ N-Serve หรือ 2-chloro-6 (Trichloromethyl) Pyridine Dicyanoclamide, Cyanoquani-dine เป็นต้น วิธีการนี้เป็นการทำให้ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4\text{-N}$) ไม่ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนเตรต - ไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) ปุ๋ยนี้จะถูกดูดซึมไว้ที่คอลลอยด์ได้นานขึ้น ไม่ถูกชะล้างได้ง่าย [5]

2.2.5.4 ปุ๋ยเคลือบ (Coated fertilizers) [6]

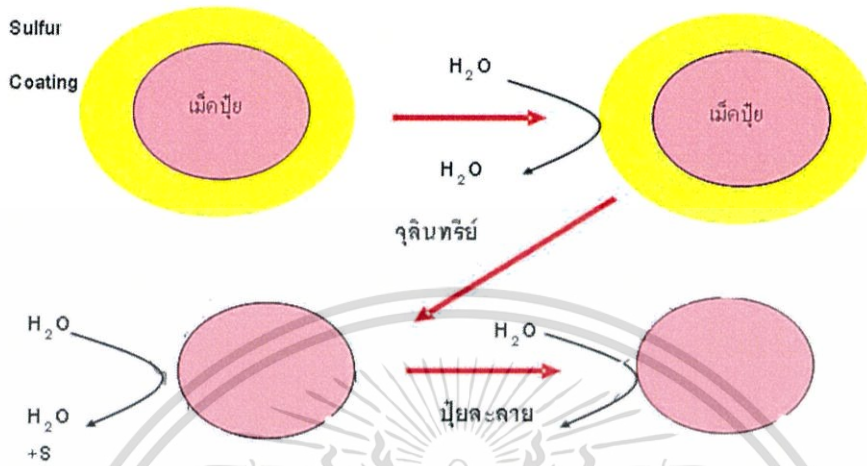
ปุ๋ยเคลือบ ปุ๋ยชนิดนี้สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้โดยมีลักษณะภายนอกถูกเคลือบด้วยสารไม่ชอบน้ำ

1) ยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน (Sulfur-coated urea หรือ SCU)

ปุ๋ยไนโตรเจนที่มีการเคลือบด้วยกำมะถัน เพื่อควบคุมการปลดปล่อย เมื่อสารซัลเฟอร์ที่เคลือบอยู่บนเม็ดปุ๋ยถูกทำลาย จะทำให้ยูเรียละลายและปลดปล่อยธาตุอาหารไนโตรเจนออกมา การสลายตัวของสารซัลเฟอร์ที่เคลือบอยู่บนเม็ดปุ๋ยยูเรีย เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสิ่งมีชีวิตกับปุ๋ยและทางกายภาพ (Physical breaking) ของเม็ดปุ๋ย วิธีเคลือบยูเรียชนิดเม็ดด้วยกำมะถันมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกนำเม็ดปุ๋ยมาทำให้ร้อน จากนั้นหลอมกำมะถันที่อุณหภูมิ 156°C แล้วพ่นไปเคลือบเม็ดปุ๋ยยูเรีย ปุ๋ยเคลือบชนิดนี้มีไนโตรเจนอยู่ 31–38%

การเคลือบด้วยกำมะถันเพียงอย่างเดียว ผิวน้ำที่เคลือบจะมีรูพรุนมากเกินไป ทำให้ควบคุมการละลายได้ไม่ดี จึงมีวิธีแก้ดังนี้ 1. ใช้ไขเป็นวัสดุอุดกันรั่ว (Wax sealant) เพื่อลดการซึมการน้ำไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

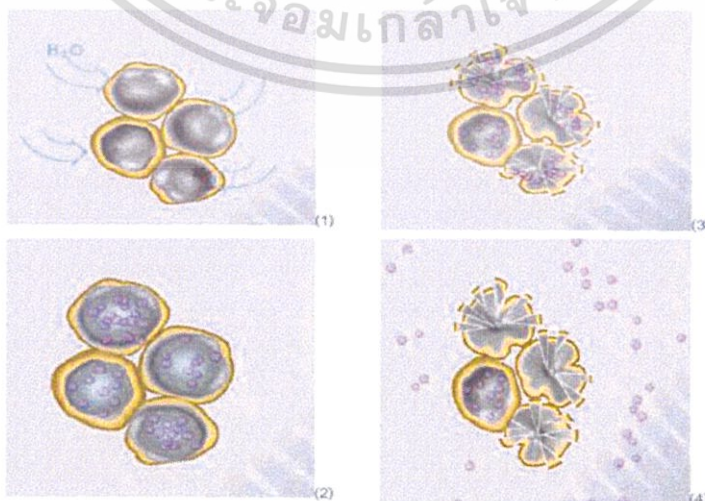
น้ำ 2. เพิ่มสารควบคุมการกระทำของจุลินทรีย์ (Microbiocide) เพื่อป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับกำมะถันเร็วเกินไป 3. เคลือบชั้นนอกสุดด้วยวัสดุปรับสภาพปุ๋ย (Conditioner) เช่น ดินเหนียวแอตตาปุลไกต์ (Attapulgite) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การสลายตัวของชั้นกำมะถันที่เคลือบบนเม็ดปุ๋ยก่อนที่จะมีการปลดปล่อย [6]

2) ยูเรียที่เคลือบด้วยกำมะถันและเคลือบหับด้วยพอลิเมอร์ (Polymer coating of SCU)

เนื่องจากยูเรียเคลือบด้วยกำมะถันเพียงอย่างเดียว ทำให้การควบคุมการปลดปล่อยยูเรียออกจากเม็ดปุ๋ยได้ไม่ดี จึงทำการปรับปรุงด้วยวิธีการเคลือบพอลิเมอร์อินทรีย์พวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน เพิ่มอีกชั้น เรียกว่า PSCU (Polymer coated SCU) ทำให้สมบัติด้านควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารดีกว่า SCU มากขึ้น นอกจากนี้ชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบหับ ยังสามารถเพิ่มความทนทานต่อการเสียดสี (Attrition-resistance) ระหว่างเม็ดปุ๋ยข้างเคียง (รูปที่ 2.2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
รูปที่ 2.2 การสลายตัวของชั้นกำมะถันและพอลิเมอร์ที่เคลือบบนเม็ดปุ๋ยยูเรีย [7]
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เคลือบผิวด้วยพอลิเมอร์ การเคลือบประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เคลือบด้วยพอลิเมอร์เทอร์โมเซต (Thermosetting polymer-coated fertilizers) โดยเรซินที่ใช้เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยมี 2 ชนิด คือ 1.อัลคิเดเรซิน (Alkyd resin) ที่เตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ระหว่างไดไซโคลเพนทาไดอิน (Dicyclopentadiene) กับกลีเซอรอลเอสเทอร์ (Glycerol ester) ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล จึงไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป และ 2.สารพอลิยูรีเทน (Polyurethane compound) จากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยานาต (Diisocyanate) กับแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลหลายหมู่หรือพอลิออล (Polyols) การเคลือบด้วยเรซินชนิดนี้ มีลักษณะพิเศษแตกต่างจากเรซินชนิดอื่น คือ พอลิไอโซไซยานาตสามารถทำปฏิกิริยากับผิวของเม็ดปุ๋ย สารเคลือบจึงติดแน่น ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการร่อนจากการขัดสีระหว่างเม็ดปุ๋ย ปุ๋ยที่นำมาใช้เคลือบจะเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ง่าย ปัจจัยในการเคลือบที่ส่งผลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารมี 2 ปัจจัย คือ การใช้เรซินที่มีองค์ประกอบต่างกัน ซึ่งเรซินแต่ละชนิดมีสมบัติในการยอมให้น้ำซึมผ่านไม่เท่ากัน และความหนาในการเคลือบที่ต่างกัน สำหรับปัจจัยภายนอกที่ควบคุมอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ย คือ อุณหภูมิ เช่น ถ้าอุณหภูมิสูง อัตราการปลดปล่อยจะสูงกว่าอุณหภูมิต่ำ ทำให้การปลดปล่อยธาตุอาหารในเขตอากาศร้อนจะเร็วกว่าในเขตอากาศหนาว ส่วนปัจจัยภายนอกอื่น ๆ เช่น การกระทำของจุลินทรีย์ดิน pH และความชื้นของดิน ไม่มีผลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร

- เคลือบด้วยพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic polymer-coated fertilizers) พอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ย คือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) โดยมีวิธีการเคลือบคือ นำพอลิเอทิลีนมาละลายในตัวทำละลายพวกคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปฉีดพ่นบนผิวเม็ดปุ๋ยในเครื่องที่ออกแบบโดยเฉพาะ สำหรับการควบคุมอัตราการปลดปล่อยของธาตุอาหาร ทำได้โดยการผสมในอัตราส่วนระหว่างพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นส่วนที่น้ำซึมผ่านได้ช้า กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) เป็นส่วนที่น้ำซึมผ่านได้เร็ว ซึ่งมีผลในการควบคุม Q_{10} ของการปลดปล่อยให้มีค่าระหว่าง 1.5–2.0 (Q_{10} คือการเปลี่ยนแปลงของอัตราการปลดปล่อยธาตุ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C) สามารถปรับอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนกับ เอทิลีนไวนิลอะซิเตต เพื่อให้ได้ปุ๋ยที่สามารถปลดปล่อยธาตุอาหารในอัตราเร็วที่ต่างกัน แล้วนำปุ๋ยเหล่านั้นมาผสมกันในสัดส่วนเพื่อให้ได้การปลดปล่อยตามที่ต้องการ สำหรับปุ๋ยยูเรียเคลือบด้วยพอลิโอเลฟิน (Polyolefin coated urea, POCU) นั้น มีตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพอลิเอทิลีน (PE) ต่อ EVA ในสารเคลือบกับการปลดปล่อยยูเรีย (จำนวนวันที่ยูเรียร้อยละ 80 ถูกปลดปล่อยออกมาจากเม็ดปุ๋ยที่อุณหภูมิ 25°C) แสดงดังตารางที่ 2.1

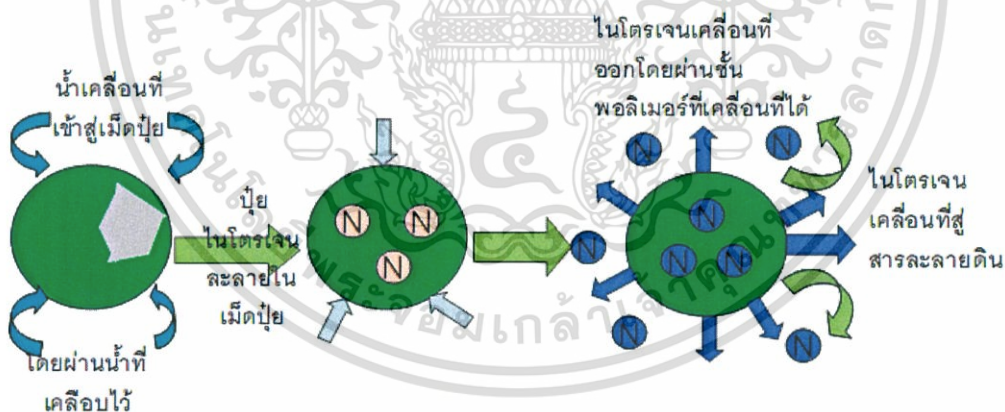
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการเคลือบปุ๋ยด้วยพอลิเมอร์ของ PE:EVA กับระยะเวลาในการปลดปล่อย [6]

% PE	% EVA	จำนวนวัน
50	50	98
60	40	135
65	35	187
70	30	260
80	20	330
90	10	410
100	0	1300

2.2.5.5 หลักการปลดปล่อยของยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน

โดยเริ่มจากเกิดรอยร้าวหรือรูเล็ก ๆ ของเม็ดปุ๋ย ซึ่งมีไซหรือพลาสติกกุดไว้ เมื่อผิวเคลือบถูกจุลินทรีย์ย่อย จะเกิดรูและน้ำซึมเข้าไปได้ สารละลายยูเรียจึงแพร่ออกมาทางรู โดยแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ

- ช่วงแรกเป็นช่วงที่มีการปลดปล่อยไนโตรเจนระดับคงที่ (Steady N release phase) เป็นช่วงที่ยังมียูเรียในสภาพเป็นของแข็ง จากนั้นยูเรียจะค่อย ๆ ละลายออกมา
- ช่วงหลังเป็นช่วงที่มีการปลดปล่อยในอัตราลดลง (Reduced-rate phase) อัตราการปลดปล่อยลดลง เนื่องจากยูเรียภายในสารเคลือบใกล้จะหมด



รูปที่ 2.3 กลไกการปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจนผ่านชั้นเคลือบ [8]

2.2.5.6 หลักการปลดปล่อยของปุ๋ยเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์

หลักการการปลดปล่อยของปุ๋ยเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์ มี 2 หลักการ คือ

- 1) หลักการที่หนึ่งเป็นหลักการแบบกลไกล้มเหลว จะเกิดกับปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารที่เปราะและไม่ค่อยยืดหยุ่น เช่น กำมะถัน หรือสารอนินทรีย์อื่น ๆ เป็นต้น มีการปลดปล่อยหลายระยะดังนี้ ระยะแรกมีการซึมของน้ำ (ส่วนมากเป็นไอน้ำ) ผ่านผิวเคลือบ หากความดันภายในเม็ดปุ๋ยสูงกว่าความต้านทานของวัสดุที่หุ้มเม็ดปุ๋ยอยู่ ผิวเคลือบจะแตกออก ทำให้ปุ๋ยทะลักออกมาทั้งหมดในทันที เรียกว่า “กลไกล้มเหลว (Failure mechanism)” แต่ถ้าผิวหุ้มเม็ดปุ๋ยยังทนต่อแรงดันภายในไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ ปุ๋ยถูกปลดปล่อยโดยการแพร่ เนื่องจากความเข้มข้นภายในสูงกว่าภายนอก ทำให้มีการปลดปล่อยปุ๋ยออกมา

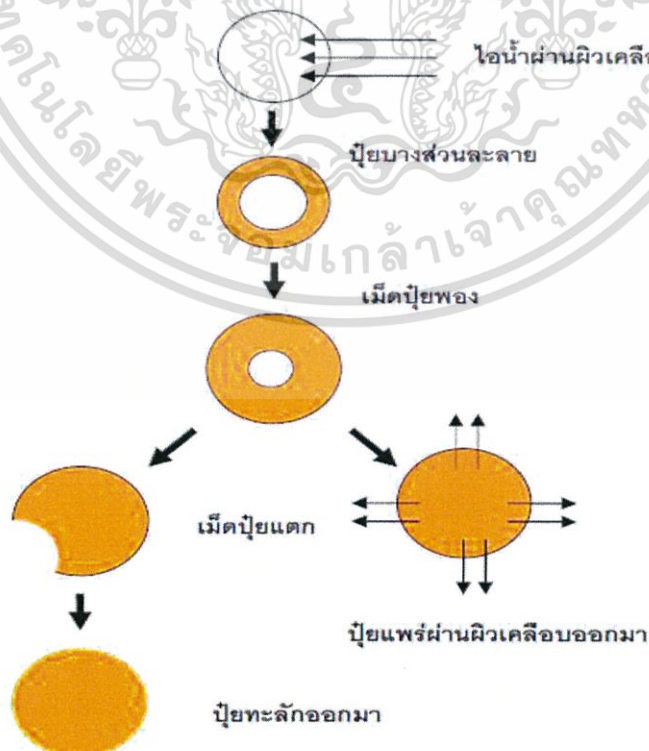
2) หลักการที่สองเป็นหลักการแบบการแพร่ จะเกิดกับปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ กลไกแบบการแพร่จะเป็นการปลดปล่อยออกมาทีละน้อย เช่น อัลคิลเรซินและพอลิโอะเลฟิน การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยเม็ดเคลือบด้วยพอลิเมอร์มี 3 ระยะ คือ

- ระยะแรกเกือบไม่มีการปลดปล่อยธาตุอาหาร (Lag period หรือ ช่วงนิ่ง)
- ระยะปลดปล่อยคงที่
- ระยะที่การปลดปล่อยลดลงทีละน้อย

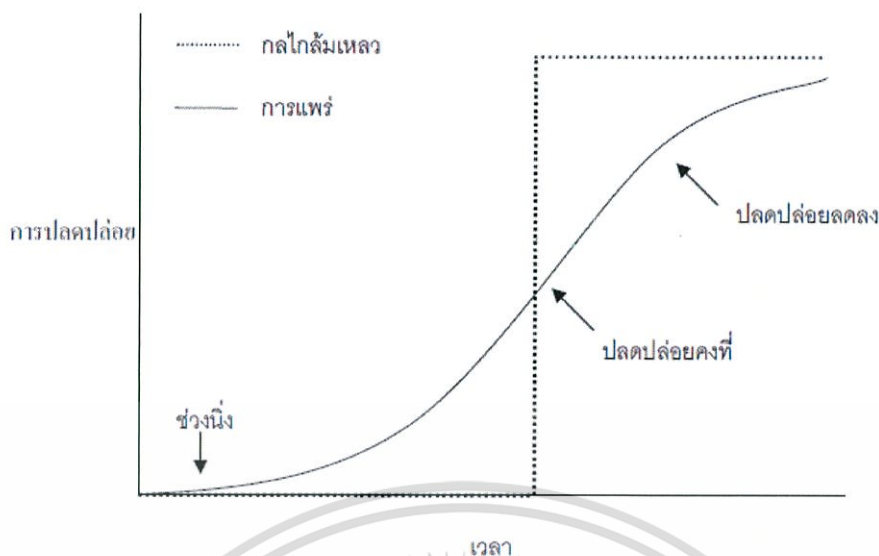
ระยะที่ 1 ช่วงนิ่ง ใอน้ำจะซึมเข้าไปในเม็ดปุ๋ยอย่างช้า ๆ ทำให้เริ่มเกิดการละลายของปุ๋ยในส่วนที่อยู่ใกล้ผิวเคลือบ ในช่วงนี้จะมีแรงดันที่เกิดจากความแตกต่างของความดันไอ (Vapor pressure) ระหว่างชั้นเคลือบกับผิวด้านนอก เมื่อไอน้ำไปอยู่ภายในชั้นผิวเคลือบ จะเข้าไปในช่องว่างสองส่วน คือ รูพรุนภายในเนื้อปุ๋ย และช่องว่างระหว่างผิวเคลือบกับปุ๋ย ทำให้แรงดันภายในสูงขึ้น เมื่อช่วงนิ่งสิ้นสุด สารละลายปุ๋ยจะเริ่มดันผนังด้านในของผิวเคลือบและเป็นจุดเริ่มต้นระยะที่สอง

ระยะที่ 2 ปลดปล่อยคงที่ เมื่อน้ำเข้ามาเต็มช่องว่างของปุ๋ยทั้งหมดแล้ว จะมีน้ำเข้าสู่ชั้นเม็ดปุ๋ย ทำให้เกิดแรงดันคงที่ ส่งผลให้ปุ๋ยจะถูกดันออกมาภายนอก อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารในช่วงนี้จึงคงที่

ระยะที่ 3 การปลดปล่อยลดลง เกิดเมื่อปุ๋ยภายในเม็ดได้ละลายหมดแล้ว ต่อจากนั้นแรงดันในการปลดปล่อยปุ๋ยจะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ ในช่วงท้ายจะมีปุ๋ยออกมาน้อยมากจนกระทั่งหมดไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.4 กลไกการปลดปล่อยปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ [6]
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการปลดปล่อยแบบสะสม (Accumulative release) ของธาตุอาหารจากปุ๋ยเม็ดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ [6]

2.2.5.7 การสูญเสียปุ๋ยเคมีไปจากดิน [5]

ประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยของพืชขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปุ๋ยเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ในดิน และเกิดการสูญเสียได้หลายทาง ดังนี้ คือ

1) การสูญเสียธาตุอาหารโดยการชะล้าง

น้ำไหลบ่าและการพังทลายของดิน ในดินเนื้อหยาบ ดินที่มีไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมสูง ดินมีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกต่ำ จะมีการสูญเสียธาตุอาหารเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในฤดูฝน ธาตุไนโตรเจนจะสูญเสียในรูปไนเตรตมาก เมื่อฝนตกหนักและน้ำไหลบ่าบนผิวดิน จะมีการสูญเสียปุ๋ยไนเตรตที่ละลายน้ำกับบางส่วนของดินที่ติดอยู่กับผิวคอลลอยด์ในดิน ไนเตรตเหล่านี้จะถูกชะล้างลงไปสะสมในแหล่งน้ำ ธาตุอาหารพืชที่มีการสูญเสียโดยการชะล้างรองลงมา ได้แก่ โพแทสเซียม ส่วนฟอสฟอรัสสูญเสียโดยการชะล้างน้อยที่สุด

สำหรับดินที่มีการชะล้างสูง ๆ จะมีวิธีการลดการสูญเสียไนโตรเจนและโพแทสเซียมโดยการชะล้างได้ โดยมีการแบ่งการใส่ปุ๋ยเป็นปุ๋ยแต่งหน้าเป็น 2 ครั้ง เพื่อที่จะให้พืชใช้ประโยชน์จากปุ๋ยได้ทันที และเหมาะสมต่อระยะการเจริญเติบโตของพืชและพืชสามารถดูดไปใช้อัตราที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยของพืชได้ดีกว่าการใส่ปุ๋ยทั้งหมดก่อนปลูก หรือการใช้ปุ๋ยที่มีขนาดเม็ดโตขึ้น ปุ๋ยละลายช้าหรือปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย ก็เป็นการช่วยลดการสูญเสียปุ๋ยโดยการชะล้างได้

การสูญเสียของไอออนประจุลบไปกับการชะล้างจะมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณน้ำฝนที่ดินได้รับ และสมบัติในการดูดซับไอออนประจุลบของดินนั้น เช่น ดินที่มีออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมสูง ถ้ามีระดับความเป็นกรดต่าง = 6 หรือต่ำกว่า จะดูดซับไนเตรตได้เพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไอออนประจุลบด้วยกันแล้ว ซัลเฟตจะดูดซับกับดินได้เหนียวแน่นกว่าไนเตรต ดินที่มีความเป็นกรดจะมีความสามารถดูดซับไอออนประจุลบได้มากขึ้น ขณะเดียวกันความเป็นกรดของดินจะช่วยชะลอกระบวนการทางชีวภาพ เช่น ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) จึงมีการสูญเสียไน-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การสูญเสียไนโตรเจนในรูปก๊าซ

การสูญเสียไนโตรเจนในรูปก๊าซจากดิน เกิดขึ้นโดยสองกระบวนการ คือ

- ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) เป็นการสูญเสียไนโตรเจนในสภาพที่ใช้ปุ๋ยในรูปไนเตรตในดินที่ขาดออกซิเจน ส่วนยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียมนั้น เมื่อถูกเปลี่ยนรูปในดินเป็นไนเตรต และดินนั้นอยู่ในสภาพที่มีน้ำขังหรือมีการขาดแคลนออกซิเจนในภายหลัง ก็จะมีสูญเสียโดยกระบวนการนี้เช่นกัน การพรวนดิน และระบายน้ำในดิน ทำให้มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอจะลดการสูญหายของปุ๋ยในลักษณะนี้ ดังนั้นการใช้ปุ๋ยในนาข้าวน้ำขังควรเลือกใช้ปุ๋ยเชิงเดี่ยวหรือเชิงประกอบที่มีไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมหรือยูเรีย จะลดการสูญเสียจากกระบวนการนี้ได้

- การระเหยของแอมโมเนียมจากปุ๋ย ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใส่ปุ๋ยยูเรียในดินที่เป็นกรดจนถึงค่า และปุ๋ยแอมโมเนียมในดินที่เป็นกลางถึงค่า เมื่อหว่านปุ๋ยทั้งสองประเภทนั้นบนผิวดิน ดังนั้นควรใส่ปุ๋ยโดยการพรวนกลบใต้ผิวดินประมาณ 5 เซนติเมตร จะลดการสูญหายไปได้มาก

ลักษณะดินที่ส่งเสริมให้เกิดการสูญเสียแอมโมเนียม จากปุ๋ยแอมโมเนียมและยูเรียมากขึ้น ได้แก่ ดินมีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกต่ำ ดินเนื้อหยาบ ดินเป็นด่าง และดินที่มีความชื้นในดินต่ำ

3) การตรึงฟอสฟอรัสในดิน การสูญเสียฟอสฟอรัสโดยการถูกตรึงจะเกี่ยวข้องกับอัตราปุ๋ยที่ใช้ ดังนั้นควรใส่ในปริมาณที่เพียงพอแก่พืช เช่น ใส่ในอัตราที่สูงในดินที่ตรึงฟอสฟอรัสมาก และใช้ในอัตราที่ต่ำลงในดินที่ตรึงปุ๋ยได้น้อย ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินก็มีผลต่อการตรึงฟอสเฟตในดิน เช่น เมื่อความเป็นกรดเป็นด่างของดินต่ำ ฟอสเฟตจะถูกตรึงโดยไอออนบวกที่ละลายได้ของ Al^{3+} และ Fe^{3+} และเมื่อระดับความเป็นกรดเป็นด่างสูงขึ้นจาก 6 จนถึง 8 จะถูกตรึงโดย Ca^{2+} , Mg^{2+} และ $CaCO_3$

วิธีการลดการตรึงปุ๋ยฟอสเฟตในดิน มี 6 วิธี คือ

- ใส่ครั้งเดียวเท่ากับความสามารถในการตรึงของดิน และควรพิจารณาถึงการใส่ปุ๋ยอัตราสูง ซึ่งอาจจะกระทบกระเทือนต่อสมดุลของธาตุอาหารอื่น

- โรยปุ๋ยที่ละลายได้ง่ายเป็นแถวแคบให้เพียงพอกับความต้องการพืชในแต่ละระยะการเจริญเติบโตและฤดูปลูก เพื่อลดการสัมผัสระหว่างปุ๋ยกับดิน ซึ่งจะทำให้การตรึงเกิดน้อยลงไป อัตราปุ๋ยที่ใช้ควรน้อยกว่าแบบหว่านทั่วแปลง แต่สำหรับดินที่มีระดับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำเกินไป การโรยเป็นแถวแคบอาจให้ผลน้อยกว่าการโรยเป็นแถวกว้างหรือบางส่วนหว่านทั่วแปลงแต่บางส่วนโรยเป็นแถวแคบ

- ใส่ปุ๋ยละลายช้าอย่างเดี่ยวหรือใส่ร่วมกับปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ง่าย

- ควรใช้ปุ๋ยที่มีขนาดเม็ดใหญ่ คือ ปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ง่ายควรผลิตเป็นเม็ดใหญ่

เนื่องจากปุ๋ยเม็ดจะทำปฏิกิริยากับดินช้า แม้ว่าหว่านทั่วแปลงก็พบว่าประมาณร้อยละ 2 ของปริมาณดินเท่านั้นที่สัมผัสกับปุ๋ย และถ้าใส่เป็นแถวแคบ จะลดการสัมผัสลงไปได้อีก

- ปรับระดับความเป็นกรดและด่าง (ความเป็นกรดเป็นด่าง) ของดินให้อยู่ระหว่าง 6 - 7

- เพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เพื่อให้ไอออนลบของอินทรีย์วัตถุตรึงแทนฟอสเฟตและกรดอินทรีย์จากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุจะทำปฏิกิริยากับ Al^{3+} และ Fe^{3+} จึงมีผลทำให้ลดการตรึงฟอสเฟตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การตรึงโพแทสเซียม

- แร่ดินเหนียวที่ตรึงโพแทสเซียมได้มาก คือ อิลไลต์ เวอร์คิวไลต์ และคลอไลต์ เนื่องจากแร่ดินเหนียวเหล่านี้มีประจุลบเกิดในแผ่นซิลิกา (Si-Sheet) ส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ และเคโอลิไนต์จะไม่ตรึงโพแทสเซียม

- การถ่ายเทอากาศในดินมีผลต่อการดูดโพแทสเซียมของรากพืช ในดินที่มีการถ่ายเทอากาศไม่ดี เนื่องจากดินชื้นเกินไปหรือดินแน่นทึบ รากพืชจะดูดธาตุนี้ได้บ้าง และการดูดโพแทสเซียมจะลดลงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของพืชชนิดเดียวกัน

2.3 ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติโครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย ส่วนที่ชอบน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำ เช่น หมู่ -OH, -COOH, -CONH₂, -CONH- และ -SO₃H เป็นต้น และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เช่น หมู่ -CH₂- และ -CH₃ เป็นต้น โดยระหว่างสายโซ่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่าง ๆ ในสายโซ่ ประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมากและเมื่อโมเลกุลมารวมตัวกันจะพันกันหรือขดตัวจึงทำให้โครงสร้างโดยรวมเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ๆ จำนวนมาก ทำให้ไฮโดรเจลมีสมบัติในการดูดซับน้ำ และของเหลวทางชีวภาพ และเนื่องจากคุณลักษณะเด่นของไฮโดรเจลที่สามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างที่เป็นโครงร่างตาข่าย ทำให้ไฮโดรเจลสามารถยืดตัวและพองตัวขึ้น แต่จะไม่ละลายน้ำ เพราะมีโครงสร้างเป็นแบบโครงร่างตาข่าย และเมื่อไฮโดรเจลมีการสูญเสียน้ำ จะเกิดการหดตัว [9]

จึงมีการนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ด้านสุขอนามัย นำมาผลิตเป็นผ้าอ้อมสำเร็จรูปและผ้าอนามัย ด้วยสมบัติเด่นของไฮโดรเจลที่ช่วยดูดซับพวกของเหลวไว้ได้นาน แต่ปล่อยน้ำออกมาได้ยาก เช่น ปัสสาวะ จึงทำให้ไม่เกิดการเปียกชื้น ด้านการแพทย์ จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ได้ค่อนข้างหลากหลาย เนื่องจากมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อหรือร่างกายของมนุษย์ (Biocompatibility) เช่น การนำมาทำคอนแทคเลนส์ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความชุ่มชื้นและลดการระคายเคืองแก่ดวงตา หรือใช้เป็นแผ่นปิดแผล ช่วยดูดซับของเหลว เช่น น้ำเหลือง เลือดที่ไหลออกมาจากแผล และสามารถให้แก๊สออกซิเจนแพร่ผ่านได้ ทำให้บริเวณที่เกิดแผลสามารถสร้างเนื้อเยื่อได้ดีกว่าปกติ และการใช้เป็นสารนำส่งยา (Drug delivery) ส่วนด้านการเกษตร นำมาประยุกต์เป็นวัสดุอุ้มน้ำ เพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นในดิน ทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่ขาดแคลนน้ำ โดยไฮโดรเจลจะค่อย ๆ ปล่อยน้ำที่ดูดซับไว้ออกมา นอกจากนี้ไฮโดรเจลยังช่วยป้องกันการสูญเสิแร่ธาตุในดิน เนื่องจากสามารถดูดซับแร่ธาตุต่าง ๆ ได้ แต่โดยส่วนใหญ่ไฮโดรเจลที่นำมาใช้ในด้านเกษตรนั้นเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์จากปิโตรเคมีซึ่งย่อยสลายได้ยาก

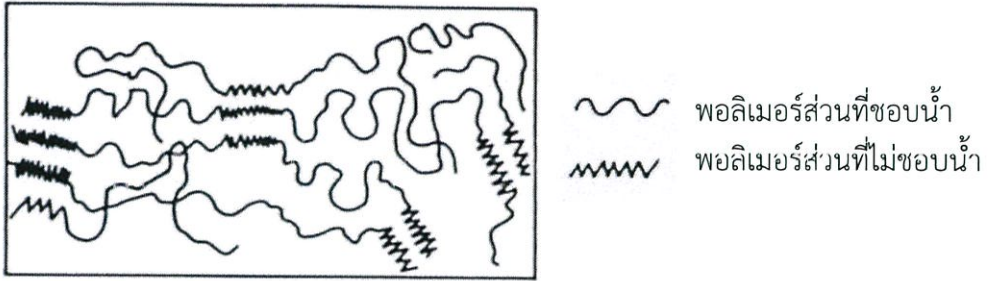
2.3.1 การจำแนกประเภท

2.3.1.1 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตามลักษณะการสังเคราะห์

1) ไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม และนำไปใช้เพื่อเคลือบผิวของวัสดุต่าง ๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้ มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำนั้นจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่าง ๆ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ [10]

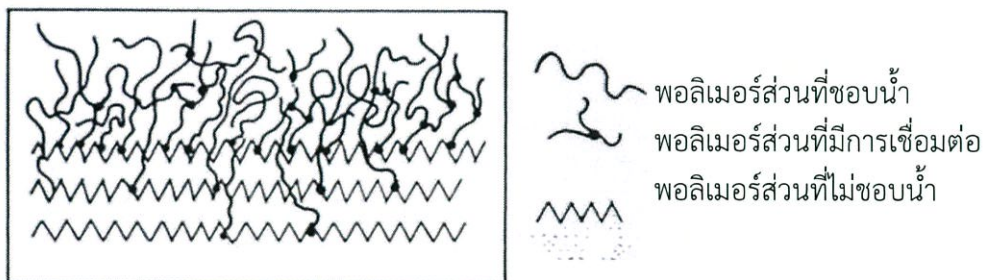
2) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสารละลายผสมของมอนอเมอร์ที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และตัวเชื่อมตอสายโซ่ (Crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วยและจากนั้นหลงไปในแม่พิมพ์ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย [10]

3) ไฮโดรเจลแบบกราฟต์บนพื้นผิว (Surface grafted polymer)

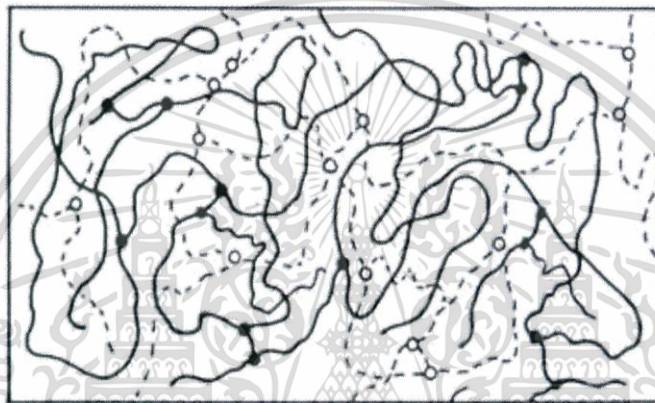
ไฮโดรเจลแบบกราฟต์บนพื้นผิวทำได้ โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ จึงสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการเพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานได้ เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นโดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.8 โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบกราฟต์บนพื้นผิว [10] ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (Interpenetrating polymer network, IPN)

ไฮโดรเจลแบบ IPN เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิด แทรกกันอยู่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้น หรือมีสมบัติอื่นที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลชนิดที่เป็นแบบกึ่งอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (semi-IPN) คือไฮโดรเจลที่มีพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายสอดแทรกกันอยู่ซึ่งทั้งสองเทคนิคเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่ง เพื่อให้ตรงต่อการประยุกต์ใช้งานในแต่ละแบบ ซึ่งโครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.9



พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่ชอบน้ำ)
 พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ)
 พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่เกิดการเชื่อมต่อ)
 พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่เกิดการเชื่อมต่อ)

รูปที่ 2.9 โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค [10]

2.3.1.2 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตามการเชื่อมโยงของโครงสร้าง

1) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical hydrogel)

ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก โดยในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่เกิดพันธะมักมีหมู่ฟังก์ชันอยู่หลายตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกได้อีกอย่างว่า “ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต” เนื่องจากไฮโดรเจลชนิดนี้มีความคงทนไม่หลอมเหลวและไม่ละลายในตัวทำละลาย นั่นคือจะไม่สามารถทำให้หลอมได้อีก หากให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออก จะเกิดการสลายตัวสมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูปตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่มีการเชื่อมโยงด้วยเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต เป็นต้น

2) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical hydrogel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรเจนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์หรือแรงระหว่างประจุ ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ โดยไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถเรียกได้อีกชื่อว่า “ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก” เนื่องจากสามารถหลอมได้เมื่อให้ความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง ซึ่งการให้ความร้อนจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิดทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายรวมทั้งการผสมสารอื่นลงในเจลด้วย เช่น สารต้านจุลินทรีย์ยา เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ (อะคริลามิเด-โค-เมทิลเมทาคริเลต-โค-ไวนิลเอมีน) (Poly (acrylamide-co-methacrylate-co-vinylamine)) เป็นต้น

2.3.2 วิธีเตรียมไฮโดรเจล [11]

วิธีการเตรียมไฮโดรเจลเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีสมบัติตามต้องการ และเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานที่เจาะจง โดยไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้หลายวิธีดังนี้

2.3.2.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslinking)

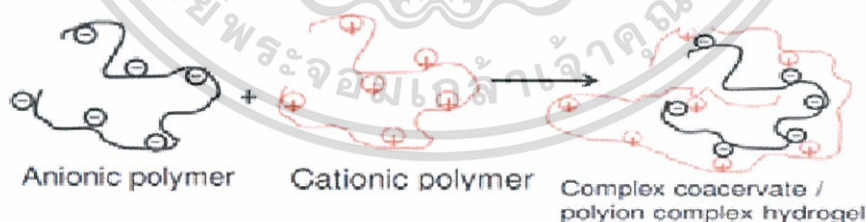
วิธีการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพนี้ เป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้สารเชื่อมขวางซึ่งช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพมีหลายวิธี ได้แก่

1) การเกิดอันตรกิริยาแบบไอออนิก (Ionic interaction)

การเตรียมไฮโดรเจลวิธีนี้เป็นการเกิดอันตรกิริยาแบบไอออนิกระหว่างหมู่ฟังก์ชันภายในสายโซ่ของไฮโดรเจล เช่น การเตรียมไฮโดรเจลโดยการเติม CaCl_2 ลงใน polymannuronate ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน COO^- จึงทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนบวกและหมู่ฟังก์ชันที่เป็นแอนไอออนิกและเกิดเป็นไฮโดรเจลที่มีลักษณะเป็นไอออนิกพอลิเมอร์

2) การเกิดโคอะเซอร์เวชันเชิงซ้อน (Complex coacervation)

การเตรียมไฮโดรเจลวิธีนี้ ทำได้โดยนำพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามกัน เป็นการนำพอลิเมอร์ที่เป็นแอนไอออนิกมาเชื่อมขวางกับพอลิเมอร์ที่เป็นแคตไอออนิก แสดงดังรูปที่ 2.10

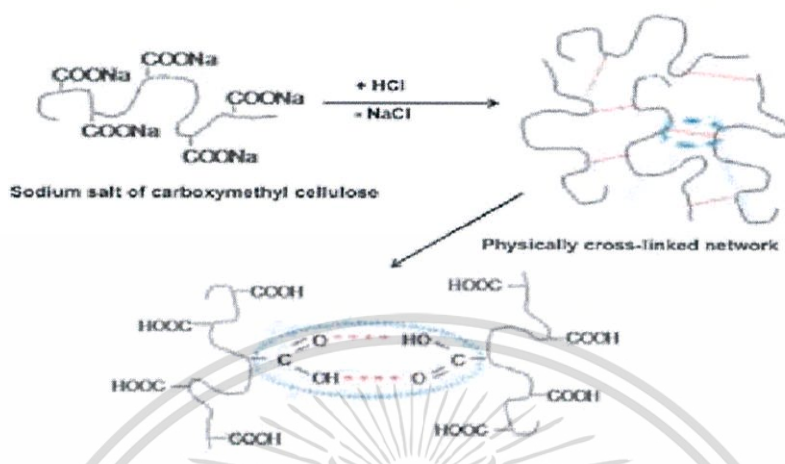


รูปที่ 2.10 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธี Complex coacervation [12]

3) การสร้างพันธะไฮโดรเจน (H-bonding)

การเตรียมไฮโดรเจลจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล เช่น การเตรียมไฮโดรเจลชนิด คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose) โดยการเชื่อมขวางโมเลกุลของ Poly(carboxymethyl cellulose) ด้วยการลดค่าพีเอชของสารละลายพอลิเมอร์ เพื่อให้สารละลายมีความเป็นกรด และเกิดการถ่ายโอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) จากนั้นโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกด้วยกันเองจนเกิดการเชื่อมขวางและเกิดเป็นเจลในที่สุด



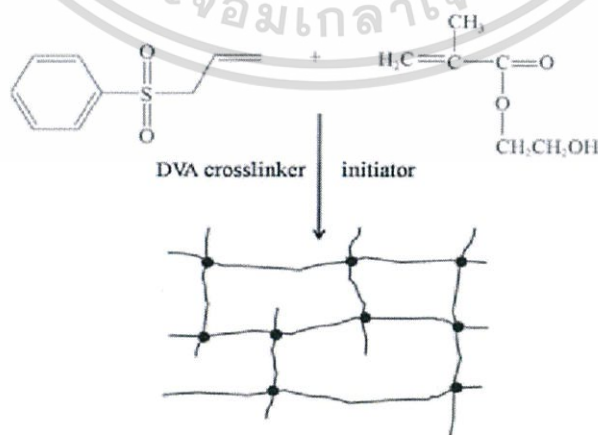
รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด Carboxymethylcellulose [13]

2.3.2.2 การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking)

การเตรียมด้วยวิธีนี้ต้องอาศัยการเติมสารเชื่อมขวางเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์สองสายโซ่เข้าด้วยกันทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย ซึ่งเป็นการเชื่อมขวางทางเคมีโดยจะเชื่อมโยงมอนอเมอร์ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยอาศัยวิธีการเชื่อมขวางทางเคมี 2 แบบ ดังนี้

1) การเติมสารเชื่อมขวาง (Chemical crosslinkers)

วิธีการเตรียมไฮโดรเจลโดยการเติมสารเชื่อมขวาง และอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้ดังรูปที่ 2.12



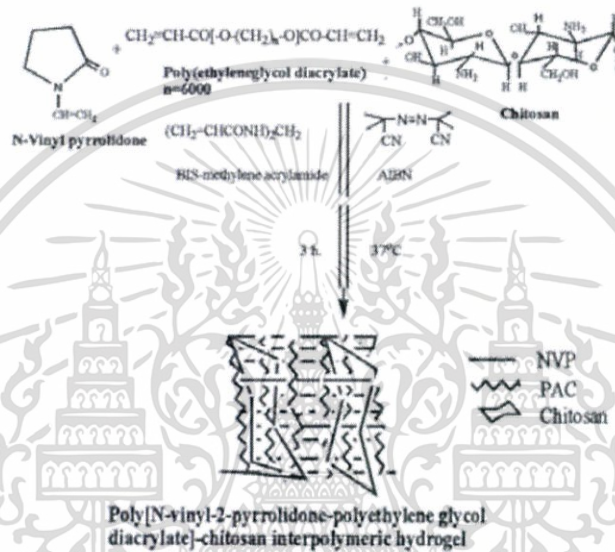
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเติมสารเชื่อมขวาง [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การกราฟต์ (Grafting)

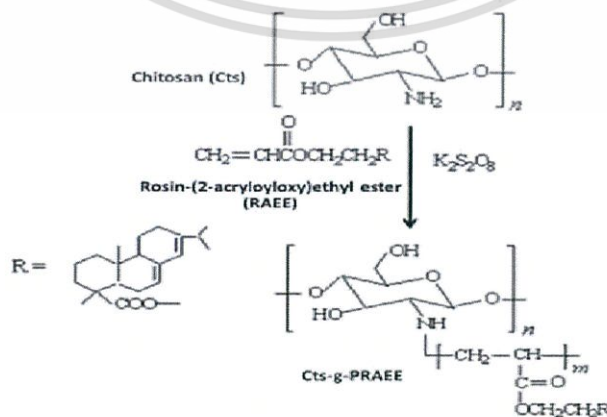
วิธีการเตรียมไฮโดรเจลโดยใช้สารเชื่อมขวางหรือรังสีความร้อนช่วยให้เกิดตำแหน่งว่องไว (Active site) ขึ้นมา จากนั้นมอนอเมอร์จะเข้าไปกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์อีกชนิดบนสายโซ่พอลิเมอร์ จึงเกิดการเชื่อมไขว้กันภายในสายโซ่ ซึ่งการทำให้เกิดการกราฟต์ของมอนอเมอร์บนสายโซ่พอลิเมอร์สามารถทำได้ 2 วิธีดังนี้

- การกราฟต์โดยใช้สารเคมี (Chemical grafting) เป็นวิธีเตรียมไฮโดรเจลโดยใช้สารเคมีเชื่อมขวางทำให้เกิด active sites แล้วเติมมอนอเมอร์เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิเมอร์



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธี Chemical grafting [15]

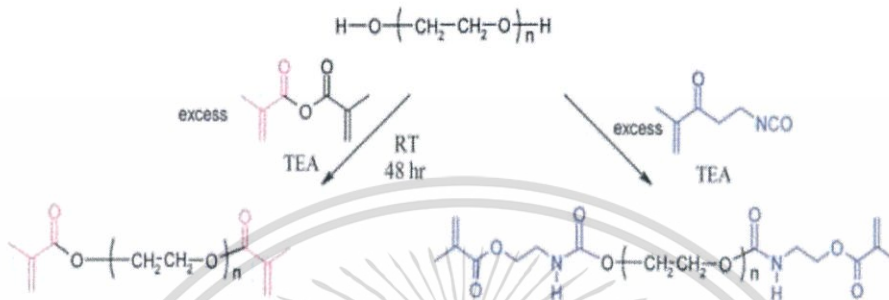
- การกราฟต์โดยการฉายรังสี (Radiation grafting) เป็นการเตรียมไฮโดรเจลกราฟต์พอลิเมอร์โดยการทำให้เกิด Active site ด้วยการฉายรังสีความร้อนที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมาไมโครเวฟ และลำแสงอิเล็กตรอน เป็นต้น แล้วจึงเติมมอนอเมอร์เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิเมอร์



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธี Radiation grafting [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในวงจำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

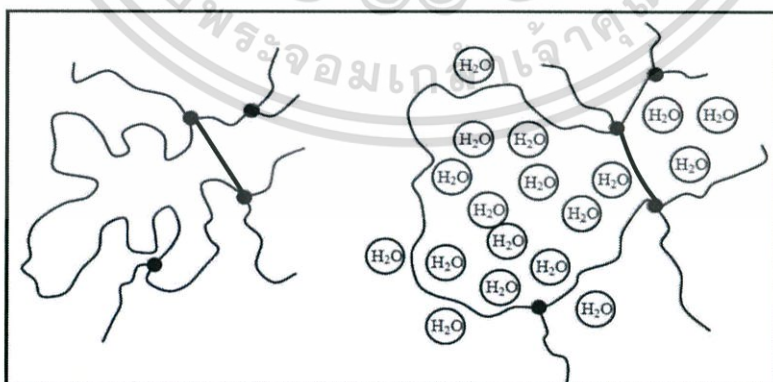
การเตรียมไฮโดรเจลโดยการฉายรังสีเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมต่อนของมอนอเมอร์ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์ ซึ่งเชื่อว่าการเตรียมไฮโดรเจลวิธีนี้ โครงร่างตาข่ายที่เกิดขึ้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติทั้งด้านโครงสร้างและสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยส่วนมากแล้ววิธีนี้นิยมเตรียมเป็นสารละลายแบบชั้นตอนเดียว ซึ่งทำให้ลดขั้นตอนการสังเคราะห์ สะดวกรวดเร็วและยังช่วยลดต้นทุนในการผลิต



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธี Radiation crosslinking [17]

2.3.3 สมบัติของไฮโดรเจล

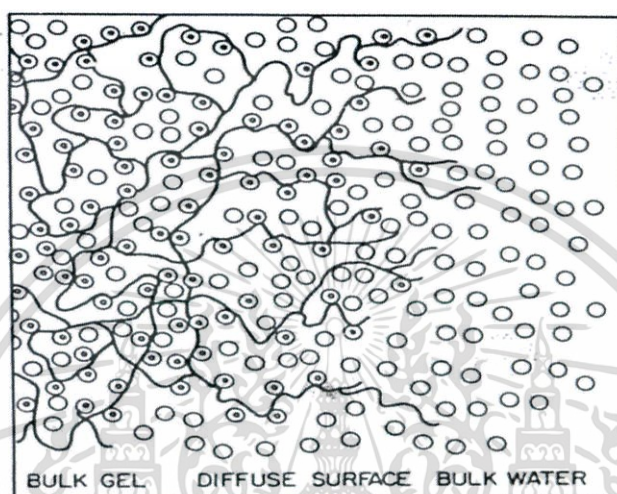
สมบัติเด่นของไฮโดรเจลคือความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างที่เป็นโครงร่างตาข่ายแล้วเกิดการพองตัวขึ้น เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำโมเลกุลของน้ำสามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่ในรูพรุนภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลนั้นได้ และเนื่องจากแรงดันออสโมติกทำให้โมเลกุลน้ำบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ แล้วผลักดันให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวและพองตัวขึ้น แม้ว่าไฮโดรเจลจะขยายตัวเต็มที่ก็จะไม่แยกขาดออกจากกัน เนื่องจากภายในประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัดและยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์โดยมีตัวเชื่อมต่อนสายโซ่ (Crosslinker) เป็นตัวช่วยยึดระหว่างสายพอลิเมอร์



รูปที่ 2.16 การพองตัวของไฮโดรเจลเมื่อโมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปภายในโครงสร้าง [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในไฮโดรเจลมี 2 ลักษณะ คือ โมเลกุลน้ำอิสระ (Free water) ซึ่งเป็นโมเลกุลน้ำที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระระเหยได้ง่าย มีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจลไม่มากนักและโมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่ (Bound water) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ยากกว่า ซึ่งปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในไฮโดรเจลขณะที่ไฮโดรเจล พองตัวเต็มที่แล้วเรียกว่า “ปริมาณน้ำสมดุล” (Equilibrium water content, EWC)



 สายโซ่พอลิเมอร์
 โมเลกุลน้ำโมเลกุลอิสระ (Free water)
 โมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่ในไฮโดรเจล (Bound water)

รูปที่ 2.17 อันตรกิริยาของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล [18]

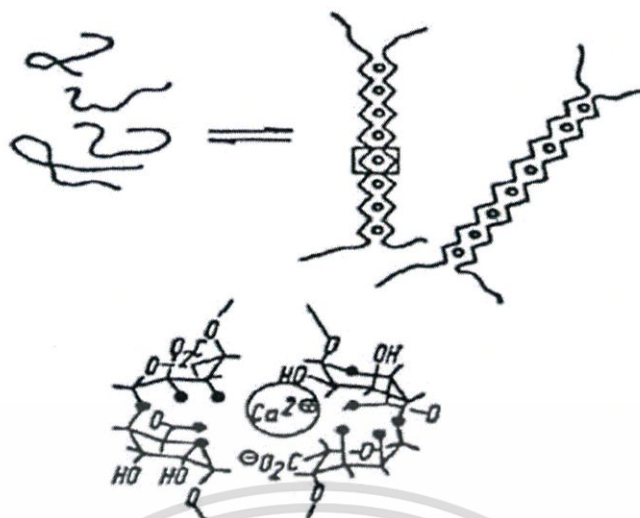
2.4 กัมธรรมชาติ [22]

กัม (Gum) จากแหล่งธรรมชาติเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์และอนุพันธ์ของพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนใหญ่ได้จากพืช สามารถละลายได้ในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อนโดยสารละลายที่ได้มีความหนืดสูง แม้ว่าความเข้มข้นของกัมจะน้อยก็ตาม ดังนั้นจึงมีการนำกัมจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมประเภทอาหารโดยใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดหรือสารข้น สารช่วยให้เกิดเป็นเจล อิมัลซิไฟเออร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตเป็นกาวได้

กัมธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามแหล่งที่มา [21] ได้แก่

1. กัมจากสาหร่ายทะเล (Seaweed extracts)
2. กัมจากพืช (Plant extracts gums)
 - 2.1 กัมจากเมล็ดของพืช (Plant seed gums) เช่น กัวร์กัม (Guar gum)
 - 2.2 กัมจากยางไม้ (Plant exuded gums) เช่น กัมอาราบิก (Gum arabic)
 - 2.3 กัมจากเนื้อเยื่อพืช (Plant tissue) เช่น เพคติน (Pectin)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 กลไกการเกิดเจลของ Calcium alginate (Egg-box model) [30]

อัลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 โดยเติมในอาหารกระป๋อง บางชนิด ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว ทำให้อิมัลชันคงตัว สารทำให้เกิดเจล และสารยับยั้งการเกิด Syneresis ตัวอย่างเช่น

- Propylene glycol alginate ใช้ในน้ำสลัด (Salad dressing) และเบียร์ เพราะสามารถละลายได้ดีที่ค่า pH ต่ำ
- โซเดียมอัลจิเนตใช้เป็นส่วนผสมในไส้พายมะนาวที่แช่เย็นเพื่อให้เกิดความคงตัวระหว่างกระบวนการ freeze-thaw
- ใช้เคลือบผิวชิ้นเนื้อปลาก่อนนำไปแช่เยือกแข็งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด Freeze burn กับชิ้นเนื้อปลา
- ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม, Frozen dessert, Sherbet, Processed cheese และใช้เป็น Alginate gel restructured products เช่น Onion rings และ Shrimp-like fish products

นอกจากนี้ยังมีการนำอัลจิเนตไปใช้ในทางเภสัชกรรมคือการเตรียมไมโครแคปซูลจากเกลื่อแคลเซียมอัลจิเนต ไมโครแคปซูลที่ได้สามารถใช้ในการนำส่งยาโปรตีนและเปปไทด์ (เช่น อินซูลินและแคลซิโตนิน) รูปแบบรับประทาน โดยอัลจิเนตในรูปเกลื่อสามารถปกป้องยาโปรตีนจากการสลายตัว ในสภาวะกรดในกระเพาะอาหารได้เนื่องจากอัลจิเนตในรูปเกลื่อไม่ละลายในสภาวะกรด อีกทั้งยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยยา ในลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ได้ และยังสามารถนำอัลจิเนตมาใช้เป็นวัสดุในการรักษาแผล ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแผ่นเจลที่ได้จากอัลจิเนตสามารถ ช่วยดูดซับสารคัดหลั่งที่มาจากบาดแผล อีกทั้งยังช่วยลดการติดเชื้อแบคทีเรียของแผลได้ มีรายงานการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าการใช้เกลื่อ อัลจิเนตของแคลเซียมและสังกะสีเป็นวัสดุห้ามเลือดในแผลลึก สามารถเพิ่มการแข็งตัวของเลือดได้มากกว่าวัสดุห้ามเลือดที่ไม่มีอัลจิเนต

2.5 ระบบเชื่อมโยง

2.5.1 การเชื่อมโยงด้วยประจุ

พอลิแซคคาไรด์ในกลุ่มกัมมธรรมชาติมีหลายชนิดที่มีหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งสามารถเชื่อมโยงทางประจุด้วยพันธะไอออนิกได้ โดยการใช้สารเชื่อมโยงแบบโมโนวาเลนต์ เช่น Ag^+ โดยมีการเกิดโคออร์ดิเนชันร่วม [40], การใช้สารเชื่อมโยงแบบไดวาเลนต์ เช่น Ca^{2+} หรือการใช้สารเชื่อมโยงแบบไตรวาเลนต์ เช่น Fe^{3+} [43]

2.5.1.1 การเชื่อมโยงประจุแบบโมโนวาเลนต์

การเชื่อมโยงประจุแบบโมโนวาเลนต์สามารถใช้ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate, AgNO_3) เป็นสารก่อกพันธะเชื่อมโยงได้ มีงานวิจัยเกี่ยวกับการเติมซิลเวอร์ไอออนลงในพอลิเอมิกแอซิด (Poly (amic acid)) โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ได้เป็นซิลเวอร์คาร์บอกซิเลต

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พบว่าซิลเวอร์ไนเตรตสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโคโตซานได้ในสถานะที่ไม่รุนแรงเช่น ที่อุณหภูมิห้อง และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้น โดยซิลเวอร์ไอออนจะเกิดโคออร์ดิเนชันกับคู่อิเล็กตรอน (Electron pair) ที่ตำแหน่งไนโตรเจนของหมู่เอมีนในโครงสร้างของโคโตซาน

2.5.1.2 การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์

การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์สามารถใช้แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2) เป็นสารก่อกพันธะเชื่อมโยงได้ ซึ่งแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารละลายที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ จึงนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแซนแทนกัมและ Divalent cation เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} โดยจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอกซิเลตของไพรูเวต Bajpai และ Sharma [20] ได้เตรียมไฮโดรเจลโดยการเติม CaCl_2 ลงใน Polymannuronate ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอนไอออนิก คือ COO^- ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนบวกและหมู่ฟังก์ชันที่เป็นแอนไอออนิกแล้วเกิดการเชื่อมโยงเป็นไฮโดรเจลที่มีลักษณะเป็นไอออนิกพอลิเมอร์ [47]

2.5.1.3 การเชื่อมโยงประจุแบบไตรวาเลนต์

การเชื่อมโยงประจุแบบไตรวาเลนต์สามารถใช้เฟอร์ริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) เป็นสารก่อกพันธะเชื่อมโยงได้ โดยการเชื่อมโยงจะเกิดผ่านหมู่คาร์บอกซิลิกของอัลจินเนต ไอออนของเหล็ก (Fe^{3+}) เกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับหมู่คาร์บอกซิลิกบนสายโซ่หลักของอัลจินเนตหลายหมู่ ทำให้สายโซ่ของอัลจินเนตเกิดการเชื่อมโยงกันเอง หรือเกิดการเชื่อมโยงกับสายโซ่อื่นเกิดเป็นเจลขึ้นได้

2.5.2 แคลเซียมคลอไรด์

แคลเซียมคลอไรด์ มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ใช้มากในงานอุตสาหกรรมทั่วไป อุตสาหกรรมอาหาร และ อุตสาหกรรมการเกษตร เป็นสารที่ดูดซับความชื้น และละลายได้ดีในน้ำ เมื่อละลายน้ำจะเกิดกรดไฮโดรคลอริก และเกิดแคลเซียมประจุบวก มักใช้ในรูป $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [37]

2.5.2.1 ลักษณะจำเพาะ

- สถานะ : ของแข็ง สีขาวเงิน
- จุดหลอมเหลว : 851°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความร้อนในการหลอมเหลว : 2.23 kcal/mol
- จุดเดือด : 1,482°C
- ความร้อนในการกลายเป็นไอ : 36.7kcal/mol ที่ 1,482°C
- ความหนาแน่น : 1.54 g/cc ที่ 20°C
- ความร้อนเมื่อเผาไหม้ : 151.9 cal/g
- ละลายได้ดีในน้ำได้กรดไฮโดรคลอริก



2.5.2.2 ประโยชน์แคลเซียมคลอไรด์

- งานเทคนิคกรีนนิยมนิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเร่งการแข็งตัว และเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้น ๆ

- สารละลายแคลเซียมคลอไรด์นิยมนิยมใช้รักษา และยืดอายุ ผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้หลายชนิด โดยการฉีดพ่นสารละลายทั้งก่อน และหลังการเก็บเกี่ยว หรือจุ่มผลผลิตในสารละลายโดยตรง

- ในอุตสาหกรรมบางชนิด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์สำหรับดูดซับความชื้นหรือดูดซับน้ำออกจากตัวทำละลาย

- ในอุตสาหกรรมอาหารผลไม้กระป๋อง นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเพิ่มความกรอบให้แก่ผลไม้

- ในอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เพิ่มความนุ่มของผลิตภัณฑ์เนื้อต่างๆ เช่น เนื้อโค เนื้อไก่ เป็นต้น

- ในอุตสาหกรรมบางชนิด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์ สำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร

- ในอุตสาหกรรมอาหารบางชนิด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเพิ่มรสชาติและสกัดโปรตีนออกจากเนื้อ เช่น การผลิตไส้กรอก การผลิตเนื้อหมัก

2.5.2.3 ความเป็นพิษของแคลเซียมคลอไรด์

- สามารถกัดกร่อนโลหะให้เกิดสนิม หากใช้ในงานเทคนิคกรีนมักทำให้คอนกรีตมีการหดตัว และคอนกรีตมีความต้านทานซัลเฟตลดลง

- สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด (กรดไฮโดรคลอริก) ทำให้เกิดการระคายเคืองเมื่อสัมผัส ทั้งบริเวณผิวหนัง และตา หากสัมผัสกับสารละลายที่มีความเข้มข้นมากจะทำให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรงทำให้เนื้อเยื่อบริเวณนั้นตายได้

- การใช้แคลเซียมคลอไรด์ในผลิตภัณฑ์ผัก ผลไม้ และอาหารทุกชนิด อาจมีการตกค้างของคลอรีนทำให้เกิดความเป็นพิษได้ นอกจากนี้ ผลของการตกค้างของคลอรีนมักทำให้อาหารมีกลิ่นไม่น่ารับประทาน และมีรสขม

2.5.2.4 ข้อควรระวังในการใช้

- ขณะใช้ต้องสวมผ้าปิดจมูก แว่นตากันสารเคมี สวมเสื้อผ้า รองเท้าบูท สวมถุงมือ และอุปกรณ์ป้องกันสารเคมีอื่น ๆ ทุกครั้ง

- เมื่อละลายน้ำไม่ควรสูดดม เพราะจะได้รับไอระเหยของคลอรีนได้ง่าย

- ระวังการสัมผัสกับโลหะทุกชนิด เพราะจะเกิดการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภูษิต จันทาวุฒิ (2558) ศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยสารอโรโพสเฟตในรูปของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ของไฮโดรเจลจากอัลจินเตต/กัวร์กัม โดยมีอัตราส่วนของอัลจินเตตต่อกัวร์กัมเป็น 60:40 โดยน้ำหนัก และใช้โซเดียมเททระโบเรตและแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมโยง โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมเททระโบเรตที่ 0, 0.2, 0.6 และ 1.0 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ที่ 0, 0.01 และ 0.05 M จากนั้นเตรียมเจลปุ๋ยอัดเม็ดโดยนำไฮโดรเจลที่บรรจุสารอโรโพสเฟตมาอัดเม็ด จากนั้นเคลือบน้ำมันทั้ง โดยใช้อัตราส่วนของน้ำมันทั้งต่อน้ำที่ 100:0 และ 50:50 โดยน้ำหนัก แล้วให้ความร้อนกับเจลปุ๋ยอัดเม็ดที่เคลือบน้ำมันทั้งเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเชื่อมโยงเป็นอุณหภูมิห้อง, 60°C และ 80°C จากนั้นศึกษาพฤติกรรมของการปลดปล่อยสารอโรโพสเฟตจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดด้วยวิธี Ascorbic acid โดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ผลการศึกษาพบว่าสารอโรโพสเฟตปลดปล่อยออกมาจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดช้าลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง อัตราส่วนของน้ำมันทั้งต่อน้ำ และอุณหภูมิเชื่อมโยง และพบว่าพฤติกรรมการปลดปล่อยสารอโรโพสเฟตของเจลปุ๋ยอัดเม็ดที่เคลือบน้ำมันทั้งช้าในช่วงเริ่มต้นเนื่องจากผลของการเคลือบน้ำมันทั้งซึ่งเกิดเป็นฟิล์มที่ต้านทานน้ำคลุมพื้นผิว และปลดปล่อยอย่างคงที่ในเวลาต่อมาเนื่องจากผลของสารเชื่อมโยง นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังมีการศึกษาพฤติกรรมบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ดอีกด้วย โดยผลการทดลองพบว่าการบวมตัวสูงสุดของเจลปุ๋ยอัดเม็ดทุกสูตรอยู่ในช่วง 2.9 ถึง 8.7 เท่า [3]

ปรนันท์ ปาริชาติวุฒิกุล และคณะ (2559) ศึกษาการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารซึ่งเตรียมจากโซเดียมอัลจินเตตความเข้มข้น $7.0\% \text{w/v}$ ผสมกับโพแทสเซียมไนเตรตแล้วขึ้นรูปเป็นเม็ดปิด จากนั้นเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ และ 4 โมลาร์ เป็นเวลา 5 หรือ 15 นาที ซึ่งเป็นการเตรียมเม็ดปิดพร้อมบรรจุสารโพแทสเซียมไนเตรตในขั้นตอนเดียว แต่เม็ดปิดที่เตรียมได้มีการหน่วงการปลดปล่อยที่ต่ำ จึงนำมาปรับปรุงโดยทำการเชื่อมโยงสองขั้นตอนด้วยการเคลือบผิวด้วยโซเดียมอัลจินเตตความเข้มข้น $7.0\% \text{w/v}$ กับแคลเซียมคลอไรด์ 4 โมลาร์, การเคลือบผิวด้วยเพอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 30 วินาที และ 1 นาที หรือการเคลือบผิวด้วยไคโตซานความเข้มข้น $1.0\% \text{w/v}$ ภาพตัดขวางของเม็ดปิดชุดสูตร ACaX-ACa4/5 และชุดสูตร ACaX-C พบว่ามีลักษณะเป็น Core-Shell จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตและศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร พบว่าเม็ดปิดสูตร ACa4/5 มีประสิทธิภาพในการกักเก็บที่มากที่สุดคือ 98% และเม็ดปิดที่ปรับปรุงด้วยการเคลือบอัลจินเตตมีการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรตที่เป็นแบบเชิงเส้นในช่วงต้น เมื่อพิจารณาผลของประสิทธิภาพการกักเก็บและพฤติกรรมการปลดปล่อย พบว่าสูตร ACa4/5-ACa4/5 และ สูตร ACa4/15-ACa4/5 เหมาะแก่การนำไปทำเม็ดปิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร [23]

นลินา ประไพรัชสิทธิ์ และคณะ (2550) ศึกษาองค์ประกอบที่เหมาะสมในการเตรียมเม็ดจากสูตรผสมของอัลจินเตตและไคโตซานสำหรับปลดปล่อยยาอะม็อกซิซิลลิน ภายใต้สภาวะเลียนแบบกระเพาะอาหาร (pH 1.2 อุณหภูมิ 37°C) โดยเตรียมเม็ดปิดอัลจินเตต-ไคโตซาน 3 สูตรผสม คือ ปิดอัลจินเตต - 0.25% ไคโตซาน ปิดอัลจินเตต - 0.5% ไคโตซานและปิดอัลจินเตต - 1% ไคโตซาน แล้วนำมาทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่าปิดทั้ง 3 สูตรผสมมีประสิทธิภาพการกักเก็บยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่า 98% บีดมีการบวมตัวเล็กน้อย การบวมตัวของบีดทั้ง 3 สูตรผสมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและบีดไม่มีการแตกเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนักที่ 10 บีดอัลจินต - 0.25% โคโตซานปลดปล่อยยาได้ $80.51 \pm 3.40\%$ บีดอัลจินต - 0.5% โคโตซานปลดปล่อยยาได้ $73.79 \pm 2.10\%$ และบีดอัลจินต $\pm 1\%$ โคโตซานปลดปล่อยยาได้ $89.49 \pm 1.71\%$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบีดอัลจินต - 0.5% โคโตซานสามารถหน่วงการปลดปล่อยยาได้ดีที่สุด ส่วนประสิทธิภาพในการยึดเกาะเยื่อเมือกพบว่าเปอร์เซ็นต์ที่บีดอัลจินต - 0.25% โคโตซานสามารถยึดเกาะเยื่อเมือกมีค่าเท่ากับ $74.33 \pm 5.0\%$, บีดอัลจินต - 0.5% โคโตซานมีค่าเท่ากับ $80.33 \pm 2.2\%$ และบีดอัลจินต - 1% โคโตซานมีค่าเท่ากับ $82.33 \pm 1.5\%$ ดังนั้นเมื่อพิจารณาคุณสมบัติในด้านต่างๆ ประกอบกับสรุปได้ว่าบีดอัลจินต - โคโตซาน 0.25% มีสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นระบบนำส่งยาอะม็อกซิซิลลินเพื่อใช้ในการรักษาโรคแผลในกระเพาะอาหาร [24]

เฉลิมขวัญ เวชสกุล และคณะ (2555) ศึกษาการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจินตและกัวร์กัม โดยมีโซเดียมเทระบอเรต ความเข้มข้น (0.6 % w/w) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ความเข้มข้น (0.05, 0.10 และ 0.23 M) เป็นสารเชื่อมโยง โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมอัลจินตต่อกัวร์กัมเป็น 4:6 และ 6:4 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมไฮโดรเจล พร้อมบรรจุสาร KH_2PO_4 ในขั้นตอนเดียว จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาศึกษาการบวมตัวและการปลดปล่อยสารละลาย KH_2PO_4 ด้วยการตรวจวัดปริมาตรสารละลาย KH_2PO_4 ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer และศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลาย KH_2PO_4 ของเจลบู่ยัดเม็ด พบว่าปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ในเจลบู่ยัดเม็ดส่งผลให้ค่าการปลดปล่อยสารลดลง โดยสูตร A4G6 และ A6G4 ปลดปล่อยสารออกมาได้เกือบ 100% สูตร A4G6-Ca25 และ A6G4-Ca25 มีค่าการปลดปล่อยสูงสุดเท่ากับ 80 % และ 91% ตามลำดับ และสูตรที่มีปริมาณ CaCl_2 สูงขึ้นส่งผลให้มีการปลดปล่อยสารลดลง [25]

ไพลิน นิมิตรพรชัย และคณะ (2557) ศึกษาการเตรียมเม็ดไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างโคโตซาน (Chitosan) กับ แชนแทนกัม (Xanthan Gum) โดยมีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์และเพอริกซัลเฟตเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารเชื่อมโยงทางประจุแบบไดวาเลนต์และไตรวาเลนต์ โดยเริ่มจากเตรียมเม็ดไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นของโคโตซาน 0.5, 1.0 และ 1.5 (%w/v) ภาพตัดขวางของเม็ดไฮโดรเจลที่ได้แสดงลักษณะของชั้นเจลโดยชั้นนอก (Shell) เป็นส่วนของโคโตซานและชั้นใน (Core) เป็นส่วนของแชนแทนกัม โดยสูตร C5X-CaFe10P มีชั้นเจลที่มีการเชื่อมโยงบริเวณขอบนอกที่หนาที่สุด ผลการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling behavior) ในสภาวะต่างๆ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ได้แก่ สภาวะจำลองกรดในกระเพาะอาหาร (Simulated gastric fluid: SGF, pH 1.2), สภาวะเลียนแบบลำไส้ (Phosphate buffer solution: PBS, pH 7.4), สภาวะสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution, pH 7) ที่อุณหภูมิ 25 และ 37°C พบว่าเม็ดไฮโดรเจลทุกสูตรมีความสามารถในการบวมตัวได้นานโดยมีค่าสูงสุดประมาณ 3,000 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือสูงทั้งที่ 1 และ 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของการปลดปล่อยยาพาราเซตามอล ซึ่งเป็นตัวแทนของยากลุ่มละลายน้ำได้ดีในสภาวะต่างๆ พบว่าสูตร C10X-CaFe10P สามารถหน่วงการปลดปล่อยยาได้ดีที่สุด จึงเลือกมาศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยยาพาราเซตามอลในสภาวะจำลองระบบย่อยอาหาร พบว่ามีการปลดปล่อยยาออกมาเร็วในช่วงต้นขณะที่แช่อยู่ในสารละลาย SGF และสามารถปลดปล่อยยาพาราเซตามอลได้สูงสุด 92% และเมื่อเพิ่มการเชื่อมโยงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของแซนแทนกัมด้วยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ในสูตร C10X-CaFe10P* และ C10X-CaFe10P** พบว่าทั้งสองสูตรมีการหน่วงการปลดปล่อยยาได้มากกว่าสูตร C10X-CaFe10P [26]

พีรพงศ์ หาญพิชาญชัย (2545) ศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยของเม็ดยาโดยวิธีเคลือบด้วยสารละลายโคโคซานที่มีร้อยละของการกำจัดหมู่อะซิทิล ร้อยละ 79 และร้อยละ 95 โดยละลายโคโคซานในกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อให้ได้สารละลายโคโคซานที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ศึกษาผลกระทบจากปริมาณของธาตุอาหารในปุ๋ยต่ออัตราการละลาย สารละลายโคโคซานจะถูกพ่นลงบนเม็ดยาภายในถังเคลือบ และนำไปอบที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ปุ๋ยที่เคลือบด้วยโคโคซานจะนำไปศึกษาการละลายของธาตุอาหารในน้ำกลั่น และวัดปริมาณของธาตุอาหารซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ตามเวลาที่กำหนด จากผลการทดลองพบว่า ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่ปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยที่เคลือบด้วยโคโคซาน มีปริมาณน้อยกว่าปุ๋ยที่ไม่ได้เคลือบ อัตราการปลดปล่อยของธาตุอาหารขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโคโคซาน และค่าร้อยละของการกำจัดหมู่อะซิทิลของโคโคซาน ปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายโคโคซานที่มีความเข้มข้นสูง และปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายโคโคซานที่มีค่าร้อยละของการลดหมู่อะซิทิลน้อย จะมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารช้าลง อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่เคลือบด้วยโคโคซานขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุอาหารในปุ๋ยเคลือบ [27]

วิรัชฐา แสงฤทธิ์ (2547) การศึกษาการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยโดยการเคลือบด้วยน้ำมันชักแห้งชนิดต่างๆ คือ น้ำมันลินสีด น้ำมันทัง และน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้เครื่องมือในการเคลือบคือฟลูอิดซ์ เบด และหม้อเคลือบ พบว่าเครื่องมือที่มีความเหมาะสมในการเคลือบปุ๋ยเพื่อควบคุมการปลดปล่อยคือ หม้อเคลือบ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเคลือบพบว่าปุ๋ยจะเคลือบได้ดีที่สุดเมื่อใช้โคบอลต์ แนพทีเนต 1% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80°C โดยเม็ดยาที่เคลือบได้จะมีลักษณะมันวาว ผิวเรียบและสม่ำเสมอ ชนิดของน้ำมันที่เหมาะสมในการเคลือบปุ๋ย คือน้ำมันลินสีด และน้ำมันถั่วเหลือง ส่วนน้ำมันทังไม่เหมาะสมในการเคลือบปุ๋ยโดยใช้หม้อเคลือบ และปริมาณของน้ำมันชักแห้งที่เหมาะสมในการเคลือบโดยใช้หม้อเคลือบคือ 10 ส่วนในร้อยละ 10 จากการศึกษาการปลดปล่อยโพแทสเซียม โดยใช้เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี และศึกษาอัตราการปลดปล่อยยูเรีย โดยใช้เทคนิค ยูวี วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมตริพบว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยน้ำมันลินสีดมีความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ดีที่สุด รองลงมาคือ น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันลินสีดผสมน้ำมันถั่วเหลือง และพบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มหรือจำนวนชั้นของฟิล์มมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้อัตราการปลดปล่อยสารอาหารลดลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงสภาวะในการทดสอบปุ๋ยที่เคลือบได้ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปุ๋ยมีการปลดปล่อยธาตุอาหารเพิ่มขึ้น ช่วงสภาวะความเป็นกรดที่สูง จะเพิ่มการปลดปล่อยธาตุอาหาร [28]

ธัญลักษณ์ อาษานอกและคณะ (2556) ศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยสารอโรโพสเฟตในรูปของสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ของเจลปุ๋ยอัดเม็ดจากอัลจินตและแซนแทน โดยมีโซเดียมเทรโบเรต, แคลเซียมคลอไรด์ และคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมโยง โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอัลจินตต่อแซนแทน ความเข้มข้นของโซเดียมเทรโบเรต แคลเซียมคลอไรด์และคอปเปอร์ซัลเฟต ทำการเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารอโรโพสเฟต จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาอัดเม็ดเพื่อศึกษาการบวมตัว โดยนำเจลปุ๋ยอัดเม็ดแช่ในน้ำกลั่น และวัดการปลดปล่อยสารอโรโพสเฟตของเจลปุ๋ย โดยตรวจวัดปริมาณสารอโรโพสเฟตด้วย Ascorbic acid method ใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร จากผลการการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวมตัว พบว่าสูตร X5A5B0.6Ca0.05 ที่มีการเชื่อมโยง 2 กลไก มีค่าการบวมตัวสูงสุดที่ประมาณ 12 เท่า และคงตัวอยู่ได้นาน เนื่องจากการสร้างพันธะเชื่อมโยงของทั้งโซเดียมเทตระบอเรต และแคลเซียมคลอไรด์ จากการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลบิวต์เม็ด พบว่าสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยง และเชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตความเข้มข้น 0.6% w/w มีอัตราการปลดปล่อยใกล้เคียงกัน และปลดปล่อยสารออกมาได้หมด 100% เมื่อทำการเชื่อมโยง 2 กลไก ด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หรือคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน การปลดปล่อยมีอัตราการปลดปล่อยที่ช้าลงและปลดปล่อยออกมาได้ไม่หมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้แคลเซียมคลอไรด์หรือคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.05 M สามารถปลดปล่อยได้เพียง 80% [29]

Zipei Zhang และคณะ (2016) ศึกษาเกี่ยวกับกรคงอยู่ และอัตราการปลดปล่อยโปรตีนของเม็ดบิวต์ไฮโดรเจลที่ถูกห่อหุ้มด้วยแคลเซียมอัลจินेट ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ เครื่องเอ็กทราซันด้วยหัวฉีดแบบสัน โดยโปรตีนที่นำมาใส่ในเม็ดบิวต์อยู่ในช่วง pH ที่ต่างกันคือ pH 3, 5 และ 7 ศึกษาผลของเม็ดบิวต์เกี่ยวกับ การคงอยู่ และการปลดปล่อย พบว่าโปรตีนที่ถูกห่อหุ้มนั้นมีเวลาในการคงอยู่ยาวนานที่ค่า pH ต่ำ ในขณะที่การปลดปล่อยของโปรตีนนั้นมีค่าสูงที่บริเวณค่า pH สูง การศึกษาพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า pH นั้นเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยโปรตีนของเม็ดบิวต์ โดยเม็ดบิวต์ไฮโดรเจลมีความเหมาะสมสำหรับการห่อหุ้มโปรตีน และมีประโยชน์อย่างมากในการใช้งานทางด้านอาหาร [3]

ปิยะธิดา ทะลิตะพงษ์ (2558) ศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารสกัดจากใบประยงค์จากเม็ดกำจัดวัชพืชที่มีผลต่อการยับยั้งการรอดของเมล็ดหญ้าข้าวนก เติร์มโดยการนำอัลจินตละลายในสารสกัดจากใบประยงค์ในอัตราส่วนน้ำหนักอัลจินตต่อปริมาตรสารสกัดใบประยงค์ คือ 1:20, 1:40 และ 1:60 เชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05, 0.10 และ 0.20 M นำสารที่ได้ไปประเหยให้แห้งแล้วนำมาบดให้ละเอียด จากนั้นนำผงที่บดละเอียดมาอัดเป็นเม็ด ศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารสกัดใบประยงค์ของเม็ดกำจัดวัชพืช โดยนำเม็ดกำจัดวัชพืชแช่ในน้ำกลั่นแล้วสุ่มตัวอย่างน้ำตรวจด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer เพื่อตรวจวัดหาปริมาณของสารประกอบ Odorine ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ที่เวลาต่างๆ ผลการทดลองที่ได้พบว่า เม็ดกำจัดวัชพืชที่มีการเชื่อมโยงมีการปลดปล่อยสารสกัดใบประยงค์ช้ากว่าเม็ดกำจัดวัชพืชที่ไม่มีการเชื่อมโยง และเม็ดกำจัดวัชพืชที่มีน้ำหนัก 0.30 กรัม มีการปลดปล่อยช้ากว่าเม็ดกำจัดวัชพืชที่มีน้ำหนัก 0.15 กรัม การทดสอบความสามารถในการยับยั้งการรอดและการเจริญเติบโตของวัชพืช วัชพืชที่ใช้ทดสอบ คือ หญ้าข้าวนก พบว่าที่สภาวะไม่เปลี่ยนจานเพาะเชื้อ เม็ดกำจัดวัชพืชทุกสูตรมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการและการเจริญเติบโตของเมล็ดหญ้าข้าวนกได้ 80-100 % เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ ในขณะที่สภาวะเปลี่ยนจานเพาะเชื้อ เม็ดกำจัดวัชพืชสูตรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ได้แก่ สูตร A60Ca10 และ A60Ca20 (น้ำหนัก 0.30 กรัม) มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการรอดของเมล็ดหญ้าข้าวนกได้ 56 และ 67% ตามลำดับ ที่ระยะเวลา 3 สัปดาห์ [31]

โดยปกติพืชมอสที่เกษตรกรนิยมใช้ซึ่งขายตามท้องตลาดทั่วไปมักจะมีการใส่ปุ๋ยเพื่อเพิ่มแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า ถึงแม้การใช้วัสดุอื่นทดแทน เช่น ขุยมะพร้าวหมักเพื่อลดต้นทุน ก็มีการแนะนำให้เติมแร่ธาตุอาหารลงไปด้วย เนื่องจากพบว่าหลังผ่านการเพาะเมล็ดไปแล้ว 7 วัน การเจริญเติบโตของต้นกล้าโดยใช้ขุยมะพร้าวหมักเป็นวัสดุเพาะลดลงเมื่อเทียบกับการใช้พืชมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีการเติมแร่ธาตุอาหารมาก่อนแล้ว นั้นแสดงว่าแร่ธาตุในขุยมะพร้าวหมักไม่เพียงพอต่อความต้องการของต้นกล้า [32]

ดังนั้นในโครงการนี้จะเป็นการเตรียมวัสดุเพาะแบบไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ชีวภาพนั้นคือ อัลจิเนต โดยทำการเชื่อมโยงเพื่อพัฒนาให้มีความสามารถควบคุมการปลดปล่อยแร่ธาตุอาหารที่จำเป็นได้ เพราะแร่ธาตุในปุ๋ยปกติสามารถชะออกไปได้ง่ายหลังจากการรดน้ำ ทำให้พืชได้แร่ธาตุน้อยลงหรืออาจได้แร่ธาตุในเวลาสั้น ๆ ซึ่งไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ทำให้ต้องมีการเติมปุ๋ยเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นการผลิตวัสดุเพาะกล้าที่มีความสามารถในการควบคุมแร่ธาตุได้จึงเป็นข้อดีที่จะช่วยเกษตรกรลดต้นทุนการผลิตลง นอกจากนี้ยังเป็นการลดการนำเข้าฟอสเฟต และเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบในประเทศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 1) โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) เกรดการค้า บริษัท รวมเคมี จำกัด
- 2) แคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตต (Calcium magnesium acetate) ศูนย์เรียนรู้การจัดการขยะและน้ำเสียชุมชน คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3) ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Diammonium hydrogen phosphate) Carlo Erba Co., Ltd.
- 4) แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) Merck Co., Ltd.
- 5) ยางซิลิโคน
- 6) น้ำยาเช็ดตัว
- 7) โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate) เกรตวิเคราะห์ Apex Chemicals Co., Ltd.
- 8) แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium molybdate) เกรตวิเคราะห์ Mallinckrodt Co., Ltd.
- 9) แอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต (Antimony potassium tartrate) เกรตวิเคราะห์ Italmar (Thailand) Co., Ltd.
- 10) สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. Sulfuric acid) เกรตวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents Group Co., Ltd.
- 11) กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) Loba Chemie Pvt. Ltd.
- 12) เจลตินวิทยาศาสตร์
- 13) สารละลายมาตรฐานแคลเซียม 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (สารละลายแคลเซียมไนเตรตในกรดไนตริก 0.5 โมลาร์) Merck Co., Ltd.
- 14) สารละลายมาตรฐานแมกนีเซียม 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (สารละลายแมกนีเซียมไนเตรตในกรดไนตริก) May & Baker Co., Ltd.

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน IKA Co., Ltd. รุ่น HS-7
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง Denver Instrument Co., Ltd. รุ่น SI-234
- 3) ตู้อบ Memmert Co., Ltd. รุ่น UN55
- 4) เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (UV-vis) (Thermo Scientific genesis 10s)
- 5) เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) PerkinElmer Co., Ltd. รุ่น AAS 200
- 6) เครื่อง Ultrasonic Cleaner Elma Co., Ltd. รุ่น Elmasonic S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) PerkinElmer Co., Ltd. รุ่น FTIR Spectrum GX
- 8) เครื่อง X-ray diffraction spectrometer (XRD) Bruker Co., Ltd. AG รุ่น D8 Advance
- 9) เครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF) Philips Co., Ltd. รุ่น PW2400
- 10) แท่งแม่เหล็กคนสาร
- 11) ผ้าสก๊อต
- 12) เครื่องกรองแบบลดความดัน
- 13) ถาดอะลูมิเนียมทรงสี่เหลี่ยม 6.5x10 เซนติเมตร
- 14) ลูกปิด
- 15) Peristaltic pump Lead Fluid Co., Ltd. รุ่น YZ15
- 16) Desiccator
- 17) บริษัทเครื่องแก้ว
- 18) Fan Oven ยี่ห้อ OTTO รุ่น CO-705
- 19) ภาชนะปลูก
- 20) Filter 0.45 micron CNW Technologies Co., Ltd.

3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

3.3.1 สารละลายอัลจินเตความเข้มข้น 7 %w/v

- 1) ชั่งอัลจินเต 7.0 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) ตวงน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกตวง ใส่ในบีกเกอร์ที่มีอัลจินเต
- 3) ละลายอัลจินเตในน้ำกลั่น โดยปั่นกวนที่อุณหภูมิ 70°C

3.3.2 สารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตความเข้มข้นประมาณ 1 โมลาร์

- 1) ชั่งแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตต 186.0 กรัม
- 2) ละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตในน้ำโดยการปั่นกวน ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตรและปรับปริมาตร

3.3.3 สารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 1 โมลาร์

- 1) ชั่งไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 132.0 กรัม
- 2) ละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตในน้ำโดยการปั่นกวน ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตรและปรับปริมาตร

3.3.4 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0 และ 4.0 โมลาร์

- 1) ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ 29.4 และ 58.8 กรัม
- 2) ละลายในน้ำกลั่นใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตรและปรับปริมาตร

3.3.5 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

- 1) ชั่งสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ปริมาณ 219.5 มิลลิกรัม
- 2) ละลายสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 สารละลายแอสคอบิกรีเอเจนต์

- 1) ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 20 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร
- 2) ละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต 1.3715 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร
- 3) ละลายกรดแอสคอบิก 1.76 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
- 4) เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอลจากสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) ปริมาตร 70 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร
- 5) นำสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 15 มิลลิลิตร สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต 5 มิลลิลิตร สารละลายกรดแอสคอบิก 30 มิลลิลิตร และสารละลายกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอล 50 มิลลิลิตร ผสมในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.4 ขั้นตอนการเตรียมแม่พิมพ์ซิลิโคน

- 1) ชั่งยางซิลิโคน 48.5 กรัม
- 2) ชั่งน้ำยาเซตตัว 1.5 กรัม
- 3) ผสมยางซิลิโคนและน้ำยาเซตตัวเข้าด้วยกันโดยระวังไม่ให้เกิดฟอง
- 4) เทลงในภาตอะลูมิเนียมทรงสี่เหลี่ยมเพื่อทำเป็นชั้นล่างของแม่พิมพ์
- 5) ผสมยางซิลิโคนและน้ำยาเซตตัวในอัตราส่วนเดิมแล้วเทลงในภาตอะลูมิเนียมทรงสี่เหลี่ยมในข้อที่ 4) เพื่อทำเป็นชั้นบนโดยต้องทำให้ผิวหน้าของชั้นบนของแม่พิมพ์เรียบที่สุด
- 6) ใส่ลูกปัดลงบนแม่พิมพ์ชั้นบนเพื่อทำให้แม่พิมพ์เป็นร่องตามรูปทรงของลูกปัดโดยกดให้ลูกปัดจมลงไปแม่พิมพ์ 3 ใน 4 ของลูกปัด
- 7) นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 40°C จนกว่าผิวหน้าของแม่พิมพ์จะเกิดการเซตตัว
- 8) นำแม่พิมพ์ออกจากภาตอะลูมิเนียมทรงสี่เหลี่ยมแล้วจึงนำลูกปัดออกจากแม่พิมพ์

3.5 ขั้นตอนการเตรียมสูตรปุ๋ย

- 1) ตวงสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตความเข้มข้นประมาณ 1 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร ด้วยกระบอกตวง
- 2) ตวงสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 1 โมลาร์ 100 มิลลิลิตรด้วยกระบอกตวง
- 3) ผสมสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตและสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตเข้าด้วยกันจะเกิดตะกอนละเอียดสีขาวขึ้นทันที และทิ้งไว้ประมาณ 10 นาทีเพื่อให้สารละลายผสมตกตะกอนสมบูรณ์
- 4) นำตะกอนที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน
- 5) นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.6 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเพาะ

3.6.1 การเตรียมวัสดุเพาะเชื่อมโยงโดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 4.0 โมลาร์

- 1) เตรียมสารละลายอัลจินเนตเข้มข้น 7.0 %w/v นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ใส่สูตรปุ๋ย 15 กรัมในสารละลายอัลจินต 30 มิลลิลิตร ปั่นจนให้เข้ากันในปิกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร

3) เทใส่แม่พิมพ์ซิลิโคนจนเต็ม และนำไปแช่ในตู้เย็น (-5°C - 0°C) เป็นเวลา 60 นาที

4) นำออกจากแม่พิมพ์ไปแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 4 โมลาร์ ปริมาณ 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 3-5°C เป็นเวลา 10 นาที

5) จะได้ว่าวัสดุเฉพาะนำออกมาซับให้แห้ง และอบใน Fan oven เป็นเวลา 60 นาที

6) เข้าตู้อบอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและเก็บในเดซิเคเตอร์

3.6.2 การเตรียมวัสดุเฉพาะเชื่อมโยงโดยใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์
เตรียมวิธีเดียวกับ 3.6.1 ยกเว้นข้อ 4) โดยแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ปริมาณ 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 3-5°C เป็นเวลา 20 นาที

3.6.3 การเตรียมวัสดุเฉพาะเชื่อมโยงโดยใช้แคลเซียมแมกนีเซียมไอออน
เตรียมวิธีเดียวกับ 3.6.1 ยกเว้นข้อ 4) โดยแช่ในสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตดความเข้มข้นประมาณ 1 โมลาร์ ปริมาณ 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 3-5°C เป็นเวลา 60 นาที

3.7 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ของสูตรปุ๋ย

3.7.1 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FTIR

นำสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้ไปตรวจวัดด้วยเครื่อง FTIR spectrum GX PerkinElmer Spectrophotometer โดยใช้เทคนิค KBr-pellet มีขั้นตอนดังนี้ ใส่สารตัวอย่างลงในโถงบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันกับ KBr ในอัตราส่วน sample : KBr เป็น 1:10 แล้วอัดให้เป็นแผ่นบาง ๆ ด้วย Hand press จากนั้นใส่ลงใน disc holder และทำการบันทึกสเปกตรัมการสั่น โดยกำหนดสภาวะของการวิเคราะห์ คือ บันทึกเลขคลื่น (Wavenumber) ในช่วง 4000-400 cm^{-1} จำนวนครั้งการการัน (Scan Number) เท่ากับ 8 และ Resolution เท่ากับ 4 cm^{-1}

3.7.2 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

นำสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้มาตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (a, b, c และมุม β) และคำนวณขนาดผลึกด้วยสมการ Scherrer จากการเปรียบเทียบ XRD patterns ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐานด้วยเครื่อง X-Ray powder diffractometer โดยบดสารให้ละเอียดแล้วใส่ลงใน sample holder และทำการวิเคราะห์ต่อไป โดยกำหนดสภาวะของการวิเคราะห์ ดังนี้

- Scan method : Start 5 deg ; Stop 60 deg

- Step size 0.04 deg ; Time/Step 1 mins

3.7.3 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค X-ray fluorescence

นำสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้มาตรวจวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุ โดยมีขั้นตอนดังนี้ ชั่งสาร boric acid และ สูตรปุ๋ยด้วยอัตราส่วน 3:1 เทสารที่ชั่งได้ลงในครกอะเกต เติมสารละลายอะซิโตนและบดสารให้เข้ากันจนมีลักษณะเป็นผงละเอียด จากนั้นเทผลที่ได้ลงเบ้าสำหรับอัดสารตัวอย่าง แล้วนำเข้าเครื่องอัดไฮดรอลิก ความดันประมาณ 10 torr เป็นเวลา 2 นาที เมื่อได้เม็ดสารตัวอย่างแล้วทำความสะอาดด้วยสารละลายแอลกอฮอล์ ซึ่งปริมาณเม็ดสารที่ได้ นำไปตรวจวิเคราะห์โดยการวาวรังสีเอกซ์ (X - ray fluorescence)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การตรวจวิเคราะห์

3.8.1 การทดสอบการปลดปล่อยธาตุอาหารในวัสดุเพาะ

- 1) ชั่งน้ำหนักวัสดุเพาะที่จะทดสอบ
- 2) หยดน้ำผ่านวัสดุเพาะจำนวน 1 เม็ด ที่มีผ้าสกรีนรองอยู่ โดยใช้ Peristaltic pump ด้วยอัตรา 4 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และอัตรา 20 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
- 3) รองน้ำที่ผ่านเม็กลงมาเก็บไว้ในปิ๊งเกอร์
- 4) ทำซ้ำข้อ 1 และข้อ 2 โดยฝั่งเม็ดไว้ 55 นาที สำหรับอัตรา 4 มิลลิลิตรต่อนาที และ 59 นาที สำหรับอัตรา 20 มิลลิลิตรต่อนาที ก่อนเริ่มรอบต่อไป โดยจะทำทั้งหมด 15 รอบ

3.8.1.1 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุเพาะ

1) การสร้างกราฟมาตรฐาน

(1) เตรียมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยนำสารละลายมาตรฐานแคลเซียมความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐาน 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(2) นำสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ได้จากข้อ (1) ปริมาตร 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานเข้มข้น 2.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

(3) นำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร

(4) นำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนไปสร้างกราฟมาตรฐาน

2) การหาปริมาณแคลเซียมไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุเพาะ

(1) นำน้ำตัวอย่างจากข้อ 3.8.1 ในรอบการหยดน้ำที่ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 มารองโดยใช้ Filter ขนาด 0.45 micron ก่อนการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร

(2) นำน้ำตัวอย่างจากข้อ 3.7.1 ในรอบการหยดน้ำที่ 6, 8, 10, 12 และ 14 มารวมกันและกรองโดยใช้ Filter ขนาด 0.45 micron ก่อนนำเข้าเครื่อง AAS และวัดค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร

(3) นำค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่างที่ได้จากการปลดปล่อยธาตุอาหารจากวัสดุเพาะมาเทียบกับกราฟมาตรฐานจะได้ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนที่อยู่ในวัสดุเพาะที่ปลดปล่อยออกมา

3.8.1.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุเพาะ

1) การสร้างกราฟมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) เตรียมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, และ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการนำสารละลายมาตรฐานแมกนีเซียมความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(2) นำสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ได้จากข้อ (1) ปริมาตร 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

(3) นำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 285.2 นาโนเมตร

(4) นำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานและความเข้มข้นของแมกนีเซียมไปสร้างกราฟมาตรฐาน

2) การหาปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุเพาะ

ทำแบบ 3.8.1.1 ข้อ 2) แต่เปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงเป็นที่ความยาวคลื่น

285.2 นาโนเมตร

3.8.1.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณของฟอสเฟตไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจาก

วัสดุเพาะ

1) การสร้างกราฟมาตรฐาน

(1) เตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เตรียมไว้ในข้อ 3.3.5 ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น สารละลายนี้ $1.00 \text{ มิลลิลิตร} = 2 \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P /ml}$

(2) ปิเปิดสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เตรียมจากข้อ (1) ปริมาตร 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 34 และ 38 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร (เพื่อเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20, 0.28, 0.36, 0.44, 0.52, 0.60, 0.68 และ $0.76 \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P / ml}$ ตามลำดับ)

(3) นำมาเติมสารละลายแอสคอบิกรีเอเจนต์ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงในแต่ละความเข้มข้นผสมให้เข้ากันและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตรแล้วทิ้งไว้ 10 นาที

(4) นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-vis

(5) นำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณของฟอสเฟต ไปสร้างกราฟมาตรฐาน

2) การหาปริมาณฟอสเฟตไอออนที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุเพาะ

(1) ปิเปิดน้ำตัวอย่างจากข้อ 3.8.1 ในรอบการหยดน้ำที่ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13 และ 15 รวมไปถึงน้ำตัวอย่างจากข้อ 3.8.1 ในรอบการหยดน้ำที่ 6, 8, 10, 12 และ 14 ที่รวมกัน ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครปิเปต ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร

(2) จากนั้นใส่สารละลายแอสคอบิกรีเอเจนต์ 1.0 มิลลิลิตร ในขวดวัด

ปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตรในข้อ (1) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตรและทิ้งไว้ 10 นาที

(4) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 880.0 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-vis

(5) นำค่าการดูดกลืนแสงมาเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของฟอสเฟตไอออนที่ปลดปล่อยออกมา

3.8.2 การหาปริมาณธาตุอาหารทั้งหมดที่สามารถละลายน้ำได้ของวัสดุเพาะ

1) นำวัสดุเพาะที่ผ่านการหยดน้ำแล้ว 15 รอบ จากข้อ 3.8.1 มาชั่งน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่หายไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักก่อนหยดน้ำกำหนดให้เป็นส่วนที่ละลายน้ำได้ง่าย

2) นำวัสดุเพาะที่ผ่านการหยดน้ำแล้วมาละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตรและให้ความร้อนที่ 80°C เป็นเวลา 60 นาที

3) นำไปเข้าเครื่อง Ultrasonic Cleaner ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 60 นาที

4) นำไปกรองแบบลดความดัน และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นอีก 10 มิลลิลิตร

5) นำน้ำตัวอย่างส่วนที่เป็นสารละลายไปกรองโดยใช้ Filter ขนาด 0.45 micron

6) นำตะกอนที่ไม่ละลายน้ำไปชั่งน้ำหนักกำหนดให้เป็นส่วนที่ละลายน้ำได้ยาก และน้ำหนักที่หายไปในช่วงตอนนี้กำหนดให้ให้เป็นส่วนที่ละลายน้ำได้ช้า

7) แบ่งน้ำตัวอย่างที่ได้จากการกรองในข้อ 5) เป็นสองส่วน ส่วนแรกนำมาตรวจวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนด้วยเครื่อง AAS วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 422.7 และ 285.2 นาโนเมตร ตามลำดับ และส่วนที่สองนำมาตรวจวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนโดยนำน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายแอสคอบิกรีเอเจนต์ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น และทิ้งไว้ 10 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis ที่ความยาวคลื่น 880.0 นาโนเมตร

8) นำค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่างที่ได้จากปลดปล่อยของวัสดุเพาะมาเทียบกับกราฟมาตรฐานจะได้ปริมาณธาตุอาหารส่วนที่ละลายน้ำได้ช้าที่ยังสามารถละลายได้อีกหลังจากการหยดน้ำ 15 รอบ

9) ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสที่สามารถละลายน้ำได้ในวัสดุเพาะคำนวณได้จากผลรวมของปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสผ่านการหยดน้ำ 15 รอบ กับปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสที่บรรจุอยู่ในวัสดุเพาะส่วนที่ละลายน้ำได้ช้าที่ยังสามารถละลายได้อีกหลังจากผ่านการหยดน้ำ 15 รอบ

3.9 การศึกษาสภาพการละลายของสูตรปุ๋ย

ทำแบบข้อ 3.8.1 และ 3.8.2 ยกเว้นการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมแมกนีเซียมและฟอสเฟตไอออน

3.10 การศึกษาเบื้องต้นถึงประสิทธิภาพของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งใน เจลดินวิทยาศาสตร์

- 1) แช่เมล็ดผักบุ้งในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) แช่ดินวิทยาศาสตร์ 1 กรัมต่อน้ำ 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำเจลดินวิทยาศาสตร์ใส่ลงในภาชนะปลูกที่มีลักษณะเป็นหลุม หลุมละ 1 กรัม
- 4) นำเมล็ดผักบุ้งใส่ลงในหลุมของภาชนะปลูก หลุมละ 1 เมล็ด
- 5) ใส่วัสดุเพาะลงในเจลดินวิทยาศาสตร์ที่มีเมล็ดผักบุ้ง
- 6) รดน้ำปริมาณ 10 มิลลิลิตรต่อวันด้วยกระบอกฉีดยา และวางภาชนะปลูกไว้ในบริเวณที่มี
แดดส่องถึงประมาณ 7 ชั่วโมงต่อวัน
- 7) วัดการเจริญเติบโตของผักบุ้งโดยการวัดความยาวของลำต้นเพื่อทำการเปรียบเทียบกับ
การเจริญเติบโตของผักบุ้งที่ไม่มีการใส่วัสดุเพาะ



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุเพาะจากโซเดียมอัลจิเนตผสมกับสูตรปุ๋ย ซึ่งมาจากการทำปฏิกิริยาของสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตและสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต จากนั้นเชื่อมโยงวัสดุเพาะด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หรือสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตต เพื่อศึกษาสภาพการละลายและพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะ โดยตรวจวิเคราะห์แคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนด้วย เครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 422.7 และ 285.2 นาโนเมตร ตามลำดับ และตรวจวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนด้วยเครื่อง UV-vis ที่ความยาวคลื่น 880.0 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังทำการศึกษาเบื้องต้นถึงประสิทธิภาพของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง

ในการเตรียมวัสดุเพาะผู้ทดลองเลือกใช้เวลาในการเชื่อมโยงสารเชื่อมโยงแต่ละชนิดแตกต่างกัน เนื่องจากผู้ทดลองได้ทำการทดลองเชื่อมโยงสารเชื่อมโยงในเวลาต่าง ๆ พบว่าเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมโยงที่น้อยเกินไป วัสดุเพาะที่เตรียมได้มีลักษณะแตกและไม่แข็ง ไม่คงรูปเป็นทรงกลม อีกทั้งยังละลายออกมาในสารเชื่อมโยง และเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมโยงมากขึ้น วัสดุเพาะที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นทรงกลมแข็งที่ไม่แตกต่างกัน ผู้ทดลองจึงได้เลือกใช้เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงดังตารางที่ 4.1 คือ สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 4 โมลาร์ ใช้เวลาในการเชื่อมโยง 10 นาที ในขณะที่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 2 โมลาร์ ใช้เวลาในการเชื่อมโยง 20 นาที และสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตใช้เวลาในการเชื่อมโยง 60 นาที

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบวัสดุเพาะ

สูตร	องค์ประกอบ	สารเชื่อมโยง	เวลาในการเชื่อมโยง (นาที)
ACa4	อัลจิเนต 7 %w/v	CaCl ₂ 4 M	10
ACa2		CaCl ₂ 2 M	20
ACaMg		Ca _x Mg _y (CH ₃ COO) ₂ ·2H ₂ O ~1M	60

4.1 การเตรียมสูตรปุ๋ย

สูตรปุ๋ยเตรียมได้จากสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตและสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต นำสารที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD วิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิค XRF และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

4.1.1 ร้อยละผลผลิต

การเตรียมสูตรปุ๋ยซึ่งได้จากการผสมสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตและสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยทำปฏิกิริยากันในอัตราส่วน 1:1 โดยมวล ผสมและปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที ได้ตะกอนที่มีลักษณะเป็นสีขาวละเอียด โดยร้อยละผลผลิตสามารถคำนวณได้ดังนี้ ซึ่งเป็นการคำนวณร้อยละผลผลิตโดยน้ำหนักของสารทั้ง 2 ตัวรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

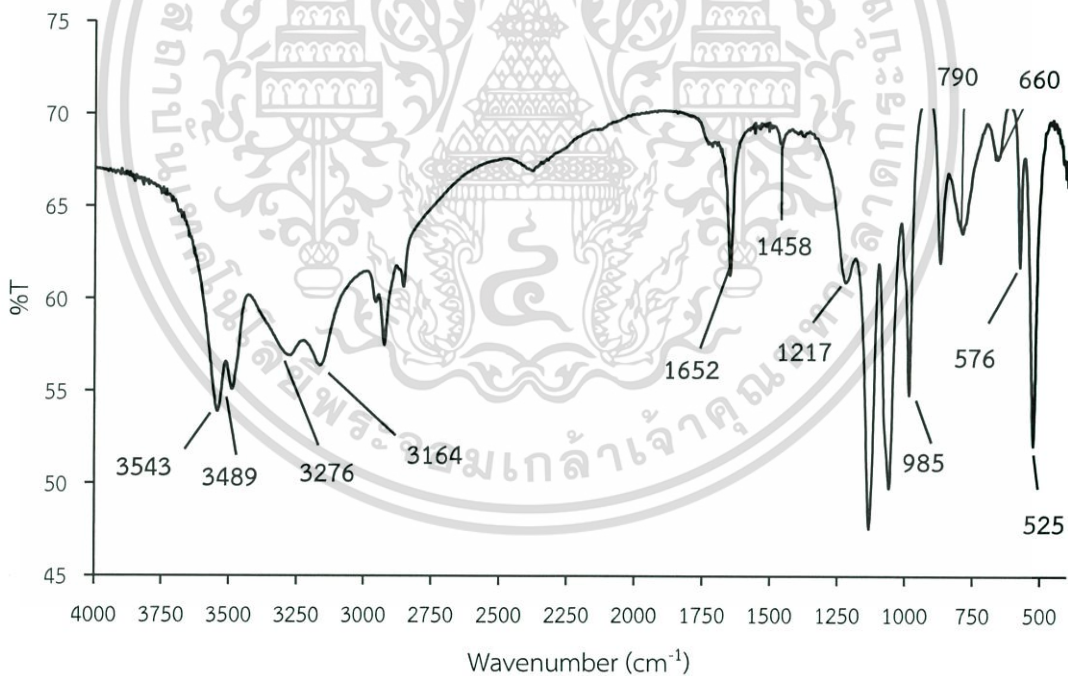
การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักทางทฤษฎี} &= \text{ผลรวมของน้ำหนักสารตั้งต้นที่ใช้} \\ &= 18.6 + 13.2 = 31.8 \text{ g} \\ \text{น้ำหนักที่ชั่งได้จริง} &= 20.7 \text{ g} \\ \text{ร้อยละผลผลิต} &= \frac{\text{น้ำหนักจริง}}{\text{น้ำหนักทางทฤษฎี}} \times 100 = \frac{20.7}{31.8} \times 100 \\ &= 65.09 \end{aligned}$$

ดังนั้น ร้อยละผลผลิตของสูตรปุ๋ยเท่ากับ 65.09 โดยน้ำหนัก

4.1.2 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FTIR

สูตรปุ๋ยที่เตรียมได้นำไปตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR spectrometry โดยสเปกตรัมของสารที่เตรียมได้แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าปรากฏพีกสองคู่ที่ตำแหน่ง 3543 cm^{-1} กับ 3489 cm^{-1} และ 3276 cm^{-1} กับ 3164 cm^{-1} ซึ่งทั้งสี่พีกนี้แสดงโมเลกุลน้ำในผลึก และปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 1652 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ Bending ของโมเลกุลน้ำ, 985 cm^{-1} , 576 cm^{-1} และ 525 cm^{-1} แสดงหมู่ P-O stretching นอกจากนี้ยังพบพีกปรากฏที่ 1458 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่ NH_4^+ จากพีกที่ปรากฏทั้งหมดแสดงให้เห็นว่ามีหมู่ NH_4^+ , PO_4^{3-} และโมเลกุลของน้ำ [33]

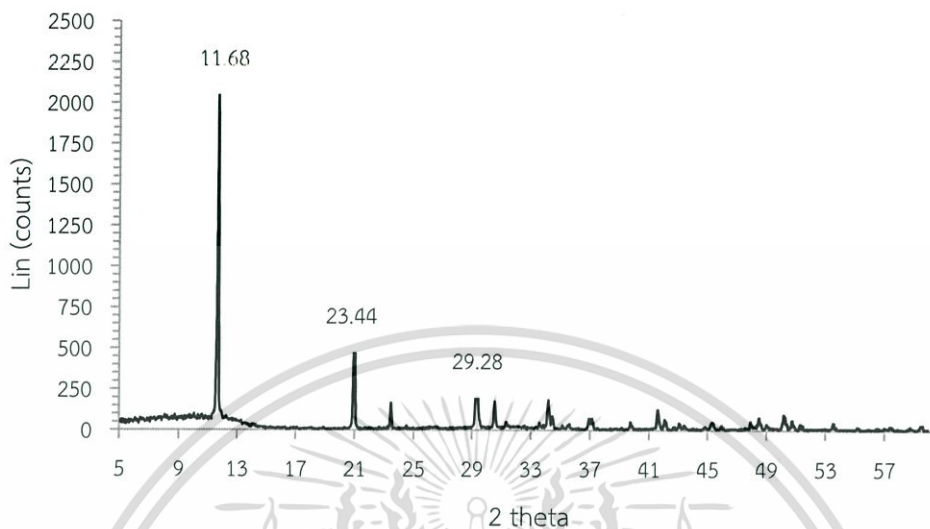


รูปที่ 4.1 กราฟ FTIR ของสูตรปุ๋ย

4.1.3 ผลการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

จากการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างของสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 11.68, 23.44 และ 29.28 เมื่อเทียบกับไฟล์มาตรฐานพบว่าตรงกับแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) แสดงให้เห็นว่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารที่เตรียมได้เป็นสารผสมซึ่งส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมไฮดรอกซีฟอสเฟตไดไฮเดรต นอกจากนี้ยังไม่พบฟีกของแมกนีเซียมอาจเป็นเพราะมีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้



รูปที่ 4.2 กราฟ XRD ของสูตรปุ๋ย

4.1.4 ผลการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)

จากการตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้างของสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRF พบว่าสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้มีปริมาณออกซิเจน 45.2 % แคลเซียม 28.3 % และฟอสฟอรัส 25.8 % ในขณะที่มีปริมาณแมกนีเซียมเพียง 0.16 % โดยน้ำหนัก และนอกจากนี้ยังประกอบด้วยธาตุอื่นๆ เช่น อะลูมิเนียม ซิลิกอน แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบธาตุในสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้

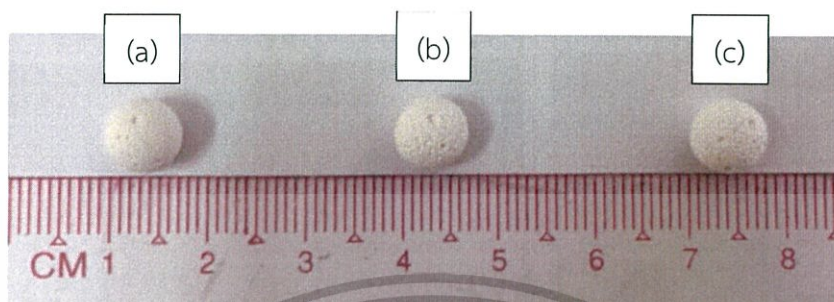
ธาตุ	ปริมาณ (wt%)
ออกซิเจน (O)	45.2
แคลเซียม (Ca)	28.3
ฟอสฟอรัส (P)	25.8
ซิลิกอน (Si)	0.346
แมกนีเซียม (Mg)	0.160
อะลูมิเนียม (Al)	0.109

4.2 การเตรียมและลักษณะทางกายภาพของวัสดุเพาะ

วัสดุเพาะเตรียมได้จากการนำสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้ผสมกับโซเดียมอัลจิเนตแล้วเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หรือสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตต จากนั้นนำวัสดุเพาะที่ได้ไปชั่งน้ำหนักและวัดขนาดเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของวัสดุเพาะสูตรต่าง ๆ พบว่าวัสดุเพาะมีลักษณะเป็นทรงกลมแข็ง ผิวมีรูพรุน สีขาวขุ่น ซึ่งวัสดุเพาะในแต่ละสูตรมีลักษณะที่เหมือนกัน ภาพของวัสดุเพาะทุกสูตรแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยค่าน้ำหนัก, เส้นผ่านศูนย์กลาง, ปริมาตร และความหนาแน่นกับค่าเบี่ยงเบนของวัสดุเพาะสูตรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุเพาะ
(a) สูตร ACa4 (b) สูตร ACa2 และ (c) สูตร ACaMg

ตารางที่ 4.3 ค่าน้ำหนัก, เส้นผ่านศูนย์กลาง, ปริมาตร และความหนาแน่นเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของวัสดุเพาะแต่ละสูตร

สูตร	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
ACa4	0.1289 ±0.0083	0.6960 ±0.0152	0.1768 ±0.0113	0.7296 ±0.0369
ACa2	0.1131 ±0.0030	0.7530 ±0.0110	0.2238 ±0.0096	0.5060 ±0.0215
ACaMg	0.1022 ±0.0040	0.7180 ±0.0148	0.1941 ±0.0121	0.5281 ±0.0329

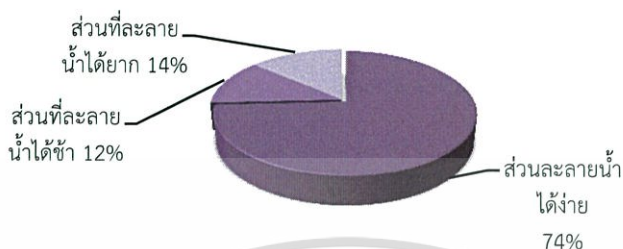
4.3 สภาพการละลายของปุ๋ยและผลของการเชื่อมโยง

4.3.1 สภาพการละลายของปุ๋ย

ศึกษาสภาพการละลายของสูตรปุ๋ยที่เตรียมขึ้นมา โดยการนำวัสดุเพาะที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนไปหยดน้ำ ด้วยอัตรา 4 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการหยดน้ำทั้งหมด 15 รอบ วัสดุเพาะจะถูกทำให้แห้งและชั่งน้ำหนัก โดยจะนิยามให้น้ำหนักที่หายไปหลังจากการหยดน้ำคือปุ๋ยส่วนที่ละลายน้ำได้ง่าย จากนั้นนำวัสดุเพาะดังกล่าวไปหาส่วนที่ยังสามารถละลายได้อีก โดยเร่งการละลายด้วยการให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปเข้าเครื่อง Ultrasonic cleaner ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งจะนิยามให้น้ำหนักที่หายไปหลังจากการเร่งการละลายเป็นปุ๋ยส่วนที่ละลายน้ำได้ช้า วัสดุเพาะส่วนที่เหลือจะถูกทำให้แห้งด้วยการอบและชั่งน้ำหนัก ซึ่งนิยามให้เป็นปุ๋ยส่วนที่ละลายน้ำได้ยาก โดยสภาพการละลายของวัสดุเพาะสามารถนำเสนอในรูปของแผนภูมิวงกลมดังรูปที่ 4.4

ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ ก4 ในภาคผนวก ก และรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำได้ง่ายเท่ากับ 0.0786 กรัม ซึ่งคิดเป็น 74% เมื่อเร่งการละลายจะได้น้ำหนักของปุ๋ยส่วนที่ละลายน้ำได้ช้าเท่ากับ 0.0131 กรัม คิดเป็น 12% และจะได้น้ำหนักปุ๋ยส่วนที่ละลายน้ำได้ยากเท่ากับ 0.0144 กรัม คิดเป็น 14% ของน้ำหนักปุ๋ยก่อนหยดน้ำ

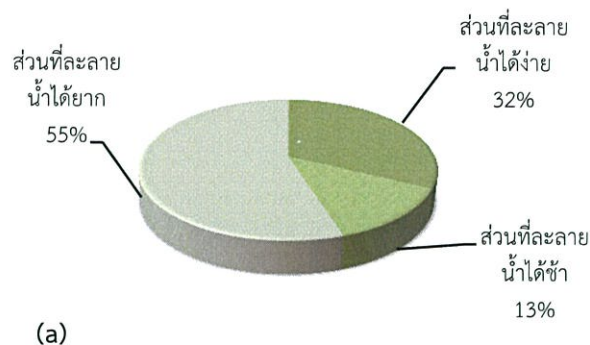


รูปที่ 4.4 แผนภูมิวงกลมแสดงสภาพการละลายของปุ๋ยที่เตรียมได้

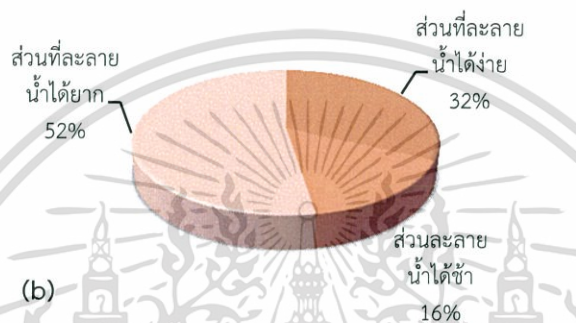
4.3.2 ผลของการเชื่อมโยงต่อสภาพการละลายของปุ๋ย

การศึกษาผลของการเชื่อมโยงของวัสดุเพาะในแต่ละสูตร โดยนำวัสดุเพาะที่ได้หลังจากข้อ 3.8.1 มาชั่งน้ำหนัก หรือน้ำหนักที่หายไปหลังจากหยดน้ำ ซึ่งจะนิยามให้เป็นปุ๋ยส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ง่าย จากนั้นนำมาเร่งการละลายด้วยการให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปเข้าเครื่อง Ultrasonic Cleaner ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 60 นาที เพื่อหาส่วนที่ยังสามารถละลายได้อีก ซึ่งจะนิยามให้เป็นปุ๋ยส่วนที่ละลายน้ำได้ช้า ในส่วนที่ไม่ละลายน้ำที่ได้จากการกรองจะนิยามให้เป็นปุ๋ยส่วนที่ละลายน้ำได้ยาก โดยนำเสนอข้อมูลในรูปของแผนภูมิวงกลมดังรูปที่ 4.5

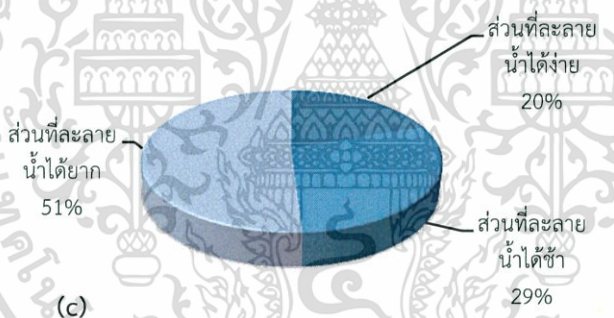
จากตารางที่ ก4 ในภาคผนวก ก และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าวัสดุเพาะสูตร ACa4 มีน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำได้ง่ายเท่ากับ 0.0445 กรัม คิดเป็น 32% เมื่อเร่งการละลายจะได้น้ำหนักของส่วนที่ละลายน้ำได้ช้าเท่ากับ 0.0188 กรัม คิดเป็น 13% และน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำได้ยากเท่ากับ 0.0730 กรัม คิดเป็น 55% ของน้ำหนักปุ๋ยก่อนหยดน้ำ วัสดุเพาะสูตร ACa2 มีน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำได้ง่ายเท่ากับ 0.0484 กรัม คิดเป็น 32% เมื่อเร่งการละลายจะได้น้ำหนักของส่วนที่ละลายน้ำได้ช้าเท่ากับ 0.0237 กรัม คิดเป็น 16% และน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำได้ยากเท่ากับ 0.0799 กรัม คิดเป็น 52% ของน้ำหนักปุ๋ยก่อนหยดน้ำ และวัสดุเพาะสูตร ACaMg มีน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำได้ง่ายเท่ากับ 0.0190 กรัม คิดเป็น 20% เมื่อเร่งการละลายจะได้น้ำหนักของส่วนที่ละลายน้ำได้ช้าเท่ากับ 0.0284 กรัม คิดเป็น 29% และน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำได้ยากเท่ากับ 0.0493 กรัม คิดเป็น 51% ของน้ำหนักวัสดุเพาะก่อนหยดน้ำ จะเห็นได้ว่าผลของการเชื่อมโยงวัสดุเพาะทำให้ส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ง่ายน้อยลงเมื่อเทียบกับการละลายของสูตรปุ๋ย (รูปที่ 4.4) เนื่องจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตที่ใช้เป็นสารเชื่อมโยงทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจินेटที่ผสมอยู่กับสูตรปุ๋ยเกิดโครงสร้างเป็นตาข่ายที่แข็งแรง ทำให้สามารถชะลอการละลายของสูตรปุ๋ยที่อยู่ภายในวัสดุเพาะได้ โดยเปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายน้ำได้ยากของวัสดุเพาะที่เพิ่มขึ้น คาดว่าสารเชื่อมโยงในวัสดุเพาะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสูตรปุ๋ยส่วนที่ละลายน้ำได้ช้าและส่วนที่ละลายน้ำได้ง่ายบางส่วนไม่ให้ละลายออกมาและอาจจะไปเปลี่ยนโครงสร้างของสูตรปุ๋ยให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ยากมากขึ้น จึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายน้ำได้ยากมากกว่าสูตรปุ๋ยที่ไม่มีการเชื่อมโยง



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.5 แผนภูมิวงกลมแสดงสภาพการละลายของวัสดุเพาะที่มีการเชื่อมโยง
(a) สูตร Aca4 (b) สูตร Aca2 และ (c) สูตร AcaMg

4.4 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะ

การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะในแต่ละสูตร โดยศึกษาอัตราการให้น้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที่ เป็นเวลา 5 นาที่ และอัตราการให้น้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที่ เป็นเวลา 1 นาที่ โดยใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างในการวิเคราะห์ 20 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุอาหารที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุเพาะในแต่ละสูตร แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.4.1 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนของวัสดุเพาะ

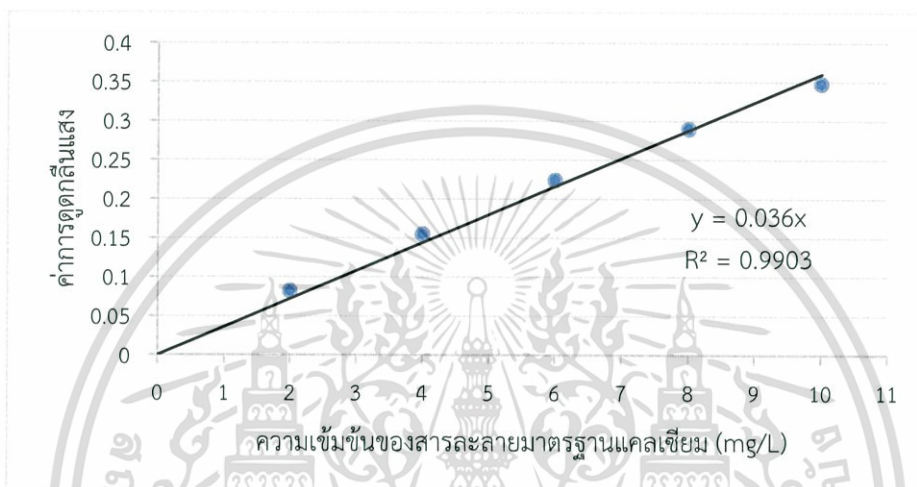
การศึกษาผลของการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนของวัสดุเพาะในแต่ละสูตร ทำได้โดยนำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการหยดน้ำผ่านวัสดุเพาะมาวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมไอออนด้วยเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AAS วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 422.7 นาโนเมตร และนำค่าที่ได้มาหาปริมาณแคลเซียมไอออนจากกราฟมาตรฐาน

4.4.1.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน

จากหัวข้อ 3.8.1.1 จะได้กราฟมาตรฐาน โดยพลอตระหว่างแกน x เป็นความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคลเซียมไอออนกับแกน y เป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแคลเซียม ดังรูปที่ 4.6 ได้สมการเส้นตรงคือ $y = 0.036x$, ค่า $R^2 = 0.9903$ ซึ่งสามารถนำกราฟมาตรฐานไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณแคลเซียมไอออนของน้ำในแต่ละรอบ



รูปที่ 4.6 กราฟมาตรฐานสารละลายแคลเซียมไอออน

4.4.1.2 การคำนวณปริมาณแคลเซียมไอออนที่ปลดปล่อยของวัสดุเพาะ

ตัวอย่าง จากน้ำรอบที่ 1 ของเม็ดสูตร ACa4 โดยใช้อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ปิดเต้าน้ำตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร เมื่อนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง AAS จะได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.618

จากสมการของกราฟมาตรฐานรูปที่ 4.6 $y = 0.036x$

โดยที่ $y =$ ค่าการดูดกลืนแสง และ

$x =$ ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออน

ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมไอออนในน้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ $\frac{0.618}{0.036} = 17.1667 \text{ mg/L}$

จากข้อมูลเบื้องต้นได้มีการเจือจางน้ำตัวอย่างเป็น 50 เท่า ดังนั้น น้ำตัวอย่างจากรอบที่ 1 ของสูตร ACa4 จะมีปริมาณแคลเซียมไอออนเท่ากับ $17.1667 \times 50 = 233.3333 \text{ mg/L}$

ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยมีปริมาณของแคลเซียมไอออนเท่ากับ 222.2222, 233.3333 และ 305.5556 mg/L โดยได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 253.7037 mg/L ซึ่งวัสดุเพาะสูตรอื่น ๆ แสดงการคำนวณในทำนองเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยปริมาณแคลเซียมไอออนของแต่ละรอบ แสดงดังภาคผนวก ข

4.4.1.3 ผลของการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนของวัสดุเพาะ

จากรูปที่ 4.7 พบว่าในอัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที วัสดุเพาะสูตร ACa4 มีปริมาณการปลดปล่อย Ca^{2+} ในรอบการหยดน้ำที่ 1 ประมาณ 253 mg/L ซึ่งปริมาณ Ca^{2+}

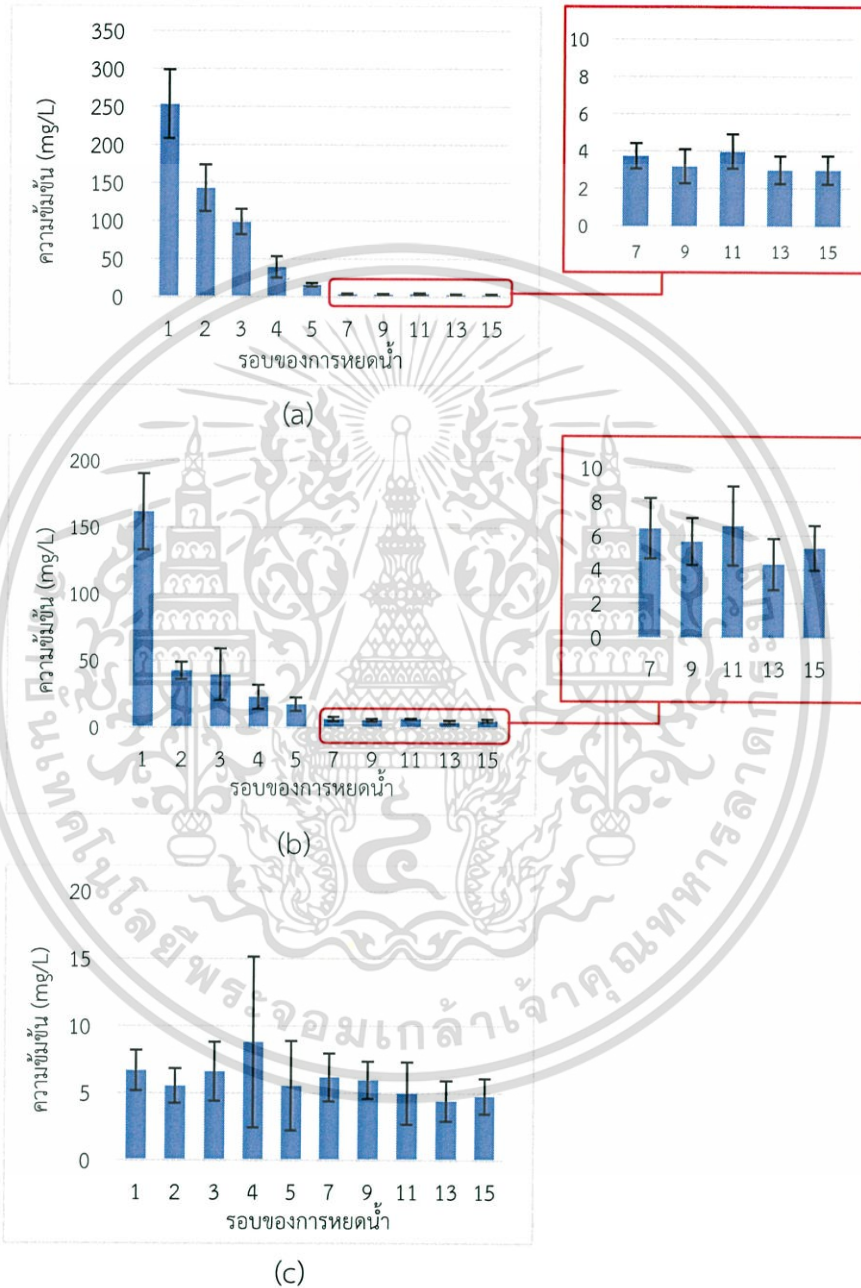
ที่ปล่อยออกมาจะมีค่าลดลงเมื่อรอบการหยดน้ำเพิ่มขึ้นและเริ่มคั่งที่ในรอบการหยดน้ำที่ 7 ที่ค่าประมาณ 3-4 mg/L วัสดุเพาะสูตร ACa2 มีปริมาณการปลดปล่อย Ca^{2+} ในรอบการหยดน้ำที่ 1 ประมาณ 125 mg/L ซึ่งปริมาณ Ca^{2+} ที่ปล่อยออกมาจะมีค่าลดลงเมื่อรอบการหยดน้ำเพิ่มขึ้นและเริ่มคั่งที่ในรอบการหยดน้ำที่ 7 ที่ค่าประมาณ 4-6 mg/L วัสดุเพาะสูตร ACaMg มีปริมาณการปลดปล่อย Ca^{2+} ในรอบการหยดน้ำที่ 1 ประมาณ 6.6 mg/L ซึ่งปริมาณ Ca^{2+} ที่ปล่อยออกมาในแต่ละรอบของการหยดน้ำค่อนข้างคงที่ตั้งแต่รอบการหยดน้ำที่ 1 โดยมีค่าประมาณ 5-8 mg/L

จากรูปที่ 4.7 พบว่าวัสดุเพาะสูตร ACa4 มีปริมาณ Ca^{2+} ที่ปลดปล่อยออกมาในรอบการหยดน้ำในรอบที่ 1-5 มากกว่าสูตร ACa2 และ ACaMg เนื่องจากวัสดุเพาะสูตร ACa4 ใช้ CaCl_2 4 โมลาร์เป็นสารเชื่อมโยงทำให้มีปริมาณ Ca^{2+} บางส่วนที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับอัลจินเตตค้ำอยู่ในเนื้อวัสดุเพาะซึ่งจะถูกน้ำชะออกมาได้ค่อนข้างง่าย และเนื่องจากเป็นรูปแคลเซียมที่ละลายน้ำได้ง่าย ทำให้มีปริมาณ Ca^{2+} ในรอบการหยดน้ำช่วงต้นมากกว่าวัสดุเพาะอีก 2 สูตร สำหรับวัสดุเพาะสูตร ACa2 แม้ว่าจะใช้สารเชื่อมโยงชนิดเดียวกันแต่ปริมาณน้อยกว่า ทำให้มีปริมาณ Ca^{2+} ที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับอัลจินเตตค้ำอยู่ในเนื้อวัสดุเพาะน้อยกว่า โดยมีรูปแบบการปลดปล่อย Ca^{2+} ในช่วงรอบการหยดน้ำที่ 1-5 คล้ายกับวัสดุเพาะสูตร ACa4 แต่มีปริมาณน้อยกว่า ในขณะที่วัสดุเพาะสูตร ACaMg มีปริมาณ Ca^{2+} ที่ปลดปล่อยออกมาค่อนข้างสม่ำเสมอตั้งแต่รอบน้ำที่ 1 และมีค่าน้อย เนื่องจากใช้ $\text{Ca}_x\text{Mg}_y(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \sim 1\text{M}$ (186 g/L) เป็นสารเชื่อมโยงซึ่งใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า CaCl_2 ในสูตร ACa4 และ ACa2 นอกจากนี้สารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตสังเคราะห์ได้จากโดโลไมต์ ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมต่ำกว่า CaCl_2 ที่ความเข้มข้นโดยมวลเท่ากันเนื่องจากในโดโลไมต์นั้นไม่ได้มีเพียงแคลเซียมหรือแมกนีเซียมเท่านั้น แต่ยังมีโลหะชนิดอื่นปะปนอยู่ด้วย และในการเตรียม $\text{Ca}_x\text{Mg}_y(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \sim 1\text{M}$ (186 g/L) นั้นยังเหลือส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ จึงทำให้ความเข้มข้นของ Ca^{2+} ในสารละลายนี้มีปริมาณน้อยกว่าการคำนวณ อย่างไรก็ตามยังคงสามารถเกิดการเชื่อมโยงกับอัลจินเตตและสามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารในวัสดุเพาะได้ ซึ่งเห็นได้จากรูปที่ 4.5 ที่เปอร์เซ็นต์ของส่วนที่ละลายน้ำได้ยากของวัสดุเพาะสูตร ACaMg มากกว่าเปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายน้ำได้ยากของปุ๋ยดังรูปที่ 4.4

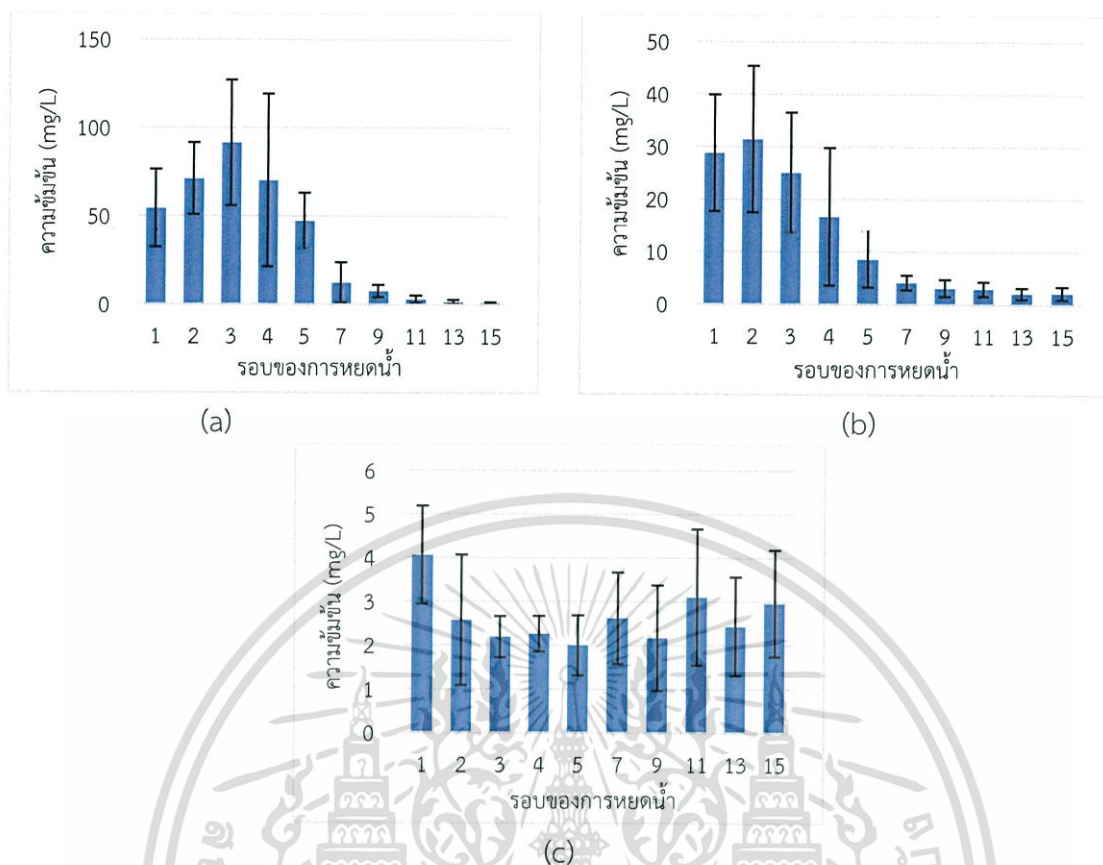
รูปที่ 4.8 เป็นผลการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนจากวัสดุเพาะสูตรต่าง ๆ ในอัตราการหยดน้ำที่เร็วขึ้น คือ 20 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าวัสดุเพาะสูตร ACa4 มีปริมาณการปลดปล่อย Ca^{2+} ในรอบการหยดน้ำที่ 1 ประมาณ 54 mg/L ซึ่งปริมาณ Ca^{2+} ที่ปล่อยออกมาจะเพิ่มขึ้นถึงรอบการหยดน้ำที่ 3 และลดลงจนกระทั่งคั่งที่ในรอบการหยดน้ำที่ 11 ประมาณ 2 mg/L เนื่องจากอัตราการหยดน้ำนี้ น้ำจะผ่านวัสดุเพาะในระยะเวลาที่สั้นทำให้ในรอบแรกน้ำเริ่มซึมเข้าสู่วัสดุเพาะแล้วชะสารที่ละลายได้ออกมาได้บ้าง ในรอบการหยดน้ำถัดไปวัสดุเพาะมีความชื้นตักค้างอยู่ปริมาณมาก เมื่อมีการหยดน้ำแร่ธาตุจึงถูกชะออกมาได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณ Ca^{2+} ปลดปล่อยออกมามากสุดที่รอบน้ำที่ 3 และลดลงตามรอบการหยดน้ำที่มากขึ้น เนื่องจากปริมาณ Ca^{2+} ได้ถูกปลดปล่อยออกไปในรอบการหยดน้ำช่วงสามรอบแรกมาก จึงทำให้ปริมาณ Ca^{2+} ที่ปลดปล่อยออกมาในรอบการหยดน้ำถัดไปมีปริมาณน้อยลง ซึ่งใน วัสดุเพาะสูตร ACa2 มีแนวโน้มในการปลดปล่อย Ca^{2+} ในทำนองเดียวกันกับวัสดุเพาะสูตร ACa4 แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า ดังเหตุผลเดียวกันกับคำอธิบายในกรณีที่ใช้การหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ในส่วนของวัสดุเพาะสูตร ACaMg พบว่าปริมาณ Ca^{2+} ที่ปลดปล่อยออกมาในแต่ละรอบการหยดน้ำไม่แตกต่างกัน ประมาณ 2-4 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบการหยดน้ำทั้ง 2 อัตรา ปริมาณ Ca^{2+} ที่ปลดปล่อยออกมาในอัตรา การหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณมากกว่าอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากใน อัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลาที่วัสดุเพาะสัมผัสกับน้ำน้อยกว่า อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนของอัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที
(a) สูตร A_{Ca4} (b) สูตร A_{Ca2} และ (c) สูตร A_{CaMg}



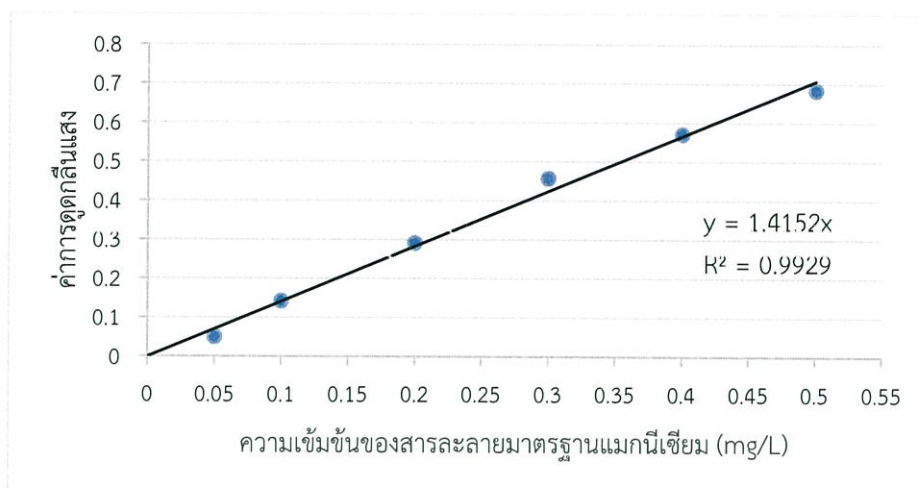
รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนของอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที
(a) สูตร A Ca4 (b) สูตร A Ca2 และ (c) สูตร A CaMg

4.4.2 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยแมกนีเซียมไอออนของวัสดุเพาะ

การศึกษาผลของการปลดปล่อยแมกนีเซียมไอออนของวัสดุเพาะในแต่ละสูตร ทำได้โดยนำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการหยดน้ำผ่านวัสดุเพาะมาวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียมไอออนด้วยเครื่อง AAS วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 285.2 นาโนเมตร และนำค่าที่ได้มาหาปริมาณแมกนีเซียมไอออนจากกราฟมาตรฐาน

4.4.2.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน

จากหัวข้อ 3.8.1.2 จะได้กราฟมาตรฐาน โดยพลอตระหว่างแกน x เป็นความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแมกนีเซียมไอออนกับแกน y เป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานแมกนีเซียมดังรูปที่ 4.9 โดยมีสมการเส้นตรงคือ $y = 1.4152x$, ค่า $R^2 = 0.9929$ ซึ่งสามารถนำกราฟมาตรฐานไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณแมกนีเซียมไอออนของน้ำในแต่ละรอบ



รูปที่ 4.9 กราฟมาตรฐานสารละลายแมกนีเซียมไอออน

4.4.2.2 การคำนวณปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่ปลดปล่อยของวัสดุเพาะ

ตัวอย่าง จากน้ำรอบที่ 1 ของวัสดุเพาะสูตร ACa4 โดยใช้อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรนาที ปิดเปิดน้ำตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร เมื่อนำไปวิเคราะห์จะได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.632

จากสมการของกราฟมาตรฐาน รูปที่ 4.9 $y = 1.4152x$

โดยที่ $y =$ ค่าการดูดกลืนแสง และ

$x =$ ความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมไอออน

ความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมไอออนในน้ำตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ $\frac{0.632}{1.4152} = 0.4466$ mg/L

จากข้อมูลเบื้องต้นได้มีการเจือจางน้ำตัวอย่างเป็น 2 เท่า ดังนั้น น้ำตัวอย่างจากรอบที่ 1 ของวัสดุเพาะสูตร ACa4 จะมีปริมาณแมกนีเซียมไอออนเท่ากับ $0.4466 \times 2 = 0.8932$ mg/L

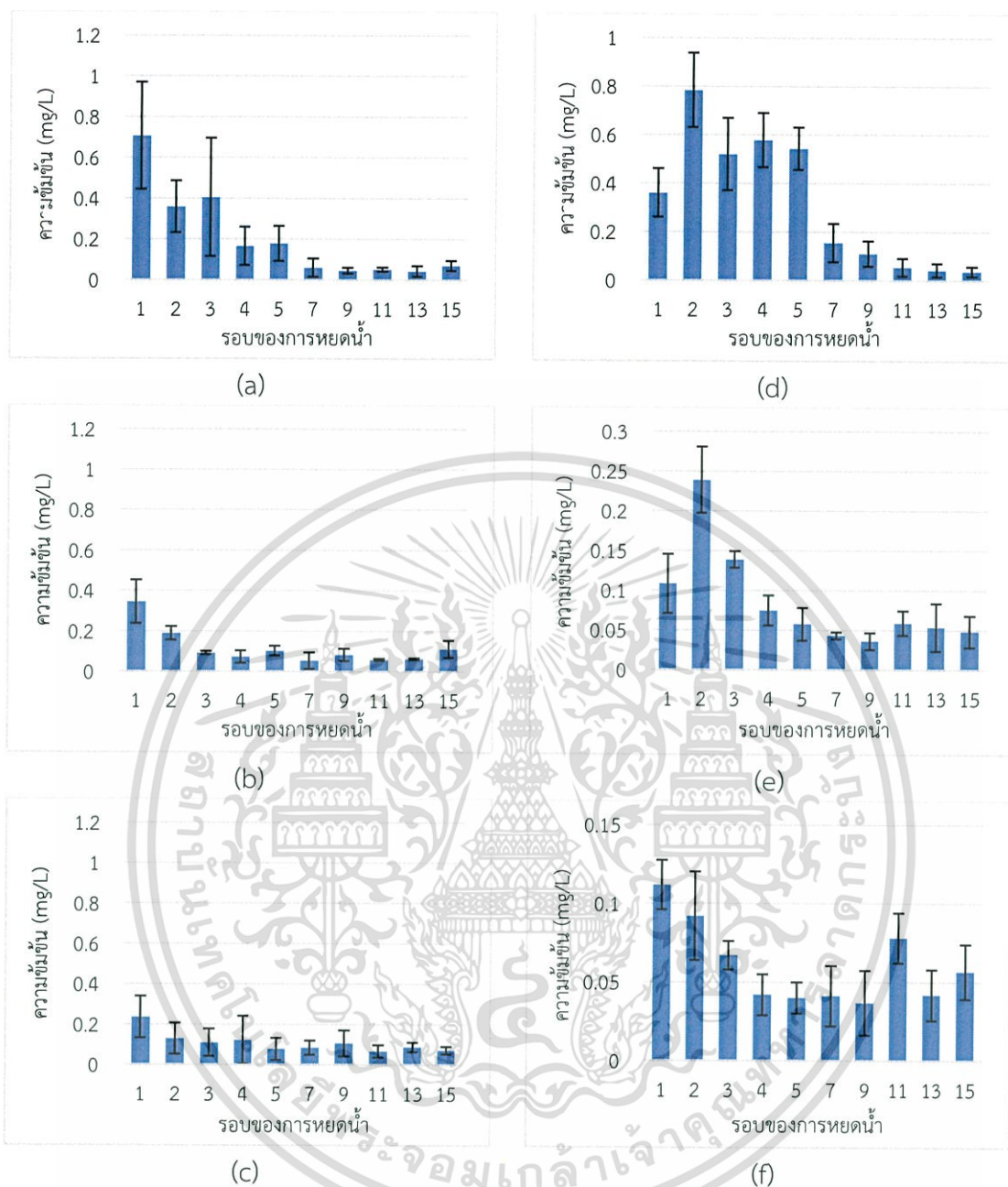
ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยมีปริมาณของแมกนีเซียมไอออนเท่ากับ 0.8932, 0.5215 และ 3.5896 mg/L โดยได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.6681 mg/L ซึ่งวัสดุเพาะสูตรอื่น ๆ แสดงการคำนวณในทำนองเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยปริมาณแมกนีเซียมไอออนของแต่ละรอบ แสดงดังภาคผนวก ข

4.4.2.3 ผลของการปลดปล่อยแมกนีเซียมไอออนของวัสดุเพาะ

รูปที่ 4.10 แสดงผลการปลดปล่อยปริมาณแมกนีเซียมไอออนของวัสดุเพาะสูตรต่าง ๆ โดยพบว่าในวัสดุเพาะทุกสูตรมีปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่ปลดปล่อยออกมาค่อนข้างน้อยในรอบการหยดน้ำรอบแรก ๆ และเริ่มคงที่หลังรอบการหยดน้ำที่ 3 โดยมีแนวโน้มการปลดปล่อยแมกนีเซียมไอออนมากที่สุดเพียง 0.7-0.8 mg/L (วัสดุเพาะสูตร ACa4) แสดงให้เห็นว่าสูตรวัสดุเพาะที่เตรียมขึ้น มีปริมาณแมกนีเซียมไอออนน้อยกว่าปริมาณแคลเซียมไอออนมาก เมื่อเปรียบเทียบการหยดน้ำทั้ง 2 อัตรา ปริมาณแมกนีเซียมไอออนที่ปลดปล่อยออกมาในอัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีปริมาณมากกว่าอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากในอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที วัสดุเพาะจะมีระยะเวลาสัมผัสกับน้ำน้อยกว่าอัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 พฤติกรรมการปลดปล่อยของแมกนีเซียมไอออน เมื่อใช้อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อ นาที ของวัสดุเพาะ (a) สูตร ACa4 (b) สูตร ACa2 (c) สูตร ACaMg และอัตราการหยด น้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะ (d) สูตร ACa4 (e) สูตร ACa2 และ (f) สูตร ACaMg

4.4.3 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนของวัสดุเพาะ

การศึกษาผลของการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนของวัสดุเพาะแต่ละสูตร ทำได้โดยนำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการหยดน้ำผ่านวัสดุเพาะมาวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนด้วยวิธีการดูดสเปกโตรเมทรีด้วยเครื่อง UV-vis วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่น 880.0 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนจากกราฟมาตรฐาน

4.4.3.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออน

จากหัวข้อ 3.8.1.3 จะได้กราฟมาตรฐาน โดยพลอตระหว่างแกน x เป็นความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตกับแกน y เป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

การคำนวณ

ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนจากสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในข้อ 3.3.5

สารละลาย KH_2PO_4 1000 ml มี KH_2PO_4 219.5 mg

สารละลาย KH_2PO_4 1 ml มี $\text{KH}_2\text{PO}_4 \frac{219.5 \times 1}{1000} = 219.5 \times 10^{-3}$ mg

ดังนั้น ในสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 1 มิลลิลิตรจะมีปริมาณ KH_2PO_4 219.5×10^{-6} กรัม

KH_2PO_4 136 g จะมีฟอสฟอรัสในรูปของ PO_4^{3-} 31 g

KH_2PO_4 219.5×10^{-6} g จะมีฟอสฟอรัสในรูปของ $\text{PO}_4^{3-} \frac{219.5 \times 10^{-6} \times 31}{136} = 50$ $\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$

ดังนั้น ในสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 1 มิลลิลิตรจะมีฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออน $50 \mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$

ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนจากการนำสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในข้อ 3.3.5 มา 40 มิลลิลิตรแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 มิลลิลิตร

สารละลาย KH_2PO_4 1000 ml มีฟอสฟอรัสในรูปของ PO_4^{3-} $50 \mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$

สารละลาย KH_2PO_4 40 ml มีฟอสฟอรัสในรูปของ $\text{PO}_4^{3-} \frac{50 \times 40}{1000} = 2 \mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$

ดังนั้น ในขั้นตอนนี้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ได้ 1 มิลลิลิตรจะมีฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออน $2 \mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$

ตัวอย่าง การคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตใช้สำหรับเป็นสารมาตรฐานสำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-vis นำสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (สารนี้ 1 ml = $2 \mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P}$) มา 1 มิลลิลิตรปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

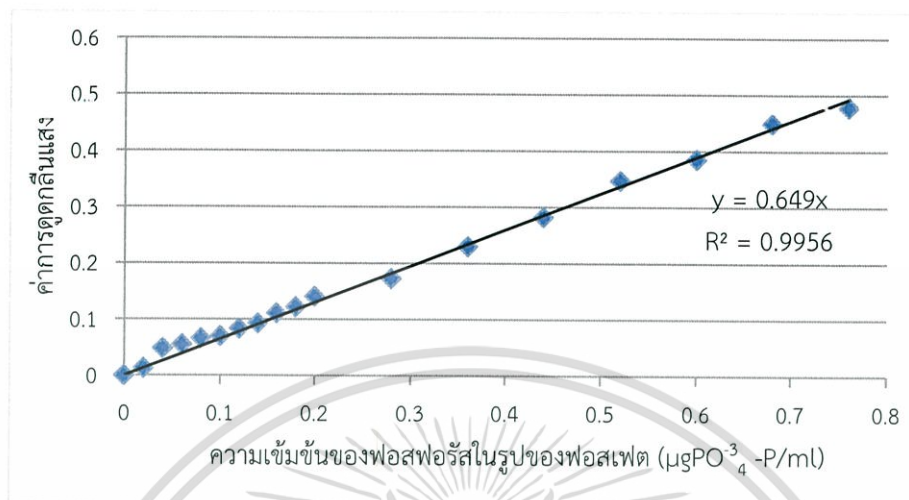
สารละลาย KH_2PO_4 100 ml มีฟอสฟอรัสในรูปของ PO_4^{3-} $2 \mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$

สารละลาย KH_2PO_4 1 ml มีฟอสฟอรัสในรูปของ $\text{PO}_4^{3-} \frac{2 \times 1}{100} = 0.02 \mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$

ดังนั้น ในขั้นตอนนี้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ได้ 1 มิลลิลิตรจะมีฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออน $0.02 \mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$

จากหัวข้อ 3.8.1.3 นำสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้นต่าง ๆ มาวัดค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟมาตรฐาน โดยพลอตระหว่างแกน x เป็นความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนกับแกน y เป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ดังรูปที่ 4.11 โดยมีสมการเส้นตรงคือ $y =$ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$0.649x$, ค่า $R^2 = 0.9956$ ซึ่งสามารถนำกราฟมาตรฐานไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนของน้ำในแต่ละรอบ



รูปที่ 4.11 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออน

4.4.3.2 การคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของฟอสเฟตไอออนของวัสดุเพาะ

ตัวอย่าง จากน้ำรอบที่ 1 ของวัสดุเพาะสูตร ACa4 โดยใช้อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อนำไปวิเคราะห์จะได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.197

จากสมการของกราฟมาตรฐาน รูปที่ 4.11 $y = 0.649x$

โดยที่ y = ค่าการดูดกลืนแสง และ

x = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออน

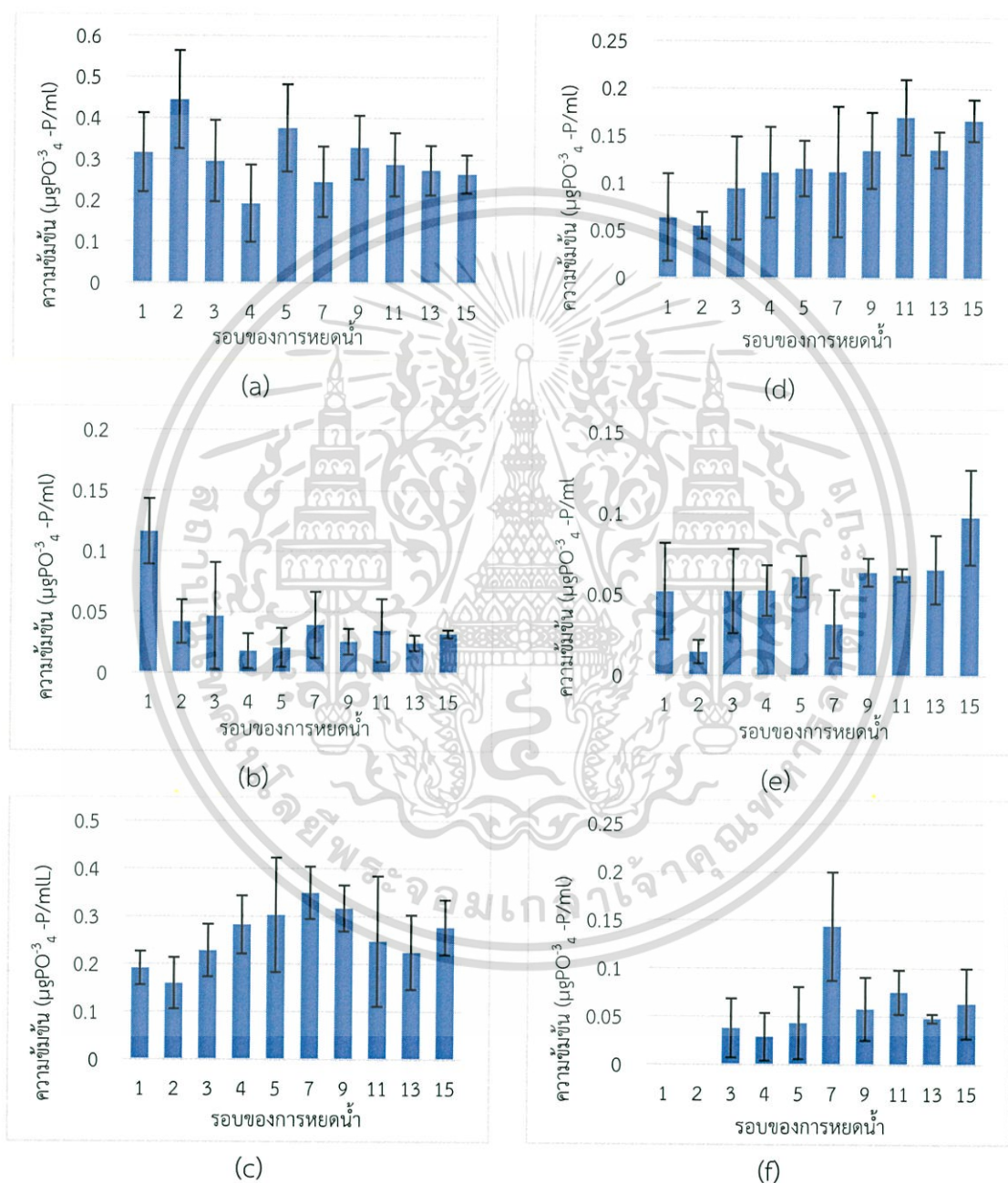
ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนในน้ำตัวอย่างมีค่าเท่ากับ $\frac{0.197}{0.649} = 0.3035 \mu\text{gPO}_4^{3-}\text{-P/ml}$

ทำการทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ โดยมีปริมาณของฟอสเฟตไอออนเท่ากับ 0.3035, 0.2504, 0.3105, 0.2720 และ 0.2381 $\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{-P/ml}$ โดยได้ค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.2749 $\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{-P/ml}$ วัสดุเพาะสูตรต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสเฟตไอออนของแต่ละรอบ แสดงดังภาคผนวก ข

4.4.3.3 ผลของการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออนของวัสดุเพาะ

จากรูปที่ 4.12 พบว่าวัสดุเพาะในแต่ละสูตรมีแนวโน้มในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสค่อนข้างคงที่ตั้งแต่รอบการหยดน้ำที่ 1 โดยพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของฟอสเฟตไอออนมีปริมาณน้อย คาดว่าสูตรปุ๋ยที่เตรียมขึ้นมาได้ มีปริมาณฟอสเฟตไอออนในรูปที่ละลายน้ำได้ยากค่อนข้างมาก เช่น $\text{Ca}(\text{PO})_4$, CaHPO_4 , และ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$ จึงทำให้ฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมามีปริมาณน้อย เมื่อเปรียบเทียบการหยดน้ำทั้ง 2 อัตรา ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของฟอสเฟตไอออนในอัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณมากกว่าอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากในอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที

วัสดุเพาะมีระยะเวลาสัมผัสกับน้ำน้อยกว่าอัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าในรอบการหยดน้ำแรก ๆ ในอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที มีปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัสค่อนข้างต่ำ เนื่องจากในรอบแรก ๆ ของการหยดน้ำ วัสดุเพาะแห้ง เมื่อสัมผัสกับน้ำในรอบแรก ๆ จึงเป็นการดูดซับน้ำเข้าไปในวัสดุเพาะมากกว่าที่จะมีการปลดปล่อยธาตุต่าง ๆ ออกมา ซึ่งสอดคล้องกับผลของการปลดปล่อยแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน



รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการปลดปล่อยของฟอสฟอรัสในรูปแบบฟอสเฟตไอออน เมื่อใช้อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะ (a) สูตร ACa4 (b) สูตร ACa2 (c) สูตร ACaMg และอัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะ (d) สูตร ACa4 (e) สูตร ACa2 และ (f) สูตร ACaMg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การหาปริมาณธาตุอาหารในวัสดุเพาะ

การหาปริมาณธาตุอาหารในวัสดุเพาะ โดยนำวัสดุเพาะที่ผ่านการหยดน้ำจากข้อ 3.8.1 มาเร่งการละลายโดยให้ความร้อนที่ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปเข้าเครื่อง Ultrasonic Cleaner 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำตัวอย่างที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนส่วนที่ละลายช้าของวัสดุเพาะในแต่ละสูตรด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 422.7 และ 285.2 นาโนเมตร ตามลำดับ ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสส่วนที่ละลายช้าของวัสดุเพาะในแต่ละสูตรด้วยวิธีกรดแอสคอบิก ใช้เครื่อง UV-vis ที่ความยาวคลื่น 880.0 นาโนเมตร โดยปริมาณธาตุอาหารในวัสดุเพาะ คำนวณได้จากผลรวมของปริมาณธาตุอาหารที่ปลดปล่อยของวัสดุเพาะในทุกรอบของการหยดน้ำซึ่งนิยามให้เป็นส่วนที่ละลายน้ำได้ง่ายกับปริมาณธาตุอาหารส่วนที่ละลายน้ำได้ช้าของวัสดุเพาะ

ตัวอย่าง วัสดุเพาะสูตร ACa4 จากข้อมูลใน ภาคผนวก ข

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณแคลเซียมไอออนในวัสดุเพาะ} &= \text{ส่วนที่ละลายน้ำได้ง่าย} + \text{ส่วนที่ละลายน้ำได้ช้า} \\ &= 585.4630 + 79.8611 = 665.3241 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ตรวจวัดมีปริมาตร 20 มิลลิลิตร ดังนั้น จะมีปริมาณแคลเซียมไอออนในวัสดุเพาะ

$$\text{เท่ากับ } \frac{665.3241 \text{ mg}}{1\text{L}} \times \frac{1\text{L}}{1000 \text{ ml}} \times 20 \text{ ml} = 13.3065 \text{ mg}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณแมกนีเซียมไอออนในวัสดุเพาะ} &= \text{ส่วนที่ละลายน้ำได้ง่าย} + \text{ส่วนที่ละลายน้ำได้ช้า} \\ &= 1.9557 + 6.1299 = 4.8905 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ตรวจวัดมีปริมาตร 20 มิลลิลิตร ดังนั้น จะมีปริมาณแมกนีเซียมไอออนในวัสดุเพาะ

$$\text{เท่ากับ } \frac{4.8905 \text{ mg}}{1\text{L}} \times \frac{1\text{L}}{1000 \text{ ml}} \times 20 \text{ ml} = 0.0978 \text{ mg}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณฟอสฟอรัสในวัสดุเพาะ} &= \text{ส่วนที่ละลายน้ำได้ง่าย} + \text{ส่วนที่ละลายน้ำได้ช้า} \\ &= 4.7488 + 8.1587 = 12.9075 \text{ } \mu\text{gPO}_4^{-3} \text{ -P/ml} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ตรวจวัดมีปริมาตร 20 มิลลิลิตร ดังนั้น จะมีปริมาณฟอสฟอรัสในวัสดุเพาะ

$$\text{เท่ากับ } \frac{12.9075 \text{ } \mu\text{gPO}_4^{-3} \text{ -P}}{1\text{ml}} \times 20 \text{ ml} = 258.1500 \text{ } \mu\text{gPO}_4^{-3} \text{ -P}$$

โดยสูตรอื่น ๆ แสดงการคำนวณในทำนองเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยปริมาณแคลเซียมแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสในวัสดุเพาะแต่ละสูตร แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสของวัสดุเพาะแต่ละสูตรที่อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาที

สูตร	ปริมาณแคลเซียมไอออน ในวัสดุเพาะ (mg)	ปริมาณแมกนีเซียม ไอออนในวัสดุเพาะ (mg)	ปริมาณฟอสฟอรัสใน วัสดุเพาะ ($\mu\text{gPO}_4^{-3} \text{ -P}$)
ACa4	13.3065	0.0978	258.1500
ACa2	6.5000	0.1151	50.5120
ACaMg	2.7000	0.1063	294.5940

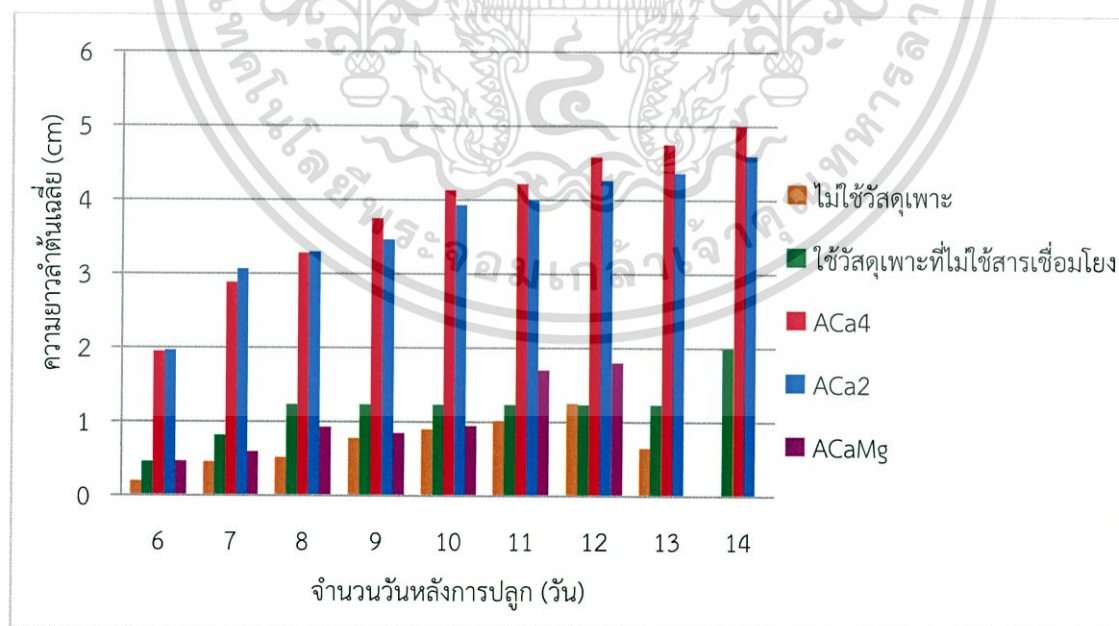
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสของวัสดุเพาะแต่ละสูตรที่อัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาที

สูตร	ปริมาณแคลเซียมไอออน ในวัสดุเพาะ (mg)	ปริมาณแมกนีเซียม ไอออนในวัสดุเพาะ (mg)	ปริมาณฟอสฟอรัสใน วัสดุเพาะ ($\mu\text{gPO}_4^{-3}-\text{P}$)
ACa4	8.9000	0.0866	205.6440
ACa2	3.3000	0.0480	175.7900
ACaMg	1.4000	0.0240	207.5640

4.6 การศึกษาประสิทธิภาพเบื้องต้นของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งใน เจลดินวิทยาศาสตร์

ประสิทธิภาพของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของพืชทดสอบได้โดยการนำวัสดุเพาะสูตรต่าง ๆ มาทดลองปลูก แล้วศึกษาการเจริญเติบโตของพืชด้วยการวัดความยาวลำต้นเพื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโต ระหว่างวัสดุเพาะที่มีการเชื่อมโยงแตกต่างกัน วัสดุเพาะที่ไม่มีการใช้สารเชื่อมโยง และการไม่ใช้วัสดุเพาะในการปลูก ซึ่งพืชที่ใช้ในการทดลองคือผักบุ้งจีน เนื่องจากเป็นพืชที่มีอายุสั้นและมีการเจริญเติบโตเร็ว ในการทดลองนี้จะใช้เจลดินวิทยาศาสตร์แทนดินตามธรรมชาติเพื่อให้ผักบุ้งที่ทดลองนั้นได้รับธาตุอาหารจากวัสดุเพาะที่เตรียมได้เพียงทางเดียว ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้เมล็ดผักบุ้ง 1 เมล็ดต่อวัสดุเพาะ 1 เม็ด จากนั้นทำการรดน้ำปริมาณ 10 มิลลิลิตรวันละ 1 รอบและวางไว้ในบริเวณที่มีแดดส่องถึงเป็นเวลา 7 ชั่วโมงต่อวัน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงอัตราการเจริญเติบโตของผักบุ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 แสดงอัตราการเจริญเติบโตของผักบุ้งในเจลดินวิทยาศาสตร์ พบว่าในวัสดุเพาะสูตร ACa4 และ ACa2 มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามจำนวนวันที่ปลูก และวัสดุเพาะสูตร ACa4 มีความยาวลำต้นเฉลี่ยสูงสุด สำหรับสูตรที่ไม่ใช้สารเชื่อมโยง อัตราการเจริญเติบโตจะเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่อผ่านไป 8 วัน คาดว่าธาตุอาหารได้ถูกชะออกไปจนไม่เหลือแร่ธาตุที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต สำหรับพืชที่ใช้วัสดุเพาะสูตร ACaMg พืชมีแนวโน้มของการเจริญเติบโตในช่วงแรก (10 วัน) ช้ากว่าพืชที่ใช้วัสดุเพาะที่ไม่มีการเชื่อมโยง เนื่องจากธาตุอาหารถูกกักไว้ในโครงสร้างที่ถูกเชื่อมโยง ทำให้การปลดปล่อยธาตุอาหารช้าลง โดยพืชที่ใช้วัสดุเพาะสูตร ACaMg มีการเติบโตได้ดีกว่าพืชที่ใช้วัสดุเพาะที่ไม่มีการเชื่อมโยง หลังวันที่ 10 และในกรณีของพืชที่ไม่มีการใช้วัสดุเพาะจะมีอัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มขึ้นและจะคงที่ในช่วงหนึ่ง จากนั้นพืชจะค่อย ๆ ตายไปในที่สุดเนื่องจากไม่มีธาตุอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโต ส่วนพืชที่ใช้วัสดุเพาะ ACa4 และ ACa2 มีการเจริญเติบโตสูงกว่าสถานะอื่น ๆ คาดว่าเนื่องจากวัสดุเพาะทั้ง 2 สูตร มีปริมาณแคลเซียมส่วนที่เหลือจากการเชื่อมโยงจำนวนมากในรูปของแคลเซียมคลอไรด์ จึงทำให้ต้นพืชได้แคลเซียมจากส่วนนี้ ช่วยให้การเจริญเติบโต รวดเร็วกว่าสถานะการปลูกอื่น และยังพบว่าสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้อีกหลังจากการทดลองปลูก 15 วัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะจากโซเดียมอัลจิเนต โดยเตรียมวัสดุเพาะจากการผสมโซเดียมอัลจิเนตกับสูตรปุ๋ยที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตและสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต แล้วขึ้นรูปเป็นวัสดุเพาะ จากนั้นเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 โมลาร์ หรือสารละลายแคลเซียมแมกนีเซียมอะซิเตตความเข้มข้นประมาณ 1 โมลาร์ (186 g/L) โดยศึกษาสภาพการละลายและพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารของวัสดุเพาะที่อัตราการหยดน้ำ 2 อัตราคือ 4 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที ตรวจวิเคราะห์แคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนด้วยเครื่อง AAS และตรวจวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตไอออนด้วยเครื่อง UV-vis นอกจากนี้ยังศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง โดยผลของการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

การสังเคราะห์สูตรปุ๋ย

จากการสังเคราะห์สูตรปุ๋ย พบว่ามีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 65.09 % โดยน้ำหนัก และจากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าสูตรปุ๋ยเป็นสารผสมที่ประกอบด้วยแคลเซียม ฟอสฟอรัส และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังพบธาตุอะลูมิเนียม ซิลิกอนและแมกนีเซียมในปริมาณต่ำ จากเทคนิค XRD พบว่าสูตรปุ๋ยที่เตรียมได้เป็นสารผสมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตไดไฮเดรต และเทคนิค FTIR พบว่ามีหมู่แอมโมเนียม หมู่ฟอสเฟต และโมเลกุลน้ำในโครงสร้าง

วัสดุเพาะและพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหาร

วัสดุเพาะที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรมีลักษณะที่เหมือนกันคือ เป็นทรงกลมแข็ง ผิวมีรูพรุน สีขาวขุ่นจากการตรวจสอบสภาพการละลายของวัสดุเพาะ พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของส่วนที่ละลายน้ำได้ง่าย : ส่วนที่ละลายน้ำได้ช้า : ส่วนที่ละลายน้ำได้ยาก ของวัสดุเพาะสูตร A_{Ca}4, A_{Ca}2 และ A_{Ca}Mg มีค่าเท่ากับ 32 : 13 : 55 , 32 : 16 : 52 และ 20 : 29 : 51 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าส่วนที่ละลายน้ำได้ง่ายมีค่าลดลงอย่างมาก และส่วนที่ละลายน้ำได้ยากมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรปุ๋ย (มีค่าเท่ากับ 74 : 12 : 14) จากผลการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหาร 3 ชนิดคือ แคลเซียม แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตไอออน ในอัตราการหยดน้ำทั้ง 2 อัตรา พบว่าวัสดุเพาะทุกสูตรมีแนวโน้มในการปลดปล่อยที่เหมือนกัน โดยช่วงแรกมีการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนในปริมาณมากและลดลงจนกระทั่งคงที่เมื่อรอบการหยดน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสปลดปล่อยออกมาในปริมาณน้อย และค่อนข้างคงที่

การศึกษาเบื้องต้นถึงประสิทธิภาพของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง

จากผลการเจริญเติบโตของผักบุ้งที่ปลูกในเจลดินวิทยาศาสตร์พบว่า ผักบุ้งที่มีการใช้วัสดุเพาะมีความยาวลำต้นเฉลี่ยสูงกว่าผักบุ้งที่ไม่ใช้วัสดุเพาะ โดยวัสดุเพาะที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (ACa4) มีความยาวลำต้นเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุเพาะสูตรอื่น ๆ จึงสรุปได้ว่าวัสดุเพาะสูตร ACa4 มีประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งในเจลดินวิทยาศาสตร์ดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เปลี่ยนชนิดธาตุอาหารในปุ๋ยให้มีธาตุอาหารครบตามความต้องการของพืชและวิเคราะห์ธาตุอาหาร
2. เพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมโยงโดยปรับเปลี่ยนชนิดและความเข้มข้นของสารเชื่อมโยง เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต และโซเดียมเทตระบอเรต
3. เปลี่ยนชนิดของพืชและสภาวะการเพาะปลูกในการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตของพืช



เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เรียนรู้ปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงและเกษตรทฤษฎีใหม่. 2015. พีทมอส. [Online]. Available : <http://www.kasetkawna.com/article/143/พีทมอส>.
- [2] ภูษิต จันทาวุฒิ. 2558. “ผลของน้ำมันทั้งต่อการควบคุมการปลดปล่อยโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจิเนต/กัวร์กัม.” ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Z. Zipei, Z. Ruojie, Z. Liqiang and David Julian McClements. 2016. “Protein encapsulation in alginate hydrogel beads: Effect of pH on microgel stability, protein retention and protein release.” *Food Hydrocolloids*. 58 : 308-315.
- [4] สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน. 2535. คู่มือการปรับปรุงดินและการใช้ปุ๋ย. กรุงเทพฯ : ศูนย์การพิมพ์พลชัย.
- [5] มุกดา สุขสวัสดิ์. 2547. ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- [6] ยงยุทธ โอสถสกา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชวลิต ฮงประยูร. 2551. ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [7] N.W. Hummel. 1989. “Resin-coated urea evaluation for turfgrass fertilization.” *Agronomy Journal* 81 : 290-294.
- [8] A. Shaviv. 2011. “Advances in controlled-release fertilizer.” *Advances in Agronomy*. 71 : 1-49.
- [9] ฉัญญภรณ์ ศรีสุบิน. 2557. สารละลาย ไฮโดรเจล วัสดุดูดซับน้ำอัจฉริยะ. [Online]. Available : <http://www.dss.go.th/images/st-article/ct-10-2557-hydro.pdf>
- [10] Y. Lui, M. Huglin and R. Mao. 1996. “Characteristics of Copolymerization involving Dimethacrylamide and Swelling Behavior of the Copolymers in water.” *Polymer*. 37 : 5069-5075.
- [11] วารุณี ดานันตและสายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. “พอลิเมอร์ดูดซับน้ำไดมาก การสังเคราะห์การวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี*. 16(2) : 63-81.
- [12] D. Magnin, J. Lefebvre, E. Chornet and S. Dumitriu. 2004. “Physicochemical and structural characterization of a polyionic matrix of interest in biotechnology, in the pharmaceutical and biomedical fields.” *Carbohydrate Polymers*. 55 : 437-453.
- [13] C. Xiao and Y. Gao. 2008. “Preparation and properties of physically crosslinked sodium carboxymethyl-cellulose/poly(vinyl alcohol) complex hydrogels.” *Journal of Applied Polymer Science*. 107(3) : 1568-1572.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] L. Zhihui, W. Wenhui, W. Jianquan and J. Xin. 2007. "Swelling behaviors, tensile properties and thermodynamic interactions in APS/HEMA copolymeric hydrogels." *Frontiers of Materials Science in China*. 1(4) : 427-431.
- [15] K.L. Shantha and D.R.K. Harding. 2000. "Preparation and in-vitro evaluation of poly[Nvinyl-2-pyrrolidone-polyethylene glycol diacrylate]-chitosan interpolymeric pH responsive hydrogels for oral drug delivery." *International Journal of Pharmaceutics*. 207. 65–70.
- [16] W. Duan, C. Chen, L. Jiang and G.H. Li. 2008. "Preparation and characterization of the graft copolymer of chitosan with poly [rosin(2acryloyloxy)ethylester]." *Carbohydrate Polymers*. 73(4) : 582–586.
- [17] L.G. Sheng, S. Lin-Gibson, S. Bencherif, J.A. Cooper, S.J. Wetzel, J.M. Antonucci, B.M. Vogel, F. Horkay and N.R. Washburn. 2004. "Synthesis and Characterization of PEG Dimethacrylates and Their Hydrogels." *Biomacromolecules*. 5(4) : 1280–1287.
- [18] J. Guent. 1992. "Thermoreversible Gelation of Polymers and Biopolymer." London : Academic Press.
- [19] G.O. Phillips and P.A. Williams. 2000. "Handbook of hydrocolloids." New York : CRC Press.
- [20] S.K. Bajpai and S. Sharma. 2004. "Investigation of swelling/degradation behaviour of alginate beads crosslinked with Ca^{2+} and Ba^{2+} ions." *Reactive and Functional polymers*. 59. 129–140.
- [21] ภัทราวุธ มนต์วิเศษ. 2556. เอกสารการสอนวิชาไบโอพอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] กัมปนาท ทลลุดตา และธนิกานต์ แสงน้อม. 2556. "การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ที่ได้จากทรัพยากรทางทะเลในทางเภสัชกรรม." *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 18(2) : 263-273.
- [23] ประพันธ์ ปารีชาตวุฒิกุล, มาริศา ว่องกิตติสิน, และเมธวี เมธวานิช. 2559. "การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดบีดจากอัลจิเนต." *โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [24] นลินา ประไพรัชสิทธิ์ และพรั้มภา งามศิริ. 2550. "การเตรียมและศึกษาการปลดปล่อยแบบควบคุมของยาอะม็อกซิซิลลินจากบีดอัลจิเนต-โคโตซาน." *วารสารวิทยาศาสตร์ ภาควิชาชีววิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 23(2) : 39-52.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] เฉลิมขวัญ เวชสกุล, เบญจรัตน์ วุฒิจิตรมงคล และฝัสมพร ช่วยศรี. 2555. “การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตและกัวร์กัมเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] ไพลิน นิมิตรพรชัย, ศศิวรรณ วิมลมนัส และอังศนา ประจักษ์แสงสิริ. 2557. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของเม็ดไฮโดรเจลระหว่างโคโตซานและแซนแทนกัม.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] พีรพงศ์ หาญพิชาญชัย. 2545. “การควบคุมการปลดปล่อยของเม็ดปุ๋ยโดยการเคลือบโคโตซาน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [28] วริษฐา แสงฤทธิ์. 2547. “ปุ๋ยที่เคลือบด้วยน้ำมันชักแห้งเพื่อการปลดปล่อยแบบควบคุม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [29] ธัญลักษณ์ อาษานอก, ปองพล อุดมชัยเดช และสิงห์ สันแสนดี. 2556. “การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตและแซนแทน.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] ดุษฎี อุดภาพ. 2555. Carbohydrate Technology. [online]. Available : <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter4.html>.
- [31] ปิยะธิดา หะสีตะพงษ์. 2558 “การควบคุมการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์กำจัดวัชพืชจากไบประยงค์ด้วยไฮโดรเจลอัลจินต” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] สุเมธ รอดหิรัญ และธรรมศักดิ์ ทองเกตุ. 2557. “การพัฒนาขุยมะพร้าวหมักเป็นวัสดุเพาะต้นกล้าแตงกวา.” *แก่นเกษตร*. 42(3) : 835-839.
- [33] K. Suguna and C. Sekar. 2011. “Role of Strontium on the Crystallization of Calcium Hydrogen Phosphate Dihydrate (CHPD).” *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 10(7) : 625-636.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่าความหนาแน่นของวัสดุเพาะ

ตารางที่ ก1 ค่าความหนาแน่นของวัสดุเพาะสูตร A_{Ca}4

เม็ดที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.1396	0.7100	0.1875	0.7446
2	0.1333	0.7000	0.1797	0.7419
3	0.1202	0.7000	0.1797	0.6690
4	0.1304	0.7000	0.1797	0.7258
5	0.1208	0.6700	0.1575	0.7668
เฉลี่ย	0.1289	0.6960	0.1768	0.7296

ตารางที่ ก2 ค่าความหนาแน่นของวัสดุเพาะสูตร A_{Ca}2

เม็ดที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.1096	0.7600	0.2299	0.4766
2	0.1134	0.7500	0.2210	0.5132
3	0.1175	0.7600	0.2299	0.5110
4	0.1138	0.7600	0.2299	0.4949
5	0.1111	0.7350	0.2080	0.5342
เฉลี่ย	0.1131	0.7530	0.2238	0.5060

ตารางที่ ก3 ค่าความหนาแน่นของวัสดุเพาะสูตร A_{Ca}Mg

เม็ดที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	0.1080	0.7200	0.5524	0.1955
2	0.1033	0.7100	0.5510	0.1875
3	0.1023	0.7200	0.5232	0.1955
4	0.0972	0.7000	0.5410	0.1797
5	0.1004	0.7400	0.4730	0.2123
เฉลี่ย	0.1022	0.7180	0.5281	0.1941

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก4 สภาพการละลายของปุ๋ยและวัสดุเพาะ

สูตร	น้ำหนักก่อน ทดสอบ (g)	น้ำหนักที่ เหลืออยู่หลัง ปลดปล่อย (g)	ส่วนที่ละลาย น้ำได้ง่าย (g)	ส่วนที่ละลาย น้ำได้ช้า (g)	ส่วนที่ละลาย น้ำได้ยาก (g)
ปุ๋ย	0.1061	0.0275	0.0786	0.0131	0.0144
ACa4	0.1363	0.0918	0.0445	0.0188	0.0730
ACa2	0.1521	0.1037	0.0484	0.0237	0.0799
ACaMg	0.0968	0.0777	0.0190	0.0284	0.0493



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ปริมาณธาตุอาหารเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากวัสดุเพาะ

ตารางที่ ข1 ปริมาณธาตุอาหารที่ละลายได้ที่อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะสูตร ACa4

รอบน้ำ	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณแมกนีเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสใน รูปฟอสเฟตไอออน ($\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$)
1	253.7037	0.7073	0.3162
2	143.0556	0.3593	0.4448
3	98.6111	0.4054	0.2955
4	39.0741	0.1658	0.1926
5	15.8333	0.1785	0.3760
7	3.7407	0.0605	0.2455
9	3.1759	0.0462	0.3291
11	3.9722	0.0521	0.2876
13	2.9815	0.0433	0.2740
15	2.9815	0.0702	0.2650
รอบรวม	18.3333	0.2226	1.7227
รวม	585.4630	1.9557	4.7488

ตารางที่ ข2 ปริมาณธาตุอาหารที่ละลายได้ที่อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะสูตร ACa2

รอบน้ำ	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณแมกนีเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสใน รูปฟอสเฟตไอออน ($\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$)
1	161.8056	0.3451	0.1162
2	42.6389	0.1894	0.0421
3	39.7222	0.0921	0.0467
4	22.9630	0.0725	0.0180
5	17.5000	0.1020	0.0208
7	6.4074	0.0537	0.0394
9	5.6389	0.0824	0.0257
11	6.5648	0.0584	0.0350
13	4.3056	0.0624	0.0247
15	5.2685	0.1121	0.0322
รอบรวม	30.4630	0.4110	0.2504
รวม	275.1296	1.5812	0.6512

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้ภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่สู่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข3 ปริมาณธาตุอาหารที่ละลายได้ที่อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะสูตร ACaMg

รอบน้ำ	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณแมกนีเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสใน รูปฟอสเฟตไอออน ($\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$)
1	6.6759	0.2358	0.1911
2	5.5463	0.1288	0.1595
3	6.6111	0.1095	0.2282
4	8.7963	0.1225	0.2825
5	5.5463	0.0780	0.3028
7	6.1759	0.0846	0.3494
9	5.9630	0.1055	0.3169
11	4.9907	0.0674	0.2475
13	4.4167	0.0871	0.2246
15	4.7685	0.0718	0.2772
รอบรวม	28.7500	0.3721	1.3746
รวม	88.2407	1.4632	3.9544

ตารางที่ ข4 ปริมาณธาตุอาหารที่ละลายได้ที่อัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะสูตร ACa4

รอบน้ำ	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณแมกนีเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสใน รูปฟอสเฟตไอออน ($\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$)
1	54.3750	0.3606	0.0636
2	71.1806	0.7839	0.0551
3	91.4583	0.5201	0.0946
4	70.2083	0.5785	0.1115
5	47.3611	0.5432	0.1158
7	12.4028	0.1547	0.1121
9	7.6458	0.1101	0.1348
11	2.9097	0.0546	0.1699
13	1.4792	0.0426	0.1356
15	1.1458	0.0370	0.1666
รอบรวม	55.2431	0.5768	1.1518
รวม	415.4097	3.1755	2.3112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข5 ปริมาณธาตุอาหารที่ละลายได้ที่อัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะสูตร ACa2

รอบน้ำ	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณแมกนีเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสใน รูปฟอสเฟตไอออน ($\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$)
1	28.7778	0.1083	0.0518
2	31.4444	0.2388	0.0146
3	25.1056	0.1387	0.0522
4	16.6778	0.0747	0.0526
5	8.5778	0.0575	0.0612
7	4.1333	0.0431	0.0320
9	3.1278	0.0360	0.0639
11	2.9778	0.0589	0.0622
13	2.1056	0.0537	0.0657
15	2.1889	0.0483	0.0980
รอบรวม	22.6944	0.2567	0.3467
รวม	147.8111	1.1148	0.8879

ตารางที่ ข6 ปริมาณธาตุอาหารที่ละลายได้ที่อัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อนาทีของวัสดุเพาะสูตร ACaMg

รอบน้ำ	ปริมาณแคลเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณแมกนีเซียม ไอออน (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสใน รูปฟอสเฟตไอออน ($\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$)
1	4.0625	0.1119	0.0000
2	2.5764	0.0921	0.0000
3	2.1944	0.0671	0.0378
4	2.2639	0.0420	0.0290
5	2.0000	0.0400	0.0432
7	2.6250	0.0413	0.1436
9	2.1736	0.0369	0.0579
11	3.1042	0.0782	0.0754
13	2.4375	0.0419	0.0484
15	2.9653	0.0567	0.0638
รอบรวม	16.8750	0.2314	1.6970
รวม	43.2778	0.7423	2.0097

หมายเหตุ รอบรวมหมายถึง น้ำตัวอย่างที่รวมน้ำในรอบการหยดน้ำที่ 6, 8, 10, 12 และ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับบริการเชิงพาณิชย์ ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข7 ปริมาณธาตุอาหารส่วนที่ละลายน้ำได้ซ้ำของวัสดุเพาะที่อัตราการหยดน้ำ 4 มิลลิลิตรต่อ นาที

สูตร	ปริมาณแคลเซียมไอออน (mg/L)	ปริมาณแมกนีเซียมไอออน (mg/l)	ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตไอออน ($\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$)
ACa4	79.8611	6.1299	8.1587
ACa2	51.2222	4.3192	1.8744
ACaMg	46.4861	3.8510	10.7753

ตารางที่ ข8 ปริมาณธาตุอาหารส่วนที่ละลายน้ำได้ซ้ำของวัสดุเพาะที่อัตราการหยดน้ำ 20 มิลลิลิตรต่อ นาที

สูตร	ปริมาณแคลเซียมไอออน (mg/L)	ปริมาณแมกนีเซียมไอออน (mg/L)	ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตไอออน ($\mu\text{gPO}_4^{3-}\text{P/ml}$)
ACa4	27.2813	1.1532	7.9709
ACa2	19.4333	1.2843	7.9016
ACaMg	25.5521	0.4566	8.5831

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การเจริญเติบโตของผักบุงในเจลไดโนวิทยาศาสตร์

ตารางที่ ค1 ตารางแผนผังการปลูกผักบุงลงในภาชนะปลูก

ต้น							สภาวะการปลูก
7	6	5	4	3	2	1	
							ใช้วัสดุเพาะที่ไม่ใช้สารเคมี
							ไม่ใช้วัสดุเพาะ
							วัสดุเพาะ ACaMg
							วัสดุเพาะ ACa2
							วัสดุเพาะ ACa4

หมายเหตุ

สัญลักษณ์ / หมายถึงต้นผักบุงที่ออกแล้วแต่ความยาวลำต้นยังสูงไม่ถึงขอบภาชนะ

สัญลักษณ์ O หมายถึงต้นผักบุงที่ไม่งอกขึ้นมา

สัญลักษณ์ X หมายถึงต้นผักบุงที่ตาย

โดยตัวเลขที่ระบุในตารางหมายถึงความยาวลำต้นของต้นผักบุงที่สูงขึ้นจากขอบภาชนะปลูก (cm)

ตารางที่ ค2 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที่ 3

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะที่ไม่ใช้สารเคมี
1	O	O	O	O	O
2	O	O	O	O	O
3	O	O	O	O	O
4	O	O	O	O	O
5	O	/	O	O	O
6	O	O	O	O	/
7	/	O	O	O	/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค3 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที 4

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	○	○	○	○	○
2	○	○	○	○	/
3	○	○	/	/	○
4	/	/	/	○	○
5	/	/	/	○	/
6	/	/	/	/	/
7	1.0	/	/	/	/

ตารางที่ ค4 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที 5

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	○	○	○	○	○
2	○	○	○	○	/
3	/	○	/	/	/
4	1.0	○	○	○	○
5	○	2.1	/	○	/
6	2.0	○	○	/	/
7	1.5	/	0.5	/	/

ตารางที่ ค5 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที 6

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	0.7	○	○	○	○
2	○	○	○	/	/
3	1.5	○	/	/	/
4	2.0	1.5	○	○	○
5	1.5	3.4	/	/	1.5
6	3.5	○	○	/	/
7	2.5	1.0	2.0	/	/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค6 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที 7

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	2.8	0	0	0	0
2	0	1.5	0	/	/
3	2.3	1.5	/	/	1.5
4	3.0	2.9	/	0	0
5	1.7	4.4	/	/	2.0
6	4.5	0	0	/	/
7	3.0	1.9	2.4	1.5	/

ตารางที่ ค7 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที 8

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	2.8	0	0	/	0
2	0	1.8	0	/	/
3	3.0	2.2	/	0.4	1.5
4	3.0	3.5	1.0	0	/
5	2.1	4.5	1.5	/	2.0
6	5.4	0	0	0.6	/
7	3.4	1.9	2.4	1.5	/

ตารางที่ ค8 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที 9

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	4.2	0	0	/	0
2	0	3.0	0	/	/
3	3.4	3.5	/	0.5	1.5
4	3.4	3.5	1.2	0	/
5	2.5	4.6	2.0	1.0	2.0
6	5.5	0	0	1.0	/
7	3.5	2.3	1.5	1.5	/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค9 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุ้งในวันที่ 10

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	4.5	0	0	/	0
2	0	3.4	0	/	/
3	3.5	4.0	/	0.6	1.3
4	3.6	4.3	2.1	/	0.5
5	3.3	4.8	2.0	1.2	2.0
6	6.0	0	0	1.3	/
7	3.9	2.7	1.7	1.2	/

ตารางที่ ค10 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุ้งในวันที่ 11

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	4.8	0	0	/	0
2	0	3.4	0	/	/
3	3.5	4.5	X	1.0	1.4
4	3.7	4.3	2.2	0.6	0.5
5	3.3	5.0	2.4	1.3	2.0
6	6.0	0	0	1.3	X
7	4.0	2.7	1.7	1.3	/

ตารางที่ ค11 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุ้งในวันที่ 12

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช้ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	5.0	0	0	/	0
2	0	3.8	0	/	/
3	4.2	5.5	X	1.1	1.4
4	3.8	4.5	2.6	2.1	0.6
5	3.8	5.3	2.6	2.1	2.0
6	6.5	0	0	X	X
7	4.2	3.0	1.8	1.6	X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค12 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที่ 13

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช่ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	5.1	○	○	/	○
2	○	4.0	○	/	/
3	4.5	5.5	X	1.1	1.4
4	3.9	4.5	2.6	X	0.6
5	4.1	5.4	2.8	X	2.0
6	6.7	○	○	X	X
7	4.2	3.2	X	X	X

ตารางที่ ค13 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที่ 14

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช่ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	5.2	○	○	X	○
2	○	4.0	○	X	X
3	4.7	5.7	X	X	2.0
4	4.0	4.7	3.0	X	0.6
5	4.8	5.5	X	X	X
6	6.9	○	○	X	X
7	4.4	3.6	X	X	X

ตารางที่ ค14 ตารางบันทึกผลการเจริญเติบโตของผักบุงในวันที่ 15

ต้นที่	วัสดุเพาะ ACa4	วัสดุเพาะ ACa2	วัสดุเพาะ ACaMg	ไม่ใช่ วัสดุเพาะ	ใช้วัสดุเพาะ ที่ไม่ใช้สาร เชื่อมโยง
1	5.4	○	○	X	○
2	○	4.2	○	X	X
3	4.8	5.8	X	X	X
4	4.2	5.3	3.0	X	X
5	5.2	6.0	X	X	X
6	7.1	○	○	X	X
7	5.4	3.8	X	X	X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค15 ตารางภาพการเจริญเติบโตของผักบุ้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้