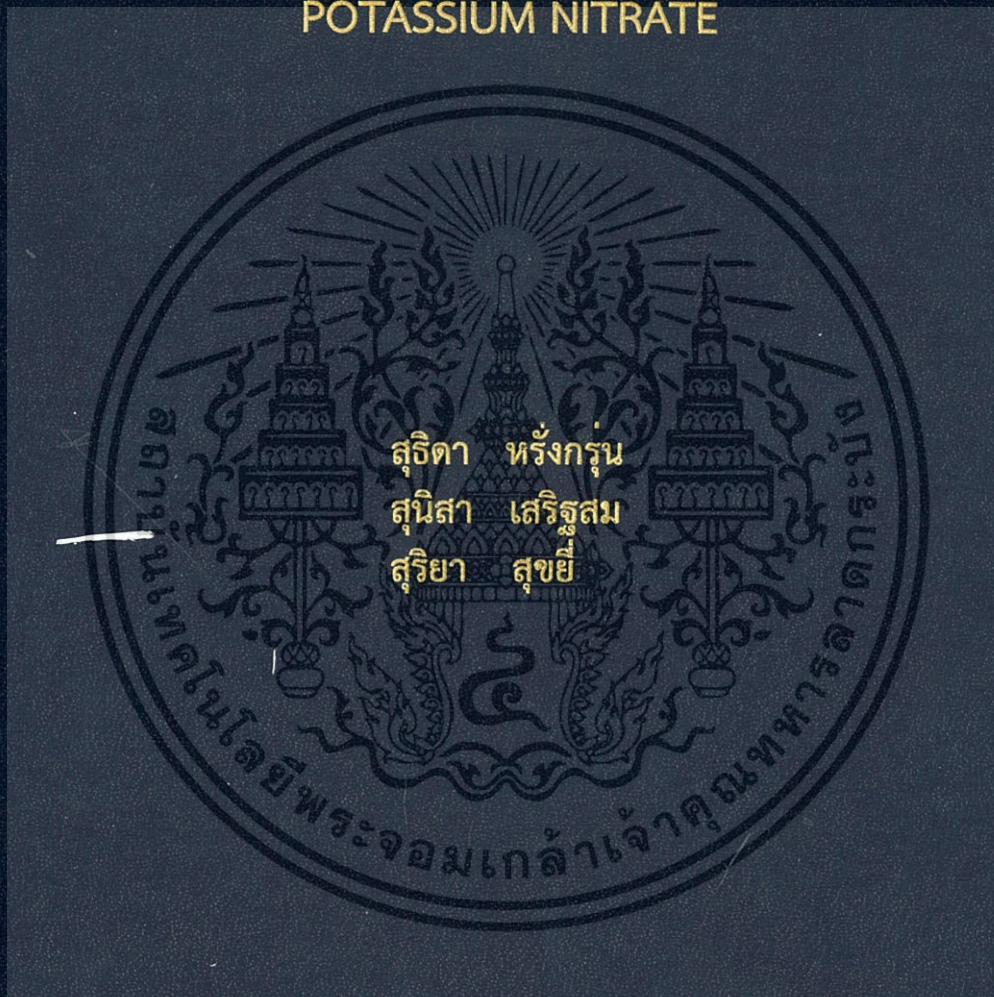


การประยุกต์ใช้วัสดุประกอบมอนต์มอริลโลไนต์ / ไคโตซาน  
สำหรับการกักเก็บและปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรต

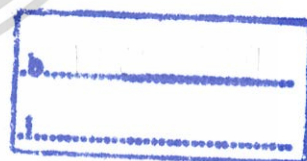
APPLICATION OF MONTMORILLONITE / CHITOSAN  
COMPOSITES FOR LOADING AND RELEASING  
POTASSIUM NITRATE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การประยุกต์ใช้วัสดุประกอบมอนต์มอริลโลไนต์ / ไคโตซาน  
สำหรับการกักเก็บและปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรต

APPLICATION OF MONTMORILLONITE / CHITOSAN  
COMPOSITES FOR LOADING AND RELEASING  
POTASSIUM NITRATE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF MONTMORILLONITE / CHITOSAN  
COMPOSITES FOR LOADING AND RELEASING  
POTASSIUM NITRATE



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การประยุกต์ใช้วัสดุประกอบมอนต์มอริลโลไนต์ / ไคโตซาน  
สำหรับการกักเก็บและปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรต  
Application of Montmorillonite / Chitosan Composites For  
Loading And Releasing Potassium Nitrate

ชื่อนักศึกษา นางสาวสุธิดา หรั่งรุ่ม รหัสนักศึกษา 56050632  
นางสาวสุนิสา เสรีรัฐสม รหัสนักศึกษา 56050634  
นายสุรียา สุขยี่ รหัสนักศึกษา 56050639

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชา เคมี  
ปีการศึกษา 2559  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รัชชสิทธิ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การประยุกต์ใช้วัสดุประกอบมอนต์มอริลโลไนต์ / ไคโตซาน สำหรับการกักเก็บและปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรต		
นักศึกษา	นางสาวสุธิดา	หรั่งกรุ่น	รหัสนักศึกษา 56050632
	นางสาวสุนิสา	เสริฐสม	รหัสนักศึกษา 56050634
	นายสุรียา	สุขย์	รหัสนักศึกษา 56050639
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์/ไคโตซานบรรจุโพแทสเซียมไนเตรตที่เชื่อมโยงด้วยโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP) ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม โดยทำการเอ็บซุ่ม MMT ด้วยสารละลายผสม CS และ KNO<sub>3</sub> ในกรดอะซิติก ตามด้วยการเติมสารละลาย STPP เพื่อให้ไคโตซานเกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิก ได้เป็นวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP โดยปรับเปลี่ยนปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบนาโน คือ ปริมาณ KNO<sub>3</sub> (0 0.1 0.2 และ 0.3 g) ปริมาณ STPP (0 0.01 และ 0.03 g) และปริมาณ CS (0 0.025 0.05 และ 0.1 g) เมื่อนำวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เครื่องวิเคราะห์การคายรังสีเอ็กซ์ (XRF) เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (TGA) และเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) พบว่าการดัดแปรโครงสร้าง MMT ด้วยวิธีเอ็บซุ่มไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลักของ MMT โดย CS และ KNO<sub>3</sub> แทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างโครงสร้าง MMT และเมื่อปริมาณ KNO<sub>3</sub> เพิ่มขึ้น KNO<sub>3</sub> บางส่วนอยู่ภายนอกชั้นโครงสร้างของ MMT การเพิ่มปริมาณ STPP และ CS ไม่ส่งผลกระทบต่อฟังก์ชันของ MMT และปริมาณ KNO<sub>3</sub> ที่บรรจุได้ การปลดปล่อย KNO<sub>3</sub> จากวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ทดสอบโดยแช่เม็ดวัสดุประกอบในน้ำบริสุทธิ์สูง ปริมาณ K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ที่ปลดปล่อยออกจากวัสดุประกอบหลังจากการแช่เป็นเวลา 1 2 3 4 5 และ 24 ชั่วโมง ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอออนโครมาโทกราฟี พบว่าปริมาณการปลดปล่อย K<sup>+</sup> เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ KNO<sub>3</sub> ในวัสดุประกอบ MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP เพิ่มขึ้นเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มปริมาณ STPP และ CS ที่ใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบนาโนมีผลให้ปริมาณการปลดปล่อย  $K^+$  และ  $NO_3^-$  ลดลง เมื่อนำวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ไปใช้ในการปลูกต้นข้าวพันธุ์ กข4 พบว่าวัสดุประกอบนาโนส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นข้าวได้

คำสำคัญ : กระบวนการเอ็บซุ่ม การเชื่อมโยงแบบไอออนิก ไคโตซาน โพลีแซลไยมนิเตรต มอนต์มอริลโลไนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Application of Montmorillonite / Chitosan Composites For Loading And Releasing Potassium Nitrate		
Students	Miss. Sutida	Rungkron	Student ID 56050632
	Miss. Sunisa	Soetsom	Student ID 56050634
	Mr. Suriya	Sukyee	Student ID 56050639
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. Punnama Siriphannon		

### Abstract

This research studied on the preparation of montmorillonite/sodium tripolyphosphate crosslinked chitosan containing potassium nitrate (MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP) nanocomposites by impregnation method. The MMT was impregnated with the mixed solutions of CS and KNO<sub>3</sub> in acetic acid and then the STPP was added in order to ionically crosslink the chitosan, created as the MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP nanocomposites. The initial quantities of starting substances were varied, i.e. KNO<sub>3</sub> weight (0 0.1 0.2 and 0.3 g), STPP weight (0 0.01 and 0.03 g) and CS weight (0 0.025 0.05 and 0.1 g). The as-prepared MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP nanocomposites were characterized by X-ray diffractometer (XRD), X-Ray fluorescence spectrometer (XRF), thermogravimetric analyser (TGA) and differential scanning calorimeter (DSC). It was found that the modification of MMT by impregnation method had no effect on the main structure of MMT, in which the CS and KNO<sub>3</sub> intercalated into the basal spacing of MMT structure. When the KNO<sub>3</sub> quantity was increased, the partial of KNO<sub>3</sub> was on the external MMT layer structure. The increases of STPP and CS quantities did not affect the characteristic crystalline peaks of MMT and contained KNO<sub>3</sub> amount. The KNO<sub>3</sub> releasing from the synthesized nanocomposites was tested by soaking the nanocomposite pellet in the ultrapure water. The amounts of K<sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> releases

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

from the nanocomposites after soaking for 1, 2, 3, 4, 5 and 24 hr were analyzed by ion chromatography. It was found that the  $K^+$  release increased with increasing  $KNO_3$  quantity in the MMT/CS- $KNO_3$ -STPP nanocomposites. The increases of STPP and CS quantities used in the preparation of nanocomposites resulted in the reduction of  $K^+$  and  $NO_3^-$  releases. When the MMT/CS- $KNO_3$ -STPP nanocomposites were applied to the RD4 rice, the nanocomposites could enhance the growth of rice.

**Keywords :** Impregnation, Ionic crosslinking, Chitosan, Potassium nitrate, Montmorillonite



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของทุก ๆ ท่าน ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปยุตต์มา ศิริพันธ์โนน ที่คอยให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือแนะนำที่ดีในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษและขอขอบพระคุณกรรมการสอบโครงการพิเศษ คือ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่เอื้อเพื่อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องต่าง ๆ

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกท่าน สำหรับกำลังใจ ความห่วงใย ความปรารถนาดี และทุก ๆ ความช่วยเหลือในขณะทำงานวิจัย ทำให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับกำลังใจ ความเอาใจใส่ ความรัก และแรงผลักดันจากบิดามารดา และพี่ ๆ

สำหรับคุณงามความดีอันใดซึ่งเกิดจากโครงการพิเศษฉบับนี้ผู้เขียนขอมอบให้ทุก ๆ ความปรารถนาดี และความห่วงใยจากทุก ๆ ท่านที่มีต่อผู้เขียนตลอดมา

สุธิดา หรั่งกรุ่น  
สุนิสา เสริฐสม  
สุรียา สุขย์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ปุ๋ย.....	4
2.1.1 ปุ๋ยเคมี.....	4
2.1.1.1 ตัวอย่างปุ๋ย.....	4
2.1.2 ความสำคัญธาตุอาหารของพืช.....	5
2.1.3 ปุ๋ยละลายช้าและปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย.....	6
2.1.4 สารดูดซับและควบคุมการปลดปล่อยจากแร่ดินเหนียว.....	7
2.2 ปัญหาการสูญเสียปุ๋ยเคมีในดิน.....	7
2.3 มอนต์มอริลโลไนต์.....	9
2.3.1 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	11
2.3.2 วัสดุประกอบนาโนเคลย์.....	11
2.4 ไคโตซาน.....	12
2.4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน.....	13
2.4.2 การเชื่อมโยงไคโตซานแบบไอออนิก.....	14
2.4.3 การประยุกต์ใช้งานไคโตซาน.....	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	24
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	24
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	24
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	25
3.3.1 การกำจัดสิ่งเจือปนในแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ .....	25
3.3.2 การสังเคราะห์วัสดุประกอบนาโนแร่ดินเหนียว มอนต์มอริลโลไนต์/โคโตซานบรรจุ KNO <sub>3</sub> ที่เชื่อมโยงด้วย STPP ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม .....	26
3.3.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MMT และวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้	33
3.3.4 การศึกษาการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรดจากวัสดุประกอบนาโน ที่สังเคราะห์ได้ .....	33
3.3.5 การศึกษาการเจริญเติบโตของต้นข้าวพันธุ์ กข4 หลังการใช้วัสดุประกอบ นาโนที่สังเคราะห์ได้ .....	36
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	38
4.1 การสังเคราะห์วัสดุประกอบนาโนแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์/โคโตซาน บรรจุ KNO <sub>3</sub> ที่เชื่อมโยงด้วย STPP ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม .....	38
4.1.1 ผลของปริมาณ KNO <sub>3</sub> ที่แตกต่างกัน .....	38
4.1.2 ผลของการใช้สารเชื่อมโยง STPP .....	42
4.1.3 ผลของปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน .....	45
4.1.4 สมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO <sub>3</sub> -STPP .....	49
4.2 การปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรดจากวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ .....	50
4.3 การเจริญเติบโตของต้นข้าวพันธุ์ กข4 หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน ที่สังเคราะห์ได้ .....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	66
เอกสารอ้างอิง .....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก.....	72
ภาคผนวก ข.....	77
ภาคผนวก ค.....	82



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 องค์ประกอบในการเตรียมตัวอย่าง.....	27
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-xKNO <sub>3</sub> -0.01STPP.....	40
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -ySTPP.....	43
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP.....	47
4.4 ค่าอุณหภูมิ (Onset) ของพีกดูดความร้อน (Endothermic peak) และค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO <sub>3</sub> -STPP จากการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค DSC.....	49
4.5 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ K <sup>+</sup> และ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-xKNO <sub>3</sub> -0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ KNO <sub>3</sub> ที่แตกต่างกัน.....	51
4.6 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ K <sup>+</sup> และ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> จากวัสดุประกอบ นาโน MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -ySTPP ซึ่งมีปริมาณ STPP ที่แตกต่างกัน.....	53
4.7 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ K <sup>+</sup> และ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> จากวัสดุประกอบ นาโน MMT/zCS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน.....	55
4.8 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวและค่าน้ำหนักที่หายไป จากวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO <sub>3</sub> -STPP.....	56
4.9 น้ำหนักสเดิลี่ ความสูงของต้นเดิลี่ และความยาวรากเดิลี่ จากตัวอย่างต้นข้าว หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-xKNO <sub>3</sub> -0.01STPP.....	59
4.10 น้ำหนักสเดิลี่ ความสูงของต้นเดิลี่ และความยาวรากเดิลี่ จากตัวอย่างต้นข้าว หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -ySTPP.....	61
4.11 น้ำหนักสเดิลี่ ความสูงของต้นเดิลี่ และความยาวรากเดิลี่ จากตัวอย่างต้นข้าว หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP.....	64

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแปรสภาพของปุ๋ยไนโตรเจน.....	8
2.2 การแปรสภาพของปุ๋ยโพแทสเซียม.....	8
2.3 โครงสร้างทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์.....	9
2.4 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่ยึดแผ่นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	11
2.5 ชนิดของวัสดุประกอบนาโนแบบต่าง ๆ.....	12
2.6 โครงสร้างทางเคมีของ (a) ไคติน และ (b) ไคโตซาน.....	12
2.7 การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างไคโตซานกับโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต.....	14
3.1 แผนภาพขั้นตอนการกำจัดสิ่งเจือปนในแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์.....	25
3.2 แผนภาพขั้นตอนการทดลองปัจจัยศึกษาที่ 1 ผลของปริมาณ $KNO_3$ .....	28
3.3 แผนภาพขั้นตอนการทดลองปัจจัยศึกษาที่ 2 ผลของการใช้สารเชื่อมโยง STPP.....	30
3.4 แผนภาพขั้นตอนการทดลองปัจจัยศึกษาที่ 3 ผลของปริมาณ CS.....	32
3.5 แผนภาพแสดงการทดสอบการปลดปล่อย $KNO_3$ .....	35
3.6 แผนภาพแสดงการศึกษาการเจริญเติบโตต้นข้าวพันธ์ กข4 หลังการใช้วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้.....	37
4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT เริ่มต้นและวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $KNO_3$ -0.01STPP.....	39
4.2 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $KNO_3$ -0.01STPP.....	41
4.3 DTG เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $KNO_3$ -0.01STPP.....	41
4.4 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT เริ่มต้นและวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2 $KNO_3$ -ySTPP.....	42
4.5 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2 $KNO_3$ -ySTPP.....	44
4.6 DTG เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2 $KNO_3$ -ySTPP.....	45
4.7 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT เริ่มต้นและวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2 $KNO_3$ -0.01STPP.....	46
4.8 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2 $KNO_3$ -0.01STPP.....	48
4.9 DTG เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2 $KNO_3$ -0.01STPP.....	48
4.10 กราฟการปลดปล่อยของ $K^+$ จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $KNO_3$ -0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ $KNO_3$ ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟการปลดปล่อยของ $\text{NO}_3^-$ จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ $\text{KNO}_3$ ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ .....	50
4.12 กราฟการปลดปล่อยของ $\text{K}^+$ จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -ySTPP ซึ่งมีปริมาณ STPP ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ .....	52
4.13 กราฟการปลดปล่อยของ $\text{NO}_3^-$ จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -ySTPP ซึ่งมีปริมาณ STPP ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ .....	52
4.14 กราฟการปลดปล่อยของ $\text{K}^+$ จากวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ .....	54
4.15 กราฟการปลดปล่อยของ $\text{NO}_3^-$ จากวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ .....	54
4.16 ภาพถ่ายแสดงการเจริญเติบโตของต้นข้าว ระยะเวลา 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบ นาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP .....	57
4.17 ต้นข้าวที่ถูกสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ต้น หลังครบ 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP .....	58
4.18 ภาพถ่ายแสดงการเจริญเติบโตของต้นข้าว ระยะเวลา 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบ นาโน MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -ySTPP .....	60
4.19 ต้นข้าวที่ถูกสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ต้น หลังครบ 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -ySTPP .....	61
4.20 ภาพถ่ายแสดงการเจริญเติบโตของต้นข้าว ระยะเวลา 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบ นาโน MMT/zCS-0.2 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP .....	62
4.21 ต้นข้าวที่ถูกสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ต้น หลังครบ 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP .....	63

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
MMT	Montmorillonite
KNO <sub>3</sub>	Potassium Nitrate
CS	Chitosan
STPP	Sodium Tripolyphosphate
XRD	X-ray diffractometer
XRF	X-ray fluorescence
TGA	Thermogravimetric analysis
DSC	Differential scanning calorimeters
IC	Ion chromatography
MMT/0.05CS-xKNO <sub>3</sub> -0.01STPP	วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ โดยมีปริมาณ KNO <sub>3</sub> ที่แตกต่างกัน ที่ 0 0.1 0.2 และ 0.3 g ( x คือ ปริมาณ KNO <sub>3</sub> ที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม)
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -ySTPP	วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ โดยมีปริมาณ STPP ที่แตกต่างกัน ที่ 0 0.01 และ 0.03 g ( y คือ ปริมาณ STPP ที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม)
MMT/zCS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ โดยมีปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน ที่ 0 0.025 0.05 และ 0.1 g ( z คือ ปริมาณ CS ที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาคเกษตรกรรมมีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของประชากรและการพัฒนาประเทศ เนื่องจากเป็นแหล่งวัตถุดิบหลักในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรมจึงมีการขยายตัวมากขึ้นในปัจจุบัน หลายประเทศจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตในภาคเกษตรกรรม เพื่อจะนำไปสู่การพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ สำหรับประเทศไทย เกษตรกรรมถือเป็นอีกหนึ่งอาชีพหลักของประชากรในประเทศภาคเกษตรกรรมจึงมีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของประชากรและเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามเกษตรกรไทยยังคงประสบปัญหาในการทำเกษตรกรรมทั้งจากภัยธรรมชาติ ศัตรูพืช ประสิทธิภาพการผลิต ราคาผลผลิตไม่แน่นอน ต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น เป็นต้น จากข้อมูลการศึกษาโครงสร้างค่าใช้จ่ายภาคเกษตรกรรม [1] พบว่าต้นทุนที่มีสัดส่วนสูงที่สุดคือ ค่าแรง รองลงมาคือ ปุ๋ยเคมี ดังนั้นปุ๋ยเคมีจึงถือเป็นปัจจัยหลักที่มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มผลผลิตในการทำเกษตรกรรม สอดคล้องกับข้อมูลปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปุ๋ยเคมีของไทย ปี 2554-2558 [2] พบว่ามีการใช้ปุ๋ยเคมีในภาคการเกษตรและการนำเข้าปุ๋ยเคมีซึ่งมีแนวโน้มในการใช้งานที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ เป็นผลจากความสะดวกรวดเร็วและการให้ผลผลิตในปริมาณมากทำให้มีรายได้เพิ่มสูงขึ้น

เนื่องจากการใช้ประโยชน์ของปุ๋ยเคมีขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของปุ๋ยในดินแต่ปุ๋ยเคมีที่ละลายง่ายและให้สารอาหารแก่พืชเร็วเกินไปอาจมีผลที่ไม่พึงประสงค์บางประการ [3] เช่น ปุ๋ย N-P-K เมื่อใส่ในดินสำหรับการเพาะปลูกพืชสามารถดูดซึมแร่ธาตุ และนำไปใช้ได้ปริมาณ  $N \approx 50 - 60\%$   $P \approx 5 - 25\%$  และ  $K \approx 40 - 70\%$  ของปุ๋ยที่ใส่ลงไปที่เหลือ ถูกดูดซับไว้ในดิน และสูญหายไปโดยการชะล้างหรือเปลี่ยนรูปเป็นโครงสร้างที่พืชใช้ไม่ได้หรือสูญหายไปในอากาศ ทำให้ประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารของพืชจากปุ๋ยเคมีต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ส่งผลให้เกษตรกรจำเป็นต้องใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณที่มากขึ้นเพิ่มภาระต้นทุนการผลิตให้สูงขึ้น ทั้งยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพร่างกายอีกด้วย ในภาวะที่ตลาดโลกมีการแข่งขันสูงทั้งในด้านคุณภาพ และราคาผลผลิต เกษตรกรไทยจำเป็นต้องปรับกระบวนการผลิตสินค้าเกษตรกรรมให้มีคุณภาพสูงขึ้น ขณะเดียวกันต้องมีการควบคุมหรือลดต้นทุนการผลิตสินค้าเกษตรให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของสินค้าเกษตรไทยในตลาดโลก

แนวทางหนึ่งในการลดต้นทุนการผลิต คือ ลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีเกินความจำเป็น และไม่มีประสิทธิภาพ โดยการใช้ปุ๋ยเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการปลดปล่อยที่เร็วเกินไป [4] ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงปุ๋ยเคมีให้มีสมบัติในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุ้มน้ำ และธาตุอาหารได้ดี สามารถคงสภาพอยู่ในดินได้เป็นเวลานาน และมีการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ ที่เรียกว่า ปุ๋ยละลายช้า และปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยละลายช้า และปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย ส่วนใหญ่มาจากพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymers) [5-7] เช่น พอลิอะคริลิกแอซิด โคพอลิเมอร์ของพอลิอะคริลิไมด์ อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์เหล่านี้มาจากการสังเคราะห์จึงย่อยสลายในดินยาก และเมื่อใช้ไปนาน ๆ ทำให้เกิดการสะสมก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม จากข้อมูลข้างต้น โครงการพิเศษนี้จึงทำการศึกษาพัฒนาวัสดุที่ใช้ในการกักเก็บ และควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย โพลีเอทิลีน ไนเทรตจากวัตถุดิบธรรมชาติที่มีราคาถูก และมีแหล่งวัตถุดิบในประเทศไทย กล่าวคือ ดินเบนโทไนต์ (Bentonite) ซึ่งอยู่ในกลุ่มแร่ดินเหนียว สเมกไทต์ (Smectite) หรือมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) เนื่องจากแร่ดินเหนียวประเภทนี้มีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น ๆ โดยในระหว่างชั้นมีไอออนบวก เช่น โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แทรกตัวอยู่ ซึ่งโครงสร้างลักษณะดังกล่าวทำให้ดินชนิดนี้มีความสามารถในการพองตัวในน้ำ อุ้มน้ำได้ดี และสามารถดูดซับสารได้ อย่างไรก็ตามแร่ดินเหนียวมีประสิทธิภาพในการดูดซับไม่ค่อยสูง เนื่องจากมีขนาดของช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมีขนาดเล็กประมาณ 1.3 นาโนเมตร ทำให้การแพร่เข้าไปภายในช่องว่างระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียวจึงแพร่ได้ไม่มากนัก อีกทั้งการควบคุมการปลดปล่อยสารที่ดูดซับได้ไม่ดัดนัก โครงการพิเศษนี้จึงมุ่งพัฒนาให้แร่ดินเหนียวมีประสิทธิภาพในการกักเก็บ และควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้

วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ และควบคุมการปลดปล่อยของแร่ดินเหนียวที่หลายกลุ่มวิจัยได้ศึกษา และพัฒนาขึ้น [8-12] คือ การดัดแปรโครงสร้างแร่ดินเหนียวด้วยสารประกอบอินทรีย์ และสารลดแรงตึงผิวบางประเภท ซึ่งสารเหล่านี้มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสารไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว ที่มีหมู่ปลายสายโซ่ที่มีประจุเป็นบวกจึงสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange) กับประจุบวกขนาดเล็กที่ตุลประจุอยู่ระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียว โมเลกุลของสารดังกล่าวเข้าไปแทรกตัวระหว่างชั้นโครงสร้างของแร่ดินเหนียวเรียกว่า การแทรกสอด (Intercalation) ทำให้ช่องว่างระหว่างโครงสร้างของแร่ดินเหนียวกว้างขึ้น จึงมีความสามารถในการดูดซับสารได้ นอกจากนี้สารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างอาจช่วยดูดซับปุ๋ยไว้ในโครงสร้างโมเลกุลเป็นผลให้ความสามารถในการกักเก็บปุ๋ยเพิ่มขึ้น ในโครงการพิเศษนี้จึงสนใจที่จะนำสารประกอบอินทรีย์มาใช้ร่วมกับแร่ดินเหนียวในการบรรจุปุ๋ยโพแทสเซียมไนเทรต ( $KNO_3$ ) โดยเลือกใช้โคโตซาน เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา [13-14] มีรายงานว่าโคโตซานซึ่งเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้ อีกทั้งโคโตซานสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวดินได้ดี ทนต่อการถูกชะล้าง ลดการระเหยน้ำ ช่วยเร่งอัตราการเจริญเติบโตของพืช

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาและพัฒนาวิธีการในการสังเคราะห์วัสดุประกอบนาโนแรดดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์/ไคลโตซานบรรจุโพแทสเซียมไนเตรดที่เชื่อมโยงด้วยโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต (MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP) ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม
2. ศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมการปลดปล่อย KNO<sub>3</sub> และผลของการเจริญเติบโตของต้นข้าวพันธุ์ กข4 ของวัสดุประกอบนาโน (MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP) ที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการในการสังเคราะห์วัสดุประกอบนาโน MMT/CS บรรจุ KNO<sub>3</sub> ที่เชื่อมโยงด้วย STPP ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม โดยมีปัจจัยการศึกษา ดังนี้
  - ผลของปริมาณ KNO<sub>3</sub> ได้แก่ 0, 0.1, 0.2 และ 0.3 g
  - ผลของการใช้สารเชื่อมโยง STPP ได้แก่ 0, 0.01 และ 0.03 g
  - ผลของปริมาณ CS ได้แก่ 0, 0.025, 0.05 และ 0.1 g
2. ตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP
3. ทดสอบความสามารถในการปลดปล่อย KNO<sub>3</sub> และสมบัติอื่น ๆ ของวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ที่เตรียมได้
4. ศึกษาผลของการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ที่เตรียมได้ต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวพันธุ์ กข4

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ที่มีประสิทธิภาพในการปลดปล่อย KNO<sub>3</sub> และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการเกษตร
2. เข้าใจถึงกระบวนการในการดัดแปรโครงสร้างของ MMT ด้วย CS เพื่อบรรจุ KNO<sub>3</sub> และทราบถึงกลไกการปลดปล่อยปุ๋ย KNO<sub>3</sub>
3. เป็นการประยุกต์ใช้ MMT และ CS มาเพิ่มมูลค่า และใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ปุ๋ย

ปุ๋ย [4,15] หมายถึง อินทรีย์สารหรืออนินทรีย์สาร ซึ่งได้จากธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์ เป็นสารที่ให้ธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อพืช เมื่อดินขาดแคลนธาตุอาหารการใส่ปุ๋ยที่ให้แก่เหล่านั้นลงไปจะเป็นผลให้พืชได้รับธาตุอาหารเพียงพอกับความต้องการ จึงช่วยเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้นได้ ปุ๋ยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ ปุ๋ยอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด และวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นพวกอินทรีย์สาร และปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยวิทยาศาสตร์เป็นปุ๋ยที่ได้จากการผลิตหรือสังเคราะห์จากแร่ธาตุต่าง ๆ ที่ได้จากธรรมชาติหรือเป็นผลพลอยได้ของโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท

#### 2.1.1 ปุ๋ยเคมี

ปุ๋ยเคมี [4] แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ แม่ปุ๋ยหรือปุ๋ยเดี่ยว ซึ่งจะมีธาตุอาหารอยู่หนึ่งหรือสองธาตุ และ ปุ๋ยผสมซึ่งจะเป็นปุ๋ยที่มีการเอาแม่ปุ๋ยหลายๆ ชนิดมาผสมรวมกันเพื่อให้ปุ๋ยมีปริมาณและสัดส่วนทางธาตุอาหาร N P และ K ตามที่ต้องการ

ข้อได้เปรียบของปุ๋ยเคมี [1] คือ ปุ๋ยเคมี มีปริมาณธาตุอาหารต่อหน่วยน้ำหนักของปุ๋ยสูงซึ่งใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอต่อความต้องการของพืช ทั้งยังราคาถูกเมื่อคิดเป็นราคาต่อหน่วยน้ำหนักของธาตุอาหาร นอกจากนี้การขนส่งและการเก็บรักษาสะดวก หาได้ง่าย เพราะมีการผลิตจำหน่าย และให้ผลทางด้านธาตุอาหารเร็วกว่าเมื่อเทียบกับปุ๋ยอินทรีย์

ข้อเสียเปรียบของปุ๋ยเคมี [1] คือ ปุ๋ยเคมี ไม่สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน กล่าวคือไม่ทำให้ดินโปร่งร่วนซุยเหมือนปุ๋ยอินทรีย์ ทั้งยังส่งผลเสียต่อดินเมื่อใช้ในปริมาณมากหรือใช้ติดต่อกันเป็นเวลานาน ปุ๋ยเคมีทุกชนิดจะก่อให้เกิดภาวะดินเค็ม ถ้าใช้ในอัตราที่สูงหรือใส่โคนต้นพืชจะเกิดอันตรายแก่พืชและการงอกของเมล็ด การใช้ปุ๋ยเคมีจึงต้องระมัดระวัง

#### 2.1.1.1 ตัวอย่างปุ๋ย

##### 1. ปุ๋ยยูเรีย ( $H_2NCONH_2$ )

ปุ๋ยยูเรีย [16] เป็นปุ๋ยที่มีธาตุไนโตรเจนอยู่ 46% หรือเขียนได้ว่า ปุ๋ยยูเรีย 46 - 0 - 0 กล่าวคือ ในปุ๋ยหนัก 100 kg จะมีไนโตรเจน 46 kg เนื่องจากปุ๋ยยูเรียมีส่วนของธาตุไนโตรเจนที่สูงจึงมีการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตปุ๋ยชนิดอื่น แต่เมื่อมีการใส่ลงไปในดินแล้วพืชจะไม่สามารถดูดซึ่มยูเรียโดยตรง ยูเรียต้องเกิดการเปลี่ยนรูปให้เป็นไนเตรตเพื่อให้พืชสามารถดูดซึ่มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ปุ๋ยโพแทสเซียมไนเตรต ( $KNO_3$ )

ปุ๋ยโพแทสเซียมไนเตรต [3] เป็นปุ๋ยที่มีธาตุอาหารทั้งโพแทสเซียมและไนโตรเจนในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยในปุ๋ยหนัก 100 kg มีธาตุไนโตรเจน 13 kg และมีธาตุโพแทสเซียมที่ละลายน้ำ (โพแทสเซียมออกไซด์ :  $K_2O$ ) 46 kg หรือเขียนว่า ปุ๋ยโพแทสเซียมไนเตรต 13 - 0 - 46 ซึ่งปุ๋ย  $KNO_3$  สามารถให้ธาตุอาหารแก่พืชได้ 100% ประกอบด้วย  $NO_3^-$  62% และ  $K^+$  38%

### 2.1.2 ความสำคัญธาตุอาหารของพืช

ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช [15] มีทั้งหมด 16 ธาตุ โดยพืชสามารถนำธาตุอาหารแต่ละชนิดไปใช้ในปริมาณที่มากหรือน้อยแตกต่างกันไป ธาตุที่พืชมีความต้องการในปริมาณมากที่สุดคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างพืชซึ่งธาตุอาหารทั้ง 3 นี้ได้มาจากน้ำและอากาศ ส่วนที่เหลือ 13 ธาตุ พืชจะได้รับจากดินโดยสามารถแบ่งกลุ่มย่อยตามปริมาณความต้องการของพืชได้ 3 ประเภท คือ

1. ธาตุอาหารหลัก หรือธาตุปุ๋ย ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) เป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการใช้ในปริมาณมากซึ่งดินเป็นแหล่งที่มาของธาตุทั้งสามนี้ แต่มีไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช จึงแก้ไขโดยการเติมปุ๋ยเคมีที่มีองค์ประกอบธาตุ N-P-K ให้กับพืชแทน

ธาตุไนโตรเจน (N) โดยปกติมีอยู่ในปริมาณมากในอากาศ แต่ไนโตรเจนในอากาศนั้นพืชนำเอาไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ (ยกเว้นพืชตระกูลถั่ว) ธาตุไนโตรเจนที่พืชใช้ประโยชน์ได้อยู่ในรูปของไอออนของสารประกอบ เช่น แอมโมเนียมไอออน ( $NH_4^+$ ) และไนเตรตไอออน ( $NO_3^-$ ) ธาตุไนโตรเจนในดินเหล่านี้มาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์วัตถุในดิน นอกจากนั้นจะได้มาจากการใส่ปุ๋ยเคมี โดยทั่วไปพืชมีความต้องการธาตุไนโตรเจนเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นธาตุที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช พืชที่ได้รับไนโตรเจนอย่างเพียงพอจะมีสีเขียวสดมีความแข็งแรง โตเร็ว และทำให้พืชออกดอกและผลที่สมบูรณ์

ธาตุฟอสฟอรัส (P) ในดินมาจากการสลายตัวของแร่บางชนิด การสลายตัวของสารอินทรีย์วัตถุในดินสามารถให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้เช่นเดียวกับไนโตรเจน ธาตุฟอสฟอรัสในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะต้องอยู่ในรูปไอออนของสารประกอบที่เรียกว่า ฟอสเฟตไอออน ( $H_2PO_4^-$  และ  $HPO_4^-$ ) ซึ่งจะละลายอยู่ในน้ำและในดิน ส่วนใหญ่สารประกอบของฟอสฟอรัสในดินละลายน้ำได้ยากซึ่งพืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ พืชที่ได้รับฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอจะมีระบบรากที่แข็งแรงแพร่กระจายอยู่ในดินสามารถดึงดูตน้ำและธาตุอาหารได้ดี การออกดอกและผลเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธาตุโพแทสเซียม (K) ในดินมาจากการสลายตัวของหินและแร่หลายชนิด โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปไอออนบวก เช่น โพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) เท่านั้นที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ ธาตุโพแทสเซียมมีความสำคัญในการสร้างและการเคลื่อนย้ายอาหารพวกแป้งและน้ำตาลไปเลี้ยงส่วนที่กำลังเติบโตและส่งไปเก็บไว้ที่หัวหรือที่ลำต้น พืชที่ขาดโพแทสเซียมมักเหี่ยวง่าย แคร่แกระ็น ใบเหลือง และเกิดเป็นรอยไหม้ตามขอบใบ

2. ธาตุอาหารรอง ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และกำมะถัน (S) เป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการใช้มากรองจากธาตุอาหารหลัก

3. ธาตุอาหารเสริม ได้แก่ ธาตุโบรอน (B) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) โมลิบดีนัม (Mo) ทองแดง (Cu) และคลอรีน (Cl) โดยทั่วไปในดินจะมีอยู่อย่างเพียงพอกับความต้องการของพืช เพราะพืชต้องการใช้ในปริมาณที่น้อย

### 2.1.3 ปุ๋ยละลายช้าและปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

การลดการสูญเสียปุ๋ยเคมีจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยเคมีให้สูงขึ้น และช่วยประหยัดต้นทุนในภาคเกษตรกรรมอย่างมาก [1] โดยวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยเคมีมี 3 วิธี [4] ได้แก่ การแบ่งใส่หลายครั้งในช่วงเวลาที่เหมาะสม การใช้สารยับยั้ง (Inhibitor) ควบคุม Volatilization และ Denitrification กรณีปุ๋ยยูเรีย และการใช้ปุ๋ยละลายช้า (Slow-Release fertilizer, SRF) หรือปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled released fertilizer, CRF)

- ปุ๋ยละลายช้า [3,18] หมายถึง ปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้ากว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป แต่ไม่สามารถควบคุมอัตรา และช่วงเวลาในการปลดปล่อยธาตุอาหารได้มากนัก เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้น และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ยูเรีย-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Urea - formaldehyde)

- ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย [3,18] หมายถึง ปุ๋ยซึ่งมีการผลิตให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ นอกจากนี้ยังทราบชัดเจนว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่ออัตรา และช่วงเวลา that ปุ๋ยนั้นจะปลดปล่อยธาตุอาหาร รวมทั้งมีกลไกที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร ตัวอย่างเช่น ปุ๋ยเคลือบ (Coated fertilizers)

การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยละลายช้ามีหลายระยะ โดยในระยะแรกเป็นการซึมผ่านของน้ำผ่านผิวเคลือบถ้าความดันภายในมีค่าสูงกว่าความต้านทานของผิวเคลือบ บริเวณผิวจะแตกออกเกิดการทะลักออกของปุ๋ยที่อยู่ภายใน แต่ถ้าผิวเคลือบสามารถทนต่อความดันภายในได้ ปุ๋ยจะเกิดการแพร่ออกมาช้า เนื่องจากความต้านทานของผิวเคลือบมีมากกว่าความดันภายใน [15]

### 2.1.4 สารดูดซับและควบคุมการปลดปล่อยจากแร่ดินเหนียว

แร่ดินเหนียวเป็นแร่ทุติยภูมิที่เกิดจากการผุพังของหิน [8-9] ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิดขึ้นกับแหล่งกำเนิด ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญในแร่ดินเหนียว ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic matters) สารอนินทรีย์ (Inorganic matters) และความชื้น โดยทั่วไปอนุภาคมีขนาดเล็กมากระดับไมครอนถึงนาโนเมตร แร่ดินเหนียวเป็นสารประกอบจำพวกแอนไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกต ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนทับกัน แบ่งออกได้หลายแบบขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ แร่ดินเหนียวที่สำคัญที่มีการพัฒนาในงานด้านนาโนเคลย์ และวัสดุประกอบนาโน คือ แร่ดินเหนียวกลุ่มสมกไทต์ เนื่องจากมีจุดเด่นคือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกันของชั้นอะลูมิโนออกไซด์ระหัดระออลที่ถูกประกอบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของซิลิเกตเตตระไฮดรอออล ชั้นผลึกเหล่านี้มีความยืดหยุ่น และมีความเป็นขั้วหรือมีประจุ (Polarity) จากโครงสร้างลักษณะดังกล่าวทำให้ประจุสุทธิของผลึกเป็นลบ ดังนั้นในระหว่างชั้นผลึกจะมีไอออนบวกของธาตุโลหะ เช่น โซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และเหล็กแทรกอยู่ เพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ ซึ่งไอออนบวกที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกชนิดอื่นที่อยู่นอกโครงสร้างได้ ดังนั้นแร่ดินเหนียวในกลุ่มสมกไทต์จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำเป็นวัสดุประกอบนาโนสำหรับประยุกต์ใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้ มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวกลุ่มสมกไทต์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาดัดแปรโครงสร้าง นำมาใช้เป็นสารดูดซับ และควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้

### 2.2 ปัญหาการสูญเสียปุ๋ยเคมีในดิน

ปัญหาหลักของการใช้ปุ๋ยเคมีที่สำคัญประการหนึ่ง [18] คือ การละลาย และการปลดปล่อยสารอาหาร ที่เร็วเกินไปเมื่อใส่ปุ๋ยเคมีลงไปในดินทำให้มีโอกาสสูญเสียไปมากกว่าครึ่งหนึ่ง เช่น ปุ๋ย N-P-K พืชสามารถดูดซึมแร่ธาตุ และนำไปใช้ได้ปริมาณ  $N \approx 50 - 60\%$   $P \approx 5 - 25\%$  และ  $K \approx 40 - 70\%$  ของปุ๋ยที่ใส่ลงไป ส่วนที่พืชไม่ได้ดูดซึมไว้จะทำปฏิกิริยากับดินกลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยาก พืชนำไปใช้ไม่ได้หรือใช้ได้น้อยกว่าปกติ โดยส่วนใหญ่จะถูกดูดซับไว้ในดิน สูญหายไปโดยการชะล้าง เปลี่ยนรูปเป็นโครงสร้างที่พืชใช้ไม่ได้หรือสูญหายไปในอากาศ ดังนี้

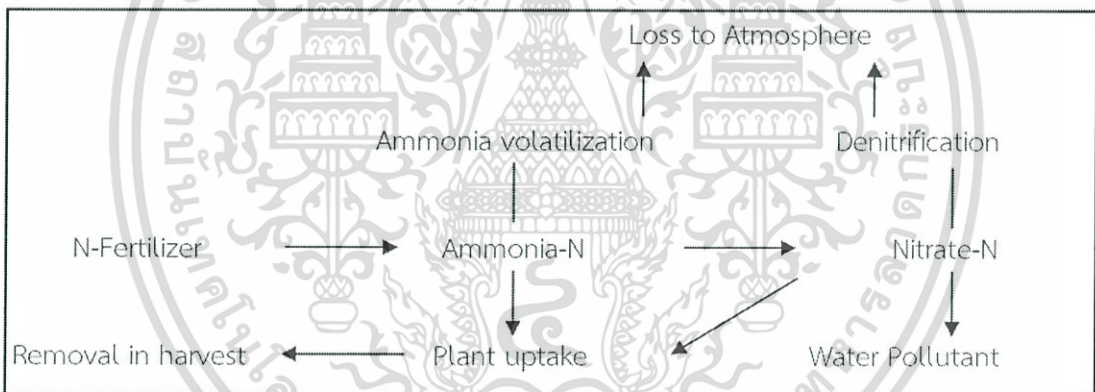
- การสูญเสียธาตุอาหารโดยการชะล้าง [1,19] ดินมีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกต่ำ จะมีการสูญเสียธาตุอาหารเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในฤดูฝน โดยส่วนใหญ่ธาตุไนโตรเจนจะสูญเสียในรูปไนเตรต เมื่อฝนตกหนักและน้ำไหลบ่าบนผิวดินจะมีการสูญเสียปุ๋ยไนเตรตที่ละลายน้ำกับบางส่วนที่ดูดซับกับผิวของคอลลอยด์ในดิน ไนเตรตเหล่านี้จะถูกชะล้างลงไปสะสมในแหล่งน้ำ ธาตุอาหารพืชที่มีการสูญเสียโดยการชะล้างรองลงมาได้แก่ โพแทสเซียม ส่วนฟอสฟอรัสสูญเสียโดยการชะล้างน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

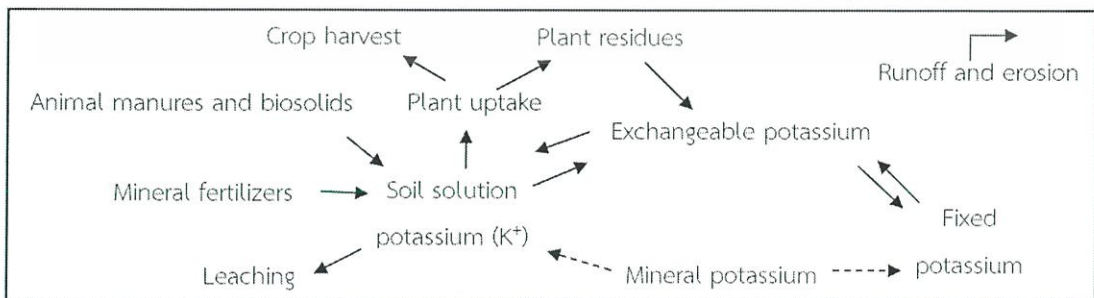
- การสูญเสียธาตุอาหารโดยการละลาย [1,19] เนื่องจากประสิทธิภาพของปุ๋ยเคมีขึ้นอยู่กับ การละลาย (Dissolution) และความสามารถในการละลาย (Solubility) ของปุ๋ยในสารละลายดิน แต่ปุ๋ยเคมีที่ละลายง่าย และให้สารอาหารแก่พืชเร็วเกินไปอาจมีผลที่ไม่พึงประสงค์ บางประการ เช่น ปุ๋ยไนโตรเจนมีโอกาสสูญเสียมากดังที่กล่าวแล้ว ส่วนปุ๋ยฟอสเฟตกับปุ๋ยโพแทสเซียมจะถูกตรึงในดินเมื่อละลายทำให้ประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารของพืชจากปุ๋ย (Nutrient use efficiency) ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

- ปัญหาการสูญเสียธาตุอาหารในลักษณะอื่นๆ [1,19] เช่น แอมโมเนียระเหยไปจากดิน (Ammonia volatilization) ไนเตรตถูกรีดิวซ์เป็นแก๊สไนตรัสออกไซด์ ( $N_2O$ ) ไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจน ( $N_2$ ) ซึ่งระเหยไปจากดิน พืชจึงไม่สามารถใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารเหล่านี้ได้ ยกเว้นพืชตระกูลถั่วเท่านั้นที่มีระบบรากพิเศษสามารถแปรรูปก๊าซไนโตรเจนจากอากาศเอามาใช้ประโยชน์ได้

รูปที่ 2.1 และ 2.2 แผนภาพแสดงการแปรสภาพของปุ๋ยไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 การแปรสภาพของปุ๋ยไนโตรเจน [1]



รูปที่ 2.2 การแปรสภาพของปุ๋ยโพแทสเซียม [19]

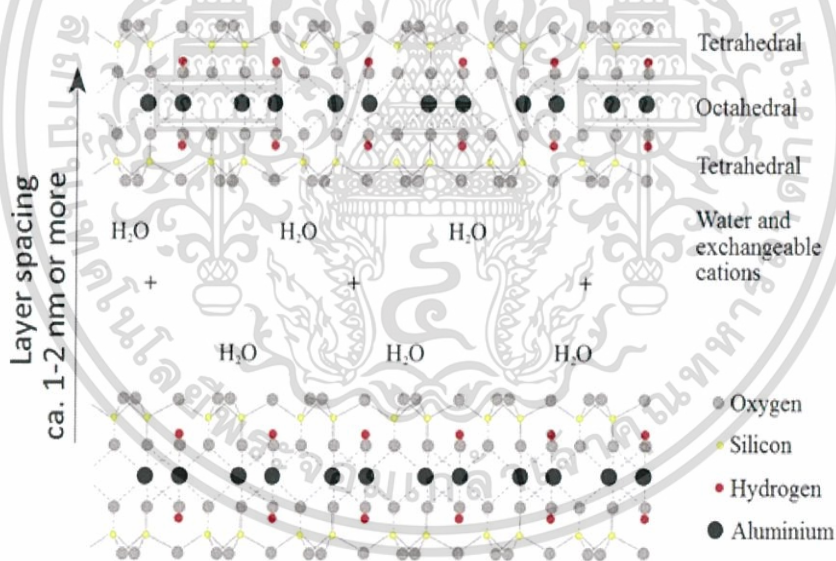
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 มอนต์มอริลโลไนต์

มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) [8-9] จัดอยู่ในแร่ตระกูลไฟโรซิลิเกต (Phyllosilicate) มีสูตรโครงสร้างคือ  $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$  มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟ แหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส สำหรับประเทศไทยพบที่บริเวณตำบลนารายณ์ อำเภอยะบะดา จังหวัดลพบุรี และจังหวัดกาญจนบุรี

แร่ MMT จัดอยู่ในกลุ่มของแร่สมกโทต์ซึ่งเป็นกลุ่มของแร่ดินเหนียวที่สามารถขยายตัว (Expandability) เมื่อน้ำหรือโมเลกุลของสารอนินทรีย์แทรกเข้าไปในโครงสร้าง และมีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน

MMT [20-22] เป็นแร่ดินเหนียวที่มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างจากแร่อื่น ๆ คือ จะมีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ ของชั้นแผ่นอะลูมินา และชั้นของแผ่นซิลิกาซ้อนทับกันคล้ายแซนวิช โดยชั้นที่อยู่ตรงกลางเป็นชั้นของอะลูมินาซึ่งเป็นประจุบวก ประกบบนและล่างด้วยชั้นซิลิกาซึ่งมีประจุเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็กเรียกว่าแกลเลอรี (Gallery) ในช่องว่างจะมีประจุบวกโซเดียมหรือแคลเซียมเพื่อทำหน้าที่ยึดชั้นของแร่ดินเหนียวเอาไว้ด้วยกัน ซึ่งไอออนโซเดียมหรือแคลเซียมในช่องแกลเลอรีนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ [25]

ดินเบนโทไนต์ มีองค์ประกอบหลัก คือ MMT รองลงมาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ ทำให้ดินเบนโทไนต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ อย่างไรก็ตามสมบัติของดินยังแตกต่างกันในเรื่องของความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของ MMT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่อนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์และเบนโทไนต์มีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมากทำให้สารในกลุ่มนี้มีสมบัติพิเศษคือ การบวมตัว (Swelling) ความสามารถในการฟอกสี กำจัดสี การเปลี่ยนแปลงความข้นเหลว (Thixotropy) โดยมีความหนืดสูงขึ้นเมื่อถูกตั้งทิ้งไว้โดยไม่มีกรรบกวน

พฤติกรรมโดยส่วนใหญ่ของแร่ดินเหนียว [23-25] ขึ้นกับ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และสมบัติการดึงดูดหรือผลักกันของประจุไฟฟ้าของผลึกแร่ซึ่งแสดงออกมาในรูปค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange capacity, CEC)

- พื้นที่ผิวจำเพาะ [23-25] หมายถึง พื้นที่ผิวของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยมวล วัสดุที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวต่อมวลน้อย ดังนั้นพฤติกรรมของวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับแรงเนื่องจากมวล (Body force) แรงที่กระทำตามผิววัสดุ เช่น แรงเนื่องจากประจุไฟฟ้าจะมีบทบาทน้อย แต่ถ้าวัสดุมีขนาดเล็กลงพื้นที่ผิวต่อมวลก็จะเพิ่มขึ้น สำหรับแร่ดินเหนียวซึ่งมีรูปร่างเป็นแผ่น และมีขนาดเล็ก ระดับไมครอนจะมีพื้นที่ผิวต่อมวลสูงมาก ดังนั้นพฤติกรรมของแร่ดินเหนียวจะถูกควบคุมโดยแรงระหว่างผิว ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างผงดิน ส่วนแรงเนื่องจากมวลมีน้อยมาก

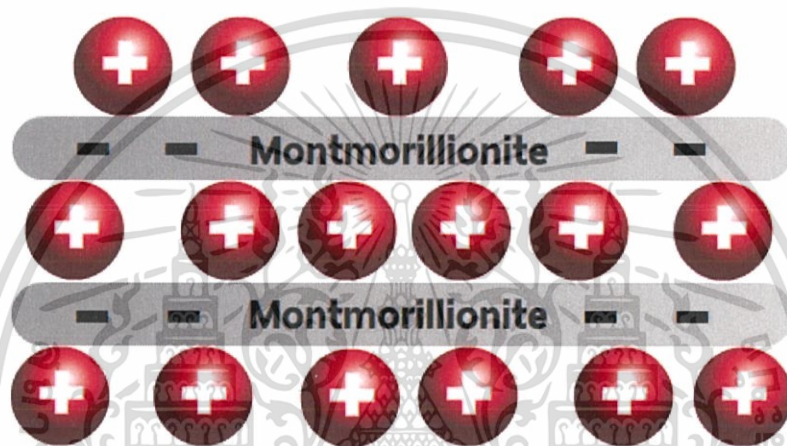
- ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก [23-25] โดยทั่วไปแร่ดินเหนียวควรมีประจุสุทธิเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากการเกิดการแทนที่แบบไอโซเมอร์ และจากการที่โครงสร้างขยายตัวได้ไม่เต็มที่ ทำให้ขอบของหน่วยโครงสร้างที่ไม่ได้ยึดเกาะกับโครงสร้างอื่นมีประจุไฟฟ้าลบ จึงทำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบบนผิวของผงดิน ดังนั้นการที่จะทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ จึงมีการดึงดูดไอออนที่มีประจุไฟฟ้าบวกจากเกลือซึ่งละลายน้ำอยู่ในดินเหนียว ซึ่งไอออนเหล่านี้เรียกว่าไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable ions) และไอออนบางตัวจะถูกดึงดูดมากกว่าตัวอื่น โดยสามารถเรียงลำดับไอออนเหล่านี้ตามความแรงของการดึงดูดได้ดังนี้



ในการวัดจำนวนของไอออนที่ถูกดูดซับโดยแร่ดินเหนียวมักจะแสดงในรูปของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ซึ่งหมายถึง ปริมาณการแลกเปลี่ยนไอออนในหน่วย มิลลิอิควิวาเลนต์ (Milli-equivalents) ต่อน้ำหนัก 100 g ของแร่ดินแห้ง ซึ่ง MMT จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากเมื่อเทียบกับแร่ดินชนิดอื่นจึงมีแรงดึงดูดระหว่างผิวสูงมาก

### 2.3.1 การตัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

มอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติชอบน้ำ จึงทำให้มอนต์มอริลโลไนต์สามารถตัดแปรโครงสร้างได้ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) [8-9] ซึ่งประจุบวกที่ยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์เป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง จึงสามารถมีสารที่เป็นประจุบวกแทนที่ประจุบวกเดิมที่มีอยู่ระหว่างชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดการแทรกสอด (Intercalation) หรือเกิดการแยกออกจากกัน (Exfoliation) ของชั้นมอนต์มอริลโลไนต์ได้ แต่ละชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ซ้อนทับกันอย่างเป็นระเบียบยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่ยึดแผ่นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [25]

### 2.3.2 วัสดุประกอบนาโนเคลย์

วัสดุประกอบนาโนเคลย์ [8-9] สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทตามลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

- วัสดุประกอบทั่วไป (Conventional Clay Nanocomposite)

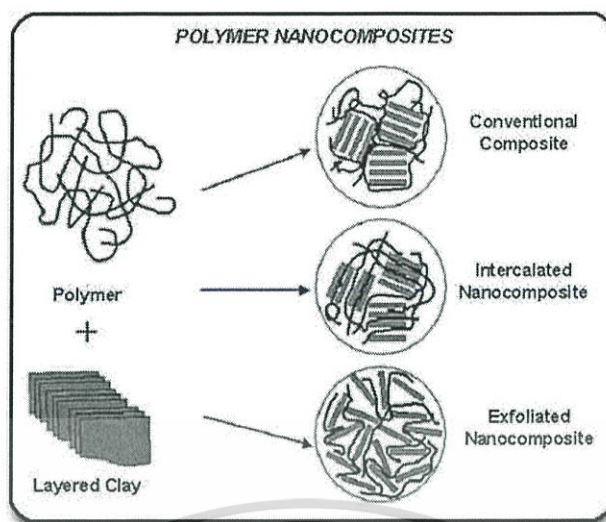
วัสดุประกอบนาโนที่ประกอบด้วยอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ โดยที่ชั้นแต่ละชั้นในโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ยังรวมกลุ่มกันอยู่ไม่แยกออกจากกัน

- วัสดุประกอบนาโนแบบแทรกสอด (Intercalated Clay Nanocomposite)

โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ถูกแทรกสอดด้วยพอลิเมอร์ตั้งแต่ 1 โมเลกุลขึ้นไป ทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นของโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น

- วัสดุประกอบนาโนแบบแยกออกจากกัน (Exfoliated Clay Nanocomposite)

วัสดุประกอบนาโนแบบแยกออกจากกันมักเกิดจากมีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่ำ ซึ่งการแยกของแต่ละชั้นในโครงสร้างขึ้นอยู่กับปริมาณของพอลิเมอร์ในวัสดุประกอบ

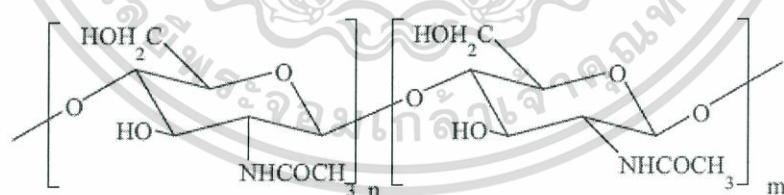


รูปที่ 2.5 ชนิดของวัสดุประกอบนาโนแบบต่าง ๆ [26]

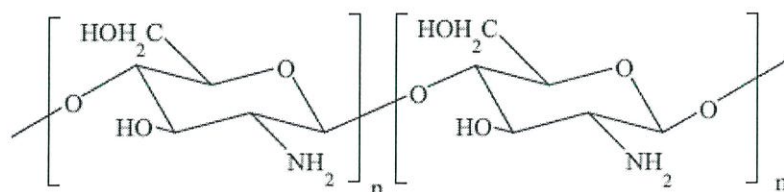
## 2.4 ไคโตซาน

ไคโตซาน [27-28] เป็นพอลิแซ็กคาไรด์จากธรรมชาติชนิดหนึ่ง สามารถสังเคราะห์ได้จากเปลือกของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่มีข้อปล้อง เช่น เปลือกกุ้ง กระดองปู และแกนปลาหมึก เป็นต้น

โดยไคโตซานนั้นเป็นไคตินในรูปแบบที่มีปริมาณหมู่อะซิติกต่ำ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิติกของไคตินด้วยด่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างทางเคมีของไคตินเปลี่ยนไป โดยมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหมู่อะซิตามิโด ( $-\text{NHCOCH}_3$ ) เป็นหมู่อะมิโนหรือหมู่เอมีน ( $-\text{NH}_2$ ) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และไคโตซานคือ พอลิเมอร์ของหน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ D-glucosamine (2-amino-2-deoxy-D-glucose) แสดงความแตกต่างโครงสร้างทางเคมีของไคติน และไคโตซาน ดังรูปที่ 2.6



(a)



(b)

รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ (a) ไคติน และ (b) ไคโตซาน [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโคโตซาน

โคโตซานเป็นพอลิแซ็กคาไรด์จากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีสมบัติเด่นด้านอื่น ๆ ที่พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอื่นไม่มี เช่น มีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี มีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถดัดแปรโครงสร้างทางเคมีได้ มีสมบัติความต้านทานต่อจุลินทรีย์ จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องของมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้โคโตซาน และมีราคาไม่แพง โคโตซานจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง [27-28]

- การละลาย [30-31]

โคโตซานไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในสารละลายกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่า pH น้อยกว่า 6 เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ส่วนกรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก สามารถละลายโคโตซานได้เช่นกัน แต่ทำละลายที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง และสารละลายโคโตซานที่ได้จะมีความเหนียว ใส และมีพฤติกรรมแบบนอนนิวตันเนียน (Non-newtonian)

- ความหนืด [30-31]

ความหนืดของสารละลายโคโตซานขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น องศาการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of Deacetylation) น้ำหนักโมเลกุล ความแรงไอออน (Ionic strength) pH และอุณหภูมิ โดยทั่วไปความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้ และการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายโคโตซานส่งผลให้มีความหนืดที่แตกต่างกันได้ เช่น ความหนืดของโคโตซานในกรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่า pH ลดลง ในขณะที่ความหนืดของโคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น

- การสลายตัว [30-31]

โคโตซานคล้ายกับพอลิเมอร์หรือพอลิแซ็กคาไรด์ทั่วไป เมื่อเกิดการสลายตัวจะทำให้สายโซ่ของโมเลกุลสั้นลงเป็นโอลิโกเมอร์หรือโอลิโกแซ็กคาไรด์ และเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดเรียกว่า มอนอเมอร์หรือมอนอแซ็กคาไรด์ของโคโตซาน คือ N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine

- การสลายตัวทางความร้อน [30-31]

ความร้อนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของโคโตซานจากการวิจัยพบว่า ความร้อนจากเตาอบซึ่งเป็นความร้อนแบบแห้งที่อุณหภูมिन้อยกว่าหรือเท่ากับ 80°C มีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของโคโตซานมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ค่าอุณหภูมิที่สภาวะคล้ายแก้ว (Glass transition Temperature,  $T_g$ ) ลดลง และทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ส่วนความร้อนแบบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะมีผลทำให้โคโตซานเปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำตาลขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา

- การสลายตัวในสภาวะกรดและด่าง [30-31]

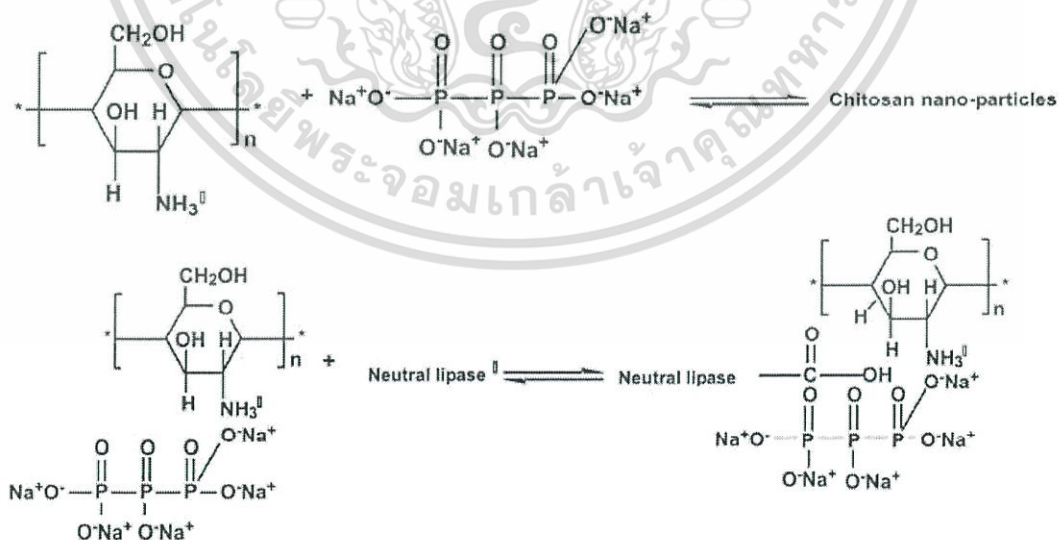
การสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลของไคโตซานเนื่องจากกรดจะเกิดขึ้นแบบสุ่มผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโอลิโกเมอร์ขนาดต่าง ๆ และมอนอเมอร์ขึ้นกับสภาวะที่ใช้ เช่น เวลา ชนิดของกรด อุณหภูมิ ชนิดของพอลิเมอร์ และชนิดพันธะของสายโซ่โมเลกุล ส่วนการสลายตัวของไคโตซานในสภาวะด่างจะเริ่มจากปลายสุดของสายโซ่โมเลกุล

- ความสามารถในการตกตะกอน [30-31]

ไคโตซานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอนที่ดี เนื่องจากมีหมู่อะมิโนจำนวนมากที่สามารถแตกตัวเป็นประจุบวก และจับกับสารประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม และพอลิเมอร์อื่นๆ เป็นต้น นอกจากนี้ ไคโตซานยังสามารถจับโลหะหนักได้ โดยไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้ไอออนของโลหะสามารถสร้างพันธะเชิงซ้อนกับหมู่อะมิโนได้ และยังพบว่าหมู่อะมิโนของไคโตซานยังมีประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะได้ดีกว่าหมู่อะซิดิลในไคติน ซึ่งความสามารถในการดูดซับไอออนของไคโตซานขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเป็นผลึก และความสามารถในการดึงดูน้ำของไคโตซาน

### 2.4.2 การเชื่อมโยงไคโตซานแบบไอออนิก

การเชื่อมโยงไคโตซานแบบไอออนิก (Ionic crosslink) [32] อาศัยอันตรกิริยาระหว่างสารที่มีประจุตรงข้ามกับสารเชื่อมโยง เช่น ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีประจุบวกสามารถเกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิกกับ STPP ที่มีประจุลบ ดังแสดงใน รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างไคโตซานกับโซเดียมไตรฟอสเฟต [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 การประยุกต์ใช้งานไคโตซาน [27]

- ด้านการเกษตร

การใช้ประโยชน์จากไคโตซานทางการเกษตร สามารถนำไปใช้ได้ทุกขั้นตอน เช่น ใช้เป็นสารปรับสภาพดินสำหรับการเพาะปลูก การใช้ไคโตซานผสมในปุ๋ยน้ำสำหรับพืชมีข้อดี คือ สามารถยึดเกาะกับพื้นผิวดินได้ดี ทนต่อการถูกชะล้าง ลดการระเหยของน้ำ อีกทั้งยังเป็นตัวควบคุม การปลดปล่อยแร่ธาตุ และสารอาหารให้แก่พืช ช่วยเร่งอัตราการเจริญเติบโต มีผลทำให้ผลไม้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น เป็นส่วนประกอบในการผลิตแผ่นคลุมดิน เพื่อเร่งการเจริญเติบโตของพืช เพิ่มอุณหภูมิของดิน และช่วยเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในดิน

- ด้านอุตสาหกรรมอาหาร

ปัจจุบันไคโตซานมีการผลิตออกจำหน่ายอย่างแพร่หลายในรูปของอาหารเสริมเพื่อลดคอเลสเตอรอล และควบคุมน้ำหนัก จากสมบัติของไคโตซานในด้านการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย เชื้อรา นับเป็นจุดเด่นที่สำคัญต่อการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการถนอมอาหาร เช่น ในการเก็บรักษาเนื้อปลา การนำไปใช้ในเครื่องปรุงรสอาหาร ในกระบวนการผลิตอาหาร และเครื่องดื่มหลายชนิด ใช้เป็นฟิล์มห่อหุ้มเพื่อถนอมอาหาร

- ด้านเครื่องสำอาง

ไคโตซานเป็นสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ที่ไม่เป็นพิษ ที่มีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ทั้งนี้เพราะประจุบวกของหมู่แอมโมเนียม ( $\text{NH}_3^+$ ) ที่อยู่บนโครงสร้างของไคโตซานจะมีความว่องไวต่อการจับกับผิวหนัง และเส้นผมที่ประกอบด้วยสาร Mucopolysaccharides โปรตีน และไขมันที่มีประจุลบได้เป็นอย่างดี ไคโตซานที่เคลือบอยู่จะก่อตัวเป็นฟิล์มบาง ซึ่งสามารถดูดซับความชื้น และไขมันเอาไว้จึงช่วยรักษาความชุ่มชื้น และความยืดหยุ่นให้แก่ผิวหนัง และเส้นผม อีกทั้งยังมีสมบัติในการช่วยยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และลดอาการระคายเคืองหรือคันศีรษะ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิแวกคาไรด์ และโปรตีนของเส้นผมช่วยเพิ่มความเงางามให้แก่เส้นผม จากข้อดีของไคโตซานข้างต้นปัจจุบันผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางหลายประเภท จึงมีส่วนผสมของสารไคติน และไคโตซาน เช่น โลชั่นบำรุงผิว แชมพู โลชั่นบำรุงผม แป้งแต่งหน้า ยาทาเล็บ ยาสีฟัน และมอยส์เจอร์ไรเซอร์ เป็นต้น

- ด้านเส้นใย และสิ่งทอ

การประยุกต์ใช้ไคติน และไคโตซานทางด้านเส้นใย และสิ่งทอ สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้ ใช้ผลิตเป็นเส้นใย และเส้นด้าย เส้นใยไคติน และไคโตซานสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ผ้านอนวูฟเวน (Nonwoven) ผ้าปิดแผลไหมละลาย เป็นต้น ในกระบวนการขึ้นรูปใช้วิธีละลายด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมแล้วจึงปั่น (Spin) เส้นใยผ่านหัวรีดที่มีรูเล็ก ๆ ที่เรียกว่า Spinneret ลงในอ่างสารเคมีที่ทำให้เกิดการแข็งตัว (Coagulation bath) ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า การปั่นเส้นใยแบบเปียก (Wet Spinning) สามารถผลิตเส้นใยได้หลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะ เช่น ผลิตเส้นใยจากไคติน และไคโตซานโดยตรง การผลิตโดยปั่นเป็นเส้นใยร่วมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เป็นต้น

- ด้านการแพทย์ และเภสัชกรรม

ไคติน และไคโตซานเป็นสารธรรมชาติที่มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ และเซลล์ของร่างกาย สามารถรับประทานได้ และย่อยสลายได้ตามธรรมชาติโดยไม่เป็นพิษต่อร่างกาย จึงได้มีการนำไคติน และไคโตซานมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ และเภสัชกรรม เช่น ใช้ในวัสดุทดแทนกระดูก ใช้เป็นสารเติมเต็ม (Filling) ในกระดูก และฟัน ใช้เป็นวัสดุปิดบาดแผลซึ่งสามารถกระตุ้นการสร้างเซลล์ใหม่ และป้องกันการติดเชื้อจึงช่วยทำให้บาดแผลหายเร็วขึ้น เป็นสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของเลือด (Blood anticoagulant) และสารห้ามเลือด (Hemostatic)

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### (ก) วัสดุดูดซับและควบคุมการปลดปล่อยจากแร่ดินเหนียว

สิรินันท์ วิริยะสุนทร และสงวนศักดิ์ ศรีพลัง [10] ได้ทำการศึกษารเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจากแป้งมันสำปะหลัง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ MMT โดยวิธีแบบสารละลาย เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับเคลือบปุ๋ย ซึ่งเตรียมโดยการผสมแป้งมันสำปะหลัง และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 70/30 และ 80/20 กับ MMT ปริมาณต่าง ๆ กัน (2, 4, 6, 8 และ 10 ส่วนโดยน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 100 ส่วน นำของผสมที่ได้ไปหล่อเป็นแผ่นบนแม่แบบพลาสติก และทำให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C จากนั้นนำแผ่นนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการซึมผ่านของความชื้น ความสามารถในการซึมผ่านของแอมโมเนียมไอออน ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ และวิเคราะห์โครงสร้าง จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเป็นผลให้การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการซึมผ่านของความชื้น และความสามารถในการซึมผ่านของแอมโมเนียมไอออนมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม MMT มีผลทำให้การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการซึมผ่านของความชื้น และความสามารถในการซึมผ่านของแอมโมเนียมไอออนมีค่าลดลง ซึ่งแปรผันตามปริมาณของ MMT ที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำแผ่นนาโนคอมพอสิตที่ได้ไปฝังดินเป็นเวลา 50 วัน พบว่าร้อยละการหายไปของน้ำหนัก และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น ผลของการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างเกิดการแยกออกจากกัน (Exfoliation) โดยสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) เมื่อนำปุ๋ยเม็ดทางการค้า NPK สูตร 16-16-16 และสูตร 18-46-0 ไปห่อหุ้มด้วยนาโนคอมพอสิตของแป้ง/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/มอนต์มอริลโลไนต์ ที่อัตราส่วน 80/20/8 ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบ จากนั้นนำไปวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อย

ไนโตรเจนโดยการแช่ในน้ำที่ปราศจากไอออนตามระยะเวลาที่กำหนด พบว่าปุ๋ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต มีอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนต่ำกว่าปุ๋ยที่ไม่ได้เคลือบ

Liang R. และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาการควบคุมการปล่อยปุ๋ยสารประกอบของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (CRNPK) กับการกักเก็บน้ำ แกนด้านในจะใช้ปุ๋ย Urea formaldehyde (UF) และ Polyphosphate potassium (PAK) ส่วนเปลือกของโครงสร้างใช้วัสดุประกอบไม่ชอบน้ำยิ่งยวด P(acrylic acid-co-acrylamide) และดินขาว โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยสารประกอบไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่อุณหภูมิ 5, 10 และ 35°C จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมปลดปล่อยของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมใน CRNPK สามารถควบคุมได้จากอุณหภูมิ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการปลดปล่อยสารอาหารเร็วขึ้น และยังสามารถดูดซับน้ำได้ประมาณ 91 g/g ในน้ำประปา มีอัตราการบวมตัวเริ่มต้นสูง สมบัติการปลดปล่อยช้าในดินดี สามารถปรับปรุงความสามารถในการอุ้มน้ำ และกักเก็บน้ำได้

Shuibao H. และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยยาออกพลอกซาซินจากไคโตซาน-มอนต์มอริลโลไนต์ไฮโดรเจล โดยทำการเตรียมออกพลอกซาซิน/มอนต์-มอริลโลไนต์/ไคโตซานไฮโดรเจล (OFL/MMT/CTS) โดยทำการแทรกสอดสารละลายไคโตซานใน MMT และเชื่อมโยงด้วยพันธะไอออนิกโดยใช้ STPP ซึ่งมีปัจจัยศึกษาคือ ปริมาณของ MMT และ pH ของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบการปลดปล่อย ได้แก่ สารละลายจำลองของเหลวในกระเพาะอาหาร (pH 1.2) และสารละลายจำลองของเหลวในลำไส้ (pH 7.4) จากนั้นทำการศึกษาความสามารถในการดักจับของยา การบวมตัว และศึกษาการปลดปล่อยของยาของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยโครงสร้าง และการบรรจุยาสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค FTIR และเทคนิค XRD จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณของ MMT ในเม็ดยาจะช่วยปรับปรุงการดักจับของยา ปรับปรุงพฤติกรรมบวมตัว และปรับปรุงการปลดปล่อยยาให้ปลดปล่อยออกมาที่ละน้อย ๆ เพื่อให้ร่างกายสามารถดูดซึมยาได้มากขึ้น เป็นผลให้มีประสิทธิภาพการใช้ยาได้สูงสุด

Hickey J. และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาไมโครแคปซูลที่มีพอลิยูเรียเติมสารอนินทรีย์เคลือบด้วยดินเหนียวและชั้นพอลิแคทาไอออนเพื่อควบคุมการเปิดตัวฟุ้ง โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาอัตราการปลดปล่อยด้วยแรงโน้มถ่วงของไมโครแคปซูลพอลิยูเรียกับไซลีน 100% ที่ 25, 65 และ 75°C และของไมโครแคปซูลพอลิยูเรียที่เติมบิวทิลอะซีเตท 10%/ไซลีน 90% และเคลือบชั้นที่สองด้วย MMT จากการศึกษาพบว่าการเคลือบชั้นแรกทำให้ชั้นดินเหนียวเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 15-20 nm มีความหนาประมาณ  $4.2 \pm 1$  wt% เมื่อเทียบกับพอลิยูเรียการเปิดตัวฟุ้งพบว่า ลดลงประมาณ 50% หลังการทับถมของชั้นแรก สมบัติการกันถูกกลืนหายไปเมื่อเคลือบแคปซูลด้วยพอลิแคทแล้วคืนค่าอีกครั้งเมื่อเคลือบด้วย MMT ครั้งที่สอง MMT ถูกเคลือบลงบนไมโครแคปซูลพอลิยูเรียประกอบชั้นต่อชั้นด้วยประจุลบบนเกล็ดดินและประจุบวกของพื้นผิวแคปซูล การปลดปล่อยตามแรงโน้มถ่วงมีการซึมผ่านลดลงประมาณ 40-50% เมื่อเคลือบดินเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bhardwaj D. และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาการเตรียมโคลนีโอพติโลไลท์ (Clinoptilolite, SMC) และมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, SMM) ที่มีการปรับปรุงลดแรงดึงดูดด้วยเฮกซะ-เดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (HDTMAB) และไดออกตะเดคซิลโดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (DODMAB) ด้วยกระบวนการทางความร้อนปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 423 K ได้ตัวอย่างเป็น  $SMC_{HDTMAB}$   $SMC_{DODMAB}$   $SMM_{HDTMAB}$  และ  $SMM_{DODMAB}$  เมื่อนำไปทดสอบการดูดซับสารละลายไนเตรต พบว่าการดูดซับไนเตรตเกิดได้สูงสุดที่ pH 5-7 และเมื่อใช้ระยะเวลาการดูดซับที่ 12 ชั่วโมงปริมาณไนเตรตที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นถึง 80% ซึ่งสารเชื่อมโยง HDTMAB และ DODMAB จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับไนเตรตเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น SMC และ SMM ที่ไม่ได้ปรับปรุง ผลดังกล่าวเกิดจากการก่อตัวของไบเลเยอร์ที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนลบระหว่างไนเตรตไอออนกับโบรไมด์ไอออนจาก HDTMAB และ DODMAB และทดสอบการเตรียมเป็นปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้า โดยนำตัวอย่าง  $SMC_{HDTMAB}$   $SMC_{DODMAB}$   $SMM_{HDTMAB}$  และ  $SMM_{DODMAB}$  ปั่นกวนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต ( $NH_4NO_3$ ) นาน 24 ชั่วโมง ในอัตราส่วนตัวอย่าง : สารละลาย  $NH_4NO_3$  เป็น 1:10 (w/v) แบ่งการทดสอบการปลดปล่อยเป็น 2 วิธี คือ Thin layer-funnels analytical test โดยเก็บน้ำที่ถูกชะล้างไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไนเตรตด้วย Spectrophotometry พบว่า SMC และ SMM ที่ไม่ได้ปรับปรุงมีการปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจน 25-35% ในช่วงแรก และกว่า 75% จะถูกชะล้างในครั้งที่ 6 ในขณะที่ตัวอย่าง  $SMC_{HDTMAB}$   $SMC_{DODMAB}$   $SMM_{HDTMAB}$  และ  $SMM_{DODMAB}$  มีแนวโน้มการปลดปล่อยปุ๋ยช้าเพียง 15-20% ในช่วงแรก 40% ในครั้งที่ 6 และคงเหลือถึง 4% หลังการชะล้างครั้งที่ 24 และวิธีระบบแทรกซึมของคอลัมน์ดิน (Soil-column analytical test) โดยการบรรจุดินเพาะปลูกร่วมกับตัวอย่าง SMC และ SMM ที่สังเคราะห์ขึ้น เก็บน้ำที่ถูกชะล้างต่อวัน ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไนเตรตนาน 15 วัน พบว่าในช่วงวันแรก SMC และ SMM ที่ไม่ได้ปรับปรุงมีการปลดปล่อยปุ๋ยสูงถึง 30% และ 35% ตามลำดับ และสิ้นสุดการปลดปล่อยหลังจากผ่านไป 12 วัน ขณะที่ตัวอย่าง  $SMC_{HDTMAB}$   $SMC_{DODMAB}$   $SMM_{HDTMAB}$  และ  $SMM_{DODMAB}$  มีการปลดปล่อยปุ๋ยเพียง 18% ในช่วงวันแรก และเมื่อผ่านไป 15 วันยังคงมีการปลดปล่อยปุ๋ยประมาณ 7% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง SMC และ SMM ที่มีการปรับปรุงลดแรงดึงดูดมีความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ยช้า และเพียงพอต่อความต้องการสารอาหารของพืช

Guodong Y. [36] ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมออกไซด์แคลไซต์เพื่อทำให้มีความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ยได้ช้าลง โดยนำออกไซด์แคลไซต์ทางการค้าซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบ 3.67 nm เป็นเมทริกซ์ในการผลิตเม็ดบรรจุคอปเปอร์ซัลเฟต ( $CuSO_4$ ) และ ไดไซยานไดเอไมด์ (Dicyandiamide, DCD) จากนั้นทำการทดลองเปรียบเทียบพฤติกรรมในการปลดปล่อย  $CuSO_4$  และ DCD โดยมีปัจจัยศึกษา คือ ขนาดของเม็ดที่แตกต่างกันคือ 0.7 cm และ 1.2 cm และระยะเวลาที่ใช้ในการละลายจากการทดลองพบว่า เม็ด  $CuSO_4$  ขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 cm จะแสดงพฤติกรรมการปลดปล่อยได้ช้ากว่าเมื่อเทียบกับเม็ดขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 cm และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ถูกต้องทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเม็ดของ DCD ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 cm ต้องใช้เวลา 6 วันในการละลายโดยสมบูรณ์ ความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยสารเป็นผลมาจากธรรมชาติความไม่ชอบน้ำ และอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของอแกโนเคลย์ ซึ่งอัตราการปลดปล่อยนี้สามารถปรับได้โดยการปรับเปลี่ยนขนาดของเม็ด

Lavorgna M. และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาวัดคุณสมบัติของนาโน CS ที่มี MMT เป็นตัวช่วยส่งเสริมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ให้มีโครงสร้าง และสมบัติในการต้านทานแบคทีเรีย โดยทำการเตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์-มอนต์มอริลโลไนต์ (Ag-MMT) จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน  $Ag^+$  และเตรียมวัสดุประกอบนาโนฟิล์ม CS ได้จากการละลาย CS 2 g ในสารละลายกรดอะซิติกที่ความเข้มข้น 1% ปริมาณ 100 ml และปั่นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที และทำกลีเซอรอลพลาสติไซเซอร์ได้จากการปั่นกวนสารละลาย CS เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 20°C ซึ่งวัสดุประกอบนาโนจะได้มาจาก Ag-MMT ที่กระจายตัวแตกต่างกันในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 1% ปริมาณ 100 ml จากนั้นเติมสารละลาย CS และทำการ ปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โชนิกเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25°C ในอ่างอัลตราโซนิก และเทสารละลายลงในจานเพาะเชื้อ ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 22°C เป็นเวลา 3 วัน ตัวทำละลายจะระเหยกลายเป็นไอจนหมดและจะได้ฟิล์ม CS ซึ่งความหนาของฟิล์มจะอยู่ที่ประมาณ  $120 \pm 5 \mu m$  และนำไปทำให้แห้งที่เตาสู่ญญากาศ อุณหภูมิ 25°C ทิ้งไว้ตลอดทั้งคืน และทำการศึกษ้อัตราการปลดปล่อยซิลเวอร์ และความสามารถในการต้านทานแบคทีเรีย โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาคือความเข้มข้นของสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต  $AgNO_3$  ที่ใช้ต่าง Na-MMT ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 500, 1,000 และ 5,000 ppm และระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานแบคทีเรียจากการศึกษาพบว่าเมื่อนำวัสดุประกอบนาโน CS ไปทดสอบการต้านทานแบคทีเรียเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะแสดงสมบัติในการทำให้แบคทีเรียเติบโตได้ช้าลงเนื่องจากฟิล์ม Ag-MMT CS แต่ภายหลังจาก 48 ชั่วโมงจะบรรจุแบคทีเรียได้สูงที่สุดเนื่องจากกระบวนการที่ผันกลับได้ของเซลล์ ซึ่งการแทรกเอา CS เข้าไปภายในแร่ซิลิเกตของ MMT จะส่งผลให้เกิดการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น และช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังช่วยลดการดูดซึมน้ำของวัสดุประกอบนาโนชีวภาพอีกด้วย และ  $Ag^+$  จะช่วยยืดเวลาในการปลดปล่อยหลังจาก 24 ชั่วโมง และยังช่วยลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซูโดโมแนส

Rashidzadeh A. และ Olad A. [38] ศึกษาการเตรียมปุ๋ยละลายช้า NPK จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ (In-situ free radical polymerization) พร้อมการบรรจุปุ๋ยด้วยวัสดุดูดซับที่ยาวนานาโนคอมโพสิต โดยใช้ Alginate-g-poly(acrylic acid-co-acrylamide), Hyd และ MMT ได้เป็น Hyd/MMT จากนั้นนำตัวอย่างมาบรรจุปุ๋ย NPK ซึ่งเตรียมมาจากยูเรีย แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ได้เป็น Hyd/MMT/NPK หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR XRD และ SEM ศึกษาการดูดซับน้ำ โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ ปริมาณสารเชื่อมโยง N,N'-methylene bisacrylamide (MBA) ที่แตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าปริมาณที่เหมาะสมคือที่ 0.75 wt% ซึ่งจะช่วยให้การดูดซับน้ำได้ดี โดยการเพิ่มปริมาณ MBA จะส่งผลให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะลดพื้นที่ในการกักเก็บน้ำทำให้ยากต่อการดูดซับน้ำ ปริมาณของ MMT ที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อมีการเติม MMT ในปริมาณมากขึ้นจะทำให้การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากโครงสร้างของ MMT ที่มีผิวหน้าเป็นประจุลบมีแรงผลักสูงส่งผลให้การขยายตัวเพิ่มขึ้นในโครงสร้างทำให้มีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ปัจจัยของ pH ต่อการบวมตัว โดยวัดในช่วง pH 2-9 พบว่าที่ pH 5-9 จะมีการบวมตัวสูงเป็นผลมาจากมีแรงผลักของไอออนสูง แต่เมื่อมีการเพิ่ม pH มากขึ้นทำให้เกิดการสะสมไอออนของคาร์บอกซิลิกในโครงสร้างทำให้เกิดการปลดปล่อยน้ำ จึงเกิดการหดตัว และปัจจัยของสารละลายเกลือ NaCl, KCl, CaCl<sub>2</sub> และ FeCl<sub>3</sub> ต่อการบวมตัว พบว่าการบวมตัวในสารละลายเกลือทุกประเภทมีค่าต่ำกว่าน้ำกลั่น เป็นผลมาจากแรงดันออสโมติก และการยืดหยุ่นของโครงข่าย และศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยโดยการวัดค่าการนำไฟฟ้าในตัวกลางที่แช่ Hyd/MMT/NPK พบว่าในช่วงแรกมีการปลดปล่อยปุ๋ยออกมาอย่างช้า ๆ จากพื้นผิว และการปลดปล่อยจะลดลงจนเป็นค่าคงที่ อีกทั้งพฤติกรรมการกักเก็บน้ำในดินพบว่าสามารถเพิ่มการกักเก็บน้ำในดิน และลดการระเหยน้ำได้

He Y. และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาการห่อหุ้ม *Raoultella planticola* RS-2 ด้วยวัสดุประกอบอัลจิเนต (NaAlg) เพื่อพัฒนาการปลดปล่อยช้าให้ได้ปุ๋ยอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ และลดต้นทุนการผลิต โดยใช้ไมโครแคปซูลเป็นรูปทรงกลมห่อหุ้มปุ๋ยไว้ โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือผลของเบนโทไนด์ และอัลจิเนตโดยเตรียมสารละลายเบนโทไนด์-อัลจิเนต (B-NaAlg) ที่ความเข้มข้นอัลจิเนต 1.5 : เบนโทไนด์ 0, อัลจิเนต 0.5 : เบนโทไนด์ 2.0, 3.0, 4.0 และอัลจิเนต 1.0 : เบนโทไนด์ 2.0, 3.0, 4.0% จากการศึกษาพบว่าไมโครแคปซูลมีการบวมตัว การย่อยสลายทางชีวภาพ และอัตราการปลดปล่อยเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอัลจิเนต และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเบนโทไนด์ การปลดปล่อยตัวของเชื้อแบคทีเรียจากไมโครแคปซูลเบนโทไนด์-อัลจิเนต จะเกิดการปลดปล่อยในตอนแรกและค่อย ๆ เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณเบนโทไนด์ส่งผลให้สารละลายประกอบมีความหนืดลดลงจึงเป็นผลให้ขนาดของเม็ดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มเบนโทไนด์ยังลดการสูญเสียของผนังวัสดุประกอบ การเพิ่มจำนวนอัลจิเนต และแคลเซียมไอออนจะช่วยเพิ่มการเชื่อมโยง และเพิ่มผลผลิต การรวมตัวกันของ B-NaAlg ห่อหุ้มเซลล์ RS-2 ป้องกันความเครียดจากสิ่งแวดล้อม เม็ดที่เตรียมจาก NaAlg 1% ไม่เป็นทรงกลมนักเนื่องจากความหนืดต่ำ ความเข้มข้นสูงของสารละลายอัลจิเนต เอื้อต่อการเกิดการเชื่อมโยง และความหนืดที่สูงขึ้นเป็นประโยชน์ต่อการก่อตัวของเม็ดทรงกลม นอกจากนี้ที่เบนโทไนด์ 2% และอัลจิเนต 0.5% เป็นทรงกลม เนื่องจากเบนโทไนด์ทำหน้าที่ช่วยรักษาโครงสร้าง

Santos B.R.D. และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมบวมตัวในน้ำและการปลดปล่อยปุ๋ย KNO<sub>3</sub> ในดิน โดยการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีโคแอกกูเลชัน (Coagulation method) ซึ่งเป็นการจับตัวร่วมกันแล้วตกตะกอนในสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ระหว่าง โคโตซาน (Ch) ร่วมกับ MMT ในสารละลาย NaOH ที่มีปริมาณ MMT แตกต่างกันคือ 6, 33 และ 50 wt% ได้เป็น

ChMMT6, ChMMT33 และ ChMMT50 ตามลำดับ กรองแยกตะกอนตัวอย่างล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pH เป็นกลาง หลังจากนั้นแช่ตัวอย่างลงในสารละลาย  $\text{KNO}_3$  ที่ 1, 7, 15 และ 30 g/L นาน 24 ชั่วโมง อบแห้งที่  $60^\circ\text{C}$  นาน 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR XRD TGA และ SEM ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวในน้ำจากการหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในน้ำ โดยการชั่งน้ำหนักก่อน และหลังการแช่ในน้ำปราศจากไอออน พบว่าในช่วงแรกแนวโน้มในทุกตัวอย่างมีการเพิ่มขนาด และการบวมตัวอย่างรวดเร็ว และคงที่เมื่อผ่านไป 40 ชั่วโมง โดยโคโตซานบริสุทธิ์มีค่าการบวมตัวในน้ำสูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่าง ChMMT และศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ย  $\text{KNO}_3$  ด้วยเทคนิค โทมโดเมนรีฟเลกโตเมทรี (Time-domain reflectometry) พบว่ายังมีปริมาณ  $\text{KNO}_3$  มากการปลดปล่อยปุ๋ยยิ่งสูง โดยการปลดปล่อยปุ๋ยสูงที่สุดในช่วงสามวันแรกซึ่งเป็นผลจากปริมาณปุ๋ยที่อยู่บนพื้นผิวของตัวอย่าง และความเข้มข้นของโพแทสเซียมจะลดลงจนถึงค่าสมดุล จากนั้นปุ๋ยภายในตัวอย่างจะเริ่มหลุดลอดออกมาแสดงให้เห็นถึงความต่อเนื่องของการปลดปล่อยปุ๋ย

#### (ข) โคโตซานกับการควบคุมการปลดปล่อย

Mohan L. และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยยา Quercetin (TNTQ) ที่บรรจุในท่อนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่เคลือบด้วย CS โดยการสร้างท่อนาโน  $\text{TiO}_2$  จากกระบวนการแอโนไดซ์ด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้แพลทินัมเป็นขั้วแคโทดและใช้ Ti-6Al-7Nb เป็นขั้วแอโนดจากนั้นให้ไฟฟ้ากระแสตรง 30 โวลต์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยควบคุมความหนาแน่นของกระแสที่ขั้วแอโนดซึ่งระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต้องควบคุมให้ห่างกัน 2 cm ตลอดเวลา เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยการผสม 0.08 M HF ปริมาตร 50 ml ใน 1 M กรดซัลฟิวริกปริมาตร 50 ml และปั่นกววนอย่างต่อเนื่องจะได้ท่อนาโน  $\text{TiO}_2$  จากนั้นนำ Quercetin 10 mg ละลายในเอทานอล 0.2 ml และนำไปบรรจุในท่อนาโน  $\text{TiO}_2$  จากนั้นเตรียมสารละลาย CS ในกรดอะซิติกเข้มข้น 2 wt% ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0.5, 1 และ 2 wt% จากนั้นนำสารละลาย CS ไปเคลือบไว้ด้านบนของท่อนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่บรรจุ Quercetin โดยทำการเตรียมตัวอย่าง 4 ชุดคือ กลุ่ม A บรรจุ Quercetin ที่ปราศจาก CS เคลือบด้านบน กลุ่ม B, C และ D บรรจุ Quercetin ที่เคลือบด้วยสารละลาย CS ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0.5, 1 และ 2 wt% ตามลำดับ ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษาการปลดปล่อยยาซึ่งมีปัจจัยศึกษาคือ ความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารละลาย CS ที่ใช้เคลือบ เวลาที่ใช้ในการปลดปล่อยยา และความหนาของ CS ที่ใช้เคลือบ โดยนำท่อนาโน  $\text{TiO}_2$  ที่บรรจุยาไปแช่ในสารละลายแฮงค์ (Hank) เป็นเวลา 192 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าการเคลือบด้วย CS ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะมีความหนาของ CS เพิ่มขึ้นด้วย โดยการปลดปล่อยของยาจะควบคุมได้จากความหนาของ CS ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมต่อการรักษาโรค

Perez J.J. และ Francois N.J. [13] ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ย  $\text{KNO}_3$  ด้วยเม็ดบีดโคโตซานร่วมกับแป้งมันฝรั่ง (CS/ST) ที่เตรียมขึ้นด้วยกระบวนการเกิดเจลแบบไอออนิก (Ionotropic gelation) โดยเตรียมเป็นอัตราส่วนโดยปริมาตรของ CS/ST ที่ 100/0 (CS100) 30/70 (30CS/70ST) และ 20/80 (20CS/80ST) เตรียมเป็นเม็ดบีดด้วยเทคนิคการหยดสารละลายผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของลิขสิทธิ์ อาจก่อให้เกิดความเสียหายทางกฎหมายได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวในสารละลายเชื่อมโยง STPP โดยศึกษาปัจจัยของ CS ที่ใช้ในปริมาณที่ต่างกัน และเวลาในการเชื่อมโยงที่ต่างกันคือ 2 และ 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นตัวอย่าง CS/ST จะถูกแยกออกจากสารละลาย STPP ล้างด้วยน้ำกลั่นอบแห้ง 40°C นาน 48 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM XRD FTIR NMR DSC และ TGA ทดสอบการบวมตัวในน้ำ โดยการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการแช่ในน้ำปราศจากไอออน การบรรจุปุ๋ย  $\text{KNO}_3$  โดยการแช่ตัวอย่าง CS/ST ในสารละลาย  $\text{KNO}_3$  พบว่าการบวมตัวสอดคล้องกับการบรรจุปุ๋ยยิ่งบวมตัวสูงขึ้นการไหลดบรรจุปุ๋ยสูงตามไปด้วย เมื่อเวลาในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการบวมตัว และการไหลดบรรจุปุ๋ยลดลง ขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณ CS ส่งผลให้ค่าการบวมตัว และการบรรจุปุ๋ยเพิ่มขึ้น และการทดสอบการปลดปล่อยปุ๋ยโดยใช้หลักการวิเคราะห์การวัดค่าการนำไฟฟ้า พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นสะสม (%Cumulative concentration) ในการปลดปล่อยของ  $\text{KNO}_3$  ที่ CS100~95% CS30/ST70~73% และ CS20/ST80~80%

### (ค) ไคโตซานด้านการเกษตร

นวลใจ โคตรแสง และพงษกร ชมภูแสน [29] ศึกษาผลของการสกัดสารไคโตซานจากเปลือกกุ้งด้วย FT-IR เพื่อหาปริมาณของไคตินและไคโตซานที่สกัดได้จากเปลือกกุ้ง และศึกษาผลของไคโตซานที่มีต่อการเจริญเติบโตของต้นคะน้า โดยมีชุดการทดลองได้แก่ ปลุกในดินธรรมชาติ (ชุดควบคุม) ปลุกในดินที่ผสมปุ๋ยคอกอัตราส่วน 7:1 ปลุกโดยมีการฉีดพ่นสารละลายไคซานความเข้มข้น 40 ppm และปลุกโดยมีทั้งการใส่ปุ๋ยคอกอัตราส่วน 7:1 และมีการฉีดพ่นไคโตซาน ความเข้มข้น 40 ppm เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของคะน้าโดยการวัดความสูงต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความกว้างใบ ความยาวใบ และจำนวนใบ ผลการสกัดไคตินจากเปลือกกุ้ง 50 g พบว่าได้ปริมาณไคติน 4.96 g คิดเป็น 9.92 wt% ปริมาณสารไคโตซานที่กำจัดหุ้มะขิดิล 1 ครั้งและ 2 ครั้งจะได้ปริมาณไคโตซาน 9.44 wt% และ 7.78 wt% ตามลำดับ และมีเปอร์เซ็นต์ DD เป็น 88% และ 92% ตามลำดับ จากการนำไคโตซานมาใช้ในการทดสอบการเจริญเติบโตของคะน้า พบว่าคะน้าที่ฉีดพ่นด้วยไคโตซานความเข้มข้น 40 ppm และใส่ปุ๋ยคอกอัตราส่วน 7:1 จะมีการเจริญเติบโตดีที่สุด ทั้งทางด้านความสูงต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความกว้างใบ ความยาวใบ และจำนวนใบ

สุชาดา บุญเลิศนิรันดร์ และคณะ [41] เพิ่มประสิทธิภาพปุ๋ยไนโตรเจนโดยใช้ร่วมกับไคโตซาน เพื่อเพิ่มผลผลิตข้าว และลดต้นทุนการผลิต วางแผนการทดลองแบบ split plot in RCB จำนวน 4 ซ้ำ โดยปัจจัยหลักคือ ความเข้มข้นของไคโตซาน 4 อัตราคือ 0, 40, 80 และ 120 ppm และปัจจัยรองคือ ปุ๋ยไนโตรเจน 4 อัตราคือ 0, 6, 12 และ 24 kg ต่อไร่ ทำการทดลองระหว่างเดือนมกราคม ถึงเดือนกรกฎาคม 2556 ผลการทดลองพบว่า การใช้ไคโตซานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันมีผลทำให้คลอโรฟิลล์แตกต่างกันทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้ง ความสูง ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิต ในขณะที่การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราต่าง ๆ กันมีผลทำให้น้ำหนักแห้ง ความสูง ผลผลิต และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบผลผลิตแตกต่างกันทางสถิติ และพบปฏิสัมพันธ์ระหว่างการใช้โคโตซานร่วมกับการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ และน้ำหนักแห้งของข้าว

กนกวรรณ วัฒนาร และพรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง [42] ประยุกต์ใช้โคโตซานต่อผลผลิตข้าวเจ้าหอมนิล โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD จัดสิ่งทดลองแบบ 2x6 Factorial จำนวน 5 ซ้ำ ประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 ฤดูกาลปลูก แบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ฤดูปลูกที่หนึ่งช่วงเดือนพฤศจิกายน 2557 ถึงกุมภาพันธ์ 2558 และฤดูปลูกที่สองช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2558 ถึงพฤษภาคม 2558 และปัจจัยที่ 2 ความเข้มข้นของโคโตซาน ได้แก่ 0, 2, 4, 8, 10 และ 16 ml/L พบว่า ฤดูกาลปลูกไม่มีผลต่อความยาวรวง น้ำหนักเมล็ดรวม เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี และเมล็ดลีบ แต่มีผลต่อน้ำหนัก 1,000 เมล็ดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนความเข้มข้นของโคโตซานมีผลต่อความยาวรวง น้ำหนัก 1,000 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดรวม และเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีเพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งช่วยลดเปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบได้ถึง 24.94% เมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยการให้โคโตซานที่ความเข้มข้น 8, 10 และ 16 ml/L ทำให้ผลผลิตข้าวเจ้าหอมนิลเพิ่มขึ้น

วรรณศา ปัทมะภูสิต และพรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง [43] ศึกษาผลของโคโตซานต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณกรดซาลิไซลิกในพริกชี้หนู โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) จำนวน 4 ชุดทดลอง ชุดทดลองละ 12 ต้น โดยฉีดพ่นโคโตซานความเข้มข้น 1.2% ปริมาตร 0, 5, 10 และ 20 ml/L ทุกสัปดาห์หลังย้ายปลูก และทำการบันทึกความสูง จำนวนผลทั้งหมด น้ำหนักผลผลิตต่อต้น วิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ, บี, คลอโรฟิลล์ทั้งหมด แคโรทีนอยด์ และปริมาณกรดซาลิไซลิกในใบพืช ผลการทดลองพบว่า การให้โคโตซานส่งเสริมอัตราการเจริญเติบโตของความสูง จำนวนผลทั้งหมด น้ำหนักผลผลิตต่อต้น ปริมาณรงควัตถุ และกรดซาลิไซลิกสูงกว่าชุดควบคุม โดยโคโตซานที่ปริมาตร 5-20 ml/L สามารถเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตผลผลิต และปริมาณกรดซาลิไซลิกในพริกชี้หนูได้สูงที่สุด

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) Mac gel บริษัท ไทยนิปปอน จำกัด
2. ไคโตซาน (Chitosan, CS) บริษัท ไบโอ 21 จำกัด เกรดการค้า
3. โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium Nitrate,  $KNO_3$ ) บริษัท คาโลเออบา จำกัด เกรดวิเคราะห์
4. โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต (Sodium Tripolyphosphate, STPP) บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด เกรดการค้า
5. กรดอะซิติก (Acetic acid,  $CH_3COOH$ ) บริษัท แล็บสแกน จำกัด เกรดวิเคราะห์
6. น้ำบริสุทธิ์สูง (Ultrapure water)
7. น้ำกลั่น (Distilled water)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) บริษัท บรูเกอร์ จำกัด AXS รุ่น D8 Advance
2. เครื่องวิเคราะห์การคายรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy, XRF) บริษัท บรูเกอร์ จำกัด AG รุ่น SRS3400
3. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyser, TGA) บริษัท เพอร์กินเอลเมอร์ จำกัด รุ่น Pyris 1 TGA
4. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) บริษัท เนทซ จำกัด รุ่น DSC 204 F1
5. เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatography, IC) บริษัท เมโทรห์ม จำกัด รุ่น 930 Compact IC Flex
6. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) บริษัท ไวบราเซล จำกัด รุ่น VC505
7. ตู้อบ บริษัท แล็บคอมโพเนี่ยน จำกัด รุ่น OF-11E
8. เครื่องหมุนเหวี่ยง บริษัท ไทยพอลิเมอร์ติก จำกัด ยี่ห้อ Sanyo รุ่น Centaur 2
9. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท บูชิ จำกัด รุ่น B-169
10. เครื่องซั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท เดนเวอร์อินสตรูเมนต์ จำกัด รุ่น TC-254
11. เครื่องอัดตัวอย่างแกนเดี่ยว บริษัท เอสเอ็นพีอินสตรูเมนต์ จำกัด รุ่น A-011
12. ตาข่ายสแตนเลสความละเอียด 400 เมช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 13. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว

#### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

##### 3.3.1 การกำจัดสิ่งเจือปนในแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

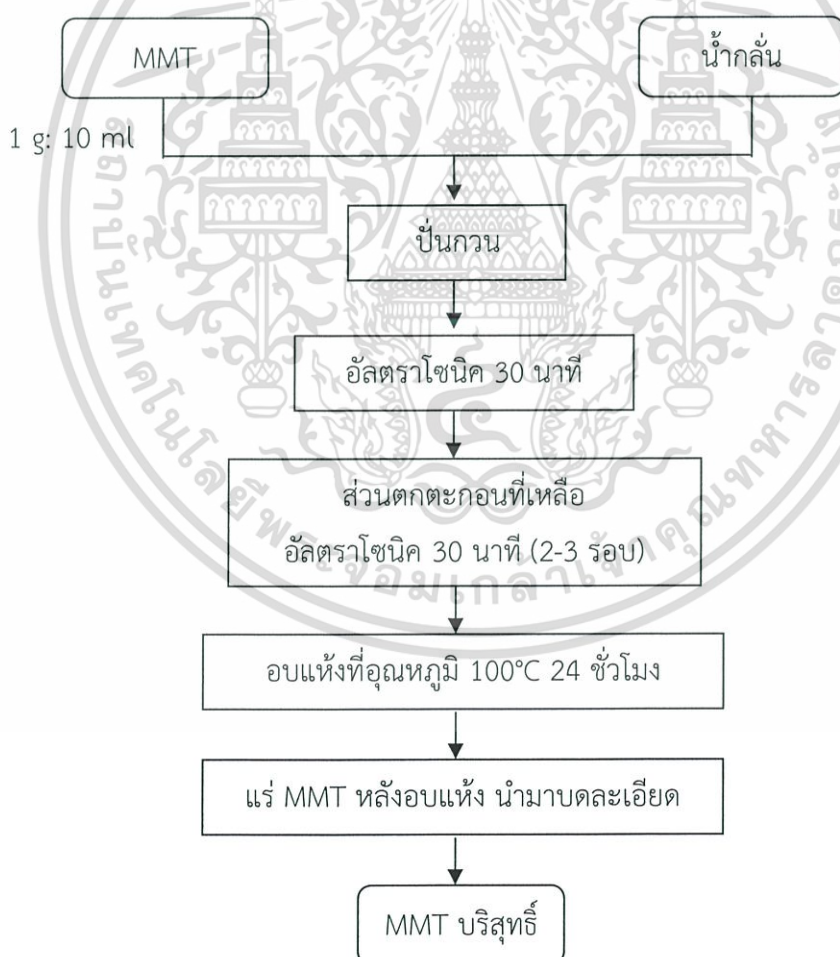
1. นำแร่ MMT ผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 g : 10 ml ในปิกเกอร์ขนาด 1000 ml แล้วปั่นจนให้กระจายตัว

2. นำปิกเกอร์ที่เตรียมไว้ใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก เพื่อแยกขนาดอนุภาคของแร่ MMT และสิ่งเจือปนออกเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำส่วนบนเข้าสู่ตูบที่อุณหภูมิ 100°C เพื่อระเหยน้ำออกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. นำแร่ MMT ที่เหลือในปิกเกอร์เติมน้ำกลั่น แล้วนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิก 2-3 รอบ

4. อบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

5. นำอนุภาคแร่ MMT ที่ได้ บดละเอียดด้วยโกร่งบดยา



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการกำจัดสิ่งเจือปนในแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การสังเคราะห์วัสดุประกอบนาโนเรดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์/ไคโตซานบรรจุ $\text{KNO}_3$ ที่เชื่อมโยงด้วย STPP ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม

- ปัจจัยศึกษาที่ 1 ปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ที่แตกต่างกัน

องค์ประกอบในการเตรียมตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.1 และขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในปัจจัยศึกษานี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ได้ตัวอย่างเป็น MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP (เมื่อ x คือปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม)

(ก) การเตรียมตัวอย่างที่ไม่มี  $\text{KNO}_3$

1. ละลายไคโตซาน 0.05 g ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2%v/v ปริมาตร 1.5 ml โดยเตรียมจากการเจือจางกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาตร 0.03 ml ด้วยน้ำกลั่น 1.5 ml ได้เป็นสารละลาย CS

2. หยดสารละลาย CS ที่เตรียมได้ในข้อ 1. ลงใน MMT 1 g ที่ผ่านขั้นตอนที่ 3.3.1 ด้วยหลอดหยดอย่างช้า ๆ สลับกับการอบแห้ง 60°C จนสารละลาย CS หมด หลังจากนั้นอบแห้งอีกครั้ง 60°C ได้เป็น สารตัวอย่าง MMT/0.05CS

3. เตรียมสารละลาย STPP โดยละลาย STPP 0.01 g ในน้ำกลั่น 1 ml จากนั้นหยดสารละลาย STPP ลงบนสารตัวอย่าง MMT/0.05CS ด้วยหลอดหยดจนหมด หลังจากนั้นอบแห้ง 60°C สารที่ได้เรียกว่า MMT/0.05CS-0.01STPP

(ข) การเตรียมตัวอย่างที่มีปุ๋ย  $\text{KNO}_3$  ปริมาณต่างกัน

1. ละลายไคโตซาน 0.05 g ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2%v/v ปริมาตร 1.5 ml ได้เป็นสารละลาย CS

2. ผสมสารละลาย CS ที่เตรียมได้ในข้อ 1. ด้วย  $\text{KNO}_3$  ที่ 0.1, 0.2 และ 0.3 g

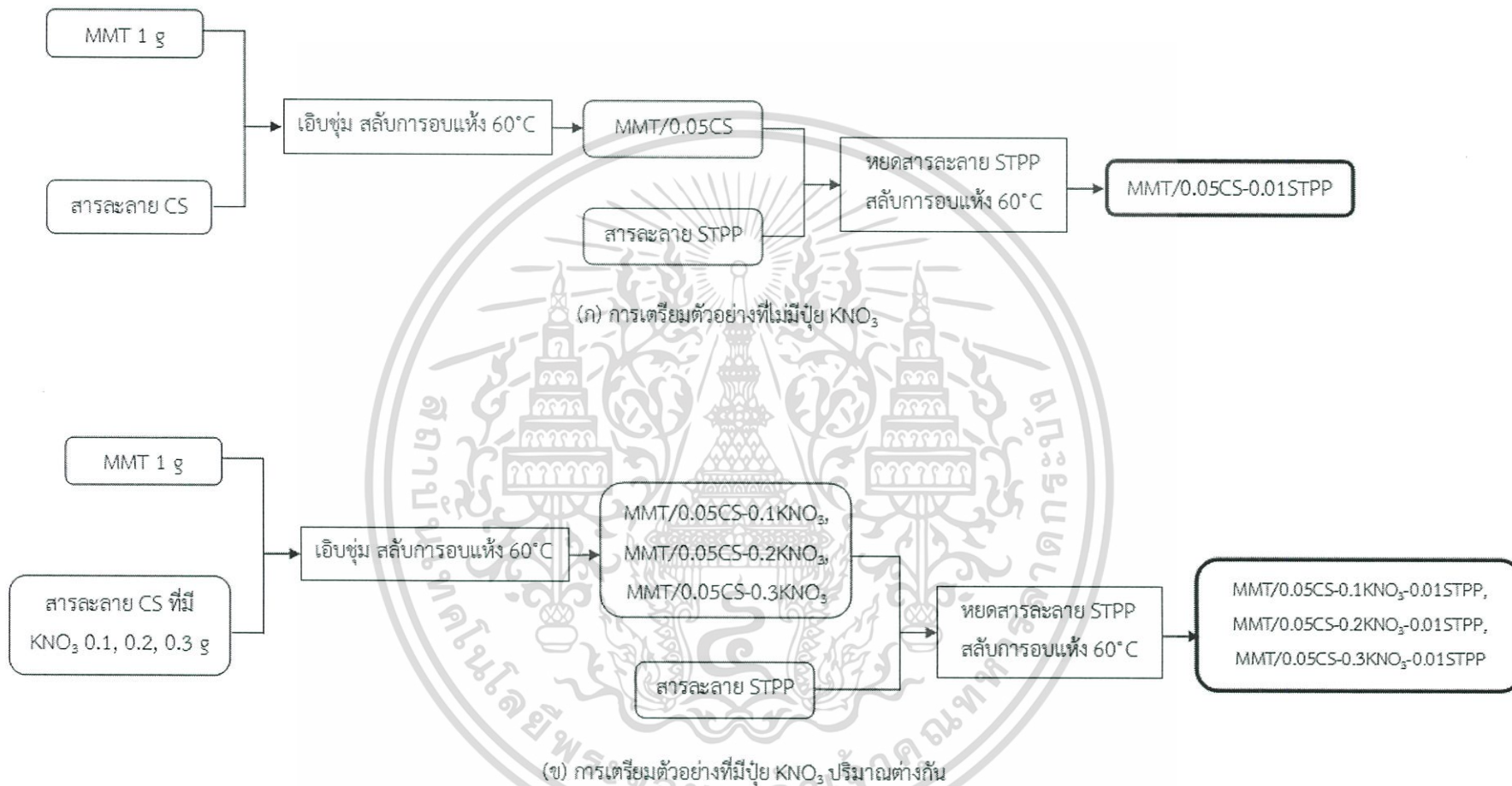
3. หยดสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2. ลงใน MMT 1 g ที่ผ่านขั้นตอนที่ 3.3.1 ด้วยหลอดหยดอย่างช้า ๆ สลับกับการอบแห้ง 60°C จนสารละลาย CS หมด หลังจากนั้นอบแห้งอีกครั้ง 60°C ได้เป็น สารตัวอย่าง MMT/0.05CS-0.1 $\text{KNO}_3$ , MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$  และ MMT/0.05CS-0.3 $\text{KNO}_3$  ตามลำดับ

4. เตรียมสารละลาย STPP โดยละลาย STPP 0.01 g ในน้ำกลั่น 1 ml จากนั้นหยดสารละลาย STPP ด้วยหลอดหยดลงบนสารตัวอย่างที่เตรียมได้ใน ข้อ 3. จนหมด หลังจากนั้นอบแห้ง 60°C สารที่ได้เรียกว่า MMT/0.05CS-0.1 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP, MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP และ MMT/0.05CS-0.3 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบในการเตรียมตัวอย่าง

ชื่อตัวอย่าง		ปริมาณองค์ประกอบ			
		KNO <sub>3</sub> (g)	CS (g)	MMT (g)	STPP (g)
ปัจจัยศึกษาที่ 1	MMT/0.05CS-0.01STPP	0.000	0.050	1.000	0.010
	MMT/0.05CS-0.1KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.100			
	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.200			
	MMT/0.05CS-0.3KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.300			
ปัจจัยศึกษาที่ 2	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub>		0.050	1.000	0.000
	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.200			0.010
	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.03STPP				0.030
ปัจจัยศึกษาที่ 3	MMT-0.2KNO <sub>3</sub> -STPP		0.000	1.000	0.010
	MMT/0.025CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.200	0.025		
	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP		0.050		
	MMT/0.1CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP		0.100		

ในการเตรียมตัวอย่างวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ในการศึกษาผลของปริมาณ KNO<sub>3</sub> และผลของปริมาณ STPP เลือกใช้ปริมาณ CS เป็น 0.05 g เนื่องจากเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการเอิบซุ่ม เนื่องจากเมื่อ CS 0.100 g ถูกเตรียมเป็นสารละลาย CS ส่งผลให้มีความหนืดมากจึงแทรกซึมเข้าไปเอิบซุ่มในชั้นโครงสร้าง MMT ได้ยาก ส่วนในการศึกษาผลของปริมาณ STPP และปริมาณ CS จะทำการเตรียมวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP โดยใช้ปริมาณ KNO<sub>3</sub> คงที่เป็น 0.2 g เนื่องจากเป็นปริมาณ KNO<sub>3</sub> ที่เหมาะสมซึ่งสามารถแทรกตัวอยู่ในโครงสร้าง MMT ได้มากกว่าจึงตรวจพบฟีกผลึกของ KNO<sub>3</sub> ที่อยู่ภายนอกชั้นโครงสร้างของ MMT ในปริมาณไม่มากนัก และในการศึกษาผลของปริมาณ KNO<sub>3</sub> และปริมาณ CS ทำได้โดยเตรียมวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP โดยใช้ปริมาณ STPP คงที่เป็น 0.01 g เนื่องจากเป็นปริมาณ STPP ที่เหมาะสมในการการเชื่อมโยงของ CS ปริมาณ STPP ที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงมากจึงขัดขวางการปลดปล่อย KNO<sub>3</sub>



รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนการทดลองปัจจัยศึกษาที่ 1 ผลของปริมาณ KNO<sub>3</sub>

## - ปัจจัยศึกษาที่ 2 ผลของการใช้สารเชื่อมโยง STPP

องค์ประกอบในการเตรียมตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.1 และขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในปัจจัยศึกษานี้ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ได้ตัวอย่างเป็น  $MMT/0.05CS-0.2KNO_3-ySTPP$  (เมื่อ  $y$  คือปริมาณ STPP ที่ใช้ในการเอิบซุ่ม)

### (ก) การเตรียมตัวอย่างที่ไม่มีสารเชื่อมโยง STPP

1. ละลายโคโตะซาน 0.05 g ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2%v/v ปริมาตร 1.5 ml โดยเตรียมจากการเจือจางกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาตร 0.03 ml ด้วยน้ำกลั่น 1.5 ml ได้เป็นสารละลาย CS

2. ผสมสารละลาย CS ที่เตรียมได้ในข้อ 1. ด้วย  $KNO_3$  ที่ 0.2 g

3. หยดสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2. ลงใน MMT 1 g ที่ผ่านขั้นตอนที่ 3.3.1 ด้วยหลอดหยดอย่างช้า ๆ สลับกับการอบแห้ง  $60^{\circ}C$  จนสารละลาย CS หมด หลังจากนั้นอบแห้งอีกครั้ง  $60^{\circ}C$  ได้เป็นสารตัวอย่าง  $MMT/0.05CS-0.2KNO_3$

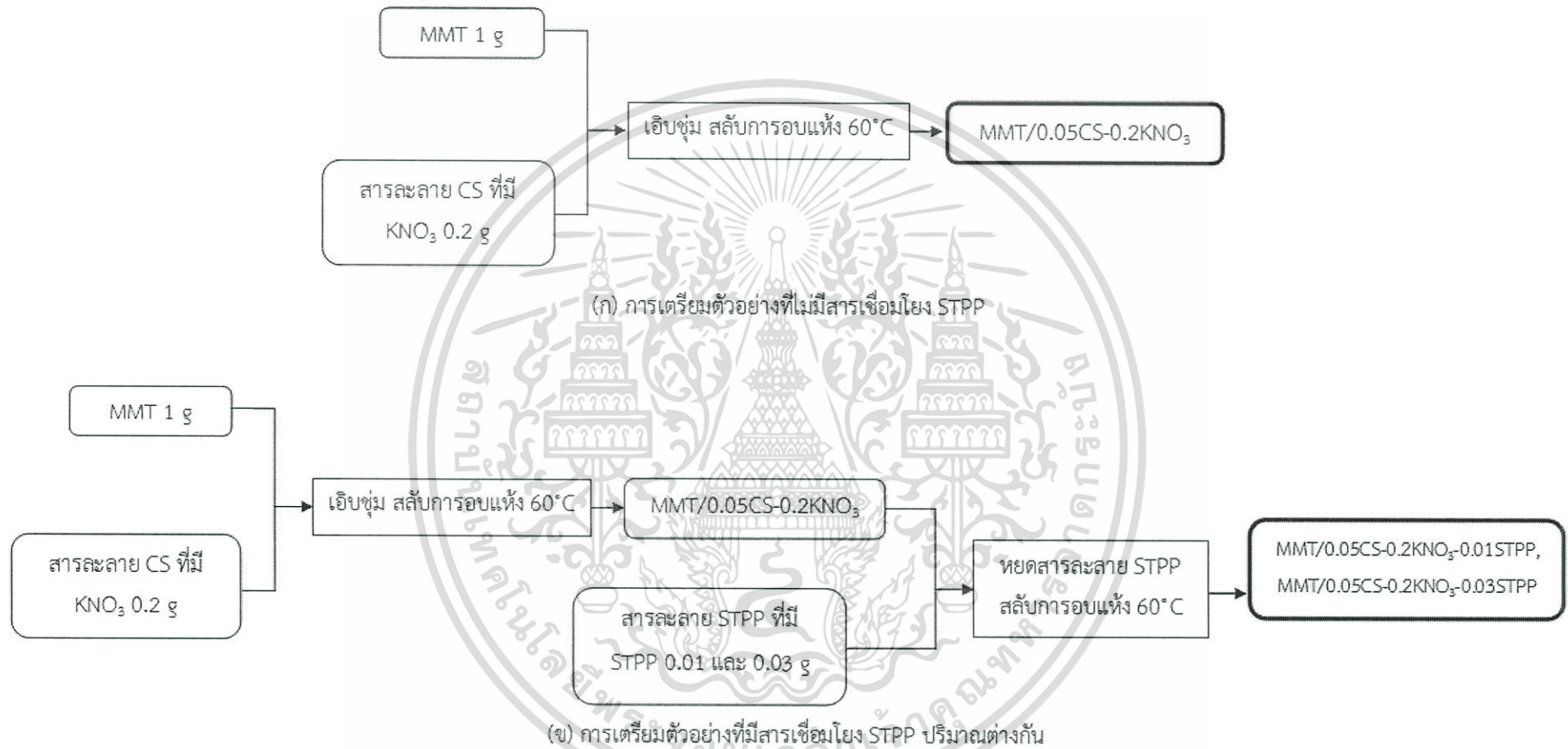
### (ข) การเตรียมตัวอย่างที่มีสารเชื่อมโยง STPP ปริมาณต่างกัน

1. ละลายโคโตะซาน 0.05 g ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2%v/v ปริมาตร 1.5 ml ได้เป็นสารละลาย CS

2. ผสมสารละลาย CS ที่เตรียมได้ในข้อ 1. ด้วย  $KNO_3$  ที่ 0.2 g

3. หยดสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2. ลงใน MMT 1 g ที่ผ่านขั้นตอนที่ 3.3.1 ด้วยหลอดหยดอย่างช้า ๆ สลับกับการอบแห้ง  $60^{\circ}C$  จนสารละลาย CS หมด หลังจากนั้นอบแห้งอีกครั้ง  $60^{\circ}C$  ได้เป็นสารตัวอย่าง  $MMT/0.05CS-0.2KNO_3$

4. เตรียมสารละลาย STPP ที่ต่างกันโดยละลาย STPP 0.01 และ 0.03 g ในน้ำกลั่น 1 ml จากนั้นหยดสารละลาย STPP ลงบนสารตัวอย่างที่เตรียมได้ในข้อ 3. ด้วยหลอดหยด จนหมด หลังจากนั้นอบแห้ง  $60^{\circ}C$  สารที่ได้เรียกว่า  $MMT/0.05CS-0.2KNO_3-0.01STPP$  และ  $MMT/0.05CS-0.2KNO_3-0.03STPP$  ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการทดลองป้งจัยศึกษาที่ 2 ผลของการใช้สารเชื่อมโยง STPP

- ปัจจัยศึกษาที่ 3 ปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน

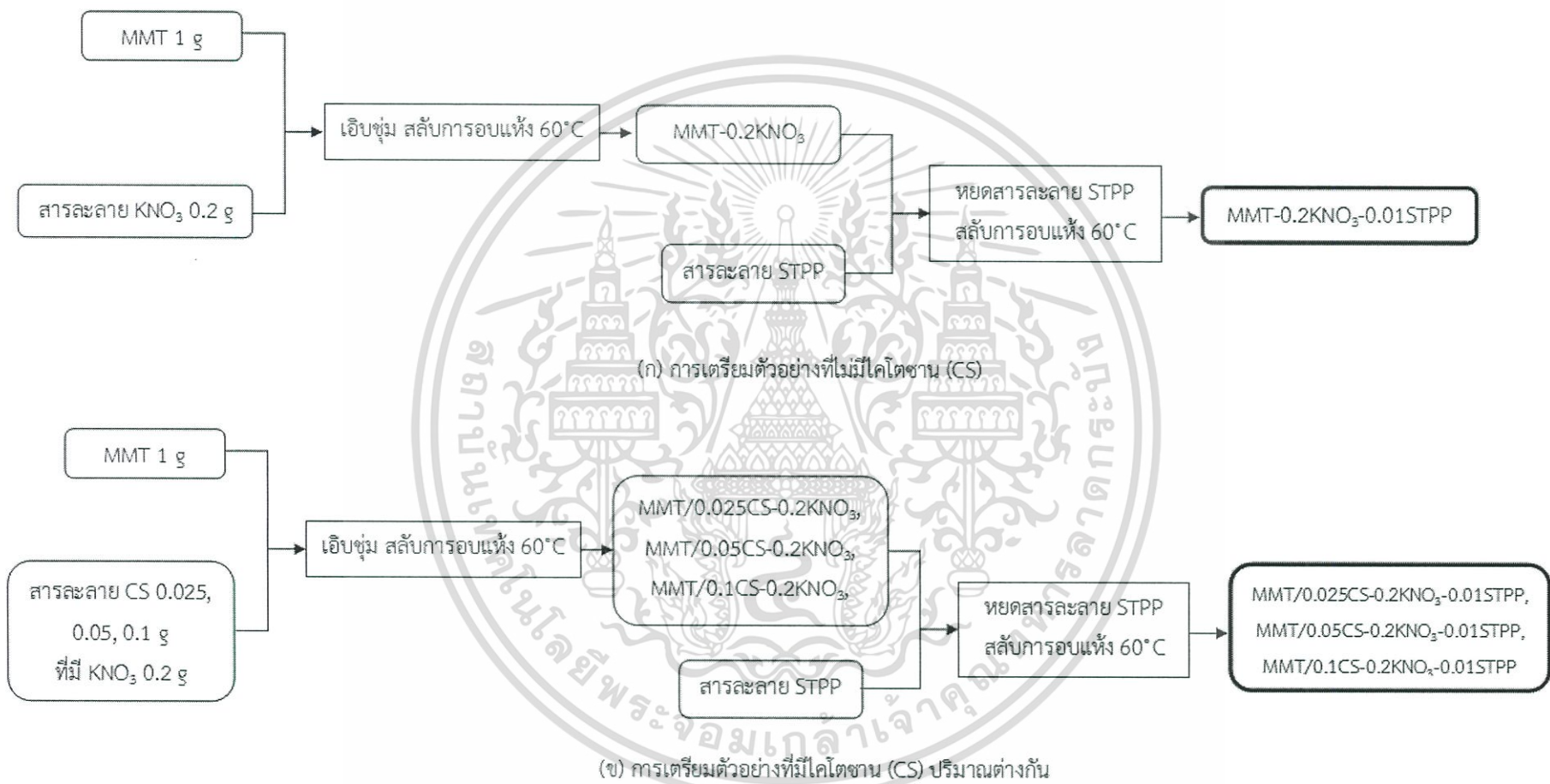
องค์ประกอบในการเตรียมตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.1 และขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างในปัจจัยศึกษานี้ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ได้ตัวอย่างเป็น MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP (เมื่อ z คือปริมาณ CS ที่ใช้ในการเอิบชุ่ม)

(ก) การเตรียมตัวอย่างที่ไม่มีไคโตซาน (CS)

1. ละลาย KNO<sub>3</sub> ที่ 0.2 g ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2%v/v ปริมาตร 1.5 ml โดยเตรียมจากการเจือจางกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาตร 0.03 ml ด้วยน้ำกลั่น 1.5 ml
2. หยดสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1. ลงใน MMT 1 g ที่ผ่านขั้นตอนที่ 3.3.1 ด้วยหลอดหยดอย่างช้า ๆ สลับกับการอบแห้ง 60°C จนสารละลาย CS หมด หลังจากนั้นอบแห้งอีกครั้ง 60°C ได้เป็นสารตัวอย่าง MMT-0.2KNO<sub>3</sub>
3. เตรียมสารละลาย STPP โดยละลาย STPP 0.01 g ในน้ำกลั่น 1 ml จากนั้นหยดสารละลาย STPP ลงบนสารตัวอย่างที่เตรียมได้ในข้อ 2. ด้วยหลอดหยดจนหมด หลังจากนั้นอบแห้ง 60°C สารที่ได้เรียกว่า MMT-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

(ข) การเตรียมตัวอย่างที่มีไคโตซาน (CS) ปริมาณต่างกัน

1. ละลายไคโตซาน 0.025, 0.05 และ 0.1 g ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2%v/v ปริมาตร 1.5 ml ได้เป็นสารละลาย CS 0.025, 0.05 และ 0.1
2. ผสมสารละลาย CS ที่เตรียมได้ในข้อ 1. ด้วย KNO<sub>3</sub> ที่ 0.2 g
3. หยดสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2. ลงใน MMT 1 g ที่ผ่านขั้นตอนที่ 3.3.1 อย่างช้า ๆ สลับกับการอบแห้ง 60°C ด้วยหลอดหยดอย่างช้า ๆ หลังจากนั้นอบแห้งอีกครั้ง 60°C ได้เป็นสารตัวอย่าง MMT/0.025CS-0.2KNO<sub>3</sub>, MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub> และ MMT/0.1CS-0.2KNO<sub>3</sub> ตามลำดับ
4. เตรียมสารละลาย STPP โดยละลาย STPP 0.01 g ในน้ำกลั่น 1 ml จากนั้นหยดสารละลาย STPP ลงบนสารตัวอย่างที่เตรียมได้ในข้อ 3. ด้วยหลอดหยดจนหมด หลังจากนั้นอบแห้ง 60°C สารที่ได้เรียกว่า MMT/0.025CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP, MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP และ MMT/0.1CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แผนภาพขั้นตอนการทดลองปัจจัยศึกษาที่ 3 ผลของปริมาณ CS

### 3.3.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MMT และวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้

1. ศึกษาวัฏภาคที่เป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

2 $\theta$ เริ่มต้น-สิ้นสุด	5° - 60°
Step size	0.040°/step
Time/step	1 sec

2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF โดยใช้การเตรียมตัวอย่าง ดังนี้

ปริมาณสารตัวอย่างประมาณ	0.5000 g
ปริมาณกรดบอริกประมาณ	4.5000 g

3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเทคนิค TGA โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

อุณหภูมิเริ่ม-สิ้นสุด	50°C - 700°C
อัตราการให้ความร้อน	10°C/min
สภาวะแก๊ส	Air zero

4. ศึกษาสมบัติและพฤติกรรมทางความร้อนของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค DSC โดยใช้สภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

อุณหภูมิเริ่ม-สิ้นสุด	40°C - 400°C
อัตราการให้ความร้อน	10°C/min
อัตราการเย็นตัว	10°C/min
สภาวะแก๊ส	Nitrogen

### 3.3.4 การศึกษาการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรตจากวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้

1. นำสารตัวอย่างที่เตรียมได้ อย่างละ 0.2 g ชั่งละเอียดด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักเป็น  $W_1$  อัดเป็นเม็ดตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ด้วยเครื่องอัดตัวอย่างแกนเดี่ยว

2. บรรจุเม็ดตัวอย่างในตาข่ายสแตนเลสความละเอียด 400 เมช จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักละเอียดด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักเป็น  $W_2$

3. แช่ห่อตัวอย่างในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 20 ml ในระหว่างการทดสอบเก็บตัวอย่างสารละลายที่แช่ตัวอย่าง และเปลี่ยนน้ำปราศจากไอออนในการแช่ตัวอย่างทุกระยะเวลา 1, 2,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3, 4, 5 และ 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำห่อตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักเป็น  $W_3$

4. นำห่อตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ  $60^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักเป็น  $W_4$

5. นำสารละลายตัวอย่างที่เก็บในแต่ละช่วงเวลาไปวิเคราะห์ปริมาณ  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  ด้วยเครื่องไอออนโครมาโทกราฟี นำปริมาณที่วิเคราะห์ได้ไปคำนวณหาปริมาณการปลดปล่อยของปุ๋ย  $\text{KNO}_3$  จากสารตัวอย่าง

6. วิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัว (%Swelling) จากสมการที่ 3.1 และ คำนวณน้ำหนักที่หายไป จากสมการที่ 3.2

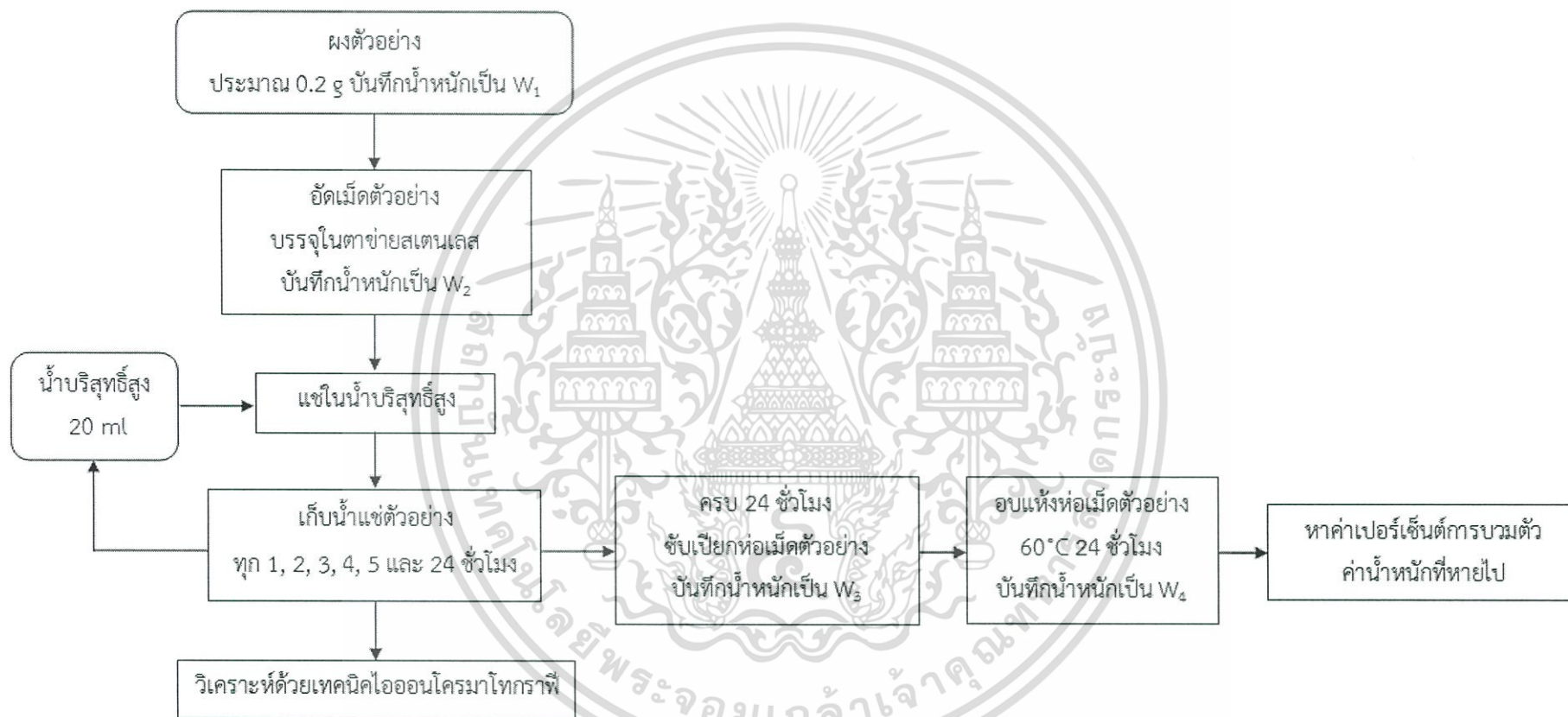
$$\% \text{Swelling} = \frac{W_3 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย  $W_3$  คือ น้ำหนักสารหลังแช่  
 $W_2$  คือ น้ำหนักสารเริ่มต้น

$$\text{น้ำหนักที่หายไป} = W_1 - W_4 \quad (3.2)$$

โดย  $W_1$  คือ น้ำหนักเริ่มต้น  
 $W_4$  คือ น้ำหนักสุดท้าย

ขั้นตอนการทดสอบการปลดปล่อย  $\text{KNO}_3$  ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการทดสอบการปลดปล่อย  $KNO_3$

### 3.3.5 การศึกษาการเจริญเติบโตของต้นข้าวพันธุ์ กข4 หลังการใช้วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้

1. เตรียมเมล็ดข้าวพันธุ์ กข4 แช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบีกเกอร์ขนาด 1000 ml ให้น้ำกลั่นท่วมเมล็ดข้าว หลังจากนั้นแยกเมล็ดข้าวออกจากน้ำที่แช่ พักทิ้งไว้ 15 นาที

2. ทำความสะอาดและกำจัดสิ่งสกปรกในทรายที่ใช้ในการเพาะปลูก โดยการนำทรายผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 : 2 กวนผสมด้วยแท่งแก้วเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเทน้ำส่วนบนที่มีเศษสิ่งสกปรกออก เติมน้ำกลั่นให้มีอัตราส่วนเดิมทำซ้ำ 2-3 รอบ หลังจากนั้น นำทรายที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. เตรียมถาดสำหรับการเพาะปลูก เจาะรูด้านล่าง บรรจุสำลีและทรายในข้อ 2. ในอัตราส่วน 1 : 2 หลังจากนั้นปลูกข้าวโดยวางเมล็ดข้าวในข้อ 1. ประมาณ 15 – 20 เมล็ด จำนวน 9 ชุดทดลองและ 1 ชุดควบคุม (Controlled group)

4. เพาะกล้าเมล็ดข้าวให้มีอายุ 1 สัปดาห์ ดูแลรดน้ำสม่ำเสมอ

5. หลังครบ 1 สัปดาห์ นำวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นทั้ง 9 ตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักอย่างละ 0.2 g ค่อย ๆ โรยลงบนโคนต้นกล้าข้าวทั้ง 9 ชุดทดลอง ดูแลรดน้ำสม่ำเสมอทุกชุดทดลอง บันทึกผลโดยการถ่ายรูปในแต่ละวันเป็นเวลา 1 สัปดาห์

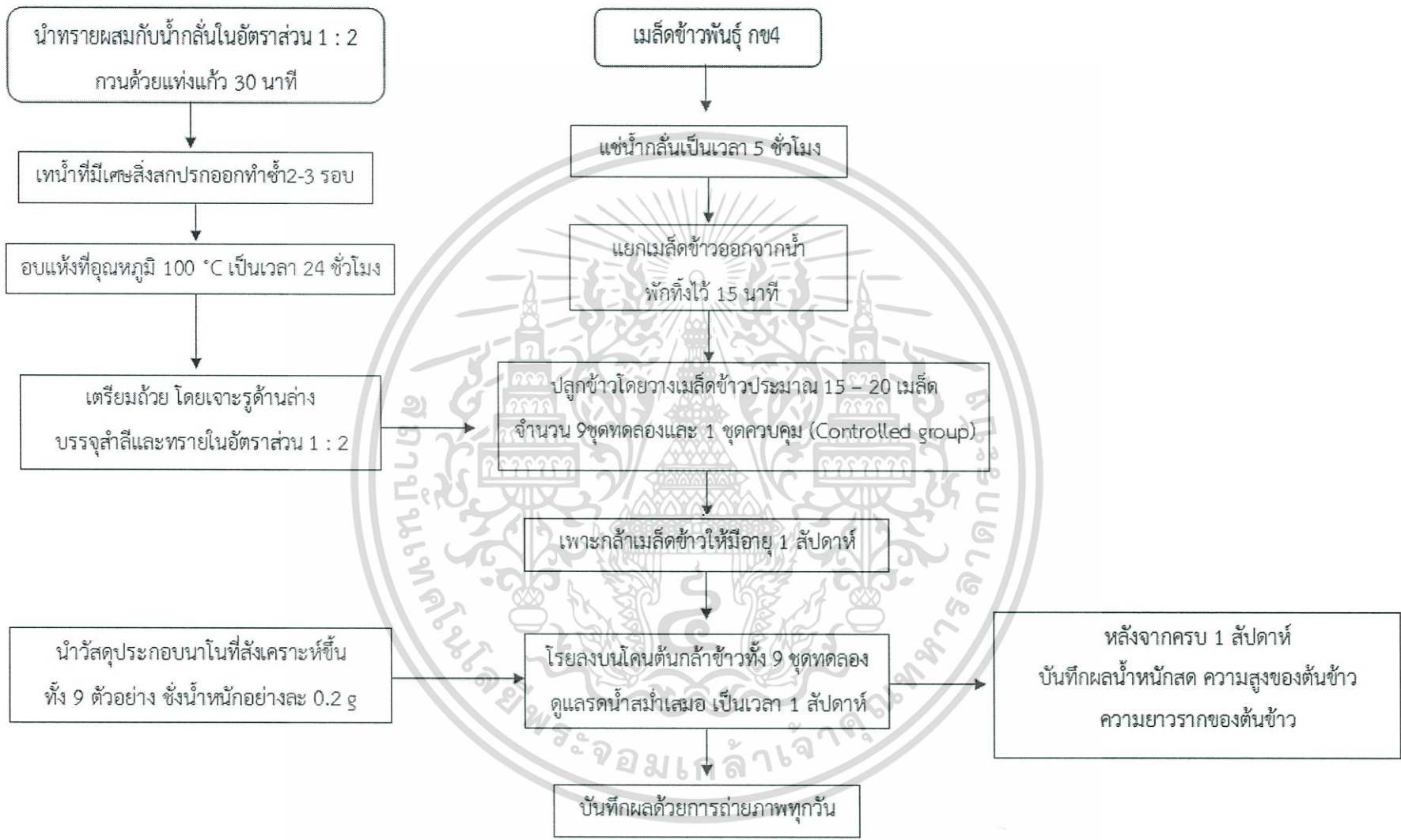
6. หลังครบ 1 สัปดาห์หลังการใช้วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ขึ้น บันทึกน้ำหนักสดและความสูงของต้นข้าว รายละเอียดการเก็บข้อมูล ดังนี้

น้ำหนักสดของต้นข้าว : ชั่งน้ำหนักต้นข้าวที่ละต้นด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

ความสูงของต้นข้าว : วัดจากข้อที่ติดรากจนถึงปลายใบที่ยาวที่สุด

ความยาวรากของต้นข้าว : วัดจากข้อที่ติดรากบนสุดจนถึงปลายรากที่ยาวที่สุด

ขั้นตอนการศึกษาการเจริญเติบโตต้นข้าวพันธุ์ กข4 หลังการใช้วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการศึกษากาการเจริญเติบโตต้นข้าวพันธุ์ กข4 หลังการใช้วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 การสังเคราะห์วัสดุประกอบนาโนแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์/ไคโตซาน บรรจุ $\text{KNO}_3$ ที่เชื่อมโยงด้วย STPP ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมวัสดุประกอบนาโน MMT/CS- $\text{KNO}_3$ -STPP ด้วยวิธีเอ็บซุ่ม ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถควบคุมปริมาณของ CS และ  $\text{KNO}_3$  ที่บรรจุในแร่ดินเหนียว MMT ได้ โดยมีปัจจัยศึกษา 3 ประการ ได้แก่ ปัจจัยศึกษาที่ 1 ปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ที่แตกต่างกัน

ปัจจัยศึกษาที่ 2 ผลของการใช้สารเชื่อมโยง STPP

ปัจจัยศึกษาที่ 3 ปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน

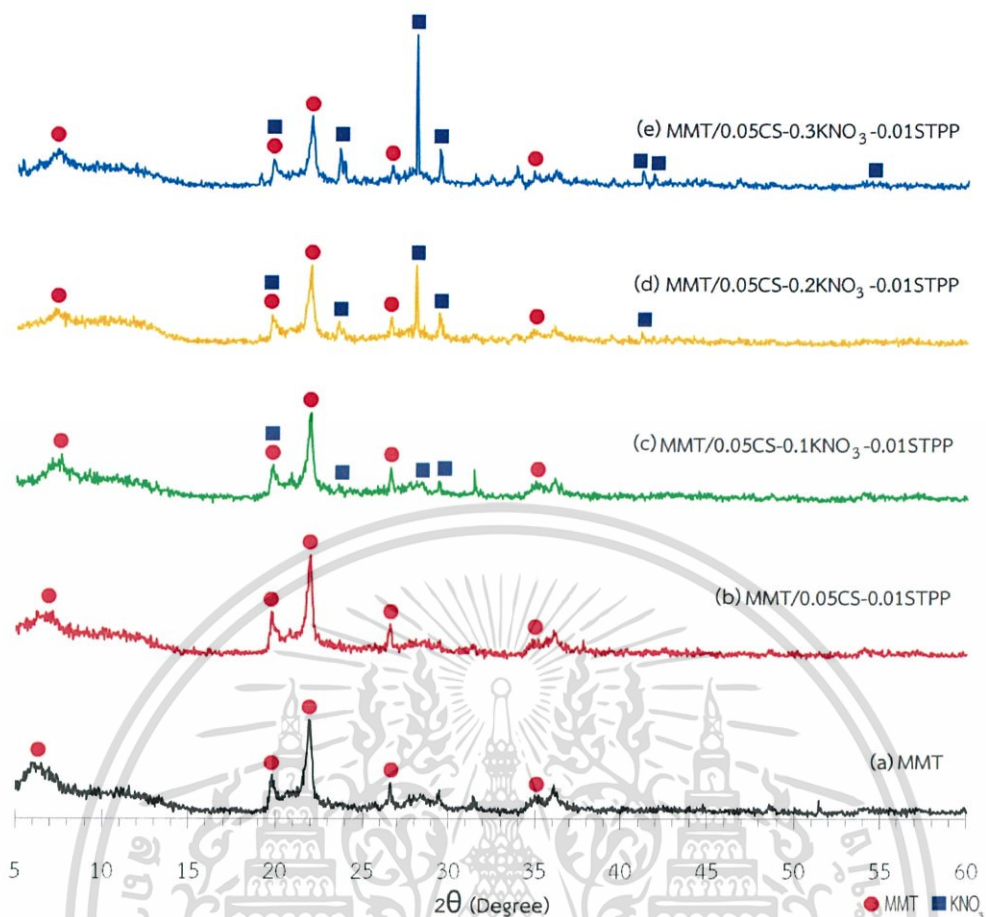
##### 4.1.1 ผลของปริมาณ $\text{KNO}_3$ ที่แตกต่างกัน

เมื่อนำแร่ดินเหนียว MMT ที่ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปนแล้วจำนวน 1 g ต่อตัวอย่างมาเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย CS ที่มี CS 0.05 g ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2%v/v ซึ่งมี  $\text{KNO}_3$  ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0, 0.1, 0.2 และ 0.3 g ตามด้วยการเอ็บซุ่มของผสมด้วยสารละลาย STPP ที่มี STPP 0.01 g ในน้ำกลั่น 1 ml เพื่อก่อให้เกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิกของไคโตซาน ได้เป็นวัสดุประกอบนาโนแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์/ไคโตซานบรรจุ  $\text{KNO}_3$  ซึ่งเรียกชื่อตัวอย่าง MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP เมื่อ x คือ ปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม

##### ก) ภูมิภาคผลึกของ MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP

เมื่อนำแร่ดินเหนียว MMT เริ่มต้นและวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ที่มุม 2 $\theta$  ตั้งแต่ 5° ถึง 60° ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1(a) พบว่าแผนภาพ XRD ของแร่ดินเหนียว MMT เริ่มต้นปรากฏพีกของระนาบ 001 ที่ตำแหน่ง 2 $\theta$  เท่ากับ 7.16° ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ได้จากสมการ  $n\lambda = 2d\sin\theta$  ( $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ) พบว่าระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของ MMT เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 12.33  $\text{\AA}$  หรือ 1.233 nm นอกจากนี้ยังพบพีกเอกลักษณ์ของ MMT ที่ตำแหน่ง 2 $\theta$  เท่ากับ 20.04° ซึ่งเป็นพีกของระนาบ 010 ตำแหน่ง 2 $\theta$  เท่ากับ 22.04° ซึ่งเป็นพีกของระนาบ 001 และตำแหน่ง 2 $\theta$  เท่ากับ 36.04° ซึ่งเป็นพีกของระนาบ 020 ระนาบเหล่านี้เป็นพีกของโครงสร้างผลึกบนแผ่น MMT



รูปที่ 4.1 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT เริ่มต้นและวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-xKNO<sub>3</sub>-0.01STPP

จากรูปที่ 4.1(b) - 4.1(e) เห็นได้ว่าการดัดแปรโครงสร้าง MMT โดยวิธีเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย CS ที่มี KNO<sub>3</sub> 0.1, 0.2 และ 0.3 g ไม่ส่งผลต่อระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ภายในโครงสร้างของ MMT อย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของโคโคซานที่เชื่อมโยงด้วย STPP ที่บรรจุ KNO<sub>3</sub> แทรกตัวอยู่ในช่องว่างระนาบ แต่ด้วยวิธีเอ็บซุ่มซึ่งแรงดันเหนียว MMT ถูกปรับปรุงโครงสร้างในสภาวะกึ่งแห้ง โดยการเอ็บซุ่ม MMT ด้วยสารละลายผสมสลับกับการอบแห้งด้วยวิธีนี้เป็นผลให้สารละลายผสม CS KNO<sub>3</sub> และ STPP แทรกตัวอยู่ในช่องว่างของ MMT ด้วยแรงคาปิลลารี (Capillary force) ซึ่งการแทรกตัวดังกล่าวไม่สามารถก่อให้เกิดการบวมตัวของ MMT จึงไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างระนาบ 001 นอกจากนี้พีกที่ตำแหน่ง 20.04° และ 22.04° ของ MMT ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแสดงให้เห็นว่าการเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย CS ที่มี KNO<sub>3</sub> ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของแผ่นผลึก MMT เช่นกันในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณของ KNO<sub>3</sub> ที่ใช้ในขั้นตอนการเอ็บซุ่ม พบพีกผลึกของ KNO<sub>3</sub> ร่วมกับพีกผลึกของ MMT โดยสัญญาณของ KNO<sub>3</sub> มีความเข้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ KNO<sub>3</sub> ที่ใช้เพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ปริมาณ KNO<sub>3</sub> น้อย KNO<sub>3</sub> จะสามารถแทรกตัวอยู่ในชั้นโครงสร้าง MMT ได้หมดจึงถูกบดบังจากพีกผลึกของ MMT แต่เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ  $\text{KNO}_3$  เพิ่มขึ้น เป็นผลให้  $\text{KNO}_3$  บางส่วนอยู่ภายในชั้นโครงสร้าง MMT และบางส่วนที่มากเกินไปจะอยู่นอกชั้นโครงสร้างของ MMT จึงพบฟีกของผลึก  $\text{KNO}_3$  ได้อย่างชัดเจน

ข) องค์ประกอบทางเคมีของ MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRF ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP

ตัวอย่าง	ธาตุองค์ประกอบทางเคมี (wt%)			อัตราส่วนโดยโมลของ $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$
	$\text{SiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	อื่นๆ	
MMT/0.05CS-0.01STPP	28.4	4.85	66.31	0.21
MMT/0.05CS-0.1 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP	22.6	24.4	52.76	1.37
MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP	17.6	39.6	42.54	2.89
MMT/0.05CS-0.3 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP	14.3	48.0	36.99	4.25

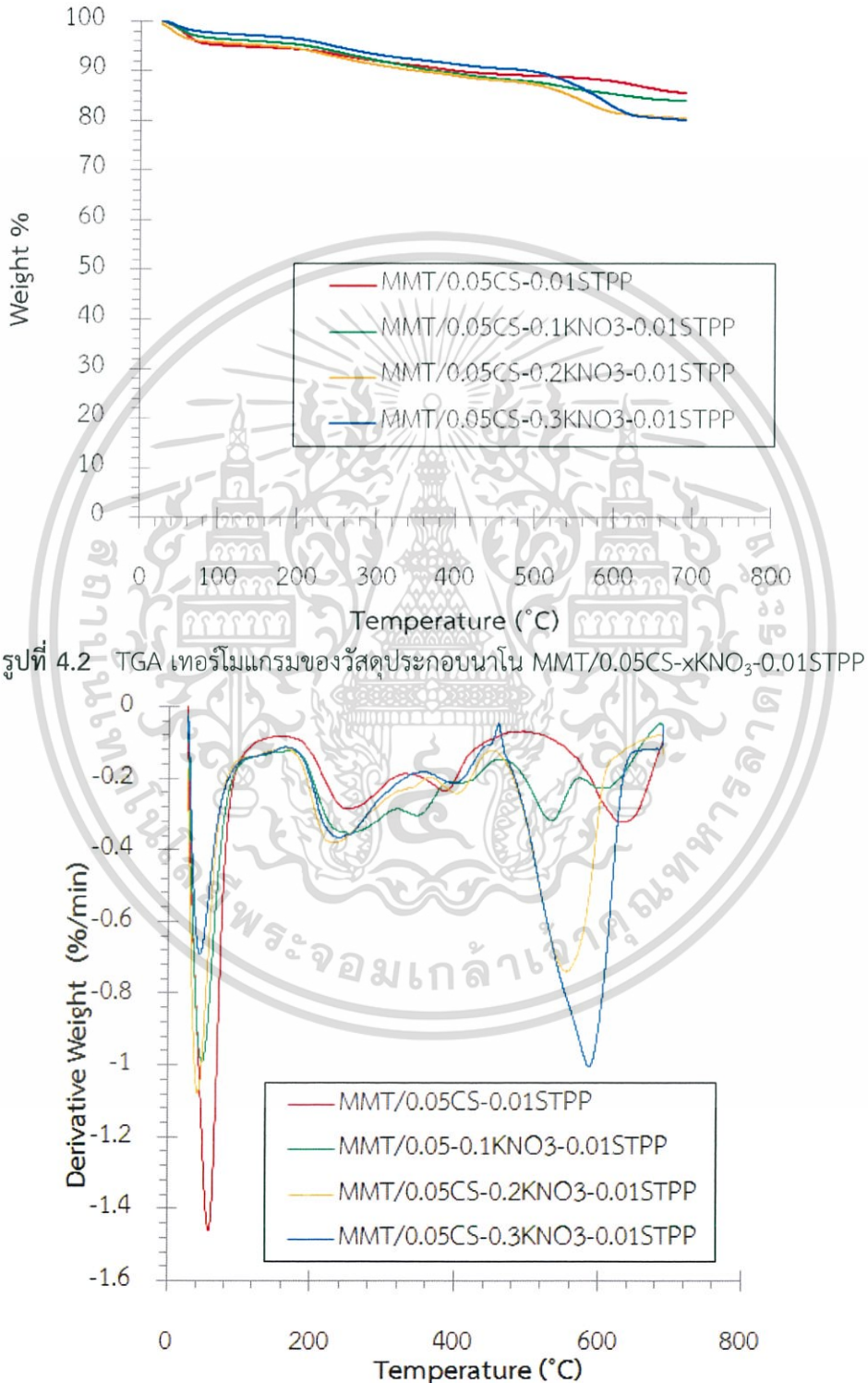
จากตารางที่ 4.1 เมื่อทำการดัดแปรโครงสร้างของ MMT พบว่าตัวอย่างที่ไม่มี  $\text{KNO}_3$  ในวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.01STPP ตรวจพบสัญญาณของ  $\text{K}_2\text{O}$  น้อยเนื่องจากสัญญาณของ  $\text{K}_2\text{O}$  มาจาก CS และ MMT เริ่มต้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ตรวจพบสัญญาณของ  $\text{K}_2\text{O}$  มากขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณที่สัมพันธ์กับปริมาณของ  $\text{KNO}_3$  ที่เพิ่มขึ้นในขั้นตอนการเอ็บซุ่ม

ค) สมบัติทางความร้อนของ MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP

เมื่อนำวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP มาศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA โดยการวิเคราะห์ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 700°C ในบรรยากาศ Air zero ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP มีช่วงการสลายตัว 3 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 100°C เป็นช่วงการสลายตัวของน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างรูพรุนและช่องว่างระหว่างโครงสร้าง MMT ช่วงที่สองคือช่วงอุณหภูมิ 210 ถึง 490°C เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ CS และช่วงที่สามคือช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700°C เป็นช่วงการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่แทรกตัวในโครงสร้าง MMT อย่างไรก็ตามในตัวอย่างที่เติม  $\text{KNO}_3$  มีสัดส่วนน้ำหนักที่สลายตัวในช่วงนี้ที่มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เติม  $\text{KNO}_3$  ทั้งนี้สันนิษฐานว่า มีการสลายตัวของ  $\text{NO}_3^-$  ร่วมกับสารอินทรีย์ ร้อยละของน้ำหนักของแข็งที่เหลือภายหลังการสลายตัวที่อุณหภูมิ 700°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงถึงปริมาณสารอนินทรีย์จาก MMT  $K_2O$  จาก  $KNO_3$  และ  $P_2O_5$  จาก STPP โดยค่าน้ำหนักที่หายไปของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $KNO_3$ -0.01STPP (เมื่อ  $x = 0.1, 0.2$  และ  $0.3$  g) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ  $KNO_3$  ที่ใช้ในการเอ็บซุ่มเพิ่มขึ้น พิจารณาจาก DTG เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $KNO_3$ -0.01STPP ดังรูปที่ 4.3

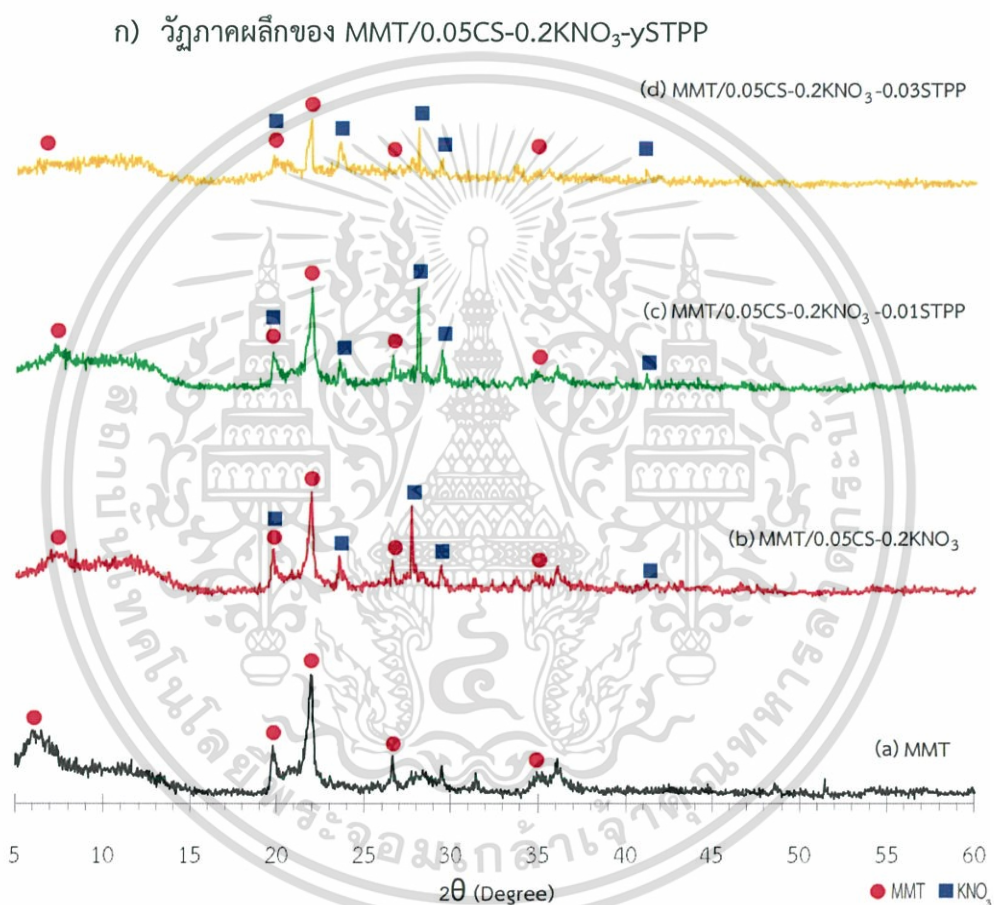


รูปที่ 4.3 DTG เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $KNO_3$ -0.01STPP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลของการใช้สารเชื่อมโยง STPP

เมื่อนำแร่ดินเหนียว MMT ที่ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปนแล้วจำนวน 1 g ต่อตัวอย่าง มาเชื่อมด้วยสารละลาย CS ที่มี CS 0.05 g ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2%v/v ซึ่งมี  $\text{KNO}_3$  0.2 g ตามด้วยการเชื่อมของผสมด้วยสารละลาย STPP ที่มีปริมาณแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 0.01 และ 0.03 g ในน้ำกลั่น 1 ml เพื่อก่อให้เกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิกของโคโตซาน ได้เป็นวัสดุประกอบนาโนแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์/โคโตซานบรรจุ  $\text{KNO}_3$  ซึ่งเรียกชื่อตัวอย่าง MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -ySTPP เมื่อ y คือ ปริมาณ STPP ที่ใช้ในการเชื่อม



รูปที่ 4.4 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT เริ่มต้นและวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -ySTPP

รูปที่ 4.4(b) - 4.4(d) แสดงวัฏภาคผลึกของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -ySTPP ที่เตรียมได้ เห็นได้ว่าการดัดแปรโครงสร้าง MMT โดยวิธีเชื่อมด้วยสารละลาย CS และ  $\text{KNO}_3$  แล้วเชื่อมโยงโมเลกุลของโคโตซานด้วย STPP ปริมาณ 0.01 และ 0.03 g จากผลการวิเคราะห์พบว่า การปรับเปลี่ยนปริมาณ STPP ที่ใช้ในการเชื่อมโยงจะพบว่าฟีกเอกลักษณ์ MMT และ  $\text{KNO}_3$  เป็นหลักแต่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของวัฏภาคผลึกที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP และระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ภายในโครงสร้างของ MMT อย่างมีนัยสำคัญ

ข) องค์ประกอบทางเคมีของ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRF ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP

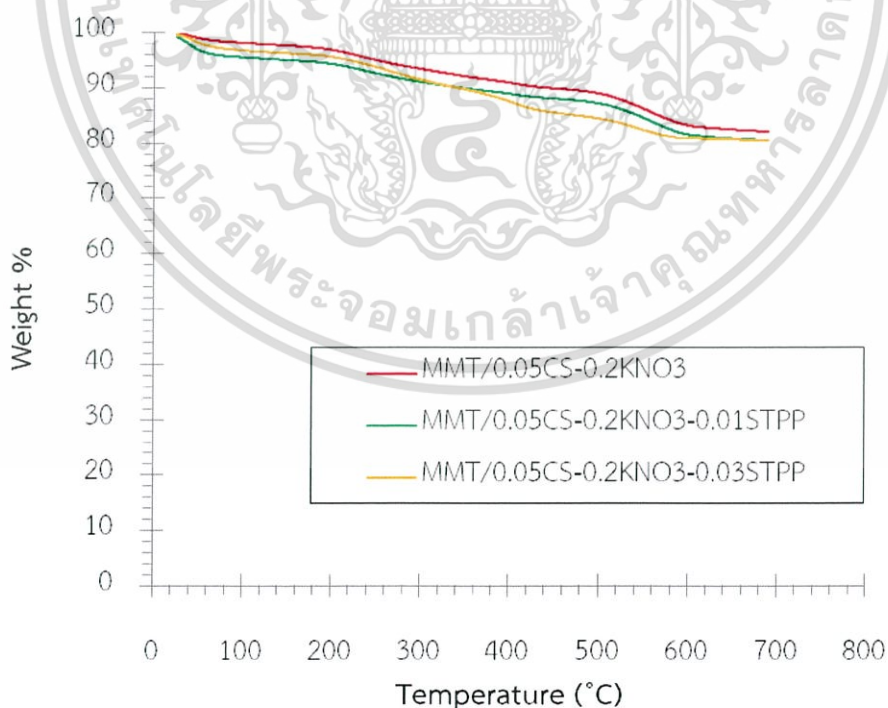
ตัวอย่าง	ธาตุองค์ประกอบทางเคมี (wt%)			อัตราส่วนโดยโมลของ K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>
	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	อื่นๆ	
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub>	17.5	40.0	41.84	2.93
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	17.6	39.6	42.54	2.89
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.03STPP	56.4	17.8	28.11	0.40 *

\*หมายเหตุ วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.03STPP มีผลการวิเคราะห์ที่คลาดเคลื่อน จึงทำให้อัตราส่วนโดยโมลของ K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> ไม่เป็นไปตามแนวโน้มทางทฤษฎี

จากตารางที่ 4.2 พบว่าวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-ySTPP ที่ไม่มี STPP สามารถตรวจพบสัญญาณของ K<sub>2</sub>O มีค่าใกล้เคียงกันกับวัสดุประกอบนาโนที่มี STPP เนื่องจากปริมาณของ KNO<sub>3</sub> ที่ใช้ในการเอ็บซุ่มมีปริมาณเท่ากัน จึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วนโดยโมลของ K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการเติม STPP 0.01 g ไม่ส่งผลต่อสัญญาณ K<sub>2</sub>O และ SiO<sub>2</sub> ใดๆก็ตามตัวอย่างที่มีปริมาณ STPP 0.03 g มีผลการวิเคราะห์ที่ไม่สอดคล้องผลทางทฤษฎี เนื่องจากปริมาณ ของ MMT, CS และ KNO<sub>3</sub> ที่ใช้ในขั้นตอนการเอ็บซุ่มมีปริมาณเท่ากัน การตรวจพบสัญญาณของ SiO<sub>2</sub> และ K<sub>2</sub>O จึงควรมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub> และ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ผลการวิเคราะห์วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.03STPP มีค่าคลาดเคลื่อน ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความคลาดเคลื่อนของการเอ็บซุ่มตัวอย่างที่มีความไม่สม่ำเสมอในวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ เมื่อสุมตัวอย่างไปวิเคราะห์จึงเกิดความคลาดเคลื่อน

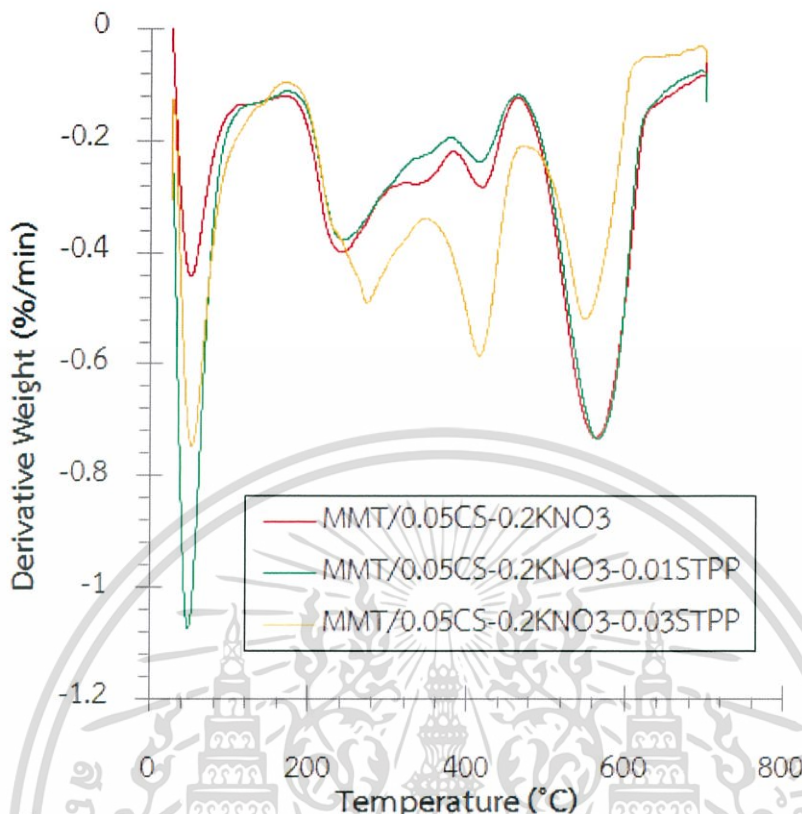
ค) สมบัติทางความร้อน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP

เมื่อนำวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP มาศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA โดยการวิเคราะห์ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 700°C ในบรรยากาศ Air zero ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP มีช่วงการสลายตัว 3 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 100°C เป็นช่วงการสลายตัวของน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างรูพรุนและช่องว่างระหว่างโครงสร้าง MMT ช่วงที่สองคือช่วงอุณหภูมิ 210 ถึง 490°C เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ CS และช่วงที่สามคือช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700°C เป็นช่วงการสลายตัวของสารสารอินทรีย์ที่แทรกตัวในโครงสร้าง MMT ร้อยละของน้ำหนักของแข็งที่เหลือภายหลังการสลายตัวที่อุณหภูมิ 700°C แสดงถึงปริมาณสารอนินทรีย์จาก MMT K<sub>2</sub>O จากการเผาไหม้ของ KNO<sub>3</sub> และ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> จากการเผาไหม้ของ STPP โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ STPP ส่งผลให้ค่าน้ำหนักที่หายไปมีค่ามากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์จาก STPP มากขึ้น สันนิษฐานว่าอาจเป็นผลจากการเชื่อมโยงระหว่าง CS ด้วย STPP ที่ช่วยกักเก็บและชะลอการสลายตัวของ KNO<sub>3</sub> ดังรูปที่ 4.6 DTG เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน พบว่าที่ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.03STPP มีช่วงอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิประมาณ 268.65°C ซึ่งสูงกว่าเพราะมีการเชื่อมโยงแบบไอออนิกของ CS ด้วย STPP มากกว่า อย่างไรก็ตามที่ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP และ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.03STPP มีค่าน้ำหนักที่หายไปแตกต่างกันไม่มากเป็นผลจากปริมาณ STPP ในระบบทั้งสองแตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 4.5 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 DTG เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP

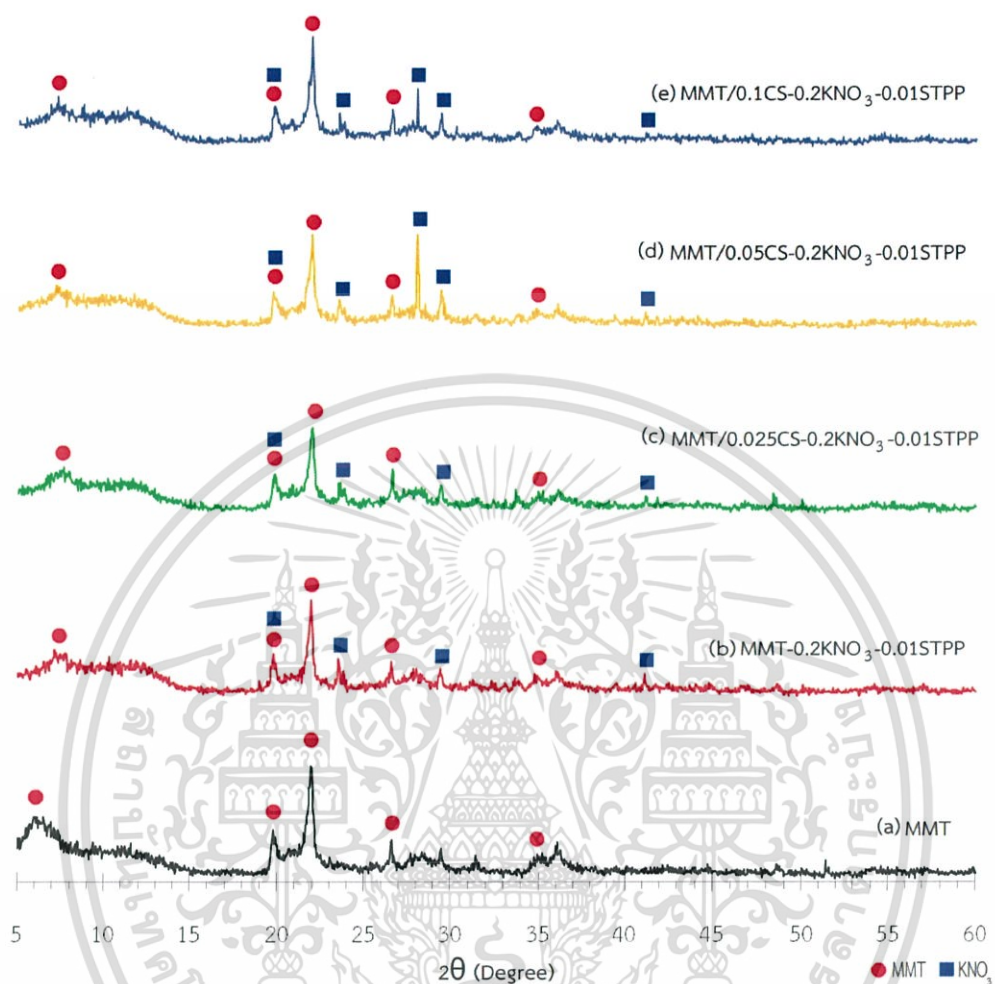
#### 4.1.3 ผลของปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน

เมื่อนำแร่ดินเหนียว MMT ที่ผ่านการกำจัดสิ่งเจือปนแล้วจำนวน 1 g ต่อตัวอย่างมาเอิบซุ่มด้วยสารละลาย CS ที่มี CS 0, 0.025, 0.05 และ 0.1 g ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 2%v/v ซึ่งมี KNO<sub>3</sub> 0.2 g ตามด้วยการเอิบซุ่มของผสมด้วยสารละลาย STPP ที่มี STPP 0.01 g ในน้ำกลั่น 1 ml เพื่อก่อให้เกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิกของโคโตซาน ได้เป็นวัสดุประกอบนาโนแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์/โคโตซานบรรจุ KNO<sub>3</sub> ซึ่งเรียกชื่อตัวอย่าง MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP เมื่อ z คือ ปริมาณ CS ที่ใช้ในการเอิบซุ่ม

#### ก) ภูมิภาคผลึกของ MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

รูปที่ 4.7(b) – 4.7(e) แสดงภูมิภาคผลึกของวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ที่เตรียมได้ เห็นได้ว่าการดัดแปรโครงสร้าง MMT โดยวิธีเอิบซุ่มด้วยสารละลาย CS ที่มี CS ที่ 0.025, 0.05 และ 0.1 g ที่มี KNO<sub>3</sub> แล้วเชื่อมโยงโมเลกุลของโคโตซานด้วย STPP ไม่ส่งผลต่อพิกเอกลักษณะของ MMT และ KNO<sub>3</sub> เป็นผลเช่นเดียวกับการปรับเปลี่ยนปริมาณ STPP ในขณะที่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ CS พบว่าไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพิกเอกลักษณะของ MMT และ KNO<sub>3</sub> เช่นเดียวกับการปรับเปลี่ยนปริมาณ STPP ดังแสดงในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แผนภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT เริ่มต้นและวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS<sub>3</sub>-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

ข) องค์ประกอบทางเคมีของ MMT/zCS<sub>3</sub>-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS<sub>3</sub>-0.01STPP ที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRF ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3

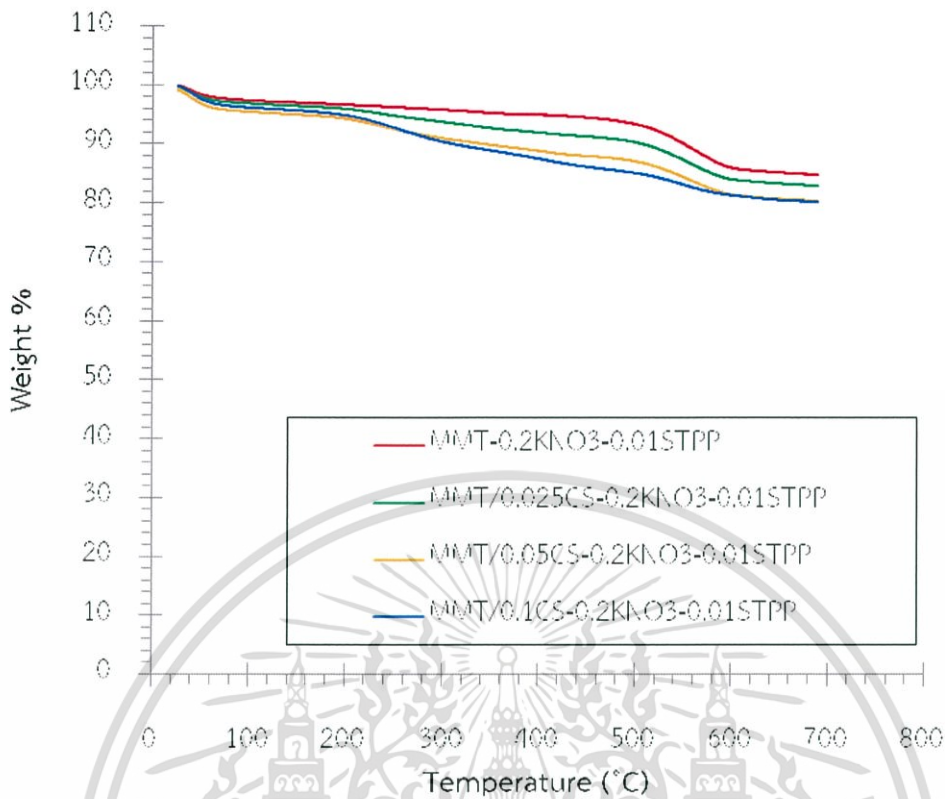
จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CS ค่าองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง และค่าอัตราส่วนโดยโมลของ K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ CS ไม่มีผลต่อการบ่งชี้องค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

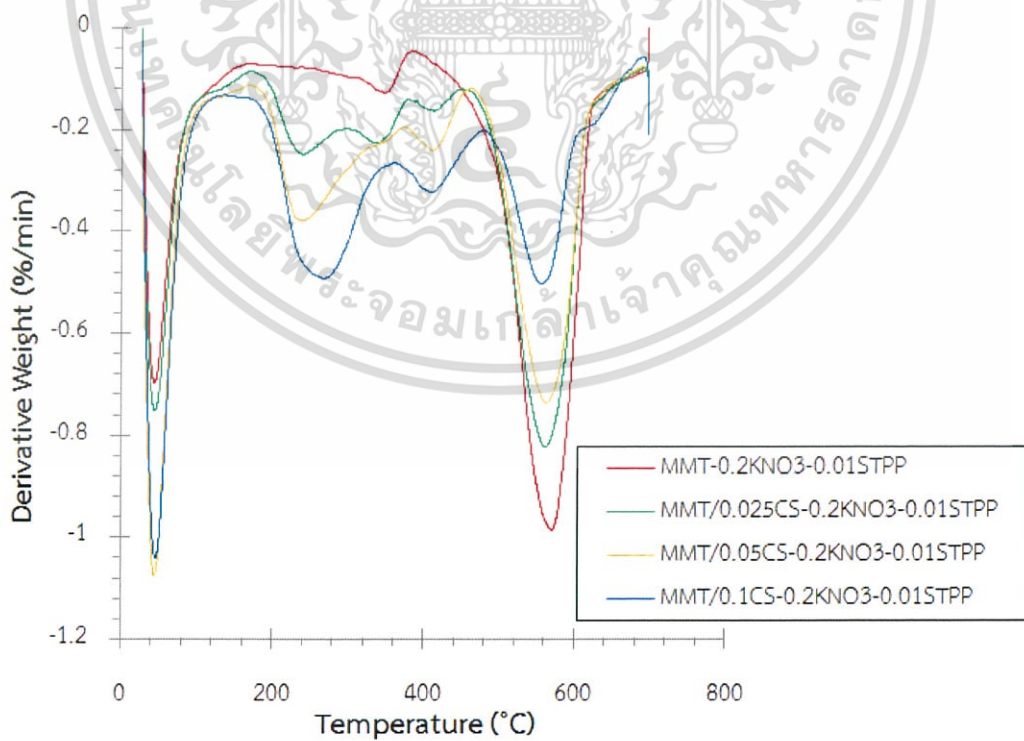
ตัวอย่าง	ธาตุองค์ประกอบทางเคมี (wt%)			อัตราส่วนโดยโมล ของ K <sub>2</sub> O /SiO <sub>2</sub>
	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	อื่นๆ	
MMT-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	18.3	39.9	41.34	2.83
MMT/0.025CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	17.6	39.1	43.09	2.86
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	17.6	39.6	42.54	2.89
MMT/0.1CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	18.7	36.1	44.41	2.48

#### ค) สมบัติทางความร้อน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

เมื่อนำวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP มาศึกษาการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA โดยการวิเคราะห์ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 700°C ในบรรยากาศ Air zero ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP มีช่วงการสลายตัว 3 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 100°C เป็นช่วงการสลายตัวของน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างรูพรุนและช่องว่างระหว่างโครงสร้าง MMT ช่วงที่สองคือช่วงอุณหภูมิ 210 ถึง 490°C เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ CS และช่วงที่สามคือช่วงอุณหภูมิ 500 ถึง 700°C เป็นช่วงการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่แทรกตัวในโครงสร้าง MMT ร้อยละของน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่หลังการสลายตัวที่อุณหภูมิ 700°C แสดงถึงปริมาณสารอนินทรีย์จาก MMT K<sub>2</sub>O จากการเผาไหม้ของ KNO<sub>3</sub> และ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> จากการเผาไหม้ของ STPP โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CS ส่งผลให้ช่วงการสลายตัวของ CS เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ CS ที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าน้ำหนักที่หายไปมีค่ามากขึ้น พิจารณาจาก DTG เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS -0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP



รูปที่ 4.9 DTG เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 สมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP

เมื่อนำวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ที่สังเคราะห์ได้ มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานแบบดูดความร้อน (Endothermic peak) และค่าพลังงานความร้อน ( $\Delta H$ ) ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณความร้อนที่ใช้เพื่อให้ตัวอย่างเกิดการหลอมเหลวดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าอุณหภูมิ Onset ของพีกดูดความร้อน (Endothermic peak) และค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC

Sample	Endothermic peak (°C)	$\Delta H$ (J/g)
MMT/0.05CS-0.01STPP	182.2	117.9
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub>	204.5	79.88
MMT-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	204.4	77.58
MMT/0.05CS-0.1KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	206.5	63.33
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	205.0	70.01
MMT/0.05CS-0.3KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	215.4	56.85
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.03STPP	222.1	36.67
MMT/0.025CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	204.9	70.78
MMT/0.1CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	199.4	86.59

จากตารางที่ 4.4 พบว่าวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.01STPP ในกรณีที่ไม่มี KNO<sub>3</sub> มีค่า Endothermic peak 182.2°C โดยมีค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 117.9 J/g ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าพีกดังกล่าวเป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของ CS ที่เชื่อมโยงด้วย STPP ขณะที่วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub> ที่ไม่มี STPP และวัสดุประกอบนาโน MMT-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ที่ไม่มี CS พบค่า Endothermic peak ที่อุณหภูมิประมาณ 204.5 และ 204.4°C ตามลำดับ โดยมีค่า  $\Delta H$  เท่ากับ 79.88 และ 77.58 J/g ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองกรณีนี้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลง และค่าพลังงานที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสันนิษฐานได้ว่าเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของสารประกอบในเทอร์ตที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างของโครงสร้าง MMT

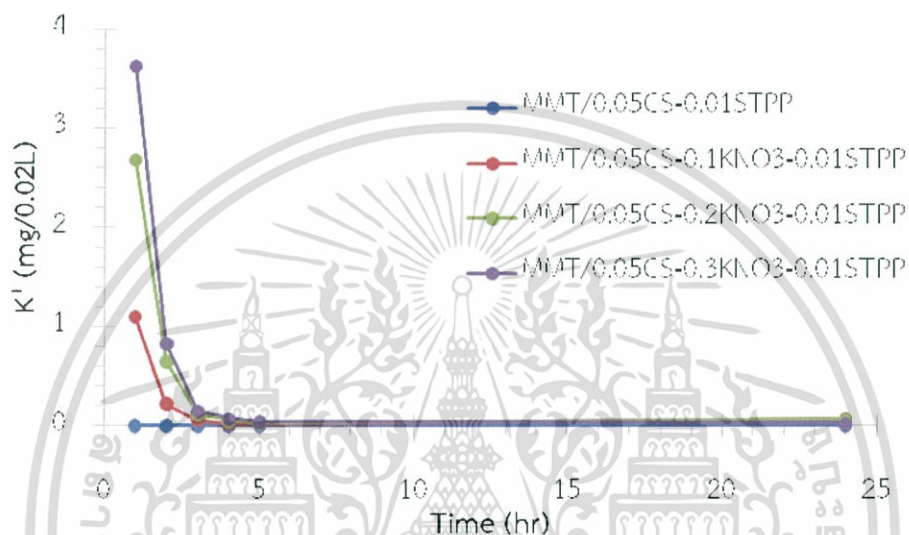
ในกรณีของวัสดุประกอบนาโนที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ พบว่าทุกตัวอย่างมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 205-220°C ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิการสลายตัวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

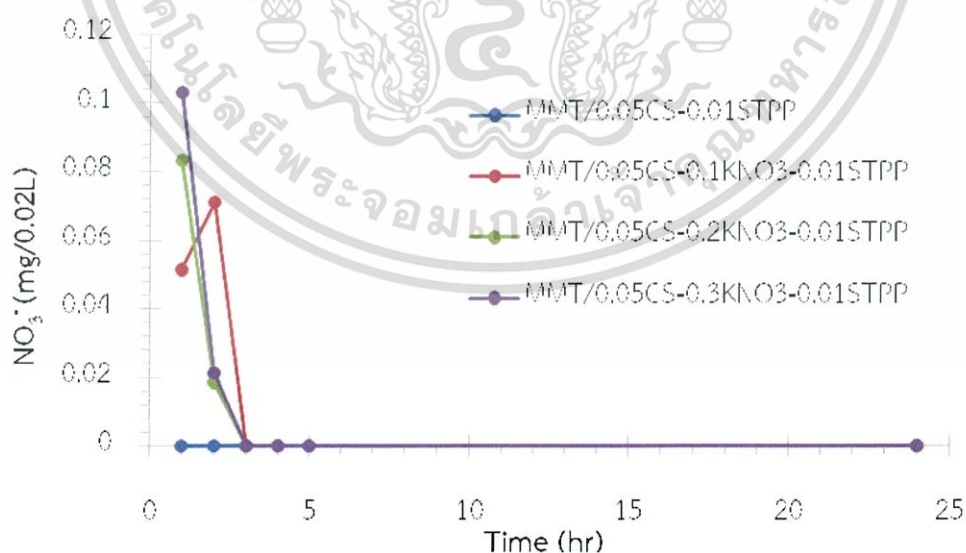
สารประกอบไนเตรดเป็นหลัก การปรับเปลี่ยนองค์ประกอบอื่นๆ คือ CS และ STPP ไม่แสดงผลอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากในวัสดุประกอบมีปริมาณ  $\text{KNO}_3$  สูงกว่าปริมาณ CS และ STPP มาก

#### 4.2 การปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรดจากวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้

ในการทดลองการปลดปล่อย  $\text{KNO}_3$  จากตัวอย่างวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นได้โดยสถานะที่แตกต่างกันตามปัจจัยศึกษา ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง 4.15 และตารางที่ 4.5 ถึง 4.7



รูปที่ 4.10 กราฟการปลดปล่อยของ  $\text{K}^+$  จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ



รูปที่ 4.11 กราฟการปลดปล่อยของ  $\text{NO}_3^-$  จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ

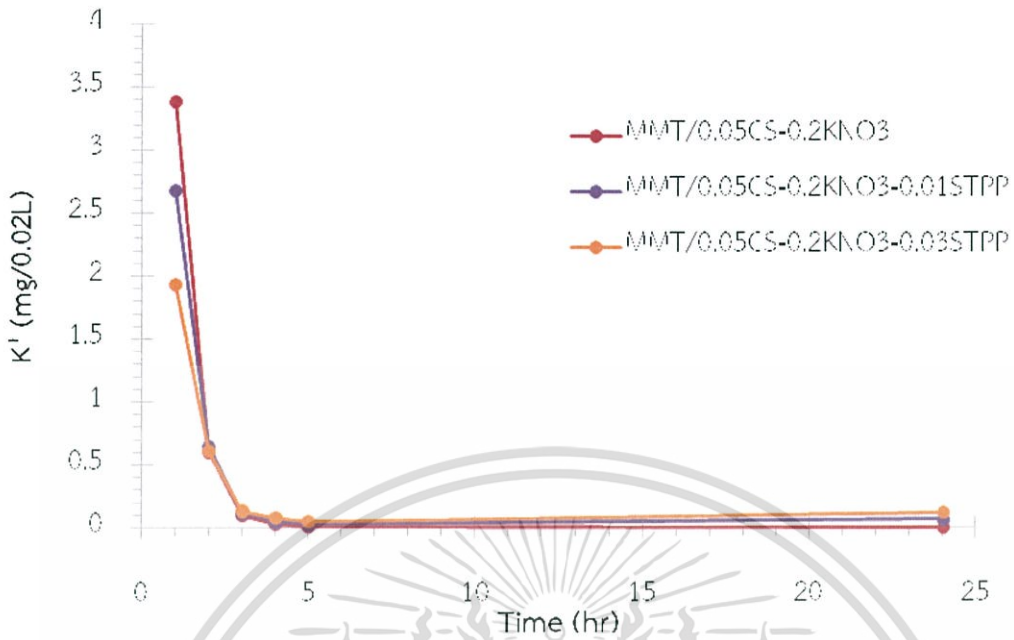
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่า วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.01STPP ซึ่งไม่มีการเติม  $\text{KNO}_3$  จะไม่มีการปลดปล่อยไอออนทั้ง  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  แต่ในวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP พบว่าในช่วงแรกมีปริมาณการปลดปล่อยของ  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  มากที่สุด แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นพบว่าปริมาณการปลดปล่อย  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยหลังจากช่วงที่ 4 พบว่าความเข้มข้นของ  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  ที่ปลดปล่อยออกมามีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สันนิษฐานว่า  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  ที่บรรจุอยู่ภายใน MMT/0.05CS-0.1, 0.2, 0.3 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ถูกปลดปล่อยออกมาน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่มี  $\text{KNO}_3$  ต่างกันพบว่าปริมาณการปลดปล่อยของ  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  มีปริมาณที่สัมพันธ์กับปริมาณของ  $\text{KNO}_3$  ที่เพิ่มลงในตัวอย่าง CS จากผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกเส้นกราฟมีความชันมาก แสดงว่าปริมาณการปลดปล่อย  $\text{KNO}_3$  สูงเนื่องจากการปลดปล่อย  $\text{KNO}_3$  ส่วนที่อยู่ภายนอกโครงสร้างของ MMT และ CS จึงสามารถละลายออกมาจากวัสดุประกอบนาโนได้ง่าย แต่ในช่วงต่อมา  $\text{KNO}_3$  ถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้าจากการแพร่ออกจากภายในโครงสร้างของ MMT และ CS

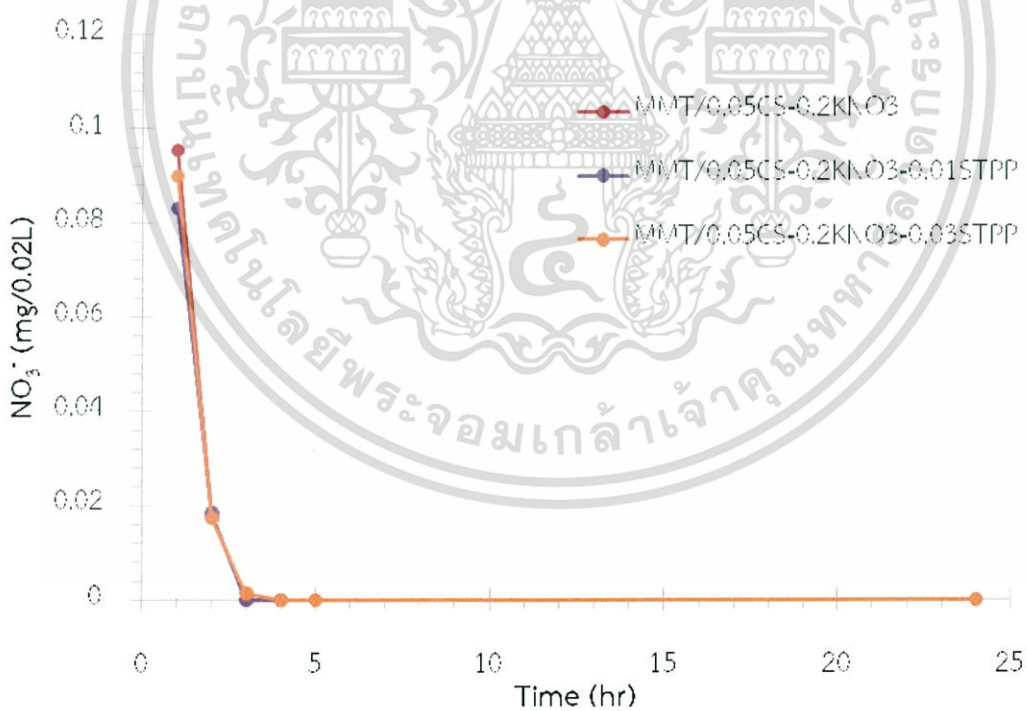
ตารางที่ 4.5 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ปริมาณเริ่มต้นที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม (mg)		ปริมาณ $\text{K}^+$ ที่ปลดปล่อย		ปริมาณ $\text{NO}_3^-$ ที่ปลดปล่อย	
	$\text{K}^+$	$\text{NO}_3^-$	mg	wt%	mg	wt%
MMT/0.05CS-0.01STPP	0	0	0	0	0	0
MMT/0.05CS-0.1 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP	4.0	13.2	1.51	37.3	0.12	0.9
MMT/0.05CS-0.2 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP	7.4	24.3	3.58	48.0	0.10	0.4
MMT/0.05CS-0.3 $\text{KNO}_3$ -0.01STPP	10.3	33.7	4.75	45.9	0.12	0.4

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.5 และภาคผนวก ค พบว่าการปลดปล่อยของ  $\text{KNO}_3$  จากวัสดุประกอบ MMT/0.05CS-x $\text{KNO}_3$ -0.01STPP มีการปลดปล่อย  $\text{K}^+$  อยู่ในช่วง 37-48 wt% ส่วน  $\text{NO}_3^-$  ปลดปล่อยออกมาน้อยมากเพียง 0.4-0.9 wt% สันนิษฐานว่าอาจเป็นผลมาจากขนาดโมเลกุลของ  $\text{NO}_3^-$  ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่า  $\text{K}^+$  ทำให้แพร่ออกจากโครงสร้างร่างแหของ CS ที่ถูกเชื่อมโยงแบบไอออนิกด้วย STPP ได้ยาก และยังมีผลจากประจุบวกของหมู่เอมีน ( $-\text{NH}_3^+$ ) ในโคโตซานที่อาจเกิดอันตรกิริยายึดจับกับ  $\text{NO}_3^-$  นอกจากนี้ยังมีผลจากหมู่ไฮดรอกซิล ( $-\text{OH}$ ) ที่มีประจุลบในโคโตซานที่เกิดอันตรกิริยายึดจับกับ  $\text{K}^+$  ไว้จึงทำให้มีการปลดปล่อยได้น้อย



รูปที่ 4.12 กราฟการปลดปล่อยของ  $K^+$  จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP ซึ่งมีปริมาณ STPP ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 กราฟการปลดปล่อยของ  $NO_3^-$  จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP ซึ่งมีปริมาณ STPP ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ

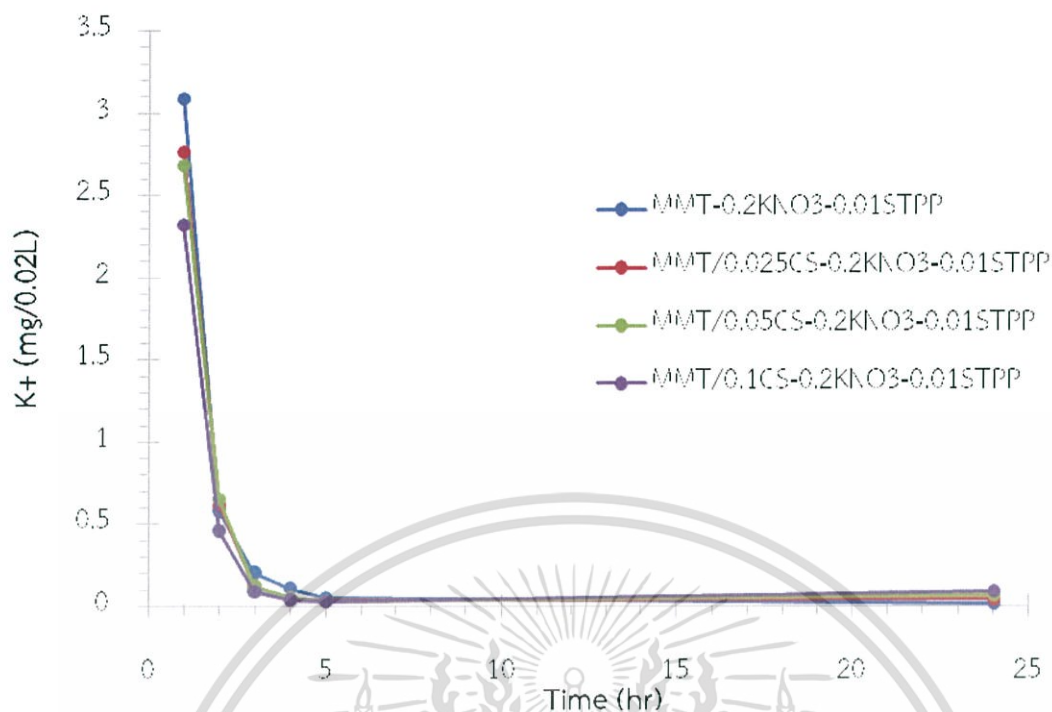
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่า วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP ในชั่วโมงแรกมีปริมาณการปลดปล่อยของ K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> มากที่สุด แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น พบว่ามีการปลดปล่อย K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยหลังจากชั่วโมงที่ 4 พบว่าความเข้มข้นของ K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ที่ปลดปล่อยออกมามีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สันนิษฐานว่า K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ที่บรรจุอยู่ภายใน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP ถูกปลดปล่อยออกมาน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ STPP มีการปลดปล่อยออกมาลดลง แสดงให้เห็นถึงผลของการเชื่อมโยงแบบไอออนิกระหว่างโคโตซานด้วย STPP ที่ส่งผลต่อความสามารถในการขัดขวางการปลดปล่อย K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

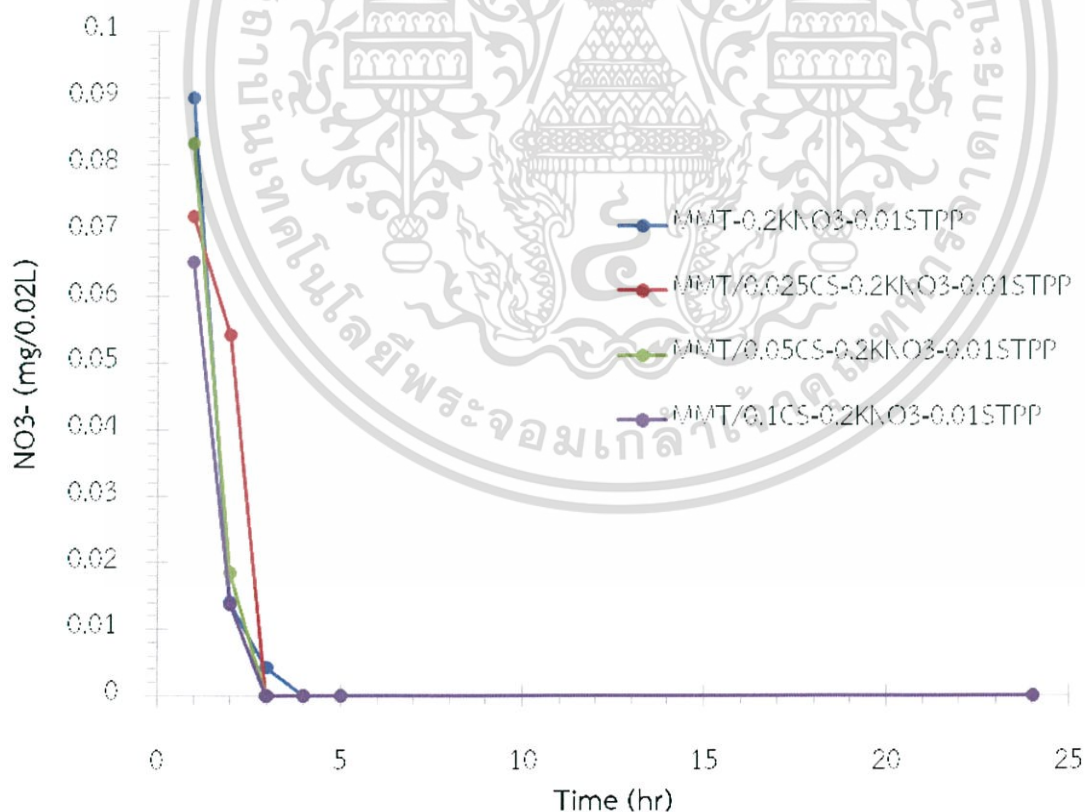
ตารางที่ 4.6 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP ซึ่งมีปริมาณ STPP ที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ปริมาณเริ่มต้นที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม (mg)		ปริมาณ K <sup>+</sup> ที่ปลดปล่อย		ปริมาณ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ที่ปลดปล่อย	
	K <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg	wt%	mg	wt%
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub>	7.5	24.5	4.12	54.9	0.11	0.5
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	7.4	24.3	3.58	48.0	0.10	0.4
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.03STPP	7.3	24.0	2.9	39.8	0.11	0.5

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และภาคผนวก ค พบว่าการปลดปล่อยของ KNO<sub>3</sub> จากวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP มีการปลดปล่อย K<sup>+</sup> อยู่ในช่วง 39-55 wt% ส่วน NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ปลดปล่อยน้อยมากเพียง 0.4-0.5 wt% สันนิษฐานว่าปริมาณของ STPP ที่มากขึ้นส่งผลต่อการเชื่อมโยงแบบไอออนิกระหว่าง CS ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหที่แน่นหนามากขึ้น เป็นผลให้โมเลกุลของ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่แพร่ออกจากโครงสร้างร่างแหของ CS ที่ถูกเชื่อมโยงแบบไอออนิกด้วย STPP ได้ยาก และ STPP ยังมีโมเลกุลของฟอสเฟต (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) ที่มีประจุลบทำให้เกิด อันตรกิริยาดจับกับ K<sup>+</sup> จึงทำให้มีการปลดปล่อยลดลงโดยจะเห็นว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเชื่อมโยงด้วย STPP มีการปลดปล่อย K<sup>+</sup> ออกในปริมาณมากกว่า



รูปที่ 4.14 กราฟการปลดปล่อยของ  $K^+$  จากวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 กราฟการปลดปล่อยของ  $NO_3^-$  จากวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน ที่ชั่วโมงต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่า MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ในชั่วโมงแรกมีปริมาณการปลดปล่อยของ K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> มากที่สุด แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นพบว่าการปลดปล่อย K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยหลังจากชั่วโมงที่ 4 พบว่าความเข้มข้นของ K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ที่ปลดปล่อยออกมามีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สันนิษฐานว่า K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ที่บรรจุอยู่ภายใน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ถูกปลดปล่อยออกมาน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ แสดงให้เห็นว่าการปลดปล่อยมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ CS ลงในตัวอย่างทำให้เห็นถึงความสามารถในการขัดขวางการปลดปล่อย K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ของ CS

ตารางที่ 4.7 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> จากวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ซึ่งมีปริมาณ CS ที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ปริมาณเริ่มต้นที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม (mg)		ปริมาณ K <sup>+</sup> ที่ปลดปล่อย		ปริมาณ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ที่ปลดปล่อย	
	K <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg	wt%	mg	wt%
MMT-0.2KNO <sub>3</sub> -STPP	7.8	25.3	4.04	52.2	0.11	0.4
MMT/0.025CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	7.6	24.8	3.61	47.5	0.13	0.5
MMT/0.050CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	7.4	24.3	3.58	48.0	0.10	0.4
MMT/0.100CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	7.1	23.4	3.01	42.1	0.08	0.3

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และภาคผนวก ค พบว่าการปลดปล่อยของ KNO<sub>3</sub> จากวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP มีการปลดปล่อย K<sup>+</sup> อยู่ในช่วง 42-53 wt% ส่วน NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ปลดปล่อยออกมาน้อยมากเพียง 0.3-0.5 wt% สันนิษฐานว่า CS มีหมู่เอมีน (-NH<sub>3</sub><sup>+</sup>) ที่มีประจุบวกทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาดึงจับ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ไว้ได้และยังมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่มีประจุลบที่สามารถเกิดอันตรกิริยาดึงจับกับ K<sup>+</sup> ได้จึงส่งผลให้มีการปลดปล่อยทั้ง K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ CS ในตัวอย่าง โดยเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเติม CS มีการปลดปล่อย K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ออกมาในปริมาณที่ค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขัดขวางการปลดปล่อย K<sup>+</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ของ CS

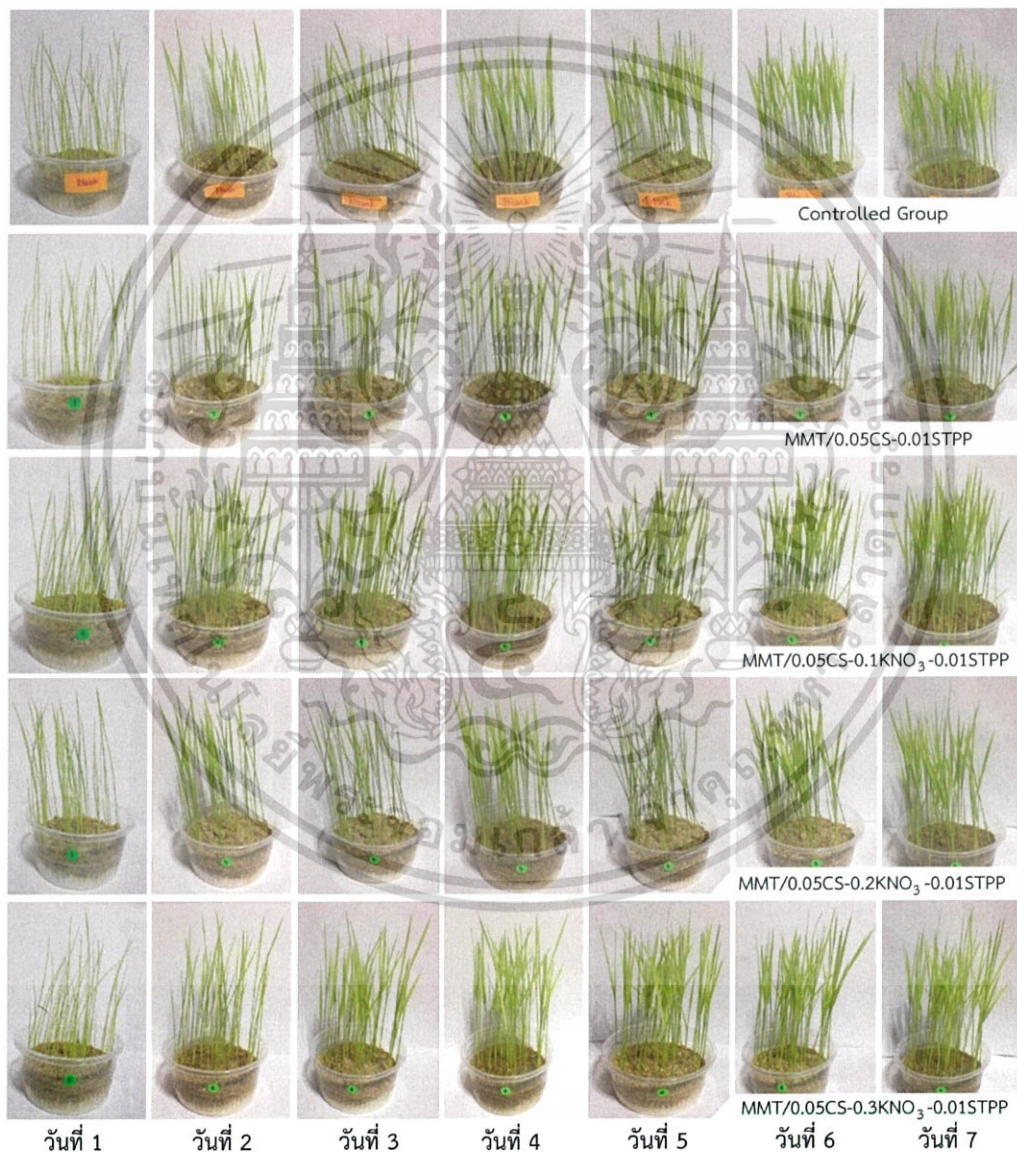
ตารางที่ 4.8 เเปอร์เซ็นต์การบวมตัวและค่าน้ำหนักที่หายไป จากวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP หลังการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรต

ปัจจัยศึกษาที่	ตัวอย่าง	%Swelling	Weight loss (g)
1	MMT/0.05CS-0.01STPP	80.63	0.0037
	MMT/0.05CS-0.1KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	79.07	0.0111
	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	78.74	0.0117
	MMT/0.05CS-0.3KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	78.77	0.0123
2	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub>	79.48	0.0124
	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	78.74	0.0117
	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.03STPP	78.43	0.0114
3	MMT-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	76.41	0.0178
	MMT/0.025CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	77.08	0.0176
	MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	78.74	0.0117
	MMT/0.1CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	79.07	0.0107

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัว ของวัสดุประกอบนาโนทุกตัวอย่างแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากทุกตัวอย่างมีปริมาณสารที่สามารถบวมตัวได้ (MMT และ CS เชื่อมโยงด้วย STPP) แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาแนวโน้มน้ำหนักที่หายไป พบว่าในปัจจัยศึกษาที่ 1 ที่มีปริมาณ KNO<sub>3</sub> แตกต่างกัน พบว่าน้ำหนักที่หายไปแปรผันตรงกับปริมาณ KNO<sub>3</sub> ในปัจจัยศึกษาที่ 2 ที่มีปริมาณ STPP ต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ STPP ทำให้มีน้ำหนักที่หายไป และการบวมตัวน้อยลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณ STPP ทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบไอออนิกทำให้เกิดการบวมตัวน้อยลงของ CS และในปัจจัยศึกษาที่ 3 ที่มีปริมาณ CS ต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CS ทำให้เกิดการบวมตัวมากขึ้น และมีน้ำหนักที่หายไปลดลง เนื่องจาก CS มีสมบัติในการบวมตัว และมีการเชื่อมโยงแบบไอออนิกทำให้มีน้ำหนักที่หายไปน้อย

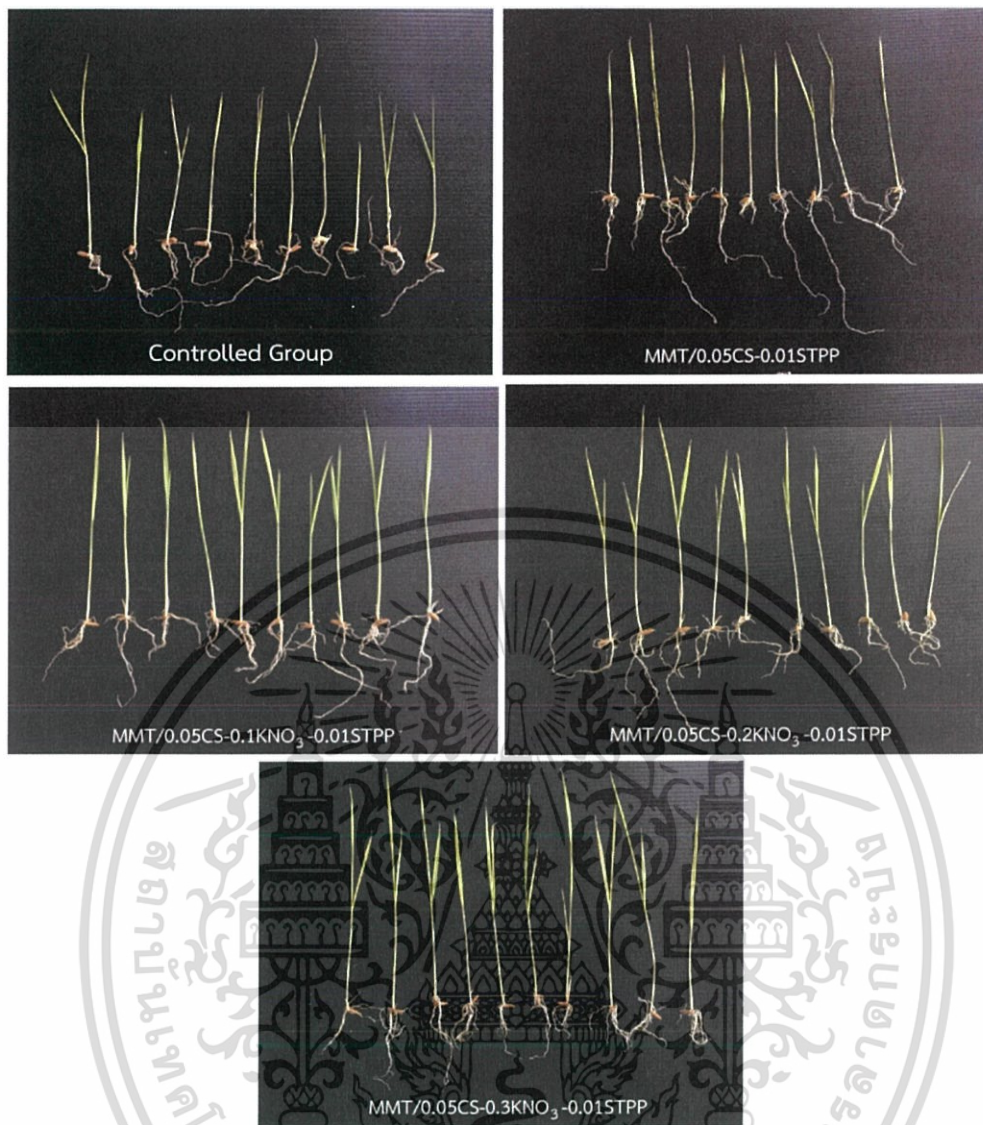
#### 4.3 การเจริญเติบโตของต้นข้าวพันธุ์ กข4 หลังการใช้วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้

ในการศึกษาผลของการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ที่สังเคราะห์ได้ต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวพันธุ์ กข4 โดยทดลองเพาะปลูกกล้าต้นข้าวที่มีอายุ 1 สัปดาห์ โดยใช้น้ำหนักวัสดุประกอบนาโนตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ปริมาณ 0.2 g โรยบริเวณโคนต้นกล้า ดูแลรดน้ำสม่ำเสมอ บันทึกผลโดยการถ่ายรูปการเจริญเติบโตในแต่ละวันเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.16, 4.18 และ 4.20 เมื่อครบ 1 สัปดาห์ สุ่มตัวอย่างต้นข้าวจำนวน 10 ต้น ทำการบันทึกน้ำหนักสด ความสูงของต้น และความยาวราก ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.17, 4.19 และ 4.21 และตารางที่ 4.9 ถึง 4.11



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายแสดงการเจริญเติบโตของต้นข้าว ระยะเวลา 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-xKNO<sub>3</sub>-0.01STPP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ต้นข้าวที่ถูกสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ต้น หลังครบ 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-xKNO<sub>3</sub>-0.01STPP

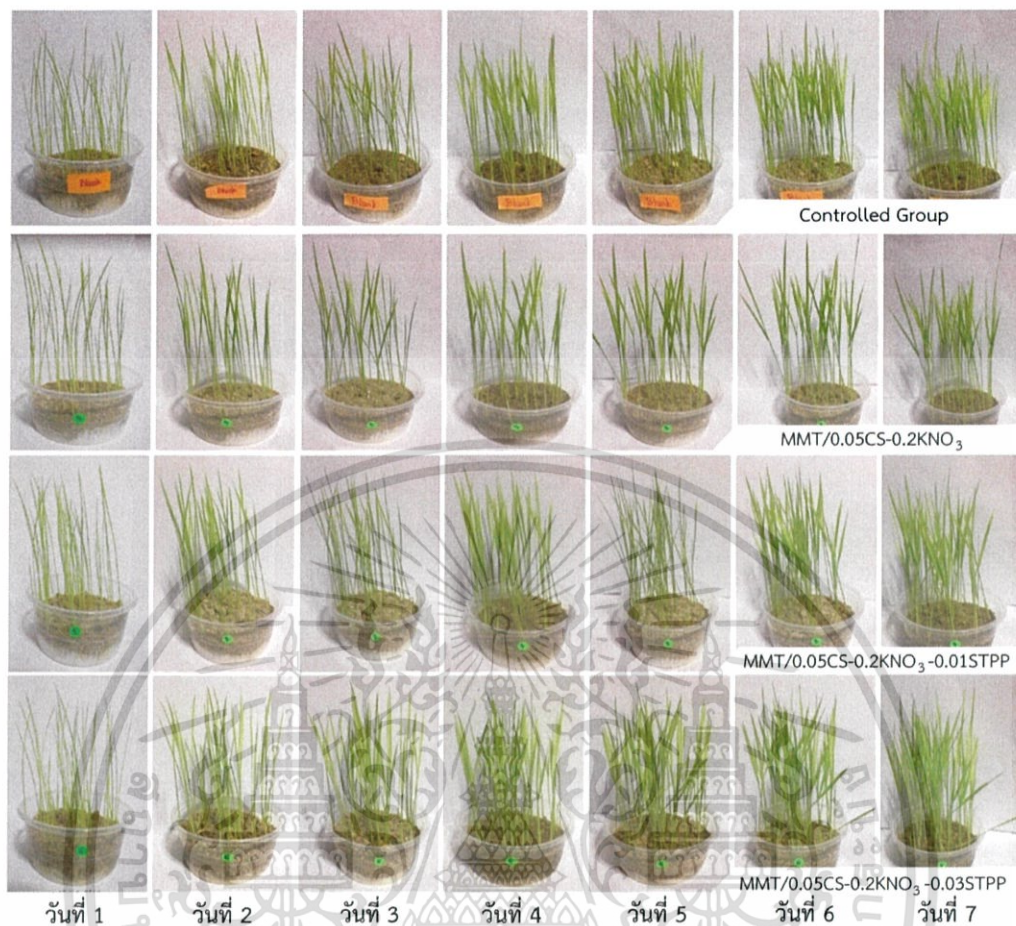
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า, ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 น้ำหนักสดเฉลี่ย ความสูงของต้นเฉลี่ย และความยาวรากเฉลี่ย จากตัวอย่างต้นข้าว หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-xKNO<sub>3</sub>-0.01STPP

ชนิดวัสดุประกอบนาโน	น้ำหนักสดเฉลี่ย (g)	ความสูงต้นเฉลี่ย (cm)	ความยาวรากเฉลี่ย (cm) *
Controlled Group	0.0836 ±0.1000	10.7 ±1.0	6.7 ±2.0
MMT/0.05CS-0.01STPP	0.0727 ±0.1000	13.4 ±1.0	7.4 ±2.0
MMT/0.05CS-0.1KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.0840 ±0.1000	14.3 ±1.0	6.7 ±2.0
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.0847 ±0.1000	14.4 ±1.0	6.8 ±2.0
MMT/0.05CS-0.3KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.0768 ±0.1000	15.6 ±1.0	6.0 ±2.0

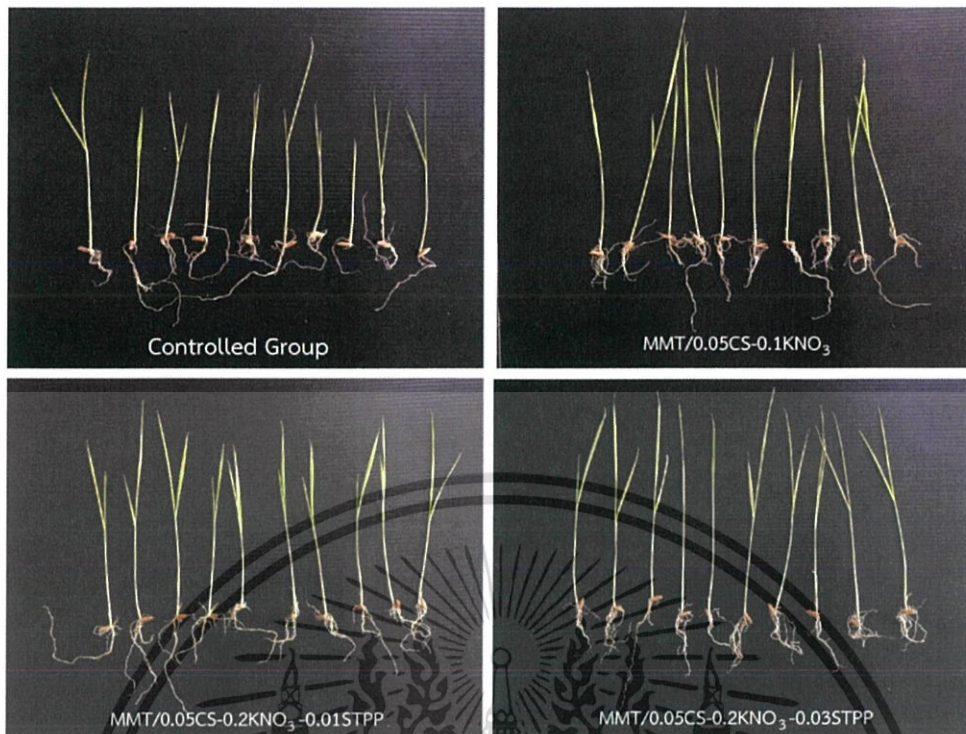
\*หมายเหตุ ผลข้อมูลความยาวรากเฉลี่ย มีผลการเก็บข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากการนำรากออกจากวัสดุที่ใช้ปลูก จึงไม่สามารถเห็นผลในความยาวรากเฉลี่ยได้มากนัก

จากรูปที่ 4.16 พบว่าภาพถ่ายแสดงการเจริญเติบโตของต้นข้าวในแต่ละวันไม่แตกต่างกัน ขณะที่เมื่อครบ 1 สัปดาห์ จากการสุ่มตัวอย่างต้นข้าวจำนวน 10 ต้นในแต่ละชนิดวัสดุประกอบนาโน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ KNO<sub>3</sub> ในวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-xKNO<sub>3</sub>-STPP ทำให้ต้นข้าวมีค่าความสูงเฉลี่ยเพิ่มขึ้น เนื่องจาก NO<sub>3</sub><sup>-</sup> มีส่วนช่วยทำให้ต้นข้าวเติบโตได้เร็วในระยะแรกของการเจริญเติบโต อีกทั้ง K<sup>+</sup> ยังช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของราก แต่ในขั้นตอนของการเก็บตัวอย่างรากมาวัดความยาวทำได้ยาก เนื่องจากต้องแกะรากออกจากวัสดุปลูกทำให้รากขาด เมื่อทำการวัดความยาวของราก จึงไม่เห็นผลในความยาวเฉลี่ยของรากที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายแสดงการเจริญเติบโตของต้นข้าวระยะเวลา 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ต้นข้าวที่ถูกสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ต้น หลังครบ 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP

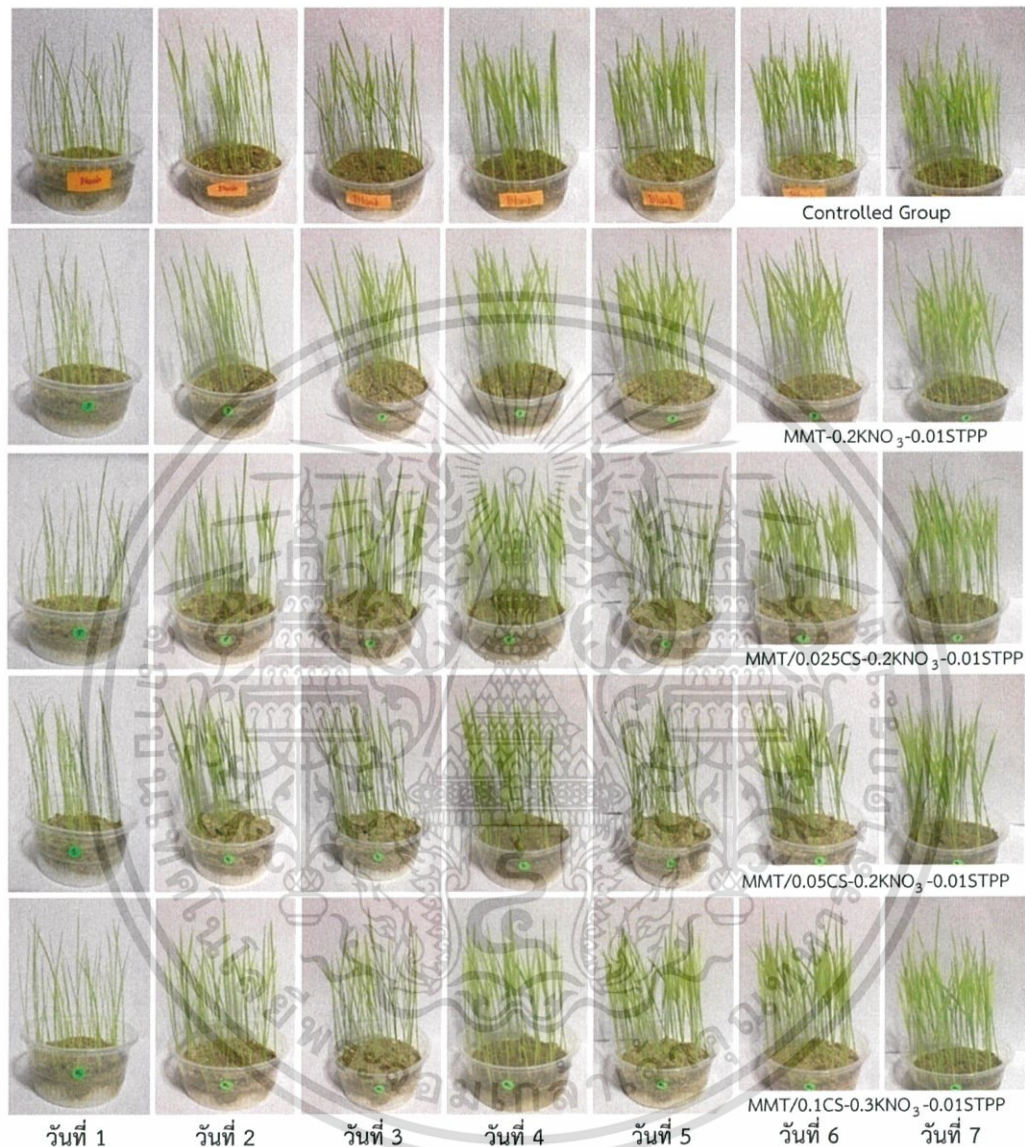
ตารางที่ 4.10 น้ำหนักสดเฉลี่ย ความสูงของต้นเฉลี่ย และความยาวรากเฉลี่ย จากตัวอย่างต้นข้าว หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP

ชนิดวัสดุประกอบนาโน	น้ำหนักสดเฉลี่ย (g)	ความสูงต้นเฉลี่ย (cm)	ความยาวรากเฉลี่ย (cm) *
Controlled Group	0.0836 ±0.1000	10.7 ±1.0	6.7 ±2.0
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub>	0.0672 ±0.1000	14.0 ±1.0	6.1 ±2.0
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.0847 ±0.1000	14.4 ±1.0	6.8 ±2.0
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.03STPP	0.0609 ±0.1000	14.6 ±1.0	6.3 ±2.0

\*หมายเหตุ ผลข้อมูลความยาวรากเฉลี่ย มีผลการเก็บข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากการนำรากออกจากวัสดุที่ใช้ปลูก จึงไม่สามารถเห็นผลในความยาวรากเฉลี่ยได้มากนัก

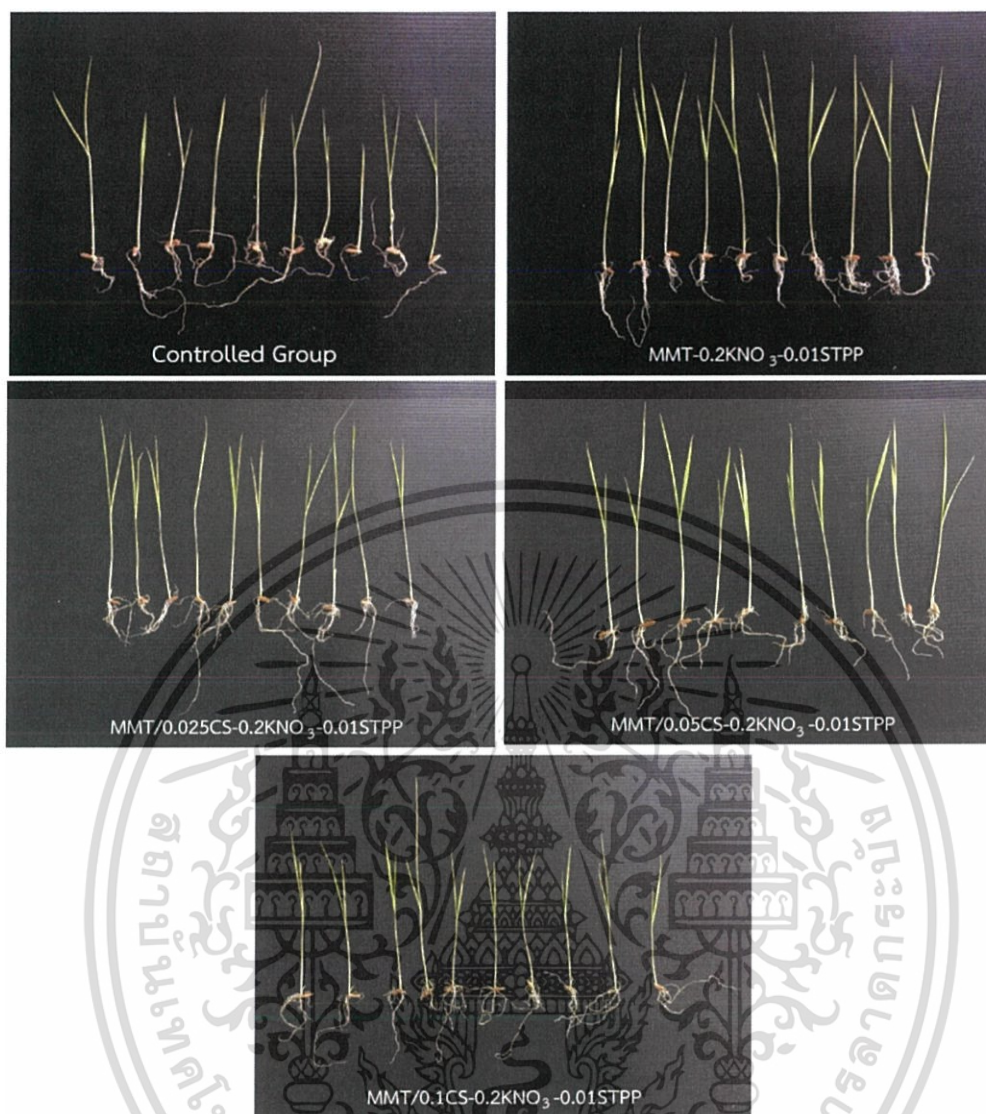
จากรูปที่ 4.18 พบว่าการเจริญเติบโตของต้นข้าวในแต่ละวันไม่แตกต่างกัน ขณะที่เมื่อครบ 1 สัปดาห์ จากการสุ่มตัวอย่างต้นข้าวจำนวน 10 ต้นในแต่ละชนิดวัสดุประกอบนาโน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ STPP ในวัสดุประกอบนาโน MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-ySTPP ต้นข้าวมีค่าความสูงต้นเฉลี่ยเพิ่มขึ้น เนื่องจาก NO<sub>3</sub><sup>-</sup> มีสมบัติทำให้พืชเจริญเติบโตได้เร็วในระยะแรกของการเติบโต ส่งเสริมการ

เจริญเติบโตของใบและลำต้น ส่วน  $K^+$  ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของราก นอกจากนี้ยังมีผลของ ฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) จาก STPP ที่ช่วยให้ลำต้นแข็งแรง และช่วยให้รากดูดซึ่มโพแทสเซียมได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายแสดงการเจริญเติบโตของต้นข้าวระยะเวลา 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุ ประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ต้นข้าวที่ถูกสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ต้น หลังครบ 1 สัปดาห์ หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 น้ำหนักสดเฉลี่ย ความสูงของต้นเฉลี่ย และความยาวรากเฉลี่ย จากตัวอย่างต้นข้าว หลังการใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP

ชนิดวัสดุประกอบนาโน	น้ำหนักสดเฉลี่ย (g)	ความสูงต้นเฉลี่ย (cm)	ความยาวรากเฉลี่ย (cm) *
Controlled Group	0.0836 ±0.1000	10.7 ±1.0	6.7 ±2.0
MMT-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.0786 ±0.1000	16.1 ±1.0	5.8 ±2.0
MMT/0.025CS-0.1KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.0614 ±0.1000	14.1 ±1.0	7.4 ±2.0
MMT/0.05CS-0.2KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.0847 ±0.1000	14.4 ±1.0	6.8 ±2.0
MMT/0.1CS-0.3KNO <sub>3</sub> -0.01STPP	0.0677 ±0.1000	14.2 ±1.0	6.7 ±2.0

\*หมายเหตุ ผลข้อมูลความยาวรากเฉลี่ย มีผลการเก็บข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากการนำรากออกจากวัสดุที่ใช้ปลูก จึงไม่สามารถเห็นผลในความยาวรากเฉลี่ยได้มากนัก

จากรูปที่ 4.20 พบว่าการเจริญเติบโตของต้นข้าวในแต่ละวันไม่แตกต่างกัน ขณะที่เมื่อครบ 1 สัปดาห์ จากการสุ่มตัวอย่างต้นข้าวจำนวน 10 ต้นในแต่ละชนิดวัสดุประกอบนาโน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CS ในวัสดุประกอบนาโน MMT/zCS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ต้นข้าวมีค่าความสูงต้นเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณของ CS ที่ใส่ไม่แตกต่างกันมาก และเห็นได้ว่าต้นข้าวที่ใช้วัสดุประกอบนาโน MMT-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP ในกรณีที่ไม่มี CS มีความสูงต้นเฉลี่ยมากที่สุด เนื่องจากไม่มีผลของการขัดขวางการปลดปล่อยจาก CS จึงทำให้ปลดปล่อย KNO<sub>3</sub> ออกมาอย่างรวดเร็ว ต้นข้าวจึงดูดซึมแร่ธาตุไปใช้ในระยะเวลาแรกของการเจริญเติบโตซึ่งการปลูกเพียงแค่วันหนึ่งสัปดาห์จึงไม่ค่อยเห็นผลดังรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.11

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เมื่อนำแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) มาดัดแปรโครงสร้างโดยใช้วิธีเอิบซุ่มด้วย สารละลายผสมโคโตซาน (CS) และโพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ ) แล้วเชื่อมโยงโมเลกุลของโคโตซาน ด้วยโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (STPP) ได้เป็นวัสดุประกอบนาโน MMT/CS- $\text{KNO}_3$ -STPP โดยมีปัจจัย ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ที่แตกต่างกันที่ 0 0.1 0.2 และ 0.3 g ผลของการใช้สารเชื่อม ขวาง STPP ที่แตกต่างกันที่ 0 0.01 และ 0.03 g และปริมาณ CS ที่แตกต่างกันที่ 0 0.025 0.05 และ 0.1 g พบว่าการดัดแปรโครงสร้าง MMT ด้วยวิธีเอิบซุ่มที่เป็นสภาวะกึ่งแห้งซึ่งไม่ส่งผลให้ MMT เกิดการบวมตัวในสารที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้าง จึงไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลัก ของ MMT เมื่อเพิ่มปริมาณของ  $\text{KNO}_3$  จะพบฟิสิกส์ของ  $\text{KNO}_3$  ร่วมกับฟิสิกส์ของ MMT ซึ่งฟิสิกส์ สัญญาณของ  $\text{KNO}_3$  จะมีความเข้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ที่ใช้เพิ่มขึ้น โดย  $\text{KNO}_3$  จะแทรกตัวอยู่ ภายในและถูกบดบังด้วยฟิสิกส์ของ MMT และเมื่อปริมาณ  $\text{KNO}_3$  เพิ่มขึ้นบางส่วน จะอยู่ภายนอก ชั้นโครงสร้างของ MMT สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  และการเพิ่มขึ้นของค่าน้ำหนักสารประกอบไนเตรตที่หายไป ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ STPP และการเพิ่ม ปริมาณ CS นั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อฟิสิกส์เอกลักษณ์ของ MMT และ  $\text{KNO}_3$  อีกทั้งค่าอัตราส่วนโดย โมลของ  $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  ของวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม ปริมาณ STPP และ CS ไม่ส่งผลต่อโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประกอบนาโน

จากการศึกษาการปลดปล่อย  $\text{KNO}_3$  ของวัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ พบว่าเมื่อเพิ่ม ปริมาณ  $\text{KNO}_3$  ปริมาณการปลดปล่อยของ  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  มีปริมาณที่สัมพันธ์กับปริมาณของ  $\text{KNO}_3$  ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณ STPP ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงของโคโตซานเพิ่มขึ้น และมีฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) ที่มีประจุลบเกิดอันตรกิริยายึดจับกับ  $\text{K}^+$  การปลดปล่อย  $\text{K}^+$  ออกจากวัสดุประกอบนาโนที่ เตรียมได้จึงมีอัตราการลดลง และในวัสดุประกอบนาโนที่มีปริมาณ CS แตกต่างกัน พบว่ามีปริมาณการ ปลดปล่อย  $\text{K}^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  ลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ CS จะทำให้มีหมู่เอมีน ( $-\text{NH}_3^+$ ) ที่สามารถ เกิดอันตรกิริยาจับกับ  $\text{NO}_3^-$  ได้ และหมู่ไฮดรอกซิล ( $-\text{OH}$ ) ที่สามารถเกิดอันตรกิริยายึดจับกับ  $\text{K}^+$  ได้

ในการศึกษาผลของวัสดุประกอบนาโน MMT/CS- $\text{KNO}_3$ -STPP ที่สังเคราะห์ได้ต่อการ เจริญเติบโตของต้นข้าวพันธุ์ กข4 พบว่าต้นข้าวที่ใช้วัสดุประกอบนาโน MMT/CS- $\text{KNO}_3$ -STPP มีแนวโน้มในการเจริญเติบโตได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับต้นข้าวที่ไม่ได้ใช้วัสดุประกอบนาโน แสดงถึงความ เป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ในภาคการเกษตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับเปลี่ยนวิธีการเติมสารเชื่อมโยง เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของวัสดุประกอบนาโน
2. ศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยในระยะเวลาเพิ่มขึ้นหรือเปลี่ยนระบบการปลดปล่อยเป็นแบบต่อเนื่องเพื่อจำลองสภาวะจริงของการใช้งาน
3. ศึกษาความแตกต่างของการใช้วัสดุประกอบนาโนที่สังเคราะห์ได้ต่อการปลูกพืชในช่วงเวลาจริงของการเพาะปลูกจำลองสภาวะจริงของการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] จักรพงษ์ ไชยศรี และพลากร บุญใส. 2548. ศึกษาการเตรียมและการแพร่ของปุ๋ยยูเรียละลายช้า. สงขลา : มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- [2] สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. 2558. ข้อมูลปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปุ๋ยเคมีของไทย ปี 2554-2558. กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร.
- [3] คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 2555. บทที่ 14 ปุ๋ยละลายช้า (Slow-Released Fertilizers). [online]. Available : [http://www.sluse.mju.ac.th/lecture note/silo/lesson.pdf](http://www.sluse.mju.ac.th/lecture%20note/silo/lesson.pdf).
- [4] กิตติ สุพันธ์ุณิษ. 2544. หลักการใช้ปุ๋ยเคมีให้ได้ผลดี. [online]. Available : <http://kanchanapisek.or.th/kp6/s18-8-infodetail06.html>.
- [5] Hong, K. and Park, S. 2000. "Polyurea microcapsules with different structures : Preparation and properties." *Journal of Applied Polymer Science*. 78 : 894-898.
- [6] Kulkarni, A.R. Soppimath, K.S. and Aminabhavi, T.M. 2000. "Solubility study of Azadirachtaindica A. Juss. (Neem) seed oil in the presence of cosolvent/nonionic surfactant at (298.15, 303.15, 308.15, and 313.15) K." *Journal of Chemical and Engineering Data*. 45 : 75-77.
- [7] Kumbar, S.G. Kulkarni, A.R. Dave, A.M. and Aminabha, T.M. 2001. "Encapsulation efficiency and release kinetics of solid and liquid pesticides through urea formaldehyde crosslinked starch, guar gum, and starch guar gum matrices." *Journal of Applied Polymer Science*. 82 : 2863-2866.
- [8] ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2557. การพัฒนาแร่ดินเหนียวเคลือบออกไซด์ฟิลลาร์ที่มีรูพรุนขนาดนาโนสำหรับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม. [online]. Available : [http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/177217/ae2e9c11b75c9c4b7714b871f862dc36?Resolve\\_DOI=10.14457/KMITL.res.2015.4](http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/177217/ae2e9c11b75c9c4b7714b871f862dc36?Resolve_DOI=10.14457/KMITL.res.2015.4).
- [9] ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2558. การพัฒนาวิธีการอย่างง่ายในการเจือคอปเปอร์ในแร่ดินเหนียวอะลูมิเนียมฟิลลาร์ที่มีรูพรุนขนาดนาโนสำหรับบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม. [online]. Available : [http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/177217/ae2e9c11b75c9c4b7714b871f862dc36?Resolve\\_DOI=10.14457/KMITL.res.2015.4](http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/177217/ae2e9c11b75c9c4b7714b871f862dc36?Resolve_DOI=10.14457/KMITL.res.2015.4).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] สิรินันท์ วิริยะสุนทร และสงวนศักดิ์ ศรีพลั้ง. 2558. การเตรียมแป้งมันสำปะหลัง/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมโพสิต สำหรับปุ๋ยที่ควบคุมการปลดปล่อย. *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น* 43(3) : 503-514.
- [11] Liang, R. Liu, M. and Wu, L. 2007. "Controlled release NPK compound fertilizer with the function of water retention." *Reactive & Functional Polymer*. 23 : 769-779.
- [12] Shuibo, H. Huixia, Y. Wenbo, W. and Aiqin, W. 2010. "Controlled release of loxacin from chitosan-montmorillonite hydrogel." *Applied Clay Science*. 50 : 112-117.
- [13] Perez, J.J. and Francois, N.J. 2016. "Chitosan-starch beads prepared by ionotropic gelation as potential matrices for controlled release of fertilizers." *Carbohydrate Polymers*. 148 : 134-142.
- [14] ยงยุทธ โอสสถภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชวลิต ฮงประยูร. 2551. ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครปฐม : ภาควิชาปฐพี วิทยาคณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- [15] กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2559. ปุ๋ยยูเรีย. [Online]. Available : <http://www.thaifertilizer.com/urea-fertilizer>.
- [16] กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2559. ปุ๋ยเคมี. [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com/ปุ๋ยเคมี/>.
- [17] Mohan, L. Anandan, C. and Rajendran, N. 2016. "Drug release characteristics of quercetin-loaded TiO<sub>2</sub> nanotubes coated with chitosan." *International Journal of Biological Macromolecules* 93 : 1633-1638.
- [18] โชคชัย สิริมา และพิณ เพียงจันทร์. 2558. การควบคุมการสูญเสียปุ๋ยยูเรียโดยการเคลือบสารไบโอพอลิเมอร์. *รายงานวิจัย*. สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [19] ปัทมา วิทยากร. 2558. ความอุดมสมบูรณ์ของดินและโภชนาการพืช. [online]. Available : [http://ag2.kku.ac.th/eLearning/132351/Doc%255C122351\\_Lec13\\_Fert\\_%2520eval-57.pdf](http://ag2.kku.ac.th/eLearning/132351/Doc%255C122351_Lec13_Fert_%2520eval-57.pdf).
- [20] รัตนาวรรณ มกรพันธุ์. 2548. นาโนเคลย์นาโนคอมโพสิต (Nanoclay/Nanocomposites). [online]. Available : <http://www.thaiscience.com/lab-vol/p18/18นาโนเคลย์.html>.
- [21] สิรินทร ลิ้มปนาถ. 2545. โครงสร้างและชนิดของแร่ดินเหนียว. [online]. Available : <http://www.material.chula.ac.th/Radio45/April/radio4-2.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] กรมทรัพยากรธรณี. 2549. ดิน. [online]. Available : [http://www.dmr.go.th/knowledge/BMR\\_Publishcation/Min\\_Assess/private/Clay](http://www.dmr.go.th/knowledge/BMR_Publishcation/Min_Assess/private/Clay).
- [23] คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยาคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [24] บุญแสน เตียวกุลธรรม. 2547. สินแร่ดินเหนียว. [online]. Available : [http://elearning.nsruc.ac.th/web\\_elearning/soil/lesson\\_7\\_3.php](http://elearning.nsruc.ac.th/web_elearning/soil/lesson_7_3.php).
- [25] สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2554. โครงสร้างทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์. [online]. Available : [http://web.eng.nuac.th /eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat\\_id=15&p\\_id=418](http://web.eng.nuac.th /eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=15&p_id=418).
- [26] Nanowiki. 2009. Nanocomposites: Schematic drawing of exfoliation and intercalation states. [online]. Available : <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/productdetail>.
- [27] สุจิตา คงทอง. 2552. ไคติน-ไคโตซาน. วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 1 : 1-7.
- [28] ศราวุธ แสงอุไร. 2549. การสกัดแยกพอลิเมอร์ชีวภาพจากครัสเตเซียน การเตรียมอนุพันธ์และการใช้การดูดซับสารเคมีบางชนิด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีศึกษา ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [29] นวลใจ โคตรแสง และพงษ์กร ชมภูแสน. 2550. ผลของไคโตซานต่อการเจริญเติบโตของคะน้า. [online]. Available : <http://research.msu.ac.th/journal/?p=7925>.
- [30] ณัฐกานต์ เจริญทรัพย์ และสุวิตรดา แซ่มชื่น. 2548. การผลิตแผ่นฟิล์มไคโตซานสำหรับปิดแผล. โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพภาคชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [31] จูติมา โชติกสถิต และณัฐริกา อภิรักษ์เสนา. 2558. การสังเคราะห์วัสดุประกอบไคโตซาน-คอปเปอร์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล. โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] วราวุธ สะโงมแสง. 2554. การเตรียมและการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ. [Online]. Available : <https://plus.google.com/100853594922273742503/posts>.
- [33] Zhaol, L. Shill, L. Zhangll, Z. Chenllin, Jiaen. Shill, D. Yangell, J. and Tangl, Z. "Preparation and application of chitosan nanoparticles and nanofibers. Brazilian." *Journal of Chemical Engineering*. 28 : 353-362.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] Hickey, J. Burke, N.A.D. Stover, H.D.H. 2011. "Layer-by-layer deposition of clay and polycation to control diffusive release from polyurea microcapsules." *Journal of Membrane Science*. 33 : 68-76.
- [35] Bhardwaj, D. Sharma, M. Sharma, P. and Tomar, R. 2012. "Synthesis and surfactant modification of clinoptilolite and montmorillonite for the removal of nitrate and preparation of slow release nitrogen fertilizer." *Journal of Hazardous Materials*. 24 : 77-101.
- [36] Guodong, Y. 2014. "An organoclay formula for the slow release of soluble compounds." *Applied Clay Science*. 100 : 84-87.
- [37] Lavorgna, M. Attianese, I. and Buonocore, G.G. 2014. "MMT-supported Ag nanoparticles for chitosan nanocomposites : Structural properties and antibacterial activity." *Carbohydrate Polymers*. 102 : 385– 392.
- [38] Rashidzadeh, A. and Olad, A. 2014. "Slow-released NPK fertilizer encapsulated by NaAlg-g-poly(AA-co-AAm)/MMT superabsorbent nanocomposite." *Carbohydrate Polymers*. 114 : 269–278.
- [39] He, Y. Wu, Z. Tu, L. Han, Y. Zhang, G. and Li, C. 2015. "Encapsulation and characterization of slow-release microbial fertilizer from the composites of bentonite and alginate." *Applied Clay Science*. 45 : 68-75.
- [40] Santos, B.R. and Bacalhau, F.B. 2015. "Chitosan-Montmorillonite microspheres: A sustainable fertilizer delivery system." *Carbohydrate Polymers*. 127 : 340-346.
- [41] สุขาดา บุญเลิศนิรันดร์, รวีวรรณ สุวรรณศรี และกิตติ บุญเลิศนิรันดร์. 2557. การใช้ไคโตซานร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนในการผลิตข้าว. *รายงานวิจัย*. สาขาพืชศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- [42] กนกวรรณ วัฒนากร และพรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง. 2559. ผลของไคโตซานต่อผลผลิตข้าวเจ้าหอมนิล 2 ฤดูกาล. *รายงานวิจัย*. สาขาพฤกษศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- [43] วรณิศา ปัทมะภูสิต และพรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง. 2559. ผลของไคโตซานต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณกรดซาลิไซลิกในพริกชี้หนู. *รายงานวิจัย*. สาขาพฤกษศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

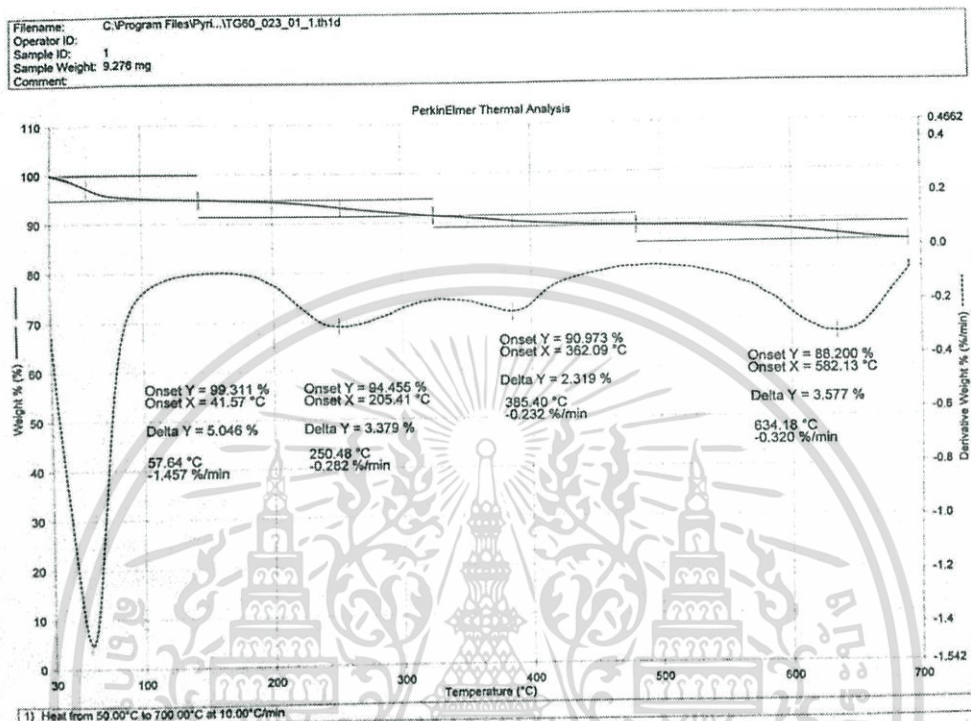
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



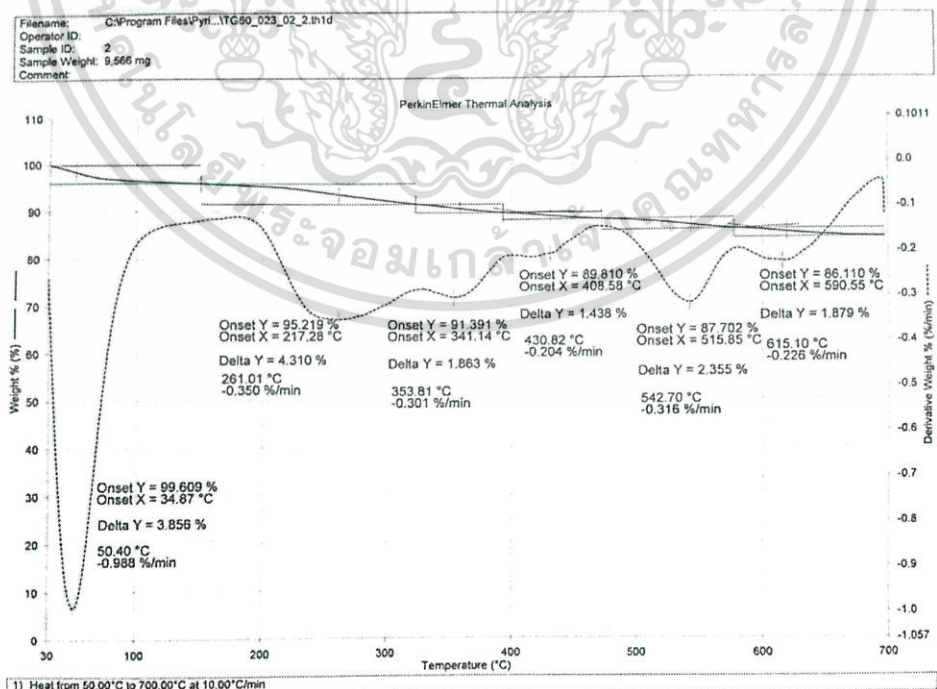
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

เทอร์โมแกรมของ MMT เริ่มต้น และวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ที่สังเคราะห์ได้ จากเทคนิค TGA

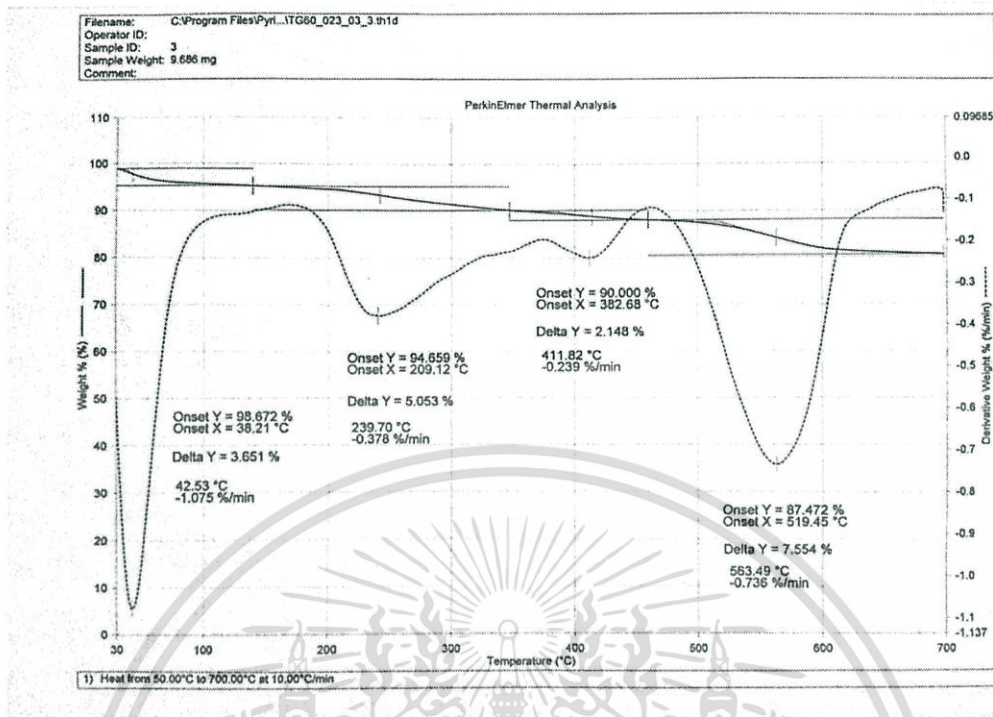


รูปที่ ก.1 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.01STPP จากเทคนิค TGA

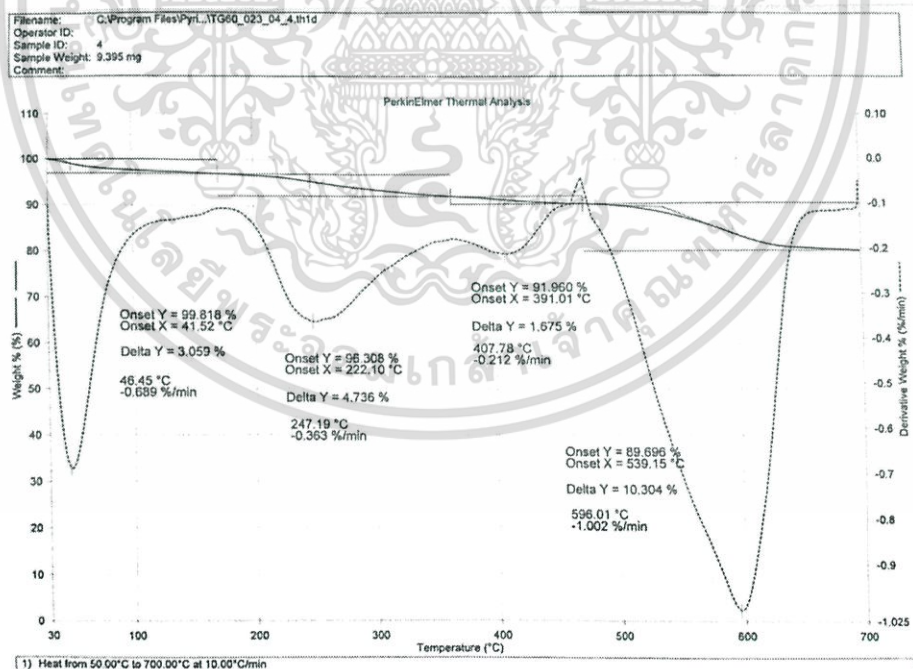


รูปที่ ก.2 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.1KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

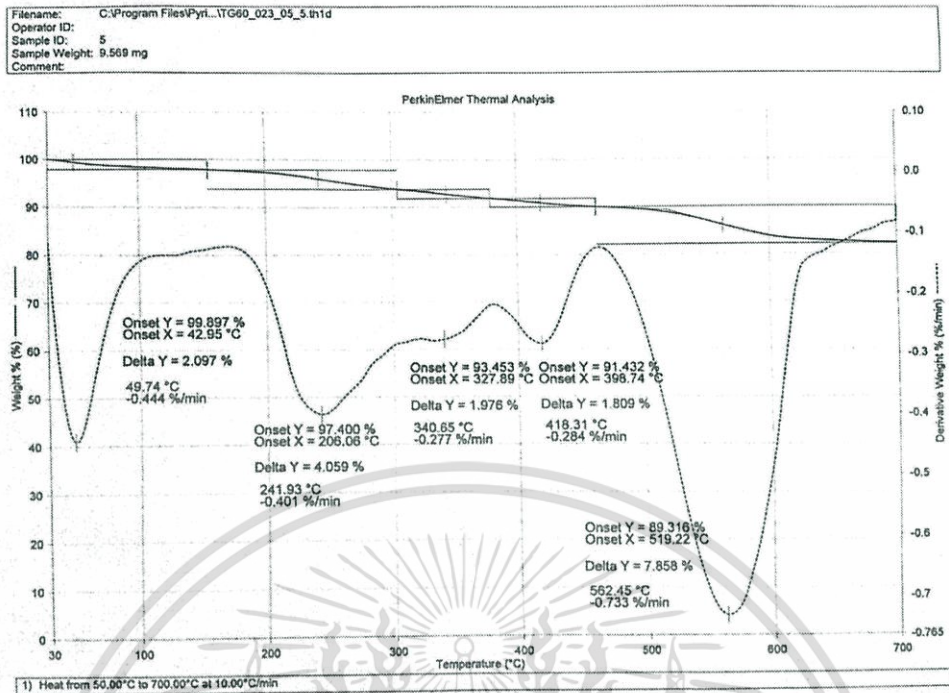


รูปที่ ก.3 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค TGA

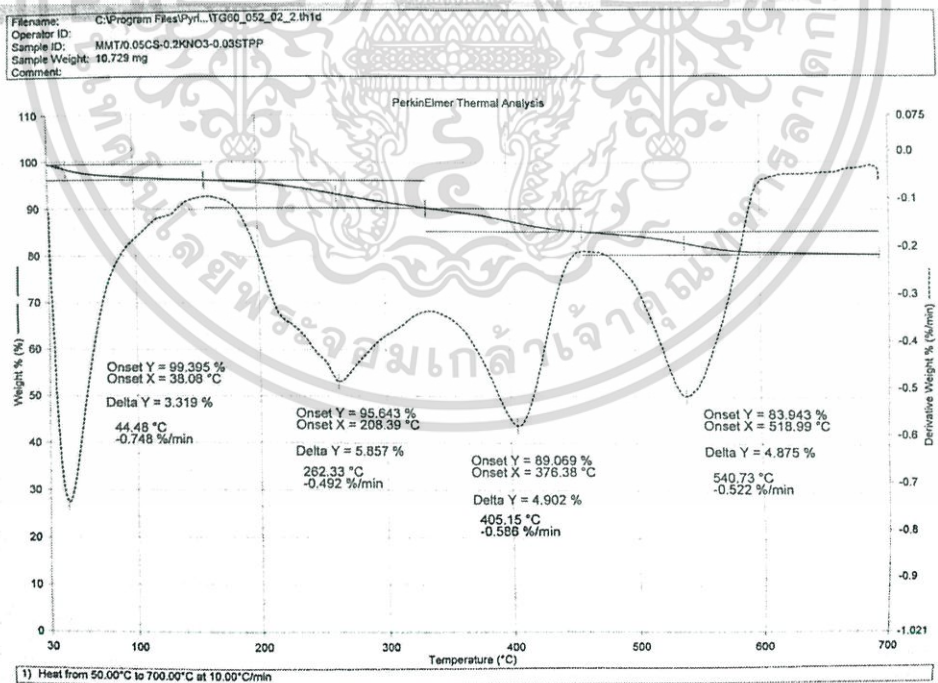


รูปที่ ก.4 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.3KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

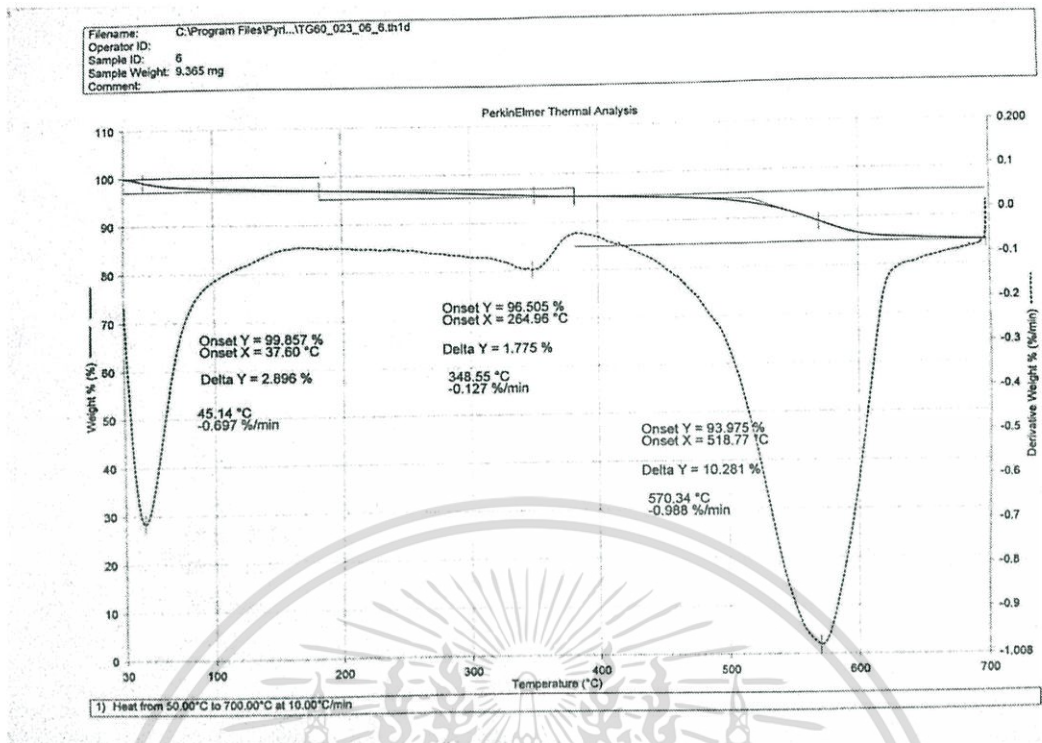


รูปที่ ก.5 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub> จากเทคนิค TGA

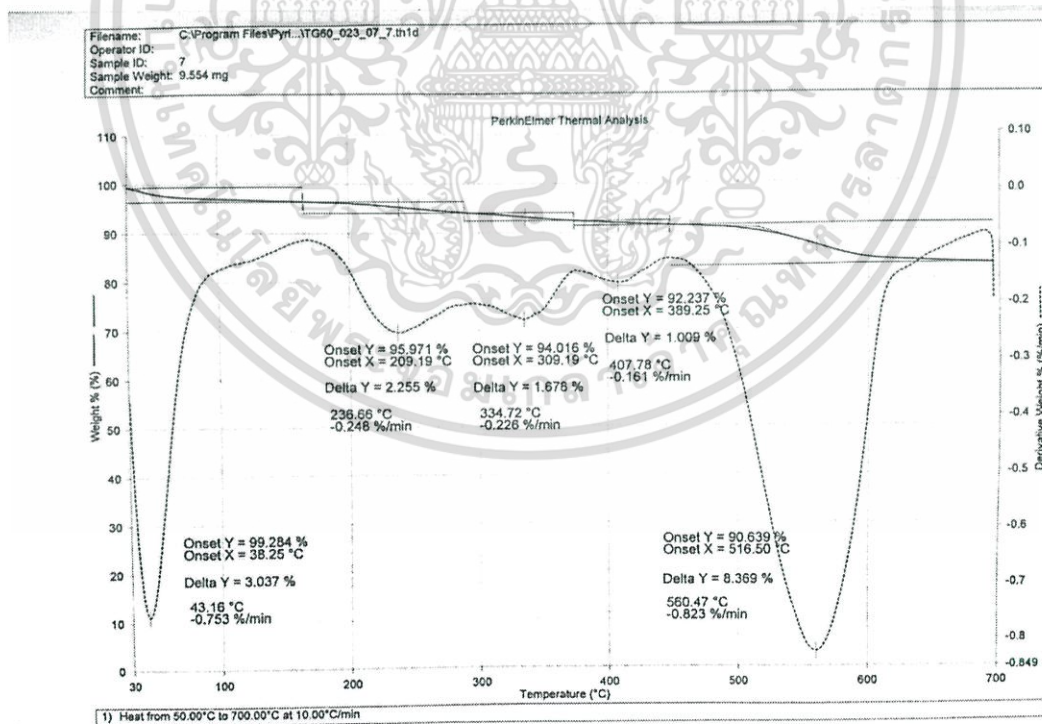


รูปที่ ก.6 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.03STPP จากเทคนิค TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

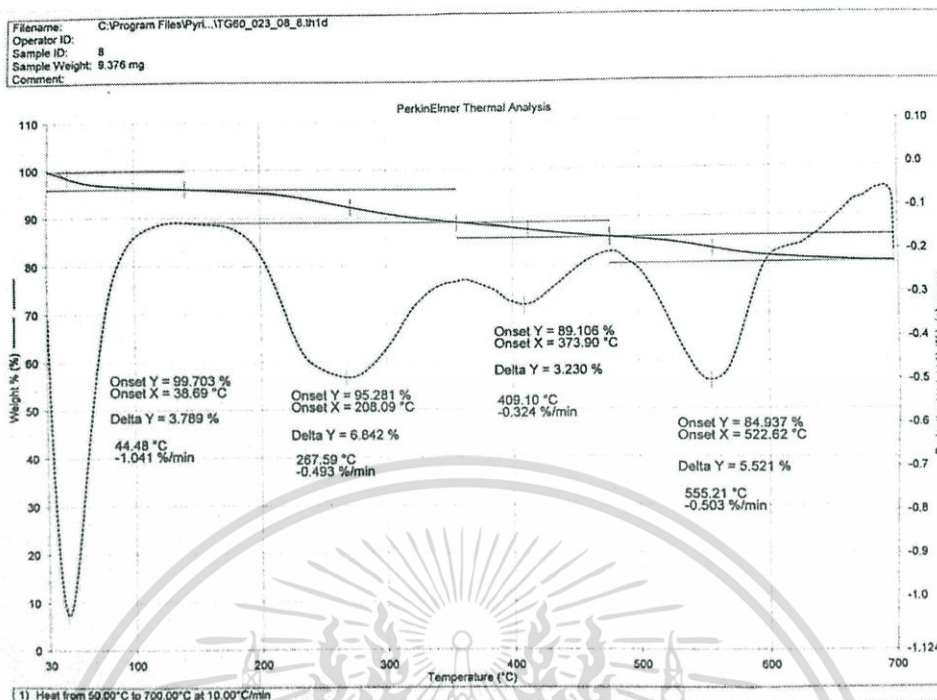


รูปที่ ก.7 เทอร์โมแกรมของ MMT-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค TGA



รูปที่ ก.8 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.025CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค TGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

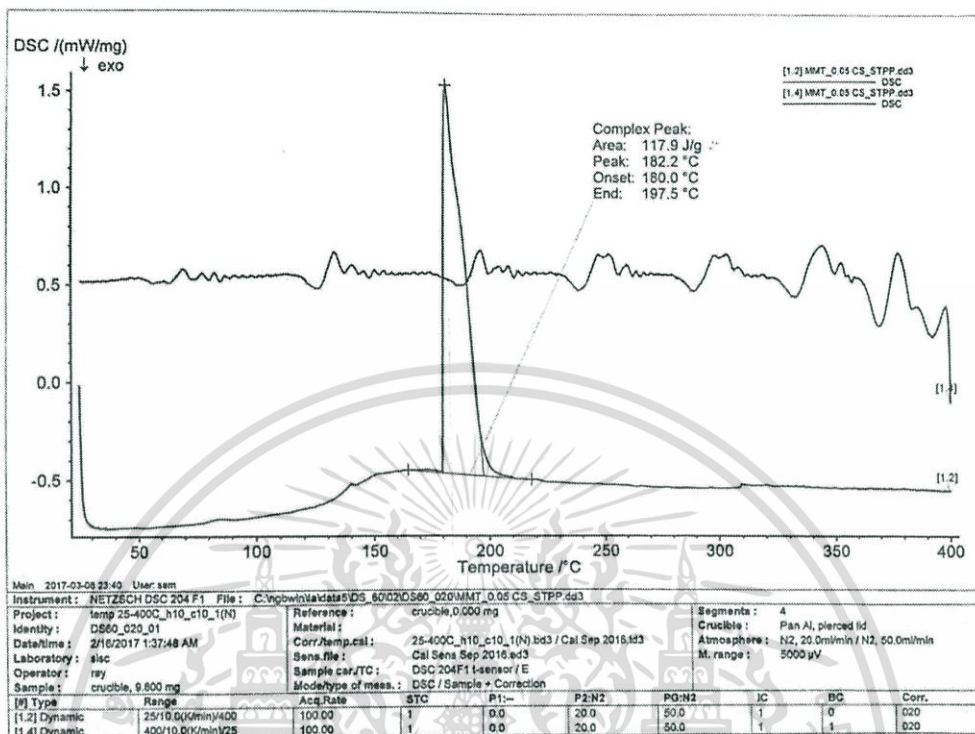


รูปที่ ก.9 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.1-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค TGA

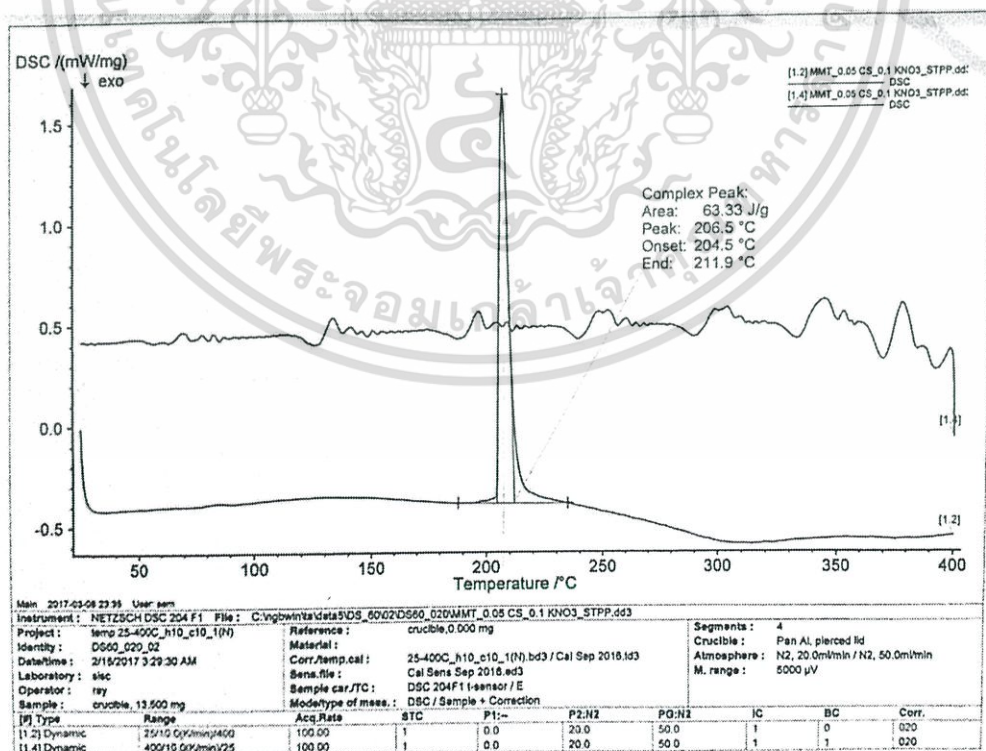
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิค DSC

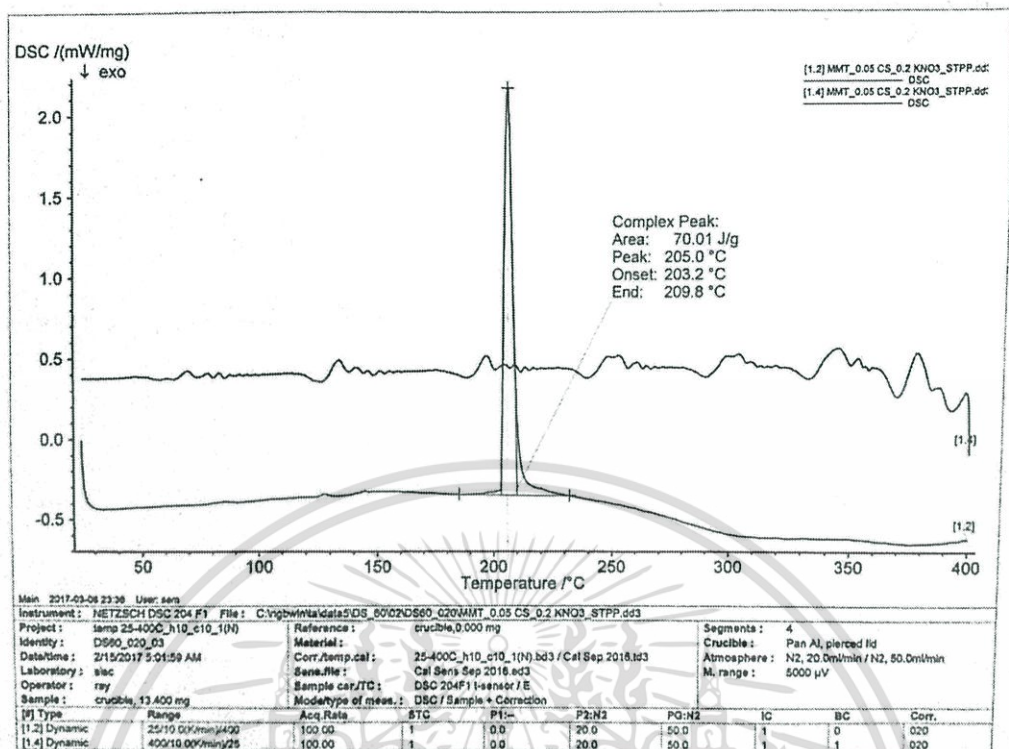


รูปที่ ข.1 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.01STPP จากเทคนิค DSC

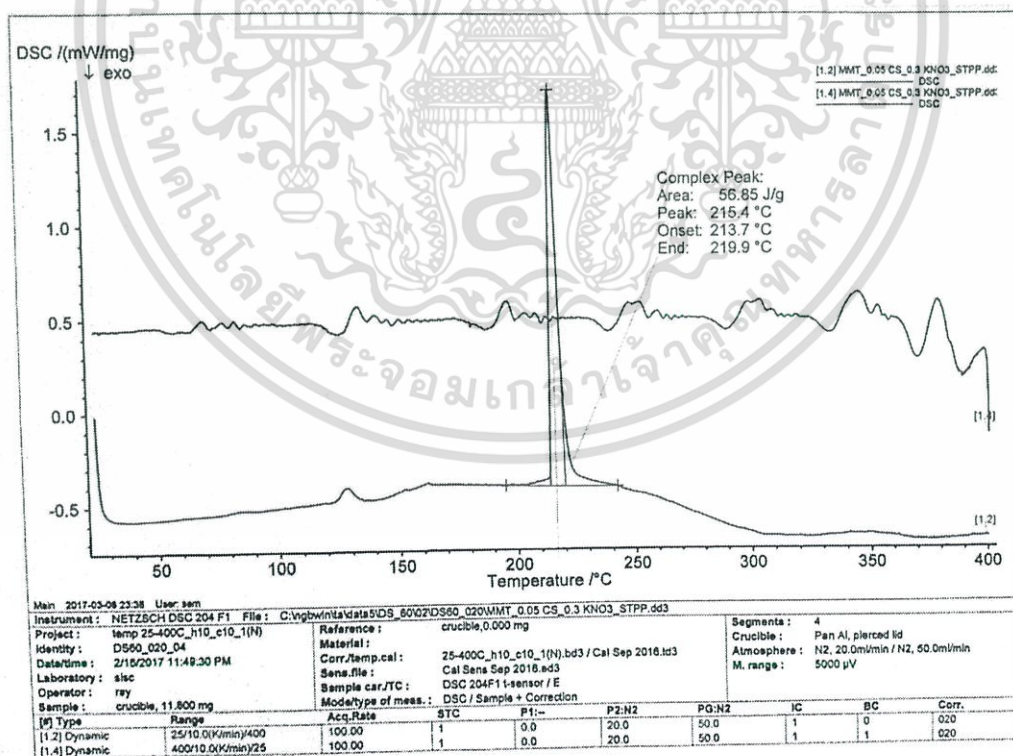


รูปที่ ข.2 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.1KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

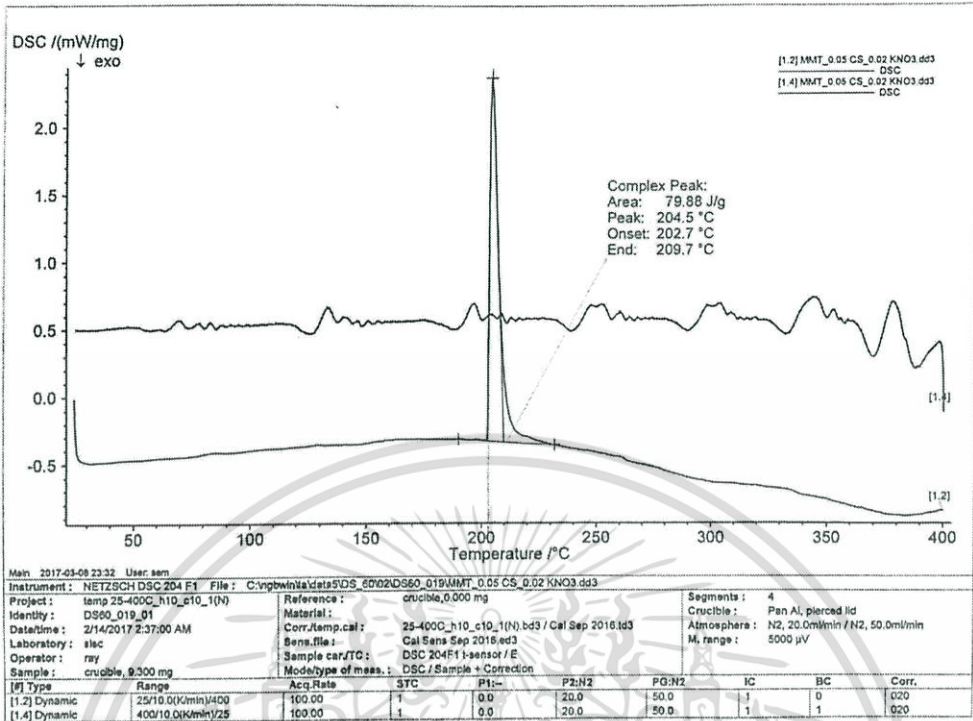


รูปที่ ข.3 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค DSC

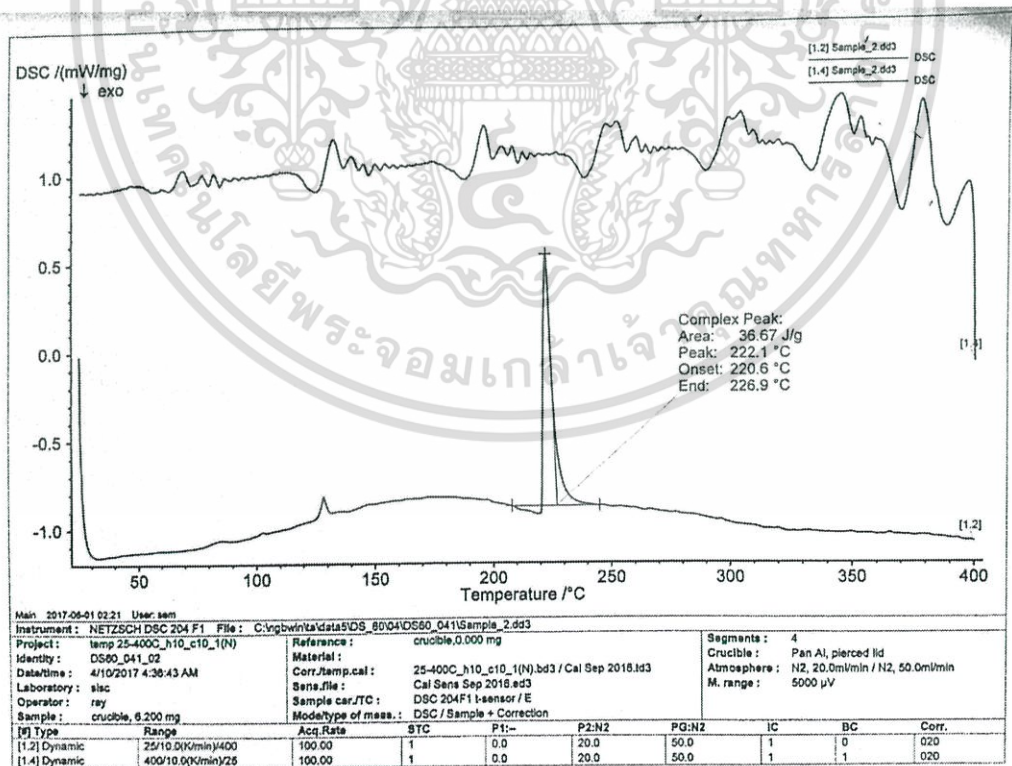


รูปที่ ข.4 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.3KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

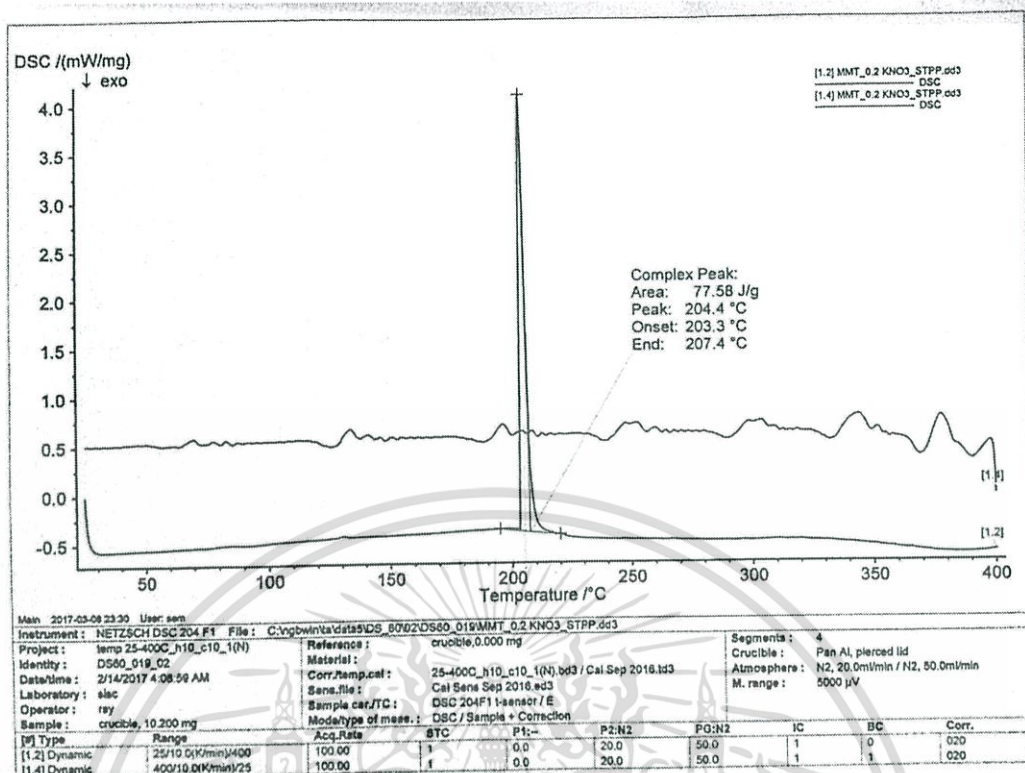


รูปที่ ข.5 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub> จากเทคนิค DSC

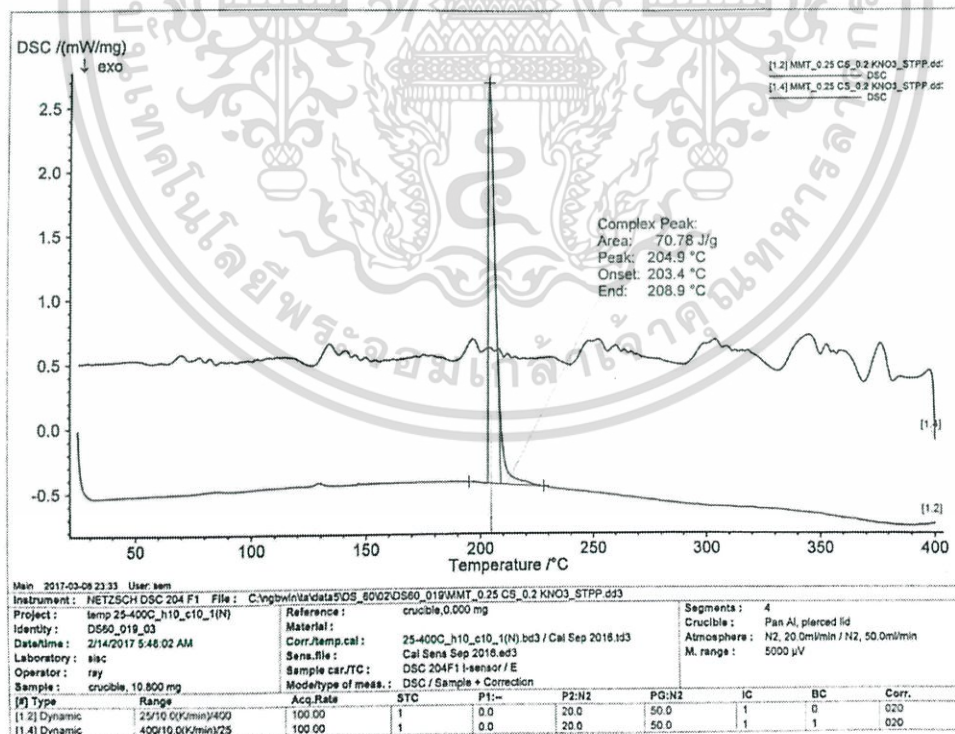


รูปที่ ข.6 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.05CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.03STPP จากเทคนิค DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

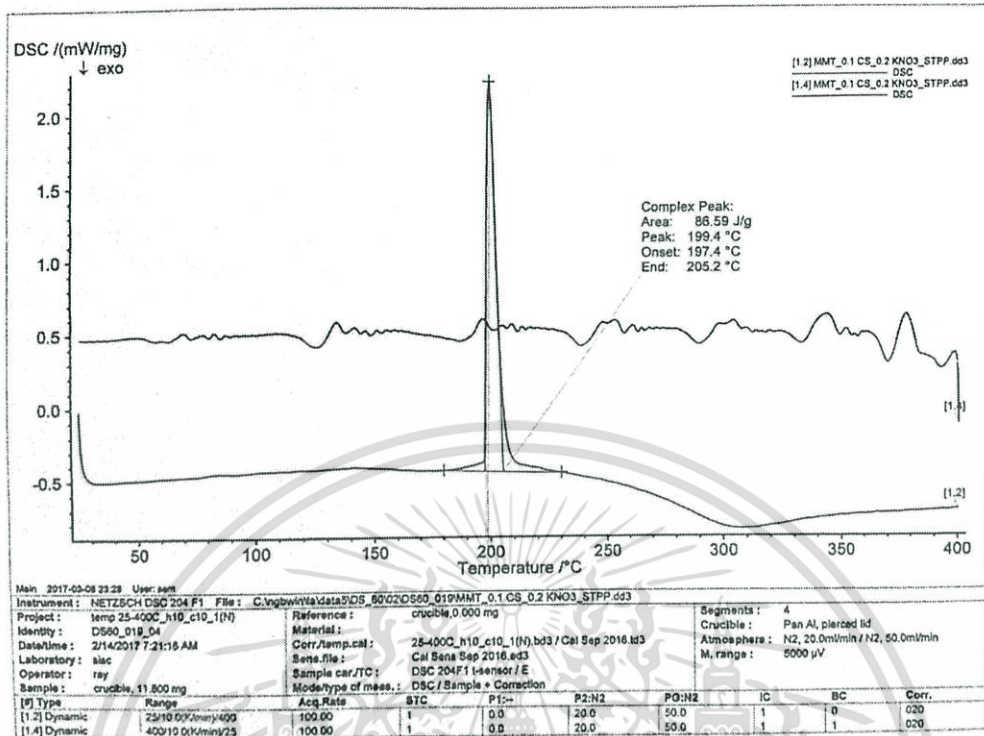


รูปที่ ข.7 เทอร์โมแกรมของ MMT-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค DSC



รูปที่ ข.8 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.025CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 เทอร์โมแกรมของ MMT/0.1CS-0.2KNO<sub>3</sub>-0.01STPP จากเทคนิค DSC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ  $K^+$  และ  $NO_3^-$  จากวัสดุประกอบนาโน MMT/CS-KNO<sub>3</sub>-STPP ที่สังเคราะห์ได้

ยกตัวอย่างการคำนวณปัจจัยที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 (MMT/0.05CS-0.1KNO<sub>3</sub>-0.01STPP)

### 1. คำนวณน้ำหนักเริ่มต้นของ $K^+$ และ $NO_3^-$

ในการเตรียมตัวอย่าง ใช้ปริมาณสารดังนี้

MMT 1กรัม      CS 0.05 g      KNO<sub>3</sub> 0.1 g      STPP 0.01 g

ปริมาณสารทั้งหมดคือ 1.16 g มี KNO<sub>3</sub> 0.1 g

ซึ่งมีปริมาณ  $K^+$  อยู่ 19 g และ  $NO_3^-$  อยู่ 62 g

สารในการอัดเป็นเม็ด 0.2 g ใน 1 เม็ดจะมีปริมาณ  $K^+$  อยู่ 0.0040 g

และ  $NO_3^-$  อยู่ 0.0130 g

มีสาร 1.16 g มี KNO<sub>3</sub> 0.1 g

มีสาร 0.2 g จะมี KNO<sub>3</sub>  $\frac{0.1 \text{ g} \times 0.2 \text{ g}}{1.16 \text{ g}} = 0.017 \text{ g}$

สาร 1.16 g มี KNO<sub>3</sub> 81 g มี  $K^+$  19 g

สาร 0.2 g มี KNO<sub>3</sub> 0.017 g จะมี  $K^+$   $\frac{19 \text{ g} \times 0.017 \text{ g}}{81 \text{ g}} = 0.004 \text{ g}$

= 4.04 mg

สาร 1.16 กรัม มี KNO<sub>3</sub> 81 g มี  $NO_3^-$  62 g

สาร 0.2 กรัม มี KNO<sub>3</sub> 0.017 g จะมี  $NO_3^-$   $\frac{62 \text{ g} \times 0.017 \text{ g}}{81 \text{ g}} = 0.013 \text{ g}$

= 13.2 mg

ดังนั้น จะมีปริมาณ  $K^+$  เริ่มต้น 4.04 mg และมี  $NO_3^-$  เริ่มต้น 13.2 mg

### 2. คำนวณปริมาณของ $K^+$ และ $NO_3^-$ ที่ปลดปล่อยออกมา

ค่าจากกราฟมีปริมาณการปลดปล่อย  $K^+$  = 54.923 mg/L

$$\text{จากสมการ} \quad \text{ppm} = \frac{\text{มวลตัวถูกละลาย (mg)}}{\text{ปริมาตรตัวทำละลาย (L)}} \quad (1)$$

$$\text{จะได้} \quad 54.923 \text{ mg/L} = \frac{\text{มวล (mg)}}{0.02 \text{ L}}$$

ดังนั้น มีมวล  $K^+$  = 1.0985 mg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าจากกราฟมีปริมาณการปลดปล่อย  $\text{NO}_3^- = 2.567 \text{ mg/L}$

$$\text{จากสมการ} \quad \text{ppm} = \frac{\text{มวลตัวถูกละลาย (mg)}}{\text{ปริมาตรตัวทำละลาย (L)}} \quad (1)$$

$$\text{จะได้} \quad 2.567 \text{ mg/L} = \frac{\text{มวล (mg)}}{0.02 \text{ L}}$$

ดังนั้น มีมวล  $\text{NO}_3^- = 0.0513 \text{ mg}$

### 3. คำนวณเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ $\text{K}^+$ และ $\text{NO}_3^-$

$\text{K}^+$  มีการปลดปล่อย 1.0985, 0.2255, 0.0643, 0.0266, 0.0232 และ 0.0686

ที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{\text{ผลรวมของการปลดปล่อย (mg)}}{\text{ปริมาณเริ่มต้น (mg)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{(1.0985+0.2255+0.0643+0.0266+0.0232+0.0686)}{4.04} \times 100$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ  $\text{K}^+$  เท่ากับ 37.3%

$\text{NO}_3^-$  มีการปลดปล่อย 0.0513, 0.0708, 0, 0, 0 และ 0

ที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{\text{ผลรวมของการปลดปล่อย (mg)}}{\text{ปริมาณเริ่มต้น (mg)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{(0.0513+0.0708+0+0+0+0)}{13.2} \times 100$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยของ  $\text{K}^+$  เท่ากับ 0.9%