

การนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการ  
ตกผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต



นางสาวดวงกมล พุทธิธโนปจัย

## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NUTRIENTS RECOVERY FROM SWINE EFFLUENT BY  
MAGNESIUM AMMONIUM PHOSPHATE PRECIPITATION

Miss Tuangkamon Pluettanopatchai



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้  
ประโยชน์โดยการตกผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม  
ฟอสเฟต

โดย

นางสาวดวงกมล พุทธิธิโนปจัย

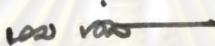
สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

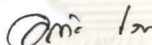
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

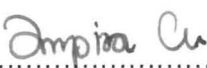
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.อัมพิรา เจริญแสง)

ดวงกมล พุทธิธิโนปจัย : การนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์ โดยการตกผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต. (NUTRIENTS RECOVERY FROM SWINE EFFLUENT BY MAGNESIUM AMMONIUM PHOSPHATE PRECIPITATION)  
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์.ดร.สุธา ขาวเจียร, 177 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัสดที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรก ศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และในส่วนที่สอง ศึกษาชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัสดที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP โดยวัสดุเป่าส้มฝัสดที่ใช้มี 2 ชนิด คือ ผลึก MAP และทรายแก้ว ผลการศึกษาส่วนที่ 1 พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP คือ ช่วงพีเอช 8-9 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เท่ากับ 83-91 และ 73-87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อใช้วัสดุเป่าส้มฝัสด พบว่า การใช้ ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มฝัสด จะเกิดการตกตะกอนผลึก MAP เหมาะสมที่สุด ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัสด เท่ากับ 88-91 และ 57-93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัสด พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เท่ากับ 86-93 และ 68-99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการศึกษาส่วนที่ 2 ศึกษาในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลองส่วนที่ 1 พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP คือ พีเอช 8.5 และวัสดุเป่าส้มฝัสดที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP คือ ผลึก MAP9 ปริมาณ 1.0 กรัม ที่พีเอชของสารละลาย 8.5 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน เท่ากับ 83 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการตกผลึก MAP เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการนำธาตุอาหารที่มีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียม ออกจากน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ซึ่งผลึกดังกล่าวมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตร

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต.....๓๖๙/๓๖๒ หุดงคิ ๖ ๓๖๓๖

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....NO พว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5170308321 : MAJOR Environmental Engineering

KEY WORDS : Magnesium Ammonium Phosphate, MAP / Precipitation / Silica sand / Seed

TUANGKAMON PLUETTANOPATCHAI: NUTRIENTS RECOVERY FROM SWINE EFFLUENT BY MAGNESIUM AMMONIUM PHOSPHATE PRECIPITATION. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. SUTHA KHAODHIAR; Ph.D., 177 pp.

The objective of this research was to find the optimum pH and appropriate seed for Magnesium Ammonium Phosphate (MAP) precipitation from synthetic wastewater and swine wastewater. The study was divided into 2 parts. First, the effects of solution pH on weight and characteristics of the Magnesium Ammonium Phosphate precipitated were investigated with vary pH by Sodium Hydroxide. In the second part, the effects of seeds, Magnesium Ammonium Phosphate precipitated and silica sand, on Magnesium Ammonium Phosphate precipitation were studied. The results of part one showed that the optimum solution pH for precipitation was between 8-9. The efficiency of nitrogen and phosphorus removal were 83-91 and 73-87 percent for wastewater and the efficiency of nitrogen and phosphorus removal were 86-93 and 68-99 percent for wastewater with silica sand seed. The results from part two indicated that the optimum solution pH for precipitation is pH 8.5 and the optimum seeds for Magnesium Ammonium Phosphate precipitated was Magnesium Ammonium Phosphate precipitated 9 (MAP9) 1.0 gram to solution pH of pH 8.5. The efficiency of nitrogen removal was 83 percent. The results showed that the present of Magnesium Ammonium Phosphate precipitated as seed can induce precipitation but it also decreased the efficiency of nitrogen and phosphorus removal of wastewater.

Department: Environmental Engineering

Field of study: Environmental Engineering

Academic year 2009

Student's signature.....

Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ชาวเขียว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาแนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน อาจารย์.ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร และ ดร.อัมพิรา เจริญแสง ที่ได้ให้คำปรึกษาจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบคุณ คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ จีรนุวัฒน์ เจ้าของฟาร์มสุกรประชาฟาร์ม ช่วยอำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่าง

ขอขอบคุณ ทีม เอ็นเนอร์ยี แมแนจเม้นท์ จำกัด ที่ได้ให้ข้อมูลและคำปรึกษาของฟาร์มสุกรประชาฟาร์ม

ขอขอบคุณ ทนุอุตทมนุวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
สัญลักษณ์/คำย่อ.....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 ระบบการเลี้ยงสุกร.....	5
2.2 ขนาดของฟาร์มสุกร.....	7
2.3 วัตถุดิบที่ใช้เป็นอาหารและยาปฏิชีวนะสำหรับสุกร.....	7
2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้ระบบ MC-UASB.....	10
2.5 ของเสียจากฟาร์มสุกร.....	12
2.6 การจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	16
2.7 น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร.....	16
2.8 ผลิต MAP (Magnesium ammonium phosphate).....	18
2.8.1 การเกิดผลิต MAP.....	19
2.8.2 กระบวนการตกตะกอนผลิต MAP.....	19
2.8.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิต MAP.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.4 ปัจจัยของการเกิดผลึก MAP.....	22
2.8.5 ประโยชน์ของผลึก MAP.....	27
2.9 การตกตะกอนทางเคมี.....	29
2.9.1 โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย.....	30
2.9.2 โดยการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์.....	31
2.9.3 โดยใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์.....	33
2.9.4 โดยใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม.....	34
2.10 วัสดุเพื่อเป็นเป้าสัมผัสด.....	35
2.11 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยเกี่ยวข้อง.....	37
<b>บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>40</b>
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	40
3.2 สารเคมี.....	41
3.3 แผนการทดลอง.....	41
3.4 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.4.1 น้ำเสียสังเคราะห์.....	44
3.4.2 น้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	44
3.5 วัสดุเป้าสัมผัสที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.6 การดำเนินการวิจัย.....	47
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>	<b>56</b>
4.1 การทดลองที่ 1.....	61
4.1.1 ผลการศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	51
4.1.2 ผลการศึกษาชนิดของวัสดุเป้าสัมผัส ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการ ตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	65



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การทดลองที่ 2.....	73
4.2.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร.....	73
4.2.2 การศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร.....	75
4.2.3 ผลการศึกษาชนิดของวัสดุป่าสัมผัสด ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร.....	88
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>107</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	107
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	109
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>110</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>116</b>
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง.....	117
ภาคผนวก ข. มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรและการระบายน้ำลงทางชลประทาน.....	167
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการนำไปใช้และประโยชน์ของปุ๋ย MAP.....	173
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>177</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณไนโตรเจน ฟอสเฟต และโพแทสเซียม ในมูลสัตว์ .....	2
2.1 ปริมาณการผลิตสุกรเป็นรายภาค พ.ศ. 2547-2551 .....	6
2.2 จำนวนสุกรเป็นรายจังหวัด ณ วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2551.....	7
2.3 อาหารที่จำเป็นต่อสุกร.....	8
2.4 การใช้ยาป้องกันและรักษาสุกรเจ็บป่วยด้วยยาชนิดต่างๆ.....	8
2.5 ปริมาณของสิ่งขับถ่าย.....	14
2.6 ส่วนประกอบของมูลสุกร (ในหน่วยของน้ำหนักแห้ง) .....	14
2.7 ปริมาณและลักษณะสมบัติโดยเฉลี่ยของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร จำแนกตามขนาดฟาร์ม.....	15
2.8 ค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของลักษณะสมบัติน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	15
2.9 คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบผลิตแก๊สชีวภาพ.....	17
2.10 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลึก MAP .....	21
2.11 ข้อดีและข้อจำกัดของสารประกอบแมกนีเซียมแต่ละชนิด.....	24
2.12 ข้อดีและข้อจำกัดของการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่มีธาตุอาหารปนเปื้อน.....	29
2.13 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของทรายแก้ว.....	36
3.1 วิธีการรักษาสภาพตัวอย่างน้ำทิ้งและวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน การวิเคราะห์น้ำดีและน้ำเสีย.....	46
3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1 ตอนที่ 1.....	48
3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1 ตอนที่ 2.....	50
3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2 ตอนที่ 1.....	52
3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2 ตอนที่ 2.....	54
3.6 พารามิเตอร์ที่วัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังการตกตะกอนผลึก MAP.....	55
4.1 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	62
4.2 ปริมาณตะกอนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ผลึก MAP ปริมาณต่างๆ เป็นวัสดุเป่าสัมผัส ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	67
4.3 ปริมาณตะกอนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ทรายแก้ว ปริมาณต่างๆ เป็นวัสดุเป่าสัมผัส ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	68

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อใช้ผลึก MAP ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	69
4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อใช้ทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	70
4.6 คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร.....	73
4.7 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....	75
4.8 เปรียบเทียบองค์ประกอบของผลึกที่ได้จากการสังเคราะห์ ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	78
4.9 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนบำบัดและหลังตกตะกอนผลึก MAP.....	81
4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำหลังตกตะกอนผลึก MAP.....	82
4.11 ปริมาณตะกอนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ MAP9 MAP10 และทรายแก้ว เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ปริมาณ 1.0 กรัม ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....	89
4.12 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนบำบัดและหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด.....	93
4.13 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนบำบัดและหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด.....	94
4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP วัสดุเป่าส้มฝัด.....	95
4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้ววัสดุเป่าส้มฝัด.....	96
ก.1 ปริมาณตะกอนผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	118
ก.2 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้ว เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	122
ก.3 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP7 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	129
ก.4 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP8 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	133

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.5 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	137
ก.6 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP10 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	141
ก.7 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	145
ก.8 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10.....	148
ก.9 ปริมาณตะกอนผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....	151
ก.10 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้ว เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....	152
ก.11 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....	153
ก.12 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ MAP10 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....	154
ก.13 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP ที่พีเอช 8-9.....	155
ก.14 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....	158
ก.15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....	161
ก.16 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP10 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....	164
ข.1 มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทานและทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับ ทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน.....	171
ค.1 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนที่ผลิตได้ระหว่างในประเทศญี่ปุ่นกับการทดลอง.....	175
ค.2 เปรียบเทียบราคาปุ๋ย.....	176

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนผังแสดงการทำงานของ MC-UASB..... 12
2.2	ผลึก MAP..... 18
2.3	รูปทรงของผลึก MAP ..... 19
2.4	ลำดับขั้นการเกิดของผลึก.....20
2.5	การเกิดเกล็ดผลึกและการโตของผลึก.....21
2.6	การเกิดผลึกรูปแบบต่างๆ ในสารละลายที่มี แมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต เป็นองค์ประกอบ..... 23
2.7	กราฟแสดงช่วงพีเอชในการตกตะกอนผลึก MAP.....23
2.8	ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของผลึก MAP..... 25
2.9	ผลของค่าพีเอชต่อการละลายของผลึก MAP..... 26
2.10	ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์.....32
2.11	การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ด้วยกลไกแบบต่างๆ.....33
2.12	กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์..... 35
2.13	ทรายแก้ว.....36
3.1	แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 1.....42
3.2	แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 2..... 43
3.3	จุดเก็บน้ำจากบ่อกักน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย MC-UASB..... 44
3.4	แผนผังและรายละเอียดการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร..... 45
4.1	ผลของค่าพีเอชต่อการละลายของผลึก MAP.....61
4.2	ตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10..... 63
4.3	ลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของผลึกที่สังเคราะห์ได้ ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10 ..... 63
4.4	ลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ ของ Babic-Ivancic และคณะ (2002).....63

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.5	ดิฟเฟกโทแกรมเปรียบเทียบเฟสของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำเสียสังเคราะห์กับผลึก MAP จากฐานข้อมูลของเครื่อง XRD.....64
4.6	ตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้วัสดุเป่าส้มฝัดต่างชนิดกันในปริมาณที่ต่างกัน ที่พีเอช 7-10.....71
4.7	การเกาะและโตของผลึก MAP ของ Regy และคณะ (2002).....71
4.8	เปรียบเทียบการเกาะและโตของผลึกที่สังเคราะห์ได้ เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัดในน้ำเสียสังเคราะห์..... 72
4.9	ตะกอนที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9.....76
4.10	ลักษณะโครงสร้างและรูปร่างของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่พีเอช 8-9.....76
4.11	เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างและรูปร่างของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร กับผลึก MAP ของ Koo Jeong (2001) และ Le Corre (2006).....77
4.12	เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างและรูปร่างของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์..... 77
4.13	ดิฟเฟกโทแกรมเปรียบเทียบเฟสของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับเฟสของผลึก MAP จากฐานข้อมูลของเครื่อง XRD..... 79
4.14	ดิฟเฟกโทแกรมเปรียบเทียบเฟสของผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับเฟสของผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์..... 79
4.15	ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีหลังตกตะกอนผลึก MAP.....83
4.16	ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนหลังตกตะกอนผลึก MAP.....84
4.17	ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยหลังตกตะกอนผลึก MAP..... 85
4.18	ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสหลังตกตะกอนผลึก MAP.....86
4.19	ประสิทธิภาพการบำบัดโลหะชนิดต่างๆ หลังตกตะกอนผลึก MAP..... 88
4.20	ตะกอนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้วัสดุเป่าส้มฝัดต่างชนิดกัน ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่พีเอช 8-9.....89

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.21	เปรียบเทียบการเกาะและโตของผลึกที่สังเคราะห์ได้ เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำในน้ำเสียสังเคราะห์..... 90
4.22	ดิฟเฟกโทแกรมเปรียบเทียบเฟสของผลึกที่สังเคราะห์ได้ ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับผลึก MAP จากฐานข้อมูลของ XRD เมื่อใช้วัสดุเป้าสัมผัสดังกล่าว.....91
4.23	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 97
4.24	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 98
4.25	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 99
4.26	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 101
4.27	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแมกนีเซียม เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 102
4.28	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแคลเซียม เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 103
4.29	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดโพแทสเซียม เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 104
4.30	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเหล็ก เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 104
4.31	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสังกะสี เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 105
4.32	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดทองแดง เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป้าสัมผัสน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9..... 106
ค.1	ปุ๋ยที่จำหน่ายทางการค้าที่มีส่วนผสมของ MAP ในประเทศญี่ปุ่น.....176

### สัญลักษณ์/คำย่อ

	สัญลักษณ์
ผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต	ผลึก MAP
ผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต ที่ได้จากการสังเคราะห์ผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต พีเอช 7 8 9 และ 10	ผลึก MAP7 MAP8 MAP9 และ MAP10
Silica sand	ทรายแก้ว
Seed	วัสดุเป้าสัมผัส



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สุกร ถือเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากในอดีตที่ผ่านมา พบว่า การเลี้ยงสุกรเป็นการเลี้ยงไว้เพื่อบริโภคในครัวเรือน จนกระทั่งในระยะหลังมีการพัฒนาการเลี้ยงสุกรอย่างกว้างขวางนำไปสู่การเลี้ยงเชิงการค้าหรือการเลี้ยงแบบอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการขยายกิจการการเลี้ยงสุกรเพื่อตอบสนองความต้องการบริโภคเนื้อสุกรและการส่งออกสู่ตลาดโลก จากการสำรวจการส่งออกเนื้อสุกรปี พ.ศ.2551 ในประเทศไทย พบว่ามีปริมาณการส่งออกเพียงร้อยละ 1 ของปริมาณการผลิตสุกร เนื่องจากข้อจำกัดจากโรคปากและเท้าเปื่อย ดังนั้นการผลิตสุกรในประเทศไทยจึงผลิตเพื่อการบริโภคภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ.2547-2551) พบว่า ปริมาณการบริโภคสุกรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.22 ต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552)

เนื่องจากประชากรในประเทศไทยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ.2547-2551) มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น (กรมการปกครอง, 2552) ทำให้ความต้องการบริโภคเนื้อสุกรเพิ่มขึ้นติดต่อกันมาหลายปี การเลี้ยงสุกรจึงขยายตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าประสบปัญหาจากภาวะค่าเงินบาทลอยตัวทำให้ฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดเล็กส่วนหนึ่งทยอยเลิกกิจการไป แต่ฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดกลางและใหญ่ที่ฟื้นฟาสภาวะวิกฤตไปได้กลับฟื้นตัวควบคู่ไปกับการส่งเสริมการเลี้ยงสุกรของธุรกิจปศุสัตว์แบบครบวงจร บางฟาร์มได้ขยายการผลิตทดแทนฟาร์มขนาดเล็กที่หายไป การเลี้ยงสุกรที่มากขึ้นนี้เป็นผลให้เกิดของเสียเป็นจำนวนมากตามไปด้วย ทั้งอาหารสัตว์ สิ่งขับถ่าย กลิ่น และน้ำเสียจากการล้างคอก ของเสียเหล่านี้ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในดิน น้ำ อากาศ และสังคมรอบข้าง หากปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะอาจก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เนื่องจากในน้ำเสียนี้อาจมีระดับธาตุอาหารพวกไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ในปริมาณที่สูง ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปริมาณไนโตรเจน ฟอสเฟต และโพแทสเซียมในมูลสัตว์ (คำนวณจากน้ำหนักสด)  
(ฐานข้อมูลเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพ, 2552)

มูลสัตว์	น้ำหนักแห้ง (ร้อยละ)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)	ฟอสฟอรัส (ร้อยละ)	โพแทสเซียม (ร้อยละ)
สุกร	25	0.6	0.6	0.4
มูลเหลว				
- สุกร (อาหารแห้ง)	10	0.6	0.4	0.2
- สุกร (อาหารเหลว)	6-10	0.5	0.2	0.2

จากตารางที่ 1.1 พบว่า ในมูลสุกรมีธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำ ซึ่งหากธาตุอาหารเหล่านี้มีปริมาณสูงจะส่งผลทำให้พืชน้ำเกิดการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อพืชน้ำเหล่านี้ตายก็จะก่อให้เกิดปัญหาแหล่งน้ำเน่าเสีย

จากปัญหามลพิษทางน้ำดังกล่าวที่แผ่ขยายวงกว้างมากขึ้น ทำให้ส่งผลกระทบต่อชุมชนที่อยู่ใกล้เคียง ผู้ประกอบการและผู้ที่เกี่ยวข้องมีส่วนต้องรับผิดชอบและช่วยกันแก้ปัญหา ดังนั้นกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมจึงได้กำหนดให้ฟาร์มสุกรประเภท ก (ขนาดใหญ่) และประเภท ข (ขนาดกลาง) เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษตามมาตรา 69 ของพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ.2535 ที่จะต้องถูกควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมนอกเขตที่ตั้งแหล่งกำเนิดมลพิษ และได้ออกประกาศเรื่องการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทฟาร์มสุกรเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2544 มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2545 เป็นต้นมา (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2550) ทำให้ฟาร์มสุกรต้องมีวิธีการหรือระบบที่รองรับและจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากฟาร์มก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการกระทำต่างๆ ในฟาร์มสุกรนั้น ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีในประเทศไทย พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสูงและสามารถบำบัดน้ำเสียผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมควบคุมมลพิษ คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic treatment) วิธีการนี้มีต้นทุนการผลิตสูงตั้งแต่การติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศและเสียค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่ใช้พลังงานสูงมาก (สถานเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพ, 2552) จึงได้มีผู้คิดค้นวิธีในการลดต้นทุนดังกล่าว โดยนำระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมาบำบัดน้ำเสีย แต่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ยังไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง เนื่องจากยังมีสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) เหลืออยู่ปริมาณเล็กน้อย แต่มีไนโตรเจนและ

ฟอสฟอรัสในปริมาณมาก (Huang และคณะ, 2007) ดังนั้นจึงต้องนำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนมาทำการบำบัดขั้นหลัง (Post treatment) การบำบัดขั้นหลังนั้นสามารถบำบัดได้หลายวิธี เช่น บ่อบึงประดิษฐ์ (Wetland system) เป็นต้น วิธีการบำบัดดังกล่าวเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางธรรมชาติ แต่ทว่ามีข้อเสีย คือ ต้องใช้พื้นที่มากและระยะเวลา นาน น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีข้างต้นนั้นสามารถนำไปเป็นน้ำหมุนเวียนภายในฟาร์มนำไปรดน้ำต้นไม้ เป็นต้น

จากรายงานการศึกษาวิจัยของ El Diwani และคณะ (2007) พบว่าน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนด้วยธาตุอาหารของพืชสามารถนำไปเพิ่มมูลค่าได้ โดยการแยกธาตุอาหารออกมาใช้ประโยชน์ (Nutrient recovery) ได้แก่ การแยกเอาฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในน้ำเสียออกมา น้ำเสียที่ออกจากระบบบำบัดทางชีวภาพจากฟาร์มสุกรที่มีฟอสเฟตปนเปื้อนอยู่นั้นสามารถนำมาแยกฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้งให้กลับมาอยู่ในรูปที่ใช้ประโยชน์ได้ โดยการตกตะกอนทางเคมี เช่น ใส่ปูนขาวให้อยู่ในรูปแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate) และการตกตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียม ฟอสเฟต (Magnesium Ammonium Phosphate, MAP) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถฆ่าเชื้อโรคได้บางส่วนในน้ำเสียได้ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาต้องการค่าพีเอชสูงจึงเป็นการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียไปพร้อมกัน นอกจากนี้ผลึกแคลเซียมฟอสเฟตและผลึก MAP ที่ตกตะกอนลงมา พบว่า มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตรหรือนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม การผลิตปุ๋ยแทนแร่หินฟอสเฟต (Phosphate rock)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัสดที่เหมาะสม ในการตกตะกอนผลึก MAP จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP ของน้ำเสียสังเคราะห์
2. ศึกษาสภาวะการตกตะกอนที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP ของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร เมื่อปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรให้เหมาะสม (อัตราส่วนโมลแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1)
3. ศึกษาประสิทธิภาพของการตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้วัสดุเป่าส้มฝัสด่างชนิดกันในปริมาณที่ต่างกัน
4. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรด้วยวิธีการตกตะกอนผลึก MAP

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ สถานที่ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย อากาศที่ภาควิชา (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมเคมี และวิศวกรรมโลหการ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $NH_4H_2PO_4$ ) โดยมีอัตราส่วนโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต ( $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ ) เท่ากับ 1:1:1 และน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบบ่อหมักข้าวแบบราง และบ่อยูเอเอสบีของฟาร์มขนาดกลาง (Medium farms: Channel-upflow anaerobic sludge blanket, MC-UASB) จากฟาร์มสุกรในจังหวัดนครปฐม

3. น้ำเสียสังเคราะห์เปรียบเทียบกับลักษณะการปรับพีเอช ในช่วงพีเอช 7-10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรให้เหมาะสม (อัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1) แล้วเปรียบเทียบกับลักษณะการปรับพีเอช ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

5. วัสดุเป่าส้มฝัดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ฝัด MAP และทรายแก้ว ปริมาณ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 กรัม

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากฟาร์มสุกร โดยการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในขั้นตอนเดียว

2. เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยการแยกธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อพืชกลับมาใช้ประโยชน์ด้วยการตกตะกอนฝัด MAP

3. สามารถเลือกใช้วัสดุเป่าส้มฝัดและสภาวะที่เหมาะสมในการนำธาตุอาหาร ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบการเลี้ยงสุกร

ระบบการผลิตสุกรของไทยในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามปริมาณสุกรที่เลี้ยง คือ (1) ระบบการผลิตหรือเลี้ยงสุกรแบบรายย่อย และ (2) ระบบการผลิตหรือเลี้ยงสุกรแบบการค้า ซึ่งมีลักษณะดังนี้

1) ระบบการผลิตหรือการเลี้ยงสุกรแบบรายย่อย หมายถึง ผู้เลี้ยงสุกรที่มีจำนวนสุกรไม่เกินรายละ 50 ตัว รวมถึงผู้เลี้ยงสุกรแบบพื้นบ้าน ซึ่งนิยมเลี้ยงสุกรเป็นอาชีพเสริม ผู้เลี้ยงสุกรรายย่อยยังไม่ค่อยมีการพัฒนาหรือปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตให้เป็นแบบการค้าอย่างแท้จริง ขาดการควบคุมและป้องกันโรคสุกรที่ดี

2) ระบบการผลิตหรือการเลี้ยงสุกรแบบการค้า หมายถึง ฟาร์มเลี้ยงสุกรที่มีจำนวนสุกรตั้งแต่ 50 ตัวขึ้นไป มีการลงทุนค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงแบบรายย่อย เป็นฟาร์มที่มีการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอยู่เสมอ (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2550)

การผลิตสุกรของไทยเป็นระบบการผลิตแบบเสรี ผู้ผลิตหรือผู้เลี้ยงสุกรมีอิสระสามารถเข้ามาทำการผลิตหรือเลิกการผลิตได้ง่าย โดยเฉพาะผู้เลี้ยงสุกรรายย่อย จำนวนผู้เลี้ยงสุกรและจำนวนสุกรจึงมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามภาวะการเปลี่ยนแปลงของตลาดและราคาสุกร จากรายงานของสถิติข้อมูลการปศุสัตว์ พ.ศ.2551 (กรมปศุสัตว์, 2552) พบว่าภาคกลางมีปริมาณการเลี้ยงสุกรสูงสุด คือ 4,145,834 ตัว รองลงมา ได้แก่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1,689,436 ตัว ภาคเหนือ 1,233,716 ตัว และภาคใต้ 671,589 ตัว ตามลำดับ คิดเป็นจำนวนสุกรรวมทั้งประเทศเท่ากับ 7,740,575 ตัว (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1) ซึ่งจังหวัดที่มีจำนวนสุกรสูงสุด 3 อันดับแรก คือ จังหวัดราชบุรี (1,313,619 ตัว) จังหวัดนครปฐม (702,763 ตัว) และจังหวัดนครราชสีมา (559,762 ตัว) ตามลำดับ (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2) จากการศึกษาข้อมูลของไชยา (2533) ได้กล่าวถึงรูปแบบการเลี้ยงสุกรในประเทศไทยในปัจจุบัน 3 ลักษณะด้วยกัน คือ

### 1) การเลี้ยงสุกรพันธุ์

การเลี้ยงพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์เพื่อผลิตลูกสุกรพันธุ์จำหน่ายให้เกษตรกรนำไปเลี้ยงต่อ แบ่งได้เป็นอีก 2 แบบย่อย คือ

1.1) การผลิตลูกสุกรพันธุ์แท้ เพื่อนำไปเป็นพ่อพันธุ์หรือแม่พันธุ์สุกรเพื่อการผลิตสุกรพันธุ์แท้

1.2) การผลิตลูกสุกรพันธุ์ผสม เพื่อการผลิตลูกสุกรพันธุ์ผสม 2 หรือ 3 สายพันธุ์ ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาดในปัจจุบัน

### 2) การเลี้ยงสุกรขุน

การเลี้ยงสุกรขุนเป็นการเลี้ยงเพื่อชำแหละหรือส่งขายเป็นสุกรมีชีวิตแบ่งได้อีก 2 แบบย่อย คือ

2.1) การเลี้ยงตั้งแต่ลูกสุกรเพิ่งหย่านม โดยเกษตรกรจะซื้อลูกสุกรมาเลี้ยงและขุนจนมีน้ำหนักประมาณ 100 กิโลกรัม ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 4-5 เดือน

2.2) การเลี้ยงในระยะสุกรรุ่น เป็นการเลี้ยงสุกรโดยเลี้ยงจากสุกรรุ่นน้ำหนักประมาณ 50-60 กิโลกรัม แล้วนำมาเลี้ยงขุนต่อจนได้น้ำหนักที่ต้องการเพื่อส่งขายต่อไป

### 3) การเลี้ยงสุกรแบบผสมบูรณ

การเลี้ยงสุกรแบบผสมบูรณ คือ การเลี้ยงสุกรที่มีครบทุกขั้นตอนตั้งแต่การผลิตลูกสุกรไปจนถึงการเลี้ยงขุนสุกรเพื่อส่งขายเป็นสุกรมีชีวิตหรือส่งชำแหละ

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการผลิตสุกรเป็นรายภาค พ.ศ. 2547-2551 (กรมปศุสัตว์, 2552)

ภาค	จำนวนสุกรในแต่ละปี (ตัว)				
	2547	2548	2549	2550	2551
ภาคกลาง	3,947,659	4,836,277	4,235,903	5,038,136	4,145,834
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	1,028,625	1,505,338	1,367,743	1,780,029	1,689,436
ภาคเหนือ	826,357	1,249,358	997,873	1,693,707	1,233,716
ภาคใต้	482,962	583,553	552,265	788,201	671,589
รวมทั้งประเทศ	6,285,603	8,174,526	7,153,784	9,300,073	7,740,575

ตารางที่ 2.2 จำนวนสุกรรายจังหวัด ณ วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2551 (กรมปศุสัตว์, 2552)

ลำดับที่	จังหวัด	จำนวนสุกร (ตัว)	ร้อยละของประเทศ
	ยอดรวมทั้งประเทศ		
		7,740,575	100
1	ราชบุรี	1,313,619	16.97
2	นครปฐม	702,763	9.08
3	นครราชสีมา	559,762	7.23
4	ลพบุรี	474,903	6.14
5	ฉะเชิงเทรา	326,545	4.22
6	ชลบุรี	316,505	4.09
7	ลำพูน	210,432	2.72
8	เชียงราย	172,681	2.23
9	ขอนแก่น	168,098	2.17
10	นครศรีธรรมราช	165,171	2.14

## 2.2 ขนาดของฟาร์มสุกร

ขนาดของฟาร์มสุกรสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขนาด คือ

2.2.1 ฟาร์มขนาดเล็ก หมายถึง ฟาร์มที่มีน้ำหนักรายหน่วยปศุสัตว์ตั้งแต่ 6 แต่ไม่เกิน 60 น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ (เทียบเท่าจำนวนสุกรตั้งแต่ 50 ตัว แต่ไม่เกิน 500 ตัว)

2.2.2 ฟาร์มขนาดกลาง หมายถึง ฟาร์มที่มีน้ำหนักรายหน่วยปศุสัตว์ตั้งแต่ 60 ถึง 600 น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ (เทียบเท่าจำนวนสุกรตั้งแต่ 500 ตัว ถึง 5,000 ตัว)

2.2.3 ฟาร์มขนาดใหญ่ หมายถึง ฟาร์มที่มีน้ำหนักรายหน่วยปศุสัตว์มากกว่า 600 น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ (เทียบเท่าจำนวนสุกรมากกว่า 5,000 ตัว)

## 2.3 วัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นอาหารและยาปฏิชีวนะสำหรับสุกร (บริษัท ทิม เ็นเนอริยี แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

สุกรเป็นสัตว์กระเพาะเดี่ยว ไม่สามารถย่อยอาหารที่มีเยื่อใยมากได้ดีเหมือนสัตว์กระเพาะรวม เช่น โค หรือ กระบือ โดยทั่วไประบบการย่อยอาหารของสุกร ทำหน้าที่ย่อยอาหารที่กินเข้าไป ให้แตกตัวจนมีขนาดเล็กลง เพื่อสามารถดูดซึมไปใช้เสริมสร้างส่วนต่างๆ ของร่างกายสุกร

ซึ่งอาหารที่จำเป็นและมีประโยชน์ต่อสุกร โดยวัตถุดิบที่ใช้เป็นอาหารประกอบด้วย 6 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และในการเลี้ยงสุกรมีการให้ยาป้องกันการเจ็บป่วย ดังแสดงในตารางที่ 2.4

### ตารางที่ 2.3 อาหารที่จำเป็นต่อสุกร

อาหาร	
1. น้ำ	ปริมาณ 5-20 ลิตรต่อวัน ตามขนาดของสุกร
2. โปรตีน	มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต ช่วยสร้างเนื้อเยื่อและเป็น
3. คาร์โบไฮเดรต	ส่วนประกอบหลักของร่างกาย เช่น กากถั่วเหลือง กากเมล็ดฝ้าย เป็นอาหารที่ให้พลังงาน เช่น แป้งและน้ำตาล รวมถึงเยื่อใยที่เป็น
4. ไขมัน	ส่วนประกอบในวัตถุดิบอาหารสัตว์ เช่น รำละเอียด เป็นอาหารที่ให้พลังงาน เช่น ไขมันจากสัตว์
5. แร่ธาตุ	ทำหน้าที่เสริมสร้างกระดูกและต้านโรค ในร่างกายสุกรมีแร่ธาตุมากกว่า 40 ชนิด ส่วนที่จำเป็นและสำคัญต่อร่างกาย ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียม เหล็ก ทองแดง ไอโอดีน สังกะสี แมงกานีส โพแทสเซียม แมกนีเซียม และซิลิเนียม เป็นต้น
6. วิตามิน	เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิต เช่น กระดูกป่น

### ตารางที่ 2.4 การใช้ยาป้องกันและรักษาสุกรเจ็บป่วยด้วยยาชนิดต่างๆ มีดังนี้

ยา	
1. ยาปฏิชีวนะ	เป็นสารที่สกัดจากจุลินทรีย์บางชนิด ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคหรือทำให้เชื้อโรคนั้นๆ ถูกทำลายได้ ซึ่งใช้ในการป้องกันและรักษาโรค เช่น โรคปอดบวม หลอดลมอักเสบ การอักเสบต่างๆ มีผลหนอง โรคทางเดินอาหาร โรคติดเชื้อทางเดินปัสสาวะ มดลูกอักเสบ โลหิตเป็นพิษ เป็นต้น
2. ยาฆ่าพยาธิ	เป็นยาที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อใช้ป้องกันและรักษาโรค ยาในกลุ่มนี้ เช่น สโตรเมซ ไบรีน่า ไตรซัลฟาน ไตรเวททริน เวซูลอง ซัลเมท ซัลฟาเมอราซีน ซัลฟาคิวิน็อกซาซีน ซัลฟาเมทาซีน อาโซน เป็นต้น



## ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

ยา	
3. ยาบำรุง	ส่วนใหญ่เป็นยาบำรุงที่อยู่ในรูปฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม น้ำตาลกลูโคส ตลอดจนวิตามิน และแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับร่างกาย ช่วยกระตุ้นให้การดูดซึมของระบบการย่อยอาหารให้ดีขึ้น เช่น โทโนฟอสฟาน อารีซิล คาโตซาล ไวตาเล็กซ์ อมิโนไลท์ เป็นต้น
4. ยาฆ่าเชื้อโรค	ใช้ล้างคอกโดยทั่วไป เช่น ไอซาล ไอโอดีน ฟอร์มาลิน จุนสี น้ำยาไลโซน โซดาไฟ คลอรีน ปูนขาว วันคลีน แบทเทิลส์ เป็นต้น ซึ่งมีวิธีการและข้อจำกัดในการใช้แตกต่างกัน ควรศึกษาให้เข้าใจก่อนใช้งาน
5. ยาฆ่าพยาธิภายนอก	ใช้ฆ่าพวกเห็บ ไร ซีเรื้อน ซีเรื้อนแห้งในสุกร เช่น เอ็นโก้ เย็นโก้-ไฟสเปอร์ย์ มาลาเฟซ มาลาโรออน เซฟวินส์ เยอร์เม็ก อาซุนโทน เนกัวอน ยาฉีดไอโวเม็ก โฟเรค เป็นต้น
6. ยาถ่ายพยาธิ	ยาถ่ายพยาธิในลำไส้ของสัตว์ที่เข้กันมากที่สุด คือ ตัวยาปิเพเธอร์-ราซิน คาร์บอนเตตราคลอไรด์ ไพแรนเทลทาร์เทรต เป็นต้น
7. ยาที่ใช้กรอกปาก ลูกสุกร	เพื่อป้องกันและรักษาลูกสุกรท้องเสีย เช่น ฟาร์โมซินป้ายลิ้น โคโลการ์ด ไดอะตริมีซินดน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้อาจจะใช้ยามงละลายน้ำให้ลูกสุกรกิน หรือกรอกปากลูกสุกรก็ได้ เช่น นิโอเม็กซ์ 325 เคดี-นีโอ เป็นต้น
8. ยาใส่แผล	ใช้ใส่แผลสดและแผลเรื้อรัง เช่น ทิงเจอร์ไอโอดีน ยาเหลือง ลูกเหม็น (ใช้ฆ่าหนอนในแผลเรื้อรัง) สควูอรัม ซีฟิงซ์ัลฟานิลไมด์ ซีฟิงซ์ กัมมะถัน แอลกอฮอล์ เป็นต้น
9. ฮอริโมน	ฮอริโมนที่ใช้ในการกระตุ้นลมเบ่งในแม่สุกร เช่น ฮอริโมนอีอกซีโตซิน ส่วนฮอริโมนพรอสตาแกลนดิน เอฟ 2 อัลฟา เป็นฮอริโมนที่ใช้ฉีดในแม่สุกร เพื่อใช้กำหนดช่วงระยะเวลาคลอดให้แม่สุกร ทำให้สะดวกในการจัดการ หรือใช้ในกรณีแม่สุกรครบกำหนดคลอดแล้ว แต่ไม่คลอดหลังจากฉีดแล้วจะช่วยให้แม่สุกรคลอดลูกภายใน ควรปรึกษาสัตวแพทย์เพราะอาจส่งผลเสียต่อสัตว์และผู้ใช้ได้
10. วัคซีน	เพื่อป้องกันโรคโลหิตจางในลูกสุกร เช่น ไฟเด็กซ์ ไมโอเฟอร์

ทั้งนี้วัตถุดิบที่ใช้ผสมเป็นอาหารสัตว์และยาปฏิชีวนะต่างๆ เหล่านี้ โดยส่วนใหญ่มักถูกขับออกมาในรูปของน้ำเสียและของเสียของสุกร ซึ่งทำให้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร มักตรวจพบปริมาณของยาปฏิชีวนะฮอร์โมนต่างๆ รวมทั้งปริมาณโลหะประเภทต่างๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียม คลอรีน เหล็ก ทองแดง ไอโอดีน กำมะถัน สังกะสี แมงกานีส โคบอลท์ โพแทสเซียม และซิลิเนียม ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนเป็นองค์ประกอบหลักของทั้งวัตถุดิบที่ใช้ผสมเป็นอาหารสัตว์และยาปฏิชีวนะ ซึ่งสารบางชนิดเป็นพิษหรือทำให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อาจปนเปื้อนลงสู่ดิน แหล่งน้ำ อากาศ รวมทั้งส่งผลทำให้เป็นเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนต่อไปได้ หากไม่ได้รับการควบคุมและเฝ้าระวังที่ดี รวมถึงมีการจัดการระบบฟาร์มสุกรที่เหมาะสม และที่สำคัญมีการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ

#### 2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยใช้ระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบบ่อหมัก ซ้ำแบบราง และบ่อยูเอเอสบีของฟาร์มขนาดกลาง (Medium farms: Channel-upflow anaerobic sludge blanket, MC-UASB) (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2550)

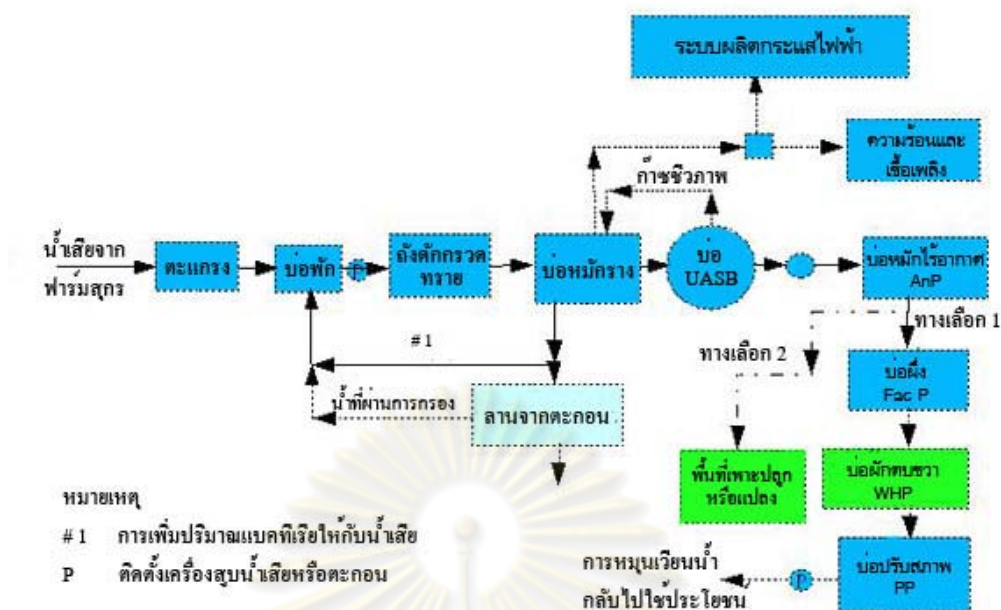
เป็นบ่อหมักแก๊สชีวภาพที่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลักทำงานต่อเนื่องกัน คือ บ่อหมักซ้ำแบบราง (Channel digester) และบ่อหมักเร็ว (Upflow anaerobic sludge blanket, UASB) ซึ่งบ่อหมักดังกล่าวเหมาะสำหรับฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดกลางและขนาดใหญ่ โดยหลักการทำงานมีดังนี้

1) บ่อหมักซ้ำแบบราง (Channel digester) ทำหน้าที่หมักย่อยส่วนที่เป็นของแข็งในน้ำเสียจากฟาร์มหรือส่วนที่เป็นน้ำมูลหนัก เป็นบ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้สำหรับหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่อยู่ในรูปของตะกอนแขวนลอยและสารละลาย โดยอาศัยแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic bacteria) ซึ่งการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังกล่าว เริ่มจากการที่สารอินทรีย์ที่มีขนาดของโมเลกุลใหญ่จะถูกย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็กลงภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ในการย่อยสลายดังกล่าวจะเกิดกรดอินทรีย์ (Volatile fatty acids, VFA) โดยแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรด (Acidogenic bacteria) และกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) นำไปใช้และผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นแก๊สมีเทน (Methane,  $CH_4$ ) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide,  $CO_2$ ) และน้ำ โดยแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกเก็บไว้ด้านบนของบ่อหมักแบบรางซึ่งคลุมปิดด้วยแผ่นพลาสติกชนิดทนทานต่อแสงแดด (PVC-Anti UV) ที่สามารถใช้กักเก็บแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ในสภาวะความดันต่ำ เพื่อรอการนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานทดแทนต่อไป ตะกอนที่ผ่านการหมักย่อย

แล้วจากบ่อหมักช้าแบบรางจะถูกดึงออกไปยังลานตากตะกอน (Sand bed filter) เพื่อแยกน้ำและกากตะกอนออกจากกัน โดยตะกอนที่ตากแห้งแล้วจะถูกกวาดเก็บไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์เพื่อการเกษตร ส่วนน้ำเสียที่ผ่านการหมักย่อยในระดับหนึ่งแล้วจากบ่อหมักช้าแบบรางจะถูกส่งไปบำบัดต่อในถังหมักยูเอเอสบีต่อไป โดยระยะเวลาที่เก็บในส่วนที่เป็นน้ำ 4-5 วัน และสำหรับส่วนที่เป็นของแข็ง 40-60 วัน ซึ่งมีรูปร่างบ่อคล้ายรางน้ำ เพื่อส่งน้ำจากด้านหัวบ่อไปท้ายบ่อเพื่อให้น้ำมูลหนักตกตะกอนภายในบ่อ ทำให้มีระยะเวลาอยู่ในบ่อนาน ซึ่งน้ำมูลหนักจะได้รับการหมักย่อยจากด้านหัวบ่อเร็วกว่าลงเรื่อยๆ จนถึงด้านท้ายบ่อ

2) ถังหมักแบบยูเอเอสบี (Upflow anaerobic sludge blanket, UASB) ทำหน้าที่หมักย่อยน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยน้อย แต่ยังมีสารอินทรีย์ละลายอยู่มาก มีระยะเวลาที่เก็บน้ำ 1-2 วัน และระยะเวลาที่เก็บตะกอน 10-15 วัน เป็นบ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้สำหรับหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่อยู่ในรูปของสารละลาย โครงสร้างทำจากคอนกรีตเสริมเหล็กเช่นเดียวกับบ่อหมักช้าแบบราง โดยจะมีการกระจายน้ำให้ไหลย้อนขึ้นผ่านชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นภายในบ่อ ซึ่งจะทำให้น้ำเสียได้รับการหมักย่อยโดยจุลินทรีย์ และแยกเอาแก๊สชีวภาพ ตะกอนจุลินทรีย์ และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ทางด้านบนของบ่อหมัก ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า ชุดเบนตะกอน เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยให้ตะกอนจุลินทรีย์ไม่หลุดออกจากบ่อหมัก ทำให้จุลินทรีย์ในบ่อมีความเข้มข้นมาก ส่งผลให้บ่อหมักมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ดี มีประสิทธิภาพการบำบัดไม่น้อยกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ โดยอาศัยหลักการคล้ายกับที่ได้กล่าวในส่วนของบ่อหมักช้าแบบราง สารอินทรีย์ในรูปของสารละลายนี้จะถูกย่อยสลายกลายเป็นแก๊สชีวภาพเช่นเดียวกัน และจะถูกส่งกลับไปเก็บรวบรวมไว้ใต้พื้นพลาสติกที่บ่อหมักแบบรางเพื่อรอการนำไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**รูปที่ 2.1** แผนผังแสดงการทำงานของระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบบ่อหมักช้าแบบวาง และบ่อยูเอเอสบีของฟาร์มขนาดกลาง (MC-UASB)

ระบบแก๊สชีวภาพที่สมบูรณ์นอกจากบ่อหมักช้าแบบวางและบ่อยูเอเอสบีของฟาร์มขนาดกลาง ซึ่งถือเป็นส่วนผลิตแก๊สชีวภาพและพลังงานทดแทนแล้ว ยังต้องมีส่วนประกอบอื่นได้แก่ ลานตากตะกอน หรือบ่อเก็บตะกอน ซึ่งนำตะกอนหรือส่วนที่ย่อยไม่ได้ในบ่อหมัก เช่น ขนสัตว์ ทราย หรือเศษวัสดุ ออกมาจัดการเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพและยั่งยืน รวมถึงระบบบำบัดขั้นหลัง ที่อาศัยการบำบัดแบบธรรมชาติ ประกอบด้วยบ่อฝั่ง บ่อพีชน้ำ และบ่อพักเก็บน้ำ ซึ่งระบบบำบัดขั้นหลังนี้จะบำบัดน้ำที่ผ่านการย่อยจากบ่อหมักแล้ว ให้มีคุณสมบัติตามที่กฎหมายกำหนด หรือจะใช้น้ำดังกล่าวกับพื้นที่เกษตรกรรมก็ได้

## 2.5 ของเสียจากฟาร์มสุกร

ของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงสุกรมีทั้งของเสียส่วนที่เป็นของแข็งและของเสียส่วนที่เป็นของเหลว ซึ่งจะมีปริมาณและสมบัติบางประการแตกต่างกันไปตามขนาดของสุกร พันธุ์สุกร คุณค่าและปริมาณของอาหารที่สุกรกิน ชนิดของอาหารสุกร และวิธีการการเลี้ยงสุกร โดยสุกรที่กินอาหารในปริมาณมากหรือกินอาหารที่มีเส้นใยสูง มีความสามารถย่อยได้น้อย จะทำให้สุกรถ่ายมูลออกมา มาก (สุทัศน์ ศิริ, 2540) ขนาดของสุกรมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณของเสีย เนื่องจากสุกรที่มีน้ำหนักตัวมากมีความต้องการอาหารมากกว่าสุกรที่มีน้ำหนักตัวน้อย ทำให้การขับถ่ายของเสีย

มีในปริมาณที่มากกว่า ดังจะเห็นได้จากสุกรพันธุ์ซึ่งมีน้ำหนักมากจะมีการขับถ่ายของเสียมากกว่า สุกรขุนซึ่งมีน้ำหนักน้อยกว่า (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5) ในส่วนของปริมาณธาตุอาหารในของเสีย จากสุกรพันธุ์ทั้งในส่วนที่เป็นของแข็งและในส่วนที่เป็นของเหลวมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ สุกรขุน (Harada, 1996) ของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงสุกรมีดังนี้

1) ของเสียส่วนที่เป็นของแข็ง คือ มูลสุกรซึ่งประกอบไปด้วยอาหารที่ไม่ถูกย่อยหรืออาหาร บางส่วนที่ถูกย่อยแล้วแต่ไม่สามารถนำไปใช้ได้ เช่น เส้นใย เซลลูโลส เนื้อเยื่อ และจุลินทรีย์ต่างๆ ในระบบทางเดินอาหาร เป็นต้น (สุทัศน์ ศิริ, 2540) มูลของสุกรพันธุ์จะมีลักษณะแข็งเป็นก้อน ส่วนมูลของสุกรขุนจะมีลักษณะเหลวกว่า และมูลของลูกสุกรจะมีความเหนียวและมีกลิ่นเหม็น ซึ่งในมูลสุกรมีค่าบีโอดี (Biochemical oxygen demand, BOD) 55,000-60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีธาตุไนโตรเจน 5-13 กรัม ฟอสฟอรัส 3-5 กรัม และโพแทสเซียม 2-12 กรัม ต่อมูลสุกร 1 กิโลกรัม (วันเพ็ญ วิโรจนุกู และคณะ, 2542) นอกจากนี้ Muller (1980) (อ้างโดย Pearce, 1979) ซึ่งทำการศึกษาส่วนประกอบของมูลสุกรในประเทศออสเตรเลียจากฟาร์มสุกร 24 แห่ง แสดงให้เห็นว่าในมูลสุกรมีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในแง่การเป็น แหล่งธาตุอาหารของพืชได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

2) ของเสียส่วนที่เป็นของเหลว คือ ปัสสาวะ ประกอบไปด้วยน้ำ สารพิษต่างๆ ที่ถูกขับทิ้ง โดยไต เป็นต้น (สุทัศน์ ศิริ, 2540) และน้ำที่ใช้ในกิจกรรมภายในคอกเลี้ยง เช่น การล้างคอกสุกร เป็นต้น จากการศึกษาของกรมควบคุมมลพิษ (2542) พบว่า ฟาร์มสุกรขนาดเล็กมีอัตราการใช้น้ำ ในการล้างคอกสุกรสูงสุด คือ 20 ลิตรต่อตัวต่อวัน รองลงมา คือ ฟาร์มสุกรขนาดกลางมีอัตราการ ใช้น้ำในการล้างคอกสุกร 15 ลิตรต่อตัวต่อวัน และฟาร์มสุกรขนาดใหญ่มีอัตราการใช้น้ำในการ ล้างคอกสุกรต่ำสุด คือ 10 ลิตรต่อตัวต่อวัน ในส่วนของค่าความสกปรกของน้ำเสีย พบว่า ค่าความ สกปรกของน้ำเสียในฟาร์มสุกรขนาดใหญ่มีค่าสูงกว่าน้ำเสียจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและเล็ก ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ในด้านความแตกต่างของสมบัติบางประการของน้ำเสียที่เกิด จากสุกรพันธุ์และสุกรขุน วันเพ็ญ วิโรจนุกู และคณะ (2542) ได้รายงานถึงการศึกษาลักษณะ สมบัติของน้ำเสียที่เกิดจากฟาร์มสุกร ซึ่งศึกษาโดยโครงการสาธิตและฝึกอบรมการจัดการน้ำเสีย แก่ผู้ประกอบการขนาดย่อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น พบว่า น้ำเสียที่เกิดจากฟาร์มสุกรขุนจะมีค่า ความสกปรกสูงกว่าน้ำเสียที่เกิดจากฟาร์มสุกรพันธุ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.5 ปริมาณของสิ่งขับถ่ายโดยประมาณของสุกรขนาดต่างๆ (สมชัย จันทร์สว่าง, 2529)

ชนิดของสุกร	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ปริมาณสิ่งขับถ่าย	
		อุจจาระและปัสสาวะ (ลิตร)	อุจจาระเปียก (กิโลกรัม)
สุกรพันธุ์	18	1.90	1.09
	45	3.79	2.68
	68	6.44	3.99
	95	8.34	5.44
แม่และพ่อสุกร	136	11.37	7.94
	227	18.95	13.61
แม่และลูกสุกร	-	15.16	13.61

ตารางที่ 2.6 ส่วนประกอบของมูลสุกร (ในหน่วยของน้ำหนักแห้ง) (Muller, 1980)

ส่วนประกอบ	ส่วนประกอบของมูลสุกร	เฉลี่ย	หน่วย
ฟอสฟอรัส (P)	1.4-4.6	2.6	เปอร์เซ็นต์
โพแทสเซียม (K)	0.6-1.6	1.0	เปอร์เซ็นต์
แคลเซียม (Ca)	1.5-8.5	3.5	เปอร์เซ็นต์
แมกนีเซียม (Mg)	0.3-1.3	0.7	เปอร์เซ็นต์
โซเดียม (Na)	0.1-0.5	0.3	เปอร์เซ็นต์
เหล็ก (Fe)	971-6,407	2,169	พีพีเอ็ม
สังกะสี (Zn)	225-1,059	600	พีพีเอ็ม
ทองแดง (Cu)	27-822	280	พีพีเอ็ม
แคดเมียม (Cd)	0.04-3.02	0.77	พีพีเอ็ม
ตะกั่ว (Pb)	0.29-40.11	9.89	พีพีเอ็ม

ตารางที่ 2.7 ปริมาณและลักษณะสมบัติโดยเฉลี่ยของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตาม  
ขนาดฟาร์ม (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2550)

ขนาดฟาร์ม	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตรต่อตัวต่อวัน)	ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
		บีโอดี (BOD)	ซีโอดี (COD)	สารแขวนลอย (SS)	ทีเคเอ็น (TKN)	ฟอสฟอรัสทั้งหมด
ขนาดใหญ่	10	3,000	7,000	4,800	540	8.0
ขนาดกลาง	15	2,500	6,800	3,000	540	9.5
ขนาดเล็ก	20	1,500	4,000	2,000	400	17.0

ตารางที่ 2.8 ค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ยของลักษณะสมบัติน้ำเสียจากฟาร์มสุกร  
(วันเพ็ญ วิโรจน์กู และคณะ, 2542)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ฟาร์มสุกรพันธุ์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ฟาร์มสุกรขุน (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
พีเอช (pH)	8.0	8.6	8.3	7.0	7.2	7.1
บีโอดี (BOD)	1,000	2,000	1,500	11,000	42,000	26,500
ซีโอดี (COD)	3,500	5,000	4,250	35,000	95,000	65,000
สารแขวนลอย (SS)	3,500	4,900	4,200	25,000	150,000	87,500
แอมโมเนียมไนโตรเจน (NH <sub>3</sub> -N)	320	420	370	1,300	2,300	1,800
ทีเคเอ็น (TKN)	350	750	550	1,600	2,500	2,000
ฟอสเฟต (PO <sub>4</sub> -P)	40	200	120	600	1,800	1,200

## 2.6 การจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

### 1) การจัดการมูลสุกร

มูลสุกรที่เก็บกวาดออกก่อนที่จะทำการฉีดล้างคอกสุกร อาจจะไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ขยายสดให้แก่เกษตรกร นำไปทำปุ๋ย นำไปเป็นอาหารให้ปลาโดยตรง หรือนำมูลสุกรและน้ำเสียไปหมักในสภาพไม่ใช้ออกซิเจนทำให้เกิดแก๊สชีวภาพ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม จุดตะเกียง หรือผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับมูลสุกรที่ผ่านการหมักแล้วนำไปเป็นปุ๋ยสำหรับปลูกพืชได้

### 2) การจัดการน้ำเสีย

ฟาร์มสุกรส่วนใหญ่จะเป็นฟาร์มสุกรขนาดเล็กและฟาร์มสุกรรายย่อย ดังนั้นหลักในการจัดการน้ำเสีย คือ ต้องแยกมูลสุกรออกจากน้ำเสีย เพื่อลดการตื่นเงินของบ่อพักน้ำเสีย และลดความสกปรกของน้ำเสียที่ไหลเข้าสู่บ่อพัก โดยการเก็บกวาดมูลสุกรออกก่อนทำการฉีดล้างคอก บ่อพักน้ำเสียควรมีประมาณ 2-3 บ่อต่อเนื่องกัน น้ำจากบ่อสุดท้ายสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก เช่น ใช้ล้างพื้นคอก สูบใส่บ่อเลี้ยงปลา ใช้รดน้ำต้นไม้ ส่วนน้ำระบายน้ำเสียควรอยู่ใต้หลังคาโรงเรือนเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำฝนไหลมารวมกับน้ำเสียเป็นการลดปริมาณน้ำเสียที่จะต้องนำไปบำบัดและเพื่อป้องกันปัญหาน้ำล้นบ่อพัก (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

## 2.7 น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียจนเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

น้ำที่เกิดจากการล้างพื้นคอกจะถูกระบายเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ถ้าฟาร์มบางแห่งที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย น้ำเสียจะถูกระบายลงสู่ร่องสวนหรือลงทางระบายน้ำสาธารณะหรือลงสู่คลองโดยตรง (นิศากร ไชยรัตน์ และยุวรี อินนา, 2536) จากตารางที่ 2.9 แสดงคุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียที่นำมาบำบัดน้ำเสียเป็นระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบบ่อหมักรางและบ่อยูเอเอสบีของฟาร์มขนาดกลาง (MC-UASB) (บริษัท ทีมเอ็นเออร์รี่ แมแนจเม้นท์ จำกัด, 2552)



ตารางที่ 2.9 คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบผลิตแก๊สชีวภาพ (บริษัท ทีเอ็ม เอ็นเนอร์ยี แมแนจเม้นท์ จำกัด, 2552)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	คุณภาพน้ำทิ้ง	หน่วย	มาตรฐานน้ำทิ้ง
1. ลักษณะของตัวอย่างน้ำ	สีน้ำตาลเหลือง	-	ไม่ระบุค่า
2. ค่าพีเอช	7.35	-	5.5-9*
3. ซีไอดี	240	มิลลิกรัมต่อลิตร	400*
4. ของแข็งแขวนลอย	76	มิลลิกรัมต่อลิตร	200*
5. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	195	มิลลิกรัมต่อลิตร	200*
6. ปริมาณโลหะ			
- แคลเซียม (Ca)	194.91	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- แมกนีเซียม (Mg)	20.75	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- โพแทสเซียม(K)	253.98	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- ฟอสฟอรัส (P)	31.00	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- เหล็ก (Fe)	17.77	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- ทองแดง (Cu)	5.10	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0**
- สังกะสี (Zn)	18.66	มิลลิกรัมต่อลิตร	5.0**

หมายเหตุ : \* มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรสำหรับฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก

\*\* มาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน

จากการศึกษาของบริษัท ทีเอ็ม เอ็นเนอร์ยี แมแนจเม้นท์ จำกัด ได้วิเคราะห์น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบบ่อหมักวาง และบ่อบำบัดของฟาร์มขนาดกลาง (MC-UASB) พบว่า น้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดมีสีน้ำตาลเหลือง มีตะกอนปนอยู่ค่อนข้างมาก มีค่าพีเอช 7.35 ซึ่งถือว่าน้ำทิ้งมีค่าพีเอชเป็นกลาง ค่าซีไอดี เท่ากับ 240 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำ เท่ากับ 195 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณสารแขวนลอย เท่ากับ 76 มิลลิกรัมต่อลิตร และในส่วนของโลหะบางชนิด เช่น แคลเซียม ทองแดง เหล็ก ฟอสฟอรัส และสังกะสี พบว่า มีการปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำ ซึ่งโลหะมาจากอาหารและยาปฏิชีวนะที่ให้สุกรกิน จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งข้างต้น พบว่า ในน้ำทิ้งยังมีธาตุอาหารของพืชละลายเจือปนอยู่ในน้ำ หากปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะในระดับความเข้มข้นที่สูงหรือต่อเนื่องเป็นระยะเวลาอันยาวนาน อาจก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศทางน้ำแผ่ขยายในวงกว้าง และยังส่งผลกระทบต่ออาชีพประมงและชุมชนที่อาศัยอยู่โดยรอบพื้นที่

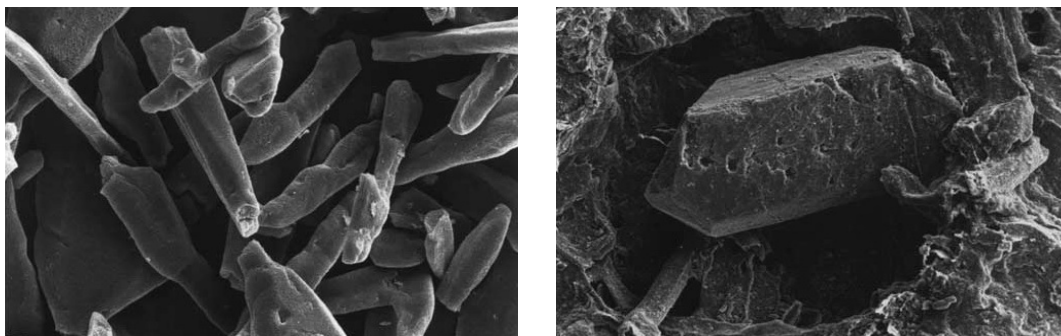
แนวทางในการจัดการน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากฟาร์มสุกรในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะเป็นการกักเก็บน้ำไว้ในบ่อพักน้ำภายในบริเวณพื้นที่ของฟาร์ม ฟาร์มสุกรบางแห่งได้มีความพยายามที่จะนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ล้างทำความสะอาดคอกสัตว์ การนำไปรดน้ำต้นไม้ เป็นต้น แต่จากลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่า มีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ซึ่งลักษณะน้ำทิ้งดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้โดยวิธีการต่างๆ เพื่อเป็นการสร้างรายได้และลดรายจ่ายให้กับเจ้าของฟาร์มสุกรหรือเกษตรกร และยังเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์แทนการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จากลักษณะของน้ำทิ้งและเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียในปัจจุบัน แนวทางในการเพิ่มมูลค่าน้ำทิ้งที่ได้รับความสนใจในการศึกษาและพัฒนา คือ การตกตะกอนผลึก MAP (Magnesium ammonium phosphate) หรือ สตรูไวท์ (Struvite)

## 2.8 ผลึก MAP (Magnesium ammonium phosphate)

ผลึก MAP (Magnesium ammonium phosphate หรือเรียกว่า สตรูไวท์ (Struvite) มีลักษณะแสดงดังรูป 2.2 โดยผลึกมีรูปร่างหกเหลี่ยมรูปยาว ดังรูปที่ 2.3 มีสูตรทางเคมี คือ  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  (Magnesium ammonium phosphate hexahydrate)



รูปที่ 2.2 ผลึก MAP (<http://www.paques.nl> [2009, May 17])



รูปที่ 2.3 รูปทรงของผลึก MAP (Jeongและคณะ, 2001)

### 2.8.1 การเกิดผลึก MAP

ผลึก MAP เป็นการควบคุมแมกนีเซียม (Magnesium,  $Mg^{2+}$ ) แอมโมเนีย (Ammonium,  $NH_4^+$ ) และฟอสเฟต (Phosphate,  $PO_4^{3-}$ ) โดยใช้แมกนีเซียมเป็นตัวประสานให้เกิดเป็นผลึกของแข็ง และตกตะกอนแยกออกจากน้ำ ซึ่งสามารถเกิดได้ตามธรรมชาติหรืออาจพบการสะสมผลึกในรูปของตะกอนตามชั้นส่วนต่างๆ ของระบบบำบัดน้ำเสีย (การสะสมของผลึก MAP, 2552) การเกิดผลึก MAP เป็นตามสมการ (2.1) และมีค่าคงที่การละลาย ( $K_{sp}$ ) เท่ากับ  $7.08 \times 10^{-14}$  ดังนี้



$$K_{sp} = [Mg^{2+}][NH_4^+][PO_4^{3-}] = 7.08 \times 10^{-14}$$

### 2.8.2 กระบวนการตกตะกอนผลึก MAP (Le Corre, 2009)

การตกตะกอนผลึก MAP ในสารละลายของเหลวหรือของแข็ง โดยสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติหรือเกิดขึ้นจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเกิดจาก 2 ขั้นตอนคือ

#### 1) การเกิดเกิดผลึก (Nucleation)

การเกิดขึ้นของอนุภาคอิสระในสารละลายของเหลวหรือไอ อนุภาคอิสระจะเคลื่อนที่แบบสุ่มในสารละลาย แล้วเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคอิสระ เมื่ออนุภาคอิสระรวมตัวกันมากพอก็จะกลายเป็นเอ็มบริโอ (Embryo) ซึ่งจะเกิดการเริ่มต้นเรียงตัวกันของอนุภาค และเกิดขึ้นมาใหม่ สุดท้ายจะตกผลึกแยกออกมา ซึ่งเอ็มบริโอจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น และกลับไปเป็นอนุภาคอิสระ แต่ถ้าสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดมากพอ เอ็มบริโออาจเจริญเติบโตจน

มีขนาดที่สามารถอยู่ในสมดุลทางอุณหพลศาสตร์กับสารละลายได้ เรียกเอ็มบริโอนี้ว่า นิวเคลียส (Nuclei) รูปที่ 2.4 แสดงลำดับขั้นการเกิดของผลึก

อนุภาคอิสระ → เอ็มบริโอ → นิวเคลียส → ผลึก

### รูปที่ 2.4 ลำดับขั้นการเกิดของผลึก

การเกิดขึ้นของอนุภาคนี้เกิดขึ้นได้ทั้งแบบการเกิดเกิดผลึกปฐมภูมิ (Primary nucleation) และการเกิดเกิดผลึกทุติยภูมิ (Secondary nucleation)

1.1) การเกิดเกิดผลึกปฐมภูมิ (Primary nucleation) เกิดในสารละลายที่ไม่มีผลึกอยู่ในรูปของสารแขวนลอย ต้องการสภาพอิ่มตัวยิ่งยวดสูงและมีกลไกที่สำคัญที่เกิดขึ้นในการตกตะกอน แบ่งการเกิดเกิดผลึกได้ 2 ชนิด

- Homogeneous nucleation คือ เกิดนิวเคลียสผลึกขึ้นเองในสารละลายและที่ความบริสุทธิ์ของตัวกลางสูง โดยเกิดขึ้นจากอนุภาคหลายอย่าง เช่น โมเลกุล อะตอม หรือ ไอออน เป็นต้น (ไม่ได้มีผลมาจากของแข็งจากแหล่งใดๆ หรืออนุภาคของสารแปลกปลอมขนาดเล็กจากที่อื่นในสภาพอิ่มตัวยิ่งยวด)

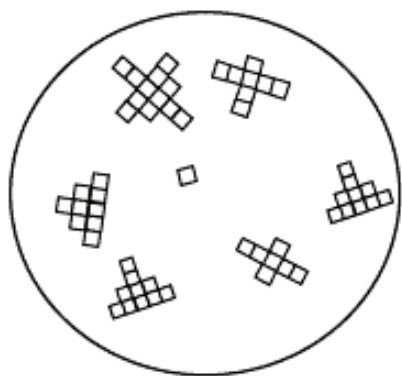
- Heterogeneous nucleation คือ เกิดผลึกได้โดยมีอนุภาคของแข็งจากแหล่งอื่นเข้ามาในกระบวนการ โดยอาจเป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสผลึกที่ทำให้เกิดสภาพอิ่มตัวยิ่งยวด หรือทำให้เกิดอัตราที่จำกัดที่สภาพอิ่มตัวยิ่งยวด

Homogeneous nucleation และ Heterogeneous nucleation ต้องเกิดขึ้นโดยอาศัยแรงขับเคลื่อน (Driving force) ซึ่งอาจมาจากความต่างของอุณหภูมิหรือความเข้มข้นของสารในสารละลาย

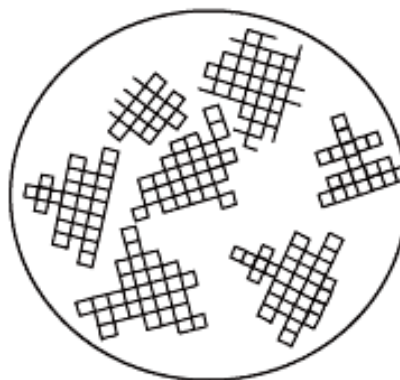
1.2) การเกิดเกิดผลึกทุติยภูมิ (Secondary nucleation) เกิดจากอิทธิพลของผลึกในระดับที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าในสารละลายที่มีเกิดผลึกอยู่ในสารละลายแล้ว

### 2) การโตของผลึก (Crystal growth)

เป็นกระบวนการเติบโตของผลึกที่เกิดขึ้นต่อจากการเกิดนิวเคลียส โดยสามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่องถ้าสิ่งแวดล้อมอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม กระบวนการโดยรวมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน คือขั้นตอนการแพร่และขั้นตอนการเกาะติดที่ผิวระหว่างหน้า ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดในสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (Le Corre, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



(ก) การเกิดเกล็ดผลึก



(ข) การโตของผลึก

**รูปที่ 2.5** การเกิดเกล็ดผลึกและการโตของผลึก ([http://202.44.47.77/tam/SubjectsbyWASAN/673352%20Food ProcessingII/crystallization.pdf](http://202.44.47.77/tam/SubjectsbyWASAN/673352%20Food%20ProcessingII/crystallization.pdf) [2009, July 17])

### 2.8.3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลึก MAP

ผลึก MAP พบในรูปผลึกของแข็งรูปทรงหกเหลี่ยมรูปลาย มีสีขาวจนถึงเหลืองอ่อนหรือสีน้ำตาล ขนาดผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดตั้งแต่เล็กหรือใหญ่ และมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีอื่นๆ ที่สำคัญดังตารางที่ 2.10

**ตารางที่ 2.10** ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลึก MAP (Le Corre, 2009)

ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ค่าประมาณ	หน่วย
น้ำหนักโมเลกุล	245.41	กรัมต่อโมล
ความแข็งแรงของแร่	1.5-2.0	-
ความถ่วงจำเพาะ	1.711	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความยาวของผลึก	10-60	ไมโครเมตร
ค่าคงที่การละลาย ( $K_{sp}$ ) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	$7.08 \times 10^{-14}$	-
การละลาย (ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)		
- ในน้ำ		
- ในกรดไฮโดรคลอริก 0.001 นอร์มัล		
- ในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 นอร์มัล		

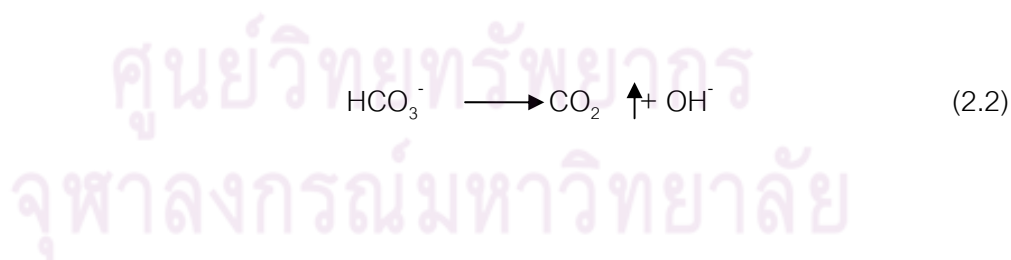
## 2.8.4 ปัจจัยของการเกิดผลึก MAP

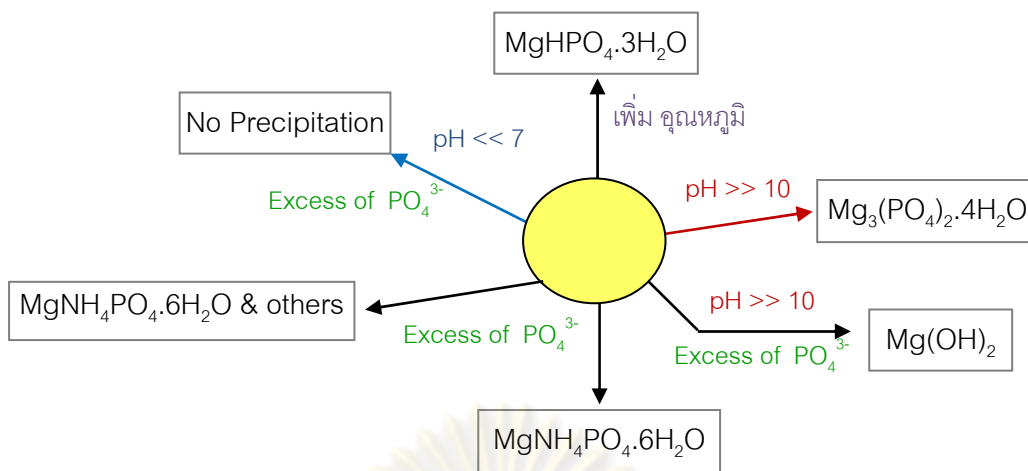
### 1) ค่าพีเอช

ค่าพีเอชของน้ำมีผลต่อการละลายและการตกตะกอนผลึก MAP ดังนั้นในน้ำเสียที่มีสารเหล่านี้เป็นองค์ประกอบอยู่การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชอาจทำให้เกิดสารประกอบได้ในหลายรูปแบบ นอกจากผลึก MAP ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เช่น  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{MgOH}^+$ ,  $\text{MgH}_2\text{PO}_4^+$ ,  $\text{MgHPO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{MgPO}_4^-$ ,  $\text{NH}_3(\text{aqueous})$  เป็นต้น จากการศึกษาของ Choi (2007) อ้างโดยบริษัท ทีเอ็ม เอ็นเนอร์ยี แมแนจเม้นท์ จำกัด (2552) รายงานว่า เมื่อค่าพีเอชของน้ำมีค่าน้อยกว่า 7 ผลึก MAP สามารถละลายน้ำได้ดี ไม่จับตัวกันเป็นผลึก เมื่อพีเอชมีค่าสูงมากกว่า 10 ขึ้นไป จะเกิดสารประกอบในรูป  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  หรือ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  และเมื่อพีเอชมีค่าประมาณ 7-9 จะเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดตะกอนผลึก MAP ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 นอกจากนี้ที่สภาวะดังกล่าวอาจเกิดการตกตะกอนผลึกของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Calcium hydroxyapatite, HAP) ดังนั้นในการสร้างตะกอนผลึก MAP จึงต้องการการควบคุมพีเอชให้เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้เกิดตะกอนผลึกอย่างสมบูรณ์

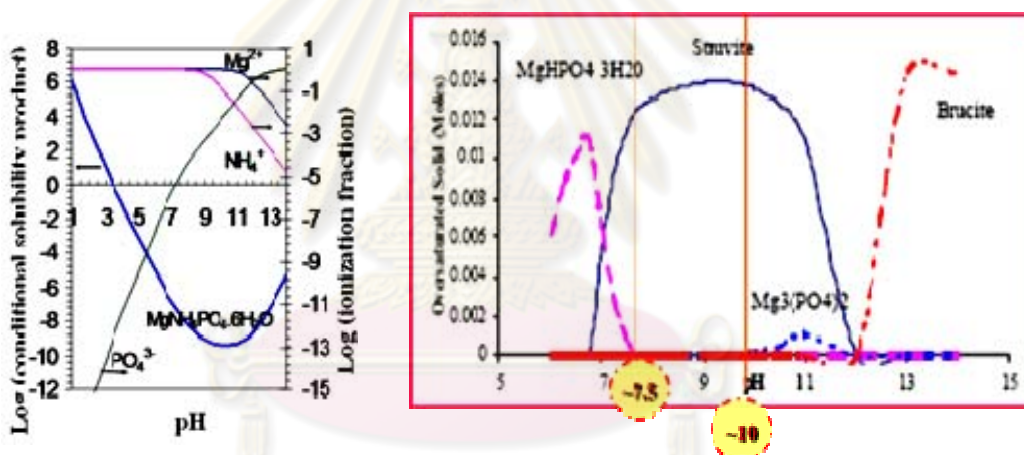
แนวทางในการเพิ่มสภาพความเป็นด่างให้กับน้ำเสียเพื่อเร่งการตกตะกอน สามารถทำได้หลายแนวทาง (de-Bashan และ Bashin, 2003) เช่น

- การเติมแมกนีเซียม เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide,  $\text{MgO}$ ) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium Hydroxide,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )
- การเติมสารเคมีที่มีสภาพเป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )
- กระบวนการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  stripping) (Neethling และ Benisch, 2004) ดังแสดงในสมการที่ (2.2)





รูปที่ 2.6 การเกิดผลึกรูปแบบต่างๆ ในสารละลายที่มี แมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต เป็นองค์ประกอบ (Choi, 2007)(อ้างโดย บริษัท ทีเอ็ม เอ็นเนอร์ยี แมแนจเม้นท์ จำกัด (2552))



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงช่วงพีเอชในการตกตะกอนผลึก MAP (Control of struvite deposition in wastewater treatment plants, 2009 และ Ali และคณะ, 2006)

2) อัตราส่วนโมลที่เหมาะสม (Molar ratio)

กลไกการเกิดผลึก MAP ในอุดมคตินั้นต้องการอัตราส่วนโมลเหมาะสมระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต ( $[Mg^{2+}]:[NH_4^+]:[PO_4^{3-}]$ ) เท่ากับ 1:1:1 (de-Bashan and Bashin, 2004) จากการศึกษาในต่างประเทศน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยทั่วไป พบว่า มีปริมาณของแมกนีเซียมน้อยหรือไม่เพียงพอ เมื่อเทียบกับแอมโมเนียมและฟอสฟอรัสในการตกตะกอนผลึก MAP ดังนั้นจึงเติมสารเคมี เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณของแมกนีเซียมให้มีค่าเหมาะสมต่อการเกิดผลึก นอกจากนี้ปริมาณแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส ( $Mg:PO_4$ ) ที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกจะมาก

หรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับสารประกอบอื่นๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย เช่น สารอินทรีย์ (Organic matter) และไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสีย ซึ่งทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมที่เติมลงไปเพื่อการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ จากการศึกษาของ Burns และคณะ (2003) พบว่า อัตราส่วนโมลที่เหมาะสมในการเกิดผลึก MAP คือ 1.6:1 ดังนั้นในการแยกฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการนี้จึงต้องทำการเติมแมกนีเซียมให้เพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณการเติมแมกนีเซียมเป็นปัจจัยควบคุมการเกิดผลึก MAP หลากหลายงานวิจัยได้ให้ความสำคัญกับชนิดของสารประกอบแมกนีเซียมและปริมาณที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึก

ปริมาณของแมกนีเซียมที่เหมาะสมนั้นจะเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยีนี้ สารประกอบแมกนีเซียมที่ได้มีการศึกษาในงานวิจัยและนำมาใช้กับโรงงานต้นแบบ (Full scale plant) ได้แก่ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide,  $Mg(OH)_2$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide,  $MgO$ ) และแมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) โดยสารประกอบแต่ละชนิดมีความเหมาะสมแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.11

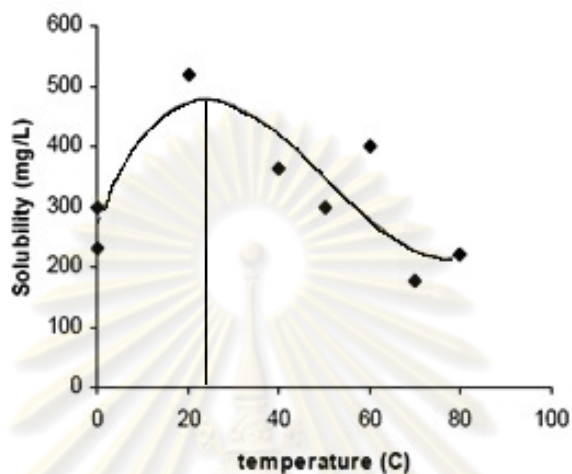
ตารางที่ 2.11 ข้อดีและข้อจำกัดของสารประกอบแมกนีเซียมแต่ละชนิด

สารเคมี	ข้อดี	ข้อจำกัด
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, $MgO$ )	ช่วยเร่งการตกตะกอนผลึก MAP โดยไม่ต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพความเป็นต่าง	ละลายน้ำได้ยาก ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาช้า มีแมกนีเซียมออกไซด์หลงเหลือหลังจากทำปฏิกิริยา
แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium chloride, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ )	ละลายน้ำได้ง่าย ทำให้ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้น	มีสภาพเป็นกรดอ่อน ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่ไม่เหมาะสมต่อเกิดผลึก MAP ดังนั้นจึงต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพน้ำให้มีค่าความเป็นต่าง



### 3) อุณหภูมิ

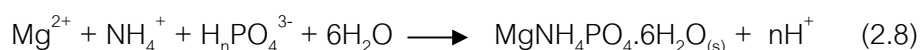
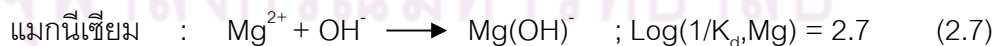
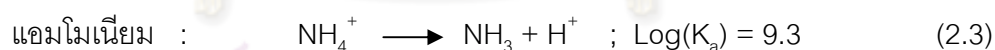
อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึก MAP จากการศึกษาของ Borgerding (1972) รายงานว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส จะเกิดการตกตะกอนของผลึก MAP ได้ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของผลึก MAP (Borgerding, 1972)

### 4) ค่าการละลายของผลิตภัณฑ์

Snoeyink และ Jenkins (1980) ศึกษาค่าการละลายของผลึก MAP โดยใช้สมการที่ (2.3)-(2.8)



จากสมการที่ (2.8) พบว่า  $K_{sp} = [Mg^{2+}][NH_4^+][PO_4^{3-}]$

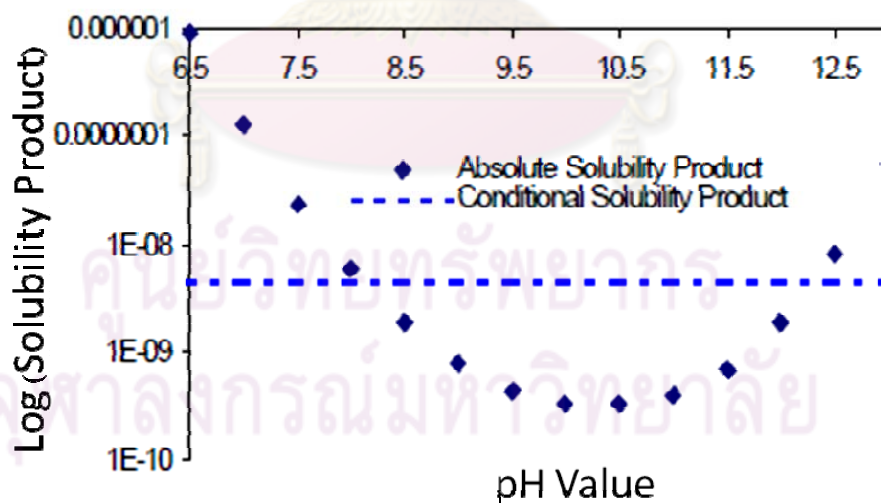
กำหนดให้	Q	คือ	ปฏิกิริยาของสารที่สามารถละลายได้
	$K_{sp}$	คือ	ค่าคงที่สมดุลของการละลาย
	$K_a$	คือ	ค่าคงที่สมดุลของกรด
	$K_d$	คือ	ค่าคงที่ของการแตกตัวของแมกนีเซียม

เมื่อ  $Q > K_{sp}$  (Supersaturated) หมายถึง ความเข้มข้นของไอออนในน้ำมีค่าสูงกว่าจุดอิ่มตัวในน้ำ เกิดการตกตะกอน

$Q = K_{sp}$  หมายถึง เริ่มมีการตกตะกอนเล็กน้อย

$Q < K_{sp}$  (Undersaturated) หมายถึง ไอออนในน้ำไม่รวมตัวกัน ไม่เกิดการตกตะกอน

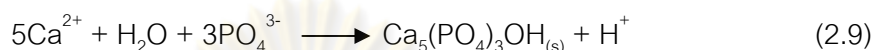
จากการศึกษาของ Ali และคณะ (2005) พบว่า การละลายน้ำของตะกอนผลึก MAP (Solubility diagram) คือ ที่พีเอชน้อยกว่า 8.1 และที่พีเอชมากกว่า 10.5 ดังนั้นช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP คือ ช่วงพีเอช 8.1-10.5 ดังแสดงในรูปที่ 2.9



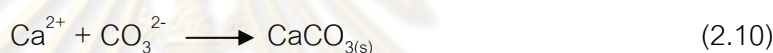
รูปที่ 2.9 ผลของค่าพีเอชต่อการละลายของผลึก MAP (Ali และคณะ, 2005)

### 5) ปริมาณไอออนในน้ำ (Ionic strength)

น้ำเสียที่มีปริมาณไอออนในน้ำสูงจะมีผลต่อการเกิดผลึก MAP ซึ่งในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมีไอออน เช่น แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) เหล็ก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) เป็นต้น จากการศึกษาของ Koutsoukos และคณะ (2003) พบว่า แคลเซียมสามารถรวมตัวกับฟอสเฟตเกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟต แสดงในสมการที่ (2.9) จากสมการฟอสเฟตจะถูกตกผลึกออกมาในรูปของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Calcium hydroxyapatite,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ )



และแคลเซียมยังสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอเนตในน้ำเกิดเป็นตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่รบกวนการเกิดตะกอนผลึก MAP ดังแสดงในสมการที่ (2.10)



### 6) การกวนผสม

ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสมมีผลต่อการเกิดผลึก MAP เนื่องจากถ้ามีการกวนผสมมาก ผลึกไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จากการศึกษาของ Ohlinger (1999) ศึกษาขนาดและรูปร่างของผลึก MAP เมื่อกวนด้วยความเร็วต่างๆ กัน พบว่า ผลึก MAP จะเกิดได้รูปร่างหกเหลี่ยมรูปยาวมากขึ้น เมื่อกวนด้วยความเร็วที่เหมาะสม

### 7) สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย

ปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนผลึก MAP ได้แก่ ปริมาณสารแขวนลอย ซึ่งมีผลต่อการตกตะกอนของผลึกต่างๆ ในน้ำ และปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมลงไป

## 2.8.5 ประโยชน์ของผลึก MAP

#### 1) ประโยชน์ของผลึก MAP ต่อภาคการเกษตรและสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนผลึก MAP เป็นการลดปริมาณของฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อภาคการเกษตรและสิ่งแวดล้อมดังนี้

- เป็นการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในน้ำเสียในขั้นตอนเดียว

- ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยน้ำทิ้งที่มีปริมาณธาตุอาหารที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชทำให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดิน และยังเป็นกรช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ที่ส่งผลเสียต่อระบบนิเวศทางน้ำ

- เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชั้นหลัง เนื่องจากการบำบัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงกับการเพาะปลูกและการเกษตร เนื่องจากมีปริมาณของธาตุฟอสฟอรัสที่ไม่มากเกินไปต่อความต้องการของพืช

## 2) ประโยชน์ของผลึก MAP ในรูปของปุ๋ยทางการเกษตร

จากรายงานการศึกษาพบว่าตะกอนผลึก MAP มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นปุ๋ยทางการเกษตร มีการนำมาผลิตเพียงจำนวนเล็กน้อย โดยแนวทางการนำไปใช้ ได้แก่

- การนำตะกอนผลึก MAP ใช้เป็นปุ๋ยละลายช้า (Slow-release fertilizer) (Von Munch และ Barr, 2001) ที่สามารถใส่ในปริมาณมากในครั้งเดียว (Single high dose) โดยไม่เป็นอันตรายต่อพืช ซึ่งพืชที่เหมาะสม ได้แก่ พืชยืนต้นอายุยาว พืชดอก ไม้ประดับ นาข้าว

- ตะกอนผลึก MAP สามารถนำไปผสมกับสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ดี เช่น กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid,  $\text{HPO}_4$ ) เพื่อนำไปใช้ในการปลูกพืชหรือไม้กระถาง

- ตะกอนผลึก MAP สามารถนำไปทดแทนปุ๋ยแอมโมเนียฟอสเฟต (Diammonium phosphate,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) ที่ผลิตจากการใช้สารเคมีสองชนิด คือ กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid,  $\text{HPO}_4$ ) และแอมโมเนียม (Ammonia,  $\text{NH}_4$ )

- การผลิตปุ๋ยโดยใช้ตะกอนผลึก MAP ผสมกับกรดฟอสฟอริกจะทำให้ได้ปุ๋ยละลายช้า (Slow-release fertilizer: di-magnesium phosphate,  $\text{MgHPO}_4$ ) และปุ๋ยละลายเร็ว (Fast-release fertilizer: di-ammonium phosphate,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่คุ้มค่า (Cost-effective) เมื่อเทียบกับการผลิตแบบเก่า

- ตะกอนผลึก MAP ที่ไม่ได้ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ (Untreated granular struvite) สามารถนำไปผสมกับถ่าน (Peat) เพื่อใช้เป็นวัสดุทางการเกษตร

- ตะกอนผลึก MAP เป็นธาตุอาหารรองที่มีประโยชน์ต่อพืชจำพวกตระกูลหัวใต้ดิน เช่น หัวบีทที่ใช้ทำน้ำตาล (Sugar beet) และข้าว เป็นต้น

## ตารางที่ 2.12 ข้อดีและข้อจำกัดของการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่มีธาตุอาหารปนเปื้อน

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. กำจัดฟอสเฟตและแอมโมเนียมในน้ำเสีย 2. ตะกอนผลึก MAP สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าทางการเกษตรและใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ย 3. การขนส่งทำได้สะดวก 4. ลดการปนเปื้อนของธาตุอาหารลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ 5. มีโรงงานต้นแบบขนาดใหญ่ (Full scale) ดำเนินการอย่างเป็นรูปธรรม	1. เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียมและฟอสเฟต 2. เสียค่าใช้จ่ายจากการเติมสารเคมี 3. ค่าใช้จ่ายสูง ในการติดตั้งระบบและถึงปฏิกรณ์ 4. การควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมทำได้ยาก

### 2.9 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation) (มันสิน, 2538)

การตกตะกอนทางเคมีหรือโคแอกกูเลชัน หมายถึง กระบวนการทั้งหมดในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมกันเป็นฟล็อก (Floc) มี 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) ทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง เป็นต้น โดยวิธีการเติมสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ทำให้อนุภาคดึงดูดเข้าหากัน

2) ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่มากกระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of colloidal particles) เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเดิม เมื่ออนุภาคต่างๆ สัมผัสกันแล้วจะเกิดการเกาะรวมกัน เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

คอลลอยด์ เป็นสารเนื้อเดียวที่เกิดจากการรวมตัวกันสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด ดังนั้นจึงต้องทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์เพื่อทำให้อนุภาคสามารถรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดและน้ำหนักมากขึ้น

จนสามารถตกตะกอนได้ ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ขึ้นอยู่กับแรงผลักรวมและแรงดูดระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ แรงผลักรวมเกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้าซึ่งชักนำโดยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนแรงดูดเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของอนุภาคขนาดเล็กและของโมเลกุล ถ้าแรงผลักรวมมากกว่าแรงดูด ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ แต่ถ้าแรงดูดมากกว่าแรงผลักรวม อนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพ และไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถกระทำได้โดยกลไก 4 แบบ คือ

1. โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer)
2. โดยการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption/Charge neutralization)
3. โดยใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (ห่อหุ้มอนุภาค)
4. โดยใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer bridging)

### 2.9.1 โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer)

การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค เป็นการเพิ่มจำนวนประจุตรงกันข้าม (Counter ion) ในชั้นกระจาย ผลที่เกิดขึ้นคือ ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไปออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ไอออนต่างๆ มีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจาย (ซึ่งเท่ากับลดซีตาโพเทนเชียล) ไม่เท่ากัน ปรากฏว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ 1 2 และ 3 มีอำนาจดังกล่าวเป็น 1:10:1000 ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น ไอออนของอลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) จะได้ผลดีกว่าไอออนของแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) ถึง 1000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ข้อสังเกตที่ควรตระหนักคือ ไอออนบวกต่างๆ ดังกล่าวไม่ได้อยู่ในน้ำอย่างอิสระ เนื่องจากไอออนเหล่านี้มักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ เช่น ไอออนของอลูมิเนียมมีน้ำ 6 โมเลกุลจับกันอยู่ ( $Al(H_2O)_6^{3+}$ ) (เรียกว่า Aqua complex) ซึ่งมีข้อเสียเพราะจะทำให้ไอออนบวก (ของโลหะ) ไม่สามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ โมเลกุลของน้ำเป็นเสมือนเกราะป้องกันการสัมผัสโดยตรง ระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับไอออนบวก ไอออนบวกต่างๆ ที่ออกันอยู่ในชั้นกระจายและไม่สามารถทำลายประจุของคอลลอยด์ได้ดีเท่าที่ควร การลดโมเลกุลของน้ำในสารประกอบคอมเพล็กซ์ (Aqua complex) ช่วยทำให้ไอออนบวกและอนุภาคคอลลอยด์เข้าใกล้กันมากขึ้น เช่น  $Al(OH)(H_2O)_5^{2+}$  หรือ  $Al(OH)_2(H_2O)_4^+$  สามารถเกาะติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ แต่  $Al(H_2O)_6^{3+}$  ไม่สามารถกระทำได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ค)

จึงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า  $\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$  หรือ  $\text{Al}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4^+$  หรือสารประกอบคอมเพล็กซ์อื่นๆ ล้วนเปลี่ยนน้อยกว่า  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกนี้ไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนประจุเป็นตรงข้าม เพราะจำนวนไอออนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกกำจัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์เสมอ ไอออนต่างประจุ (โคแอกกูแลนต์) ส่วนที่เติมมากเกินไปจะอยู่นอกชั้นกระจาย ดังนั้นไม่ว่าจะใช้โคแอกกูแลนต์มากเท่าใดการเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นตรงข้ามจะไม่สามารถเกิดขึ้น ถ้าโคแอกกูแลนต์ที่ไม่สามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์

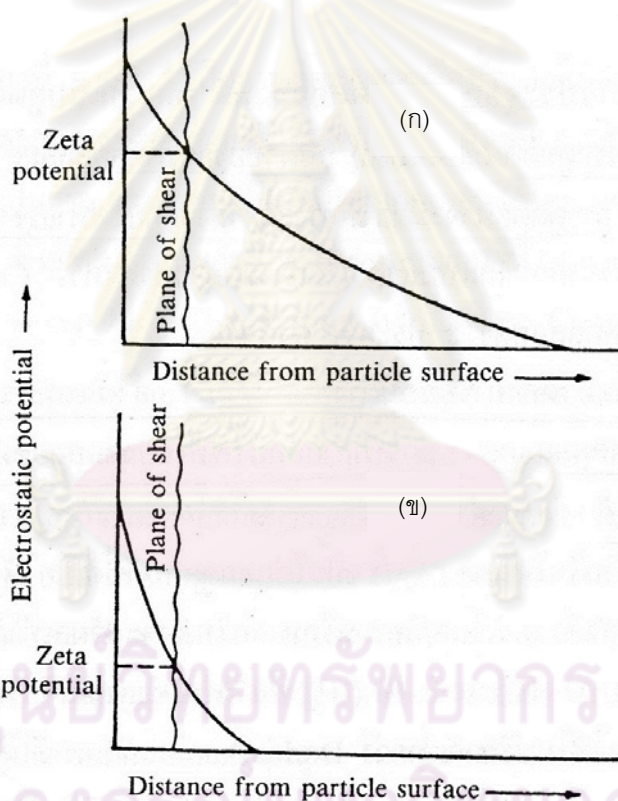
## 2.9.2 โดยการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption/ Charge neutralization)

สารเคมีบางหมู่สามารถดูดติด (Adsorbed) บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในทางลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกแบบดูดติดผิวนี้แตกต่างจากแบบแรก (ซึ่งไอออนต่างประจุอยู่ในชั้นกระจาย โดยไม่ดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์) 3 ประการ ดังนี้

1) กลไกแบบดูดติดผิวต้องการไอออนต่างชนิดน้อยกว่ากลไกแบบแรก เนื่องจากไอออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่าไอออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ เช่น Dodecylammomium ( $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NH}_3^+$ ) สามารถดูดติดผิวของคอลลอยด์ประจุลบของเงินไอโอไดต์ (AgI) เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ดีเมื่อใช้ในประมาณ  $6 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร แต่ต้องใช้ไอออนโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) สูงถึง 0.1 โมลต่อลิตร หรือมากกว่า จึงจะได้ผลเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) และ (ข) สารประกอบคอมเพล็กซ์ของไอออนอลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ ) และไอออนเหล็ก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ก็สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิวเช่นกัน และยังใช้ในปริมาณต่ำกว่า Dodecylammomium อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ค)

2) กลไกแบบดูดติดผิวแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) คือ ปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดของปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ (ที่ถูกควรเป็นพื้นที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์) แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นสโตยชิโอเมตริก

3) กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (Charge reversal) เกิดจากการใช้โคเอกกูแลนต์มากเกินไป เช่น ใช้ Dodecylammomium พอเหมาะทำให้โคเอกกูแลนต์เกิดได้ดีที่สุด (ความขุ่นเหลือน้อยที่สุด) แต่เมื่อเติม Dodecylammomium มากกว่าระดับที่เหมาะสม เสถียรภาพของคอลลอยด์จะฟื้นขึ้นมาใหม่เนื่องจากมีเปลี่ยนประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข) ข้อควรสังเกตของกลไกนี้ คือ การที่ไอออนต่างประจุสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนประจุเปลี่ยนไปเป็นตรงกันข้าม แสดงว่าปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนต่างประจุกับคอลลอยด์จนสามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ค) เป็นกลไกแบบดูดติดผิวที่ทำให้คอลลอยด์ประจุลบกลายเป็นประจุบวกเมื่อใช้สารส้มเป็นโคเอกกูแลนต์มากเกินไป

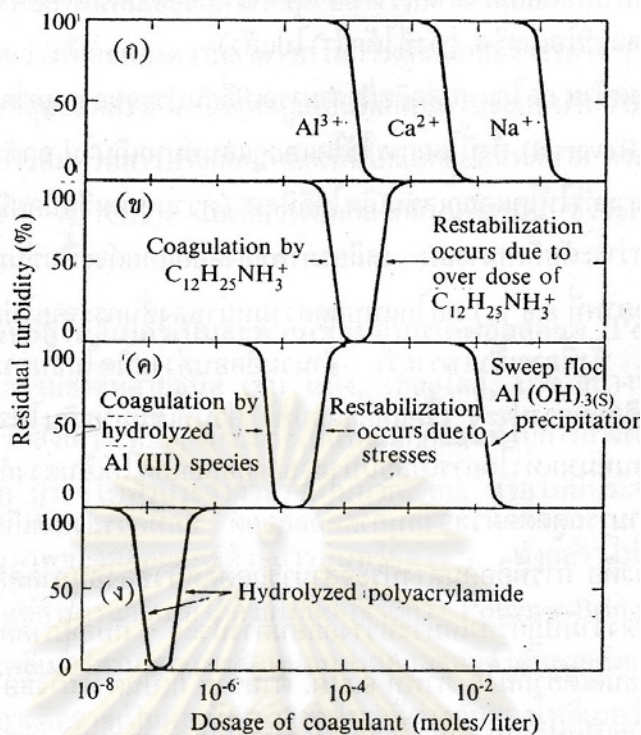


รูปที่ 2.10 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์

(ก) ก่อนเติมไอออน

(ข) หลังจากการเติมไอออน





รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ

- (ก) เป็นการลดความหนาของชั้นกระจายด้วย  $\text{Al}^{3+}$   $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Na}^+$  ต้องการโคแอกกูแลนต์มากที่สุด
- (ง) เป็นการใช้โพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมโยง (สะพาน) ให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมตัวกัน ต้องการสารโคแอกกูแลนต์น้อยที่สุด

### 2.9.3 โดยใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (ห่อหุ้มอนุภาค)

ถ้าเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปในน้ำในปริมาณเพียงพอจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับรวมตัวรวมกับผลึก ลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้อาจถือเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ กลไกแบบนี้เรียกว่า สารห่อหุ้มคอลลอยด์ (Sweep floc coagulation หรือ Sweep coagulation)

กลไกที่ใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะแตกต่างจากกลไก 2 แบบแรก คือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum dosage) แปรผกผันกับ

ความเข้มข้นของคอลลอยด์ คือ น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดโคแอกกูแลชั่นได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลชั่นน้อยกว่า เนื่องจากน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วโคแอกกูแลชั่นอาจไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควร การใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆ สำหรับเป็นวัสดุเป่าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูง โอกาสสัมผัสย่อมมีมากจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป่าสัมผัสจากภายนอกมาก

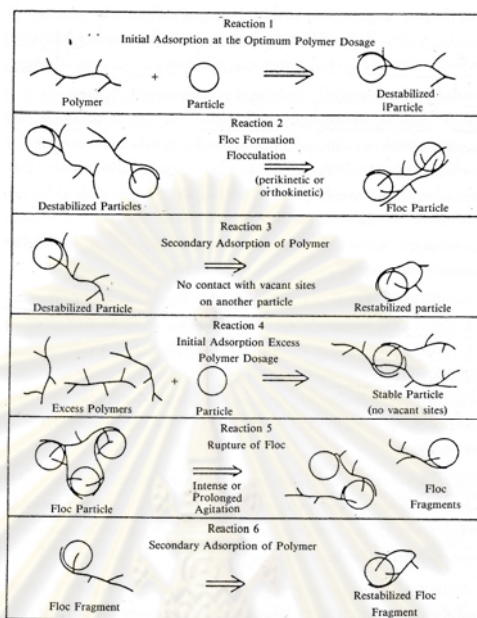
กลไกแบบนี้ไม่ต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ โคแอกกูแลชั่นจึงไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นในขณะที่ซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งกลไกนี้พีเอชมีความสำคัญมากเนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการตกผลึกของสารต่างๆ โคแอกกูแลนต์แต่ละตัวจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน

#### 2.9.4 โดยใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer bridging)

สารประกอบตามธรรมชาติ เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลบางชนิด และโปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ ในการกำจัดคอลลอยด์ได้ สารเหล่านี้มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประจุไฟฟ้าประจำตัวอาจเป็นบวก ลบ หรือไม่มีประจุเลยก็ได้

การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกที่กล่าวไปทั้งสามแบบ แต่สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า Polymer bridging ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ตามทฤษฎีนี้ โมเลกุลของสารโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง ดังแสดงสมการที่ 2.12 ปฏิกริยาที่ 1 การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว อนุภาคดังกล่าวสามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ดังแสดงในปฏิกริยาที่ 2 การเชื่อมต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ทราบเท่าที่มีโพลีเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของโพลีเมอร์ไม่มีที่จะเกาะจับบนอนุภาคอื่น ปลายอิสระก็จะเกาะจับบนอนุภาคเดิม ดังแสดงในปฏิกริยาที่ 3 ทำให้เสียประโยชน์ 2 ประการ คือ ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่นและทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาค สามารถยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจะไม่มีปลายอิสระและที่ว่าง เรียกว่า อนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Destabilized particle) การใช้โพลีเมอร์มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ ดังแสดงในปฏิกริยาที่ 4 อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบที่มีเสถียรภาพ

การกวนน้ำแรงเกินไปหรือนานเกินไปก็ก่อผลเสียได้ เนื่องจากฟลอคที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็น ส่วนๆ ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 5 และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคอันเดิม ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 6 เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่อีก



รูปที่ 2.12 กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์

หลังจากทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และเกิดการจับตัวกันเป็นตะกอนแล้ว ตะกอนเหล่านั้นจะเคลื่อนที่มาสัมผัสกัน เกิดการเกาะรวมกัน เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

## 2.10 วัสดุเป่าสัมผัส (Seed)

ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ได้นำทรายแก้ว (Silica sand) และผลึก MAP ที่ได้จากการสังเคราะห์ มาใช้เป็นวัสดุเป่าสัมผัส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 1) ทรายแก้ว (Silica sand)

ทรายแก้ว คือ ทรายบริสุทธิ์ที่มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ มีเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) และสารอื่นๆ เจือปนเล็กน้อย แหล่งแร่ทรายแก้วได้จากการผุพังของหินทรายในยุคโบราณ แล้วถูกกระแสน้ำพัดพามาสะสมตัวอยู่ในแหล่งที่เกิด โครงสร้างของทรายแก้วอยู่ในระนาบแบบควออตซ์ (Quartz) เม็ดทรายมีขนาดเล็กเป็นเหลี่ยมและเหลี่ยมมน ทรายแก้วไม่มีส่วนประกอบของเหล็กออกไซด์ (ทรายแก้ว, 2009)



รูปที่ 2.13 ททรายแก้ว (Silica sand) (ททรายแก้ว, 2009)

ตารางที่ 2.13 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของททรายแก้ว  
(Mansarayและ Ghaly, 1998)

ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	ค่าประมาณ	หน่วย
ความหนาแน่น		
- ความหนาแน่นของททรายแก้ว	2660	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ความหนาแน่นรวมของดิน	1650	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ขนาดของททรายแก้ว		
- ขนาดสูงสุดของททรายแก้ว	850	ไมโครเมตร
- ขนาดกลางของททรายแก้ว	410	ไมโครเมตร
- ขนาดต่ำสุดของททรายแก้ว	120	ไมโครเมตร
องค์ประกอบทางเคมีของททรายแก้ว		
- ซิลิกาออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	98-99	เปอร์เซ็นต์
- ไททาเนียมออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> )	0.40	เปอร์เซ็นต์
- เหล็กออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.35	เปอร์เซ็นต์
- ลิเทียมออกไซด์ (Li <sub>2</sub> O)	0.30	เปอร์เซ็นต์
- อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.15	เปอร์เซ็นต์
- แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.10	เปอร์เซ็นต์
- แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.04	เปอร์เซ็นต์

## 2) ผลึก MAP

ผลึก MAP คือ ผลึกที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างแมกนีเซียม (Magnesium,  $Mg^{2+}$ ) แอมโมเนีย (Ammonium,  $NH_4^+$ ) และฟอสเฟต (Phosphate,  $PO_4^{3-}$ ) ซึ่งสูตรเคมี คือ  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  ทั้งนี้สมบัติทางเคมีของผลึก คือ น้ำหนักโมเลกุล 245.41 กรัมต่อโมล 1.711 กรัมต่อลูกบาศก์ ค่าคงที่การละลาย ( $K_{sp}$ ) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  $7.08 \times 10^{-14}$  ไมโครเมตร เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.10

### 2.11 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยเกี่ยวข้อง

Suzuki และคณะ(2002) ศึกษาการบำบัดฟอสเฟต แมกนีเซียม และแคลเซียมจากน้ำเสียฟาร์มสุกรผ่านการตกผลึกโดยเติมอากาศในระดับห้องปฏิบัติการและระดับแบบจำลองต้นแบบ (Pilot scale) ซึ่งในระดับห้องปฏิบัติการมีการเติมอากาศอย่างต่อเนื่องและแปรค่าพีเอช จากผลการทดลอง พบว่า ที่พีเอช 8.5 เกิดการตกผลึก MAP และแคลเซียมฟอสเฟต แล้วแปรค่าความเร็วในการเติมอากาศ ผลการทดลอง พบว่า ที่ความเร็วในการเติมอากาศ 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เวลาในการตกตะกอนมากกว่า 1 ชั่วโมง สามารถเกิดผลึกได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดลองแบบจำลองต้นแบบแปรค่าความเร็วในการเติมอากาศและระยะเวลาในการตกตะกอน โดยใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกร เติมอากาศอย่างต่อเนื่อง เติกระบบเป็นเวลา 50 วัน พบว่า ระยะเวลาที่น้ำเสียอยู่ในระบบ 4.1 ชั่วโมง เติมอากาศด้วยความเร็ว 26 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง สามารถบำบัดฟอสเฟต แมกนีเซียม และแคลเซียม ได้เท่ากับ 65 51 และ 34 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

Laridi และคณะ (2004) ศึกษาการบำบัดฟอสเฟตและแอมโมเนียในระดับห้องปฏิบัติการและระดับแบบจำลองต้นแบบ โดยการตกตะกอนผลึก MAP จากน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งในระดับห้องปฏิบัติการจะเติมแมกนีเซียมคลอไรด์ แล้วแปรค่าพีเอชในช่วง 7-11 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วแปรค่าอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต 1:1 1.2:1 และ 1.4:1 กวนผสมด้วยความเร็ว 165 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที ผลึกที่เกิดขึ้นจะนำมากรองผ่านกระดาษกรอง แล้วอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลอง พบว่า ที่พีเอช 8.5 สามารถบำบัดแอมโมเนียและฟอสเฟตได้ 17 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่พีเอชน้อยกว่า 9 จะเกิดผลึก MAP ส่วนในระดับแบบจำลองต้นแบบ ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง พบว่า ที่พีเอช 8.5 สามารถบำบัดแอมโมเนียและฟอสเฟตได้ 15 และ 99 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การเกิดผลึก MAP จะเกิดได้น้อยเมื่อมีของแข็งแขวนลอยปนอยู่ในน้ำเสีย

Ali และคณะ (2005) ศึกษาการละลายทางเคมีของผลึก MAP โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้เหมือนกับน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากแมกนีเซียมคลอไรด์และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่พีเอช 8 นำไปกรอง ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาการละลายทางเคมีของผลึก MAP ด้วยโปรแกรม gPROMS พบว่า ทั้งพีเอชและความเข้มข้นของการละลายแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต มีผลต่อการตกตะกอนผลึก MAP

Suzuki และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยการตกตะกอนผลึก MAP ในถังปฏิกรณ์ น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียจากฟาร์มสุกร พีเอช 8.5 เติมน้ำเติมอากาศอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในถังปฏิกรณ์จะมีวัสดุเป่าสัมผัส เพื่อให้ผลึก MAP เกาะกับวัสดุเป่าสัมผัส วัสดุเป่าสัมผัสที่นำมาใช้ในการทดลองมี 5 ตัวกลางคือ อะลูมิเนียม (Aluminum) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ทองแดง (Copper) พีวีซี (Polyvinyl chloride, PVC) และแผ่นอะคริลิก (Acrylic plates) ซึ่งการเกิดผลึก MAP จะเกิดผ่าน 2 กระบวนการคือ (1) การเกิดผลึก MAP และ (2) การแยกผลึก MAP โดยการตกตะกอน ผลการทดลอง พบว่า วัสดุเป่าสัมผัสที่ทำให้เกิดผลึก MAP บริสุทธิ์ 95 เปอร์เซ็นต์ คือ เหล็กกล้าไร้สนิม

El Diwani และคณะ (2007) ศึกษาผลของพีเอชที่เหมาะสมในการเกิดผลึก MAP ซึ่งศึกษา น้ำเสีย 2 ชนิด คือ น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตและแอมโมเนียมไนเตรดในอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต ( $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ ) เท่ากับ 1:1:1 และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ในอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.6:0.6:1 ทำการแปรค่าพีเอชในช่วง 7-11 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กวนผสมเป็นเวลา 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 10 นาที ผลการทดลอง พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP ของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม คือ 8.6 และ 9.6 ตามลำดับ

Le Corre และคณะ (2007) ศึกษาจลนศาสตร์ (Kinetics) การตกตะกอนผลึก MAP ในระดับห้องปฏิบัติการและระดับแบบจำลองต้นแบบ โดยศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียม ซึ่งน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:2:2 ที่อุณหภูมิห้อง ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 9 ผลการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

และระดับแบบจำลองต้นแบบ พบว่า จลนศาสตร์เป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 และความเข้มข้นของแมกนีเซียมมีผลต่อการตกตะกอน MAP

Mavinic และคณะ (2007) ศึกษาการบำบัดฟอสฟอรัสจากถังย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของระบบการทดลองแบบจำลองต้นแบบในการตกตะกอนผลึก MAP โดยการทดลองเป็นแบบที่ละเท (Batch reactor) น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากถังย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน แปรค่าพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลอง พบว่า ที่ค่าพีเอชมากกว่า 8 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และสามารถตกตะกอนผลึก MAP ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า 91 เปอร์เซ็นต์

Zhao และคณะ (2008) ศึกษาผลของอัตราส่วนโมลระหว่างแอมโมเนียต่อฟอสเฟตในการตกตะกอนผลึก MAP และอัตราการบำบัดฟอสฟอรัส โดยทำการทดลองแบบที่ละเท น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ และแอมโมเนียคลอไรด์ โดยให้น้ำเสียสังเคราะห์มีฟอสเฟต 60 มิลลิลิตรต่อลิตร และระยะเวลาที่น้ำเสียอยู่ในระบบ 30 นาที แปรค่าพีเอช 9-10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแปรค่าอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต 1:1-6:1 ผลการทดลอง พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP ในอัตราส่วนโมล 1:1:1 คือ ค่าพีเอชเท่ากับ 10 ซึ่งมีอัตราการบำบัดฟอสฟอรัสได้ 51.6 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการแปรค่าอัตราส่วนโมลระหว่างแอมโมเนียต่อฟอสเฟตที่ค่าพีเอช เท่ากับ 10 พบว่า อัตราส่วนโมลระหว่างแอมโมเนียต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมเท่ากับ 6:1 โดยมีอัตราการบำบัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 84.6 เปอร์เซ็นต์

Hoilman (2009) ศึกษาการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียปศุสัตว์ โดยทำการทดลองแบบที่ละเท เมื่อใช้น้ำเสียสังเคราะห์ กำหนดอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1 แปรค่าพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า พีเอชที่เหมาะสม เท่ากับ 8.5 และระยะเวลาที่น้ำเสียอยู่ในระบบนาน 30 นาที สามารถบำบัดฟอสเฟตได้ จากนั้นนำสภาวะที่เหมาะสมมาใช้ในการทดลองแบบจำลองต้นแบบเมื่อใช้น้ำเสียจริงจากฟาร์มปศุสัตว์และเติมแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) เนื่องจากในน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์มีปริมาณแมกนีเซียมน้อย จึงเติมเพื่อให้มีปริมาณแมกนีเซียมที่เพียงพอในการทำปฏิกิริยา และเดินระบบอย่างต่อเนื่อง พบว่า สามารถบำบัดฟอสเฟตได้ 60-70 เปอร์เซ็นต์

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. พีเอชมิเตอร์ รุ่น UB-10 บริษัท Denver Instrument
2. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) รุ่น DRAGON 204 บริษัท METTLER TOLEDO
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง) รุ่น Adventurer บริษัท OHAUS
4. กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร
5. เดซิเคเตอร์
6. ตู้อบ ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
7. เครื่องทดสอบการตะกอน (Jar test) รุ่น JLT6 บริษัท VELP SCIENTIFICA
8. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ รุ่น D-7912F บริษัท KF NEUBERGER
9. กรวยบุชเนอร์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 90 และ 110 มิลลิเมตร
10. กระดาษกรอง No.4 เส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร และ No.1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร ยี่ห้อ Whatman
11. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) รุ่น Avanta ยี่ห้อ GBC
12. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น Helios ยี่ห้อ Thermo Electron Corporation
13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Scanning Electron Microscope with EDS Attachment, SEM-EDS) รุ่น JSM-5800LV และ Link ISIS Series 300 ยี่ห้อ JEOL
14. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) รุ่น Germany Model D8 Advance ยี่ห้อ Bruker AXS
15. วัสดุเป่าลมฝัด (Seed) 2 ชนิด ได้แก่ ตะกอนผลึก MAP และทรายแก้ว
16. เครื่องแก้วสำหรับการทดลอง



### 3.2 สารเคมี

1. แมกนีเซียมคลอไรด์ 90-102% W/W ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) A.R. Grade (ยี่ห้อ Carlo Erba, USA)
2. แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 98% W/W ( $NH_4H_2PO_4$ ) A.R. Grade (ยี่ห้อ Carlo Erba, USA)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ 97% W/W (NaOH) A.R. Grade (ยี่ห้อ Carlo Erba, USA)
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
5. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $NaH_2PO_4$ ) A.R. Grade (ยี่ห้อ Quality Reagent Chemical Product)

### 3.3 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ สถานที่ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย อาคารสีภาควิชา (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมเคมี และ วิศวกรรมโลหการ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**การทดลองที่ 1** ศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าสัมผัสด ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอนคือ

ตอนที่ 1 ศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ แปรค่าพีเอชเป็น 7-10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

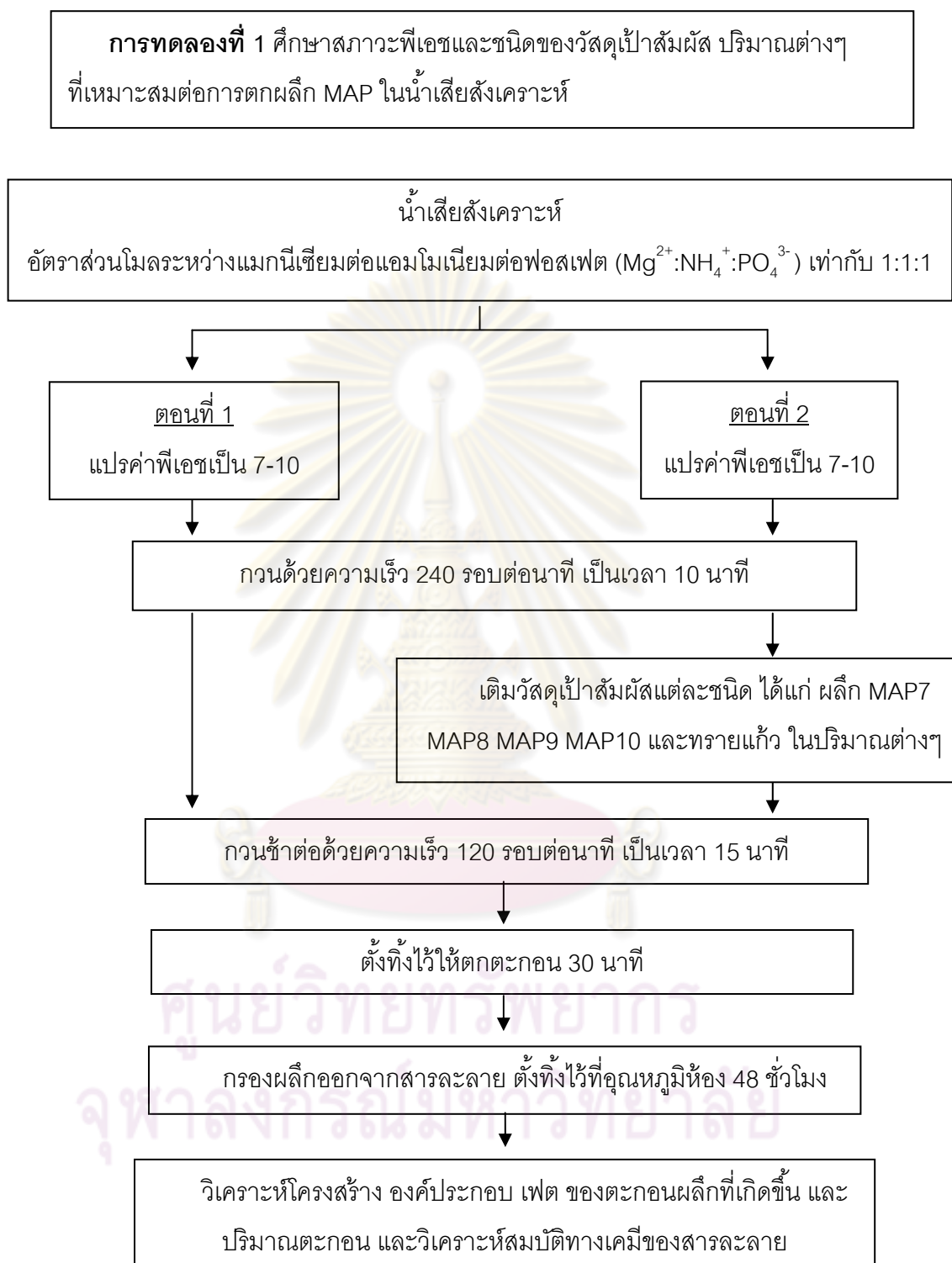
ตอนที่ 2 ศึกษาชนิดของวัสดุเป่าสัมผัสด ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์

**การทดลองที่ 2** ศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าสัมผัสด ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอนคือ

ตอนที่ 1 ศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร แปรค่าพีเอชตามการทดลองที่ 1 ตอนที่ 1

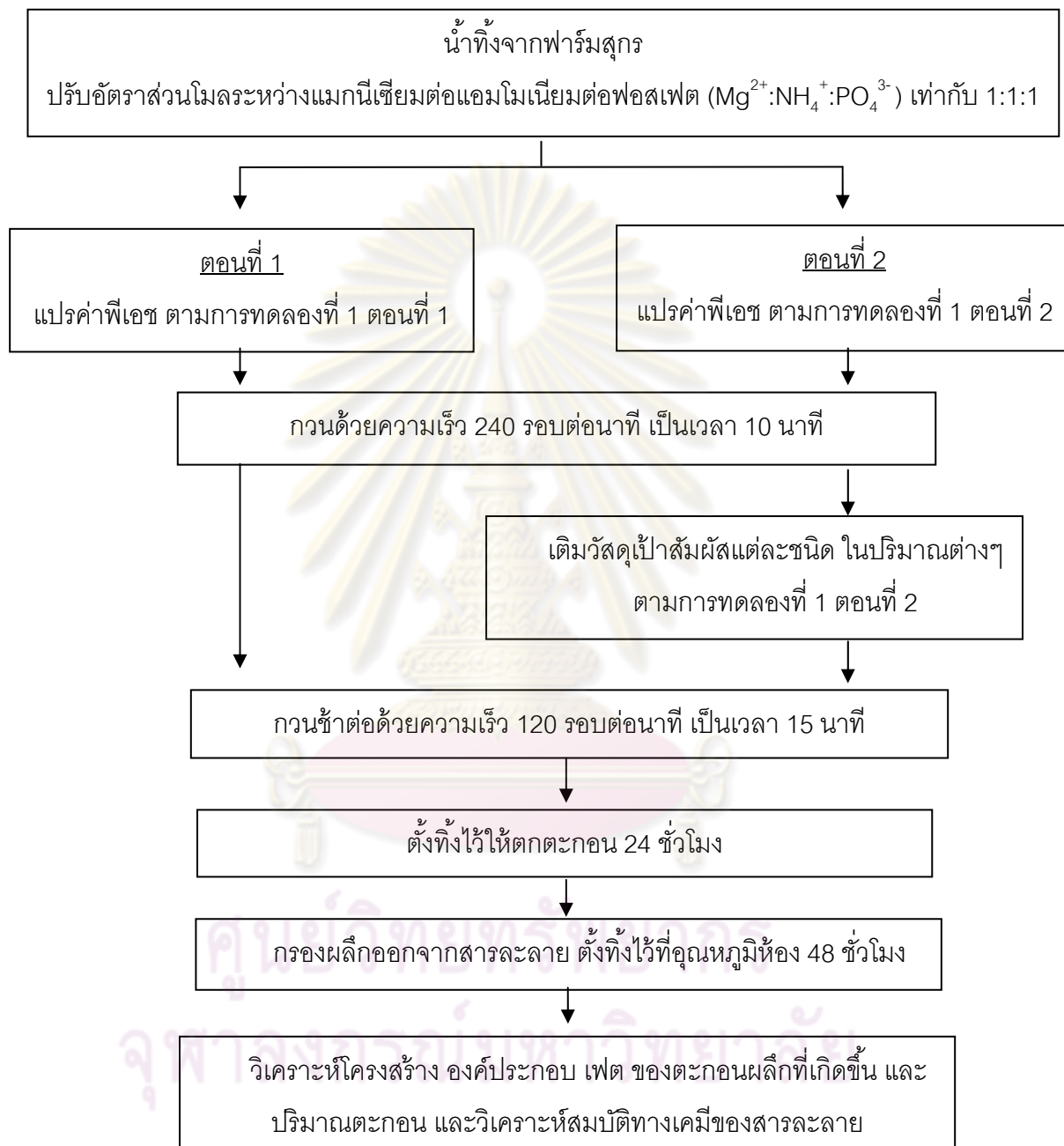
ตอนที่ 2 ศึกษาชนิดของวัสดุเป่าสัมผัสด ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการตกผลึก AMP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ตามการทดลองที่ 1 ตอนที่ 2

การทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังแผนผังการทดลองในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 1

**การทดลองที่ 2** ศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัด ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร



รูปที่ 3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองที่ 2

### 3.4 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง แบ่งได้ 2 ประเภท

#### 3.4.1 น้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมจากแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $NH_4H_2PO_4$ ) ผสมสารละลายเข้าด้วยกัน ปรับปริมาตรจนครบ 1 ลิตร โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นมีอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต ( $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ ) เท่ากับ 1:1:1

#### 3.4.2 น้ำเสียจากฟาร์มสุกร

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาจากน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบบ่อหมักข้าวแบบราง และบ่อยูเอเอสบีของฟาร์มขนาดกลาง (MC-UASB)



บ่อที่เก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง

**รูปที่ 3.3** จุดเก็บน้ำจากบ่อพักน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบบ่อหมักข้าวแบบราง และบ่อยูเอเอสบีของฟาร์มขนาดกลาง (MC-UASB)

การเก็บน้ำทิ้งจะเก็บตัวอย่างน้ำแบบผสมรวม (Composite sampling) ทั้งหมด 7 จุด คือ ด้านบนซ้าย-ขวา ตรงกลาง และด้านล่างซ้าย-ขวา และนำน้ำทั้ง 7 จุดมาผสมให้เข้ากัน ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง โดยทำการวัดค่าพีเอชและอุณหภูมิที่ภาคสนาม

น้ำทิ้งที่เก็บมาได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน

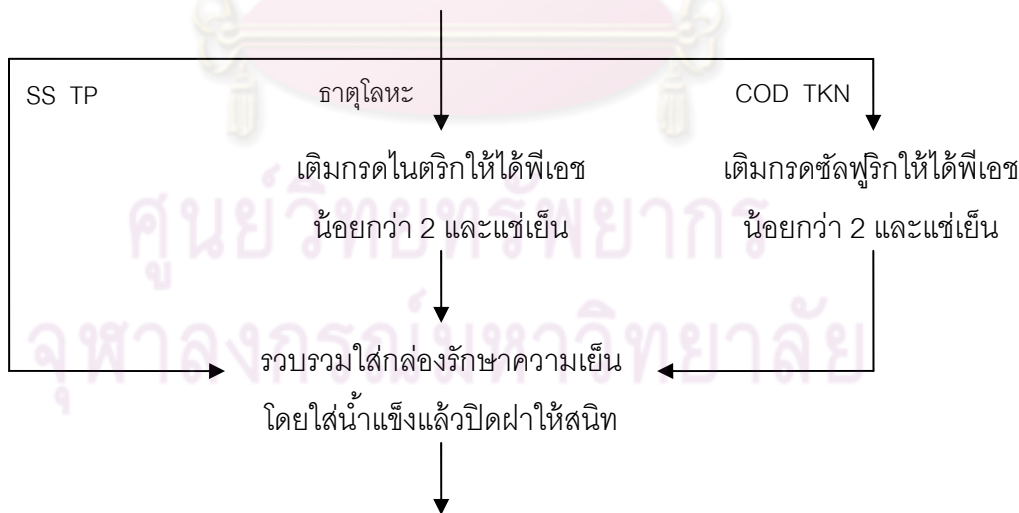
- ส่วนที่ 1 วิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus, TP) โดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งใส่ในขวดพลาสติกแช่เย็น 4 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดตามวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำดีและน้ำเสีย (APHA, AWWA and WEF, 2005)

- ส่วนที่ 2 วิเคราะห์ธาตุโลหะ เช่น แคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น โดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งใส่ในขวดพลาสติก เติมนกรดไนตริกให้ได้พีเอชน้อยกว่า 2 และแช่เย็น 4 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ธาตุโลหะด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (AAS)

- ส่วนที่ 3 วิเคราะห์ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen, TKN) โดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งใส่ในขวดพลาสติก เติมนกรดซัลฟูริกให้ได้พีเอชน้อยกว่า 2 และแช่เย็น 4 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและซีโอดีตามวิธีมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำดีและน้ำเสีย (APHA, AWWA and WEF, 2005)

- ส่วนที่ 4 เก็บน้ำทิ้งใส่ในขวดพลาสติก นำมาทำการทดลองในห้องปฏิบัติการสรุปรายละเอียดการเก็บตัวอย่างน้ำดังรูปที่ 3.4

น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ CD-UASB



นำน้ำทิ้งมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.1

รูปที่ 3.4 แผนผังและรายละเอียดการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

ตารางที่ 3.1 วิธีการรักษาสภาพตัวอย่างน้ำทิ้งและวิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำดีและน้ำเสีย (APHA, AWWA and WEF, 2005)

พารามิเตอร์	ภาชนะ บรรจุ	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	การรักษา สภาพน้ำ	ระยะเวลา ที่เก็บไว้ได้	วิธีวิเคราะห์
1. พีเอช (pH)	-	-	ตรวจวัดใน	-	- พีเอชมิเตอร์
2. อุณหภูมิ (Temperature)	-	-	ภาคสนาม	-	- เครื่องวัดอุณหภูมิ
3. ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS)	ขวดพลาสติก (PE)	1,000	แช่เย็น 4 °ซ	48 ชั่วโมง	- กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว
4. ซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)	ขวดพลาสติก (HDPE)	1,000	เติมกรด H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ให้ pH < 2 แช่เย็น 4 °ซ	28 วัน	- วิธีรีฟลักแบบปิด
5. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen, TKN)					- วิธีแมคโครเจลดาร์ล
7. ธาตุโลหะ	ขวดพลาสติก (HDPE)	1,000	เติมกรด HNO <sub>3</sub> ให้ pH < 2 แช่เย็น 4 °ซ	6 เดือน	- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์
8. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphate, TP)	-	-	-	-	- วิธีการเทียบสี

### 3.5 วัสดุเป่าสัมผัสนำใช้ในการทดลอง

วัสดุเป่าสัมผัสนำ 2 ชนิด ได้แก่

- 1) ฝล็ก MAP7 MAP8 MAP9 และ MAP10
- 2) ทราญแก้ว กำหนดให้มีขนาด 150-300 ไมโครเมตร (Battistoni และคณะ, 2001)

### 3.6 การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองคือ

#### การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าสัมผัสนำ ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแปรค่าพีเอชและเติมวัสดุเป่าสัมผัสนำต่างชนิดกัน ในปริมาณที่ต่างๆ กัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอนคือ

#### ตอนที่ 1 ศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 แปรค่าพีเอชเป็น 7-10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
2. ผสมให้เข้ากัน โดยกวนด้วยความเร็ว 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และกวนช้าต่อด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที
3. กรองผลึกออกจากสารละลายด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ฝล็กที่กรองได้นำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ เฟสของตะกอนผลึกที่เกิดขึ้น และปริมาณตะกอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) และเครื่องชั่ง ตามลำดับ
5. นำสารละลายหลังจากแยกตะกอนผลึก MAP ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช ซีไอดี ของแข็งแขวนลอย ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และธาตุโลหะ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งหลังตกตะกอนผลึก MAP

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1 ตอนที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. พีเอช	- ปรับพีเอชเป็น 7-10
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของน้ำเสีย	- น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1
2. ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม - กวนเร็ว - กวนช้า	- 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที - 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
3. เวลาในการตกตะกอน	- 30 นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้วัด
1. ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และเฟส ของผลึก MAP - ลักษณะโครงสร้างของผลึก - องค์ประกอบของผลึก - เฟสของผลึก	- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเทคนิคจุลวิเคราะห์ (SEM-EDS) - เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)
2. ปริมาณของตะกอน	- เครื่องชั่ง
3. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งหลังตกตะกอน MAP	- ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด
4. ธาตุโลหะ	- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (AAS)



ตอนที่ 2 ศึกษาชนิดของวัสดุเป่าสัมผัสด ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดผลึก MAP

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 แล้วปรับพีเอช 7-10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
2. ผสมให้เข้ากัน โดยกวนด้วยความเร็ว 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
3. เติมวัสดุเป่าสัมผัสดแต่ละชนิด ได้แก่ ผลึก MAP7 MAP8 MAP9 MAP10 และทรายแก้ว โดยแปรค่าน้ำหนักของวัสดุเป่าสัมผัสด 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 กรัม แล้วกวนเข้าต่อด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที
4. กรองผลึกออกจากสารละลายด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ผลึกที่กรองได้นำไป ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ เฟตของตะกอนผลึกที่เกิดขึ้น และปริมาณ ตะกอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) และเครื่องชั่ง ตามลำดับ
6. นำสารละลายหลังจากแยกตะกอนผลึก MAP ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช ซีไอดี ของแข็งแขวนลอย ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และธาตุโลหะ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งหลังตกตะกอนผลึก MAP

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1 ตอนที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. พีเอช	- ปรับพีเอชเป็น 7-10
2. ชนิดของตัวกลาง	- ผลึก MAP7 MAP8 MAP9 MAP10 และทรายแก้ว
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของน้ำเสีย	- น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1
2. ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม	- 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที - 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
3. เวลาในการตกตะกอน	- 30 นาที
4. ปริมาณของวัสดุเป่าสัมผัสด	- 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 กรัม
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้วัด
1. ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และเฟส ของผลึก MAP	- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเทคนิคจุลวิเคราะห์ (SEM-EDS) - เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)
2. ปริมาณของตะกอน	- เครื่องชั่ง
3. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งหลังตกตะกอน MAP	- ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด
4. ธาตุโลหะ	- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (AAS)

## การทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าสัมผัส ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยแปรค่าพีเอชและเติมวัสดุเป่าสัมผัสต่างชนิดกัน ในปริมาณที่ต่างๆ กัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอนคือ

ตอนที่ 1 ศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ด้วยสารละลายไฮเดียม-ไฮดรอกไซด์

1. นำน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ปรับพีเอช ตามการทดลองที่ 1 ตอนที่ 1 และปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารให้เหมาะสม ( $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1:1:1) โดยเติมแมกนีเซียมคลอไรด์ และไฮเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
2. ผสมให้เข้ากัน โดยกวนด้วยความเร็ว 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และกวนช้าต่อด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง
3. กรองผลึกออกจากสารละลายด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ผลึกที่กรองได้นำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ เฟตของตะกอนผลึกที่เกิดขึ้น และปริมาณตะกอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) และเครื่องชั่ง ตามลำดับ
5. นำสารละลายหลังจากแยกตะกอนผลึก MAP ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช ซีไอดี ของแข็งแขวนลอย ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และธาตุโลหะ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งหลังตกตะกอนผลึก MAP

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2 ตอนที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. พีเอช	- แปรค่าพีเอชตามการทดลองที่ 1 ตอนที่ 1
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของน้ำเสีย	- น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ปรับอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1
2. ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม	- 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที - 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
3. เวลาในการตกตะกอน	- 24 ชั่วโมง
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้วัด
1. ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และเฟส ของผลึก MAP	- ลักษณะโครงสร้างของผลึก - องค์ประกอบของผลึก - เฟสของผลึก
2. ปริมาณของตะกอน	- เครื่องชั่ง
3. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งหลังตกตะกอน MAP	- ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด
4. ธาตุโลหะ	- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (AAS)

ตอนที่ 2 ศึกษาชนิดของวัสดุโป้สั่มฝัสด ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

1. นำน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารให้เหมาะสม ( $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1:1:1) แล้วปรับพีเอชตามการทดลองที่ 1 ตอนที่ 2
2. ผสมให้เข้ากัน โดยกวนด้วยความเร็ว 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
3. เติมวัสดุโป้สั่มฝัสดแต่ละชนิด ได้แก่ ผลึก MAP7 MAP8 MAP9 MAP10 และทรายแก้ว โดยเติมในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการทดลองที่ 1 ตอนที่ 2 แล้วกวนช้าต่อด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง
4. กรองผลึกออกจากสารละลายด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ผลึกที่กรองได้นำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ เฟสของตะกอนผลึกที่เกิดขึ้น และปริมาณตะกอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) และเครื่องชั่ง ตามลำดับ
6. นำสารละลายหลังจากแยกตะกอนผลึก MAP ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช ซีไอดี ของแข็งแขวนลอย ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และธาตุโลหะ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งหลังตกตะกอนผลึก MAP

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2 ตอนที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของตัวกลาง	- ผลึก MAP7 MAP8 MAP9 MAP10 และทรายแก้ว
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของน้ำเสีย	- น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ปรับอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1
2. ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม	- 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที - 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
- กวนเร็ว	
- กวนช้า	
3. เวลาในการตกตะกอน	- 24 ชั่วโมง
4. ค่าพีเอช	- ผลจากการทดลองที่ 1 ตอนที่ 2
5. ปริมาณของวัสดุเป่าส้มผัด	- ผลจากการทดลองที่ 1 ตอนที่ 2
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้วัด
1. ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และเฟส ของผลึก MAP	- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเทคนิคจุลวิเคราะห์ (SEM-EDS) - เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)
- ลักษณะโครงสร้างของผลึก	
- องค์ประกอบของผลึก	
- เฟสของผลึก	
2. ปริมาณของตะกอน	- เครื่องชั่ง
3. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งหลังตกตะกอน MAP	- ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด
4. ธาตุโลหะ	- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (AAS)

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ที่วัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังผ่านการตกตะกอนผลึก MAP  
(APHA, AWWA and WEF, 2005)

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
1. พีเอช	พีเอชมิเตอร์
2. ซีไอดี (COD)	วิธีรีฟลักแบบปิด
3. ของแข็งแขวนลอย (SS)	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว
4. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)	วิธีแมคโครเจลดาห์ล
6. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	วิธีการเทียบสี
7. โลหะหนัก	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์
8. ผลึก MAP	
- ลักษณะโครงสร้างของผลึก	- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน
- องค์ประกอบของผลึก	- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน
- เพดของผลึก	เทคนิคจุลวิเคราะห์ - เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัสที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP จากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

**การทดลองที่ 1** ศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัส ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอนคือ

ตอนที่ 1 ศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ แปรค่าพีเอชเป็น 7-10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตอนที่ 2 ศึกษาชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัส ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์

**การทดลองที่ 2** ศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัส ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน คือ

ตอนที่ 1 ศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร แปรค่าพีเอช ตามการทดลองที่ 1 ตอนที่ 1

ตอนที่ 2 ศึกษาชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัส ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ตามการทดลองที่ 1 ตอนที่ 2

จากการทดลองที่ 1 และ 2 ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ซึ่งต้องทำการปรับให้มีอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 1:1:1 ซึ่งได้แสดงวิธีการคำนวณการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ดังนี้



## 1. การคำนวณการเตรียมน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร พบว่า น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียม เท่ากับ

- แมกนีเซียม เท่ากับ 68.73 มิลลิกรัมต่อลิตร
- แอมโมเนียมไนโตรเจน เท่ากับ 286.3 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ฟอสฟอรัส เท่ากับ 74.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

กำหนดให้

- น้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) เท่ากับ 24.305 g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน (N) เท่ากับ 14.0067 g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของฟอสฟอรัส (P) เท่ากับ 30.973 g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) เท่ากับ 203.31 g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $NaH_2PO_4$ ) เท่ากับ 120 g/mol

1) คำนวณความเข้มข้นในหน่วยโมล (M)

$$[Mg^{2+}] = \frac{68.733 \text{ mg Mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol Mg}}{24.305 \text{ g Mg}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.0028 \text{ M}$$

$$[NH_4^+ - N] = \frac{286.3 \text{ mg N}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol N}}{14.0067 \text{ g N}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.0204 \text{ M}$$

$$[PO_4^{3-} - P] = \frac{74.25 \text{ mg P}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol P}}{74.25 \text{ mg P}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.0024 \text{ M}$$

อัตราส่วน  $Mg^{2+} : NH_4^+ - N : PO_4^{3-} - P = 0.0028 : 0.0204 : 0.0024 \text{ M}$

ต้องการอัตราส่วน  $Mg^{2+} : NH_4^+ - N : PO_4^{3-} - P = 1 : 1 : 1 \text{ M}$

ดังนั้น ต้องเติม  $Mg^{2+}$  และ  $PO_4^{3-} - P$

$$- Mg^{2+} \text{ ที่เติม} = 0.0204 - 0.0028 = 0.0176 \text{ M}$$

ต้องเติม  $Mg^{2+}$  เท่ากับ 0.0176 M

$$- PO_4^{3-} - P \text{ ที่เติม} = 0.0204 - 0.0024 = 0.0180 \text{ M}$$

ต้องเติม  $PO_4^{3-} - P$  เท่ากับ 0.0180 M

การเติมแมกนีเซียมและฟอสเฟต เติมในรูปของแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) และโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ )

2) การเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ) ความเข้มข้น 0.0176 M

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุล (MW) ของ } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 24.31 + (2 \times 35.5) + (6 \times 18) \\ &= 203.31 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุลของ } \text{MgCl}_2 &= 203.31 - (6 \times 18) \\ &= 95.31 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ) ความเข้มข้น 0.0176 M

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0176 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ g_{(\text{MgCl}_2)} &= 1.6775 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 1.6775 กรัม

$$\begin{aligned} \text{แต่ } \text{MgCl}_2 \quad 95.31 \text{ g} &\quad \text{ได้จาก } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \quad 203.31 \text{ g} \\ \text{ถ้าต้องการ } \text{MgCl}_2 \quad 1.6775 \text{ g} &\quad \text{ต้องชั่ง } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (1.6775 \text{ g})}{95.31 \text{ g}} \\ &= 3.5783 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เท่ากับ 3.5783 กรัม

3) การเตรียมสารละลายโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) ความเข้มข้น

0.0180 M

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของ } \text{NaH}_2\text{PO}_4 = 120 \text{ g/mol}$$

ต้องการเตรียมสารละลายโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.0180 M

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{120 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0180 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ \text{g}_{(\text{NaH}_2\text{PO}_4)} &= 2.1600 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เท่ากับ 2.1600 กรัม

จากการคำนวณอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 0.0028 : 0.0204 : 0.0024 M ซึ่งจากการคำนวณอัตราส่วนโมลในน้ำที่จากฟาร์มสุกร จึงนำมาเตรียมในน้ำเสียสังเคราะห์ จากข้อมูล พบว่า ต้องเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ 20 mM เนื่องจากการปรับอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 1:1:1 ซึ่งใช้แอมโมเนียมไนโตรเจนเป็นหลัก ดังนั้นในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์จึงแปรค่าตามแอมโมเนียมไนโตรเจน

## 2. การคำนวณการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

1) การเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ) ความเข้มข้น 20 mM

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุล (MW) ของ } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &= 24.31 + (2 \times 35.5) + (6 \times 18) \\ &= 203.31 \text{ g/mol} \\ \text{น้ำหนักโมเลกุลของ } \text{MgCl}_2 &= 203.31 - (6 \times 18) \\ &= 95.31 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2$ ) ความเข้มข้น 20 mM

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} &= \frac{(20 \times 10^{-3} \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ g_{(\text{MgCl}_2)} &= 1.9062 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 1.9062 กรัม

$$\begin{aligned} \text{แต่ } \text{MgCl}_2 \quad 95.31 \text{ g} &\text{ ได้จาก } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \quad 203.31 \text{ g} \\ \text{ถ้าต้องการ } \text{MgCl}_2 \quad 1.9062 \text{ g} &\text{ ต้องชั่ง } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (1.9062 \text{ g})}{95.31 \text{ g}} \\ &= 4.0662 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) เท่ากับ 4.0662 กรัม

2) การเตรียมสารละลายแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) ความเข้มข้น 20 mM

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุลของ } \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 &= 14.01 + (6 \times 1.008) + 30.97 + (4 \times 16) \\ &= 115.03 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{115.03 \text{ g/mol}} &= \frac{(20 \times 10^{-3} \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ \text{g} &= 2.3006 \text{ g} \end{aligned}$$

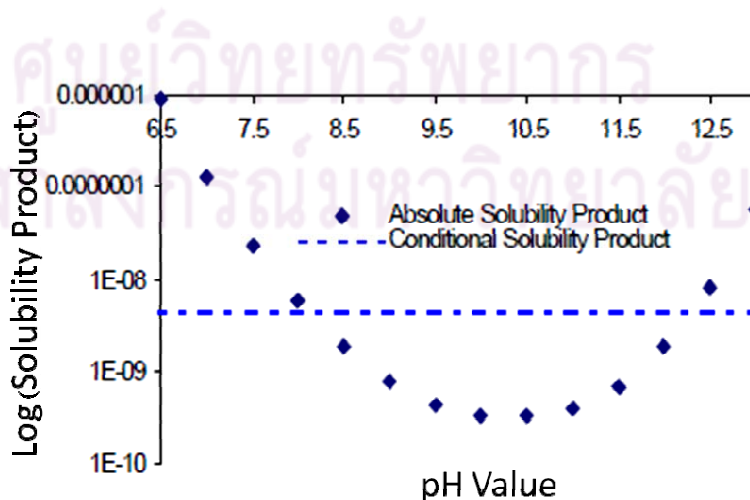
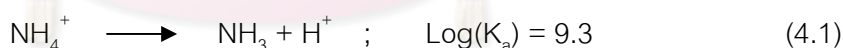
ดังนั้น ต้องชั่งแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เท่ากับ 2.3006 กรัม

#### 4.1 การทดลองที่ 1    ศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าสัมผัส ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์

##### 4.1.1 ผลการศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองนี้จะทำการแปรค่าพีเอชในช่วงพีเอช 7-10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อแปรค่าพีเอชสูงขึ้น ทำให้เกิดการตกตะกอนเพิ่มขึ้น คือ 2.14 3.96 4.43 4.66 4.71 4.87 และ 4.88 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 การที่ปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับการละลายน้ำของตะกอนผลึก MAP (Solubility diagram) (Ali และคณะ, 2005) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 คือ เมื่อค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้น (พีเอช 8.1-10.5) ตะกอนผลึก MAP ละลายน้ำได้ลดลง

เมื่อนำสารละลายหลังจากแยกตะกอน ไปวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต เกิดการรวมเป็นตะกอน และตกตะกอนแยกออกมา ทำให้สารละลายหลังจากแยกตะกอน พบว่ามีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสลดลง ตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพีเอชสูงขึ้นแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) จะเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจน ( $\text{NH}_3$ ) ระเหยขึ้นสู่อากาศ ดังนั้นประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนจึงเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลของค่าพีเอชต่อการละลายของผลึก MAP (Ali และคณะ, 2005)

ดังนั้นสภาวะพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน คือ ช่วงพีเอช 8-9 ซึ่งปริมาณตะกอนเท่ากับ 4.4-4.8 กรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เท่ากับ 83-91 และ 73-87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การที่ช่วงพีเอช 8-9 เหมาะสมต่อการตกตะกอน เนื่องจากที่พีเอชมากกว่า 9 สามารถเกิดการรวมตัวของไอออนชนิดอื่นๆ ในสารละลายได้ดี ทำให้เกิดผลึกชนิดอื่นนอกจากผลึก MAP เมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ขนาดกลางและขนาดเล็ก กำหนดให้พีเอชอยู่ในช่วง 5.5-9.0 และที่พีเอชมากกว่า 9 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส มีปริมาณไม่แตกต่างกัน

**ตารางที่ 4.1** ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส  
ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

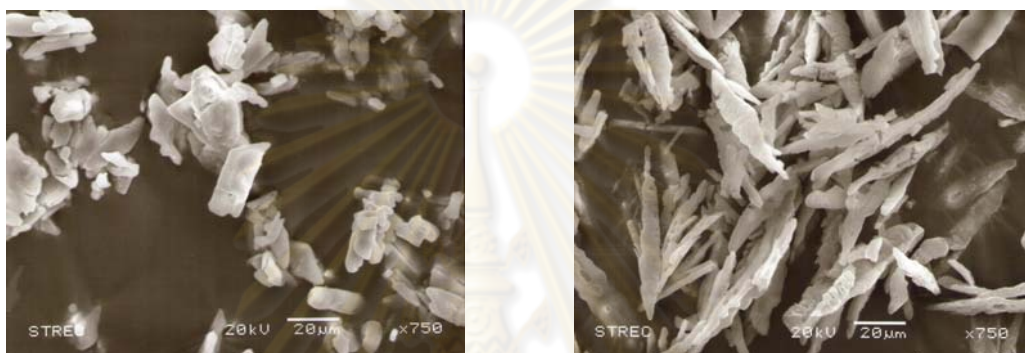
พีเอช	ปริมาณตะกอน (กรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	
		ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส
7.0	2.14 ± 0.58	50.36 ± 0.58	36.32 ± 0.12
7.5	3.96 ± 0.15	74.85 ± 0.29	53.69 ± 0.49
8.0	4.43 ± 0.06	83.51 ± 0.50	73.98 ± 0.16
8.5	4.66 ± 0.04	87.84 ± 0.29	83.54 ± 0.34
9.0	4.71 ± 0.04	90.84 ± 0.29	86.33 ± 0.42
9.5	4.87 ± 0.19	93.50 ± 0.50	87.13 ± 0.08
10.0	4.88 ± 0.12	94.67 ± 0.29	87.95 ± 0.25

ทั้งนี้จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และเฟสของตะกอนผลึก MAP ที่เกิดขึ้น มีดังนี้

ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของตะกอนผลึก MAP ที่ช่วงพีเอช 7-10 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) พบว่า ผลึกที่ได้มีลักษณะสอดคล้องกับผลึกของผลึก MAP เป็นตะกอนของแข็งสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ความยาวผลึกตั้งแต่ 10-60 ไมโครเมตร รูปทรงของผลึกที่ได้มี 2 แบบ คือ รูปทรงแบบแท่ง (Rod-like crystals) และรูปทรงผลึกแบบกิ่งไม้ (Dendritic crystals) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสอดคล้องกับผลึก MAP ของ Babic-Ivancic และคณะ (2002) ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.2 ตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10



(ก) รูปทรงผลึกแบบแท่ง

(ข) รูปทรงผลึกแบบกิ่งไม้

รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10 วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ที่กำลังขยายภาพ 750 เท่า



(ก) รูปทรงผลึกแบบแท่ง



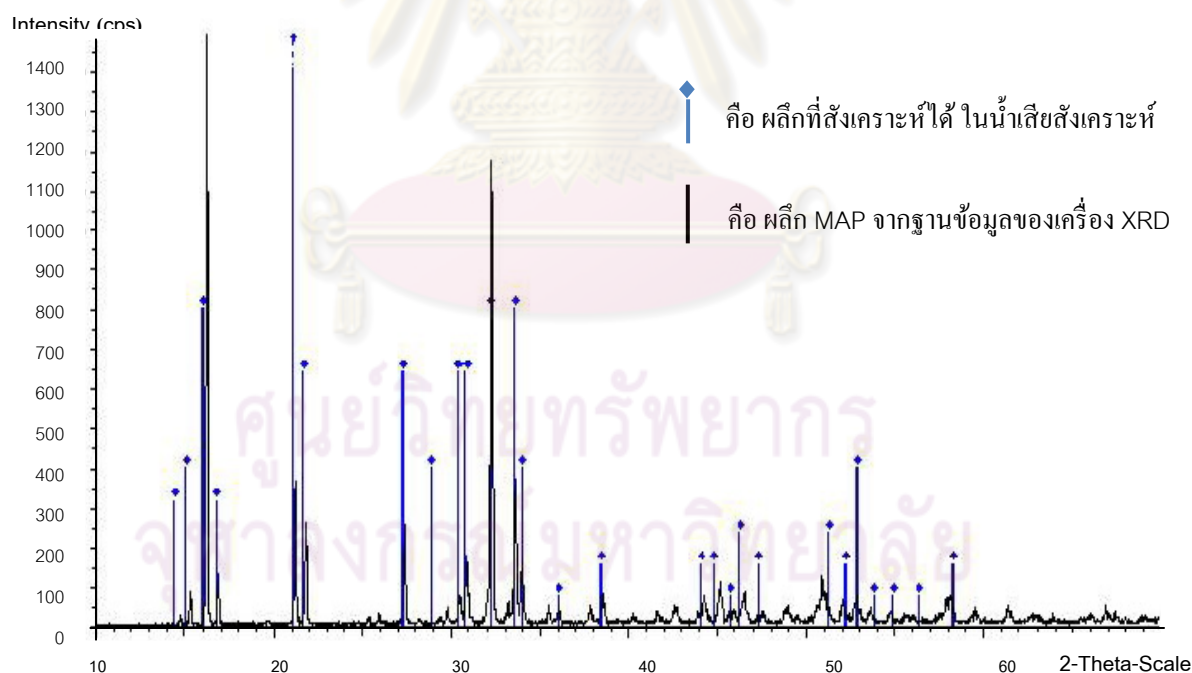
(ข) รูปทรงผลึกแบบกิ่งไม้

รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ (Babic-Ivancic และคณะ, 2002) ที่กำลังขยายภาพ 150 เท่า

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกที่สังเคราะห์ได้ ที่พีเอช 7-10 โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเทคนิคจุลวิเคราะห์ (SEM-EDS) พบว่า ผลึกดังกล่าวประกอบด้วยธาตุคาร์บอน 26-42 เปอร์เซ็นต์ ธาตุไนโตรเจน 7-12 เปอร์เซ็นต์ ธาตุออกซิเจน 27-36 เปอร์เซ็นต์ ธาตุแมกนีเซียม 6-13 เปอร์เซ็นต์ และธาตุฟอสฟอรัส 7-14 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลข้างต้น พบว่าอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 1:1:1 ซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาเคมีของการเกิดตะกอนผลึก MAP คือ อัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ดังแสดงในสมการที่ 4.2

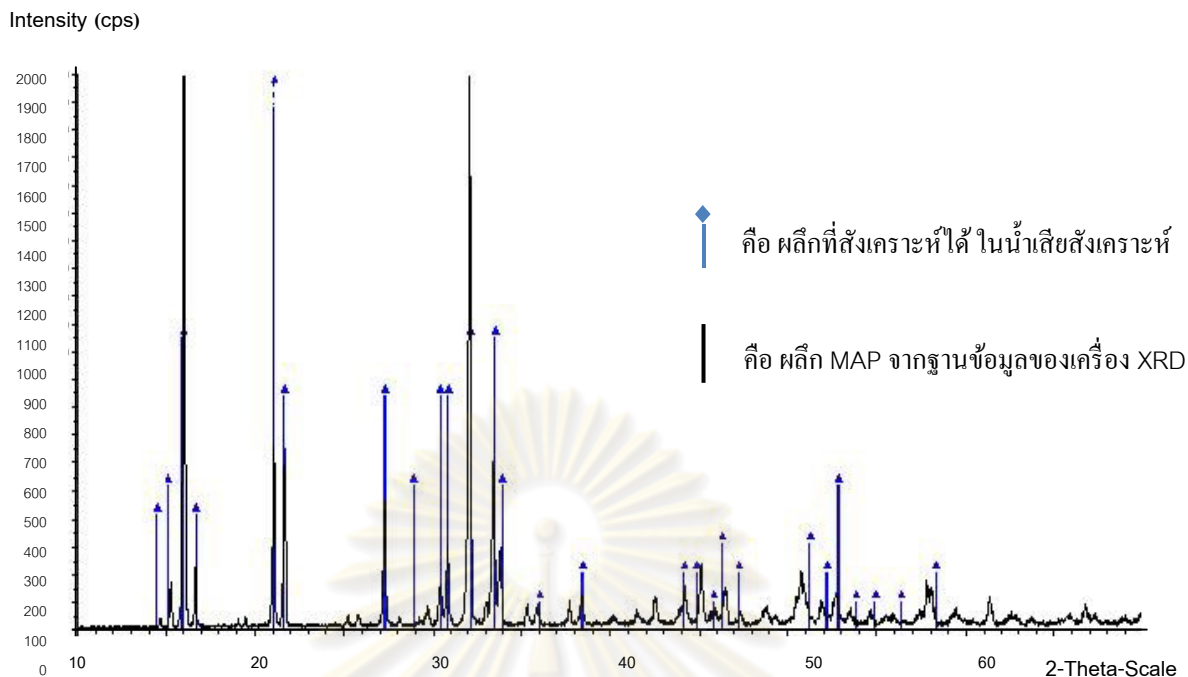


การวิเคราะห์เฟสของตะกอนผลึก MAP ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) พบว่า ผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำเสียสังเคราะห์มีเฟสตรงกับผลึก MAP จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ทั้งรูปทรงแบบแท่ง (Rod-like crystals) และรูปทรงแบบกิ่งไม้ (Dendritic crystals) (Babic-Ivancic และคณะ, 2002) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก)-(ข)



(ก) รูปทรงผลึกแบบแท่ง





(ข) รูปทรงผลึกแบบกึ่งไม้

**รูปที่ 4.5** ดิฟเฟกโทแกรมเปรียบเทียบเฟสของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำเสียดังเคราะห์กับผลึก MAP จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตะกอนผลึกที่เกิดขึ้นคือ ผลึก MAP มีสูตรโครงสร้างคือ  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  และองค์ประกอบของผลึก คือ ไอออนของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต

4.1.2 ผลการศึกษาชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัสด ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการตกผลึก MAP ในน้ำเสียดังเคราะห์

การทดลองนี้ศึกษาชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัสด 2 ชนิด คือ ผลึก MAP (MAP7 MAP8 MAP9 MAP10) และทรายแก้ว เป็นวัสดุเป่าส้มฝัสด ปริมาณต่างๆ กัน แล้วแปรค่าพีเอชในช่วงพีเอช 7-10 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าส้มฝัสด พบว่า การเติมวัสดุเป่าส้มฝัสดมีแนวโน้มในการตกตะกอนมากกว่าไม่เติมวัสดุเป่าส้มฝัสด เนื่องจากการเติมวัสดุเป่าส้มฝัสดเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้เกิดการเกาะและโตของผลึกผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน

ตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 เมื่อพิจารณาระหว่างวัสดุเป่าสัมผัสดัง 2 ชนิด พบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าสัมผัส มีแนวโน้มในการเกิดตะกอนมากกว่าใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าสัมผัส เนื่องจากตะกอนมีการเกาะและโตของผลึก ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่าเมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3

เมื่อพิจารณาพีเอชในช่วงที่ศึกษาและปริมาณวัสดุเป่าสัมผัสที่เติม เมื่อใช้ผลึก MAP และทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าสัมผัส พบว่า ผลึก MAP7 MAP8 MAP9 MAP10 และทรายแก้ว มีปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชและปริมาณวัสดุเป่าสัมผัสเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณวัสดุเป่าสัมผัส ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า ปริมาณวัสดุเป่าสัมผัส 0.5 กรัม มีปริมาณตะกอนเกิดขึ้นน้อยกว่าที่ปริมาณ 1.0 3.0 และ 5.0 กรัม ดังนั้นจึงเลือกใช้ผลึก MAP ปริมาณ 1.0 กรัม เนื่องจากที่ปริมาณ 3.0 และ 5.0 กรัม ปริมาณตะกอนเกิดขึ้นใกล้เคียงกับที่ปริมาณ 1.0 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน เมื่อใช้วัสดุเป่าสัมผัสทั้ง 2 ชนิด คือ พีเอช 8-9 เนื่องจากที่พีเอชมากกว่า 9 สามารถเกิดการรวมตัวของไอออนชนิดอื่นๆ ในสารละลายได้ดี ทำให้เกิดผลึกชนิดอื่นด้วย เมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก กำหนดให้มีค่าพีเอชในช่วง 5.5-9.0 และยังพบว่าที่พีเอชมากกว่า 9 มีปริมาณตะกอนมากที่สุด แต่ที่พีเอชมากกว่า 9 ไม่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP สำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีการปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกสู่สิ่งแวดล้อม

ดังนั้นชนิดของวัสดุเป่าสัมผัส ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมในการตกตะกอน ช่วงพีเอช 7-10 คือ ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม ที่ช่วงพีเอช 8-9 เนื่องจากมีแนวโน้มในการเกิดตกตะกอนเหมาะสมที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ปริมาณตะกอนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ผลึก MAP7 MAP8 MAP9 MAP10 ปริมาณ  
ต่างๆ เป็นวัสดุเป่าสัมผัสน้ำ ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

วัสดุเป่าสัมผัสน้ำ (ผลึก MAP)	พีเอช	ปริมาณตะกอน (กรัมต่อลิตร)			
		0.5	1.0	3.0	5.0
MAP7	7	3.35 ± 0.00	3.32 ± 0.00	3.38 ± 0.01	3.33 ± 0.01
	8	4.33 ± 0.00	4.38 ± 0.01	4.32 ± 0.00	4.01 ± 0.00
	9	4.67 ± 0.01	4.69 ± 0.00	4.59 ± 0.00	4.56 ± 0.00
	10	4.76 ± 0.01	4.76 ± 0.01	4.73 ± 0.01	4.72 ± 0.03
MAP8	7	3.44 ± 0.00	3.48 ± 0.00	3.50 ± 0.00	3.55 ± 0.01
	8	4.11 ± 0.02	4.14 ± 0.00	4.12 ± 0.01	4.11 ± 0.03
	9	4.58 ± 0.16	4.64 ± 0.01	4.57 ± 0.00	4.57 ± 0.01
	10	4.69 ± 0.04	4.67 ± 0.03	4.65 ± 0.02	4.60 ± 0.01
MAP9	7	3.43 ± 0.05	3.46 ± 0.03	3.46 ± 0.01	3.49 ± 0.01
	8	4.39 ± 0.00	4.54 ± 0.08	4.40 ± 0.00	4.35 ± 0.04
	9	4.55 ± 0.00	4.56 ± 0.06	4.55 ± 0.02	4.57 ± 0.03
	10	4.59 ± 0.03	4.72 ± 0.03	4.71 ± 0.01	4.71 ± 0.00
MAP10	7	3.63 ± 0.01	3.64 ± 0.00	3.68 ± 0.00	3.70 ± 0.04
	8	4.39 ± 0.05	4.41 ± 0.01	4.40 ± 0.00	4.12 ± 0.01
	9	4.56 ± 0.00	4.72 ± 0.00	4.73 ± 0.00	4.71 ± 0.01
	10	4.77 ± 0.03	4.77 ± 0.00	4.74 ± 0.00	4.78 ± 0.01

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ปริมาณตะกอนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ทรายแก้ว ปริมาณต่างๆ เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด  
ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ปริมาณตะกอน (กรัมต่อลิตร)			
	0.5	1.0	3.0	5.0
7.0	3.37 ± 0.11	3.14 ± 0.24	3.31 ± 0.01	3.30 ± 0.00
7.5	4.01 ± 0.25	3.83 ± 0.05	3.80 ± 0.09	4.20 ± 0.59
8.0	4.24 ± 0.02	4.44 ± 0.01	4.23 ± 0.02	4.68 ± 0.21
8.5	4.56 ± 0.04	4.67 ± 0.38	4.59 ± 0.06	4.49 ± 0.14
9.0	4.64 ± 0.04	4.67 ± 0.06	4.64 ± 0.04	4.64 ± 0.40
9.5	4.72 ± 0.03	4.73 ± 0.02	4.76 ± 0.16	4.72 ± 0.06
10.0	4.75 ± 0.00	4.70 ± 0.05	4.89 ± 0.10	4.74 ± 0.03

จากผลการศึกษานิตของวัสดุเป่าส้มฝัด ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการตกตะกอนผลึก MAP พบว่า ที่ปริมาณวัสดุเป่าส้มฝัด 1.0 กรัม มีการตกตะกอนเหมาะสมที่สุด ดังนั้นจึงนำสารละลายหลังจากแยกตะกอน เมื่อใช้วัสดุเป่าส้มฝัดต่างชนิดกัน ที่ปริมาณ 1.0 กรัม มาวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส พบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ปริมาณ 1.0 กรัม ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น และประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ผลึก MAP7 และ MAP8 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ส่วนวัสดุเป่าส้มฝัดที่ผลึก MAP9 และ MAP10 พบว่า พีเอช 8 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และเมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ปริมาณ 1.0 กรัม มาวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น และประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสดีที่สุด ที่พีเอช 8.5 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 การที่ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวไปข้างต้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต เกิดการรวมเป็นตะกอน และตกตะกอนแยกออกมา ดังสมการที่ 4.2 ปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษานิตของวัสดุเป่าส้มฝัด ปริมาณต่างๆ คือ ช่วงพีเอช 8-9 เนื่องจากที่พีเอชมากกว่า 9 สามารถเกิดการรวมตัวของไอออนชนิดอื่นๆ ในสารละลายได้ดี ทำให้เกิดผลึกชนิดอื่นด้วย และเมื่อพิจารณามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก กำหนดให้พีเอชอยู่ในช่วง 5.5-9.0 และเมื่อพิจารณาชนิดของ

วัสดุเป่าสัมผัสด พบว่า ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม มีความเหมาะสมในการตกตะกอน

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อใช้ผลึก MAP ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าสัมผัส ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

วัสดุเป่าสัมผัส ปริมาณ 1.0 กรัม (ผลึก MAP 1.0 กรัม)	พีเอช	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	
		ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส
MAP7	7	82.34 ± 0.58	31.96 ± 0.10
	8	86.17 ± 0.29	53.58 ± 0.41
	9	92.67 ± 0.58	63.55 ± 0.34
	10	96.17 ± 0.29	74.62 ± 0.18
MAP8	7	78.68 ± 0.58	43.59 ± 0.17
	8	82.34 ± 0.58	60.06 ± 0.07
	9	93.67 ± 0.58	70.15 ± 0.16
	10	97.00 ± 0.00	69.21 ± 0.15
MAP9	7	73.85 ± 0.29	14.03 ± 0.28
	8	88.67 ± 0.58	92.32 ± 0.10
	9	89.17 ± 0.29	57.62 ± 0.58
	10	92.67 ± 0.58	72.79 ± 0.28
MAP10	7	69.35 ± 0.58	37.28 ± 0.14
	8	89.01 ± 0.00	64.82 ± 0.16
	9	90.34 ± 0.58	60.37 ± 0.12
	10	90.84 ± 0.29	58.30 ± 0.21

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อใช้ทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)	
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส
7.0	72.55 ± 0.06	51.45 ± 0.04
7.5	83.17 ± 0.29	71.50 ± 0.45
8.0	86.67 ± 0.58	68.72 ± 0.35
8.5	91.50 ± 0.50	98.66 ± 0.26
9.0	92.17 ± 0.29	75.27 ± 0.16
9.5	92.84 ± 0.29	75.11 ± 0.25
10.0	93.00 ± 0.00	76.43 ± 0.18

ทั้งนี้จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และเฟสของตะกอนผลึก MAP ที่เกิดขึ้น มีดังนี้

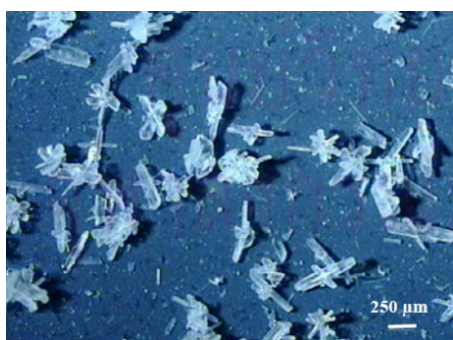
ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของตะกอน ในช่วงพีเอช 7-10 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) พบว่า ตะกอนเป็นของแข็งสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ความยาวผลึกตั้งแต่ 10-60 ไมโครเมตร รูปทรงของผลึกที่ได้มี 2 แบบ คือ รูปทรงผลึกแบบแท่ง (Rod-like crystals) และรูปทรงผลึกแบบกิ่งไม้ (Dendritic crystals) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสอดคล้องกับผลึก MAP ของ Babic-Ivancic และคณะ (2002) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าส้มผัด พบว่า เมื่อเติมวัสดุเป่าส้มผัดจะเกิดตะกอนมากกว่าไม่เติมวัสดุเป่าส้มผัด เนื่องจากการเติมวัสดุเป่าส้มผัดเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้เกิดการเกาะและโตของผลึก (Crystal growth) ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งลักษณะการเกาะและโตของผลึกที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะโครงสร้างและรูปทรงสอดคล้องกับการเกาะและโตของผลึก MAP ของ Regy และคณะ (2002) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ทำให้ตะกอนผลึกที่เกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มผัดกับใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มผัด พบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มผัด จะเกิดการเกาะและโตของผลึกมากกว่าใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มผัด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มผัด และดังแสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มผัด



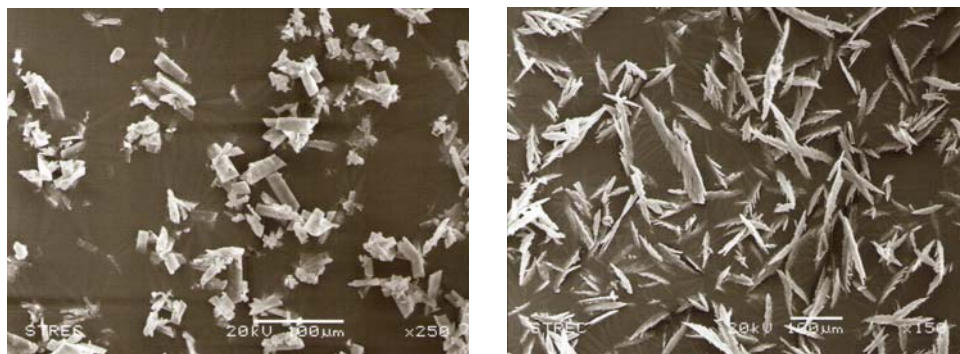
(ก) เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มผัส

(ข) เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มผัส

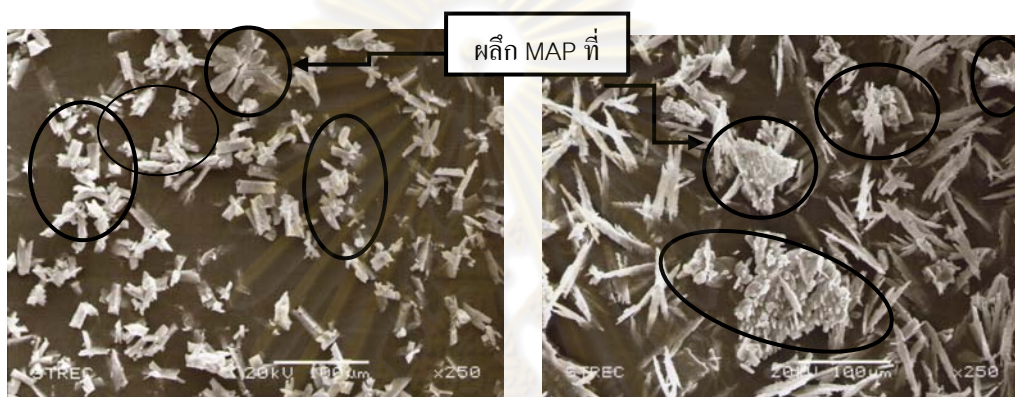
รูปที่ 4.6 ตะกอนที่ได้จากการสังเคราะห์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อใช้วัสดุเป่าส้มผัสต่างชนิดกัน ในปริมาณที่ต่างกัน ที่พีเอช 7-10



รูปที่ 4.7 การเกาะและโตของผลึก MAP (Regy และคณะ, 2002) ที่กำลังขยายภาพ 10 เท่า



(ก) ไม่เติมวัสดุเป่าส้มผัด ที่กำลังขยายภาพ 150 และ 250 เท่า



(ข) เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ที่กำลังขยายภาพ 250 เท่า



(ค) เมื่อใช้ทรายแก้ว เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ที่กำลังขยายภาพ 100 และ 150 เท่า

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการเกาะและโตของผลึกที่สังเคราะห์ได้ เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มผัด  
ในน้ำเสียสังเคราะห์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)



การวิเคราะห์องค์ประกอบและเฟตของผลึก MAP เหมือนกับข้อ 4.1.1 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตะกอนผลึกที่เกิดขึ้น คือ ผลึก MAP มีสูตรโครงสร้างคือ  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  ประกอบด้วย ไอออนแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต

#### 4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าสัมผัส ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

4.2.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบบ่อหมักช้าแบบราง และบ่อยูเอเอสบีของฟาร์มขนาดกลาง (MC-UASB) ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ทำการเก็บน้ำเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม 2552

ตารางที่ 4.6 คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพ ระบบบ่อหมักช้าแบบราง และบ่อยูเอเอสบีของฟาร์มขนาดกลาง (MC-UASB)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	คุณภาพน้ำทิ้ง	หน่วย	มาตรฐานน้ำทิ้ง
1. ลักษณะของตัวอย่างน้ำ	สีน้ำตาลเหลือง	-	ไม่ระบุค่า
2. ค่าพีเอช	8.35	-	5.5-9*
3. ซีโอดี (COD)	776	มิลลิกรัมต่อลิตร	400*
4. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)	289	มิลลิกรัมต่อลิตร	200*
5. ของแข็งแขวนลอย (SS)	424	มิลลิกรัมต่อลิตร	200*
6. ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ( $NH_4^+-N$ )	287	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
7. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	75	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
8. ปริมาณโลหะ			
- แคลเซียม (Ca)	39.39	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- แมกนีเซียม (Mg)	68.73	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- โพแทสเซียม (K)	38.48	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- เหล็ก (Fe)	3.12	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- ทองแดง (Cu)	0.74	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0**
- สังกะสี (Zn)	2.69	มิลลิกรัมต่อลิตร	5.0**

หมายเหตุ : \* มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรสำหรับฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก

\*\* มาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกร พบว่า น้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดมีสีน้ำตาล มีค่าพีเอช 8.35 ซึ่งถือว่าน้ำทิ้งมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นด่างอ่อน ค่าซีโอดี เท่ากับ 776 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด เท่ากับ 289 มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 424 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด เท่ากับ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร และในส่วนของโลหะ คือ แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี พบว่า มีการปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้ง ซึ่งโลหะมาจากอาหารและยาปฏิชีวนะที่ให้สุกรกิน จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งข้างต้น พบว่า ค่าซีโอดี ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด และของแข็งแขวนลอย มีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก นอกจากนี้ยัง พบว่า น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรยังมีปริมาณฟอสฟอรัสและแมกนีเซียมเหลืออยู่ในปริมาณที่สูงด้วย ถ้าหากปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ สาธารณะในระดับความเข้มข้นที่สูงหรือต่อเนื่องเป็นระยะเวลาอันยาวนาน อาจก่อให้เกิดปัญหาสภาวะแวดล้อมเป็นพิษ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศทางน้ำแผ่ขยายในวงกว้างและยังส่งผลต่ออาชีพประมงและชุมชนที่อาศัยอยู่โดยรอบพื้นที่

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร พบว่า น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียม เหลืออยู่ในปริมาณที่สูง คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสฟอรัส ( $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$ ) เท่ากับ 1.2 : 8.5 : 1.0 ดังนั้นน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจึงเหมาะสมที่จะใช้ในการตกผลึก MAP

โดยการทดลองจะนำน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมาปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารในน้ำทิ้งให้เหมาะสม คือ ปรับให้ได้อัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ตามทฤษฎี ด้วยการเติมแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

จากการศึกษาการตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP คือ พีเอช 8-9 ชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัด ปริมาณต่างๆ ที่เหมาะสม คือ ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม ดังนั้นจึงนำผลการศึกษาสภาวะพีเอชและชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัดดังกล่าวมาใช้เพื่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยมีรายละเอียดของผลการทดลอง ดังนี้

#### 4.2.2 การศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

##### 1) ปริมาณตะกอนผลึก MAP

การทดลองนี้จะทำการแปรค่าพีเอชตามสภาวะพีเอชที่เหมาะสมของน้ำเสียสังเคราะห์ คือ พีเอช 8 8.5 และ 9 ผลการทดลอง พบว่า ช่วงพีเอชดังกล่าว มีผลทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกเพิ่มขึ้น คือ 3.17 3.56 และ 4.04 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อแปรค่าพีเอชสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งช่วงพีเอชที่ทำการทดลองเหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP มากที่สุด โดยปริมาณตะกอนผลึกที่ได้จากการทดลองที่เพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับการละลายน้ำของตะกอนผลึก MAP (Solubility diagram) (Ali และคณะ, 2005) คือ เมื่อค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้น (พีเอช 8.1-10.5) ตะกอนผลึก MAP ละลายน้ำได้ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และจากการปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรให้เหมาะสมได้มีการเติมแมกนีเซียมคลอไรด์ ซึ่งแมกนีเซียมคลอไรด์เมื่อละลายน้ำมีสภาพเป็นกรดอ่อน จึงเป็นการเพิ่มสภาพความเป็นกรดในน้ำทิ้ง ดังนั้นจึงต้องเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น เพื่อปรับให้ค่าพีเอชของน้ำทิ้งอยู่ในช่วงที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 4.7 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

พีเอช	ปริมาณตะกอน (กรัมต่อลิตร)
8.0	3.17 ± 0.02
8.5	3.56 ± 0.02
9.0	4.04 ± 0.04

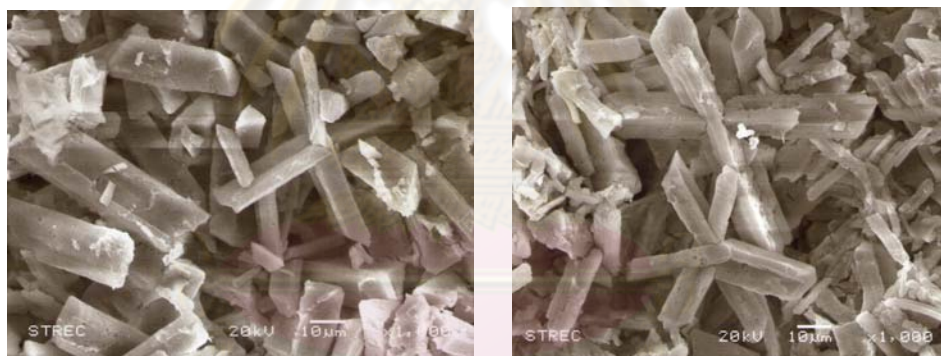
หลังจากการตกตะกอนผลึกดังกล่าวในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยปรับอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ด้วยการเติมแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แล้วจึงนำตะกอนผลึกดังกล่าวมาศึกษาลักษณะโครงสร้างองค์ประกอบ และเปตของตะกอนผลึก MAP ที่เกิดขึ้น มีดังนี้

ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของตะกอนผลึกที่ได้จากการทดลอง ที่ช่วงพีเอช 8-9 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) พบว่า ผลึกที่ได้เป็นตะกอนของแข็งสีน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ความยาวผลึกตั้งแต่ 10-60 ไมโครเมตร รูปทรงของผลึกที่ได้มี 2 แบบ คือ รูปทรงแบบปริซึมสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยมรูปยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปทรงผลึกที่ได้จากการทดลองของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับ Koo Jeong (2001) และ Le Corre (2006) อ้างจาก Dunn (2004) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า มีลักษณะ

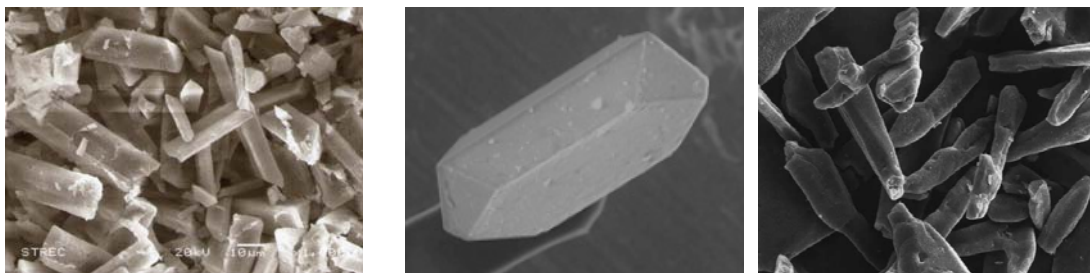
โครงสร้างของผลึกเหมือนกัน และทำการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึกของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับน้ำเสียสังเคราะห์กับ พบว่า มีรูปทรงคล้ายกัน แต่ในน้ำเสียสังเคราะห์ระยะเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเพียง 30 นาที อาจทำให้การเกิดรูปทรงของผลึก MAP ยังไม่สมบูรณ์เท่ากับน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร (ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง) ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.9 ตะกอนที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9



รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9 วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า



- (ก) ผลึกที่ได้จากการสังเคราะห์ ในน้ำที่ทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่กำลังขยาย 1000
- (ข) ผลึก MAP ของ Koo Jeong (2001) และ Le Corre (2006) อ้างจาก Dunn (2004)

**รูปที่ 4.11** เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำที่ทิ้งจากฟาร์มสุกร กับผลึก MAP ของ Koo Jeong (2001) และ Le Corre (2006) อ้างจาก Dunn (2004)



- (ก) น้ำที่ทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
- (ข) น้ำเสียสังเคราะห์ ที่กำลังขยาย 750 เท่า

**รูปที่ 4.12** เปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำที่ทิ้งจากฟาร์มสุกรกับผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)

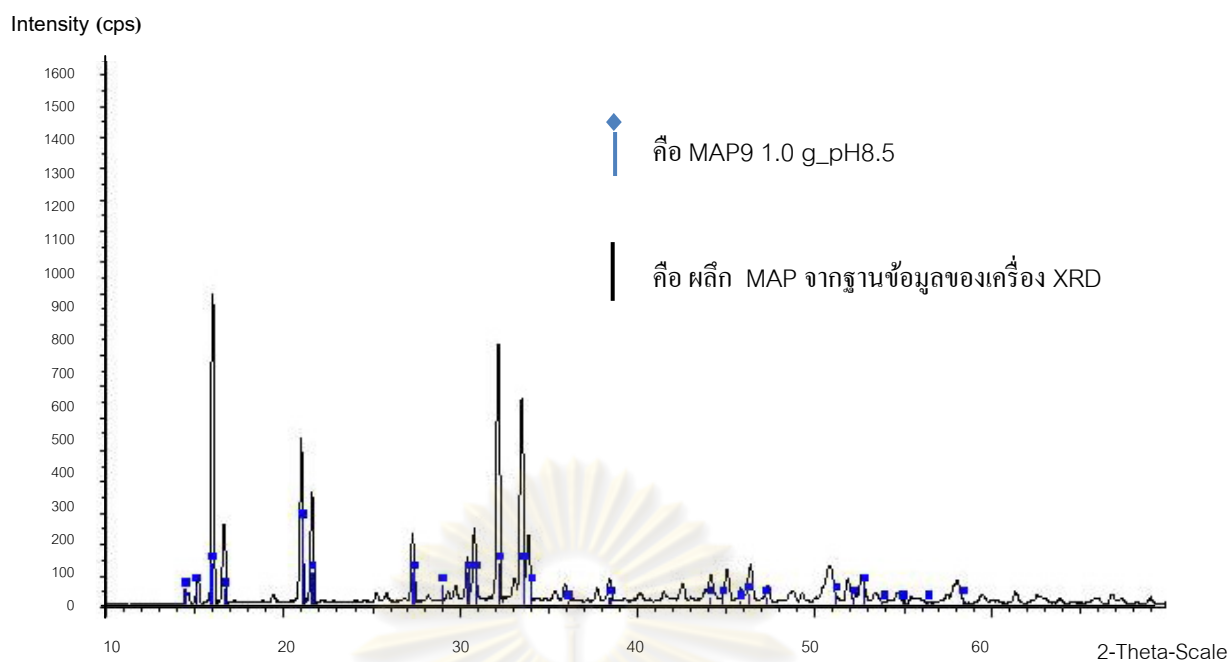
การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกที่ได้จากการทดลอง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเทคนิคจุลวิเคราะห์ (SEM-EDS) พบว่า ผลึกดังกล่าวประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน 20-31 เปอร์เซ็นต์ ธาตุไนโตรเจน 11-14 เปอร์เซ็นต์ ธาตุออกซิเจน 30-38 เปอร์เซ็นต์ ธาตุแมกนีเซียม 10-13 เปอร์เซ็นต์ ธาตุฟอสฟอรัส 11-16 เปอร์เซ็นต์ ธาตุโพแทสเซียม 0.27-0.34

เปอร์เซ็นต์ ธาตุแคลเซียม 0.24-0.33 เปอร์เซ็นต์ ธาตุทองแดง 0.76-0.90 เปอร์เซ็นต์ และธาตุสังกะสี 0.40-0.50 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลข้างต้น พบว่า อัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 1:1:1 ที่พีเอช 8-9 ซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดตะกอนผลึก MAP (Doyle, 2002) ดังแสดงในสมการที่ 4.2 และได้ทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า มีอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 1:1:1 เหมือนกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.8

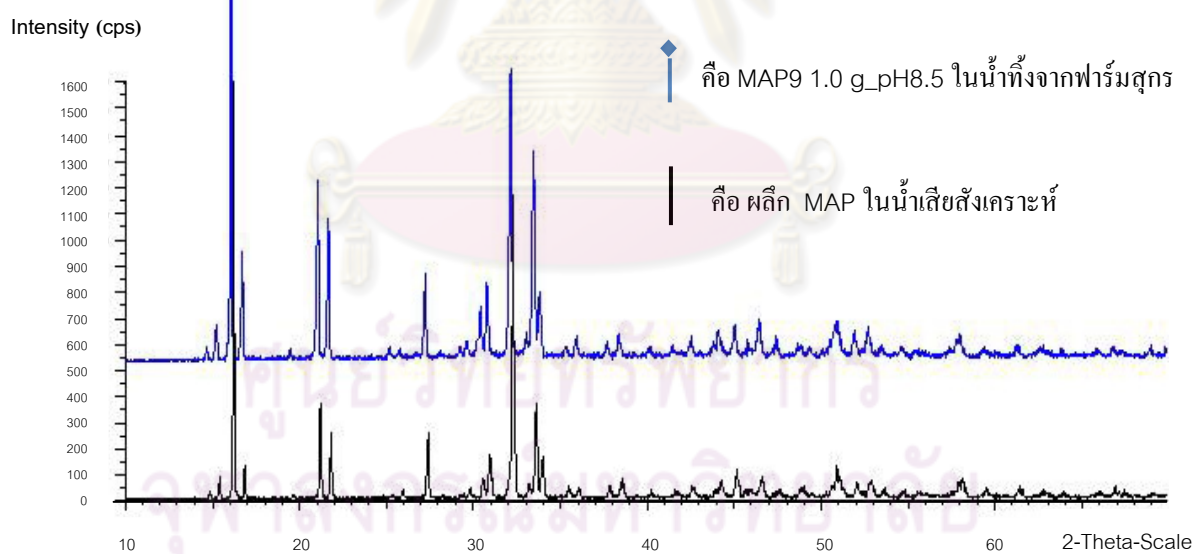
**ตารางที่ 4.8** เปรียบเทียบองค์ประกอบของผลึกที่ได้จากการสังเคราะห์ ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์

องค์ประกอบของตะกอน	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์)		
	แมกนีเซียม	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส
- องค์ประกอบของตะกอนผลึกที่สังเคราะห์ได้ ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร	10-13	11-14	11-16
- องค์ประกอบของตะกอนผลึก MAP ที่ได้จาก การสังเคราะห์ ในน้ำเสียสังเคราะห์	6-13	7-12	7-14

การวิเคราะห์เฟสของตะกอนที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) พบว่า ผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีเฟสตรงกับผลึก MAP จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (ทั้งรูปทรงแบบปริซึมสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยมรูปยาว) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรคือ ผลึก MAP และได้ทำการเปรียบเทียบเฟสของผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับเฟสของผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าเฟสของผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรตรงกับเฟสของผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ผลึก MAP ที่เกิดขึ้น ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเป็นผลึกชนิดเดียวกัน



รูปที่ 4.13 ดิฟเฟกโทแกรมเปรียบเทียบเฟสของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับเฟสของผลึก MAP จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)



รูปที่ 4.14 ดิฟเฟกโทแกรมเปรียบเทียบเฟสของผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับเฟสของผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมที่พีเอช 8-9 วัสดุเป่าสัมผัสนี้ที่ใช้ คือ ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร สามารถผลิต ผลึก MAP ได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนบำบัดและหลังตกตะกอนผลึก MAP

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ			
	คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		พีเอช8.0	พีเอช8.5	พีเอช9.0
1. ซีไอดี	776.00	320 ± 42.64	270.77 ± 42.64	221.54 ± 0.00
2. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	289.00	64.87 ± 1.62	64.87 ± 0.81	62.53 ± 0.81
3. ของแข็งแขวนลอย	424.00	75.33 ± 1.15	38.67 ± 3.06	10.67 ± 4.16
4. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	75.00	205.75 ± 0.28	137.08 ± 2.73	98.48 ± 2.82
5. ปริมาณแมกนีเซียม	68.73	138.20 ± 4.01	125.20 ± 3.33	102.0 ± 2.57
6. ปริมาณแคลเซียม	39.39	4.40 ± 0.05	4.10 ± 0.19	2.80 ± 0.12
7. ปริมาณโพแทสเซียม	38.48	24.71 ± 0.01	24.81 ± 0.37	25.04 ± 0.07
8. ปริมาณเหล็ก	3.12	0.16 ± 0.03	0.11 ± 0.03	0.08 ± 0.03
9. ปริมาณทองแดง	0.74	0.54 ± 0.03	0.30 ± 0.05	0.11 ± 0.03
10. ปริมาณสังกะสี	2.69	0.60 ± 0.02	0.52 ± 0.03	0.45 ± 0.03

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำหลังตกตะกอนผลึก MAP

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ			
	คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนบำบัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)		
		พีเอช8.0	พีเอช8.5	พีเอช9.0
1. ซีไอดี	776.00	58.74 ± 5.50	65.09 ± 5.50	65.09 ± 0.00
2. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	289.00	77.51 ± 0.56	77.51 ± 0.28	78.32 ± 0.28
3. ของแข็งแขวนลอย	424.00	82.23 ± 0.27	90.88 ± 0.72	97.48 ± 0.98
4. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	75.00	-177.10 ± 0.37	-84.62 ± 3.68	-32.63 ± 3.80
5. ปริมาณแมกนีเซียม	68.73	-101.04 ± 5.83	-82.13 ± 4.84	-48.42 ± 3.73
6. ปริมาณแคลเซียม	39.39	88.81 ± 0.12	89.63 ± 0.19	92.90 ± 0.31
7. ปริมาณโพแทสเซียม	38.48	34.96 ± 0.03	34.70 ± 0.37	34.31 ± 0.19
8. ปริมาณเหล็ก	3.12	96.63 ± 1.09	97.40 ± 0.03	97.48 ± 0.07
9. ปริมาณทองแดง	0.74	27.44 ± 3.53	60.05 ± 0.05	84.51 ± 3.53
10. ปริมาณสังกะสี	2.69	77.66 ± 0.79	80.69 ± 0.03	83.19 ± 1.08

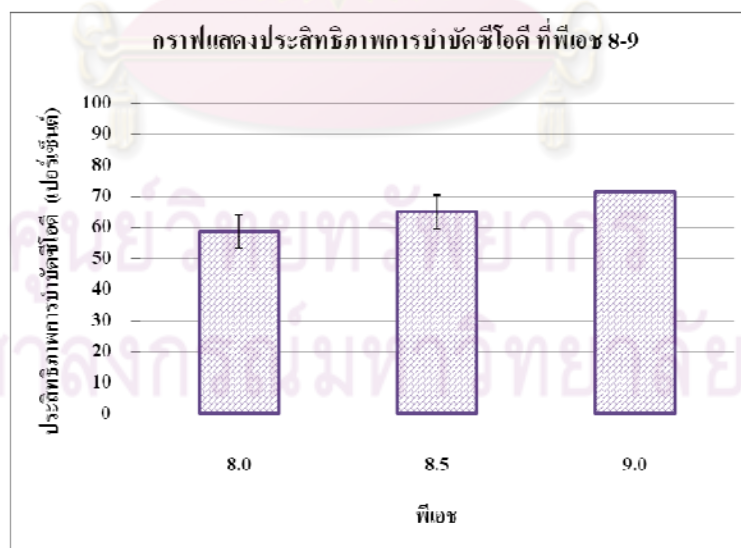
## 2) ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP

จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังตกตะกอนผลึก MAP มีรายละเอียดดังนี้

### 2.1) ปริมาณซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP พบว่า เมื่อปรับให้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีพีเอช 8.0 8.5 และ 9.0 จะทำให้ปริมาณซีโอดีมีค่าลดลง เท่ากับ 320 270.77 และ 221.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดการตกตะกอน และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณซีโอดีของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนและหลังตกตะกอนผลึก MAP พบว่า วิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP สามารถช่วยบำบัดซีโอดีในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้ 58-66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้น้ำทิ้งหลังตกตะกอนผลึก MAP มีคุณภาพน้ำดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.15

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่กำหนดให้มีค่าซีโอดีไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า วิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้

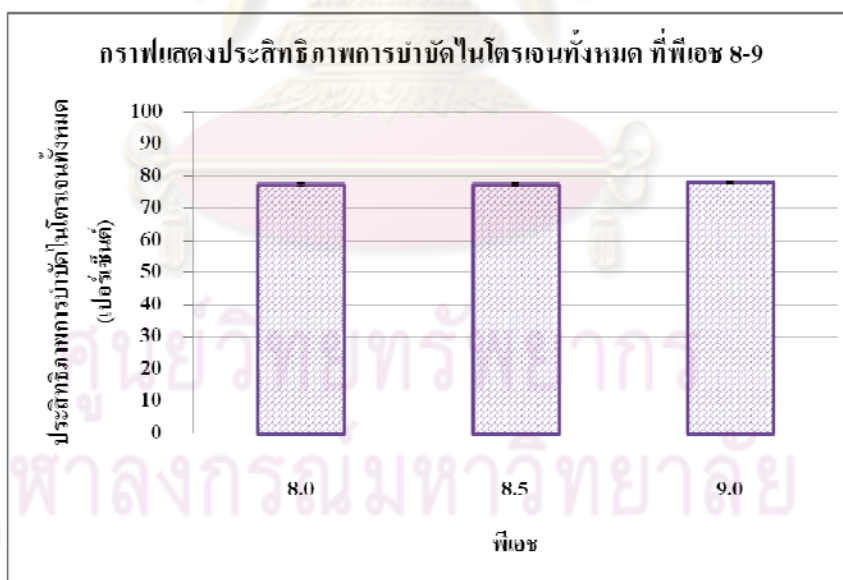


รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีหลังตกตะกอนผลึก MAP

## 2.2) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen, TKN)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอน ผลึก MAP พบว่า เมื่อปรับให้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีพีเอช 8.0 8.5 และ 9.0 จะทำให้ปริมาณไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลง เท่ากับ 64.87 64.87 และ 62.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดการตกตะกอน และในช่วงที่ทำการศึกษาเป็นช่วงพีเอชสูงแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) จะเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจน ( $\text{NH}_3$ ) ระเหยขึ้นสู่อากาศ ดังแสดงในสมการที่ 4.1 เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนและหลังตกตะกอนผลึก MAP พบว่า วิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP สามารถช่วยบำบัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้ 77-79 เปอร์เซ็นต์ ทำให้น้ำทิ้งหลังตกตะกอนผลึก MAP มีคุณภาพน้ำดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่กำหนดให้มีค่าไนโตรเจนไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า วิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้

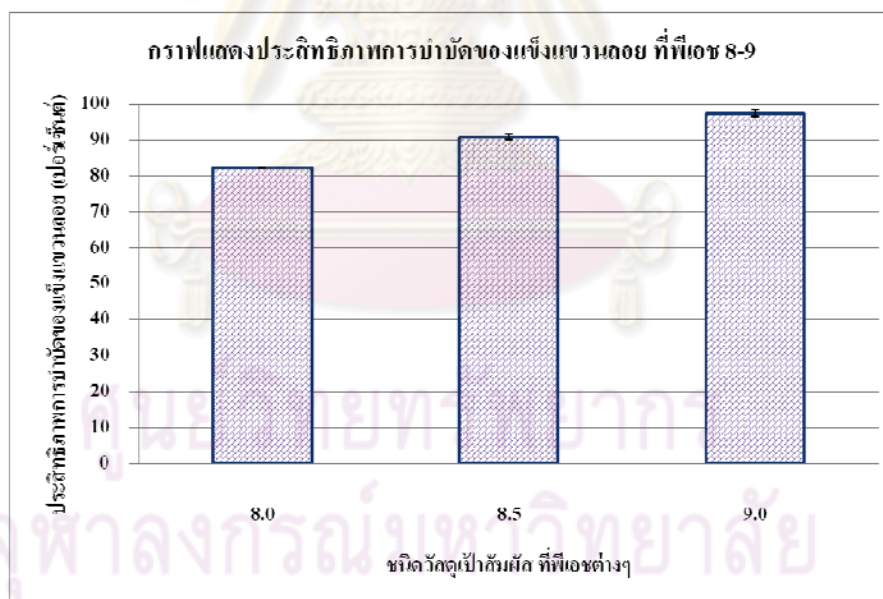


รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนหลังตกตะกอนผลึก MAP

### 2.3) ของแข็งแขวนลอย (Suspended solid, SS)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP พบว่า เมื่อปรับให้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีพีเอช 8.0 8.5 และ 9.0 จะทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลง เท่ากับ 75.33 38.67 และ 10.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในการทำการศึกษานี้ได้ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ของแข็งที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะตกตะกอนลง และยังพบว่า ช่วงที่ทำการศึกษานี้สามารถเกิดการรวมตัวของไอออนชนิดอื่น ทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกชนิดอื่นนอกเหนือจากผลึก MAP และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณของแข็งแขวนลอยของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนและหลังตกตะกอนผลึก MAP พบว่า สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ 82-98 เปอร์เซ็นต์ ทำให้น้ำทิ้งหลังตกตะกอนผลึก MAP มีคุณภาพน้ำดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่กำหนดให้มีค่าของแข็งแขวนลอยไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าวิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้

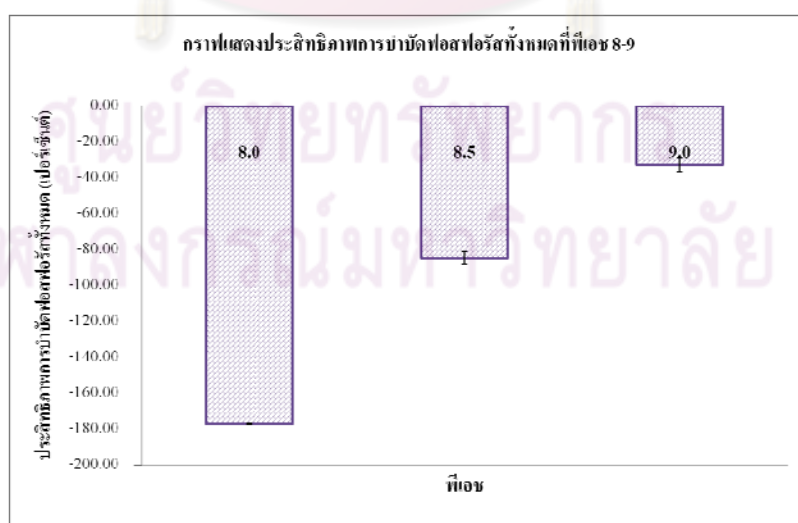


รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยหลังตกตะกอนผลึก MAP

#### 2.4) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus, TP)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP พบว่า เมื่อปรับให้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีพีเอช 8.0 8.5 และ 9.0 จะทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสลดลง เท่ากับ 205.75 137.08 และ 98.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการตกตะกอนผลึก MAP และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนและหลังตกตะกอนผลึก MAP พบว่า มีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้น 32-178 เปอร์เซ็นต์ การที่ในน้ำหลังผ่านการตกตะกอนผลึก MAP มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารในน้ำทิ้งให้เหมาะสม ซึ่งมีการเติมฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต ทำให้ฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มสูงมากขึ้น แต่เมื่อมีการปรับพีเอชให้สูงขึ้น ฟอสฟอรัสมีค่าลดลงตามพีเอชที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก และมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน พบว่า ไม่มีการกำหนดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำ แต่ถ้ามีการปล่อยน้ำที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงอาจเกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง เป็นผลทำให้น้ำเน่าเสีย สัตว์น้ำตาย ดังนั้นจึงควรนำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนผลึก MAP แล้วมาทำการบำบัดต่อ เช่น ทำการทดลองแบบเดินระบบแบบต่อเนื่องแล้วเวียนตะกอน ซึ่งน้ำที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงจะถูกเวียนกลับมาเป็นสารตั้งต้นใหม่ ทำให้ประหยัดสารเคมีในการเติมฟอสฟอรัส และในการเวียนตะกอนยังเป็นการประหยัดวัสดุเป่าลมผสมที่เติมด้วย หรือนำไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำสำหรับพืชที่ต้องการฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูง เช่น ผักกาดหอม และไม้ผล เป็นต้น



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสหลังตกตะกอนผลึก MAP

## 2.4) โลหะชนิดต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดธาตุชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่

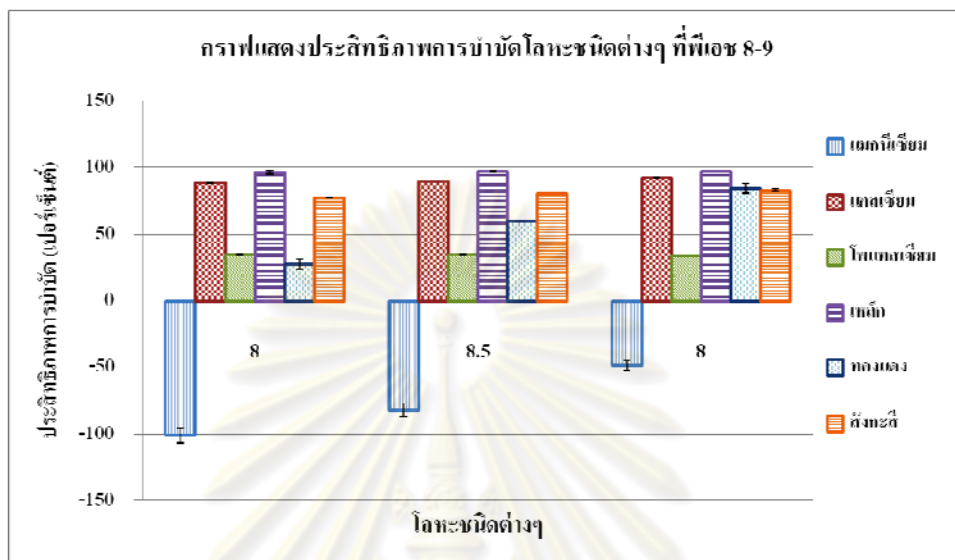
4.19

ในส่วนไอออนของแมกนีเซียม พบว่า น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังผ่านการตกตะกอนผลึก MAP มีปริมาณแมกนีเซียมลดลง เท่ากับ 138.20 125.20 และ 102.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการตกตะกอนผลึก MAP และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณแมกนีเซียมของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนและหลังการตกตะกอนผลึก MAP พบว่า มีปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มสูงขึ้น 32-178 เปอร์เซ็นต์ การที่ในน้ำหลังผ่านการตกตะกอนผลึก MAP มีปริมาณเพิ่มสูงนั้น เนื่องจากการปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารในน้ำทิ้งให้เหมาะสมซึ่งมีการเติมแมกนีเซียม ทำให้แมกนีเซียมในน้ำเพิ่มสูงมากขึ้น แต่เมื่อมีการปรับพีเอชให้สูงขึ้นแมกนีเซียมมีค่าลดลงตามพีเอชที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก และมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน พบว่า ไม่มีการกำหนดปริมาณแมกนีเซียมในน้ำ ซึ่งแนวทางแก้ไขในการนำน้ำหลังตกตะกอนผลึก MAP ที่มีปริมาณแมกนีเซียมสูงคือ นำไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำสำหรับพืชที่ต้องการธาตุอาหารแมกนีเซียมสูง เช่น ปาล์มน้ำมัน ไม้ผล เป็นต้น

ในส่วนไอออนของแคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี พบว่า น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังผ่านการตกตะกอนผลึก MAP มีแนวโน้มปริมาณแคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี ลดลง เมื่อพีเอชของน้ำสูงขึ้น ในส่วนของไอออนของแคลเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี มีปริมาณลดลง เนื่องจากในช่วงที่ทำการศึกษามีการรวมตัวของไอออนชนิดอื่นๆ ในน้ำได้ ทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกชนิดอื่นนอกเหนือจากการตกตะกอนผลึก MAP ซึ่งเมื่อพีเอชของน้ำสูงขึ้นโอกาสในการเกิดการตกผลึกชนิดอื่นก็มีมากขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น และในส่วนไอออนของโพแทสเซียมมีปริมาณลดลง เนื่องจากไอออนโพแทสเซียมเป็นธาตุหมู่ 1 ซึ่งละลายน้ำได้ดี และอาจเกิดการตกตะกอนผลึกโพแทสเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต (Potassium ammonium phosphate, K-struvite) ซึ่งเป็นปุ๋ยอีกชนิดหนึ่ง และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี ระหว่างน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนและหลังการตกตะกอนผลึก MAP พบว่า สามารถบำบัดแคลเซียม 88-93 เปอร์เซ็นต์ โพแทสเซียม 34-35 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก 96-98 เปอร์เซ็นต์ ทองแดง 27-85 เปอร์เซ็นต์ และสังกะสี 77-84 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้น้ำทิ้งหลังตกตะกอนผลึก MAP มีคุณภาพน้ำดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ซึ่งถ้าพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก และมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน พบว่า ในส่วนของแคลเซียม โพแทสเซียม และเหล็ก ไม่มีการกำหนดปริมาณในน้ำ แต่ในส่วนของทองแดงและสังกะสี มีการ

กำหนดเกณฑ์ของมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน ซึ่งพบว่า วิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดปริมาณโลหะชนิดต่างๆ ได้



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการบำบัดโลหะชนิดต่างๆ หลังตกตะกอนผลึก MAP

4.2.3 ผลการศึกษาชนิดของวัสดุเป่าส้มฝัด ปริมาณต่างๆ ที่มีผลต่อการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

#### 1) ปริมาณตะกอนผลึก MAP

ผลการศึกษาเมื่อใช้ผลึก MAP และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด เมื่อพิจารณาระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าส้มฝัด พบว่า เมื่อเติมวัสดุเป่าส้มฝัดมีแนวโน้มในการเกิดตะกอนมากกว่าไม่เติมวัสดุเป่าส้มฝัด เนื่องจากการเติมวัสดุเป่าส้มฝัดเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวทำให้เกิดการเกาะและโตของผลึก ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ทำให้ตะกอนผลึกที่เกิดขึ้น มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัดกับใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด พบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัดจะเกิดการเกาะและโตของผลึกมากกว่าใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.11 เมื่อใช้ผลึก MAP และทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด และพบว่าช่วงพีเอชที่ทำการศึกษาเป็นช่วงค่าพีเอชสูง การละลายน้ำของตะกอนผลึก MAP (Solubility diagram) (Ali และคณะ, 2005) ละลายน้ำได้ลดลง



ตารางที่ 4.11 ปริมาณตะกอนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว เป็นวัสดุ-  
เป่าส้มฝัด ปริมาณ 1.0 กรัม ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

พีเอช	ปริมาณตะกอน (กรัมต่อลิตร)		
	ผลึก MAP		ทรายแก้ว
	MAP9	MAP10	
8.0	3.23 ± 0.01	3.57 ± 0.10	3.32 ± 0.02
8.5	3.90 ± 0.00	4.02 ± 0.02	3.85 ± 0.15
9.0	4.27 ± 0.02	4.34 ± 0.07	4.18 ± 0.00

ทั้งนี้จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และเฟสของตะกอนผลึก MAP ที่เกิดขึ้น มีดังนี้

ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของตะกอนผลึก MAP ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) พบว่า เป็นตะกอนของแข็งสีน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก)-(ข) ความยาวผลึกตั้งแต่ 10-60 ไมโครเมตร รูปทรงของผลึกที่ได้มี 2 แบบ คือ รูปทรงแบบปริซึมสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยมรูปยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งลักษณะการเกาะและโตของผลึกที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะโครงสร้างและรูปทรงสอดคล้องกับการเกาะและโตของผลึก MAP ของ Regy และคณะ (2002) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และพบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ตะกอนที่เกิดขึ้นจะเกาะกับผลึก MAP ที่ใช้เป็นวัสดุเป่าส้มฝัดมากกว่าใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุ-เป่าส้มฝัด ทำให้ได้ตะกอนมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ข)-(ค) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณตะกอน

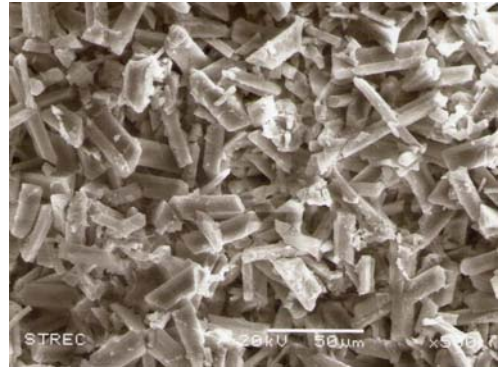
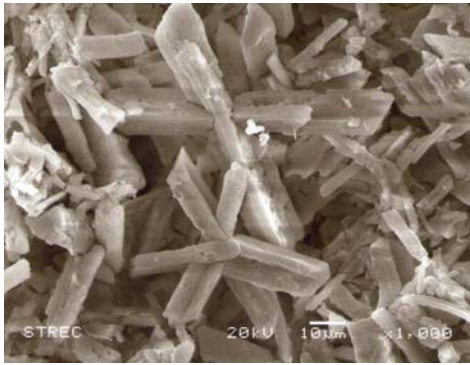


(ก) ตะกอนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ผลึก MAP  
เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด

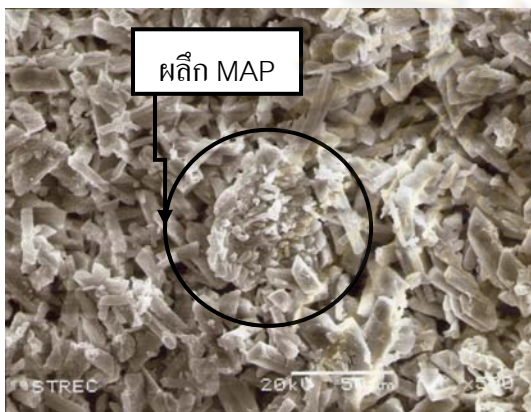


(ข) ตะกอนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้ทรายแก้ว  
เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด

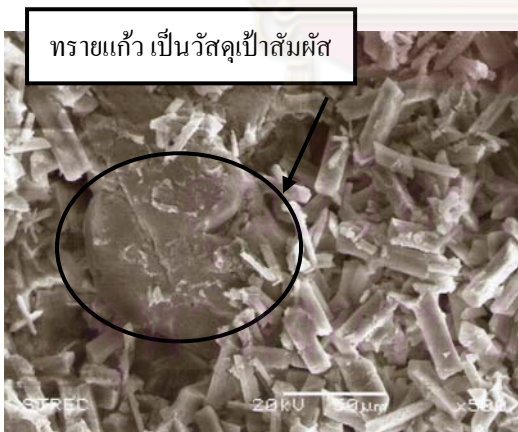
รูปที่ 4.20 ตะกอนที่สังเคราะห์ได้ ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร เมื่อใช้วัสดุเป่าส้มฝัดต่างชนิดกัน  
ที่พีเอช 8-9



(ก) ไม่เติมวัสดุเป่าสัมพันธ์ที่กำลังขยายภาพ 500 และ 1000 เท่า



(ข) เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าสัมพันธ์ที่กำลังขยายภาพ 500 เท่า

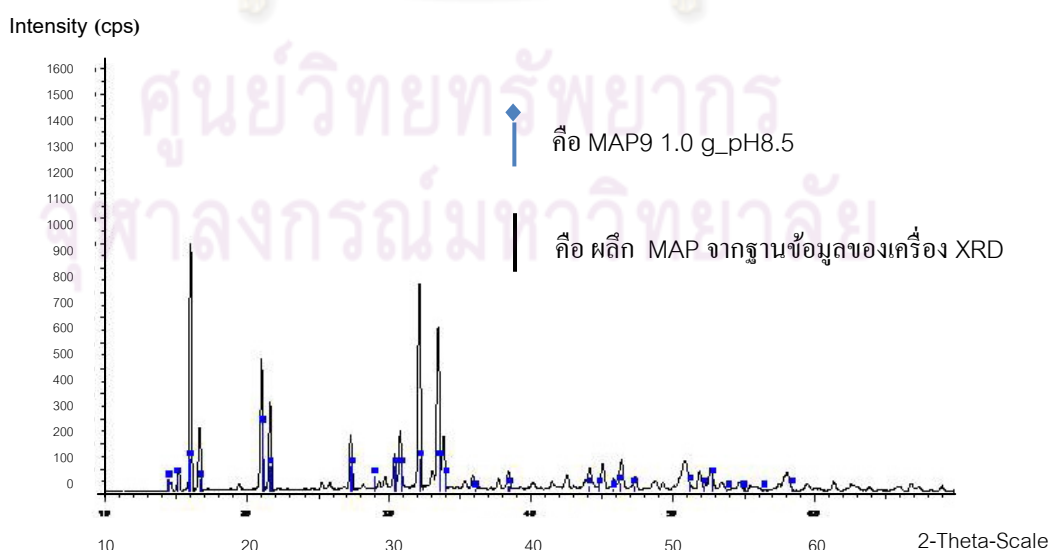


(ค) เมื่อใช้ทรายแก้ว เป็นวัสดุเป่าสัมพันธ์ที่กำลังขยายภาพ 500 เท่า

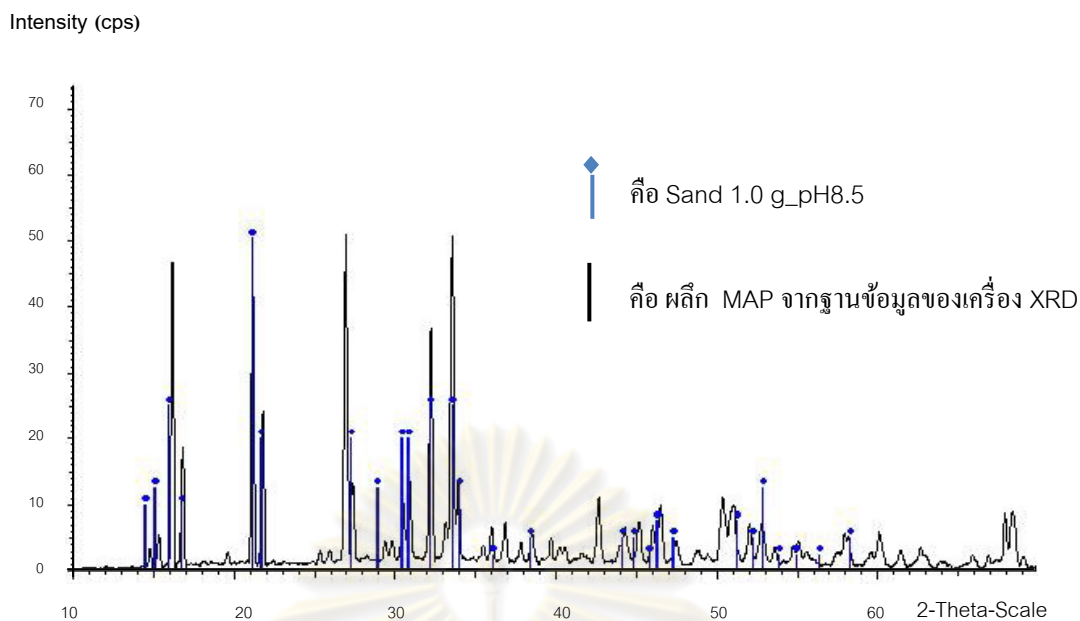
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบการเกาะและโตของผลึกที่สังเคราะห์ได้ เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าสัมพันธ์  
ในน้ำเสียสังเคราะห์ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึก MAP โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ สแกนเทคนิคจุลวิเคราะห์ (SEM-EDS) พบว่า เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ผลึกดังกล่าว ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน 20-33 เปอร์เซ็นต์ ธาตุไนโตรเจน 11-14 เปอร์เซ็นต์ ธาตุออกซิเจน 30-38 เปอร์เซ็นต์ ธาตุแมกนีเซียม 10-13 เปอร์เซ็นต์ ธาตุฟอสฟอรัส 11-16 เปอร์เซ็นต์ ธาตุ โพแทสเซียม 0.27-0.34 เปอร์เซ็นต์ ธาตุแคลเซียม 0.24-0.33 เปอร์เซ็นต์ ธาตุทองแดง 0.76-0.90 เปอร์เซ็นต์ และธาตุสังกะสี 0.40-0.50 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ผลึกดังกล่าวประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน 21-41 เปอร์เซ็นต์ ธาตุไนโตรเจน 9-17 เปอร์เซ็นต์ ธาตุออกซิเจน 26-46 เปอร์เซ็นต์ ธาตุแมกนีเซียม 6-12 เปอร์เซ็นต์ ธาตุฟอสฟอรัส 9-20 เปอร์เซ็นต์ ธาตุโพแทสเซียม 0.19-0.86 เปอร์เซ็นต์ ธาตุแคลเซียม 0.19-1.57 เปอร์เซ็นต์ ธาตุทองแดง 0.20-1.83 เปอร์เซ็นต์ และธาตุสังกะสี 0.67-1.00 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลข้างต้น พบว่า อัตราส่วน โมลระหว่างแมกนีเซียมต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส เท่ากับ 1:1:1 ที่พีเอช 8-9 ซึ่งสอดคล้องกับ ปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดตะกอนผลึก MAP (Doyle, 2002) ดังแสดงในสมการที่ 4.2 แต่ทั้งนี้ พบว่า ในช่วงที่ทำการศึกษานี้สามารถเกิดการรวมตัวของไอออนชนิดอื่นๆ ในน้ำได้ ทำให้เกิดการ ตกตะกอนผลึกชนิดอื่นนอกเหนือจากการตกตะกอนผลึก MAP ซึ่งเมื่อพีเอชของน้ำสูงขึ้นโอกาสใน การเกิดการตกผลึกชนิดอื่นก็มีมากขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของตะกอนผลึก MAP ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรค- โทมิเตอร์ (XRD) พบว่า ผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีเฟสตรงกับผลึก MAP จาก ฐานข้อมูลเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (ทั้งรูปทรงแบบปริซึมสามเหลี่ยมและรูปทรง หกเหลี่ยมรูปยาว) เมื่อใช้วัสดุเป่าส้มฝัดทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.22



(ก) เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด



(ข) เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป้าสัมผัส

**รูปที่ 4.22** ดิฟเฟกโทแกรมเปรียบเทียบเฟสของผลึกที่สังเคราะห์ได้ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกับผลึก MAP จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) เมื่อใช้วัสดุเป้าสัมผัสต่างชนิดกัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ผลึกที่เกิดขึ้น คือ ผลึก MAP มีสูตรโครงสร้าง คือ  $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  มีประกอบคือ ไอออนของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่จกฟาร์มสุกรก่อนบำบัดและหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มผัด

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ								
	คุณภาพน้ำที่จกฟาร์มสุกร			ผลึก MAP จากการสังเคราะห์					
	หลังตกตะกอนผลึก MAP			MAP9			MAP10		
	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0
1. ซีไอดี	58.74 ± 5.50	65.09 ± 5.50	65.09 ± 0.00	233.85 ± 21.32	344.62 ± 42.64	221.54 ± 0.00	233.85 ± 21.32	221.54 ± 0.00	246.15 ± 42.64
2. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	77.51 ± 0.56	77.51 ± 0.28	78.32 ± 0.28	61.60 ± 0.00	51.80 ± 1.40	18.67 ± 0.81	64.40 ± 1.40	41.07 ± 0.81	28.00 ± 1.40
3. ของแข็งแขวนลอย	82.23 ± 0.27	90.88 ± 0.72	97.48 ± 0.98	29.33 ± 1.15	17.33 ± 1.15	8.67 ± 1.15	17.33 ± 4.16	8.67 ± 1.15	4.67 ± 4.16
4. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	-177.10 ± 0.37	-84.62 ± 3.68	-32.63 ± 3.80	195.33 ± 0.48	137.39 ± 0.73	91.08 ± 0.46	172.18 ± 0.46	130.18 ± 0.64	98.05 ± 0.55
5. ปริมาณแมกนีเซียม	-101.04 ± 5.83	-82.13 ± 4.84	-48.42 ± 3.73	135.02 ± 2.36	100.68 ± 2.08	90.85 ± 3.91	128.35 ± 3.50	93.68 ± 1.26	72.68 ± 1.15
6. ปริมาณแคลเซียม	88.81 ± 0.12	89.63 ± 0.19	92.90 ± 0.31	3.44 ± 0.20	1.85 ± 1.33	1.13 ± 0.77	3.36 ± 0.26	1.72 ± 0.12	0.30 ± 0.05
7. ปริมาณโพแทสเซียม	34.96 ± 0.03	34.70 ± 0.37	34.31 ± 0.19	24.41 ± 0.40	24.29 ± 0.27	24.17 ± 0.00	24.16 ± 0.01	24.29 ± 0.20	24.11 ± 0.06
8. ปริมาณเหล็ก	96.63 ± 1.09	97.40 ± 0.03	97.48 ± 0.07	0.08 ± 0.07	0.13 ± 0.05	0.16 ± 0.03	0.10 ± 0.00	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.00
9. ปริมาณทองแดง	27.44 ± 3.53	60.05 ± 0.05	84.51 ± 3.53	0.28 ± 0.03	0.29 ± 0.02	0.33 ± 0.03	0.26 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.34 ± 0.02
10. ปริมาณสังกะสี	77.66 ± 0.79	80.69 ± 0.03	83.19 ± 1.08	0.60 ± 0.03	0.44 ± 0.07	0.64 ± 0.05	0.55 ± 0.04	0.49 ± 0.06	0.52 ± 0.06

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่จากฟาร์มสุกรก่อนบำบัดและหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มผัด

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
	คุณภาพน้ำที่จากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP			ทรายแก้ว		
	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0
1. ซีโอดี	58.74 ± 5.50	65.09 ± 5.50	65.09 ± 0.00	295.38 ± 0.00	295.38 ± 0.00	270.77 ± 42.64
2. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	77.51 ± 0.56	77.51 ± 0.28	78.32 ± 0.28	60.20 ± 1.40	54.13 ± 0.80	27.53 ± 0.80
3. ของแข็งแขวนลอย	82.23 ± 0.27	90.88 ± 0.72	97.48 ± 0.98	4.00 ± 3.46	12.67 ± 3.06	24.00 ± 2.00
4. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	-177.10 ± 0.37	-84.62 ± 3.68	-32.63 ± 3.80	205.99 ± 0.64	136.30 ± 0.11	77.08 ± 0.28
5. ปริมาณแอมโมเนีย	-101.04 ± 5.83	-82.13 ± 4.84	-48.42 ± 3.73	131.35 ± 0.87	113.02 ± 1.53	85.85 ± 2.78
6. ปริมาณแคลเซียม	88.81 ± 0.12	89.63 ± 0.19	92.90 ± 0.31	3.79 ± 0.08	2.39 ± 0.49	0.65 ± 0.16
7. ปริมาณโพแทสเซียม	34.96 ± 0.03	34.70 ± 0.37	34.31 ± 0.19	24.32 ± 0.31	24.20 ± 0.06	24.33 ± 0.04
8. ปริมาณเหล็ก	96.63 ± 1.09	97.40 ± 0.03	97.48 ± 0.07	0.14 ± 0.00	0.07 ± 0.03	0.07 ± 0.03
9. ปริมาณทองแดง	27.44 ± 3.53	60.05 ± 0.05	84.51 ± 3.53	0.26 ± 0.02	0.03 ± 0.00	0.31 ± 0.02
10. ปริมาณสังกะสี	77.66 ± 0.79	80.69 ± 0.03	83.19 ± 1.08	0.57 ± 0.00	0.40 ± 0.07	0.51 ± 0.07

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าลมฝัด

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)								
	คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร หลังตกตะกอนผลึก MAP			ผลึก MAP จากการสังเคราะห์					
				MAP9			MAP10		
	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0
1. ซีไอดี	58.74 ± 5.50	65.09 ± 5.50	65.09 ± 0.00	69.85 ± 2.75	55.57 ± 14.54	71.44 ± 0.00	69.85 ± 2.75	71.44 ± 0.00	68.27 ± 5.50
2. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	77.51 ± 0.56	77.51 ± 0.28	78.32 ± 0.28	78.64 ± 0.00	82.04 ± 0.49	93.53 ± 0.28	77.67 ± 0.48	85.76 ± 0.28	90.29 ± 0.49
3. ของแข็งแขวนลอย	82.23 ± 0.27	90.88 ± 0.72	97.48 ± 0.98	93.08 ± 0.27	95.91 ± 0.27	97.96 ± 0.27	95.91 ± 0.98	97.96 ± 0.27	98.99 ± 0.98
4. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	-177.10 ± 0.37	-84.62 ± 3.68	-32.63 ± 3.80	-163.06 ± 0.65	-85.03 ± 0.99	-22.67 ± 0.62	-131.88 ± 0.62	-75.32 ± 0.86	-32.06 ± 0.73
5. ปริมาณแมกนีเซียม	-101.04 ± 5.83	-82.13 ± 4.84	-48.42 ± 3.73	-96.43 ± 3.44	-43.48 ± 3.03	-32.18 ± 5.68	-86.74 ± 5.09	-36.30 ± 1.83	-5.75 ± 1.68
6. ปริมาณแคลเซียม	88.81 ± 0.12	89.63 ± 0.19	92.90 ± 0.31	91.26 ± 0.52	95.29 ± 3.38	97.13 ± 1.95	91.47 ± 0.66	95.63 ± 0.31	99.25 ± 0.12
7. ปริมาณโพแทสเซียม	34.96 ± 0.03	34.70 ± 0.37	34.31 ± 0.19	36.56 ± 1.03	36.87 ± 0.69	37.18 ± 0.00	37.21 ± 0.03	36.88 ± 0.52	37.34 ± 0.15
8. ปริมาณเหล็ก	96.63 ± 1.09	97.40 ± 0.03	97.48 ± 0.07	97.30 ± 2.21	95.86 ± 1.67	94.89 ± 0.83	96.82 ± 0.00	98.27 ± 0.00	98.27 ± 0.00
9. ปริมาณทองแดง	27.44 ± 3.53	60.05 ± 0.05	84.51 ± 3.53	62.46 ± 3.75	61.21 ± 2.17	54.95 ± 3.75	64.96 ± 2.17	61.21 ± 2.17	53.70 ± 2.17
10. ปริมาณสังกะสี	77.66 ± 0.79	80.69 ± 0.03	83.19 ± 1.08	77.84 ± 0.93	83.80 ± 2.47	76.37 ± 1.73	79.74 ± 1.58	81.81 ± 2.35	80.69 ± 2.07

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มผัด

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)					
	คุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP			ทรายแก้ว		
	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0	พีเอช 8.0	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0
1. ซีโอดี	58.74 ± 5.50	65.09 ± 5.50	65.09 ± 0.00	61.92 ± 0.00	65.09 ± 0.00	69.85 ± 5.50
2. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	77.51 ± 0.56	77.51 ± 0.28	78.32 ± 0.28	79.13 ± 0.49	81.23 ± 0.28	90.45 ± 0.28
3. ของแข็งแขวนลอย	82.23 ± 0.27	90.88 ± 0.72	97.48 ± 0.98	99.06 ± 0.82	97.01 ± 0.72	94.34 ± 0.47
4. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	-177.10 ± 0.37	-84.62 ± 3.68	-32.63 ± 3.80	-177.42 ± 0.86	-83.56 ± 0.14	-3.81 ± 0.37
5. ปริมาณแอมโมเนีย	-101.04 ± 5.83	-82.13 ± 4.84	-48.42 ± 3.73	-91.10 ± 1.26	-64.43 ± 2.22	-24.90 ± 4.05
6. ปริมาณแคลเซียม	88.81 ± 0.12	89.63 ± 0.19	92.90 ± 0.31	90.38 ± 0.20	93.36 ± 1.25	91.26 ± 0.41
7. ปริมาณโพแทสเซียม	34.96 ± 0.03	34.70 ± 0.37	34.31 ± 0.19	36.79 ± 0.81	37.11 ± 0.16	36.56 ± 0.10
8. ปริมาณเหล็ก	96.63 ± 1.09	97.40 ± 0.03	97.48 ± 0.07	95.37 ± 0.00	98.78 ± 0.83	97.78 ± 0.83
9. ปริมาณทองแดง	27.44 ± 3.53	60.05 ± 0.05	84.51 ± 3.53	64.96 ± 2.17	96.25 ± 0.00	57.46 ± 2.17
10. ปริมาณสังกะสี	77.66 ± 0.79	80.69 ± 0.03	83.19 ± 1.08	78.79 ± 0.15	85.27 ± 2.46	81.12 ± 2.60

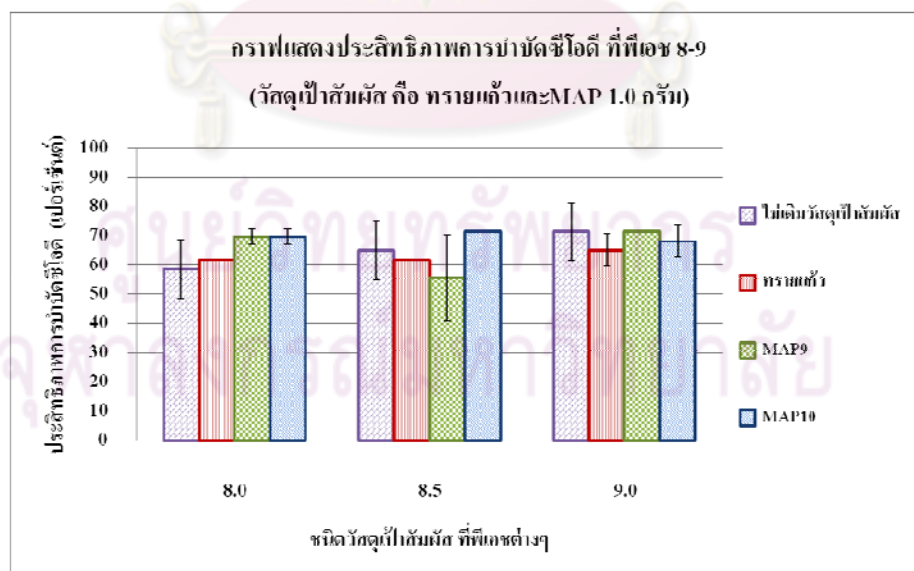


2) ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และ 4.15

### 2.1) ปริมาณซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าสัมผัส เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า การเติมวัสดุเป่าสัมผัสช่วยในการบำบัดซีโอดี ทำให้ปริมาณซีโอดีลดลง แสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 เนื่องจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดการตกตะกอน ส่งผลทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุเป่าสัมผัสทั้งสองชนิดพบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าสัมผัส มีแนวโน้มในการบำบัดซีโอดีมากกว่าใช้ทรายแก้ว ซึ่งสามารถบำบัดซีโอดีได้ 55-72 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าสัมผัส และ 61-70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าสัมผัส

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่กำหนดให้มีค่าซีโอดีไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า วิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้

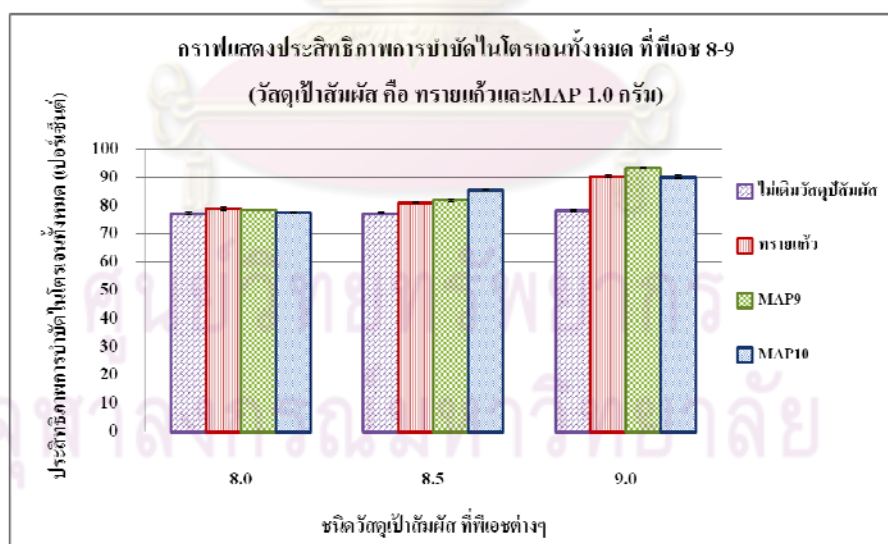


รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าสัมผัส ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

## 2.2) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen, TKN)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอน ผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าสั้มน้้ส เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าสั้มน้้ส ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า การเติมวัสดุเป่าสั้มน้้สช่วยในการบำบัดไนโตรเจน ทำให้ปริมาณไนโตรเจนลดลง แสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 เนื่องจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดการตกตะกอน และในช่วงที่ทำการศึกษาเป็นช่วงพีเอชสูง แอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) จะเกิดเป็นแก๊สไนโตรเจน ( $\text{NH}_3$ ) ระเหยขึ้นสู่บรรยากาศ ดังแสดงในสมการที่ 4.1 ส่งผลทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุเป่าสั้มน้้สทั้งสองชนิด พบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าสั้มน้้ส สามารถบำบัดไนโตรเจนได้ดีกว่าใช้ทรายแก้ว ซึ่งสามารถบำบัดไนโตรเจนได้ 77-94 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าสั้มน้้ส และ 79-91 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าสั้มน้้ส

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่กำหนดให้มีค่าไนโตรเจนไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า วิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้

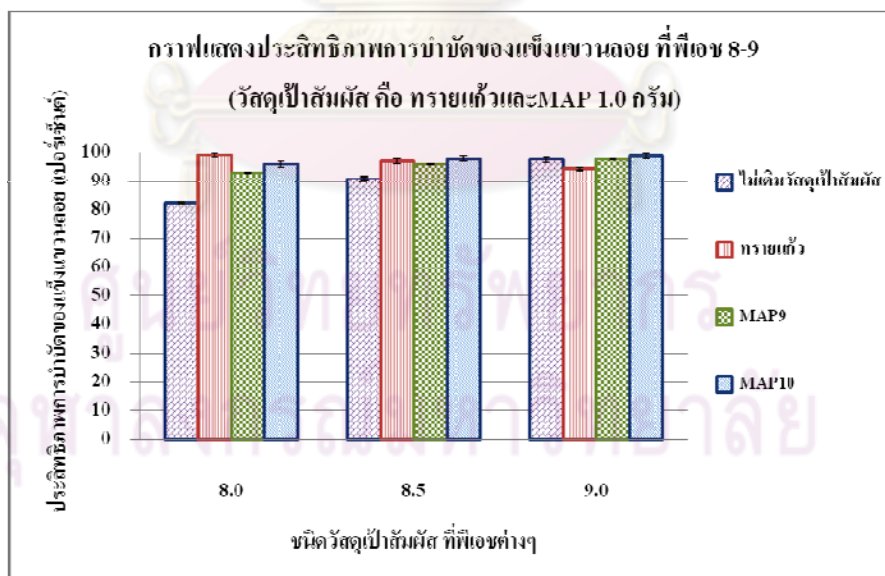


รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจน เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าสั้มน้้ส ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

2.3) ของแข็งแขวนลอย (Suspended solid, SS)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าสั้มน้สั้ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าสั้มน้สั้ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่า การเติมวัสดุเป่าสั้มน้สั้ช่วยในการบำบัดของแข็งแขวนลอยทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลง แสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 เนื่องจากในการศึกษาได้ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ของแข็งที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะตกตะกอนลง และยังพบว่าช่วงที่ทำการศึกษสามารถเกิดการรวมตัวของไอออนชนิดอื่น ทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกชนิดอื่นนอกเหนือจากผลึก MAP ส่งผลทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุเป่าสั้มน้สั้ทั้งสองชนิด พบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าสั้มน้สั้ สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยได้ดีกว่าใช้ทรายแก้ว ซึ่งสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย ได้ 93-99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าสั้มน้สั้ และ 94-99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าสั้มน้สั้

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่กำหนดให้มีค่าของแข็งแขวนลอยไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าวิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้



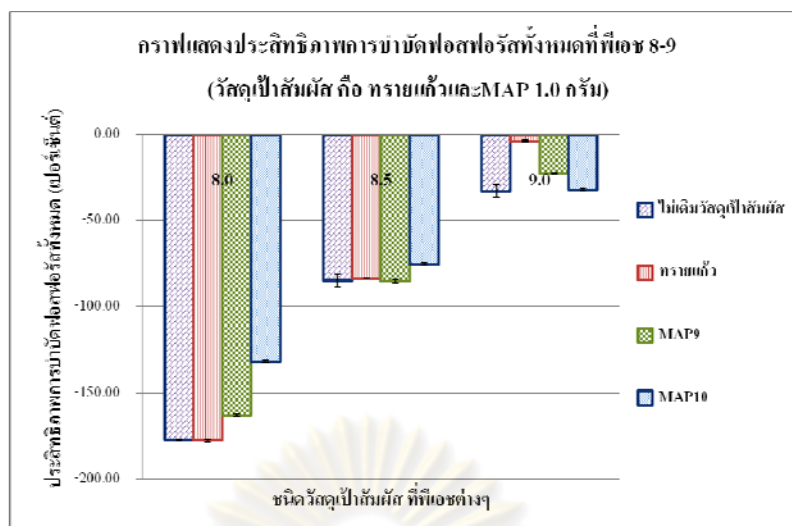
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าสั้มน้สั้ ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

#### 2.4) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus, TP)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มผัด เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าส้มผัด ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่า การเติมวัสดุเป่าส้มผัดช่วยในการบำบัดฟอสฟอรัส ทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสลดลง แสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 เนื่องจากเกิดการตกตะกอนผลึก MAP แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณฟอสฟอรัสของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรก่อนและหลังตกตะกอนผลึก MAP พบว่า มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงขึ้น เนื่องจากการปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารในน้ำทิ้งให้เหมาะสม ซึ่งมีการเติมฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต ทำให้ฟอสฟอรัสในน้ำเพิ่มสูงมากขึ้น และเมื่อมีการปรับพีเอชให้สูงขึ้น ฟอสฟอรัสมีค่าลดลงตามพีเอชที่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุเป่าส้มผัดทั้งสองชนิด พบว่า เมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มผัด สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ดีกว่าใช้ผลึก MAP คือ มีปริมาณฟอสฟอรัสเหลือในแหล่งน้ำน้อยกว่า ซึ่งถ้าใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มผัด จะทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 32-164 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มผัด จะทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 3-178 เปอร์เซ็นต์

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก และมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน พบว่า ไม่มีการกำหนดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำ แต่ถ้ามีการปล่อยน้ำที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงอาจเกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง เป็นผลทำให้น้ำเน่าเสีย สัตว์น้ำตาย ดังนั้นจึงควรนำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนผลึก MAP แล้วมาทำการบำบัดต่อ เช่น ทำการทดลองเดินระบบอย่างต่อเนื่องแล้วเวียนตะกอน ซึ่งน้ำที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงจะถูกเวียนกลับมาเป็นสารตั้งต้นใหม่ ทำให้ประหยัดสารเคมีในการเติมฟอสฟอรัส และในการเวียนตะกอนยังเป็นการประหยัดวัสดุเป่าส้มผัดที่เติมด้วย หรือนำไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำสำหรับพืชที่ต้องการฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูง เช่น ผักกาดหอม และไม้ผล เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



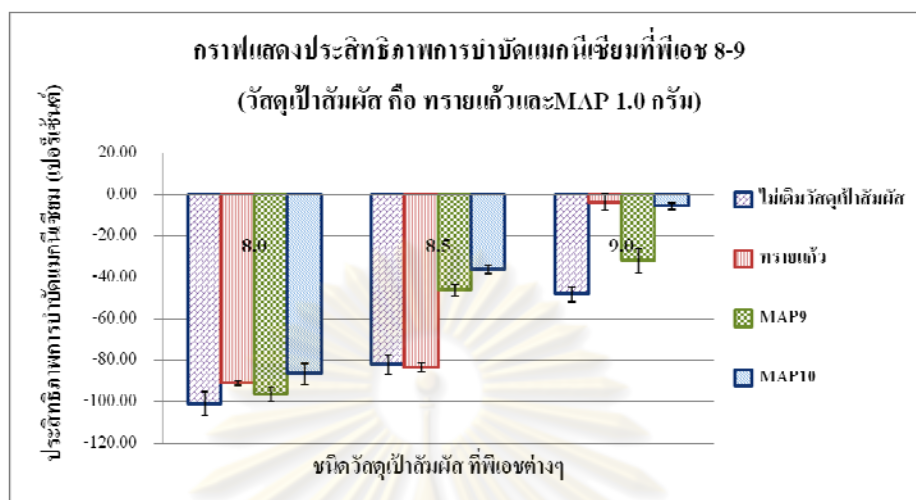
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัด  
ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

#### 2.5) โลหะชนิดต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์ไอออนแมกนีเซียมของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดแมกนีเซียมระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าส้มฝัด ดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่า การเติมวัสดุเป่าส้มฝัดช่วยในการบำบัดแมกนีเซียม ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมลดลง แสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 เนื่องจากเกิดการตกตะกอนผลึก MAP แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแมกนีเซียมก่อนและหลังตกตะกอนผลึก MAP พบว่ามีปริมาณแมกนีเซียมสูงขึ้น เนื่องจากการปรับอัตราส่วนโมลของธาตุอาหารในน้ำทิ้งให้เหมาะสม ซึ่งมีการเติมแมกนีเซียม ทำให้แมกนีเซียมในน้ำเพิ่มสูงมากขึ้น แต่เมื่อมีการปรับพีเอชให้สูงขึ้น แมกนีเซียมมีค่าลดลงตามพีเอชที่สูงขึ้น แล้วเมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุเป่าส้มฝัดทั้งสองชนิด พบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด สามารถบำบัดแมกนีเซียมได้ดีกว่าใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด คือ มีปริมาณแมกนีเซียมเหลือในแหล่งน้ำน้อยกว่า ซึ่งถ้าใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด จะทำให้มีปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น 5-97 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด จะทำให้มีปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น 24-92 เปอร์เซ็นต์

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก และมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน พบว่า ไม่มีการกำหนดปริมาณแมกนีเซียมในน้ำ ซึ่งแนวทางแก้ไขในการนำน้ำหลังตกตะกอนผลึก MAP ที่มีปริมาณ

แมกนีเซียมสูงคือ นำไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำสำหรับพืชที่ต้องการธาตุอาหารแมกนีเซียมสูง เช่น ปาล์มน้ำมัน ไม้ผล เป็นต้น

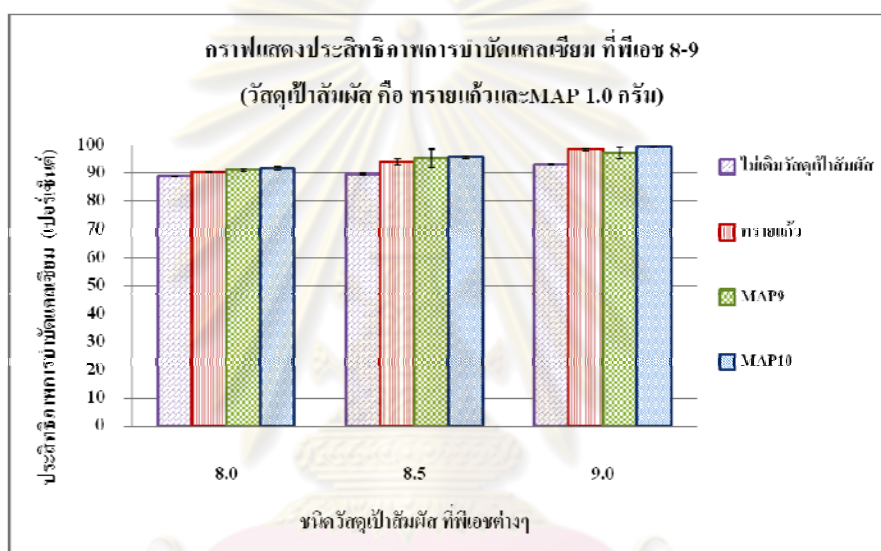


**รูปที่ 4.27** เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแมกนีเซียม เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

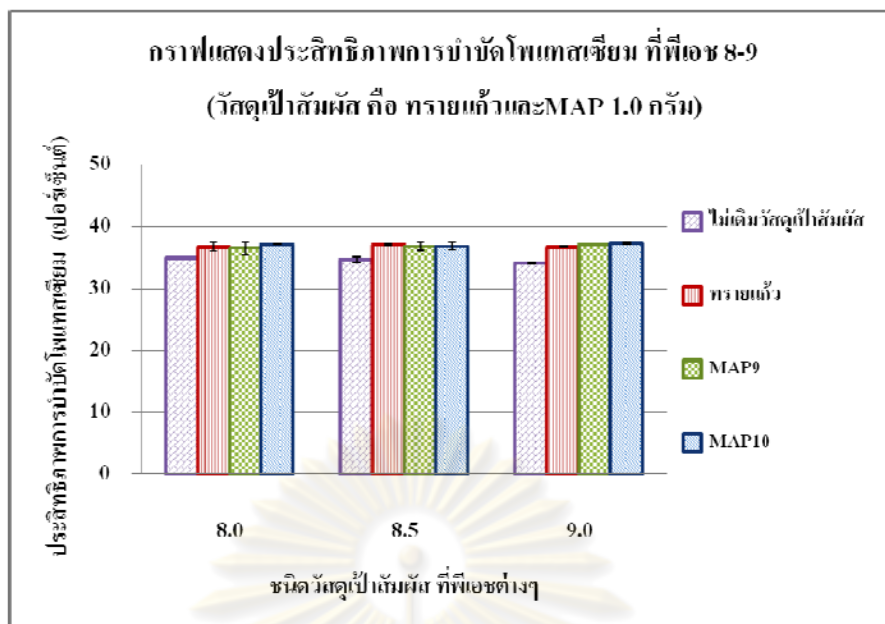
จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไอออนของแคลเซียม โฟสเฟต แมกนีเซียม เหล็ก และสังกะสี ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดแคลเซียม โฟสเฟต แมกนีเซียม เหล็ก และสังกะสี ระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าส้มฝัด ดังแสดงในรูปที่ 4.28-4.31 พบว่า การเติมวัสดุเป่าส้มฝัดช่วยในการบำบัดแคลเซียม เหล็ก และสังกะสี และเมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุเป่าส้มฝัดทั้งสองชนิด พบว่า เมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด สามารถบำบัดแคลเซียม โฟสเฟต แมกนีเซียม เหล็ก และสังกะสี ได้ดีกว่าใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด เนื่องจากในช่วงที่ทำการศึกษามีการรวมตัวของไอออนชนิดอื่นในน้ำได้ ทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกชนิดอื่นนอกเหนือจากการตกตะกอนผลึก MAP ซึ่งเมื่อพีเอชของน้ำสูงขึ้นโอกาสในการเกิดการตกผลึกชนิดอื่นก็มีมากขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น และในส่วนของไอออนของโพแทสเซียม มีปริมาณลดลง เนื่องจากไอออนโพแทสเซียมเป็นธาตุหมู่ 1 ซึ่งละลายน้ำได้ดี และอาจเกิดการตกตะกอนผลึกโพแทสเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต (Potassium ammonium phosphate, K-struvite) ซึ่งเป็นปุ๋ยอีกชนิดหนึ่ง โดยเมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด สามารถบำบัดแคลเซียม เท่ากับ 91-99 เปอร์เซ็นต์ โพแทสเซียม เท่ากับ 36-38 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก เท่ากับ 94-99 เปอร์เซ็นต์ และสังกะสี 76-84 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด สามารถบำบัดแคลเซียม เท่ากับ

90-94 เปอร์เซ็นต์ โพแทสเซียม เท่ากับ 36-38 เปอร์เซ็นต์ เหล็ก เท่ากับ 95-99 เปอร์เซ็นต์ และ สังกะสี 78-86 เปอร์เซ็นต์

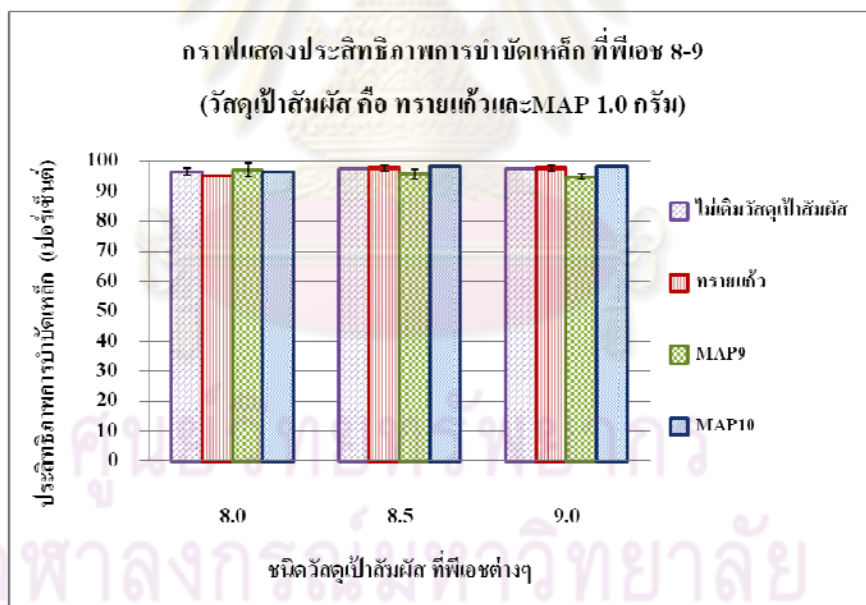
เมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำที่มาจากฟาร์มสุกรขนาดกลาง และขนาดเล็ก และมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน พบว่า โพแทสเซียม เหล็ก และ แคลเซียม ไม่มีการกำหนดปริมาณในน้ำ แต่ในส่วนของสังกะสีมีเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำ คือ ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าปริมาณสังกะสีของน้ำหลังผ่านการตกตะกอนผลึก MAP ไม่เกินมาตรฐาน ดังนั้นวิธีการนำธาตุอาหารในน้ำที่มาจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการ ตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดโลหะชนิดต่างๆ ในน้ำที่มาจากฟาร์มสุกรได้ ทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดแคลเซียม เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุปาล์มอัด ในน้ำที่มาจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

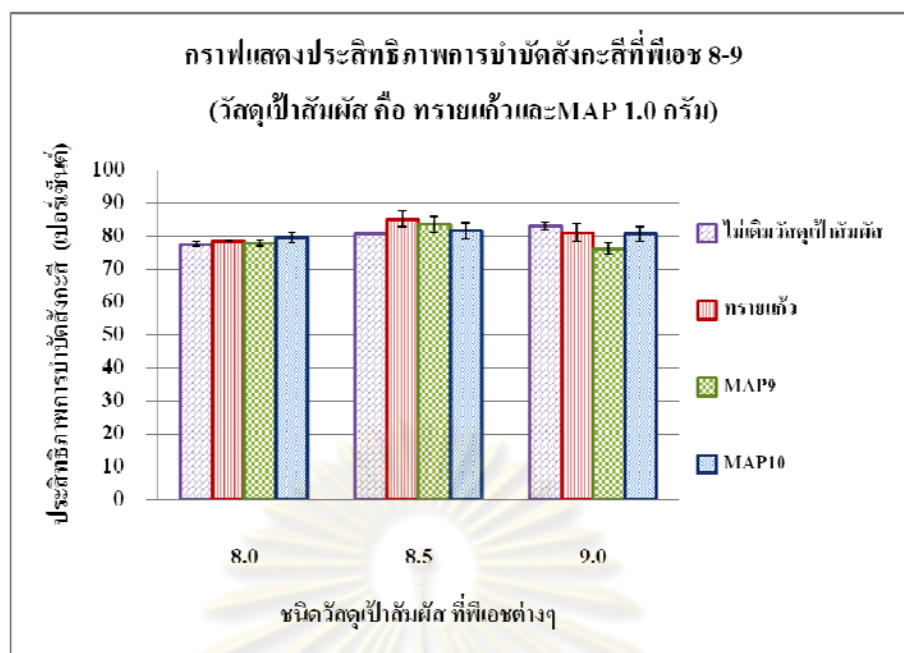


รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัตินโพรเทสซีม เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัสด ในน้ำที่จางจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำบัตินเหล็ก เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัสด ในน้ำที่จางจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

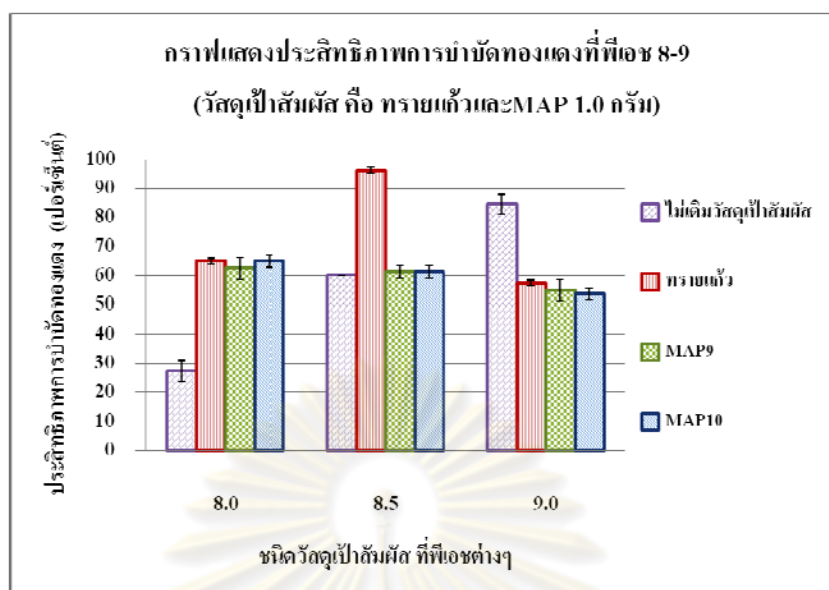




**รูปที่ 4.31** เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสังกะสี เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัด  
ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอน  
ผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด  
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงระหว่างไม่เติมกับเติมวัสดุเป่าส้มฝัด ดังแสดงในรูปที่  
4.32 พบว่า การเติมวัสดุเป่าส้มฝัดช่วยในการบำบัดทองแดง ทำให้ปริมาณทองแดงลดลง แสดง  
ในตารางที่ 4.12 และ 4.13 และเมื่อทำการเปรียบเทียบวัสดุเป่าส้มฝัดทั้งสองชนิด พบว่า เมื่อใช้  
ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัด สามารถบำบัดทองแดงได้ดีกว่าใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด  
เนื่องจากในช่วงที่ทำการศึกษานี้สามารถเกิดการรวมตัวของไอออนชนิดอื่นในน้ำได้ ทำให้เกิดการ  
ตกตะกอนผลึกชนิดอื่นนอกเหนือจากการตกตะกอนผลึก MAP ซึ่งเมื่อพีเอชของน้ำสูงขึ้นโอกาสใน  
การเกิดการตกผลึกชนิดอื่นก็มีมากขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น โดยเมื่อใช้ผลึก MAP เป็นวัสดุ-  
เป่าส้มฝัดบำบัดได้ 53-65 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัดบำบัดได้ 57-97  
เปอร์เซ็นต์

และเมื่อพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน  
พบว่า ทองแดงในน้ำทิ้งต้องไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งพบว่าปริมาณทองแดงของน้ำหลังผ่าน  
การตกตะกอนผลึก MAP ไม่เกินมาตรฐาน ดังนั้นวิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร  
กลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดไอออนทองแดงในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้  
ทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น



รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดทองแดง เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัด  
ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

จากผลการทดลอง พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP คือ  
พีเอช 8.5 และใช้วัสดุเป่าส้มฝัด คือ ผลึก MAP9 ปริมาณ 1.0 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการตกผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

1. การตกตะกอนผลึก MAP ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ แปรค่าพีเอช 7-10 พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP คือพีเอช 8.5 ได้ปริมาณตะกอนผลึก MAP เท่ากับ 4.66 กรัมต่อลิตร ตะกอนผลึกที่ได้มีองค์ประกอบ คือ แมกนีเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เท่ากับ 12 12 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ตะกอนที่ได้เป็นของแข็งสีขาว ความยาวผลึกตั้งแต่ 10-60 ไมโครเมตร รูปทรงของผลึกที่ได้มี 2 แบบ คือ รูปทรงแบบแท่ง (Rod-like crystals) และรูปทรงผลึกแบบกิ่งไม้ (Dendritic crystals) เมื่อนำน้ำหลังตกตะกอนผลึกมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส พบว่า ได้เท่ากับ 87.84 และ 83.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลึกที่สังเคราะห์ได้มีเฟตตรงกับฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

2. การตกตะกอนผลึก MAP ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัสดู พบว่า การเติมวัสดุเป่าส้มฝัสดูจะช่วยในการตกตะกอน ช่วยเพิ่มปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น และยังเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำด้วย โดยวัสดุเป่าส้มฝัสดูที่นำมาใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ ผลึก MAP และทรายแก้ว ปริมาณต่างๆกัน พบว่า การใช้ผลึก MAP 9 ปริมาณ 1.0 กรัม เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP คือ พีเอชของน้ำ 8 เนื่องจากเมื่อใช้ผลึก MAP 9 จะเกิดการตกตะกอนผลึก MAP มากกว่าใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัสดู และยังเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ได้เท่ากับ 88.67 และ 92.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลึกที่สังเคราะห์ได้มีเฟตตรงกับฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

3. การตกตะกอนผลึก MAP ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร พบว่า ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP คือ พีเอช 8.5 ได้ปริมาณตะกอนผลึก MAP เท่ากับ 3.56 กรัมต่อลิตร ตะกอนผลึกที่ได้มีองค์ประกอบ คือ แมกนีเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เท่ากับ 11 11 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ตะกอนที่ได้เป็นของแข็งสีน้ำตาล

ความยาวผลึกตั้งแต่ 10-60 ไมโครเมตร รูปทรงของผลึกที่ได้มี 2 แบบ คือ รูปทรงแบบปริซึมสามเหลี่ยมและรูปทรงหกเหลี่ยมรูปยาว เมื่อนำน้ำหลังตกตะกอนผลึกมาวิเคราะห์มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน เท่ากับ 77.51 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของ การบำบัดฟอสฟอรัส พบว่าสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ แต่มีปริมาณฟอสฟอรัสหลงเหลือจากการเติมสารเคมีที่มากเกินไป และผลึกที่สังเคราะห์ได้มีเฟตตรงกับฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

4. การตกตะกอนผลึก MAP ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มฝัสดู พบว่า การเติมวัสดุเป่าส้มฝัสดูจะช่วยในการตกตะกอน ช่วยเพิ่มปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น และยังเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำด้วย โดยวัสดุเป่าส้มฝัสดูที่นำมาใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ ผลึก MAP และทรายแก้ว ปริมาณต่างๆกัน พบว่า การใช้ผลึก MAP9 ปริมาณ 1.0 กรัม เหมาะสมในการตกตะกอนผลึก MAP คือ ที่พีเอชของน้ำ 8.5 ได้ปริมาณตะกอนผลึก MAP เท่ากับ 3.90 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเมื่อใช้ผลึก MAP ที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นวัสดุเป่าส้มฝัสดู จะเกิดการตกตะกอนผลึก MAP มากกว่าใช้ทรายแก้วเป็นวัสดุเป่าส้มฝัสดู ซึ่งผลึกที่ได้มีเฟตตรงกับผลึก MAP จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ และประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน เท่ากับ 82.04 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของ การบำบัดฟอสฟอรัส พบว่าสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ แต่มีปริมาณฟอสฟอรัสหลงเหลือจากการเติมสารเคมีที่มากเกินไป

5. น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการตกตะกอนผลึก MAP เมื่อนำน้ำมาพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก และมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน พบว่า วิธีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP มีส่วนช่วยลดปริมาณซีโอดี ไนโตรเจน ของแข็งแขวนลอย และโลหะ ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนผลึก MAP แล้วพบว่ามีความเข้มข้นฟอสฟอรัสเหลือในน้ำสูง มาทำการบำบัดต่อ เช่น ทำการทดลอง โดยเดินระบบอย่างต่อเนื่องแล้วเวียนตะกอน ซึ่งน้ำที่มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสสูงจะถูกเวียนกลับมาเป็นสารตั้งต้นใหม่ ทำให้ประหยัดสารเคมีในการเติมฟอสฟอรัส และในการเวียนตะกอนยังเป็นการประหยัดวัสดุเป่าลมที่เติมด้วย หรือนำไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำสำหรับพืชที่ต้องการแคลเซียมในปริมาณที่สูง เช่น ผักกาดหอม และไม้ผล เป็นต้น

2. ในขั้นตอนการกวนช้าและทิ้งไว้ให้ตกตะกอน ควรเพิ่มระยะเวลาในการกวนและระยะเวลาในการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน ซึ่งจะช่วยให้ตะกอนผลึก MAP แยกออกจากน้ำได้ง่าย และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

3. ลดพลังงานในการผลิตปุ๋ยเคมี



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- การตกผลึก. [Online]. Available from: <http://sci.chandra.ac.th/show/11.pdf> [2009, July 17]
- การตกผลึก. [Online]. Available from: [http://202.44.47.77/tam/SubjectsbyWASAN/673352%20Food ProcessingIII/crystallization.pdf](http://202.44.47.77/tam/SubjectsbyWASAN/673352%20Food%20ProcessingIII/crystallization.pdf) [2009, July 17]
- การสะสมของผลึก MAP. [Online]. Available from: <http://www.schaners.com> [2009, July 23]
- เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง ปศุสัตว์, กรม.[Online]. Available from: <http://www.dld.go.th> [2009, May 17]
- กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร. [Online]. Available from: <http://www.deqp.go.th/regulation/pdf/water/water12.pdf> [2009, July 23]
- คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ประจำปี 2545-2546. 2545. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2542. รายงานสถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางน้ำปี พ.ศ. 2541- 2542. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. [Online]. Available from: <http://www.pcd.go.th> [2009, May 17]
- ไชยา อุ้ยสูงเนิน. 2533. คู่มือสุกร. พิมพ์ครั้งที่ 2 .นนทบุรี: ศูนย์ผลิตตำราเกษตรเพื่อชนบท.
- ทรายแก้ว. [Online]. Available from: <http://www.perfect-turf.com> [2009, September 1]
- ทรายแก้ว. [Online]. Available from: <http://www.yixinky.com/english/image/chanpin/syfen.jpg> [2009, September 1]
- นิศากร โฆษิตรัตน์ และยุวรี อินนา. 2536. การลดมลพิษทางน้ำในกิจกรรมเกษตรกรรม. วารสารเทคโนโลยีที่เหมาะสม 11 3: 59-66.
- น้ำจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร. [Online]. Available from: [http://www.pcd.go.th/Info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/Info_serv/reg_std_water04.html) [2010, March 1]
- บริษัท ทีเอ็มเอ็นเนอร์ยี แมเนจเม้นท์ จำกัด. 2552. โครงการศึกษาการเพิ่มมูลค่าน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบแก๊สชีวภาพฟาร์มสุกรตามแนวทางเศรษฐกิจพอเพียง. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ทีเอ็มเอ็นเนอร์ยี แมเนจเม้นท์.

ปัญหาหมอกควันจากน้ำเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ฐานข้อมูลเทคโนโลยีแก้สชีวภาพ (Biogas Technology Database, BTC). [Online]. Available from: <http://teenet.chiangmai.ac.th> [2009, August 22]

ผลึก MAP . [Online]. Available from: <http://www.paques.nl> [2009, May 17]

มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทานและทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำ ชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน. [Online]. Available from: <http://www.pcd.go.th> [2009, August 17]

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2550. การบำบัดมูลสุกรแบบไร้อากาศ. กรุงเทพมหานคร: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม.

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมกรรมประปา เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มหาดไทย, กระทรวง การปกครอง, กรม. [Online]. Available from: <http://www.dopa.go.th> [2009, May 17]

ยูโทรฟิเคชัน. [Online]. Available from: <http://www.sklonline.com/download/downloadnica/utro2.pdf> [2009, July 22]

วันเพ็ญ วิโรจนกู, พัชรี หอมวิจิตร, สมเกียรติ เสงนิรันดรกุล, ภิญญ์ทิตา มุ่งการดี, อาวุธ ยิ้มแต่, สรพรรณ อมตะธรรม, ศิษยา บุญมานุช, บรรจง กาศแก้ว, สุภาพร แซ่ลิ้ม และสุวิภาศรีเมืองช้าง. 2542. โครงการนำร่องการจัดการมูลสัตว์. รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สถานเทคโนโลยีแก้สชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. [Online]. Available from: [http://www.dld.go.th/Islo\\_loe/webfile/pollution.htm](http://www.dld.go.th/Islo_loe/webfile/pollution.htm). [2009, August 11]

สถิติปีล่าสุด ประจำปี 2542-2551 สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. [Online]. Available from: [http://www.dld.go.th/ict/stat\\_web/index\\_stat.html](http://www.dld.go.th/ict/stat_web/index_stat.html). [2009, August 11]

สมชัย จันทน์ส่วง. 2529. การจัดกลุ่มและการรวมกลุ่มสุกรหลังหย่านม. สุกรศาสตร์ 13 49: 33-51.

สุทัศน์ ศิริ. 2540. การจัดการฟาร์มสุกร. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. 2552. สุกกร. สถานการณ์และแนวโน้มสินค้าเกษตรที่สำคัญ 2552: 15.  
อรรถัย ชวาลภาฤทธิ. 2545. คู่มือวิเคราะห์หน้าและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:  
สำนักพิมพ์จุดทอง.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาษาอังกฤษ

- Ahn, J-H., Do, T.H., Kim, S.D. and Hwang, S. 2006. The effect of calcium on the anaerobic digestion treating swine wastewater. Biochemical Engineering Journal 30: 33-38.
- Ali, M.L., Schneider, P.A. and Hudson, N. 2005. Thermodynamics and solution chemistry of struvite. Journal of Indian Institute 85: 141-149.
- Annual Book of ASTM Standard. 2008. Refractories, activated carbon; Advanced ceramics. Volume 15.01.USA: Baltimore.
- APHA, AWWA and WEF. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition. Washington DC: American Public Health Association.
- Babic-Ivancic, V., Kontrec, J., Kralj, D. and Brecevic, L. 2002. Precipitation diagrams of struvite and dissolution kinetics of different struvite morphologies. Journal of Croatica Chimica Acta 75(1): 89-106.
- Battistoni, P., De Angelis, A., Pavan, P., Prisciandaro, M. and Cecchi, F. 2001. Phosphorus removal from a real anaerobic supernatant by struvite crystallization. Water Research 35: 2167-2178.
- Borgerding, J. 1972. Phosphate deposits in digestion systems. Journal of the Water Pollution Control Federation 44: 813-819.
- Burns, R.T., Moody, L.B., Celen, I. and Buchanan, J.R.. 2003. Optimization of phosphorus precipitation from swine manure slurries to enhance recovery. Water Science and Technology 48: 139-146.
- Control of struvite deposition in wastewater treatment plants. [Online]. Available from: [http://www.cswea.org/include/force\\_download.php?file=6](http://www.cswea.org/include/force_download.php?file=6). [2009, August 11]
- de-Bashan, L.E. and Bashan, Y. 2004. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as a fertilizer (1997-2003). Water Research 38: 4222-4246.
- Development of a mobile process to extract phosphorous from livestock waste as a valuable fertilizer. [Online]. Available from: [http://www.bre.orst.edu/Presentations/Gene\\_Hoilman.ppt](http://www.bre.orst.edu/Presentations/Gene_Hoilman.ppt) [2009, August 11]

- Doyle, J.D., Oldring, K., Churchley, J. and Parsons, S.A. 2002. Struvite formation and the fouling propensity of different materials. Water Research 36: 3971–3978.
- El Diwani, G., El Rafie, Sh., El Ibiari, N.N. and El-Aila, H.I. 2007. Recovery of ammonia nitrogen from industrial wastewater treatment as struvite slow releasing fertilizer. Desalination 214: 200-214.
- Harada, Y. 1996. Animal manure recycle system and its utilization in japan. The 8-AAAP Animal Science Congress. Proceeding 1: 99-108.
- Huang, J.S., Chou, H.H., Chen, C.M. and Chiang, C.M. 2007. Effect of recycle-to-influent ratio on activities of nitrifiers and denitrifiers in a combined UASB–activated sludge reactor system . Chemosphere 68: 382–388.
- Jeong, Y.K. and Kim, J.S. 2001. A new method for conservation of nitrogen in aerobic composting process. Journal of Bioresource Technology 79: 129-133.
- Koutsoukos, P.G., Kofina, A.N. and Klepetsanis, P.G. 2003. Exploration of alternatives for phosphorus recovery from wastewater by crystallisation. Istanbul Turkey: WASIC Workshop.
- Koo Jeong, Y and Soo Kim, J. 2001. A new method for conservation of nitrogen in aerobic composting processes. Bioresource Technology 79: 129-133.
- Laridi, R., Auclair, J-C. and Benmoussa, H. 2004. Laboratory and pilot-scale phosphate and ammonium removal by controlled struvite precipitation following coagulation and flocculation of swine wastewater. Environmental Technology 26: 525-536.
- Le Corre, K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P. and Parsons, S.A. 2009. Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A Review. Environmental Science and Technology 39: 433–477.
- Le Corre, K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P. and Parsons, S.A. 2007. Kinetics of struvite precipitation: Effect of the magnesium dose on induction times and precipitation rates. Environmental Technology 28: 1317-1324.
- Mansaray, K. G. and Ghal, A. E. 1998. Agglomeration characteristics of silica sand-rice husk ash mixtures at elevated temperatures. Energy Sources 20: 631-652.
- Mavinic, D.S., Koch, F.A., Huang, H. and Lo, K.V. 2007. Phosphorus recovery from anaerobic digester supernatants using a pilot-scale struvite crystallization process. Journal of Environmental Engineer Science 6: 561-571.

- Muller, Z.O. 1980. Feed from animal wastes : State of knowledge. Food and Agriculture Organization of United Nations. Italy: Rome.
- Neethling, J.B. and Benisch, M. 2004. Struvite control through process and facility design as well as operation strategy. Water Science and Technology 49: 191-199.
- Ohlinger, K.N., Young, T.M. and Schroeder, E.D. 1999. Kinetics effects on preferential struvite accumulation in wastewater. Journal of Environmental Engineering 125: 730-737.
- Shimamura, K., Tanaka, T., Miura, Y. and Ishikawa, H. 2003. Development of a high efficiency phosphorus recovery method using a fluidised-bed crystallized phosphorus removal system. Water Science and Technology 48: 163-170.
- Snoeyink, V. L. and Jenkins, D. 1980. Water Chemistry. New York: John Wiley and Sons.
- Suzuki, K., Tanaka, Y., Kuroda, K., Hanajima, D., Fukumoto, Y. and Yasuda, T. 2006. The technology of phosphorous removal and recovery from swine wastewater by struvite crystallization reaction. Journal of Bioresource Technology 40: 341-349.
- Suzuki, K., Tanaka, Y., Osada, T. and Waki, M. 2002. Removal of phosphate, magnesium and calcium from swine wastewater through crystallization enhance. Water Research 36: 2991-2998.
- Suzuki, K., Tanaka, Y., Kuroda, K., Hanajima, D., Fukumoto, Y. and Yasuda, T. 2006. The technology of phosphorous removal and recovery from swine wastewater by struvite crystallization reaction. Japan Agricultural Research Quarterly 40: 341-349.
- Von Munch, E. and Barr, K. 2001. Control crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester side stream. Water Research 35: 151-159.
- Zhao, Z., Zou, X., Zhang, H.X. and Zhao, X. 2008. X-ray diffraction analysis of the effect of the  $\text{NH}_4^+ : \text{PO}_4^{3-}$  molar ratio on the formation of crystallized struvite and recovery rate of phosphorus. Natural Science Foundation Committee 978: 3111-3114.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ปริมาณตะกอนผลึก MAP ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเจือย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการทดลอง	พีเอชหลังทำการทดลอง			
7.0	1	7.04	6.60	2.5458	2.1364	0.5752
	2	7.02	6.36	1.5202		
	3	7.05	6.55	2.4240		
	4	7.07	6.45	1.5822		
	5	7.06	6.75	2.9231		
	6	7.11	6.44	1.8229		
7.5	1	7.51	7.47	4.0368	3.9622	0.1518
	2	7.54	7.47	3.7683		
	3	7.54	7.49	4.0645		
	4	7.53	7.48	4.0334		
	5	7.53	7.49	3.7693		
	6	7.52	7.51	4.1010		

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการทดลอง	พีเอชหลังทำการทดลอง			
8.0	1	8.07	8.04	4.4377	4.4315	0.0646
	2	8.05	8.05	4.3710		
	3	8.00	8.05	4.4360		
	4	8.07	8.00	4.5522		
	5	8.70	8.00	4.4018		
	6	8.06	8.04	4.3900		
8.5	1	8.50	8.50	4.7266	4.6600	0.0380
	2	8.57	8.47	4.6449		
	3	8.65	8.56	4.6163		
	4	8.63	8.51	4.6428		
	5	8.56	8.49	4.6695		
	6	8.62	8.49	4.6772		

ศูนย์วิทยพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการทดลอง	พีเอชหลังทำการทดลอง			
9.0	1	9.02	8.98	4.6654	4.7243	0.0429
	2	9.00	8.99	4.7003		
	3	9.02	9.02	4.7505		
	4	9.02	9.03	4.7525		
	5	9.04	9.03	4.7530		
	6	9.05	9.04	4.6660		
9.5	1	9.55	9.55	5.2471	4.8677	0.1890
	2	9.50	9.50	4.8247		
	3	9.53	9.53	4.8071		
	4	9.55	9.55	4.8021		
	5	9.54	9.54	4.7992		
	6	9.50	9.50	4.7260		

ศูนย์วิทยพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการทดลอง	พีเอชหลังทำการทดลอง			
10.0	1	10.05	10.05	4.8093	4.8756	0.1249
	2	10.00	10.00	4.7843		
	3	10.03	10.02	4.8956		
	4	10.07	10.05	4.7986		
	5	10.00	10.00	4.8490		
	6	10.08	10.07	5.1170		

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้ว เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักทรายแก้ว (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
7.0	1 (0.5 กรัม)	7.02	6.99	0.5137	3.2582	3.3656	0.1124
	2	7.03	6.99	0.5137	3.4824		
	3	7.01	6.98	0.5116	3.3561		
7.0	1 (1.0 กรัม)	7.05	7.00	1.0133	3.1886	3.2787	0.2425
	2	7.07	7.02	1.0017	3.0942		
	3	7.06	7.03	1.0021	3.5534		
7.0	1 (3.0 กรัม)	7.09	7.08	3.0085	3.3199	3.3165	0.0059
	2	7.05	6.99	3.0044	3.3097		
	3	7.05	7.00	3.0210	3.3199		
7.0	1 (5.0 กรัม)	7.06	7.04	5.0102	3.3016	3.3027	0.0014
	2	7.05	7.04	5.0048	3.3043		
	3	7.04	7.01	5.0034	3.3021		

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักทรายแก้ว (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
7.5	1 (0.5 กรัม)	7.52	7.50	0.5146	4.1386	4.0129	0.2451
	2	7.52	7.52	0.5160	3.7305		
	3	7.52	7.55	0.5031	4.1697		
7.5	1 (1.0 กรัม)	7.53	7.53	1.0089	3.8440	3.8330	0.0512
	2	7.52	7.51	1.0073	3.8778		
	3	7.53	7.51	1.0028	3.7771		
7.5	1 (3.0 กรัม)	7.55	7.50	3.0021	3.8491	3.8006	0.0895
	2	7.52	7.49	3.0015	3.8553		
	3	7.55	7.52	3.0089	3.6973		
7.5	1 (5.0 กรัม)	7.52	7.50	5.0041	3.8135	4.1977	0.5909
	2	7.56	7.51	5.0065	3.9016		
	3	7.50	7.48	5.0029	4.8781		

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักทรายแก้ว (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
8.0	1 (0.5 กรัม)	8.02	8.02	0.5070	4.2655	4.2428	0.0240
	2	8.07	8.07	0.5114	4.2176		
	3	8.05	8.04	0.5320	4.2453		
8.0	1 (1.0 กรัม)	8.03	8.03	1.0028	4.4557	4.4435	0.0123
	2	8.02	8.02	1.0024	4.4311		
	3	8.04	8.04	1.0043	4.4436		
8.0	1 (3.0 กรัม)	8.08	8.00	3.0020	4.2500	4.2364	0.0156
	2	8.03	8.00	3.0055	4.2193		
	3	8.01	8.00	3.0120	4.2398		
8.0	1 (5.0 กรัม)	8.04	8.03	5.0017	4.8885	4.6634	0.2135
	2	8.06	8.02	5.0056	4.4638		
	3	8.02	8.00	5.0032	4.6378		

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักทรายแก้ว (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
8.5	1 (0.5 กรัม)	8.55	8.53	0.5070	4.5219	4.5605	0.0376
	2	8.52	8.48	0.5061	4.5970		
	3	8.58	8.53	0.5056	4.5625		
8.5	1 (1.0 กรัม)	8.50	8.50	1.0044	5.1003	4.6657	0.3770
	2	8.55	8.53	1.0075	4.4266		
	3	8.61	8.51	1.0077	4.4703		
8.5	1 (3.0 กรัม)	8.53	8.53	1.0085	4.5881	4.5871	0.0576
	2	8.52	8.52	1.0090	4.6442		
	3	8.51	8.51	1.0055	4.5290		
8.5	1 (5.0 กรัม)	8.53	8.52	5.0110	4.5459	4.4869	0.1395
	2	8.52	8.50	5.0168	4.5872		
	3	8.50	7.49	5.0103	4.3276		

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักทรายแก้ว (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
9.0	1 (0.5 กรัม)	9.00	9.00	0.5085	4.6194	4.6449	0.0360
	2	9.01	9.01	0.5060	4.6861		
	3	9.02	8.98	0.5064	4.6292		
9.0	1 (1.0 กรัม)	9.04	8.99	1.0060	4.6663	4.6691	0.0649
	2	9.01	9.00	1.0040	4.6056		
	3	9.04	8.90	1.0101	4.7353		
9.0	1 (3.0 กรัม)	9.01	9.00	3.0406	4.6571	4.6442	0.0366
	2	9.00	8.99	3.0096	4.6029		
	3	9.00	9.01	3.0066	4.6726		
9.0	1 (5.0 กรัม)	9.02	9.02	5.0091	5.0565	4.6407	0.3959
	2	9.01	9.01	5.0020	4.5975		
	3	9.02	9.02	5.0088	4.2682		

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักทรายแก้ว (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
9.5	1 (0.5 กรัม)	9.56	9.52	0.5081	4.7233	4.7206	0.0263
	2	9.52	9.52	0.5059	4.6931		
	3	9.55	9.53	0.5102	4.7455		
9.5	1 (1.0 กรัม)	9.55	9.50	1.0067	4.7368	4.7278	0.0240
	2	9.52	9.49	1.0112	4.7459		
	3	9.50	9.48	1.0077	4.7006		
9.5	1 (3.0 กรัม)	9.53	9.52	3.0052	4.7894	4.7596	0.1633
	2	9.53	9.51	3.0042	4.9060		
	3	9.52	9.49	3.0074	4.5835		
9.5	1 (5.0 กรัม)	9.51	9.50	5.0062	4.7634	4.7174	0.0625
	2	9.50	9.50	5.0088	4.6463		
	3	9.51	9.50	5.0011	4.7425		

ตารางที่ ก.2 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักทรายแก้ว (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
10.0	1 (0.5 กรัม)	10.15	10.15	0.5048	4.7508	4.7541	0.0032
	2	10.17	10.17	0.5044	4.7571		
	3	10.09	10.09	0.5032	4.7544		
10.0	1 (1.0 กรัม)	10.09	10.09	1.0024	4.7580	4.7033	0.0535
	2	10.11	10.10	1.0066	4.6511		
	3	10.01	10.00	1.0043	4.7007		
10.0	1 (3.0 กรัม)	10.10	10.09	3.0145	4.7858	4.8735	0.1016
	2	10.09	10.09	3.0107	4.9848		
	3	10.08	10.05	3.0230	4.8500		
10.0	1 (5.0 กรัม)	10.09	10.05	5.0030	4.7695	4.7446	0.0301
	2	10.09	10.07	5.0059	4.7112		
	3	10.07	10.04	5.0003	4.7531		



ตารางที่ ก.3 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP7 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP7 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
7.0	1 (0.5 กรัม)	7.04	6.97	0.5020	3.3432	3.3454	0.0036
	2	7.03	6.98	0.4997	3.3495		
	3	7.02	6.97	0.5033	3.3435		
7.0	1 (1.0 กรัม)	7.02	6.98	1.0014	3.3273	3.3317	0.0040
	2	7.09	6.98	1.0032	3.3350		
	3	7.07	6.97	1.0023	3.3328		
7.0	1 (3.0 กรัม)	7.05	6.97	3.0025	3.3882	3.3826	0.0076
	2	7.09	6.98	3.0013	3.3739		
	3	7.04	6.92	3.0000	3.3857		
7.0	1 (5.0 กรัม)	7.07	6.95	5.0066	3.3311	3.3346	0.0058
	2	7.08	6.97	5.1006	3.3314		
	3	7.04	6.98	5.1008	3.3412		

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP7 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
8.0	1 (0.5 กรัม)	8.05	7.94	0.5036	4.3351	4.3328	0.0029
	2	8.06	7.97	0.5043	4.3337		
	3	8.02	7.99	0.5012	4.3295		
8.0	1 (1.0 กรัม)	8.05	7.96	1.0081	4.3755	4.3810	0.0052
	2	8.07	7.98	1.0041	4.3857		
	3	8.02	7.99	1.0056	4.3819		
8.0	1 (3.0 กรัม)	8.08	7.96	3.0054	4.3180	4.3173	0.0008
	2	8.01	7.97	3.0034	4.3164		
	3	8.04	7.98	3.0021	4.3174		
8.0	1 (5.0 กรัม)	8.07	7.95	5.0033	4.0075	4.0081	0.0007
	2	8.03	7.99	5.0021	4.0080		
	3	8.02	8.00	5.0045	4.0088		

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP7 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
9.0	1 (0.5 กรัม)	9.03	8.93	0.5075	4.6688	4.6681	0.0144
	2	9.02	8.95	0.5054	4.6534		
	3	9.05	8.97	0.5023	4.6821		
9.0	1 (1.0 กรัม)	9.09	9.01	1.0066	4.6953	4.6943	0.0014
	2	9.06	9.04	1.0043	4.6927		
	3	9.07	9.02	1.0081	4.6949		
9.0	1 (3.0 กรัม)	9.05	9.02	3.0091	4.5943	4.5939	0.0013
	2	9.03	9.01	3.0083	4.5593		
	3	9.05	9.02	3.0031	4.5545		
9.0	1 (5.0 กรัม)	9.05	8.96	5.0070	4.5593	4.5572	0.0025
	2	9.03	8.97	5.0032	4.5545		
	3	9.05	8.96	5.0067	4.5579		

ตารางที่ ก.3 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP7 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
10.0	1 (0.5 กรัม)	10.03	9.90	0.5030	4.7537	4.7595	0.0067
	2	10.02	9.95	0.5021	4.7579		
	3	10.01	9.97	0.5043	4.7669		
10.0	1 (1.0 กรัม)	10.03	9.96	1.0034	4.7593	4.7625	0.0102
	2	10.04	9.98	1.0065	4.7543		
	3	10.07	10.01	1.0031	4.7740		
10.0	1 (3.0 กรัม)	10.07	9.93	3.0029	4.7212	4.7288	0.0073
	2	10.02	9.94	3.0021	4.7358		
	3	10.01	9.95	3.0007	4.7293		
10.0	1 (5.0 กรัม)	10.00	10.00	5.0081	4.7180	4.7190	0.0285
	2	10.01	10.00	5.0021	4.7479		
	3	10.09	10.50	5.0045	4.6910		

ตารางที่ ก.4 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP8 เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP8 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
7.0	1 (0.5 กรัม)	7.07	7.03	0.5086	3.4368	3.4380	0.0016
	2	7.05	7.01	0.5032	3.4399		
	3	7.05	7.02	0.5021	3.4374		
7.0	1 (1.0 กรัม)	7.06	7.08	1.0023	3.4781	3.4763	0.0016
	2	7.05	7.09	1.0021	3.4756		
	3	7.02	7.07	1.0034	3.5020		
7.0	1 (3.0 กรัม)	7.01	7.11	3.0046	3.5035	3.5018	0.0018
	2	7.04	7.12	3.0056	3.5000		
	3	7.05	7.15	3.0045	3.5505		
7.0	1 (5.0 กรัม)	7.05	7.16	5.0056	3.5505	3.5515	0.0057
	2	7.01	7.10	5.0023	3.5577		
	3	7.04	7.14	5.0034	3.5464		

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP8 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
8.0	1 (0.5 กรัม)	8.06	8.00	0.5089	4.1049	4.1073	0.0227
	2	8.03	8.01	0.5021	4.0858		
	3	8.01	8.00	0.5029	4.1311		
8.0	1 (1.0 กรัม)	8.05	8.05	1.0015	4.1373	4.1373	0.0002
	2	8.03	8.02	1.0034	4.1372		
	3	8.07	8.08	1.0023	4.1375		
8.0	1 (3.0 กรัม)	8.00	7.98	3.0121	4.1158	4.1207	0.0097
	2	8.01	8.00	3.0021	4.1319		
	3	8.03	8.00	3.0045	4.1145		
8.0	1 (5.0 กรัม)	8.09	8.00	5.0150	4.1009	4.1051	0.0304
	2	8.02	8.01	5.0021	4.0770		
	3	8.05	8.03	5.0056	4.1374		

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP8 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
9.0	1 (0.5 กรัม)	9.03	8.92	0.5005	4.5809	4.5771	0.1594
	2	9.02	8.90	0.5008	4.7346		
	3	9.05	8.95	0.5012	4.4159		
9.0	1 (1.0 กรัม)	9.07	8.93	1.0041	4.6203	4.6364	0.0144
	2	9.05	8.99	1.0034	4.6479		
	3	9.06	8.96	1.0021	4.6410		
9.0	1 (3.0 กรัม)	9.01	8.92	3.0043	4.5749	4.5746	0.0030
	2	9.05	8.97	3.0021	4.5775		
	3	9.06	9.00	3.0045	4.5715		
9.0	1 (5.0 กรัม)	9.04	8.92	5.0063	4.5720	4.5728	0.0116
	2	9.03	8.91	5.0021	4.5848		
	3	9.07	8.97	5.0053	4.5617		

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP8 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
10.0	1 (0.5 กรัม)	10.02	9.93	0.5026	4.6697	4.6882	0.0371
	2	10.09	9.97	0.5031	4.6641		
	3	10.04	9.95	0.5031	4.7309		
10.0	1 (1.0 กรัม)	10.07	10.03	1.0032	4.6695	4.6733	0.0197
	2	10.04	10.00	1.0021	4.6947		
	3	10.07	10.02	1.0032	4.6947		
10.0	1 (3.0 กรัม)	10.01	9.91	3.0069	4.6423	4.6476	0.0179
	2	10.08	9.97	3.0043	4.6676		
	3	10.04	9.94	3.0011	4.6330		
10.0	1 (5.0 กรัม)	10.01	9.94	5.0058	4.5941	4.6009	0.0080
	2	10.06	9.97	5.0021	4.5990		
	3	10.06	9.95	5.0043	4.6097		



ตารางที่ ก.5 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP9 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
7.0	1 (0.5 กรัม)	7.09	7.05	0.5091	3.4395	3.4337	0.0461
	2	7.07	7.05	0.5021	3.3850		
	3	7.05	7.02	0.5034	3.4766		
7.0	1 (1.0 กรัม)	7.06	7.06	1.0077	3.4522	3.4635	0.0265
	2	7.05	7.06	1.0043	3.4446		
	3	7.07	7.08	1.0052	3.4938		
7.0	1 (3.0 กรัม)	7.00	7.01	3.0056	3.4549	3.4606	0.0050
	2	7.02	7.03	3.0071	3.4641		
	3	7.08	7.09	3.0081	3.4629		
7.0	1 (5.0 กรัม)	7.03	7.09	5.0044	3.4886	3.4896	0.0084
	2	7.01	7.10	5.0054	3.4817		
	3	7.03	7.09	5.0021	3.4985		

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP9 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
8.0	1 (0.5 กรัม)	8.08	8.07	0.5089	4.3881	4.3879	0.0011
	2	8.07	8.08	0.5021	4.3889		
	3	8.03	8.03	0.5045	4.3867		
8.0	1 (1.0 กรัม)	8.00	8.01	1.0041	4.5008	4.5373	0.0771
	2	8.03	8.04	1.0089	4.5008		
	3	8.04	8.05	1.0021	4.6259		
8.0	1 (3.0 กรัม)	8.05	8.06	3.0020	4.3992	4.4022	0.0049
	2	8.06	8.08	3.0021	4.4079		
	3	8.03	8.05	3.0054	4.3996		
8.0	1 (5.0 กรัม)	8.01	8.01	5.0067	4.3520	4.3511	0.0353
	2	8.03	8.05	5.0091	4.3860		
	3	8.02	8.07	5.0076	4.3154		

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP9 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
9.0	1 (0.5 กรัม)	9.02	9.02	0.5025	4.5465	4.5484	0.0038
	2	9.04	9.04	0.5043	4.5527		
	3	9.03	9.01	0.5012	4.5459		
9.0	1 (1.0 กรัม)	9.07	9.07	1.0020	4.5665	4.5564	0.0554
	2	9.05	9.09	1.0054	4.6061		
	3	9.03	9.07	1.0034	4.4966		
9.0	1 (3.0 กรัม)	9.02	9.00	3.0022	4.5365	4.5510	0.0157
	2	9.05	9.04	3.0023	4.5677		
	3	9.04	9.00	3.0012	4.5488		
9.0	1 (5.0 กรัม)	9.04	9.00	5.0067	4.5706	4.5702	0.0323
	2	9.05	9.03	5.0078	4.6022		
	3	9.08	9.01	5.0054	4.5377		

ตารางที่ ก.5 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP9 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
10.0	1 (0.5 กรัม)	10.03	9.94	0.5075	4.5740	4.5863	0.0262
	2	10.04	9.96	0.5041	4.6164		
	3	10.08	10.00	0.5087	4.5686		
10.0	1 (1.0 กรัม)	10.05	10.02	1.0029	4.7153	4.7174	0.0263
	2	10.07	10.05	1.0034	4.7447		
	3	10.03	10.10	1.0039	4.6922		
10.0	1 (3.0 กรัม)	10.02	10.01	3.0008	4.7080	4.7054	0.0128
	2	10.08	10.05	3.0011	4.7166		
	3	10.04	10.02	3.0032	4.6915		
10.0	1 (5.0 กรัม)	10.02	10.01	5.0098	4.7147	4.7125	0.0029
	2	10.03	10.01	5.0021	4.7093		
	3	10.05	10.03	5.0034	4.7136		

ตารางที่ ก.6 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP10 เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP10 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
7.0	1 (0.5 กรัม)	7.07	7.16	0.5028	3.6325	3.6330	0.0116
	2	7.02	7.14	0.5032	3.6217		
	3	7.01	7.07	0.5061	3.6448		
7.0	1 (1.0 กรัม)	7.02	7.16	1.0036	3.6427	3.6420	0.0026
	2	7.02	7.12	1.0032	3.6391		
	3	7.05	7.20	1.0056	3.6442		
7.0	1 (3.0 กรัม)	7.07	7.21	3.0042	3.6736	3.6762	0.0023
	2	7.01	7.17	3.0021	3.6770		
	3	7.03	7.19	3.0041	3.6781		
7.0	1 (5.0 กรัม)	7.05	7.18	5.0095	3.6801	3.7010	0.0437
	2	7.03	7.14	5.0087	3.7513		
	3	7.04	7.16	5.0032	3.6717		

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP10 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
8.0	1 (0.5 กรัม)	8.02	8.02	0.5022	4.3313	4.3892	0.0507
	2	8.03	8.07	0.5074	4.4255		
	3	8.05	8.05	0.5053	4.4108		
8.0	1 (1.0 กรัม)	8.04	8.04	1.0091	4.4117	4.4118	0.0075
	2	8.05	8.07	1.0056	4.4194		
	3	8.02	8.04	1.0076	4.4044		
8.0	1 (3.0 กรัม)	8.06	8.08	3.0038	4.4052	4.4045	0.0015
	2	8.07	8.10	3.0045	4.4055		
	3	8.04	8.09	3.0072	4.4028		
8.0	1 (5.0 กรัม)	8.07	8.21	5.0096	4.1262	4.1230	0.0088
	2	8.01	8.14	5.0032	4.1298		
	3	8.06	8.17	5.0049	4.1131		

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP10 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
9.0	1 (0.5 กรัม)	9.09	9.11	0.5033	4.5541	4.5551	0.0015
	2	9.06	9.09	0.5032	4.5545		
	3	9.07	9.10	0.5041	4.5568		
9.0	1 (1.0 กรัม)	9.05	9.05	1.0003	4.7166	4.7182	0.0027
	2	9.03	9.06	1.0011	4.7213		
	3	9.05	9.06	1.0032	4.7168		
9.0	1 (3.0 กรัม)	9.03	9.10	3.0029	4.7245	4.7252	0.0006
	2	9.06	9.07	3.0014	4.7256		
	3	9.03	9.14	3.0045	4.7255		
9.0	1 (5.0 กรัม)	9.00	9.15	5.0031	4.7008	4.7058	0.0060
	2	9.03	9.19	5.0048	4.7124		
	3	9.08	9.20	5.0780	4.7042		

ตารางที่ ก.6 (ต่อ)

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP10 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
10.0	1 (0.5 กรัม)	10.08	10.00	0.5054	4.7422	4.7681	0.0265
	2	10.04	10.01	0.5041	4.7952		
	3	10.07	10.02	0.5078	4.7670		
10.0	1 (1.0 กรัม)	10.04	10.00	1.0095	4.7725	4.7724	0.0021
	2	10.03	10.00	1.0079	4.7702		
	3	10.05	10.01	1.0045	4.7744		
10.0	1 (3.0 กรัม)	10.04	10.03	3.0023	4.7388	4.7376	0.0013
	2	10.04	10.02	3.0045	4.7362		
	3	10.03	10.00	3.0021	4.7378		
10.0	1 (5.0 กรัม)	10.08	10.05	5.0027	4.7836	4.7799	0.0072
	2	10.06	10.04	5.0043	4.7846		
	3	10.01	10.00	5.0021	4.7716		



ตารางที่ ก.7 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าส้มผัด โดยวัสดุเป่าส้มผัดที่ใช้ คือ MAP7 MAP8 MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ปริมาณฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส (เปอร์เซ็นต์)	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
pH 7.0	393.75	395.20	394.47	394.47	36.32	0.1174
pH 7.5	290.11	286.35	284.13	286.86	53.69	0.4882
pH 8.0	160.11	161.38	162.11	161.20	53.69	0.1634
pH 8.5	99.75	103.93	102.29	101.99	73.98	0.3402
pH 9.0	82.47	83.93	87.56	84.65	83.54	0.4233
pH 9.5	79.56	80.29	79.38	79.75	86.33	0.0777
pH 10.0	76.11	73.02	74.84	74.65	87.13	0.2508
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 7.0	301.02	300.47	300.84	300.78	51.45	0.0448
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 7.5	175.93	179.56	174.11	176.53	71.50	0.4483
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 8.0	195.93	191.56	193.75	193.75	68.72	0.3522
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 8.5	9.02	9.38	6.47	8.29	98.66	0.2559
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 9.0	152.11	153.56	153.93	153.20	75.27	0.1553

ตารางที่ ก.7 (ต่อ)

พีเอช	ปริมาณฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส (เปอร์เซ็นต์)	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 9.5	153.38	155.93	153.20	154.17	75.11	0.2461
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 10.0	145.02	145.75	147.20	145.99	76.43	0.1793
MAP7 = 1.0 กรัม_pH 7	420.84	422.11	421.56	421.50	31.96	0.1031
MAP7 = 1.0 กรัม_pH 8	290.11	285.02	287.56	287.56	53.58	0.4109
MAP7 = 1.0 กรัม_pH 9	223.93	228.11	225.38	225.81	63.55	0.3427
MAP7 = 1.0 กรัม_pH 10	156.47	158.47	156.65	157.20	74.62	0.1785
MAP8 = 1.0 กรัม_pH 7	348.65	350.65	349.02	349.44	43.59	0.1720
MAP8 = 1.0 กรัม_pH 8	247.02	247.38	247.93	247.44	60.06	0.0739
MAP8 = 1.0 กรัม_pH 9	183.75	185.38	185.56	184.90	70.15	0.1616
MAP8 = 1.0 กรัม_pH 10	191.56	189.75	190.84	190.72	69.21	0.1477
MAP9 = 1.0 กรัม_pH 7	534.47	531.20	531.93	532.53	14.03	0.2774
MAP9 = 1.0 กรัม_pH 8	47.20	48.29	47.20	47.56	92.32	0.1017
MAP9 = 1.0 กรัม_pH 9	159.20	153.38	159.93	157.50	74.57	0.5791
MAP9 = 1.0 กรัม_pH 10	167.20	170.47	167.93	168.53	72.79	0.2774

ตารางที่ ก.7 (ต่อ)

พีเอช	ปริมาณฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส (เปอร์เซ็นต์)	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
MAP10 = 1.0 กรัม_pH 7	387.56	389.02	389.02	388.53	37.28	0.1356
MAP10 = 1.0 กรัม_pH 8	216.84	218.29	218.65	217.93	64.82	0.1553
MAP10 = 1.0 กรัม_pH 9	244.84	246.29	245.38	245.50	60.37	0.1186
MAP10 = 1.0 กรัม_pH 10	257.20	259.75	258.11	258.35	58.30	0.2082

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียไนโตรเจน เมื่อไม่เติมและเติมวัสดุเป่าสัมผัส โดยวัสดุเป่าสัมผัสที่ใช้ คือ MAP7 MAP8 MAP9 MAP10 และทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่พีเอช 7-10

พีเอช	ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัด แอมโมเนียไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
pH 7.0	140.00	140.00	137.20	139.07	50.36	0.5771
pH 7.5	70.00	71.40	70.00	70.47	74.85	0.2885
pH 8.0	44.80	46.20	47.60	46.20	83.51	0.4998
pH 8.5	33.60	35.00	33.60	34.07	87.84	0.2885
pH 9.0	25.20	25.20	26.60	25.67	90.84	0.2885
pH 9.5	16.80	18.20	19.60	18.20	93.50	0.4998
pH 10.0	14.00	15.40	15.40	14.93	94.67	0.2885
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 7.0	77.00	76.72	77.00	76.91	72.55	0.0577
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 7.5	46.20	47.60	47.60	47.13	83.17	0.2885
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 8.0	36.40	36.40	39.20	37.33	86.67	0.5771
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 8.5	22.40	25.20	23.80	23.80	91.50	0.4998
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 9.0	21.00	22.40	22.40	21.93	92.17	0.2885

ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

พีเอช	ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัด แอมโมเนียมไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 9.5	19.60	19.60	21.00	20.07	92.84	0.2885
ทรายแก้ว = 1.0 กรัม_pH 10.0	19.60	19.60	19.60	19.60	93.00	0.0000
MAP7 = 1.0 กรัม_pH 7	50.40	47.60	50.40	49.47	82.34	0.5771
MAP7 = 1.0 กรัม_pH 8	37.80	39.20	39.20	38.73	86.17	0.2885
MAP7 = 1.0 กรัม_pH 9	19.60	22.40	19.60	20.53	92.67	0.5771
MAP7 = 1.0 กรัม_pH 10	11.20	11.20	9.80	10.73	96.17	0.2885
MAP8 = 1.0 กรัม_pH 7	58.80	58.80	61.60	59.73	78.68	0.5771
MAP8 = 1.0 กรัม_pH 8	50.40	50.40	47.60	49.47	82.34	0.5771
MAP8 = 1.0 กรัม_pH 9	16.80	16.80	19.60	17.73	93.67	0.5771
MAP8 = 1.0 กรัม_pH 10	8.40	8.40	8.40	8.40	97.00	0.0000
MAP9 = 1.0 กรัม_pH 7	72.80	72.80	74.20	73.27	73.85	0.2885
MAP9 = 1.0 กรัม_pH 8	30.80	33.60	30.80	31.73	88.67	0.5771
MAP9 = 1.0 กรัม_pH 9	29.40	30.80	30.80	30.33	89.17	0.2885
MAP9 = 1.0 กรัม_pH 10	19.60	22.40	19.60	20.53	92.67	0.5771

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 (ต่อ)

พีเอช	ปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัด แอมโมเนียมไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
MAP10 = 1.0 กรัม_pH 7	86.80	84.00	86.80	85.87	69.35	0.5771
MAP10 = 1.0 กรัม_pH 8	30.80	30.80	30.80	30.80	89.01	0.0000
MAP10 = 1.0 กรัม_pH 9	28.00	28.00	25.20	27.07	90.34	0.5771
MAP10 = 1.0 กรัม_pH 10	25.20	25.20	26.60	25.67	90.84	0.2885

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 ปริมาณตะกอนผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการทดลอง	พีเอชหลังทำการทดลอง			
8.0	1	8.03	8.00	3.1948	3.1713	0.0241
	2	8.02	8.01	3.1467		
	3	8.02	8.02	3.1723		
8.5	1	8.54	8.54	3.5813	3.5585	0.0198
	2	8.55	8.53	3.5491		
	3	8.58	8.55	3.5451		
9.0	1	9.01	9.00	4.0871	4.0443	0.0371
	2	9.03	9.01	4.0224		
	3	9.00	9.93	4.0234		

ตารางที่ ก.10 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าสัมผัส ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนักทรายแก้ว (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
8.0	1	8.09	8.03	1.0086	3.3398	3.3177	0.0197
	2	8.01	7.99	1.0052	3.3018		
	3	8.05	8.02	1.0043	3.3115		
8.5	1	8.51	8.51	1.0050	3.7004	3.8494	0.1453
	2	8.52	8.52	1.0050	3.8572		
	3	8.57	8.57	1.0068	3.9907		
9.0	1	9.01	8.98	1.0023	4.1728	4.1763	0.0037
	2	9.03	8.99	1.0042	4.1801		
	3	9.02	8.98	1.0032	4.1760		



ตารางที่ ก.11 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP9 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
8.0	1	8.03	7.94	1.0051	3.2283	3.2328	0.0077
	2	8.04	7.93	1.0087	3.2417		
	3	8.03	7.98	1.0078	3.2284		
8.5	1	8.54	8.54	1.0071	3.9048	3.9000	0.0042
	2	8.54	8.56	1.0070	3.8971		
	3	8.55	8.55	1.0056	3.8981		
9.0	1	9.02	8.97	1.0054	4.2506	4.2670	0.0164
	2	9.05	8.98	1.0063	4.2833		
	3	9.04	8.99	1.0078	4.2670		

ตารางที่ ก.12 ปริมาณตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ MAP10 ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

พีเอช	ครั้งที่	พีเอช		น้ำหนัก MAP10 (กรัม)	น้ำหนักตะกอน (กรัมต่อลิตร)	น้ำหนักตะกอนเฉลี่ย (กรัมต่อลิตร)	SD
		พีเอชก่อนทำการ ทดลอง	พีเอชหลังทำการ ทดลอง				
8.0	1	8.04	8.01	1.0032	3.4876	3.5704	0.0966
	2	8.06	8.05	1.0027	3.6766		
	3	8.05	8.03	1.0045	3.5470		
8.5	1	8.52	8.50	1.0089	4.0345	4.0211	0.0183
	2	8.55	8.49	1.0070	4.0003		
	3	8.56	8.51	1.0062	4.0285		
9.0	1	9.08	9.02	1.0021	4.3202	4.3375	0.0749
	2	9.03	8.98	1.0068	4.2728		
	3	9.01	8.97	1.0032	4.4195		

ตารางที่ ก.13 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1. ซีไอดี	8.0	369.23	295.38	295.38	320.00	58.74	5.4966
	8.5	221.54	295.38	295.38	270.77	65.09	5.4966
	9.0	221.54	221.54	221.54	221.54	71.44	0.0000
2. ปริมาณไนโตรเจน ทั้งหมด	8.0	63.00	65.80	65.80	64.87	77.51	0.5605
	8.5	65.80	64.40	64.40	64.87	77.51	0.2803
	9.0	61.60	63.00	63.00	62.53	78.32	0.2803
3. ของแข็งแขวนลอย	8.0	75.00	74.00	76.00	75.33	82.23	0.2723
	8.5	36.00	42.00	38.00	38.67	90.88	0.7205
	9.0	12.00	6.00	14.00	10.67	97.48	0.9819
4. ปริมาณฟอสฟอรัส ทั้งหมด	8.0	206.05	205.69	205.51	205.75	-177.10	0.3740
	8.5	136.96	139.87	134.42	137.08	-177.10	3.6757
	9.0	95.69	101.32	98.42	98.48	-32.63	3.7961

ตารางที่ ก.13 (ต่อ)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
5. ปริมาณแอมโมเนีย	8.0	142.35	137.85	134.35	138.18	-101.04	5.8347
	8.5	121.35	127.35	126.85	125.18	-82.13	4.8436
	9.0	99.85	99.85	101.35	102.02	-48.42	3.7330
6. ปริมาณแคลเซียม	8.0	4.35	4.44	4.44	4.41	88.81	0.1182
	8.5	4.19	4.19	3.87	4.09	89.63	0.1862
	9.0	2.66	2.84	2.89	2.80	92.90	0.3018
7. ปริมาณโพแทสเซียม	8.0	24.72	24.70	24.38	24.71	34.96	0.0324
	8.5	25.02	25.00	24.99	24.81	34.70	0.3732
	9.0	25.00	24.99	25.12	25.04	34.13	0.1868

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.13 (ต่อ)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
8. ปริมาณเหล็ก	8.0	0.15	0.19	0.145	0.16	96.63	1.0932
	8.5	0.15	0.10	0.10	0.11	97.40	0.0261
	9.0	0.10	0.05	0.10	0.08	97.48	0.0663
9. ปริมาณทองแดง	8.0	0.51	0.55	0.55	0.54	27.44	3.5303
	8.5	0.24	0.33	0.33	0.30	60.05	0.0522
	9.0	0.10	0.14	0.10	0.11	84.51	3.5303
10. ปริมาณสังกะสี	8.0	0.58	0.62	0.60	0.60	77.66	0.7920
	8.5	0.50	0.51	0.55	0.52	80.69	0.0251
	9.0	0.44	0.48	0.43	0.45	0.7920	1.0793

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.14 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ทรายแก้ว ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มฝัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร  
ที่พีเอช 8-9

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1. ซีไอดี	8.0	295.38	295.38	295.38	295.38	61.92	0.0000
	8.5	295.38	295.38	295.38	295.38	61.92	0.0000
	9.0	295.38	221.54	295.38	270.77	65.09	5.4966
2. ปริมาณไนโตรเจน ทั้งหมด	8.0	61.60	60.20	58.80	60.20	79.13	0.4854
	8.5	54.60	54.60	53.20	54.13	81.23	0.2803
	9.0	28.00	26.60	28.00	27.53	90.45	0.2803
3. ของแข็งแขวนลอย	8.0	6.00	0.00	6.00	4.00	99.06	0.8170
	8.5	12.00	10.00	16.99	12.67	97.01	0.7205
	9.0	26.00	24.00	22.00	24.00	94.34	0.4717

ตารางที่ ก.14 (ต่อ)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
4. ปริมาณฟอสฟอรัส ทั้งหมด	8.0	206.60	205.33	206.05	205.99	-177.42	0.8599
	8.5	136.24	136.42	136.24	136.30	-83.56	0.1414
	9.0	77.33	76.78	77.15	77.08	-3.81	0.3740
5. ปริมาณแมกนีเซียม	8.0	131.85	130.35	131.85	131.35	-91.10	1.2600
	8.5	114.35	111.35	113.35	113.02	-64.43	2.2224
	9.0	88.85	85.35	83.35	85.85	-24.90	4.0502
6. ปริมาณแคลเซียม	8.0	3.71	3.87	3.79	3.79	90.38	0.2047
	8.5	2.82	1.85	2.50	2.39	93.93	1.2510
	9.0	0.81	0.48	0.65	0.65	98.36	0.4095
7. ปริมาณโพแทสเซียม	8.0	24.38	23.98	24.60	24.32	36.79	0.8149
	8.5	24.25	24.13	24.22	24.20	37.11	0.1633
	9.0	24.36	24.28	24.34	24.33	36.78	0.1035

ตารางที่ ก.14 (ต่อ)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
8. ปริมาณเหล็ก	8.0	0.14	0.14	0.14	0.14	95.37	0.0000
	8.5	0.14	0.14	0.05	0.07	97.78	0.8346
	9.0	0.10	0.05	0.05	0.07	97.78	0.8346
9. ปริมาณทองแดง	8.0	0.25	0.28	0.25	64.96	64.96	2.1672
	8.5	0.03	0.03	0.03	96.25	96.25	0.0000
	9.0	0.31	0.33	0.33	57.46	57.46	2.1672
10. ปริมาณสังกะสี	8.0	0.58	0.57	0.57	0.57	78.79	0.1497
	8.5	0.46	0.33	0.39	0.40	85.27	2.4639
	9.0	0.44	0.58	0.51	0.51	81.12	2.5967



ตารางที่ ก.15 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP9 ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร  
ที่พีเอช 8-9

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1. ซีไอดี	8.0	258.46	221.54	221.54	233.85	69.85	2.7483
	8.5	443.08	221.54	369.23	344.62	55.57	14.5427
	9.0	221.54	221.54	221.54	221.54	71.44	0.0000
2. ปริมาณไนโตรเจน ทั้งหมด	8.0	61.60	61.60	61.60	61.60	78.64	0.0000
	8.5	53.20	51.80	50.40	51.80	82.04	0.4854
	9.0	19.60	18.20	18.20	18.67	93.53	0.2803
3. ของแข็งแขวนลอย	8.0	30.00	28.00	30.00	29.33	93.08	0.2723
	8.5	16.00	18.00	18.00	17.33	95.91	0.2723
	9.0	8.00	8.00	10.00	8.67	97.96	0.2723

ตารางที่ ก.15 (ต่อ)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
4. ปริมาณฟอสฟอรัส ทั้งหมด	8.0	195.51	195.69	194.78	195.33	-163.06	0.6479
	8.5	138.05	136.60	137.51	137.39	-85.03	0.9896
	9.0	91.51	91.15	90.60	91.08	-22.67	0.6162
5. ปริมาณแมกนีเซียม	8.0	136.85	132.35	135.85	135.02	-96.43	3.4378
	8.5	102.35	98.35	101.35	100.68	-46.48	3.0286
	9.0	95.35	88.85	88.85	90.85	3.4378	5.6815
6. ปริมาณแคลเซียม	8.0	3.63	3.23	3.47	3.44	91.26	0.5152
	8.5	0.48	3.15	1.94	1.85	95.29	3.3828
	9.0	1.85	1.21	0.32	1.85	97.13	1.9530
7. ปริมาณโพแทสเซียม	8.0	23.97	24.75	24.51	24.41	36.56	1.0315
	8.5	24.38	24.00	24.50	24.29	36.87	0.6898
	9.0	24.17	24.17	24.17	24.17	37.18	0.0000

ตารางที่ ก.15 (ต่อ)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
8. ปริมาณเหล็ก	8.0	0.01	0.14	0.10	0.08	97.30	2.2083
	8.5	0.19	0.10	0.10	0.13	95.86	1.6693
	9.0	0.14	0.19	0.19	0.16	94.89	0.8346
9. ปริมาณทองแดง	8.0	0.31	0.25	0.28	0.28	62.46	3.7538
	8.5	0.31	0.28	0.28	0.29	61.21	2.1672
	9.0	0.31	0.36	0.33	0.33	54.95	3.7538
10. ปริมาณสังกะสี	8.0	0.62	0.57	0.60	0.60	77.84	0.9347
	8.5	0.51	0.37	0.43	0.44	83.80	2.4730
	9.0	0.67	0.66	0.58	0.64	76.37	1.7261

ตารางที่ ก.16 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP เมื่อใช้ผลึก MAP10 ปริมาณ 1.0 กรัม เป็นวัสดุเป่าส้มผัด ในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร ที่พีเอช 8-9

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1. ซีไอดี	8.0	258.46	221.54	221.54	233.85	69.85	2.7483
	8.5	221.54	221.54	221.54	221.54	71.44	0.0000
	9.0	295.38	221.54	221.54	246.15	68.27	5.4966
2. ปริมาณไนโตรเจน ทั้งหมด	8.0	65.80	63.00	64.40	64.40	77.67	0.4854
	8.5	42.00	40.60	40.60	41.07	85.76	0.2803
	9.0	28.00	26.60	29.40	28.00	90.29	0.4854
3. ของแข็งแขวนลอย	8.0	22.00	14.00	16.00	17.33	95.91	0.9819
	8.5	8.00	8.00	10.00	8.67	97.96	0.2723
	9.0	8.00	0.00	6.00	4.67	98.90	0.9819

ตาราง ก.16 (ต่อ)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
4. ปริมาณฟอสฟอรัส ทั้งหมด	8.0	172.60	171.69	172.24	172.18	-131.88	0.6162
	8.5	130.78	129.51	130.24	130.18	-75.32	0.8599
	9.0	97.51	98.60	98.05	98.05	-32.06	0.7346
5. ปริมาณแมกนีเซียม	8.0	130.85	124.35	129.85	128.35	-86.74	5.0921
	8.5	94.85	92.35	93.85	93.68	-36.30	1.8307
	9.0	71.35	73.35	73.35	72.68	-5.75	1.6800
6. ปริมาณแคลเซียม	8.0	3.55	3.06	3.47	3.36	91.47	0.6581
	8.5	1.85	1.69	1.61	1.72	95.63	0.3127
	9.0	0.24	0.32	0.32	0.30	99.25	0.1182
7. ปริมาณโพแทสเซียม	8.0	24.17	24.15	24.16	24.16	37.21	0.0287
	8.5	24.07	24.47	24.33	24.29	36.88	0.5235
	9.0	24.05	24.16	24.13	24.11	37.34	0.1474

ตารางที่ ก.16 (ต่อ)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	พีเอช	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ					
		น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรหลังตกตะกอนผลึกMAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์ม สุกรหลังตกตะกอนผลึก MAP (เปอร์เซ็นต์)	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
8. ปริมาณเหล็ก	8.0	0.10	0.10	0.10	0.10	96.82	0.0000
	8.5	0.05	0.05	0.05	0.05	98.27	0.0000
	9.0	0.05	0.05	0.05	0.05	98.27	0.0000
9. ปริมาณทองแดง	8.0	0.28	0.25	0.25	0.26	64.96	2.1672
	8.5	0.28	0.31	0.28	0.29	61.21	2.1672
	9.0	0.33	0.36	0.33	0.34	53.70	2.1672
10. ปริมาณสังกะสี	8.0	0.58	0.50	0.55	0.55	79.74	1.5840
	8.5	0.42	0.55	0.50	0.49	81.81	2.3523
	9.0	0.58	0.46	0.52	0.52	80.69	2.0739

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข.

มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรและการระบายน้ำลงทางชลประทาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



**ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม**  
**เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษ**  
**ประเภทการเลี้ยงสุกร**

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๕๕ แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ อันเป็นพระราชบัญญัติที่มีบทบัญญัติบางประการเกี่ยวกับการจำกัดสิทธิและเสรีภาพของบุคคล ซึ่งมาตรา ๒๘ ประกอบกับมาตรา ๓๕ มาตรา ๔๘ มาตรา ๕๐ และมาตรา ๕๑ ของรัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย บัญญัติให้กระทำได้โดยอาศัยอำนาจตามบทบัญญัติแห่งกฎหมาย รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม โดยคำแนะนำของคณะกรรมการควบคุมมลพิษ และโดยความเห็นชอบของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร ไว้ดังต่อไปนี้

**ข้อ ๑ ในประกาศนี้**

“การเลี้ยงสุกร” หมายความว่า การเลี้ยงสุกรพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ สุกรขุนหรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปตามน้ำหนักรวมหน่วยปศุสัตว์

“น้ำหนักรวมหน่วยปศุสัตว์ ๑ หน่วย” หมายความว่า น้ำหนักสุทธิของสุกรพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ สุกรขุน หรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปที่มีน้ำหนักรวมกันเท่ากับ ๕๐๐ กิโลกรัม โดยให้คิดคำนวณน้ำหนักเฉลี่ยของสุกรพ่อพันธุ์หรือแม่พันธุ์ตัวละ ๑๗๐ กิโลกรัม สุกรขุนตัวละ ๖๐ กิโลกรัม และลูกสุกรตัวละ ๑๒ กิโลกรัม

“การเลี้ยงสุกรประเภท ก” หมายความว่า การเลี้ยงสุกรพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ สุกรขุน หรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ที่มีน้ำหนักรวมหน่วยปศุสัตว์เกินกว่า ๖๐๐ หน่วย



“การเลี้ยงสุกรประเภท ข” หมายความว่า การเลี้ยงสุกรพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ สุกรขุน หรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ที่มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ ตั้งแต่ ๖๐ หน่วย แต่ไม่เกิน ๖๐๐ หน่วย

“การเลี้ยงสุกรประเภท ก” หมายความว่า การเลี้ยงสุกรพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ สุกรขุน หรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ที่มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ ตั้งแต่ ๖ หน่วย แต่ไม่ถึง ๖๐ หน่วย

“น้ำทิ้ง” หมายความว่า น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแล้วจนเป็นไปตาม มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งตามที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ ๒ ให้แบ่งประเภทการเลี้ยงสุกรตามข้อ ๑ ออกเป็น ๓ ประเภท คือ

- (๑) การเลี้ยงสุกรประเภท ก
- (๒) การเลี้ยงสุกรประเภท ข
- (๓) การเลี้ยงสุกรประเภท ค

ข้อ ๓ มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากการเลี้ยงสุกรประเภท ก ต้องมีค่า ดังต่อไปนี้

- (๑) ความเป็นกรดและด่าง (pH Value) ระหว่าง ๕.๕ ถึง ๘
- (๒) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ไม่เกิน ๖๐ มิลลิกรัมต่อลิตร
- (๓) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่เกิน ๑๕๐ มิลลิกรัมต่อลิตร
- (๔) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่เกิน ๓๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร
- (๕) ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)

ไม่เกิน ๑๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ ๔ มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากการเลี้ยงสุกรประเภท ข และประเภท ค ต้องมีค่าดังต่อไปนี้

- (๑) ความเป็นกรดและด่าง ระหว่าง ๕.๕ ถึง ๘
- (๒) บีโอดี ไม่เกิน ๑๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร
- (๓) สารแขวนลอย ไม่เกิน ๒๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร
- (๔) ซีโอดี ไม่เกิน ๔๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร
- (๕) ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ไม่เกิน ๒๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ ๕ การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งให้เก็บแบบชั่ววง (Grab Sampling) จากจุดที่สถานี ที่เลี้ยงสุกรระบายน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม ในกรณีสถานีที่เลี้ยงสุกรมีการระบายน้ำทิ้งหลายจุด ให้เก็บทุกจุดที่มีการระบายน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม

- ข้อ ๖** การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากการเลี้ยงสุกรให้ใช้วิธีการดังต่อไปนี้
- (๑) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter) แบบ Electrometric Titrator ที่มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า ๐.๑ หน่วย
  - (๒) การตรวจสอบค่าปิไอดีให้ใช้วิธีการอะไซด์ โมดิฟิเคชัน (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ ๒๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๕ วัน คัดคอกันหรือวิธีการ Membrane Electrode
  - (๓) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอยให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc) และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ ๑๐๓ - ๑๐๕ องศาเซลเซียส
  - (๔) การตรวจสอบค่าซีไอดีให้ใช้วิธีการย่อยสลายโดยโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion) แบบ Open Reflux หรือ Closed Reflux
  - (๕) การตรวจสอบค่าไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นให้ใช้วิธีการเจลดาล์ (Kjeldahl) และให้ตรวจวัดแอมโมเนียที่เกิดขึ้นด้วยวิธีการ Colorimetric หรือ Ammonia Selective Electrode
- ข้อ ๗** การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากการเลี้ยงสุกรตามข้อ ๖ ต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำเสียที่สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยกำหนดไว้ หรือตามวิธีการมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) ที่ American Public Health Association, American Water Work Association และ Water Environment Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ หรือตามวิธีการอื่นที่กรมควบคุมมลพิษประกาศในราชกิจจานุเบกษา

ประกาศ ณ วันที่ ๖ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๔๔

อาทิตย์ อุไรรัตน์

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม ๑๑๘ ตอนพิเศษ ๑๘ ง วันที่ ๒๓ กุมภาพันธ์ ๒๕๔๔)

ตารางที่ ข.1 มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทานและทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับ  
ทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)
1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6.5-8.5
2. ความนำไฟฟ้า	ไมโครโมลต์ต่อซม.	2,000
3. ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	1,300
4. บีโอดี (BOD <sub>5</sub> )	มิลลิกรัมต่อลิตร	20
5. สารแขวนลอย (SS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	30
6.เปอร์มังกาเนต (PV)	มิลลิกรัมต่อลิตร	6.0
7.ซัลไฟด์คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0
8.ไซยาไนด์คิดเทียบเป็นไฮโดรเจน ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.2
9.น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	มิลลิกรัมต่อลิตร	5.0
10.ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0
11.ฟีนอลและ/หรือครีโซล	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0
12.คลอรีนอิสระ (Free chlorine)	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0
13.ยาฆ่าแมลง	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มีเลย
14.สารกัมมันตรังสี	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่มีเลย
15.สีและกลิ่น (Colour and Odour)	-	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
16.น้ำมันทาร์ (Tar)	-	ไม่มีเลย

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)
17. โลหะหนัก		
- สังกะสี (Zn)	มิลลิกรัมต่อลิตร	5.0
- โครเมียม (Cr)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.3
- อาร์เซนิก (As)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.25
- ทองแดง (Cu)	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0
- ปรอท (Hg)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.005
- แคดเมียม (Cd)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.03
- แบเรียม (Ba)	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0
- ซีลีเนียม (Se)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.02
- ตะกั่ว (Pb)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.1
- นิกเกิล (Ni)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.2
- แมงกานีส (Mn)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

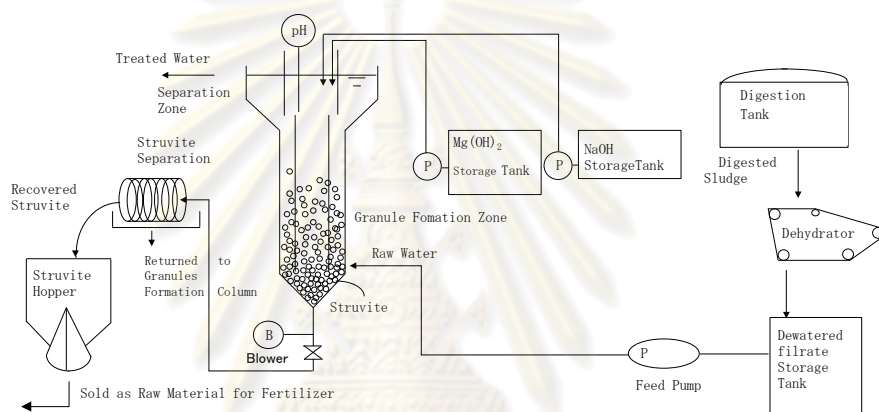


ภาคผนวก ค.

ตัวอย่างการนำไปใช้และประโยชน์ของปุ๋ย MAP

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1. การนำไปใช้ ในประเทศญี่ปุ่น



- รองรับน้ำเสีย (น้ำเสียที่ได้มาจากกระบวนการรีดตะกอน) ขนาด 1,150 ลูกบาศก์เมตร ต่อวัน
- ปรับให้ได้อัตราส่วน Mg:P = 1:1 ( $H_3PO_4$ -P เท่ากับ 100-110 มิลลิกรัมต่อลิตร และ  $NH_4$ -N เท่ากับ 200-250 มิลลิกรัมต่อลิตร) เติม  $Mg(OH)_2$
- ปรับให้มีค่าพีเอช 8.2-8.8 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- เริ่มตกตะกอนลงภายใน 10 วัน
- บำบัดฟอสฟอรัสได้ 90 เปอร์เซ็นต์
- กำลังการผลิต 1,150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถผลิต MAP ได้เท่ากับ 500-550 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่ง MAP ที่ได้จะส่งไปขายที่โรงงานผลิตปุ๋ย (ราคา 250 ยูโรต่อตัน หรือ 11,250 บาทต่อตัน เมื่อ 1 ยูโร เท่ากับ 45 บาท)

ตารางที่ ค.1 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนที่ผลิตได้ระหว่างในประเทศญี่ปุ่นกับการทดลอง

	ปริมาณตะกอน : 1,150 m <sup>3</sup> /d (กิโลกรัมต่อวัน)	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)
ญี่ปุ่น	500-550	} 11.25
การทดลอง	1495	

- ที่  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-} = 1 : 1 : 1$  (MAP9 1.0 g\_pH8.5) ปริมาณตะกอนที่ผลิตได้ประมาณ 3.90 กรัมต่อลิตร (Lab scale)

นำปริมาณตะกอนที่ได้มาขยายผลใช้กับฟาร์มสุกร สามารถคำนวณปริมาณตะกอนผลึก MAP ที่สามารถผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ซึ่งน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร เท่ากับ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น สามารถผลิตปุ๋ย MAP ได้} &= \frac{70 \text{ m}^3}{\text{d}} \times \frac{3.90 \text{ g}}{\text{L}} \times \frac{1,000 \text{ L}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{kg}}{1,000 \text{ g}} \\ &= 273 \text{ กิโลกรัมต่อวัน} \end{aligned}$$

ในการผลิต MAP ในระดับโรงงานต้นแบบ (Full scale plant) ตะกอนผลึก MAP ที่ได้จะส่งไปขายที่โรงงานผลิตปุ๋ย ในราคาขาย 250 ยูโรต่อตัน หรือเท่ากับ 11,250 บาทต่อตัน (1 ยูโร เท่ากับ 45 บาท) ซึ่งในงานวิจัยหากมีการขยายผลใช้กับฟาร์มสุกร สามารถผลิตปุ๋ย MAP ได้เท่ากับ 273 กิโลกรัมต่อวัน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น สามารถขายได้} &= \frac{273 \text{ kg}}{\text{d}} \times \frac{11,250 \text{ บาท}}{\text{ton}} \times \frac{\text{ton}}{1,000 \text{ kg}} \\ &= 3,072 \text{ บาทต่อวัน} \\ &= \frac{3,072 \text{ บาท}}{\text{d}} \times \frac{30 \text{ d}}{\text{month}} ; 1 \text{ เดือน เท่ากับ } 30 \text{ วัน} \\ &= 92,130 \text{ บาทต่อเดือน} \end{aligned}$$

## ตารางที่ ค.2 เปรียบเทียบราคาปุ๋ย

ประเภทปุ๋ย	ราคา (บาทต่อตัน)
ปุ๋ยอินทรีย์	2,500-6,000
ปุ๋ย MAP	11,250
ปุ๋ยเคมี	9,000-14,000

หมายเหตุ: ราคาปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมีเป็นราคาเฉลี่ยที่เรโซปุ๋ย 1:1:1

จากข้อมูลในตาราง พบว่า ปุ๋ยเคมี > ปุ๋ย MAP > ปุ๋ยอินทรีย์ ดังนั้นในการผลิตปุ๋ย MAP จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้แทนปุ๋ยเคมี เนื่องจากในการผลิตปุ๋ยเคมีต้องใช้พลังงานและเสียค่าใช้จ่ายสูง แต่ปุ๋ย MAP เป็นการนำน้ำทิ้งที่มีปริมาณธาตุอาหารแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต ในปริมาณที่สูงมาใช้ประโยชน์ต่อ ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำและสามารถเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรหรือเจ้าของฟาร์มด้วย

## 2. ประโยชน์ของปุ๋ย MAP

- ในกระบวนการผลิตปุ๋ย MAP สามารถนำไปเป็นส่วนผสมกับธาตุอาหารอื่นๆ ให้มีคุณภาพทัดเทียมกับปุ๋ยชนิดอื่นๆ ที่ขายอยู่ในท้องตลาด

- ปุ๋ย MAP ที่ได้ นิยมนำไปปลูกข้าว พืชผัก ไม้ดอก ไม้ประดับ และไม้ยืนต้น เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาในประเทศญี่ปุ่น พบว่า ปุ๋ย MAP จะได้ผลผลิตดีกับการปลูกข้าว ดังแสดงในรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 ปุ๋ยที่จำหน่ายทางการค้าที่มีส่วนผสมของ MAP ในประเทศญี่ปุ่น



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวดวงกมล พุทธิธโนปจัย เกิดเมื่อวันที่ 20 เดือนพฤษภาคม พ.ศ.2528 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย