ปริมาณธาตุอาหารจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่เหมาะสมต่อการตกผลึก แมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต

นางสาวพิชญ์ภัค เจียรพันธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NUTRIENT CONTENTS FROM SWINE WASTEWATER FOR OPTIMUM MAGNESIUM AMMONIUM PHOSPHATE PRECIPITATION

Miss Pichpak Jearapan

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	ปริมาณธาตุอาหารจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่เหมาะสมต่อการตกผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต
โดย	นางสาวพิรญ์ภัค เจียรพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ชัยพร ภู่ประเสริฐ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.อัมพิรา เจริญแสง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิชญ์ภัค เจียรพันธ์: ปริมาณธาตุอาหารจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่เหมาะสมต่อการตกผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต. (NUTRIENT CONTENTS FROM SWINE WASTEWATER FOR OPTIMUM MAGNESIUM AMMONIUM PHOSPHATE PRECIPITATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.สุธา ขาวเธียร , 102 หน้า.

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรยังคงมีปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชเจือปนอยู่ จากการศึกษาที่ผ่านมามีการนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต (Magnesium Ammonium Phosphate, MAP) ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก MAP ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+}: NH_4^+: PO_4^{3-}) ค่าพีเอช (pH) เวลาในการกวนผสม และสิ่งเจือปนในน้ำทิ้ง เป็นต้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+}: PO_4^{3-}) และค่าพีเอชในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรต่อปริมาณและลักษณะผลึก MAP ที่เกิดขึ้น โดยที่ตะกอนผลึก MAP ดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับทำการเกษตรได้ ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก MAP คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1และค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 ถึง 9 นอกจากนี้การตกผลึก MAP สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้ในขั้นตอนเดียว โดยที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 ถึง 9 สามารถบำบัดไนโตรเจนได้ร้อยละ 35 และสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 50 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต.....พิชญ์ภัค เจียรพันธ์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

#5170407821 : MAJOR Environmental Engineering

KEYWORDS : Magnesium Ammonium Phosphate (MAP)/ Nitrogen and phosphate removal/ The wastewater effluent from swine farms/ Anaerobic process/ Biogas/ Precipitation

PICHPAK JEAREPAN: NUTRIENT CONTENTS FROM SWINE WASTEWATER FOR OPTIMUM MAGNESIUM AMMONIUM PHOSPHATE PRECIPITATION. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 102 pp.

The wastewater effluent from swine farms typically contains nutrients which are necessary for plant growth. Previous research showed that magnesium ammonium phosphate (MAP) precipitation is one of the methods for recovering these nutrients. The important parameters for the precipitation include Mg^{2+}: PO_4^{3-} molar ratio, solution pH, mixing time and impurities in the effluent. This research was carried out to investigate the effects of the Mg^{2+}: PO_4^{3-} molar ratio and solution pH of the effluent from swine farms on dosage and the morphology of the MAP precipitation. The precipitation can be used as the agricultural fertilizer. The results indicated that the Mg^{2+}: PO_4^{3-} molar ratios of 1.2: 1 and solution pH of 8 – 9 were the optimum conditions of MAP precipitation. Furthermore, MAP precipitation can be treated nitrogen and phosphorous from swine farms in one steps. The Mg^{2+}: PO_4^{3-} molar ratios of 1.2: 1 and solution pH range between 8 – 9 had removal efficiency of nitrogen of 35.0 percent and had removal efficiency of phosphorous of 50 percent.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Environmental Engineering Student's Signature พิชญ์ภัค เจียรพันธ์

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.อัมพิรา เจริญแสง และคุณรามนรี เนตรวิเชียร ผู้ให้คำปรึกษา แนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขข้อบกพร่องมาตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนอาจารย์ ดร.ชัยพร ภู่ประเสริฐ ที่ได้ให้คำชี้แนะและแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และงบประมาณจากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนบริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ จีรนุวัฒน์ เจ้าของฟาร์มสุกรประชาฟาร์ม ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่าง และคุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ฎ
สารบัญภาพ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2.1 ระบบการเลี้ยงสุกร..... 3
2.1.1 ระบบการเลี้ยงสุกรแบบรายย่อย..... 3
2.1.2 ระบบการเลี้ยงสุกรแบบการค้า..... 3
2.2 ขนาดและจำนวนสุกร
2.2.1 ฟาร์มขนาดเล็ก..... 3
2.2.2 ฟาร์มขนาดกลาง..... 3
2.2.3 ฟาร์มขนาดใหญ่..... 3
2.3 ของเสียจากฟาร์มสุกร
2.3.1 มูลสุกร..... 4
2.3.2 น้ำเสียฟาร์มสุกร..... 5
2.3.3 ของเสียอื่นๆ..... 7
2.4 การจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร..... 7
2.4.1 การจัดการมูลสุกร..... 7
2.4.2 การจัดการน้ำเสีย..... 7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร..... 8
2.6 มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร..... 12
2.7 การเกิดแอมโมเนีย (NH_3) ในน้ำเสียฟาร์มสุกร..... 13
2.8 ค่ามาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในในน้ำทิ้งของประเทศต่างๆ..... 15
2.9 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ..... 16
2.10 ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)..... 16
2.11 การเกิดผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต
(Magnesium Ammonium Phosphate, MAP)..... 17
2.12 ปัจจัยของการเกิดผลึก MAP..... 18
2.12.1 ค่าพีเอช (pH)..... 18
2.12.2 อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม (Molar ratio)..... 19
2.12.3 สิ่งเจือปนในน้ำเสีย..... 20
2.13 ประโยชน์ของผลึก MAP ต่อภาคการเกษตรและสิ่งแวดล้อม..... 20
2.14 ประโยชน์ของผลึก MAP ในรูปของปุ๋ยทางการเกษตร..... 21
2.15 การเกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium phosphate)..... 22
2.16 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 24

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย
3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัย..... 30
3.2 การเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย..... 30
3.2.1 อุปกรณ์สำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการ..... 30
3.2.2 เครื่องมือที่วิเคราะห์ผลึก MAP ที่ผลิตได้และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก..... 31
3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย..... 32
3.3 น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาศึกษา..... 32
3.4 การเก็บรักษาน้ำเสียตัวอย่าง..... 33
3.5 การดำเนินการทดลอง..... 35
3.5.1 วิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ..... 35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2 ศึกษาค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP..... 35

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ..... 40

4.2 ผลการศึกษาค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP จากตะกอนผลึกที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร..... 42

4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และความเป็นผลึก MAP จากตะกอนผลึกที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร..... 45

4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นจากตะกอนผลึกผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร..... 45

4.3.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบของผลึก MAP ที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร..... 57

4.3.3 ผลการศึกษาเฟสและความเป็นผลึก MAP ที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร..... 58

4.4 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP..... 59

4.4.1 ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP..... 61

4.4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP..... 62

4.4.3 ปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP..... 64

4.4.4 ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP..... 65

4.4.5 ปริมาณโลหะในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP..... 66

4.5 การขยายผลการผลิตปุ๋ย MAP ใช้ในฟาร์มสุกร..... 72

4.6 ราคาขายปุ๋ย MAP ที่ผลิตได้..... 72

4.7 การศึกษาค่าใช้จ่ายในการทดลองตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร..... 72

4.7.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี..... 73

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ..... 76

รายการอ้างอิง..... 78

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ภาพถ่ายอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย..... 82

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ..... 84

ภาคผนวก ค บันทึกข้อมูลผลการศึกษาทั้งหมด..... 91

ภาคผนวก ง มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรและการระบายน้ำลงทางชลประทาน..... 97

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 102

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	กำลังการผลิตสุกรในประเทศไทย แสดงรายภาคปีพ.ศ. 2549-2553……	4
2.2	ปริมาณและลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยเฉลี่ยจำแนกตามขนาดฟาร์ม……..	5
2.3	ลักษณะของน้ำเสียฟาร์มสุกร……	5
2.4	ลักษณะของน้ำเสียฟาร์มสุกร……	6
2.5	ส่วนประกอบของน้ำเสียฟาร์มสุกร……	6
2.6	ลักษณะของน้ำเสียฟาร์มสุกร……	6
2.7	ค่าบีโอดีของน้ำทิ้งฟาร์มสุกร……..	9
2.8	คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบบ่อโดมคงที่ (Fixed Dome)……	10
2.9	คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบพญางิ้วดำ (พพ.1)..	11
2.10	ลักษณะน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Waste Activated Sludge, WAS)……	12
2.11	มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร……	13
2.12	การแปรสภาพของไนโตรเจนที่กินเข้าไปกับอาหารโดยสัตว์เลี้ยงต่างๆ……..	14
2.13	มาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำปิดของบางประเทศ……..	15
2.14	มาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้ง……..	16
2.15	รูปแบบผลึกฟอสเฟตที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนผลึกด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและฟอสฟอรัส (Ca^{2+}: PO_4^{3-}) ที่ค่าต่างๆ……	23
2.16	ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตกผลึก MAP……..	29
3.1	การเก็บรักษาน้ำเสียตัวอย่าง……..	34
3.2	วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศตามวิธีมาตรฐาน……	35
3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร……..	38
4.1	คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ……	40
4.2	ปริมาณตะกอนที่ได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ……..	43

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึก MAPที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9...	57
4.4	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกตะกอนผลึกที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9……..	60
4.5	สรุปผลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9...	71
4.6	ราคาสารเคมีที่นำมาใช้ในการตกตะกอนผลึก MAP……..	73
4.7	สรุปปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนผลึก MAP……	75
ข.1	สรุปปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตและโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ต้องเติมลงไปเพื่อควบคุมอัตราส่วนต่างๆ……...	90
ค.1	ผลการศึกษาน้ำหนักตะกอนที่ได้จากการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ……	92
ค.2	ผลการศึกษาปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9……..	93
ค.3	ผลการศึกษาปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9……..	93
ค.4	ผลการศึกษาปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9……..	94
ค.5	ผลการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9……..	94
ค.6	ผลการศึกษาปริมาณแมกนีเซียมในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9……..	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค.7 ผลการศึกษาปริมาณแคลเซียมในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตรา-ส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9... 95

ค.8 ผลการศึกษาปริมาณโพแทสเซียมในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตรา ส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9... 95

ค.9 ผลการศึกษาปริมาณเหล็กในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วน โดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9…….. 96

ค.10 ผลการศึกษาปริมาณทองแดงในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตรา-ส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9... 96

ค.11 ผลการศึกษาปริมาณสังกะสีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วน โดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9…….. 96

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	8
2.2	วัฏจักรของไนโตรเจน.....	15
2.3	รูปทรงของผลึก MAP.....	17
2.4	ผลึก MAP.....	17
2.5	การเกิดผลึกในรูปแบบต่างๆในสารละลายที่มีแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ.....	19
2.6	ช่วงของค่าพีเอชต่อการละลายน้ำของผลึกอะพาไทต์.....	23
3.1	ชุดอุปกรณ์สำหรับทดลอง.....	31
3.2	แหล่งที่เก็บน้ำเสียตัวอย่างจากฟาร์มสุกร.....	32
3.3	บ่อพักน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	33
3.4	การเก็บน้ำเสียตัวอย่างจากบ่อพักน้ำทิ้ง.....	33
3.5	ขั้นตอนการทดลอง.....	37
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและการละลายน้ำ (Solubility) ของผลึก MAP.....	42
4.2	ปริมาณตะกอนที่ค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ.....	43
4.3	โครงสร้างผลึก MAP.....	45
4.4	โครงสร้างผลึกแคลเซียมฟอสเฟต.....	46
4.5	ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 และที่ค่าพีเอชค่าต่างๆวิเคราะห์ด้วย SEM.....	47
4.6	ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่ค่าพีเอชค่าต่างๆวิเคราะห์ด้วย SEM...	49
4.7	ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4: 1 และที่ค่าพีเอชค่าต่างๆวิเคราะห์ด้วย SEM...	51
4.8	ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6: 1 และที่ค่าพีเอชค่าต่างๆวิเคราะห์ด้วย SEM...	53
4.9	ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.8: 1 และที่ค่าพีเอชค่าต่างๆวิเคราะห์ด้วย SEM.....	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.10	ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2: 1 และที่ค่าพีเอชค่าต่างๆวิเคราะห์ด้วย SEM.....	55
4.11	แสดงเฟสและความเป็นผลึก MAP ที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ค่าต่างๆ.....	58
4.12	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9.....	61
4.13	ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึกMAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่ค่าพีเอช เท่ากับ 8 8.5 และ 9.....	63
4.14	ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9.....	64
4.15	ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9.....	65
4.16	ประสิทธิภาพการบำบัดโพแทสเซียมในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9.....	67
4.17	ประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9.....	68
4.18	ประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9.....	69
4.19	ประสิทธิภาพการบำบัดสังกะสีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9.....	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

ก.1 เครื่องกวนผสม..... 83

ก.2 ภาชนะที่ใส่สำหรับผึ่งตัวอย่างให้แห้ง..... 83

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเลี้ยงสุกรในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างมาก มีผลให้จำนวนผู้เลี้ยงสุกรและปริมาณสุกรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดของเสียและน้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยงสุกร โดยเฉพาะน้ำเสียหากมีการจัดการที่ไม่ถูกวิธีและปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรงจะก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำ ซึ่งน้ำเสียจากกิจกรรมการเลี้ยงสุกรเป็นน้ำที่เกิดจากการล้างทำความสะอาดคอกสุกรที่ปนเปื้อนด้วยของเสียจากการขับถ่ายของสุกรและอาหารสุกร ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกสูง โดยเฉพาะมีปริมาณสารประกอบอินทรีย์และไนโตรเจนเข้มข้นสูงเมื่อเทียบกับน้ำเสียชุมชน (Chin และ Ong, 1993; U.S. EPA, 2001)

วิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหามลภาวะจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ได้รับความนิยม คือ กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic process) เพราะสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงและได้แก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นผลพลอยได้ (บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552) แต่น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศยังคงมีปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเหลืออยู่จึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียต่อ คือ การบำบัดน้ำขั้นหลัง (Post treatment) เพื่อให้น้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดมีค่าความสกปรกและปริมาณธาตุอาหารของพืชลดลงก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

วิธีการที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน คือ การนำธาตุอาหารกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต (Magnesium Ammonium Phosphate, MAP) ผลึก MAP ที่ได้จะประกอบไปด้วยธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Warmadewanthi และ Liu, 2008; Uludag-Dimirer และ Othman, 2009) วิธีการดังกล่าวจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากปัญหาการปนเปื้อนจากธาตุอาหารของพืชในแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดิน และตะกอนที่ได้จากการตกผลึกสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยในการทำการเกษตรได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาแนวทางในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP

2. เพื่อศึกษาค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP
3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างและวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึก MAP ที่เกิดขึ้นจากการตกผลึกน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านการตกผลึก MAP

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย อาคารสี่ภาควิชา (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมเคมี และวิศวกรรมโลหการ) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ที่ประชาฟาร์ม อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม
3. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ เฟส และความเป็นผลึกของ MAP
   - วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope with EDS Attachment, SEM-EDS)
   - วิเคราะห์เฟสและความเป็นผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรให้มีปริมาณลดลง
2. ทราบค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP
3. สามารถนำผลึก MAP ที่มีแมกนีเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืชได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการเลี้ยงสุกร

การเลี้ยงสุกรเป็นอาชีพเก่าแก่คู่กับระบบเกษตรกรรมไทยมาตั้งแต่สมัยโบราณ ในปัจจุบันการเลี้ยงสุกรได้มีการพัฒนาการเลี้ยงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะการพัฒนาพันธุ์สุกร การพัฒนาสูตรอาหารที่ใช้เลี้ยงสุกรและการให้อาหาร การพัฒนาโรงเรือนเลี้ยงสุกร รวมทั้งพัฒนาด้านการจัดการฟาร์มและการเลี้ยงสุกร

ระบบการผลิตสุกรของไทยในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามปริมาณสุกรที่เลี้ยงคือ ระบบการผลิตหรือเลี้ยงสุกรแบบรายย่อยและระบบการผลิตหรือเลี้ยงสุกรแบบการค้า ซึ่งมีลักษณะดังนี้

2.1.1 **ระบบการเลี้ยงสุกรแบบรายย่อย** หมายถึง ผู้เลี้ยงสุกรที่มีจำนวนสุกรไม่เกินรายละ 50 ตัว รวมถึงผู้ถึงเลี้ยงสุกรแบบพื้นบ้าน ซึ่งนิยมเลี้ยงสุกรเป็นอาชีพเสริม ผู้เลี้ยงสุกรรายย่อยยังไม่ค่อยมีการพัฒนาหรือปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตให้เป็นแบบการค้าอย่างแท้จริง มักขาดการควบคุมและป้องกันโรคสุกรที่ดี

2.1.2 **ระบบการเลี้ยงสุกรแบบการค้า** หมายถึง ฟาร์มเลี้ยงสุกรที่มีจำนวนสุกรตั้งแต่ 50 ตัวขึ้นไป มีการลงทุนค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงแบบรายย่อยเป็นฟาร์มที่มีการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอยู่เสมอ

การผลิตสุกรของไทยเป็นระบบการผลิตแบบเสรี ผู้ผลิตหรือผู้เลี้ยงสุกรมีอิสระสามารถเข้ามาทำการผลิตหรือเลิกการผลิตได้ง่าย โดยเฉพาะผู้เลี้ยงสุกรรายย่อย จำนวนผู้เลี้ยงสุกรและจำนวนสุกรจึงมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามภาวการณ์เปลี่ยนแปลงของตลาดและราคาสุกร (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2550)

2.2 ขนาดและจำนวนสุกร

ขนาดของฟาร์มสุกร สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขนาด คือ

2.2.1 **ฟาร์มขนาดเล็ก** หมายถึง ฟาร์มที่มีจำนวนสุกรตั้งแต่ 50 ตัวแต่ไม่เกิน 500 ตัว

2.2.2 **ฟาร์มขนาดกลาง** หมายถึง ฟาร์มที่มีจำนวนสุกรตั้งแต่ 500 ตัว ถึง 5,000 ตัว

2.2.3 **ฟาร์มขนาดใหญ่** หมายถึง ฟาร์มที่มีจำนวนสุกรมากกว่า 5,000 ตัว

(มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2550)

กำลังการผลิตสุกรในประเทศไทยในระหว่างปี พ.ศ. 2549 – 2553 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กำลังการผลิตสุกรในประเทศไทย แสดงรายภาค ปี พ.ศ. 2549 – 2553 (หน่วย: ตัว)
(สมาคมผู้เลี้ยงสุกรแห่งชาติ, 2553)

ปี	จำนวนแม่พันธุ์ (ตัว)	จำนวนสุกรขุน (ตัว)
2549	930,000	10,400,000
2550	1,030,000	11,625,000
2551	850,000	10,440,000
2552	800,000	10,200,000
2553	840,000 (ประมาณการ)	11,000,000 (ประมาณการ)

2.3 ของเสียจากฟาร์มสุกร (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

ของเสียจากฟาร์มสุกร มี 2 ประเภทหลัก คือ

1) ส่วนที่เป็นมูลสุกรและเศษอาหารที่ตกค้างในคอก

2) ส่วนที่เป็นน้ำเสียเกิดจากการล้างคอกซึ่งจะมีของเสียที่เกิดจากการขับถ่ายของสุกรปะปนอยู่

ซึ่งลักษณะของเสียทั้ง 2 ประเภทสามารถกล่าวรายละเอียดได้ดังนี้

2.3.1 มูลสุกร

การเลี้ยงสุกรทำให้เกิดมูลสุกรเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็น โดยเฉพาะบนพื้นคอกที่มีการหมักหมมของมูลสุกรและใต้พื้นคอกที่มีการตกค้างของมูลสุกร ปัสสาวะและน้ำจากการล้างคอก

นอกจากนี้มูลสุกรที่เก็บกวาดออกจากพื้นคอกแล้วนำมาตากแห้งจะต้องมีการควบคุมดูแลโดยไม่ควรกองทิ้งมูลไว้เป็นเวลานาน เพราะความชื้นในอากาศและอุณหภูมิอาจมีความเหมาะสมที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาจนเกิดแก๊สที่มีกลิ่นเหม็นได้

2.3.2 น้ำเสียฟาร์มสุกร

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรส่วนใหญ่เกิดจากการล้างทำความสะอาดคอกและโรงเรือน ซึ่งในการทำความสะอาดคอกด้วยน้ำควรเก็บกวาดมูลสุกรออกก่อนจะได้ไม่เพิ่มปริมาณความสกปรกให้กับน้ำเสีย จากการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียฟาร์มสุกรพบว่าน้ำเสียฟาร์มสุกรมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 2.3 2.4 2.5 และ 2.6

ตารางที่ 2.2 ปริมาณและลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยเฉลี่ยจำแนกตามขนาดฟาร์ม (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

ขนาดฟาร์ม	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/ตัว/วัน)	ลักษณะน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
		บีโอดี	ซีโอดี	สารแขวนลอย	ไนโตรเจนทั้งหมด	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 2.3 ลักษณะของน้ำเสียฟาร์มสุกร (Ahn และคณะ, 2006)

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น	หน่วย
ค่าพีเอช (pH)	6.37 ± 0.10	-
ของแข็งทั้งหมด (Total solids)	61.8 ± 0.4	กรัมต่อลิตร
ของแข็งระเหยได้ (Volatile solids)	44.5 ± 0.2	กรัมต่อลิตร
ซีโอดี (COD)	130.8 ± 3.0	กรัมต่อลิตร
ซีโอดีละลายได้ (Soluble COD)	59.7 ± 0.9	กรัมต่อลิตร
ทีเคเอ็น (TKN)	7.3 ± 0.1	กรัมต่อลิตร
แอมโมเนียมไนโตรเจน (Ammonium nitrogen)	4.8 ± 0.1	กรัมต่อลิตร
โปรตีน (Protein[a])	15.8 ± 0.9	กรัมต่อลิตร
คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)	9.1 ± 0.2	กรัมต่อลิตร
ไขมัน (Lipid)	20.1 ± 0.1	กรัมต่อลิตร
อะซิเตท (Acetate)	11.1 ± 0.2	กรัมต่อลิตร
โพรไพโอเนท (Propionate)	4.2 ± 0.1	กรัมต่อลิตร
เอ็น-บิวไทเรท (*n*-Butyrate)	6.4 ± 0.1	กรัมต่อลิตร
กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดคิดเทียบจากอะซิเตท (Total VFA as acetate)	36.7 ± 0.3	กรัมต่อลิตร
แคลเซียม (Calcium)	0.67 ± 0.05	กรัมต่อลิตร
โพแทสเซียม (Potassium)	3.4 ± 0.1	กรัมต่อลิตร

[a] Protein content = (TKN – ammonium nitrogen) × 6.25

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของน้ำเสียฟาร์มสุกร (กรมปศุสัตว์, 2549)

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	หน่วย
ค่าพีเอช (pH)	8.35 ± 1.01	-
สี (Color)	88.56 ± 90.79	โคบอลต์ ยูนิต
ความขุ่น (Turbidity)	374.50 ± 240.64	ซิลิกาสเกล
บีโอดี (BOD)	742.30 ± 643.30	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี (COD)	1269.60 ± 977.26	มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	600.60 ± 1443.24	มิลลิกรัมต่อลิตร
ทีเคเอ็น (TKN)	86.20 ± 91.56	มิลลิกรัมต่อลิตร
ทองแดง (Cu)	0.02 ± 0.03	มิลลิกรัมต่อลิตร
สังกะสี (Zn)	0.13 ± 0.12	มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบของน้ำเสียฟาร์มสุกร (Cho และคณะ, 2001)

แร่ธาตุ (Minerals)	หน่วย (มิลลิโมลาร์)	แร่ธาตุ (Minerals)	หน่วย (มิลลิโมลาร์)
ฟอสฟอรัส (P)	5.526	เหล็ก (Fe)	0.118
ไนโตรเจน (N)	44.875	แมงกานีส (Mn)	0.015
โพแทสเซียม (K)	25.152	สังกะสี (Zn)	0.011
แคลเซียม (Ca)	4.792	ทองแดง (Cu)	0.006
แมกนีเซียม (Mg)	2.314	โบรอน (B)	0.185
โซเดียม (Na)	15.500	นิกเกิล (Ni)	0.010
อะลูมิเนียม (Al)	0.724	โครเมียม (Cr)	0.009

ตารางที่ 2.6 ลักษณะของน้ำเสียฟาร์มสุกร (Yamamoto และคณะ, 2006) ดังนี้

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น	หน่วย
ค่าพีเอช (pH)	8.3	-
ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids)	5,000 – 10,000	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดีทั้งหมด (Total COD)	5,000 – 11,000	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดีละลายได้ (Soluble COD)	3,000 – 5,000	มิลลิกรัมต่อลิตร
บีโอดี 5 วัน (BOD_5)	2,000 – 4,000	มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.3 ของเสียอื่น ๆ

ของเสียอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากฟาร์มสุกรต้องมีการกำจัดที่ถูกต้อง เช่น ขวดยา ขวดน้ำเสีย เข็มฉีดยา รก และซากสุกรที่ตายต้องมีการฝังกลบให้เรียบร้อย สำหรับถุงใส่อาหารสัตว์ที่ใช้ในการเลี้ยงสุกรสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือใช้เป็นถุงบรรจุมูลสุกรขายเป็นปุ๋ย เป็นต้น

2.4 การจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

2.4.1 การจัดการมูลสุกร

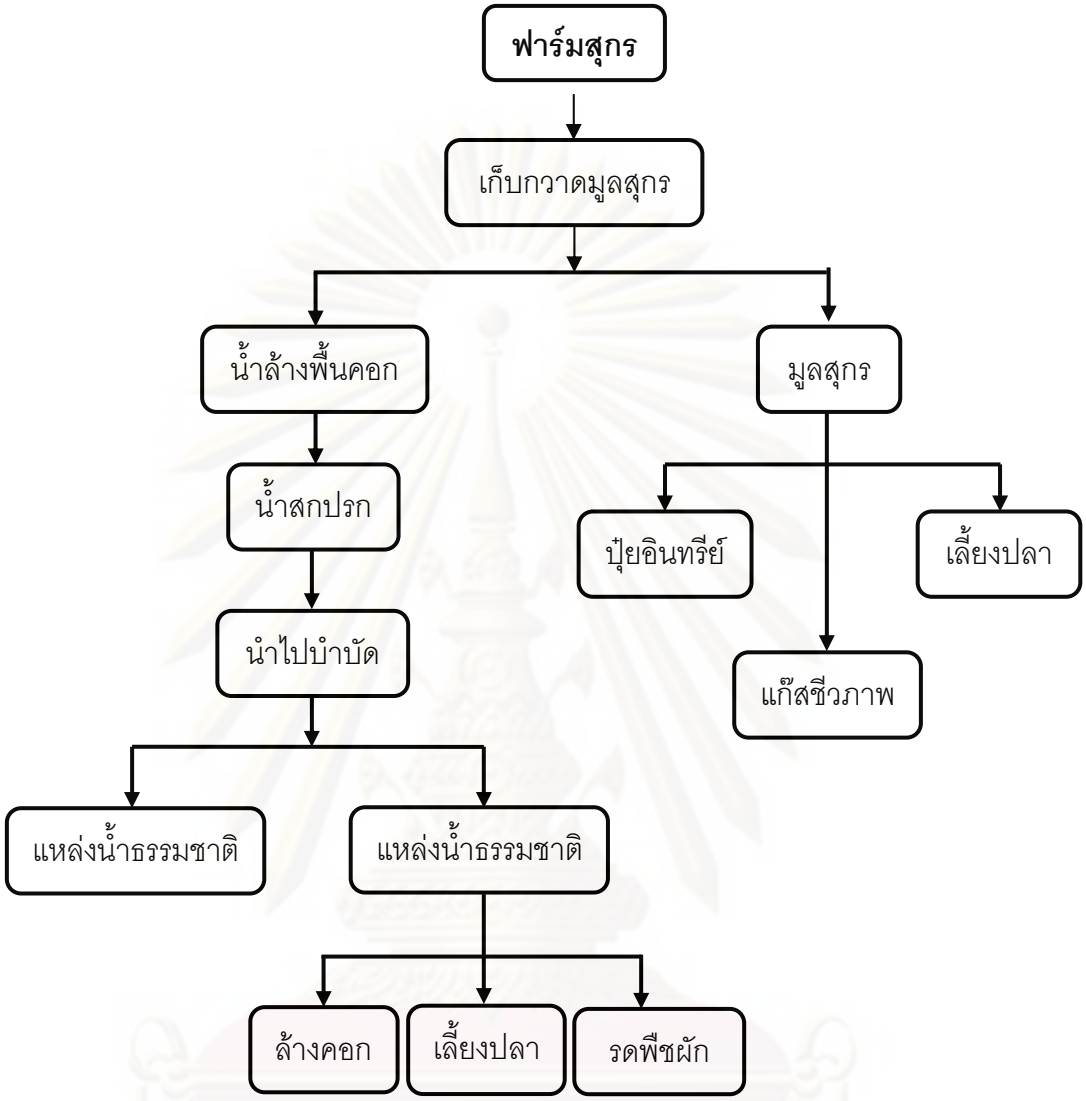
มูลสุกรที่เก็บกวาดออกก่อนที่จะทำการฉีดล้างคอกสุกร อาจจะนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น

- ขายสดให้แก่เกษตรกรที่ต้องการ
- ตากให้แห้งแล้วนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตร
- นำมูลสุกรที่ตากแห้งหรือมูลสุกรสด ไปเป็นอาหารปลาโดยตรง หรือผสมในสูตรอาหารที่ใช้เลี้ยงปลา แต่ไม่ควรใช้ในปริมาณที่มากเกินไป เพราะจะทำให้น้ำเน่าและปลาตายได้
- นำมูลสุกรและน้ำเสียไปหมักในสภาพไร้อากาศทำให้เกิดแก๊สชีวภาพซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม จุดตะเกียง กกลูกหมู หรือผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับมูลสุกรที่ผ่านการหมักแล้วนำไปเป็นปุ๋ยสำหรับปลูกพืชได้

2.4.2 การจัดการน้ำเสีย

ฟาร์มสุกรส่วนใหญ่จะเป็นฟาร์มสุกรขนาดเล็กและฟาร์มสุกรรายย่อย ดังนั้นหลักในการจัดการน้ำเสียคือ ต้องแยกมูลสุกรออกจากน้ำเสียเพื่อลดการตื้นเขินของบ่อพักน้ำเสียและลดความสกปรกของน้ำเสียที่ไหลเข้าสู่บ่อพักโดยการเก็บกวาดมูลสุกรออกก่อนทำการฉีดล้างคอก บ่อพักน้ำเสียควรมีประมาณ 2 - 3 บ่อต่อเนื่องกัน น้ำจากบ่อสุดท้ายสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก เช่น ใช้ล้างพื้นคอก สูบใส่บ่อเลี้ยงปลา ใช้รดน้ำต้นไม้ ส่วนรางระบายน้ำเสียควรอยู่ใต้หลังคาโรงเรือนเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำฝนไหลมารวมกับน้ำเสียเป็นการลดปริมาณน้ำเสียที่จะต้องนำไปบำบัดและเพื่อป้องกันปัญหาน้ำล้นบ่อพัก (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

ของเสียจากฟาร์มสุกรทั้งมูลสุกรและน้ำเสียมีกระบวนการจัดการกับของเสียที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กระบวนการจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

2.5 **น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร**

"น้ำทิ้ง" หมายความว่า น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแล้วจนเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

น้ำเสียที่เกิดจากน้ำล้างพื้นคอกจะระบายเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียในฟาร์มบางแห่งที่มีระบบบำบัดน้ำเสีย แต่ในฟาร์มบางแห่งที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียก็ลงสู่ร่องสวนหรือลงทางระบายน้ำสาธารณะ หรือลงสู่คลองโดยตรง (นิศากร และยุวรี, 2536)

จากข้อมูลการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรได้แสดงดังตารางที่ 2.7 ซึ่งข้อมูลในตารางได้แสดงค่าความสกปรกในรูปของบีโอดีของฟาร์มสุกรแต่ละขนาดไว้ด้วย

ตารางที่ 2.7 ค่าบีโอดีของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร (นิศากร และยุวรี, 2536)

ประเภทของฟาร์ม	จำนวนสุกร (ตัว)	บีโอดีของน้ำทิ้งเฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ขนาดเล็ก	50 – 100	494.8
ขนาดกลาง	101 - 1000	1668.9
ขนาดใหญ่	$\geq$ 1000	790.8

นอกจากนี้ยังมีผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่างๆ อาทิ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อโดมคงที่ (Fixed Dome), ระบบบำบัดน้ำเสียแบบพญาง้วดำ (พพ. 1) และระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Waste Activated Sludge, WAS) ดังแสดงในตารางที่ 2.8 2.9 และ 2.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบบ่อโดมคงที่ (Fixed Dome) (บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

ลำดับ	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัด	หน่วย
1	ลักษณะของตัวอย่างน้ำ	น้ำสีดำ มีตะกอนมาก	-
2	ค่าพีเอช	7.01	-
3	บีโอดี	795	มิลลิกรัมต่อลิตร
4	ซีโอดี	2,255	มิลลิกรัมต่อลิตร
5	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำ	435	มิลลิกรัมต่อลิตร
6	ปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด	835	มิลลิกรัมต่อลิตร
7	ค่าความเป็นด่าง	1,600	มิลลิกรัมต่อลิตร
8	ปริมาณโลหะ (Metals)		
	- แคลเซียม (Ca)	245.809	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- แคดเมียม (Cd)	0.008	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- ทองแดง (Cu)	19.468	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- เหล็ก (Fe)	102.576	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- โพแทสเซียม (K)	1,470.454	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- ฟอสฟอรัส (P)	45.000	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- แมกนีเซียม (Mg)	356.570	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- สังกะสี (Zn)	70.157	มิลลิกรัมต่อลิตร
9	การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. Coli*	$9.6x10^6$	MPN/100 มิลลิลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.9 คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบพญางิ้วดำ (พพ. 1) (บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

ลำดับ	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัด	หน่วย
1	ลักษณะของตัวอย่างน้ำ	น้ำสีน้ำตาลเข้ม มีตะกอน	-
2	ค่าพีเอช	8.07	-
3	บีโอดี	235	มิลลิกรัมต่อลิตร
4	ซีโอดี	1,445	มิลลิกรัมต่อลิตร
5	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำ	405	มิลลิกรัมต่อลิตร
6	ปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด	168	มิลลิกรัมต่อลิตร
7	ค่าความเป็นด่าง	22,700	มิลลิกรัมต่อลิตร
8	ปริมาณโลหะ (Metals)		
	- แคลเซียม (Ca)	90.55	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- ทองแดง (Cu)	2.51	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- เหล็ก (Fe)	13.36	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- โพแทสเซียม (K)	483.41	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- ฟอสฟอรัส (P)	16.50	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- แมกนีเซียม (Mg)	270.67	มิลลิกรัมต่อลิตร
	- สังกะสี (Zn)	16.35	มิลลิกรัมต่อลิตร
9	การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. Coli*	$2.1x10^5$	MPN/100 มิลลิลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.10 ลักษณะน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Waste Activated Sludge, WAS) (Uludag-Dimirer และ Othman, 2009)

ลำดับ	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัด	หน่วย
1	ค่าพีเอช	7.95	-
2	ของแข็งทั้งหมด (TS)	1,995	มิลลิกรัมต่อลิตร
3	ไนโตรเจนละลาย (TDN)	277	มิลลิกรัมต่อลิตร
4	ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	193	มิลลิกรัมต่อลิตร
5	แอมโมเนียไนโตรเจน	405	มิลลิกรัมต่อลิตร
6	ปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด	273	มิลลิกรัมต่อลิตร
7	ฟอสเฟต (PO_4^{3-})	168	มิลลิกรัมต่อลิตร
8	แมกนีเซียม (Mg)	11	มิลลิกรัมต่อลิตร

2.6 มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

น้ำเสียจากฟาร์มสุกรต้องได้รับการบำบัดก่อนที่จะระบายออกสู่ลำน้ำสาธารณะ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วต้องมีการตรวจสอบคุณภาพน้ำทิ้ง โดยการตรวจสอบวิเคราะห์ค่าบีโอดี ซีโอดี และค่าพีเอชให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร มีการบังคับใช้มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร แบ่งออกเป็นฟาร์มขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.11 และในภาคผนวก ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.11 มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

มาตรฐานเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร				
ดัชนีคุณภาพน้ำ	**หน่วย**	**เกณฑ์มาตรฐานสูงสุด**		
		ฟาร์มขนาดใหญ่	**ฟาร์มขนาดกลางและเล็ก**	**วิธีการตรวจสอบ**
1.ค่าพีเอช	-	5.5 – 9	5.5 – 9	เครื่องวัดพีเอชที่มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 0.1 หน่วย
2.บีโอดี	มก./ล.	60	100	เอไซด์โมดิฟิเคชันหรือขั้วอิเล็กโทรด
3.ซีโอดี	มก./ล.	300	400	ย่อยสลายโดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมตด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบเปิดหรือรีฟลักซ์แบบปิด
4.ของแข็งแขวนลอย	มก./ล.	150	200	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 °- 105°ซ
5.ทีเคเอ็น	มก./ล.	120	200	แมคโครเจลดาห์ลและตรวจวัดแอมโมเนียด้วยวิธีการวัดสี (Colorimetric)หรือขั้ววัดแอมโมเนีย (Ammonia Selective Electrode)

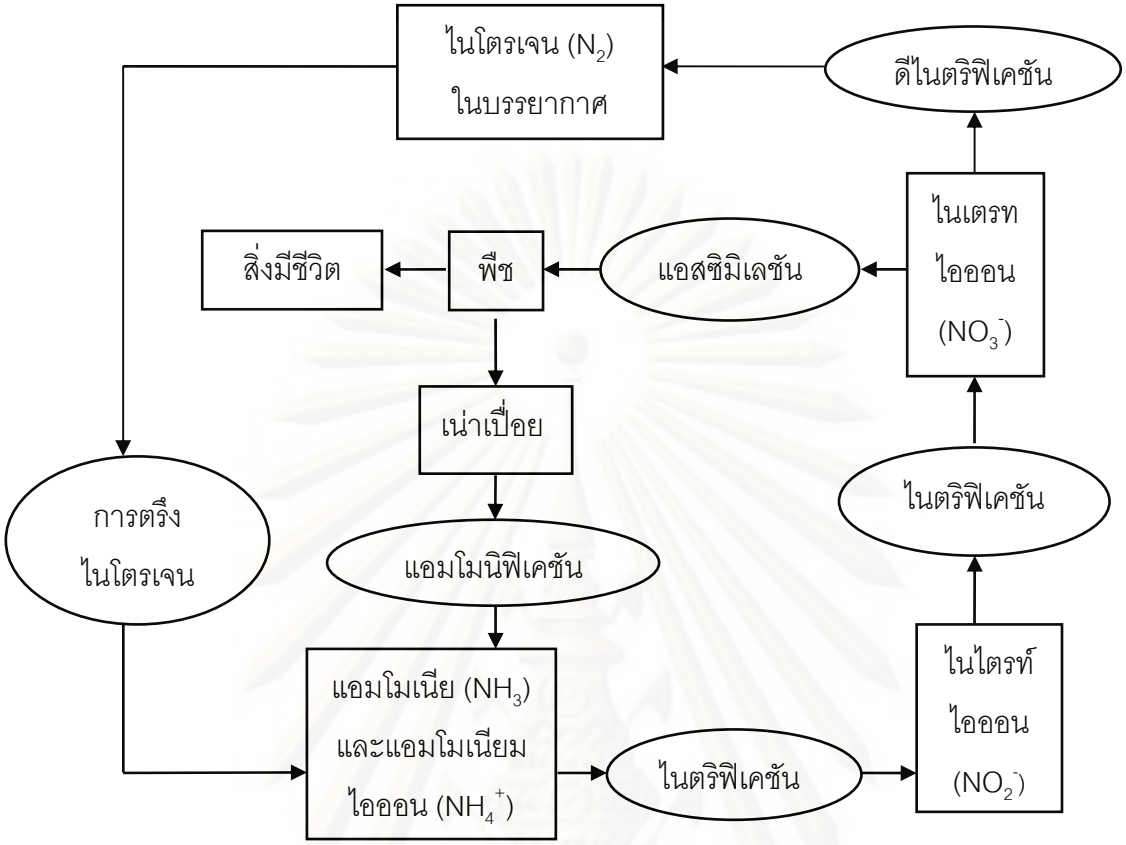
2.7 การเกิดแอมโมเนีย (NH_3) ในน้ำเสียฟาร์มสุกร

สัตว์ได้รับธาตุไนโตรเจน ส่วนใหญ่จากโปรตีนและสารประกอบไนโตรเจนต่างๆ ในอาหารที่กิน ส่วนน้อยกักเก็บไว้ใช้ในร่างกายหรือเปลี่ยนเป็นน้ำนม ส่วนใหญ่ขับถ่ายทิ้งออกไปทางมูลและปัสสาวะดังแสดงในตารางที่ 2.12 ดังนั้น ไนโตรเจนในมูลสัตว์มาจากอาหารประเภทโปรตีนและจากอาหารที่ย่อยไม่หมด ตลอดจนส่วนของไนโตรเจนจากการขับหลั่งเอนไซม์และเยื่อบุลำไส้ที่หลุดจากทางเดินอาหาร รวมทั้งจากจุลชีพที่สร้างตัวขึ้นในลำไส้ใหญ่ ไนโตรเจนในจุลชีพเป็นทั้งโปรตีนและกรดนิวคลีอิค จำนวนร้อยละ 15 ถึง 20 ปัสสาวะของสัตว์โดยส่วนใหญ่ เช่น โค แกะ และสุกร ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปยูเรีย ส่วนในสัตว์ปีกไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของกรดยูริค (สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552)

ตารางที่ 2.12 การแปรสภาพของไนโตรเจนที่กินเข้าไปกับอาหารโดยสัตว์เลี้ยงต่างๆ (สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2552)

ชนิดสัตว์	โปรตีนในอาหาร (กรัม/กิโลกรัม วัตถุแห้ง)	กักเก็บในร่างกาย (เปอร์เซ็นต์)	นม (เปอร์เซ็นต์)	มูล (เปอร์เซ็นต์)	ปัสสาวะ (เปอร์เซ็นต์)
1) โคนม					
- เลี้ยงปล่อย	250	2	7	35	56
- เลี้ยงในคอก	175	2	25	34	39
2) โคเนื้อ	150	22	-	30	48
3) แม่สุกรเลี้ยงลูก	160	5	20	20	55
4) ลูกสุกร	184	40	-	10	50
5) สุกรขุน	170	32	-	15	53
6) ไก่ไข่	170	32	-	12	56
7) ไก่เนื้อ	217	42	-	10	48

ไนโตรเจนบางส่วนในสิ่งขับถ่ายสลายตัวโดยการทำงานของจุลชีพไปอยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระและแอมโมเนียมไอออน (NH_3 และ NH_4^+ ตามลำดับ) เรียกปฏิกิริยานี้ว่าแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) จากนั้น NH_3 และ NH_4^+ จะถูกเปลี่ยนโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Nitriying bacteria) ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) กลายเป็นไนไตรท์-ไอออน (NO_2^-) และไนเตรทไอออน (NO_3^-) ซึ่งจะไปสะสมในดินและในน้ำ หรือถูกใช้ประโยชน์ได้โดยพืช เรียกว่าแอสซิมิเลชัน (Assimilation) นอกจากนี้ไนเตรทอิออนสามารถถูกเปลี่ยนโดยดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย (Denitrifying bacteria) ผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) กลายเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) กลับคืนสู่บรรยากาศได้ต่อไป ซึ่งแก๊สไนโตรเจนอาจถูกจุลชีพเปลี่ยนให้เป็น NH_3 และ NH_4^+ ได้อีกเรียกว่า การตรึงไนโตรเจน (Nitrogen fixation) ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ในธรรมชาติธาตุไนโตรเจนมีอยู่ได้ในหลายรูปของสารประกอบ ซึ่งการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนต้องอาศัยการทำงานของจุลชีพโดยสามารถสรุปกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารประกอบไนโตรเจนได้ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 วัฏจักรของไนโตรเจน (http://www.lenntech.com [2552, สิงหาคม 9])

2.8 ค่ามาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของประเทศต่าง ๆ

ในบางประเทศได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสดังแสดงในตารางที่ 2.13 และ 2.14

ตารางที่ 2.13 มาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำปิดของบางประเทศ (ธงชัย, 2544)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	มาตรฐาน	เหตุผล
แอมโมเนีย	0.016 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร	ความเป็นพิษ
	0.4 มิลลิกรัมแอมโมเนียต่อลิตร	อนุรักษ์ปะการัง แหล่งน้ำธรรมชาติ เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งทะเล
ไนไตรต์	0.06 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร	ความเป็นพิษ

ตารางที่ 2.14 มาตรฐานไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้ง (ธงชัย, 2544)

ไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ฟอสฟอรัสทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	หมายเหตุ
5	1	น้ำเสียชุมชน ออสเตรเลีย
15	4.5	ค่าสูงสุด น้ำเสียชุมชน ออสเตรเลีย
3	1	รัฐฟลอริดา
6	2	บริติชโคลัมเบีย คานาดา
5	1	หน้าหนาว อาร์เคนซอร์
8	1	ในสหรัฐอเมริกา มาตรฐานแปรผันไปตามท้องถิ่น
10	1	ข้อเสนอแนะขั้นต่ำของกลุ่มสหภาพยุโรป สำหรับข้อมูลประชากร 100,000 คน

2.9 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

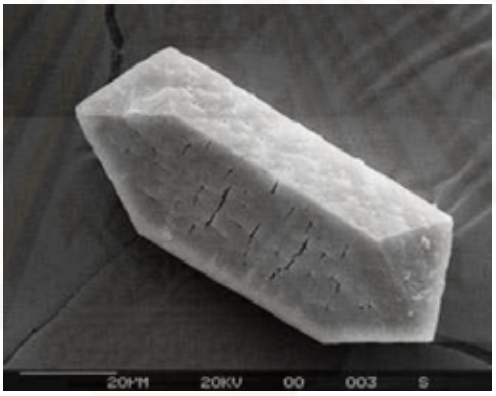
วิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหามลภาวะของน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ได้รับความนิยม คือ การติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถบำบัดน้ำที่มีค่าความสกปรกสูงหรือมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์อยู่เป็นจำนวนมากได้ ที่สำคัญผลพลอยได้จากการติดตั้งระบบบำบัดคือ แก๊สชีวภาพ (Biogas) ซึ่งน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพโดยใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ยังมีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีเหลืออยู่อีกเล็กน้อย แต่มีค่าความสกปรก เช่น บีโอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม เป็นต้น น้ำทิ้งดังกล่าวควรทำการบำบัดต่อไปเพื่อให้มีค่าธาตุอาหารในน้ำทิ้งลดลงก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ (บริษัท ทีม เอ็น-เนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

2.10 ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)

น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์และสารอาหารของพืชละลายเจือปนอยู่ในน้ำ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งหากมีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลทำให้สาหร่ายและพืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลงและส่งผลกระทบต่อเนื่องจนทำให้เกิดมลพิษทางน้ำซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ยูโทรฟิเคชัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

2.11 การเกิดผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต (Magnesium Ammonium Phosphate, MAP)

ผลึก MAP เกิดจากการรวมตัวกันระหว่างไอออนของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต มีสูตรทางเคมี คือ $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ซึ่งผลึกจะมีสีขาวจนถึงค่อนข้างเหลืองถึงสีน้ำตาล มีรูปทรงของผลึกเป็นพีระมิด ดังแสดงในภาพที่ 2.3 และ 2.4 มีค่าความแข็ง (Mohs hardness) เท่ากับ 1.5 ถึง 2 ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เท่ากับ 1.7 โดยความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง แต่สามารถละลายได้มากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด เมื่อถึงภาวะอิ่มตัวของ Mg^{2+} NH_4^+ และ PO_4^{3-} สามารถเกิดผลึก MAP ซึ่งเป็นไปตามสมการเคมีของการเกิดผลึก MAP



ภาพที่ 2.3 รูปทรงของผลึก MAP

(http://www.paques.nl. [2552, สิงหาคม 13])

ภาพที่ 2.4 ผลึก MAP

(http://www.cranfield.ac.uk/sas/water/scale/struvite.htm. [2552, สิงหาคม 13])

$$Mg^{2+} + NH_4^{+} + PO_4^{3-} + 6H_2O \rightarrow \mathbf{MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O\downarrow (ตกผลึก)}$$

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

(Choi, 2007 อ้างโดยบริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

2.12 ปัจจัยของการเกิดผลึก MAP

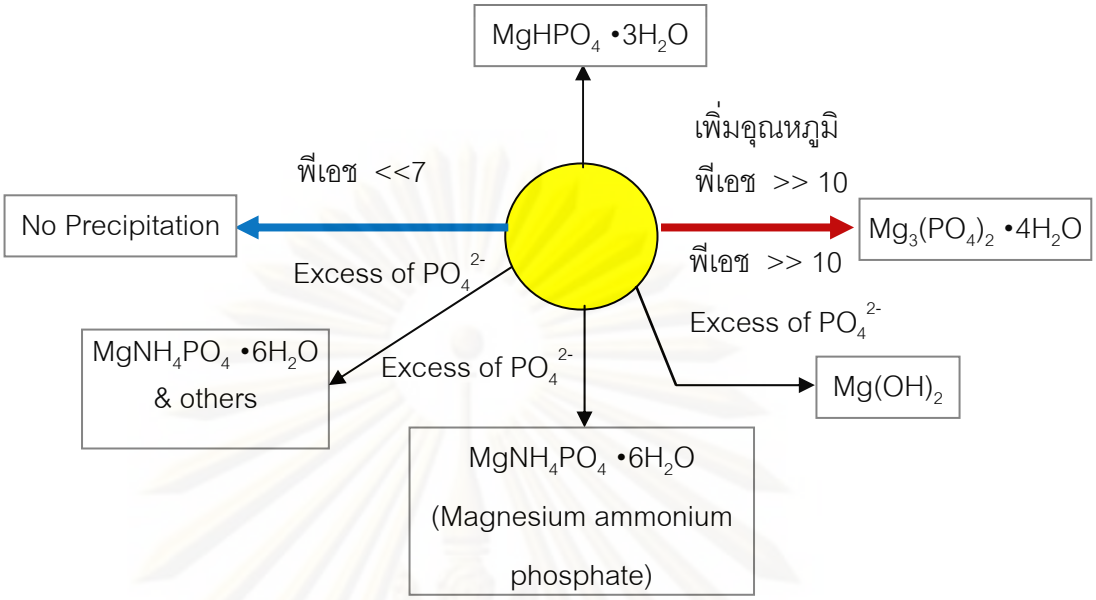
การตกตะกอนผลึก MAP เป็นการกระบวนการทางเคมีที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำเสีย โดยใช้แมกนีเซียม เป็นตัวประสานให้เกิดเป็นผลึกของแข็งและตกตะกอนแยกออกจากน้ำ โดยปัจจัยในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ค่าพีเอชของน้ำ อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม สิ่งเจือปน และอื่นๆ (บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552) มีรายละเอียดดังนี้

2.12.1 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของน้ำมีผลต่อการตกผลึกของ MAP ดังนั้นในน้ำเสียที่มีแมกนีเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบอยู่การเปลี่ยนแปลงของ ค่าพีเอชอาจทำให้เกิดสารประกอบได้ในหลายรูปแบบ นอกจากผลึก MAP เช่น Mg^{2+}, $MgOH^{+}$, $MgH_2PO_4^{+}$, $MgHPO_4$, H_3PO_4, $H_2PO_4^{-}$, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}, $MgPO_4^{-}$, NH_3 (aqueous) เป็นต้น ภาพที่ 2.5 แสดงช่วงค่าพีเอชที่มีผลต่อการเกิดสารประกอบต่างๆ จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าพีเอชของน้ำมีค่าน้อยกว่า 7 (pH < 7) แมกนีเซียม แอมโมเนีย และฟอสเฟต จะสามารถละลายน้ำได้ดีจึงไม่จับตัวกันเป็นผลึก MAP เมื่อค่าพีเอชมากกว่า 10 (pH>10) ขึ้นไป จะเกิดสารประกอบในรูป $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ หรือ $Mg(OH)_2$ และเมื่อค่าพีเอชมีค่าประมาณ 7-9 (pH $\cong$ 7 - 9) จะเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดตะกอนผลึก MAP นอกจากนี้ที่สภาวะดังกล่าวอาจเกิดการตกผลึกของแคลเซียมไฮดรอกซี-อะพาไทต์ (Calcium hydroxyapatite, HAP) ดังนั้นในการสร้างตะกอนผลึก MAP จึงต้องการการควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้เกิดตะกอนผลึกอย่างสมบูรณ์

แนวทางในการเพิ่มสภาพความเป็นด่างให้กับน้ำเสียเพื่อเร่งการตกตะกอนสามารถทำได้หลายแนวทาง (De-Bashan และ Bashan, 2004) เช่น

- การเติมแมกนีเซียม เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) และ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium Hydroxide, $Mg(OH)_2$)
- การเติมสารเคมีที่มีสภาพเป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์
- กระบวนการเป่าลมอากาศ (Air striping)



ภาพที่ 2.5 การเกิดผลึกในรูปแบบต่างในสารละลายที่มีแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ (Choi, 2007 อ้างโดยบริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

2.12.2 อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม (Molar ratio)

กลไกการเกิดผลึก MAP ตามทฤษฎีนั้นต้องการอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+}: NH_4^+: PO_4^{3-}) เท่ากับ 1: 1: 1 (Saidou และคณะ, 2008) จากการศึกษาในต่างประเทศพบว่า น้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยทั่วไปนั้นมีปริมาณของแมกนีเซียมน้อยหรือไม่เพียงพอ เมื่อเทียบกับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ในการตกผลึก MAP จึงต้องเติมสารเคมีเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณของแมกนีเซียมให้มีค่าเหมาะสมต่อการเกิดผลึก นอกจากนี้ปริมาณแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+}: PO_4^{3-}) ที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกจะมากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับสารประกอบอื่นๆ ที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย เช่น สารอินทรีย์ (Organic matter) และไอออนต่างๆ ในที่อยู่ในน้ำเสียซึ่งทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมที่เติมลงไป จึงทำให้ต้องการปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้นเพื่อการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ จากการศึกษาของ Celen และคณะ, 2007 พบว่า อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมเพื่อการเกิดผลึก MAP ของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+}: PO_4^{3-}) ที่มากเกินพอต่อการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย คือ 1.6: 1 ดังนั้นในการแยกฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการนี้จึงต้องทำการเติมแมกนีเซียมให้เพียงพอต่อความต้องการในการเกิดปฏิกิริยา

ปริมาณการเติมแมกนีเซียมเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเกิดผลึก MAP หลากหลายงานวิจัยได้ให้ความสำคัญกับชนิดของสารประกอบแมกนีเซียมและปริมาณที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึก MAP สารประกอบแมกนีเซียมที่ได้มีการศึกษาในงานวิจัยและนำมาใช้กับโรงงานต้นแบบ ได้แก่ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ โดยสารประกอบแมกนีเซียมแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อจำกัดดังนี้

- แมกนีเซียมออกไซด์ มีข้อดีในการเพิ่มค่าพีเอชของน้ำ ซึ่งช่วยเร่งการตกตะกอนผลึก MAP ได้ดีโดยไม่ต้องเติมสารเคมีเพื่อเพิ่มค่าพีเอชของน้ำให้สูงขึ้นอีก แต่ข้อจำกัดของแมกนีเซียมออกไซด์ คือ ละลายน้ำได้ยาก ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาช้า และเหลือแมกนีเซียมออกไซด์หลังจากการทำปฏิกิริยา

- แมกนีเซียมคลอไรด์ พบว่า เป็นสารประกอบแมกนีเซียมที่เหมาะสมต่อการเติมเพื่อตกตะกอนผลึก MAP เนื่องจากมีข้อดี คือ ละลายน้ำได้ง่าย ทำให้ใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้นกว่า แต่ข้อจำกัดของการใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ก็คือ เมื่อละลายน้ำจะเป็นการเพิ่มปริมาณกรดอ่อนลงในน้ำ ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่ไม่เหมาะสมต่อเกิดผลึก MAP ดังนั้นจึงต้องการเติมสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่ทำการศึกษา

2.12.3 **สิ่งเจือปนในน้ำเสีย**

ปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนผลึก MAP ได้แก่ ปริมาณสารแขวนลอย ปริมาณไอออนในน้ำ (Ionic strength) ซึ่งมีผลต่อการตกตะกอนของผลึกต่างๆ ในน้ำ และปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมลงไป

2.13 **ประโยชน์ของผลึก MAP ต่อภาคการเกษตรและสิ่งแวดล้อม**

เนื่องจากการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนผลึก MAP เป็นการลดปริมาณธาตุอาหารที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อภาคการเกษตรและสิ่งแวดล้อมดังนี้

- เป็นการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในน้ำเสียในขั้นตอนเดียว
- ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยน้ำทิ้งที่มีปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชทำให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดิน และยังเป็นการช่วยการลดการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันที่ส่งผลเสียต่อระบบนิเวศทางน้ำ

- คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มีค่าผ่านหรือใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง เนื่องจากมีการบำบัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จึงสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงกับการเพาะปลูกและการเกษตร เนื่องจากมีปริมาณของธาตุฟอสฟอรัสที่ไม่มากเกินไปต่อความต้องการของพืช (บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

2.14 ประโยชน์ของผลึก MAP ในรูปของปุ๋ยทางการเกษตร

จากรายงานการศึกษาพบว่าผลึก MAP มีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นปุ๋ยทางการเกษตร แต่มีการนำไปผลิตอย่างเป็นทางการเพียงจำนวนน้อย ซึ่งในบางบริษัทอาจใช้ชื่อของปุ๋ยแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟตว่า “MAP” เพื่อป้องกันการสับสนกับปุ๋ย Mono-ammonium phosphate

- การนำผลึก MAP ไปใช้เป็นปุ๋ย (Slow-release fertilizer) (Munch และ Barr, 2001 อ้างโดยบริษัททีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552) ที่สามารถใส่ได้ในปริมาณมากในครั้งเดียว (Single high dose) โดยไม่เป็นอันตรายต่อพืช ซึ่งพืชที่ได้เหมาะสมได้แก่ พืชยืนต้นอายุยาว พืชดอก ไม้ประดับ นาข้าว

- ผลึก MAP สามารถนำไปผสมกับสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ดี (เช่น Phosphoric acid, H_3PO_4) เพื่อนำไปใช้ในการปลูกพืชหรือไม้กระถาง

- ผลึก MAP สามารถนำไปทดแทนปุ๋ยแอมโมเนียฟอสเฟต (Di-ammonium phosphate, $(NH_4)_2HPO_4$) ที่ผลิตจากการใช้สารเคมีสองชนิดคือ กรดฟอสฟอริกและแอมโมเนีย

- การผลิตปุ๋ย โดยใช้ผลึก MAP ผสมกับกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) จะทำให้ได้ปุ๋ยละลายช้า (Slow-release fertilizer: Di-magnesium phosphate, $MgHPO_4$) และปุ๋ยละลายเร็ว (Fast-release fertilizer: Di-ammonium phosphate, $(NH_4)_2HPO_4$) ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่คุ้มค่า (Cost-effective) เมื่อเทียบกับการผลิตแบบเก่า

- ผลึก MAP ที่ไม่ได้ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ สามารถนำไปผสมกับถ่าน (Peat) เพื่อใช้เป็นวัสดุทางการเกษตร

- แมกนีเซียมในผลึก MAP เป็นธาตุอาหารรองที่มีประโยชน์ต่อพืชจำพวกตระกูลหัวใต้ดิน เช่น Sugar beet และข้าว เป็นต้น (บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

สรุปข้อดีและข้อจำกัดของการนำน้ำทิ้งฟาร์มสุกรไปผลิตปุ๋ย MAP ได้ดังนี้

ข้อดี

1) สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรภายในครั้งเดียว
2) ผลึก MAP สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าทางการเกษตรและเป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ย
3) ไม่ต้องคำนึงถึงสิ่งเจือปนและโลหะหนักในน้ำเสีย
4) การขนส่งทำได้สะดวก เนื่องจากผลึก MAP อยู่ในรูปของแข็ง
5) ลดการปนเปื้อนของธาตุอาหารลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ
6) มีโรงงานต้นแบบขนาดใหญ่ (Full scale) ดำเนินการอย่างเป็นรูปธรรม

ข้อจำกัด

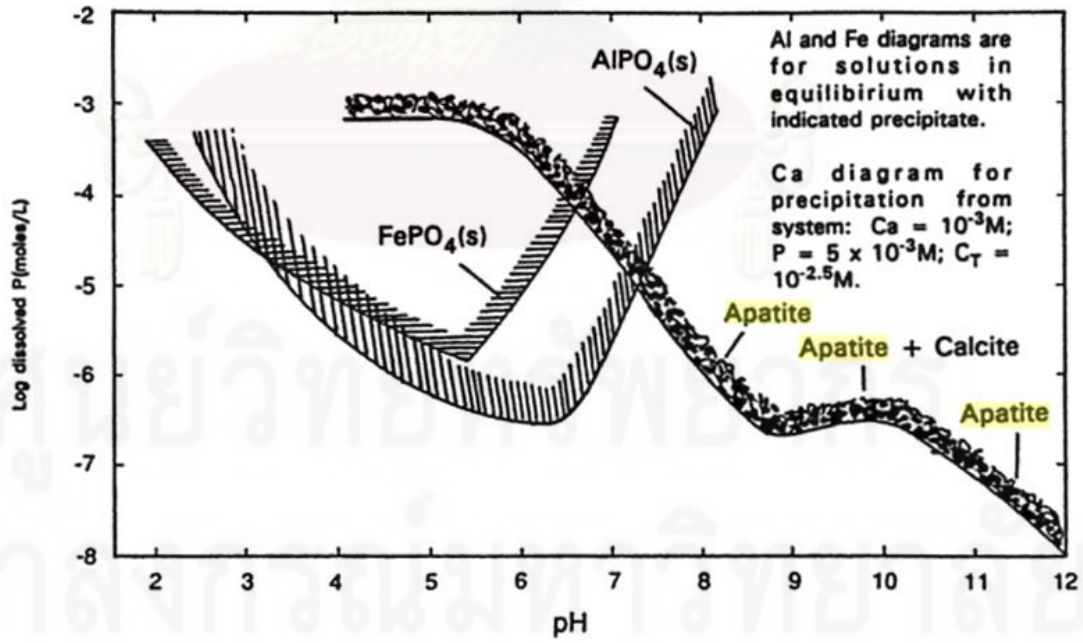
1) เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีแมกนีเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส
2) ค่าใช้จ่ายจากการเติมสารเคมี
3) ค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งระบบและถังปฏิกรณ์
4) การควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมอาจทำได้ยาก

2.15 การเกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟต (Calcium Phosphate)

การตกตะกอนของ แคลเซียม (Ca^{2+}) และฟอสเฟต (PO_4^{3-}) สามารถตกตะกอนได้หลายรูปแบบ ได้แก่ $Ca(H_2PO_4)_2$ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ $CaHPO_4$ $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ $Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)$ (Apatite) และ $Ca_5(PO_4)_3 \cdot OH$ (Hydroxyapatite, HAP) รูปแบบผลึกฟอสเฟตที่เกิดจากการตกตะกอนผลึกด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและฟอสฟอรัส (Ca^{2+}: PO_4^{3-}) ที่ค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.15 โดยปัจจัยการเกิดผลึกฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ สภาวะการอิ่มตัว (Super saturation) และสิ่งเจือปนในน้ำเสีย เป็นต้น โดยผลึกอะพาไทต์ (Apatite) เป็นผลึกฟอสเฟตที่มีความเสถียรและเป็นรูปแบบผลึกที่นิยมใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสจากระบบบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้การเกิดผลึกอะพาไทต์นั้นสามารถเกิดได้ในช่วงค่าพีเอชเท่ากับ 8 ถึง 9.8 (pH = 8.0 - 9.8) และระดับอุณหภูมิห้อง (Yigit และ Mazlum, 2007 อ้างโดยบริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด) ช่วงของค่าพีเอชต่อการละลายน้ำของแคลเซียมฟอสเฟตดังแสดงในภาพที่ 2.6

ตารางที่ 2.15 รูปแบบผลึกฟอสเฟตที่เกิดจากการตกตะกอนผลึกด้วยอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมและฟอสฟอรัส (Ca^{2+}: PO_4^{3-}) ที่ค่าต่างๆ (บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

สารประกอบฟอสเฟต (Compound)	สูตรเคมี (Formula)	อัตราส่วนโมล (Ca^{2+}: PO_4^{3-} ratio)	ค่าคงที่ผลคูณของการละลาย (solubility product constant, Ksp)
Brushite or dicalcium phosphate dihydrate (DCPD)	$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	1	2.49×10^{-7}
Monetite (DCPA)	$CaHPO_4$	1	1.26×10^{-7}
Octacalcium phosphate (OCP)	$Ca_4H(PO_4)_3 \cdot 2.5H_2O$	1.33	1.25×10^{-47}
Amorphous calcium phosphate (ACP)	$Ca_3(PO_4)_2$	1.5	2.0×10^{-29}
Hydroxylapatite (HAP)	$Ca_5(PO_4)_3OH$	1.67	4.7×10^{-59}



ภาพที่ 2.6 ช่วงของค่าพีเอชต่อการละลายน้ำของผลึกอะพาไทต์
(บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

การตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟต สามารถทำโดยการเติมปูนขาวหรือแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์ (Calclium hydroxide, $Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นวิธีนิยมใช้กันในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อการกำจัดฟอสฟอรัส โดยฟอสเฟตจะถูกตกผลึกออกมาในรูปของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ดังสมการเคมีของการตกตะกอนผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

$$5Ca^{2+} + 4OH^{-} + 3HPO_4 \rightarrow Ca_5(PO_4)_3OH + 3H_2O$$

2.16 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kim และคณะ (2006) ศึกษาการปรับปรุงความสามารถในการตกผลึก MAP เพื่อบำบัดไนโตรเจนในน้ำชะหลุมฝังกลบขยะของเทศบาล จากการศึกษาพบว่า ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9.0 และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.2: 1: 1.2 มีความเหมาะสมต่อการตกผลึก MAP โดยผลึก MAP จะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมีการความเข้มข้นของไอออนทั้ง 3 ชนิดรวมกันมากกว่าขีดจำกัดของการละลาย สารเคมีที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ และ KH_2PO_4 ซึ่งลำดับในการเติมสารเคมีมีผลต่อการตกผลึก MAP พบว่า เมื่อปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 หลังจากนั้นเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ และ KH_2PO_4 จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์และมีฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในน้ำเสียปริมาณมาก ในการศึกษาเมื่อเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ก่อนแล้วปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 9 หลังจากนั้นเติม KH_2PO_4 พบว่า น้ำเสียมีค่าพีเอชลดลงเหลือค่าพีเอช เท่ากับ 6 เนื่องจากเกิดผลึก MAP มีการปล่อย H^+ ออกมา ทำให้ค่าพีเอชลดลง จึงเกิดการยับยั้งการเกิดผลึก MAP ทำให้เกิดการแตกตัวของผลึก MAP ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในน้ำเสียปริมาณเพิ่มขึ้น จากการศึกษาเมื่อเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ แล้วปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 แล้วเติม KH_2PO_4 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนยังคงต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์และยังคงมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในน้ำเสีย เนื่องจากไอออนแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับ OH^- ในน้ำเสียอย่างรวดเร็วเกิดเป็นผลึกอสัณฐาน (Amorphous) คือ $Mg(OH)_2$ ส่งผลให้เป็นการเพิ่มค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ในน้ำเสีย จากการศึกษาเมื่อเติม KH_2PO_4 แล้วปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 หลังจากนั้นเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์และมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในน้ำเสียค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่นๆ แต่ในกรณีนี้ไอออนอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำเสีย เช่น Ca^{2+} สามารถทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้มาก จึงเกิดเป็นผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAP) ไดแคลเซียมฟอสเฟต และออกตะแคลเซียมฟอสเฟต ทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในน้ำเสียน้อยลง แต่ผลึกแคลเซียมฟอสเฟตซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกอสัณฐาน (Amorphous) เป็นตัวที่

ขัดขวางการเกิดผลึก MAP จากการศึกษาเมื่อเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ และ KH_2PO_4 หลังจากนั้นทำการปรับค่าพีเอชพบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เหลืออยู่ในน้ำเสียมีค่าน้อยกว่าที่สภาวะอื่นๆ นอกจากนี้ยังได้ผลึก MAP ที่มีความบริสุทธิ์สูง สามารถควบคุมปฏิกิริยาอื่นๆที่ไม่ต้องการให้น้อยลงได้ เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอออนแมกนีเซียมกับ OH^- และปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสกับไอออนแคลเซียม เป็นต้น

Ryu และคณะ (2007) ศึกษาการตกผลึก MAP เพื่อบำบัดไนโตรเจนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ โดยดำเนินการทดลองแบบทีละเท (Batch) พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 9.2 สามารถบำบัดไนโตรเจนได้เท่ากับ 78 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมที่มากเกินพอ ทำให้สามารถบำบัดได้ทั้งซีโอดีและไนโตรเจน จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสที่มากเกินพอจะทำให้เกิดผลึก MAP ปริมาณมาก ในบางกรณีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในสารละลายมีผลต่อการบำบัดไนโตรเจนมากกว่าไอออนของแมกนีเซียม

Song และคณะ (2007) ศึกษาการบำบัดและนำธาตุอาหารกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึก MAP จากน้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกร โดยดำเนินการทดลองแบบทีละเท (Batch) จากการศึกษา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP คือ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9.5 และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4: 8: 1 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสได้เท่ากับ 97 เปอร์เซ็นต์

Saidou และคณะ (2008) ศึกษาการตกผลึก MAP โดยใช้เทคนิคการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำ ซึ่งการตกผลึกเกิดขึ้นหลังจากอัดอากาศลงไป โดยปัจจัยของการตกผลึก MAP คือ อัตราการไหลของอากาศและค่าพีเอชของน้ำ จากการทดลองได้ควบคุมอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 พบว่า การตกผลึก MAP จะเกิดขึ้นที่ค่าพีเอชมากกว่า 8.1 ซึ่งควบคุมอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 10 ถึง 25 ลิตรต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและค่าพีเอชของน้ำ การตกผลึก MAP โดยการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากน้ำมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์

Warmadewanthi และ Liu (2008) ศึกษาการนำฟอสฟอรัสและไนโตรเจนกลับมาใช้ใหม่โดยการตกผลึก MAP ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ สารเคมีที่นำใช้ในการทดลอง

คือ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9 มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสได้เท่ากับ 47.4 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 3: 1 พบว่า มีประสิทธิภาพในบำบัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 92.1เปอร์เซ็นต์ แต่จากการศึกษา สรุปว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1: 1 หรือ 2: 1 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในตกผลึก MAP เนื่องจาก ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตมากกว่า 2.5: 1 แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสได้สูงแต่จะเกิดผลึกของโบเบียร์ไรท์ ($Mg_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$) ร่วมด้วย ซึ่งจากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเพิ่มขึ้นจาก 1: 1 เป็น 2: 1 พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 1.9 เปอร์เซ็นต์เป็น 40 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจน จะลดลง เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตมากกว่านี้ เนื่องจากอาจจะเกิดผลึกรูปอื่นๆ นอกจากนี้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta potential) และค่าความขุ่นที่เหลืออยู่มีผลต่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุเป็นลบ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเป็นทำให้ศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์กลายมาเป็นบวกมากขึ้น และเข้าใกล้ศูนย์ การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการตกผลึก MAP โดยควบคุมอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2.5: 1 พบว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 8 เป็น 9 ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจาก 48.7 เปอร์เซ็นต์เป็น 84.2 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 10 จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงสุดเท่ากับ 93.2 เปอร์เซ็นต์ แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสจะลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงกว่านี้

Yetilmezsoy และ Sapci-Zengin (2008) ศึกษาการนำไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากระบบยูเอเอสบี (UASB) ที่บำบัดน้ำเสียมูลสัตว์ปีกกลับมาใช้ใหม่โดยการตกผลึก MAP งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยระดับทดลอง (Lab scale) โดยดำเนินการแบบทีละเท (Batch) สารเคมีที่นำมาใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ชนิดดังนี้ 1) $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ผสมกับ KH_2PO_4 2) $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ผสมกับ $NaHPO_4 \cdot 7H_2O$ และ 3) MgO ผสมกับ H_3PO_4 85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ผสมกับ KH_2PO_4 มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้สูงสุด และสามารถบำบัดซีโอดีและสีได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีชนิดอื่นๆ โดยบำบัดไนโตรเจนได้เท่ากับ 85.4 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9.0 ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1: 1: 1 สามารถบำบัดซีโอดีได้เท่ากับ 54 เปอร์เซ็นต์และบำบัดสีได้เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ ต่อมามีการทดลองเพิ่ม

อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมให้มากเกินพอ โดยมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.5: 1: 1 พบว่าสามารถบำบัดไนโตรเจนและสีได้มากขึ้น เท่ากับ 89.3 เปอร์เซ็นต์ และ 56.1เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มสัดส่วนของสารเคมีทำให้มีค่าใช้จ่ายและมีสิ่งที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง นั่นก็คือ แมกนีเซียมและฟอสฟอรัส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสรุปว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง แมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมในการบำบัดไนโตรเจนคือ 1: 1: 1 เพราะว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีไม่เพิ่มขึ้น ยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเท่าเดิม คือ อยู่ในช่วง 51 ถึง 53.3 เปอร์เซ็นต์ภายใต้การควบคุมอัตราส่วนโดยโมลในช่วง 0.5 ถึง 1.5

Zhang และคณะ (2008) ศึกษาการบำบัดไนโตรเจนจากน้ำชะหลุมฝังกลบขยะโดยการตกผลึก MAP ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง คือ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ และ $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ พบว่า ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 9.5 และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.15: 1: 1 สามารถบำบัดไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพและป้องกันไม่ให้น้ำเสียลังจากตกผลึก MAP มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูง สารเคมีที่นำมาใช้ทดลองมีทั้งหมด 3 ชนิด โดย $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ผสมกับ $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้สูงสุดแต่เกิดความเข้มข้นของเกลือสูงในน้ำเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีตัวอื่น เช่น MgO ผสมกับ H_3PO_4 85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดความเข้มข้นของเกลือน้อยลง แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้น้อยกว่าเท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเติม $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ ผสมกับ $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ จะเกิดความเข้มข้นของเกลือน้อย แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนได้น้อยที่สุด ภายใต้สภาวะที่ทำการศึกษา พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.99$ การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึก MAPโดยใช้ FTIR และ XRD พบว่า ที่ผิวของผลึกส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของ ออกซิเจน ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียม ตามลำดับ และองค์ประกอบส่วนน้อยคือ คาร์บอน โพแทสเซียม โซเดียม และคลอไรด์ตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของผลึก พบว่า ไม่มีรูปร่างผลึก ผิวหยาบ และมีขนาดไม่เท่ากัน

Uludag-Dimirer และ Othman (2009)ศึกษาการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสียส่วนบนของถังย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ โดยการตกผลึก MAP จากการทดลองพบว่าการตกผลึก MAP จะเกิดขึ้นที่ค่าพีเอชเท่ากับ 9.0 และเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วง 5-10 นาทีแรก น้ำเสียที่นำมาทำการทดลองเริ่มแรกมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมมากเกินพอ มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 17.2: 8.6: 1.0 พบว่า ได้ผลึก MAP ที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ บำบัดไนโตรเจนได้ต่ำ แต่สามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้สูง เมื่อปรับอัตราส่วนโดย

โมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1: 1: 1 พบว่า จะได้ผลึก MAP ที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่มีการเติมแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสลงไปเพื่อปรับอัตราส่วนให้ได้ในช่วงที่ทำการศึกษา จึงมีผลทำให้น้ำเสียหลังจากตกผลึก MAP มีความเข้มข้นของแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในน้ำเสียปริมาณมาก เมื่อปรับอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 2: 1: 1 พบว่า ได้ผลึก MAP ที่มีความบริสุทธิ์สูง สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้มากกว่า แต่มีการเติมแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสลงไปปริมาณมาก จึงทำให้น้ำเสียหลังจากตกผลึก MAP มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในน้ำเสียปริมาณมากเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้สามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตกผลึก MAP ดังแสดงในตารางที่ 2.16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.16 ตัวอย่างงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการตกผลึก MAP

ผู้วิจัย	ชนิดของน้ำเสีย	ระยะเวลาในการกวน (นาที)	ค่าพีเอชที่เหมาะสม	$[Mg^{2+}]$: $[NH_4^+]$: $[PO_4^{3-}]$	ประสิทธิภาพการบำบัด	
					ชนิด	เปอร์เซ็นต์
Kim และคณะ (2006)	น้ำชะหลุมฝังกลบขยะ	3	9.0	1.2: 1: 1.2	ไนโตรเจน	90
Ryu และคณะ (2007)	น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ	-	9.2	1: 1: 1	ไนโตรเจน	78
Song และคณะ (2007)	น้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกร	30	9.5	1.4: 8: 1	ฟอสฟอรัส	97
Saidou และคณะ (2008)	น้ำเสียสังเคราะห์	-	> 8.1	1: 1: 1	ฟอสฟอรัส	78
Warmadewanthi และ Liu (2008)	น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ	40	9.0	1: 1: 1 3: 1: 1	ฟอสฟอรัส ฟอสฟอรัส	47.4 92.1
Yetilmezsoy และ Sapci-Zengin (2008)	น้ำทิ้งจากระบบยูเอเอสบีที่บำบัดน้ำเสียของมูลสัตว์ปีก	2	9.0	1.5: 1: 1	ไนโตรเจน	89.3
Zhang และคณะ (2008)	น้ำชะหลุมฝังกลบขยะ	30	9.5	1.5: 1: 1	ไนโตรเจน	85.5
Uludag-Dimirer และ Othman (2009)	น้ำเสียส่วนบนของถังย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ	10	9.0	1: 1: 1	ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส	64 63

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย (Hazardous waste laboratory) อาคารสี่ ภาควิชา (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมเคมี และวิศวกรรมโลหการ) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีแผนการดำเนินงานดังนี้

3.1 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยมี 10 ขั้นตอน ดังนี้

1) การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
2) การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ
3) การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ
4) การศึกษาค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP
5) การศึกษาลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และความเป็นผลึก MAP ที่เกิดขึ้นหลังจากการตกผลึกในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร
6) การศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP
7) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.2 การเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์สำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการ

1) เครื่องกวนผสม (Magnetic Stirrer): ยี่ห้อ LABINCO (รูปในภาคผนวก ก)
2) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter): ยี่ห้อ DENVER INSTRUMENT รุ่น UB-10
3) เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง: ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น DRA-GON 204
4) เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง: ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Adventurer

5) ชุดกรอง ประกอบด้วย

- กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร
- เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ ขนาด 2000 มิลลิลิตร

6) ตู้อบความร้อน (Oven): ยี่ห้อ Jermaks

7) กระดาษกรอง Whatman no.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร

8) เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer): ยี่ห้อ Thermo ELECTRON COROPERATION รุ่น Heλios α

9) ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

10) ถาดพลาสติกอะคริลิก (รูปในภาคผนวก ก)

ชุดอุปกรณ์สำหรับทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.1

ภาพที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับทดลอง

3.2.2 เครื่องมือที่วิเคราะห์ผลึก MAP ที่ผลิตได้และวิเคราะห์ปริมาณโลหะ

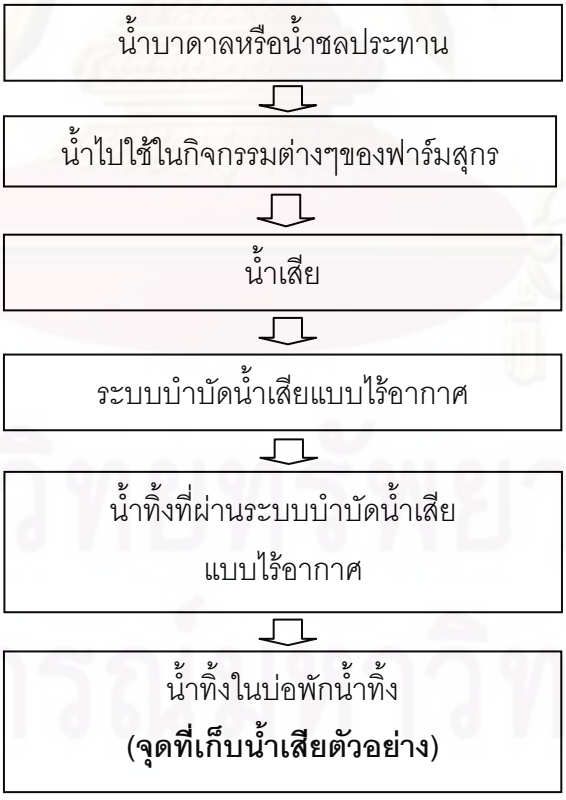
1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope with EDS Attachment, SEM-EDS): ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800LV และ Link ISIS Series 300
2) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD): ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Advance
3) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS): ยี่ห้อ GBC รุ่น Avanta

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1) แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) (AR grade, CARLO ER-BA)
2) โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) (AR grade, QRëC)
3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
5) น้ำกลั่น

3.3 น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาศึกษา

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรสำหรับการศึกษานี้เป็นน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ถึง 3.3) ที่ฟาร์มสุกรประชาฟาร์ม อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วง (Grab sampling) จากจุดกึ่งกลางของบ่อพักน้ำทิ้งบ่อแรก ใส่ลงในภาชนะเก็บน้ำตัวอย่าง (ดังแสดงในภาพที่ 3.4) ทำการเก็บตัวอย่างในวันที่ 16 ตุลาคม 2552



ภาพที่ 3.2 แหล่งที่เก็บน้ำเสียตัวอย่างจากฟาร์มสุกร

ภาพที่ 3.3 บ่อพักน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ภาพที่ 3.4 การเก็บน้ำเสียตัวอย่างจากบ่อพักน้ำทิ้ง

3.4 การเก็บรักษาน้ำเสียตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ทำการเก็บแบบจ้วงจากบ่อพักน้ำทิ้ง โดยน้ำทิ้งที่เก็บมาเพื่อทำการตรวจสอบคุณภาพนั้น บางพารามิเตอร์จะทำการวิเคราะห์ในภาคสนาม ได้แก่ ค่าพีเอช ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ สามารถที่จะนำมาทำการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการได้ โดยการรักษาคุณภาพน้ำไว้ก่อน เพื่อไม่ให้ส่วนประกอบของน้ำเปลี่ยนแปลงไปทั้งทางเคมีและทางกายภาพ วิธีการรักษาสภาพมีดังนี้

1. น้ำทิ้งที่เก็บมาจะแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในที่มืดเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสและของแข็งแขวนลอย และใช้ในการทดลองตกผลึก MAP ต่อไป

2. น้ำทิ้งที่เก็บมาจะปรับค่าพีเอชให้ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดซัลฟูริกและแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในที่มืด เพื่อวิเคราะห์ซีโอดีและไนโตรเจน และใช้ในการทดลองตกผลึก MAP ต่อไป

3. น้ำทิ้งที่เก็บมาจะปรับค่าพีเอชให้ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกและแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในที่มืด เพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะ และใช้ในการทดลองตกผลึก MAP ต่อไป

รายละเอียดขั้นตอนการเก็บรักษาตัวอย่างน้ำของแต่ละพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเก็บรักษาน้ำเสียตัวอย่าง (APHA, AWWA และ WEF, 2005)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	**ปริมาตรที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ (มิลลิลิตร)**	**วิธีการเก็บรักษา**	**ระยะเวลาที่สามารถเก็บไว้ก่อนการวิเคราะห์**
ค่าพีเอช	50	วัดในภาคสนาม	วิเคราะห์ทันที หรือ 24 ชั่วโมง
ซีโอดี	100	วิเคราะห์ทันทีหรือปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกให้ค่าพีเอชน้อยกว่า 2 และแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในที่มืด	7 วัน
ปริมาณไนโตรเจน	500	วิเคราะห์ทันทีหรือปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกให้ค่าพีเอชน้อยกว่า 2 และแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในที่มืด	7 วัน
ปริมาณฟอสฟอรัส	100	วิเคราะห์ทันทีหรือแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในที่มืด	48 ชั่วโมง
ปริมาณของแข็งแขวนลอย	200	วิเคราะห์ทันทีหรือแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในที่มืด	7 วัน
ปริมาณโลหะ: แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี	1,000	วิเคราะห์ทันทีหรือปรับสภาพด้วยกรดไนตริกให้ค่าพีเอชน้อยกว่า 2 และแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในที่มืด	6 เดือน

3.5 การดำเนินการทดลอง

3.5.1 วิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่าพีเอช ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณโลหะ คือ แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี ตามวิธีมาตรฐาน (Standard methods, 2005) ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศตามวิธีมาตรฐาน (Standard methods, 2005)

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1) ค่าพีเอช	เครื่องวัดพีเอช
2) ซีโอดี	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด
3) ของแข็งแขวนลอย	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (GF/C)
4) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	วิธีแมคโครเจลดาห์ล
5) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	วิธีแวนาโดโมลิบโดฟอสฟอริก แอซิด
6) ปริมาณโลหะ	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

3.5.2 ศึกษาค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่พีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.5 และตัวแปรที่ใช้ในการตกผลึก MAP ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

1) การเตรียมน้ำเสีย

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้ จะนำมาคำนวณเพื่อหาปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมลงไปเพื่อควบคุมอัตราส่วนของแมกนีเซียมและฟอสเฟตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

วิธีการคำนวณเพื่อหาปริมาณสารเคมีที่เติมลงไปแสดงในภาคผนวก ข

2) ศึกษาค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP

อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ทำการศึกษา เท่ากับ 1: 1 1.2: 1 1.4: 1 1.6: 1 1.8: 1 และ 2: 1 ตามลำดับ โดยการเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตและโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และทำการปรับค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 8 8.5 9 9.5 และ10 ตามลำดับโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ

2.1) กวนผสมสารละลายให้เข้ากันโดยใช้ความเร็วรอบ 240 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที ในขั้นตอนการกวนผสมนี้จะทำให้เกิดการสร้างตะกอนผลึก MAP และตกตะกอนผลึกลงมา

2.2) ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

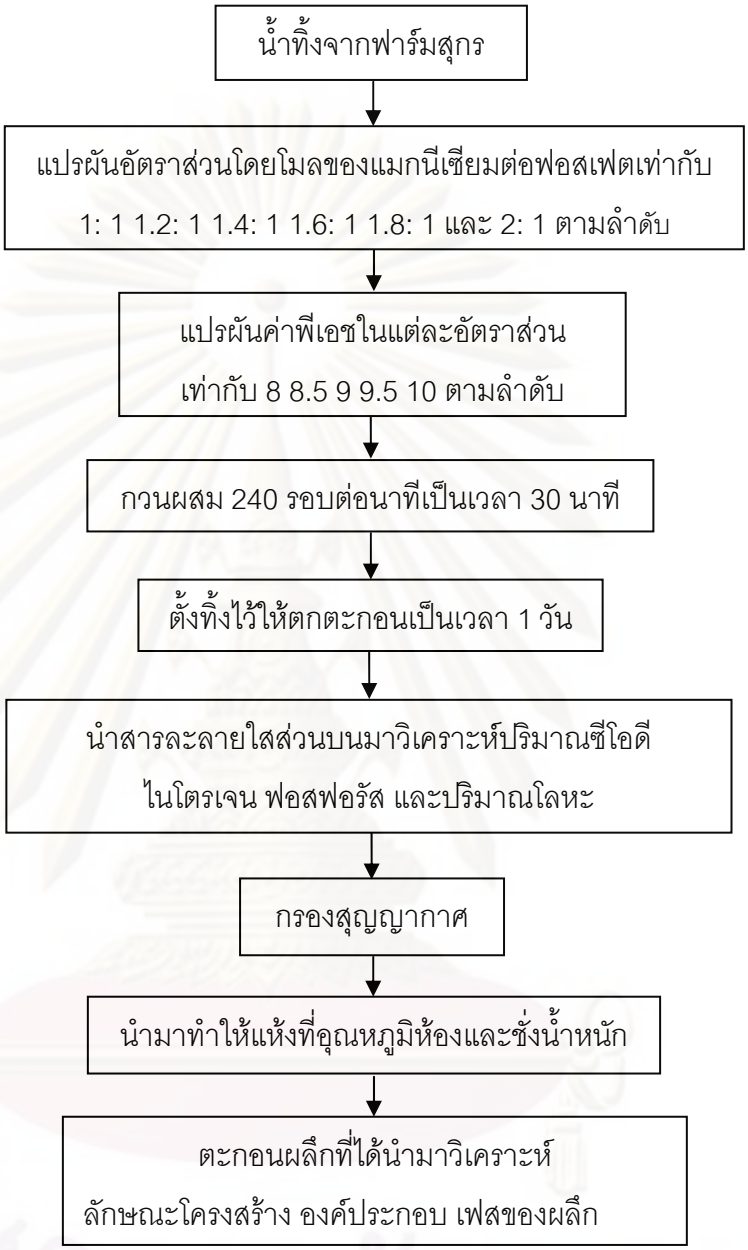
2.3) เมื่อครบเวลานำสารละลายใสส่วนบนมาวิเคราะห์ปริมาณซีโอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และปริมาณโลหะ ดังนี้ แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี

2.4) กรองตะกอนผลึกที่ได้ออกจากสารละลาย ส่วนตะกอนผลึกที่ได้นำมาทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องและชั่งน้ำหนัก

2.5) นำมาวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และเฟสของผลึก

- วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM-EDS)
- วิเคราะห์เฟสและความเป็นผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

ตัวแปรควบคุม	**รายละเอียด**
1. สารเคมีที่ใช้ในการตกผลึก MAP	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ และ NaH_2PO_4
2. สภาวะที่ศึกษา	เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึก MAP
2.1 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต	1: 1 1.2: 1 1.4: 1 1.6: 1 1.8: 1 และ 2: 1
2.2 ช่วงพีเอชที่ศึกษา	8 8.5 9 9.5 และ 10
2.3 สารเคมีที่ใช้ปรับค่าพีเอช	NaOH 6 M
ตัวแปรตาม	**วิธีวิเคราะห์**
1. ปริมาณซีโอดี ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งหลังจากตกผลึก MAP	Standard methods, 2005
ตัวแปรตาม	**เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์**
2. ลักษณะโครงสร้างและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของผลึก	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM-EDS)
3. เฟสและความเป็นผลึก	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD)
4. ปริมาณโลหะ ดังนี้ แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโต-มิเตอร์ (AAS)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ เพื่อส่งผลให้ได้ผลึก MAP ที่มีความบริสุทธิ์สูงและสามารถบำบัดธาตุอาหาร คือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้ สำหรับการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1) การวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ
2) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ
3) การศึกษาลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และความเป็นผลึก MAP
4) การศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ประกอบด้วยผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของน้ำดังนี้
   4.1) ปริมาณซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)
   4.2) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)
   4.3) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus, TP)
   4.4) ปริมาณโลหะ (Metals) คือ แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	คุณภาพน้ำทิ้ง	หน่วย	มาตรฐานน้ำทิ้ง
1. ลักษณะของตัวอย่างน้ำ	สีน้ำตาลเหลือง	-	ไม่ระบุค่า
2. ค่าพีเอช	8.35	-	5.5-9*
3. ซีโอดี	776	มิลลิกรัมต่อลิตร	400*
4. ของแข็งแขวนลอย	424	มิลลิกรัมต่อลิตร	200*
5. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	289	มิลลิกรัมต่อลิตร	200*
6. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	75	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
7. ปริมาณโลหะ			
1) แมกนีเซียม	68.73	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
2) แคลเซียม	39.39	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
3) โพแทสเซียม	38.48	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
4) เหล็ก	3.12	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
5) ทองแดง	0.74	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0**
6) สังกะสี	2.69	มิลลิกรัมต่อลิตร	5.0**

หมายเหตุ: เก็บตัวอย่างน้ำครั้งเดียว ณ วันที่ 16 ตุลาคม 2552 และทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

* มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก

** มาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน

ซึ่งแสดงรายละเอียดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรและการระบายน้ำลงทางชลประทานในภาคผนวก ง หน้า 97-101

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกร จะเห็นได้ว่า น้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีปริมาณซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และปริมาณไนโตรเจนเหลืออยู่ในปริมาณสูง ซึ่งเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง จึงต้องมีการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยปกติแล้วน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะถูกบำบัดต่อ เรียกว่าการบำบัดน้ำขั้นหลัง (Post Treatment) ฟาร์มสุกรที่ผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำมานั้นมีการ

สร้างบ่อพักน้ำเพื่อบำบัดขั้นสุดท้าย ซึ่งมีลักษณะเป็นบ่อคอนกรีตขนาดใหญ่โดยมีการสร้างผนังกั้น (Baffle) จำนวนหลายผนัง เพื่อบังคับทิศทางการไหลของน้ำทำให้โอกาสในการสัมผัสกันระหว่างน้ำทิ้งกับเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น จึงสามารถบำบัดสารอินทรีย์ให้ลดลงได้ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งก็มีค่าลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้การมีบ่อพักน้ำทำให้มีระยะเวลาในการเก็บกักน้ำนานจึงทำให้น้ำในบ่อเกิดการตกตะกอนลงเรื่อยๆปริมาณสารแขวนลอยในน้ำจึงลดลง แต่น้ำทิ้งที่เก็บไว้ในบ่อพักน้ำยังคงมีปริมาณธาตุอาหาร คือ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเหลืออยู่ในน้ำปริมาณสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางในการบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่จะนำมาทดลองตรงบ่อพักน้ำส่วนต้นที่รับน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจึงทำให้น้ำที่นำมาทดลองมีปริมาณซีโอดี สารแขวนลอยและไนโตรเจนปริมาณสูง การตกผลึก MAP เป็นแนวทางที่จะบำบัดน้ำทิ้งให้มีค่าผ่านมาตรฐานและเป็นการนำธาตุอาหารของพืชที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรโดยส่วนใหญ่จะมีโลหะ คือ แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสีเหลืออยู่ในน้ำทิ้งเท่ากับ 63.78 39.39 38.48 3.12 0.74 และ 2.69 ตามลำดับ ซึ่งมาจากอาหารและยาปฏิชีวนะที่ให้สุกร ซึ่งปริมาณของทองแดงและสังกะสี พบว่า มีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานในการระบายน้ำทิ้งลงทางชลประทานที่กำหนดไว้ (ทองแดงไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตรและสังกะสีไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) แสดงในภาคผนวก ง หน้า 101

ในการผลิตผลึก MAP นั้นจะต้องการสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึก ซึ่งการเกิดผลึก MAP ตามทฤษฎีนั้นต้องการอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต เท่ากับ 1: 1: 1 ตามสมการเคมี (Uludag-Dimirer และ Othman, 2009)

$$Mg^{2+} + NH_4^{+} + PO_4^{3-} + 6H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O\downarrow$$

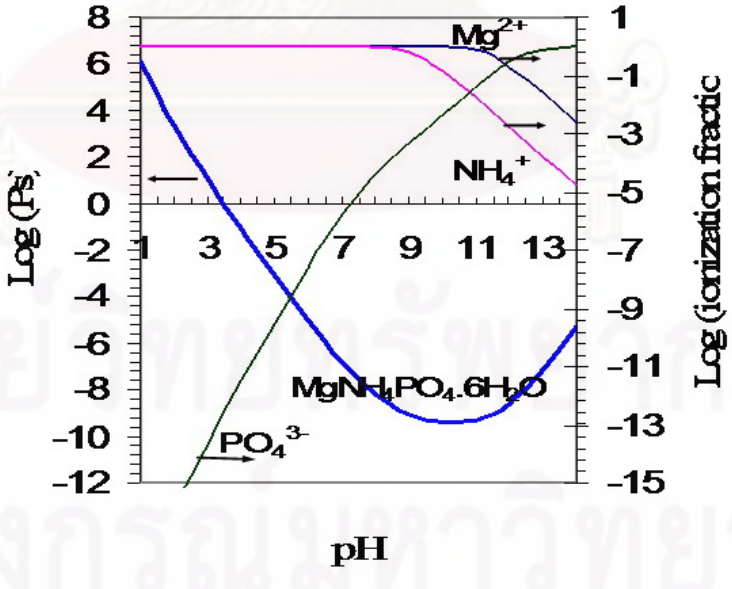
$$K_{sp} = [Mg^{2+}][NH_4^{+}][PO_4^{3-}] = 7.08 \times 10^{-14}$$

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Song และคณะ, 2007) พบว่า อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่มากเกินพอจะเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดผลึก MAP ซึ่งจากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกร พบว่า น้ำทิ้งมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต (Mg^{2+}: NH_4^{+}: PO_4^{3-}) เท่ากับ 1.2: 8.6: 1.0 แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข หน้า 85 ซึ่งมีปริมาณแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตมากเกินพอในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นน้ำเสียฟาร์มสุกรจึงเหมาะสมที่จะใช้ในการตกผลึก MAP

4.2 ผลการศึกษาค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP จากตะกอนผลึกที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

ในการเกิดผลึก MAP นั้นต้องมีการควบคุมสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกนั่นก็คือ อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟต และค่าพีเอชของน้ำที่เหมาะสมในการตกผลึก MAP ซึ่งจากสมการการเกิดผลึก MAP นั้นการเกิดผลึก MAPเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตตกตะกอนผลึกแยกออกมาจากน้ำ ซึ่งฟอสเฟตที่ทำปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดสารประกอบได้หลายรูปแบบ แต่ฟอสเฟตในรูปแบบ PO_4^{3-} นี้จะเกิดขึ้นที่สภาวะเป็นด่าง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่าพีเอชของน้ำให้เป็นด่างเพื่อให้เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยา

จากผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจากตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีสารประกอบต่างๆ คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี ซึ่งในการตกผลึก MAP นั้นเมื่อค่าพีเอชของน้ำมีค่ามากกว่า 7.5 (pH > 7.5) แมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตในน้ำจะทำปฏิกิริยาเกิดการรวมตัวกันและตกตะกอนผลึก MAP ลงมา แต่เมื่อค่าพีเอชของน้ำอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด (pH < 7.5) สารประกอบต่างๆในน้ำจะละลายน้ำได้ดีเกิดการแตกตัวเป็นไอออนอิสระทำให้ไม่จับตัวกันเป็นตะกอนผลึก MAP (Suzuki และคณะ, 2006) ดังแสดงในภาพที่ 4.1

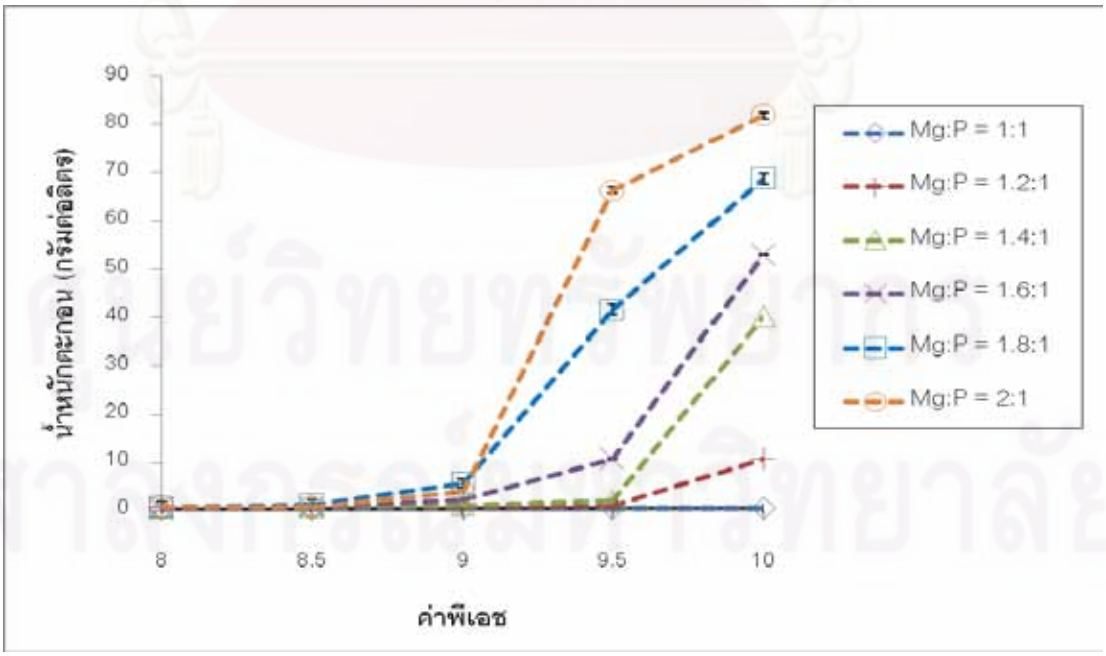


ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและการละลายน้ำ (Solubility) ของผลึก MAP (Suzuki และคณะ, 2006)

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการแปรผันอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1: 1 1.2: 1 1.4: 1 1.6: 1 1.8: 1 และ 2: 1 ตามลำดับ และทำการปรับค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 8 8.5 9 9.5 และ10 ตามลำดับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึก MAP โดยได้ทำการตกตะกอนผลึกที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตและค่าพีเอชต่างๆและเปรียบเทียบน้ำหนักตะกอนที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ ภาพที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณตะกอนที่ได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ

ค่า pH	อัตราส่วน Mg:P					
	1:1	1.2:1	1.4:1	1.6:1	1.8:1	2:1
	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)
8	0.3052	0.8058	0.6602	0.5271	0.9170	0.7817
8.5	0.3831	0.8949	0.8868	0.8915	1.3056	0.8010
9	0.5360	0.8895	1.1770	2.3128	5.7092	3.9586
9.5	0.6556	1.0986	2.0683	10.7617	41.6058	66.0770
10	0.6638	10.7385	40.2045	52.9539	68.2524	81.6400



ภาพที่ 4.2 ปริมาณตะกอนที่ค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ

จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต และค่าพีเอชของน้ำในช่วงที่ทำการศึกษา มีผลทำให้ได้ปริมาณตะกอนเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากในการปรับค่าพีเอชของน้ำให้สูงขึ้นมีผลทำให้เกิดการตกผลึกชนิดอื่นๆนอกเหนือจากผลึก MAP ได้แก่ แมกนีเซียมฟอสเฟตเตตระไฮเดรต ($Mg(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) เป็นต้น เป็นผลทำให้ต้องใช้ปริมาณแมกนีเซียมมากกว่าค่าตามทฤษฎี และเมื่อพีเอชสูงขึ้นค่าความสามารถในการละลายของผลึก MAP มีค่าลดลง จึงทำให้ได้น้ำหนักตะกอนเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้การเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต จะเป็นการเพิ่มปริมาณกรดอ่อนในน้ำทิ้ง ดังนั้นจึงต้องเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นเพื่อปรับให้ค่าพีเอชของน้ำให้อยู่ในช่วงที่ทำการศึกษา

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจากตารางที่ 4.1 พบว่า มีแคลเซียมปริมาณสูงพอที่จะทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตที่มีในน้ำกลายเป็นสารประกอบของแคลเซียมและฟอสเฟต ซึ่งเมื่อค่าพีเอชของน้ำเป็นด่างทำให้ไอออนของแคลเซียมและฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดการรวมตัวกันตกตะกอนลงมาโดยสามารถเกิดการตกตะกอนได้หลายรูปแบบ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับค่าพีเอชของน้ำให้อยู่ในช่วง 8-10 ซึ่งเป็นค่าที่มีความเหมาะสมในการตกตะกอนผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, $Ca_5(PO_4)_3 \cdot (OH)$) ด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงมีผลต่อน้ำหนักตะกอนที่เพิ่มขึ้นดังสมการเคมีของการตกตะกอนผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

$$5Ca^{2+} + 4OH^- + 3HPO_4 \rightarrow Ca_5(PO_4)_3OH + 3H_2O$$

นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจากตารางที่ 4.1 พบว่า มีปริมาณโลหะในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำของโลหะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ปริมาณสารตกตะกอน และการกวน เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการปรับค่าพีเอชของน้ำอยู่ในสภาพด่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้โลหะที่ละลายอยู่ในน้ำทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำแล้วตกตะกอนแยกออกมา ซึ่งความสามารถในการละลายของโลหะบางชนิดจะลดลงเมื่อปรับค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง (Isoelectric point) หลังจากนั้นจะกลับมาละลายได้อีก ดังนั้นน้ำหนักตะกอนที่เกิดขึ้นจึงมีผลมาจากน้ำหนักของโลหะชนิดอื่นที่เกิดจากการตกตะกอนเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น

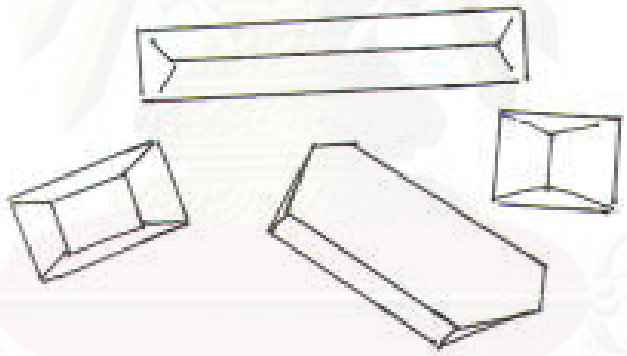
จึงสรุปได้ว่าน้ำหนักตะกอนที่เกิดขึ้นจากผลการศึกษาไม่สามารถบอกปริมาณผลึก MAP ที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากน้ำหนักตะกอนที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะเป็นน้ำหนักตะกอนผลึกอื่นๆที่ไม่ใช่ผลึก MAP จึงต้องมีการวิเคราะห์โครงสร้าง องค์ประกอบ และความเป็นผลึก MAP เพื่อหา

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตและค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึก MAP ต่อไป

4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และความเป็นผลึก MAP จากตะกอนผลึกที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นจากตะกอนผลึกที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

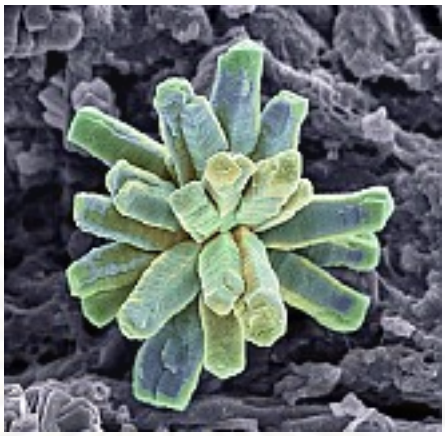
ผลึก MAP นั้นมีลักษณะโครงสร้างได้หลายรูปแบบดังนี้ “Coffin lid” และ“Hip-roof” มีขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ โครงสร้างผลึก MAP โดยมากจะมีลักษณะรูปทรงของผลึกเป็นปริซึม 3 เหลี่ยมและ 6 เหลี่ยม (http://www.clt.astate.edu/wwilliam/cls1521ua part 3.htm. [2552, มีนาคม 7]) ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างผลึก MAP

(http://www.clt.astate.edu/wwilliam/cls1521ua part 3.htm. [2552, มีนาคม 7])

ผลึกแคลเซียมฟอสเฟตมีลักษณะเป็นแท่งปริซึมบางๆหลายแท่งออกมาจากจุดกำเนิดเดียวกัน โครงสร้างที่พบเห็นอยู่บ่อยๆจะมีลักษณะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนคล้ายดาว จึงมีชื่อเรียกว่า“Stellar phosphate” (http://www.clt.astate.edu/wwiliam/cls1521uapart3.htm. [2552 ,มีนาคม 7]) ดังแสดงในภาพที่ 4.4

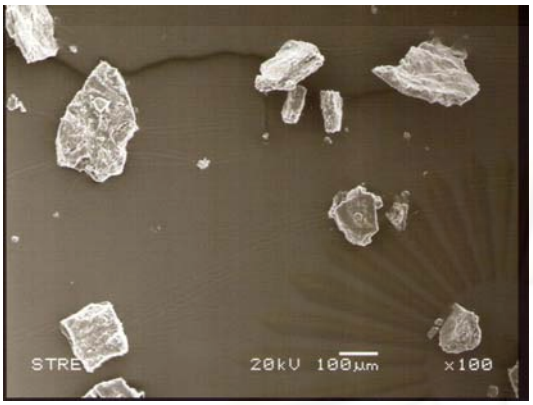


ภาพที่ 4.4 โครงสร้างผลึกแคลเซียมฟอสเฟต
(http://www.clt.astate.edu/wwiliam/cls1521uapart3.htm. [2552, มีนาคม 7])

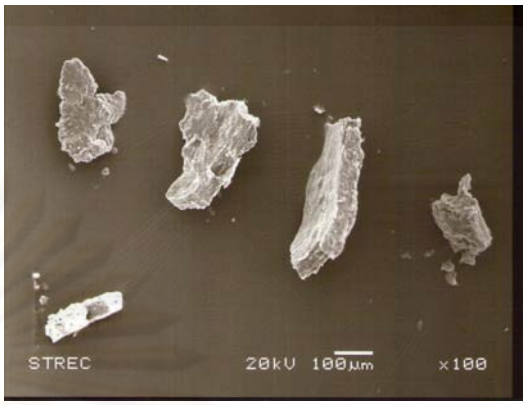
จากผลการวิเคราะห์ตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1: 1 1.2: 1 1.4: 1 1.6: 1 1.8: 1 และ 2: 1 ตามลำดับ และค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 8 8.5 9 9.5 และ10 ตามลำดับด้วย SEM พบว่า สามารถเกิดลักษณะตะกอนผลึกที่มีโครงสร้างหลายรูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากการศึกษาลักษณะตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 9 9.5 และ 10 ตามลำดับจะเห็นได้ว่าไม่พบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP ดังแสดงในภาพที่ 4.5 (ก) ถึง (จ)

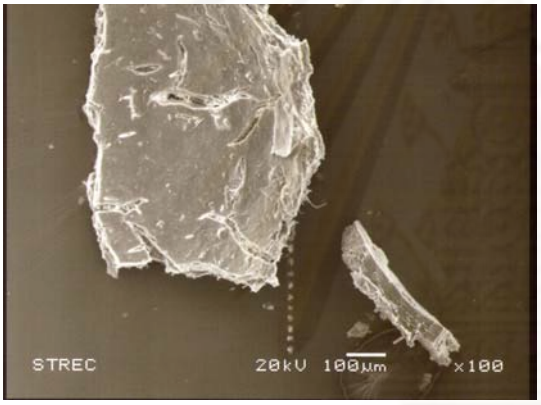
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



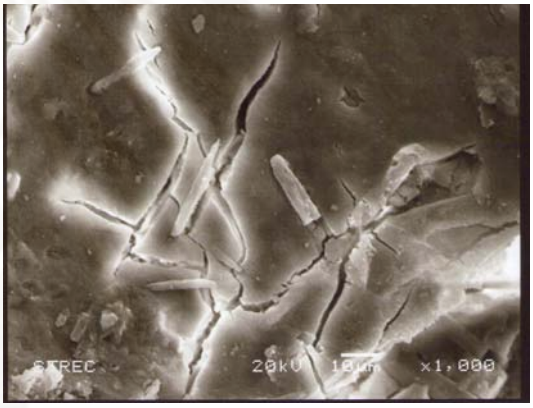
(ก) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1: 1 ที่พีเอช = 8
ที่กำลังขยาย 100 เท่า



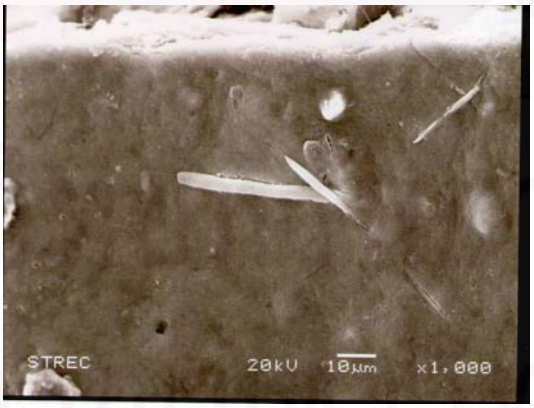
(ข) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1: 1 ที่พีเอช = 8.5
ที่กำลังขยาย 100 เท่า



(ค) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1: 1 ที่พีเอช = 9
ที่กำลังขยาย 100 เท่า



(ง) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1: 1 ที่พีเอช = 9.5
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



(จ) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1: 1 ที่พีเอช = 10
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

ภาพที่ 4.5 ลักษณะของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 และที่พีเอชค่าต่างๆ วิเคราะห์ด้วย SEM

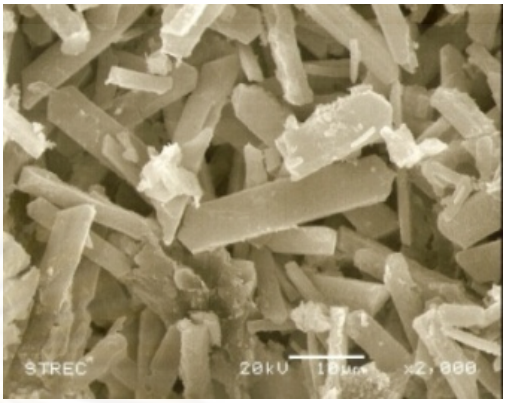
จากการศึกษาลักษณะตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 และ 9 เกิดผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP ที่สมบูรณ์เกิดขึ้นปริมาณมาก โดยมีลักษณะรูปทรงของผลึกเป็นปริซึม 3 เหลี่ยมและ6 เหลี่ยม ซึ่งผลึกที่ได้มีสีน้ำตาล มีความยาวตั้งแต่ 10 ถึง 50 ไมโครเมตร ขนาดของผลึกที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเลี้ยงผลึก ซึ่งหากใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงผลึกนาน ผลึกที่ได้จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.6 (ก) ถึง (ค)

ส่วนตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรพบว่า ที่ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 9.5 พบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP ปริมาณน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.6 (ง) เมื่อเทียบกับตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 และ 9

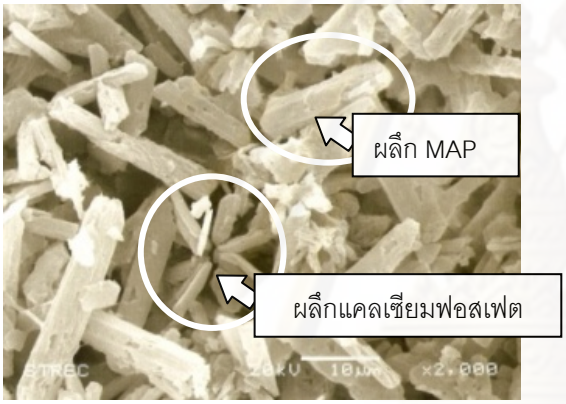
ส่วนตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรพบว่า ที่ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 10 ไม่พบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP ดังแสดงในภาพที่ 4.6 (จ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

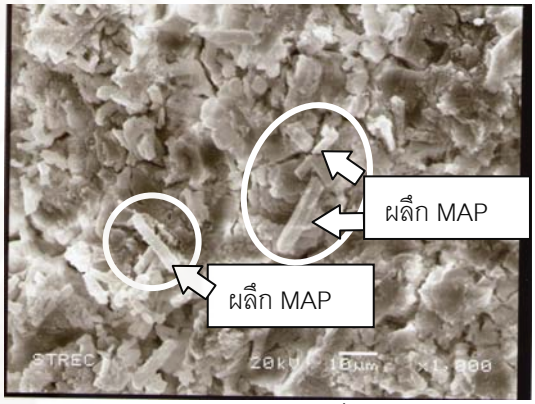
(ก) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 8
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



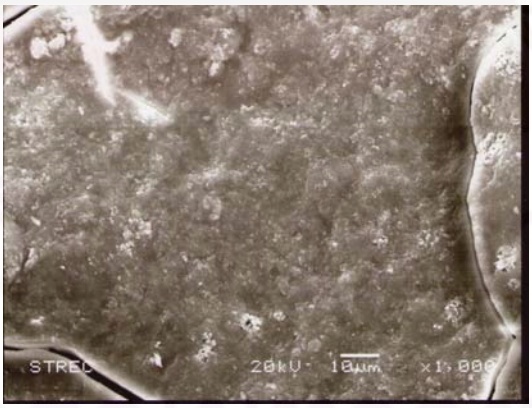
(ข) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 8.5
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



(ค) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 9
ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



(ง) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 9.5
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



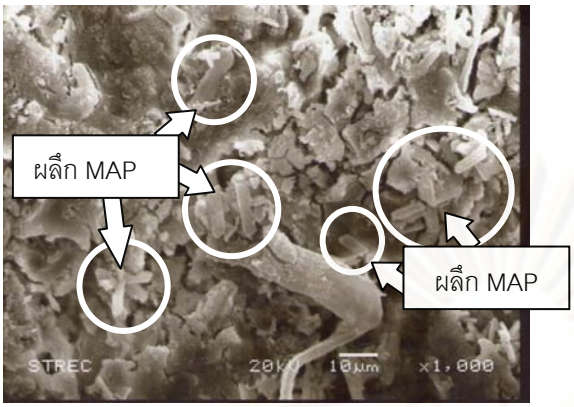
(จ) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 10
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

ภาพที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 และที่พีเอชค่าต่างๆ วิเคราะห์ด้วย SEM

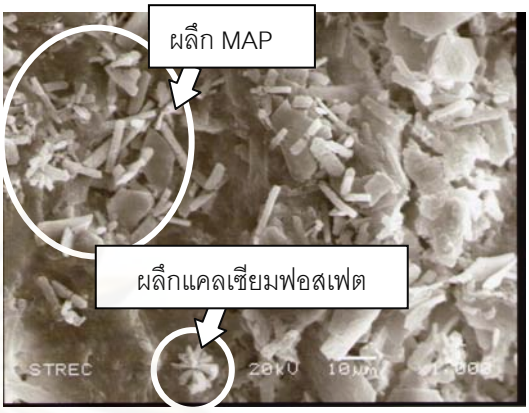
จากการศึกษาลักษณะตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.4: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 และ 9 พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP มีปริมาณน้อยและมีขนาดเล็ก โดยมีความยาวตั้งแต่ 10 ถึง 20 ไมโครเมตร เนื่องจากในสภาวะนี้มีการเกิดตะกอนผลึกชนิดอื่นที่ไม่ใช่ผลึก MAP ร่วมด้วยทำให้รบกวนการตกผลึก MAP จึงส่งผลให้ได้ตะกอนผลึกที่มีโครงสร้างเดียวกับผลึก MAP ที่มีขนาดเล็กและไม่ค่อยมีความสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ก) ถึง (ค) และลักษณะตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8.5 และ 9 นอกจากพบโครงสร้างที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP ยังพบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับผลึกแคลเซียมฟอสเฟตเกิดขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ข) ถึง (ค)

ส่วนตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรพบว่า ที่ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 9.5 และ 10 ไม่พบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ง) ถึง (จ)

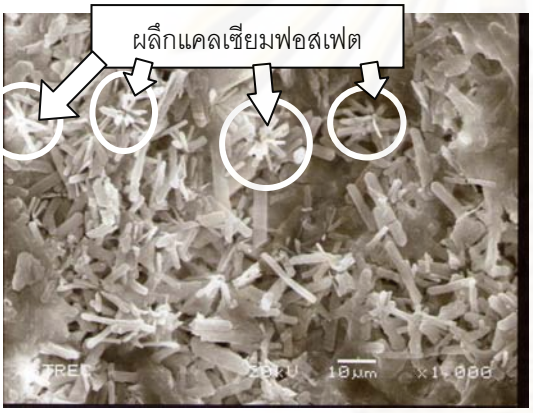
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



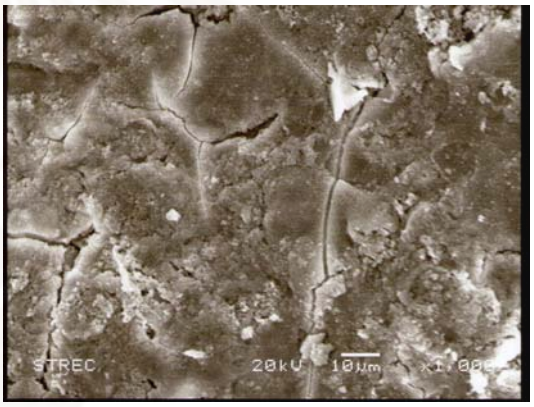
(ก) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.4: 1 ที่พีเอช = 8
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



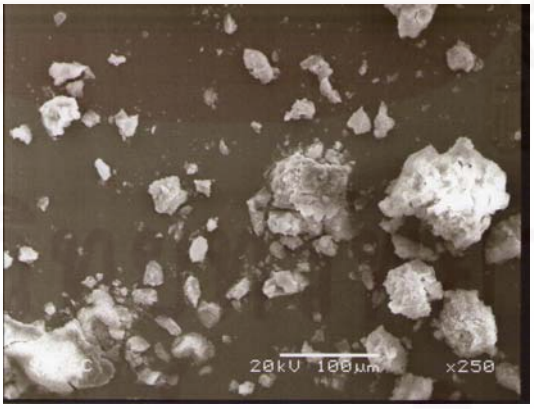
(ข) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.4: 1 ที่พีเอช = 8.5
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



(ค) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.4: 1 ที่พีเอช = 9
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



(ง) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.4: 1 ที่พีเอช = 9.5
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



(จ) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.4: 1 ที่พีเอช = 10
ที่กำลังขยาย 250 เท่า

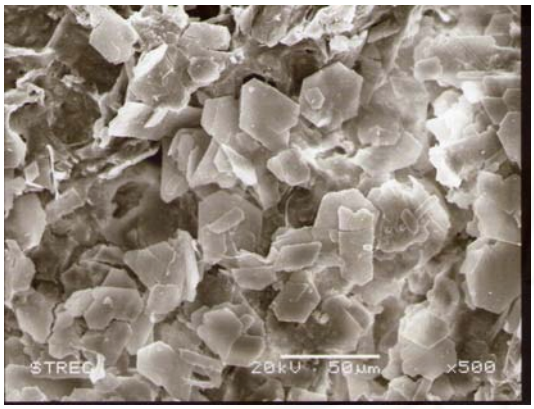
ภาพที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4: 1 และที่พีเอชค่าต่างๆ วิเคราะห์ด้วย SEM

จากการศึกษาลักษณะตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6: 1 ค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 8 8.5 9 9.5 และ 10 ตามลำดับไม่พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP แต่กลับพบผลึกรูปอื่น ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ก) ถึง (ง)

ส่วนตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6: 1 ค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 9 และ 9.5 พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ค)

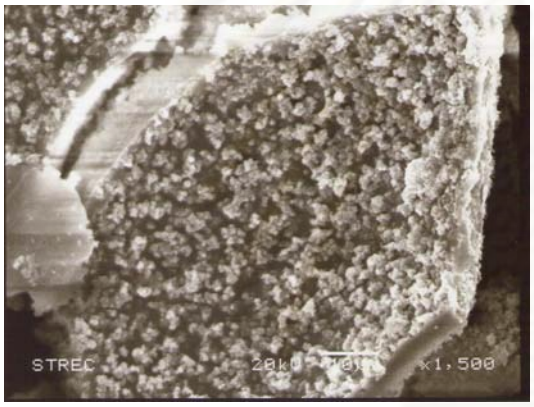
ส่วนตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6: 1 ค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 10 พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 4.8 (ง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

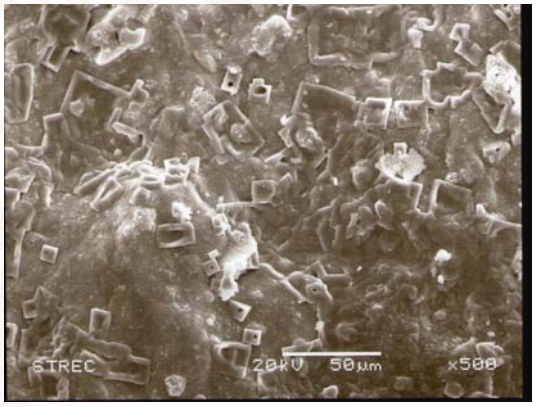


(ก) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.6: 1 ที่พีเอช = 8
ที่กำลังขยาย 250 เท่า

(ข) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.6: 1 ที่พีเอช = 8.5
ที่กำลังขยาย 250 เท่า



(ค) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.6: 1 ที่พีเอช = 9
ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



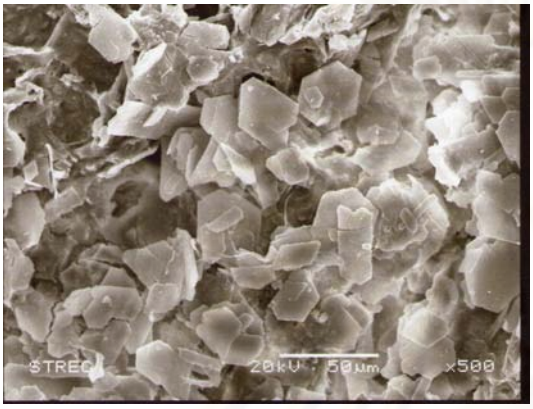
(ง) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.6: 1 ที่พีเอช = 10
ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ภาพที่ 4.8 ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6: 1 และที่พีเอชค่าต่างๆ วิเคราะห์ด้วย SEM

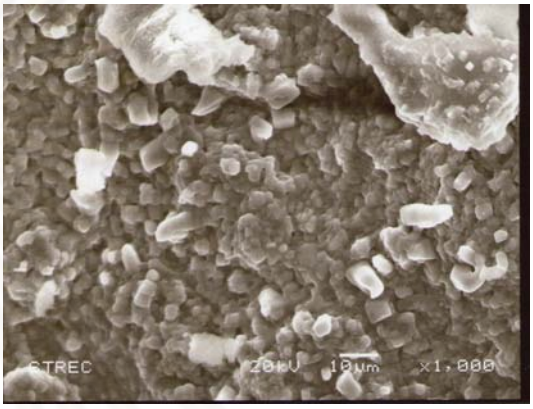
จากการศึกษาลักษณะตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.8: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 9 9.5 และ 10 ตามลำดับ ไม่พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP แต่กลับพบผลึกรูปอื่น ดังแสดงในภาพที่ 4.9 (ก) ถึง (ข)

ส่วนตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.8: 1 ค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 8 8.5 และ 9 พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.9 (ก)

ส่วนตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.8: 1 ค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 9.5 และ 10 พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.9 (ข)



(ก) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.8: 1 ที่พีเอช = 8
ที่กำลังขยาย 500 เท่า



(ข) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.8: 1 ที่พีเอช = 10
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

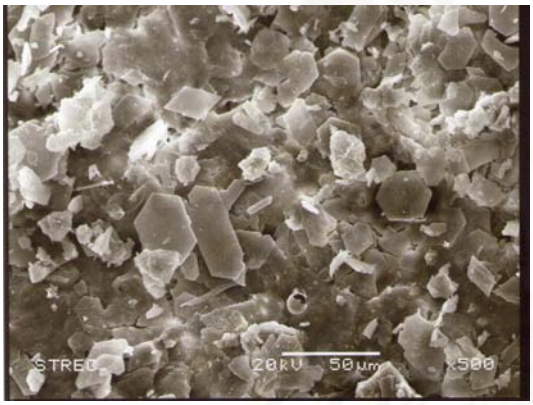
ภาพที่ 4.9 ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.8: 1 และที่พีเอชค่าต่างๆ วิเคราะห์ด้วย SEM

จากการศึกษาลักษณะตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 9 9.5 และ 10 ตามลำดับ ไม่พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP แต่กลับพบผลึกรูปอื่น ดังแสดงในภาพที่ 4.10 (ก) ถึง (ข)

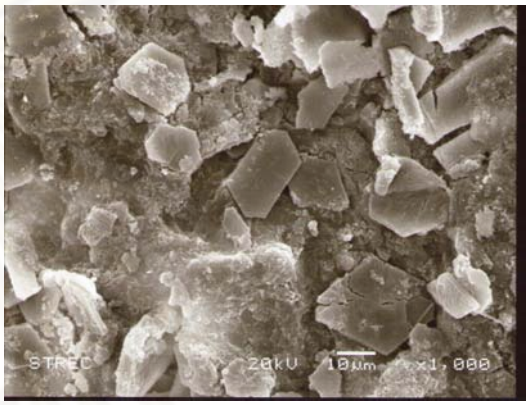
ตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2: 1 ค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 8 และ 8.5 พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.10 (ก) ถึง (ข)

ส่วนตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 9 พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกับตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6: 1 ที่ค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 9

ส่วนตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 9.5 และ 10 พบผลึกที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกับตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.8: 1 ที่ค่าพีเอชของน้ำ เท่ากับ 10



(ก) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 2: 1 ที่พีเอช = 8
ที่กำลังขยาย 500 เท่า



(ข) Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 2: 1 ที่พีเอช = 8.5
ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

ภาพที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างของตะกอนที่ผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2: 1 และที่พีเอชค่าต่างๆ วิเคราะห์ด้วย SEM

จากผลการศึกษาปริมาณ MAP ที่เกิดขึ้นในตะกอนจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรสามารถสรุปปริมาณการเกิดผลึก MAPที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตและที่พีเอชค่าต่างๆ นั้น จะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 และ 9 เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึก MAP เนื่องจากได้ผลึกปริมาณมากและมีลักษณะโครงสร้างของผลึกที่สมบูรณ์

ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 9.5 นั้นก็สามารถเกิดผลึก MAP ได้เช่นเดียวกันแต่มีปริมาณน้อยกว่าและค่าพีเอชของน้ำหลังจากการตกผลึกนั้นมีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่กำหนดให้ค่าพีเอชของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรอยู่ในช่วง 5.5 ถึง 9 ดังนั้นจึงเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะที่จะทำการตกผลึก MAP

ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 และ 9 จะเห็นได้ว่า ผลึก MAP มีปริมาณมากขึ้นตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 นั้นมีปริมาณผลึก MAP น้อย

ที่สุด จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของผลึกด้วย SEM พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8.5 และ 9 นั้นมีการตกผลึกแคลเซียมฟอสเฟตร่วมด้วย โดยแคลเซียมจะไปแย่งจับฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำทำให้รบกวนการเกิดผลึก MAP ดังนั้นผลึก MAP จึงมีปริมาณน้อยลง

ส่วนที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6: 1 1.8: 1 และ 2: 1 ที่ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 9 9.5 และ 10 ไม่พบผลึกที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP เลย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึก MAP ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 และ 9 นั้นมีความเหมาะสมในเกิดผลึก MAP เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่ได้นั้นมีโครงสร้างแบบเดียวกับผลึก MAP ปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกตะกอนที่ผลิตได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชของน้ำเท่ากับ 8 8.5 และ 9 มาวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกเพื่อยืนยันผลการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบของผลึก MAP ที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึก MAP ด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (EDS) พบว่าตะกอนผลึกที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 มีองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึก MAP ที่เกิดขึ้นในน้ำฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

องค์ประกอบของผลึก MAP	ปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์)					
	O	Mg	P	Cu	Zn	K
Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 8	38.09	9.93	8.07	0.48	0.35	0.1
Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 8.5	38.28	11.18	11.99	0.39	0.42	0.30
Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 9	33.93	10.36	9.11	0.73	0.52	0.28

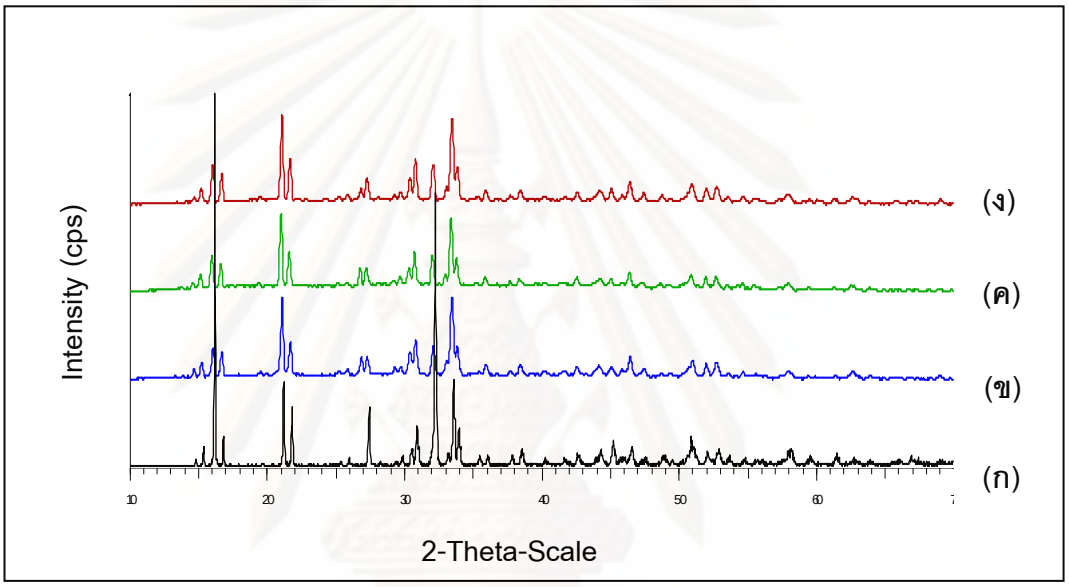
จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า ผลึก MAP ที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 มีสัดส่วนของปริมาณระหว่างธาตุแมกนีเซียมต่อธาตุฟอสฟอรัส คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลประมาณ 1: 1 ซึ่งสอดคล้องกับสมการเคมีของการเกิดผลึก MAP ตามทฤษฎีที่ต้องการอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต (Mg^{2+}: NH_4^+: PO_4^{3-}) เท่ากับ 1: 1: 1 (Saidou และคณะ, 2008) สมการเคมีของการเกิดผลึก MAP (Choi, 2007 อ้างโดยบริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

$$Mg^{2+} + NH_4^+ + PO_4^{3-} + 6H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O\downarrow \text{(ตกผลึก)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.3 ผลการศึกษาเฟสและความเป็นผลึก MAP ที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

ผลการวิเคราะห์เฟสและความเป็นผลึก MAP ที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) พบว่า น้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอช เท่ากับ 8 8.5 และ 9 มีความเป็นผลึกของสารประกอบระหว่างแมกนีเซียม แอมโมเนีย ฟอสเฟต ดังแสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 แสดงเฟสและความเป็นผลึก MAP ที่เกิดขึ้นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ค่าพีเอชต่างๆ เทียบกับผลึก MAP ที่สังเคราะห์จากน้ำเสียสังเคราะห์ วิเคราะห์ผลด้วย XRD
(ก) ผลึก MAP จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่อัตราส่วนของ Mg^{2+}: NH_4^+: PO_4^{3-} = 1: 1: 1
(ข) ผลึกที่อัตราส่วนของ Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 8
(ค) ผลึกที่อัตราส่วนของ Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 8.5
(ง) ผลึกที่อัตราส่วนของ Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1 ที่พีเอช = 9

จากผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 มีความเป็นผลึกของสารประกอบระหว่างแมกนีเซียม แอมโมเนีย และฟอสเฟต เนื่องจากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD มีความสอดคล้องกับฐานข้อมูลของผลึก MAP จากเครื่อง XRD

4.4 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกตะกอนผลึก

ประกอบด้วยผลวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของน้ำดังนี้

4.4.1 ปริมาณซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

4.4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS)

4.4.3 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)

4.4.5 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus, TP)

4.4.5 ปริมาณโลหะ (Metals) คือ แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสี

โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกตะกอนผลึกที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกตะกอนผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1			มาตรฐานน้ำทิ้ง	หน่วย	หมายเหตุ
		พีเอช = 8	พีเอช = 8.5	พีเอช = 9			
1. ปริมาณซีโอดี	776	591	665	591	400*	มก. /ล.	เกินมาตรฐาน
2. ปริมาณของแข็งแขวนลอย	424	282	252	218	200*	มก. /ล.	เกินมาตรฐาน
3. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	289	198	188	190	200*	มก. /ล.	ไม่เกินมาตรฐาน
4. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	75	45	45	30	ไม่ระบุค่า	มก. /ล.	-
5. ปริมาณโลหะ							
1) แมกนีเซียม	68.73	607.5	590.5	606.0	ไม่ระบุค่า	มก. /ล.	เพิ่มสูงมาก
2) แคลเซียม	39.39	94.84	97.63	94.52	ไม่ระบุค่า	มก. /ล.	เพิ่มขึ้น
3) โพแทสเซียม	38.48	23.81	23.42	23.72	ไม่ระบุค่า	มก./ ล.	-
4) เหล็ก	3.12	0.47	0.37	0.28	ไม่ระบุค่า	มก. /ล.	-
5) ทองแดง	0.74	0.21	0.28	0.28	1.0**	มก. /ล.	ผ่านมาตรฐาน
6) สังกะสี	2.69	1.03	1.25	0.97	5.0**	มก. /ล.	ผ่านมาตรฐาน

หมายเหตุ

* มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก

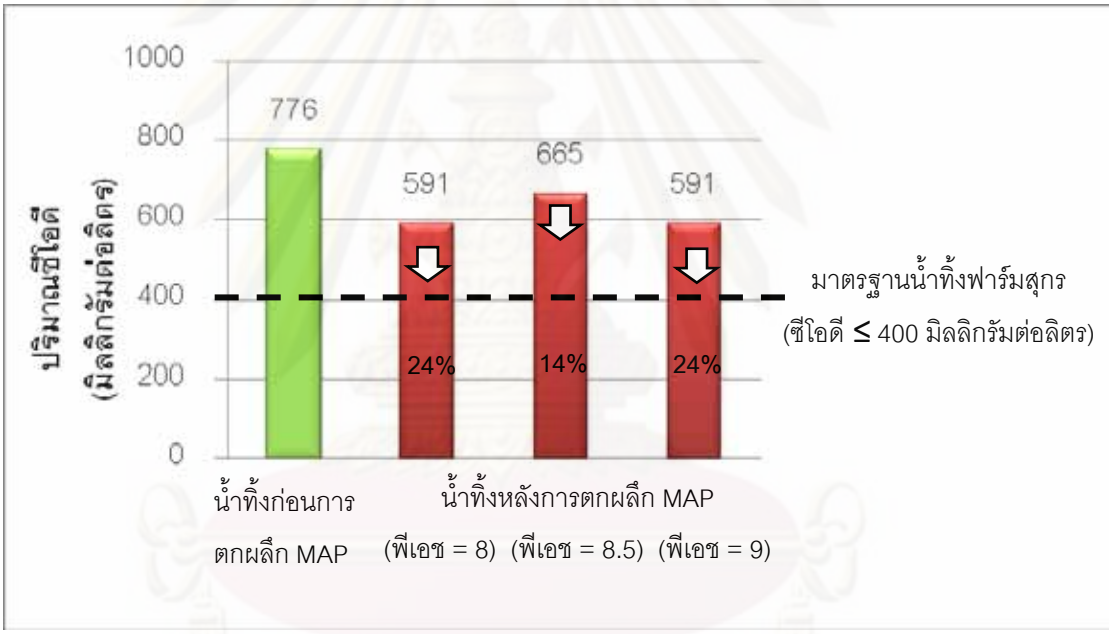
** มาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP มีรายละเอียดในแต่ละพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

4.4.1 ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 776 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากทำการตกผลึกโดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 จะมีปริมาณซีโอดีลดลงเหลือ เท่ากับ 591 665 และ 591 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 23.8 14.3 และ 23.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

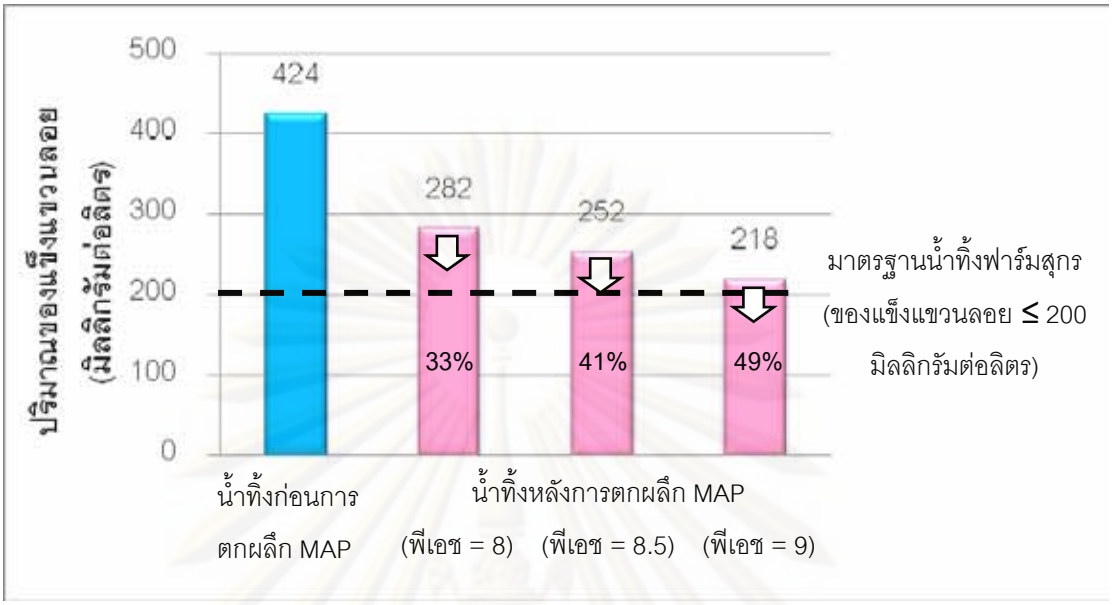
จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP มีค่าลดลง สามารถอธิบายได้ว่า ในการตกผลึก MAP มีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีทำให้น้ำทิ้งมีสภาพเป็นด่าง นอกจากจะทำให้มีความเหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP แล้วนั้น ยังมีผลทำให้สารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเกิดการตกตะกอนร่วมกับผลึก MAP ด้วย โดยอาศัยกลไกการตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical precipitation) และกรองตะกอนผลึกที่ได้แยกออกมาจากน้ำ จึงทำให้ปริมาณซีโอดีในน้ำมีค่าลดลง

เมื่อนำค่าซีโอดีมาพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก (จากตารางที่ 4.4) ซึ่งกำหนดให้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีค่าซีโอดีไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่า น้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกตะกอนผลึก MAP มีค่าซีโอดีเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนด จึงต้องมีกระบวนการในการบำบัดน้ำทิ้งในขั้นตอนต่อไปก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งในการทำวิจัยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสภาพเป็นด่างเพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำให้เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP และทำการกวนผสมเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาแล้วรวมตัวกันแล้วตกผลึกลงมา ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการกวนผสมเป็นเวลา 30 นาทีและทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งถ้ามีการเพิ่มระยะเวลาในการกวนผสมมีผลทำให้สารประกอบต่างๆในน้ำเกิดการรวมตัวกันมากขึ้นรวมถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำก็จะเกิดการรวมตัวและตกตะกอนลงมามากขึ้นด้วยเช่นกัน มีผลทำให้ปริมาณซีโอดีในน้ำลดลง

4.4.2 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณของแข็งแขวนลอยเริ่มต้นเท่ากับ 424 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากทำการตกผลึกโดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 จะมีปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลงเหลือเท่ากับ 282.3 251.7 และ 218.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนเท่ากับ 33.4 40.6 และ 48.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



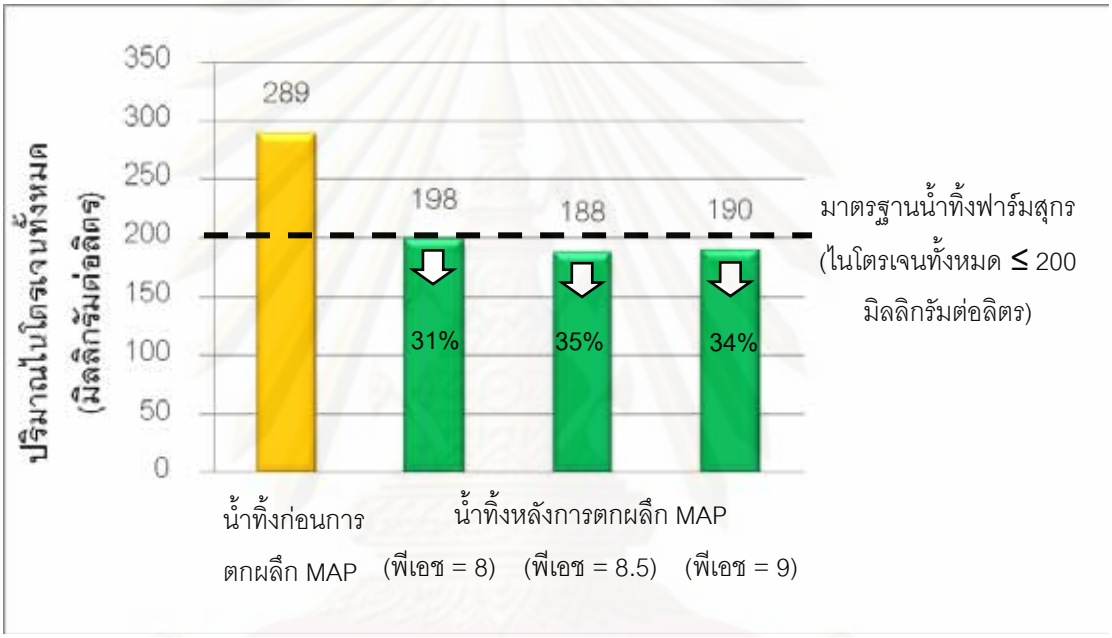
ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP มีค่าลดลง สามารถอธิบายได้ว่า ในการตกผลึก MAP มีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีทำให้น้ำมีสภาพเป็นด่าง นอกจากจะทำให้มีความเหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP แล้วนั้นยังมีผลทำให้ของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งเกิดการตกตะกอนร่วมกับผลึก MAP ด้วย โดยอาศัยกลไกการตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical precipitation) และในขั้นตอนการกวนผสมเป็นการรวมตะกอนหรือของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งให้เกิดการจับตัวกันจนมีขนาดใหญ่ที่จะตกตะกอนลงมา ซึ่งเรียกว่ากระบวนการสร้างตะกอน (Coaulation) และรวมตะกอน (Floculation) หลังจากนั้นกรองตะกอนผลึกที่ได้แยกออกมาจากน้ำ จึงทำให้ของแข็งแขวนลอยในน้ำมีค่าลดลง

เมื่อนำค่าของแข็งแขวนลอยมาพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก (จากตารางที่ 4.4) ซึ่งกำหนดให้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีค่าของแข็งแขวนลอยไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่า น้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกตะกอนผลึก MAP มีค่าของแข็งแขวนลอยเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนด จึงต้องมีกระบวนการในการบำบัดน้ำทิ้งในขั้นตอนต่อไปหรือปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้อยู่ ก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ

4.4.3 ปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณไนโตรเจนเริ่มต้นเท่ากับ 289 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากทำการตกผลึกโดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 จะมีปริมาณไนโตรเจนลดลงเหลือเท่ากับ 198.1 187.6 และ 189.7 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนเท่ากับ 31.3 35.0 และ 34.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพการบำบัดไนโตรเจนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

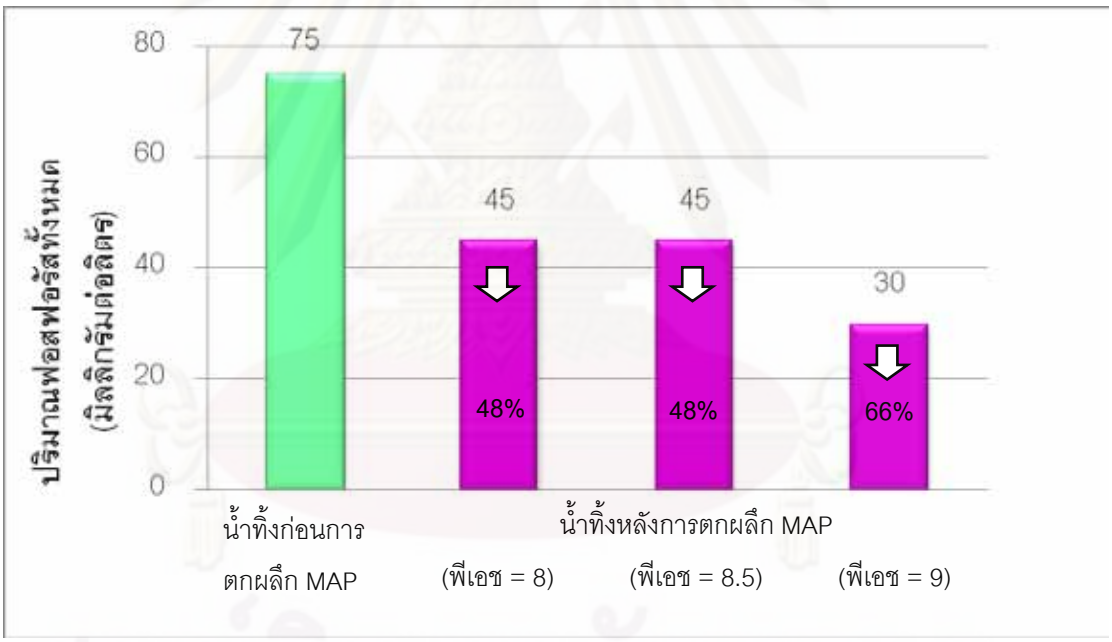
จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP มีค่าลดลง สามารถอธิบายได้ว่า ในการตกผลึก MAP ไอออนของแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจะเกิดการรวมตัวกันและตกตะกอนแยกออกมาจากน้ำให้อยู่ในรูปของผลึก MAP ที่ค่าพีเอชที่เหมาะสม จึงทำให้ปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งมีค่าลดลงเพราะถูกดึงไปใช้ในการรวมตัวเป็นผลึก MAP ดังสมการ (Choi, 2007 อ้างโดยบริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

$$Mg^{2+} + NH_4^{+} + PO_4^{3-} + 6H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O\downarrow \text{(ตกผลึก)}$$

เมื่อนำค่าปริมาณไนโตรเจนมาพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก (จากตารางที่ 4.4) ซึ่งกำหนดให้น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรมีค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่า น้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP มีค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

4.4.4 ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP

จากผลการวิเคราะห์น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP เริ่มแรกมีปริมาณของฟอสฟอรัสเท่ากับ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากทำการตกผลึกโดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 จะมีปริมาณฟอสฟอรัสลดลงเหลือเท่ากับ 44.9 44.9 และ 29.7 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสเท่ากับ 48.2 48.2 และ 65.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP มีค่าลดลง สามารถอธิบายได้ว่า การตกผลึก MAP เป็นการดึงเอาฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง ฟาร์มสุกรออกมาให้อยู่ในรูปของผลึก MAP จึงทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งมีค่าลดลง

ดังสมการเคมีของการเกิดผลึก MAP (Choi, 2007 อ้างโดยบริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด, 2552)

$$Mg^{2+} + NH_4^{+} + PO_4^{3-} + 6H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O\downarrow \text{(ตกผลึก)}$$

ส่วนในเกณฑ์ของมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก (จากตารางที่ 4.4) ไม่ได้มีการกำหนดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำ (TP)

4.4.4 ปริมาณโลหะในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP มีดังนี้

1) ปริมาณแมกนีเซียม

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณแมกนีเซียมเริ่มต้นเท่ากับ 68.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการตกผลึก MAP โดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 พบว่ามีปริมาณแมกนีเซียมในน้ำเพิ่มขึ้นเท่ากับ 607.5 590.5 และ 606.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถอธิบายได้ว่า ในการปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตนั้น มีการเพิ่มสัดส่วนของแมกนีเซียมที่มากเกินพอเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดผลึก MAP โดยการเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต จึงทำให้น้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึกยังมีปริมาณแมกนีเซียมเหลืออยู่ค่อนข้างสูง

2) ปริมาณแคลเซียม

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณแคลเซียมเริ่มต้นเท่ากับ 39.4 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการตกผลึก MAP โดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 พบว่ามีปริมาณแคลเซียมในน้ำเพิ่มขึ้นเท่ากับ 94.8 97.6 และ 94.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นอาจจะเนื่องมาจากเกิดการดูดกลืนแสงจากธาตุอื่นๆ ที่ไม่ใช่ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้วัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ได้มากกว่าปกติ

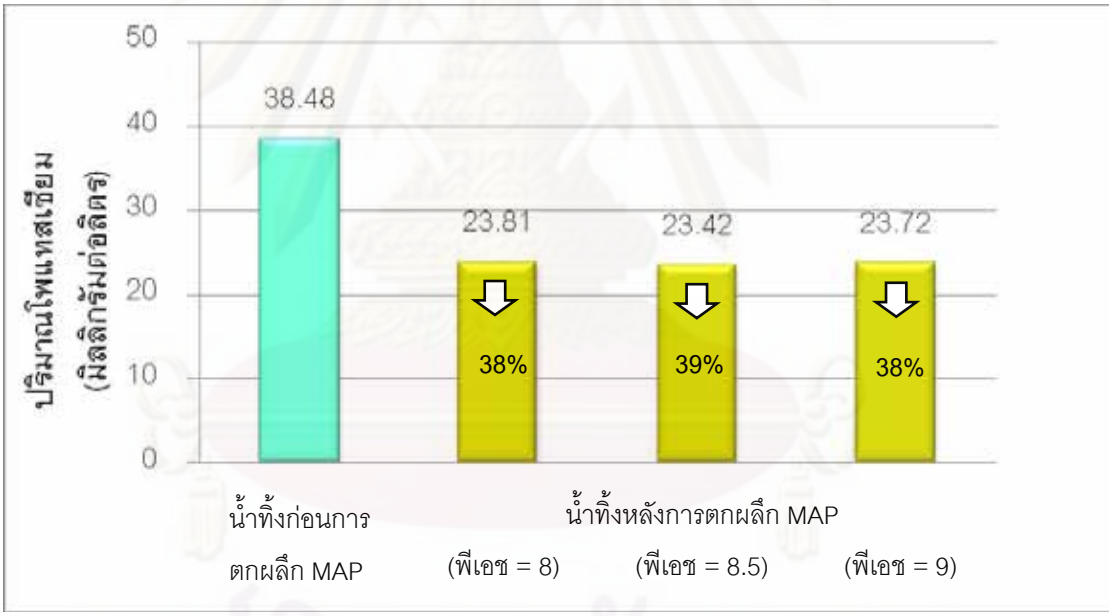
3) ปริมาณโพแทสเซียม

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณโพแทสเซียมเริ่มต้นเท่ากับ 38.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการตกผลึก MAP โดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 พบว่ามีปริมาณโพแทสเซียมในน้ำลดลงเหลือเท่ากับ 23.8 23.4 และ

23.7 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถอธิบายได้ว่า ในการตกผลึก MAP มีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสภาพเป็นด่างเพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำให้เหมาะสมต่อการตกผลึก MAP จึงทำให้โพแทสเซียมที่ละลายน้ำเกิดการตกตะกอนและจับตัวตกตะกอนร่วมกับผลึก MAP สามารถอธิบายได้ว่า ในการตกผลึก MAP การปรับค่าพีเอชที่เป็นด่างทำให้ไอออนของโพแทสเซียมสามารถเกิดการรวมตัวกับไอออนของแมกนีเซียมและไอออนของฟอสเฟต สามารถตกตะกอนผลึก $KMgPO_4 \cdot 6H_2O$ หรือที่เรียกว่า Struvite-K ได้ดังสมการ (Sun และคณะ, 2009)

$$K^+ + Mg^{2+} + PO_4^{3-} + 6H_2O \rightarrow \mathbf{KMgPO_4 \cdot 6H_2O\downarrow (ตกผลึก)}$$

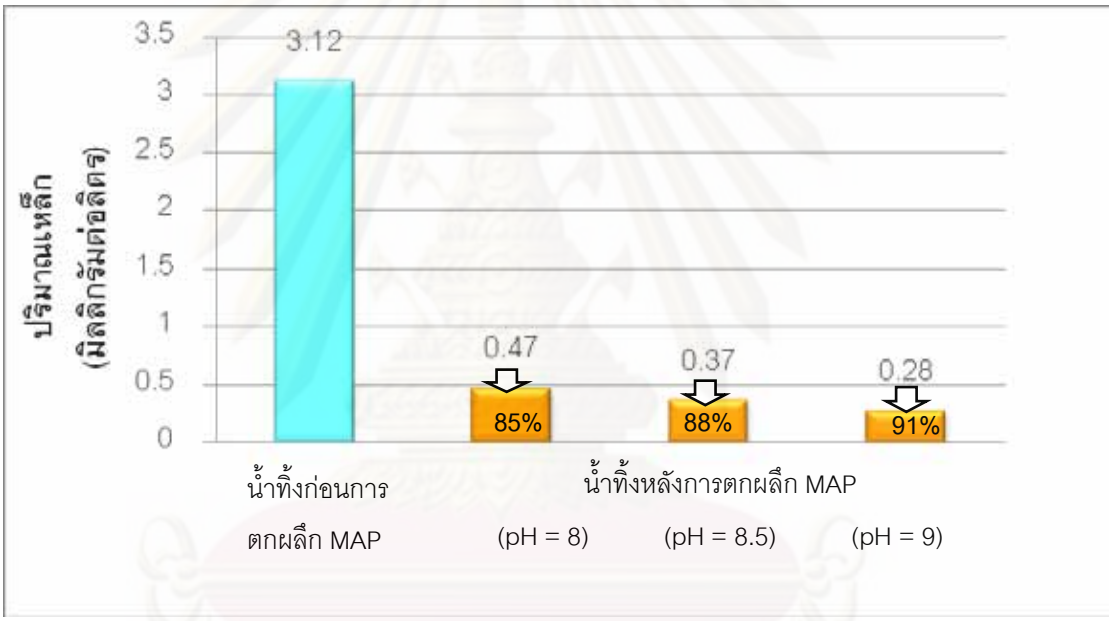
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในผลึก MAP ด้วย SEM-EDS พบว่า มีธาตุโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบในผลึกประมาณ 0.1-0.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดโพแทสเซียมเท่ากับ 38.1 39.1 และ 38.4 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 ประสิทธิภาพการบำบัดโพแทสเซียมในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

4) ปริมาณเหล็ก

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณเหล็กเริ่มต้นเท่ากับ 3.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการตกผลึก MAP โดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 พบว่ามีปริมาณเหล็กในน้ำลดลงเหลือเท่ากับ 0.47 0.37 และ 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถอธิบายได้ว่า ในการตกผลึก MAP การปรับค่าพีเอชที่เป็นด่างทำให้เหล็กที่ละลายน้ำเกิดการตกตะกอนร่วมกับไอออนอื่นๆในน้ำเกิดเป็นสารประกอบเหล็ก เช่น $FePO_4$ และ $FeSO_4$ เป็นต้น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดเหล็กเท่ากับ 84.8 88.2 และ 91.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.17

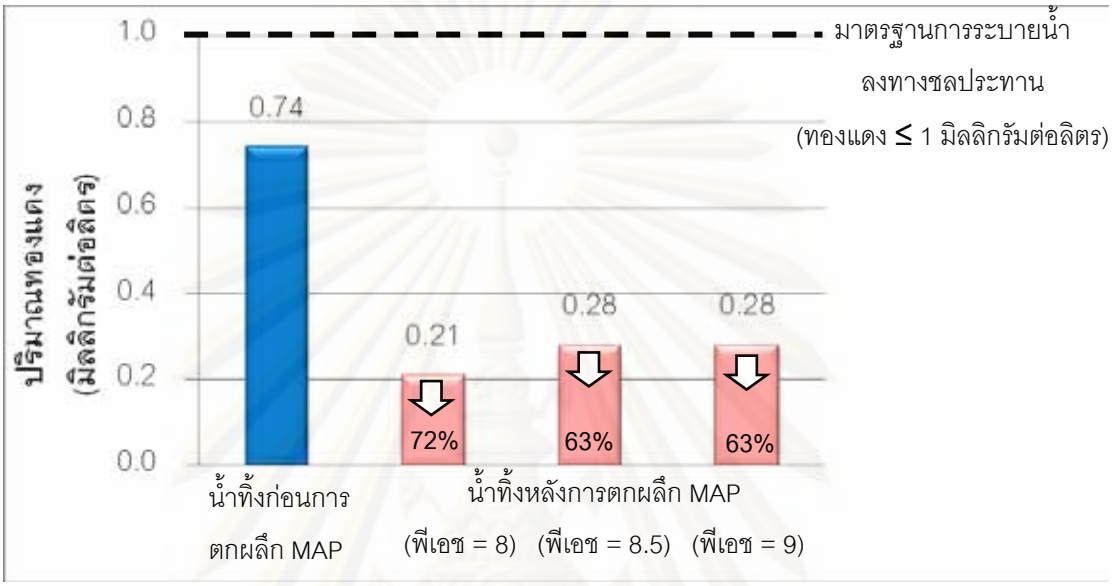


ภาพที่ 4.17 ประสิทธิภาพการบำบัดเหล็กในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

5) ปริมาณทองแดง

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณทองแดงเริ่มต้นเท่ากับ 0.74 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการตกผลึก MAP โดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 พบว่ามีปริมาณทองแดงในน้ำลดลงเหลือเท่ากับ 0.21 0.28 และ 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถอธิบายได้ว่า ในการตกผลึก MAP การปรับค่าพีเอชที่เป็นด่างทำให้ทองแดงที่ละลายน้ำเกิดการตกตะกอนร่วมกับไอออนอื่นๆในน้ำเกิดเป็นสารประกอบทองแดง เช่น $CuHPO_4$ $CuCO_3$ และ $CuSO_4$ เป็นต้น

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในผลึก MAP ด้วย SEM-EDS พบว่า มีธาตุทองแดงเป็นองค์ประกอบในผลึกประมาณ 0.4-0.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดทองแดงเท่ากับ 71.7 62.7 และ 62.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.18



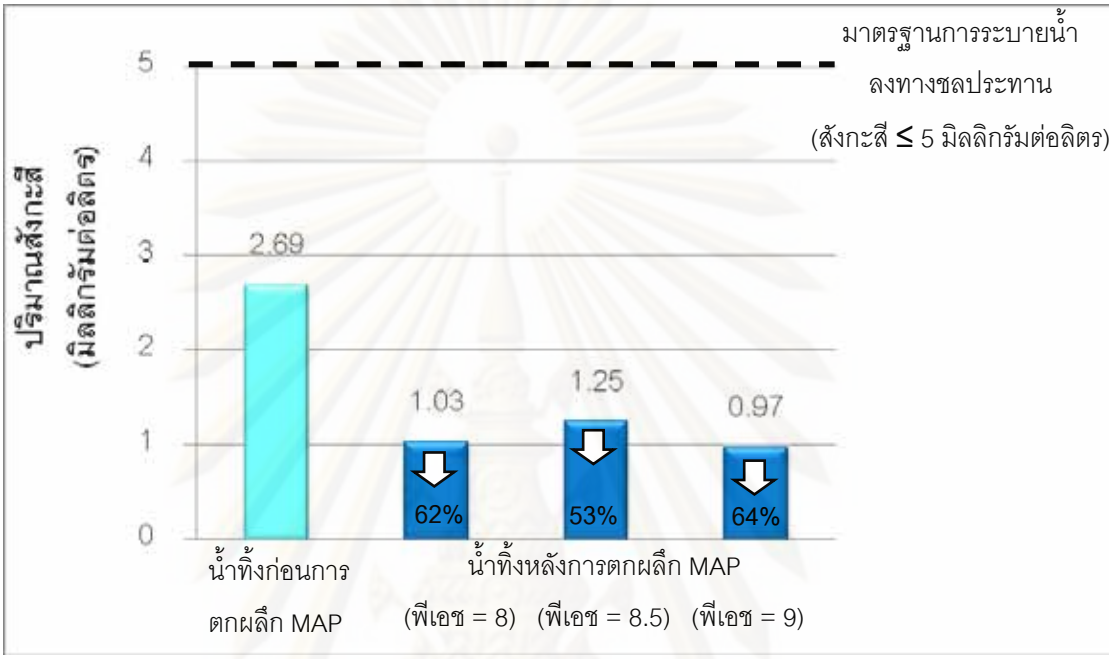
ภาพที่ 4.18 ประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

เมื่อนำค่าปริมาณทองแดงมาพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน (จากตารางที่ 4.4) ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณทองแดงไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่า น้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP มีปริมาณทองแดงไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนด เนื่องจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณทองแดงไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานอยู่แล้ว

6) ปริมาณสังกะสี

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณสังกะสีเริ่มต้นเท่ากับ 2.69 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการตกผลึก MAP โดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 พบว่ามีปริมาณสังกะสีในน้ำลดลงเหลือเท่ากับ 1.03 1.25 และ 0.97 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถอธิบายได้ว่า สามารถอธิบายได้ว่า ในการตกผลึก MAP การปรับค่าพีเอชที่เป็นด่างทำให้สังกะสีที่ละลายน้ำเกิดการตกตะกอนร่วมกับไอออนอื่นๆในน้ำเกิดเป็นสารประกอบสังกะสี เช่น $ZnHPO_4$ $ZnCO_3$ และ $ZnSO_4$ เป็นต้น

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในผลึก MAP ด้วย SEM-EDS พบว่า มีธาตุสังกะสีเป็นองค์ประกอบในผลึกประมาณ 0.3-0.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสังกะสีเท่ากับ 61.8 53.4 และ 64.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 ประสิทธิภาพการบำบัดสังกะสีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

เมื่อนำค่าปริมาณสังกะสีมาพิจารณาในเกณฑ์ของมาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน (จากตารางที่ 4.4) ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณสังกะสีไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่า น้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP มีปริมาณสังกะสีไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนด เนื่องจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก MAP มีปริมาณสังกะสีไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานอยู่แล้ว

สรุปผลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สรุปผลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกตะกอนผลึก MAP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกตะกอนผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.2: 1 (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกตะกอนผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 1.2: 1 (เปอร์เซ็นต์)		
		พีเอช = 8	พีเอช = 8.5	พีเอช = 9	พีเอช = 8	พีเอช = 8.5	พีเอช = 9
1. ปริมาณซีโอดี	776	591	665	591	23.81	14.28	23.81
2. ปริมาณของแข็งแขวนลอย	424	282	252	218	33.49	40.57	48.58
3. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	289	199	188	190	31.31	35.00	34.22
4. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	75	45	45	30	48.17	48.16	65.71
5. ปริมาณโลหะ							
1) แมกนีเซียม	68.73	607.5	590.5	606.0	-783.89	-759.16	-782.23
2) แคลเซียม	39.39	94.84	97.63	94.52	-140.77	-147.85	-139.96
3) โพแทสเซียม	38.48	23.81	23.42	23.72	38.14	39.13	38.37
4) เหล็ก	3.12	0.47	0.37	0.28	84.82	88.19	91.00
5) ทองแดง	0.74	0.21	0.28	0.28	71.69	62.68	62.68
6) สังกะสี	2.69	1.03	1.25	0.97	61.82	53.41	63.97

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 การขยายผลการผลิตปุ๋ย MAP ใช้ในฟาร์มสุกร

จากผลการศึกษา พบว่า อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 มีความเหมาะสมต่อต่อการตกผลึก MAP โดยมีปริมาณตะกอนที่ผลิตได้ประมาณ 0.9 กรัมต่อลิตร (Lab scale)

หากนำผลการศึกษาที่ได้มาขยายผลใช้กับฟาร์มสุกร สมารถคำนวณปริมาณ MAP ที่สามารถผลิตได้ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

เมื่อปริมาณน้ำทิ้งที่เกิดขึ้น = 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ดังนั้น สามารถผลิตปุ๋ย MAP ได้ $= \frac{70 \text{ ลบ.ม.}}{\text{วัน}} \times \frac{0.9 \text{ กรัม}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1{,}000 \text{ ลิตร}}{\text{ลบ.ม.}} \times \frac{\text{กิโลกรัม}}{1{,}000 \text{ กรัม}}$

$= 63$ กิโลกรัมต่อวัน

4.6 ราคาขายปุ๋ย MAP ที่ผลิตได้

ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการผลิต MAP ในระดับโรงานต้นแบบ (Full scale plant) จากน้ำเสียชุมชน มีกำลังการผลิต 1,150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะได้ MAP = 500-550 กิโลกรัมต่อวัน ผลึก MAP ที่ได้จะอยู่ในรูปเม็ด (Granular) ที่มีขนาด 0.5-1.0 มิลลิเมตร

MAP ที่ได้จะส่งไปขายที่โรงงานผลิตปุ๋ย มีราคาขาย = 250 ยูโรต่อตัน (EUR/ton) หรือเท่ากับ 11,250 บาทต่อตัน (1 EUR เท่ากับ 45 บาท) (Ueno และ Fujii, 2001 อ้างโดยบริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด)

ดังนั้น ในงานวิจัยหากมีการขยายผลใช้กับฟาร์มสุกรสามารถผลิตปุ๋ย MAP ได้เท่ากับ 63 กิโลกรัมต่อวัน

ราคาขาย $= \frac{63 \text{ กิโลกรัม}}{\text{วัน}} \times \frac{11{,}250 \text{ บาท}}{\text{ตัน}} \times \frac{\text{ตัน}}{1{,}000 \text{ กิโลกรัม}}$

$= 709$ บาทต่อวัน (หรือประมาณ 21,270 บาทต่อเดือน)

4.7 การศึกษาค่าใช้จ่ายในการทดลองตกตะกอนผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

จากผลการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9 มีความเหมาะสมต่อต่อการตกผลึก MAP ทั้งนี้สารเคมีที่นำมาใช้ในการตกตะกอนผลึก MAP มีหลายชนิด เช่น สารเคมีที่เติมลงไปเพื่อปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมและฟอสเฟตในน้ำ

และสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อปรับค่าพีเอช ดังนั้นสารเคมีจึงเป็นตัวกำหนดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงควรศึกษาค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่เติมลงไป โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

4.7.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

น้ำทิ้งฟาร์มสุกร 1 ลิตรทำการปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1 โดยการเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 0.0817 กรัม ร่วมกับการเติมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจำนวนเล็กน้อยเท่ากับ 0.0480 กรัม ปรับค่าพีเอชของน้ำด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8 ถึง 9 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ประมาณ 0.0072 ถึง 0.12 กรัม หลังจากทำการตกผลึกได้ตะกอนประมาณ 0.9 กิโลกรัม ซึ่งราคาของสารเคมีที่นำมาใช้ในการตกตะกอนผลึก MAP ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ราคาสารเคมีที่นำมาใช้ในการตกตะกอนผลึก MAP

สารเคมี	สูตรเคมี	เกรด	ราคา (บาทต่อกิโลกรัม)
แมกนีเซียม	$\underline{Mg}Cl_2.6H_2O$	อุตสาหกรรม (Commercial)	24
ฟอสเฟต	$NaH_2\underline{P}O_4$	อุตสาหกรรม (Commercial)	25
ด่าง	NaOH (Pellet)	อุตสาหกรรม (Commercial)	38

1. ปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2.6H_2O$) ที่ใช้

เพื่อปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต = 0.6831 กรัม แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข หน้า 85

$$\text{ใช้แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต} = \frac{0.6831 \text{ กรัม}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1 \text{ กิโลกรัม}}{1{,}000 \text{ กรัม}} \times \frac{1{,}000 \text{ ลิตร}}{\text{ลบ.ม.}}$$

$$= 0.6831 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ราคาแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต} = \frac{0.6831 \text{ กิโลกรัม}}{\text{ลบ.ม.}} \times \frac{24 \text{ บาท}}{\text{กิโลกรัม}}$$

$$= 16.39 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$$

2. ปริมาณโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) ที่ใช้

เพื่อปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ต้องเติมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต = 0.0480 กรัม แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข หน้า 85

ใช้โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต $= \frac{0.0480 \text{ กรัม}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1 \text{ กิโลกรัม}}{1{,}000 \text{ กรัม}} \times \frac{1{,}000 \text{ ลิตร}}{\text{ลบ.ม.}}$

$= 0.0480$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ราคาโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต $= \frac{0.0480 \text{ กิโลกรัม}}{\text{ลบ.ม.}} \times \frac{25 \text{ บาท}}{\text{กิโลกรัม}} = 1.2$ บาทต่อลูกบาศก์เมตร

3. ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้

ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชของน้ำให้มีค่าเท่ากับ 8 ถึง 9 ใช้ปริมาตรเท่ากับ 0.3 ถึง 0.5 มิลลิลิตร

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ $= \frac{6 \text{ โมล}}{\text{ลิตร}} \times 0.3 \text{ มิลลิลิตร} \times \frac{40 \text{ กรัม}}{1 \text{ โมล}} \times \frac{1 \text{ลิตร}}{1{,}000 \text{ มิลลิลิตร}}$

$= 0.0072$ กรัม

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ $= \frac{6 \text{ โมล}}{\text{ลิตร}} \times 0.5 \text{ มิลลิลิตร} \times \frac{40 \text{ กรัม}}{1 \text{ โมล}} \times \frac{1 \text{ ลิตร}}{1{,}000 \text{ มิลลิลิตร}}$

$= 0.12$ กรัม

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ $= \frac{0.0072 \text{ กรัม}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1 \text{ กิโลกรัม}}{1{,}000 \text{ กรัม}} \times \frac{1{,}000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลบ.ม.}}$

$= 0.0072$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ $= \frac{0.12 \text{ กรัม}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1 \text{ กิโลกรัม}}{1{,}000 \text{ กรัม}} \times \frac{1{,}000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลบ.ม.}}$

$= 0.12$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (แบบเม็ด) = $\frac{38 \text{ บาท}}{\text{กิโลกรัม}} \times \frac{0.0072 \text{ กิโลกรัม}}{\text{ลบ.ม.}}$

= 0.27 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (แบบเม็ด) = $\frac{38 \text{ บาท}}{\text{กิโลกรัม}} \times \frac{0.12 \text{ กิโลกรัม}}{\text{ลบ.ม.}}$

= 4.56 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

สามารถสรุปปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนผลึก MAP ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สรุปปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนผลึก MAP

ชนิดสารเคมีที่ใช้	ปริมาณ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ราคา (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)
แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต	0.6831	16.39
โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต	0.0480	1.2
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (แบบเม็ด)	0.0072 – 0.12	0.27 - 4.56
ราคาสารเคมีรวม (บาท)		18 - 23

ดังนั้น ในการผลิตตะกอนผลึก MAP จะมีค่าใช่จ่ายจากสารเคมีที่ใช้เท่ากับ 18 ถึง 23 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัด น้ำเสียแบบไร้อากาศที่ค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) การบำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรด้วยกระบวนการตกตะกอนผลึกทางเคมี MAP เป็นกระบวนการที่สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ในขั้นตอนเดียว และเป็นกระบวนการที่สามารถนำธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชกลับมาใช้อีกครั้ง (Nutrient recovery) ในรูปของปุ๋ยทางการเกษตร

2) การกำหนดอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมร่วมกับการปรับค่าพีเอชมีผลต่อปริมาณและคุณภาพของตะกอนผลึก MAP ที่ได้

3) ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 ถึง 9 ระยะเวลาการกวนผสมเป็นเวลา 30 นาที เป็นช่วงที่มีความเหมาะสมต่อการตกผลึก MAP เนื่องจากผลึก MAP ที่ได้มีปริมาณมากและผลึกมีความสมบูรณ์ ส่วนที่สภาวะอื่นๆ กลับไม่พบผลึก MAP หรือมีปริมาณน้อยและผลึก MAP ที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างไม่สมบูรณ์ และมีการเกิดผลึกชนิดอื่นๆนอกเหนือจากผลึก MAP เช่น ที่อัตราส่วนโดย โมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4: 1 ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 ถึง 9 พบผลึก MAP มากพอสมควร แต่มีการเกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟตร่วมด้วย ซึ่งผลึกแคลเซียมฟอสเฟตจะไปรบกวนการเกิดผลึก MAP มีผลทำให้ปริมาณผลึก MAP ที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นที่สภาวะนี้จึงไม่มีความเหมาะสมต่อการเกิดผลึก MAP

4) โครงสร้างของผลึก MAP ที่ตกตะกอนได้มีลักษณะรูปทรงของผลึกเป็นปริซึม 3 เหลี่ยมและ 6 เหลี่ยม องค์ประกอบของผลึก MAP ที่ได้มีสัดส่วนของปริมาณระหว่างธาตุแมกนีเซียมต่อธาตุฟอสฟอรัส คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลประมาณ 1: 1 ซึ่งสอดคล้องกับสมการเคมีของการเกิดผลึก MAP ตามทฤษฎี

5) วิธีการตกผลึก MAP มีการปรับค่าพีเอชของน้ำให้มีสภาพเป็นด่าง นอกจากจะทำให้มีความเหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก MAP ยังมีผลทำให้สารอินทรีย์และของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งเกิดการตกตะกอนร่วมกับผลึก MAP ด้วยโดยอาศัยกลไกการตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical precipitation) และในขั้นตอนการกวนผสมเป็นการรวมตะกอน หรือสารอินทรีย์และของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้ง ให้เกิดการจับตัวกันจนมีขนาดใหญ่ที่จะตกตะกอน

ลงมา ซึ่งเรียกว่ากระบวนการสร้างตะกอน (Coaulation) และรวมตะกอน (Floculation) หลังจากนั้นกรองตะกอนผลึกที่ได้แยกออกมาจากน้ำ จึงทำให้ค่าซีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำมีค่าลดลง

6) การตกผลึก MAP สามารถบำบัดโลหะ คือ โพแทสเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสีที่มีอยู่ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้ โดยเฉพาะทองแดงและสังกะสีที่เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดไว้ในเกณฑ์มาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน

7) เนื่องจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของตะกอนผลึก พบว่า ตะกอนจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ดังนั้นจึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นปุ๋ยหรือสารปรับปรุงดินทางการเกษตรได้ต่อไป

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

1) แนวทางในการนำตะกอนผลึกไปใช้ควรมีการศึกษาถึงศักยภาพและรูปแบบในการใช้งานก่อนนำไปใช้จริง

2) การศึกษาปริมาณการเติมสารเคมีร่วมกับระยะเวลาการกวนผสมสารจะมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและคุณภาพและปริมาณของตะกอนที่ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การเกิดผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://en.wikipedia.org/wiki/struvite [2552, สิงหาคม 16]

ควบคุมมลพิษ, กรม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th [2552, สิงหาคม 7]

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

นิศากร โฆษิตรัตน์ และยุวรี อินนา. 2536. การลดมลพิษทางน้ำในกิจกรรมเกษตรกรรม. วารสารเทคโนโลยีที่เหมาะสม 11 (มีนาคม): 59 – 66.

บริษัท ทีม เอ็นเนอร์ยี่ แมแนจเมนท์ จำกัด. 2552. โครงการศึกษาการเพิ่มมูลค่าน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบแก๊สชีวภาพฟาร์มสุกรตามแนวทางเศรษฐกิจพอเพียง.

ปศุสัตว์, กรม. 2549. ตรวจสอบรับรองคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ (เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากฟาร์มสุกรและโรงฆ่าสัตว์). นครพนม : สำนักงานปศุสัตว์จังหวัดนครพนม.

ผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.cranfirld.ac.uk/sas/water/ scale/struvite.htm [2552, สิงหาคม 13]

มาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทานและทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/Info_serv/reg_std_water04.html [2553, เมษายน 13]

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2550. การบำบัดมูลสุกรแบบไร้อากาศ. กรุงเทพมหานคร.

รูปทรงผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pagues. nl/ [2552, สิงหาคม 13]

วัฏจักรของไนโตรเจน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.lenntech.com/nitrogen-cycle. htm [2552, สิงหาคม 9]

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: จุดทอง.

สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.ist.cmu.ac.th/riseat/teenet/btc/farmpollution.php [2552, สิงหาคม 9]

สมาคมผู้เลี้ยงสุกรแห่งชาติ. 2553. สถานการณ์ธุรกิจสุกรปี 2552-2553. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.thaiahpa.com/image/Feed6.pdf [2553, มีนาคม 11]

ภาษาอังกฤษ

APHA, AWWA and WEF. 2005. Standard methods for the examination of water & wastewater. 21st Ed. American Public Health Association. American Public Health Association. Washington D.C.

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.

Celen, I., Buchanan, J.R., Burns, R.T., Robinson, R.B. and Raman D.R. 2007. Using a chemical equilibrium model to predict amendments required to precipitate phosphorous as struvite in liquid swine manure. Water Research. 41: 1689-1696.

Chin, K.K. and Ong, S.L. 1993. A wastewater treatment system for an industrialized pig farm. Wat. Sci.Tech. 28: 217-222.

Cho, K-S., Ryu, H.W., Park, C-H. and Goodrich, P.R. 2001. Utilization of swine wastewater as a feedstock for the production of Polyhydroxyalkanoates by *Azotobacter Vinelandii* UWD. Journal of Bioscience and Bioengineering. 91: 129-133.

De-Bashan and Bashan, Y. 2004. Recent advances in removing phosphorous from wastewater and its future use as fertilizer. Water Research. 38: 4222-4246.

Kim, D., Ryu, H-D., Kim, M-S., Kim J. and Lee S-I. 2006. Enhancing struvite precipitation potential for ammonia nitrogen removal in municipal landfill leachate. Journal of Hazardous Materials. 146: 81-85.

Ryu, H-D., Kim, D. and Lee, S-I. 2007. Application of struvite precipitation in treating ammonium nitrogen from semiconductor wastewater. Journal of Hazardous Materials. 156: 163-169.

Saidou, H., Korchef, A., Moussa, B.S. and Amor, B.M. 2008. Struvite precipitation by the dissolved CO_2 degasification technique: Impact of the airflow rate and pH. Chemosphere. 74: 338-343.

Song, Y.,Yuan P., Zheng B., Peng J, Yuan F. and Gao Y.2007. Nutrients removal and recovery by crystallization of magnesium ammonium phosphate from synthetic swine wastewater. Chemosphere. 69: 319-324.

Sun, W-D., Wang, J-Y., Zhang, K-C. and Wang, X-L. 2009. Study on precipitation of struvite and struvite-K crystal in goats during onset of urolithiasis. Research in Veterinary Science. 88: 461-466.

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.

Uludag-Dimirer, S. and Othman, M. 2009. Removal of ammonium and phosphate from the supernatant of anaerobically digested waste activated sludge by chemical precipitation. Journal of Bioresource Technology. Available from: http://www.sciencedirect.com [2009, August 7]

U.S. EPA. 2001. Development document for the proposed revision to the national pollutant discharge elimination system regulation and the effluent guidelines for concentrated animal feeding operates., Washington D.C.

Warmadewanthi and Liu, J.C. 2008. Recovery of phosphate and ammonium as struvite from semiconductor wastewater. Separation and Purification Technology. 64: 368-373.

Yamamoto, T., Takaki, K., Koyama, T. and Furukawa, K. 2006. Novel partial nitritation treatment for anaerobic digestion liquor of swine wastewater using swim-bed technology. Journal of Bioscience and Bioengineering. 102: 497-503.

Yetimezsoy, K. and Sapci-Zengin, Z. 2008. Recovery of ammonium nitrogen from the effluent of UASB treating poultry manure wastewater by MAP precipitation as slow release fertilizer. Journal of Hazardous Material. Available from: http://www.sciencedirect.com [2009, August 7]

Zhang, T., Ding, L. and Ren, H. 2008. Pretreatment of ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation. Journal of Hazardous Materials. 166: 911-915.

ภาคผนวก

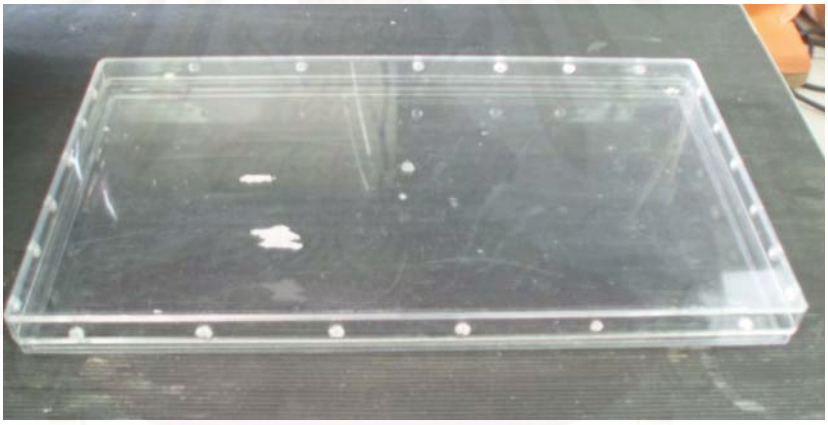
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาพถ่ายอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ ก.1 เครื่องกวนผสม



ภาพที่ ก.2 ภาชนะที่ใส่สำหรับผึ่งตัวอย่างให้แห้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข.1 วิธีการคำนวณความเข้มข้นของแมกนีเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกร จะเห็นได้ว่า มีปริมาณแมกนีเซียม ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเท่ากับ 68.73 289 และ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สามารถคำนวณเพื่อหาความเข้มข้นในหน่วยโมลต่อลิตร ได้ดังนี้

ข.1.1 ความเข้มข้นของแมกนีเซียม

น้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียม เท่ากับ 24.305 กรัมต่อโมล

$$\frac{68.73 \text{ มิลลิกรัม}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1 \text{ กรัม}}{1{,}000 \text{ มิลลิกรัม}} \times \frac{1 \text{ โมล}}{24.305 \text{ กรัม}} = 0.0028 \text{ โมลต่อลิตร}$$

ข.1.2 ความเข้มข้นของไนโตรเจน

น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน เท่ากับ 14.0067 กรัมต่อโมล

$$\frac{289 \text{ มิลลิกรัม}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1 \text{กรัม}}{1{,}000 \text{ มิลลิกรัม}} \times \frac{1 \text{ โมล}}{14.0067 \text{ กรัม}} = 0.0206 \text{ โมลต่อลิตร}$$

ข.1.3 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส

น้ำหนักโมเลกุลของฟอสฟอรัส เท่ากับ 30.9738 กรัมต่อโมล

$$\frac{75 \text{ มิลลิกรัม}}{\text{ลิตร}} \times \frac{1 \text{กรัม}}{1{,}000 \text{ มิลลิกรัม}} \times \frac{1 \text{ โมล}}{30.9738 \text{ กรัม}} = 0.0024 \text{ โมลต่อลิตร}$$

ดังนั้น ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต เท่ากับ 0.0028: 0.0206: 0.0024

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 วิธีการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมลงไป

อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ทำการศึกษา เท่ากับ 1: 1 1.2: 1 1.4: 1 1.6: 1 1.8: 1 และ 2: 1 ตามลำดับ สามารถคำนวณปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะ-ไฮเดรตและโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ต้องเติมลงไป เพื่อควบคุมอัตราส่วนให้เหมาะสมได้ดังนี้

ข.2.1 อัตราส่วนโดยของของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1

ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 0.0028: 0.0206: 0.0024

ถ้าต้องการอัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 ต้องเติมฟอสฟอรัสอีก 0.0028 - 0.0024 = 0.0004 โมลต่อลิตร

$$\text{ต้องเติมฟอสฟอรัส (กรัม)} = \frac{0.0004 \text{ โมล}}{\text{ลิตร}} \times \frac{30.9738 \text{ กรัม}}{1 \text{ โมล}} = 0.0124 \text{ กรัม}$$

ซึ่งในการทดลองใช้โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเพื่อควบคุมอัตราส่วนของฟอสเฟตให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงต้องคำนวณหาปริมาณโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ต้องเติมลงไป

โดยน้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเท่ากับ 120 กรัมต่อโมล

มีฟอสฟอรัส 30.9738 กรัมต่อโมลในโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 120 กรัมต่อโมล
ถ้าต้องการฟอสฟอรัส 0.0124 กรัมจะต้องเติมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

$$= \frac{120}{30.9738} \times 0.0124 = 0.0480 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเติมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเท่ากับ 0.0480 กรัม

ข.2.2 อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1

เติมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเท่ากับ 0.0480 กรัมเช่นเดียวกับข้อ ข.2.1 เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 หลังจากนั้นเพิ่มอัตราส่วนโดย

โมลของแมกนีเซียมเท่ากับ 0.00336 โมลต่อลิตร เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1

$$\text{ต้องเติมแมกนีเซียม (กรัม)} = \frac{0.00336 \text{ โมล}}{\text{ลิตร}} \times \frac{24.305 \text{ กรัม}}{1 \text{ โมล}} = 0.0817 \text{ กรัม}$$

ซึ่งในการทดลองใช้แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตควบคุมอัตราส่วนของแมกนีเซียมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงต้องคำนวณหาปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่ต้องเติมลงไป

โดยน้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 203.31 กรัมต่อโมล

มีแมกนีเซียม 24.305 กรัมต่อโมล ในแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 203.31 กรัมต่อโมล ถ้าต้องการแมกนีเซียม 0.0817 กรัม จะต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต

$$= \frac{203.31}{24.305} \times 0.0817 = 0.6831 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 0.6831 กรัม

ข.2.3 อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4: 1

เติมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเท่ากับ 0.0480 กรัมเช่นเดียวกับข้อ ข.2.1 เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 หลังจากนั้นเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมเท่ากับ 0.00392 โมลต่อลิตร เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4: 1

$$\text{ต้องเติมแมกนีเซียม (กรัม)} = \frac{0.00392 \text{ โมล}}{\text{ลิตร}} \times \frac{24.305 \text{ กรัม}}{1 \text{ โมล}} = 0.0953 \text{ กรัม}$$

ซึ่งในการทดลองใช้แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตควบคุมอัตราส่วนของแมกนีเซียมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงต้องคำนวณหาปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่ต้องเติมลงไป

โดยน้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 203.31 กรัมต่อโมล

มีแมกนีเซียม 24.305 กรัมต่อโมล ในแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 203.31 กรัมต่อโมล ถ้าต้องการแมกนีเซียม 0.0953 กรัม จะต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต

$$= \frac{203.31}{24.305} \times 0.0953 = 0.7970 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 0.7970 กรัม

ข.2.4 อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6: 1

เติมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเท่ากับ 0.0480 กรัมเช่นเดียวกับข้อ ข.2.1 เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 หลังจากนั้นเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมเท่ากับ 0.00448 โมลต่อลิตร เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6: 1

$$\text{ต้องเติมแมกนีเซียม (กรัม)} = \frac{0.00448 \text{ โมล}}{\text{ลิตร}} \times \frac{24.305 \text{ กรัม}}{1 \text{ โมล}} = 0.1089 \text{ กรัม}$$

ซึ่งในการทดลองใช้แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตควบคุมอัตราส่วนของแมกนีเซียมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงต้องคำนวณหาปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่ต้องเติมลงไป

โดยน้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 203.31 กรัมต่อโมล

มีแมกนีเซียม 24.305 กรัมต่อโมล ในแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 203.31 กรัมต่อโมล ถ้าต้องการแมกนีเซียม 0.1089 กรัม จะต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต

$$= \frac{203.31}{24.305} \times 0.1089 = 0.9108 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 0.9108 กรัม

ข.2.5 อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.8: 1

เติมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเท่ากับ 0.0480 กรัมเช่นเดียวกับข้อ ข.2.1 เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 หลังจากนั้นเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมเท่ากับ 0.00504 โมลต่อลิตร เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.8: 1

$$\text{ต้องเติมแมกนีเซียม (กรัม)} = \frac{0.00504 \text{ โมล}}{\text{ลิตร}} \times \frac{24.305 \text{ กรัม}}{1 \text{ โมล}} = 0.1225 \text{ กรัม}$$

ซึ่งในการทดลองใช้แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตควบคุมอัตราส่วนของแมกนีเซียมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงต้องคำนวณหาปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่ต้องเติมลงไป

โดยน้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 203.31 กรัมต่อโมล

มีแมกนีเซียม 24.305 กรัมต่อโมล ในแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 203.31 กรัมต่อโมล ถ้าต้องการแมกนีเซียม 0.1225 กรัม จะต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต

$$= \frac{203.31}{24.305} \times 0.1225 = 1.0247 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1.0247 กรัม

ข.2.6 อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2: 1

เติมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเท่ากับ 0.0480 กรัมเช่นเดียวกับข้อ ข.2.1 เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 หลังจากนั้นเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมเท่ากับ 0.0056 โมลต่อลิตร เพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2: 1

$$\text{ต้องเติมแมกนีเซียม (กรัม)} = \frac{0.0056 \text{ โมล}}{\text{ลิตร}} \times \frac{24.305 \text{ กรัม}}{1 \text{ โมล}} = 0.1361 \text{ กรัม}$$

ซึ่งในการทดลองใช้แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตควบคุมอัตราส่วนของแมกนีเซียมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงต้องคำนวณหาปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่ต้องเติมลงไป

โดยน้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 203.31 กรัมต่อโมล

มีแมกนีเซียม 24.305 กรัมต่อโมล ในแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 203.31 กรัมต่อโมล
ถ้าต้องการแมกนีเซียม 0.1361 กรัม จะต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต

$$= \frac{203.31}{24.305} \times 0.1361 = 1.1385 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1.1385 กรัม

สรุปปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตและโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ต้องเติมลงไปเพื่อให้ได้อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1 1.2: 1 1.4: 1 1.6: 1 1.8: 1 และ 2: 1 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 สรุปปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตและโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่ต้องเติมลงไปเพื่อควบคุมอัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนต่างๆ	ปริมาณสารเคมีที่ต้องเติม (กรัม)	
	แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต	โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
1) Mg: P = 1: 1	ไม่เติม	0.0480
2) Mg: P = 1.2: 1	0.6831	0.0480
3) Mg: P = 1.4: 1	0.7970	0.0480
4) Mg: P = 1.6: 1	0.9108	0.0480
5) Mg: P = 1.8: 1	1.0247	0.0480
6) Mg: P = 2: 1	1.1385	0.0480

ภาคผนวก ค

บันทึกข้อมูลผลการศึกษาทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาน้ำหนักตะกอนที่ได้จากการตกผลึก MAP ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่ค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่ค่าต่างๆ

ค่า pH	อัตราส่วน Mg:P					
	1:1	1.2:1	1.4:1	1.6:1	1.8:1	2:1
	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)	นน.ตะกอน (กรัมต่อลิตร)
pH = 8 (ครั้งที่ 1)	0.3055	0.8002	0.6570	0.5230	0.9159	0.7819
pH = 8 (ครั้งที่ 2)	0.3089	0.8057	0.6659	0.5371	0.8976	0.8056
pH = 8 (ครั้งที่ 3)	0.3012	0.8115	0.6577	0.5211	0.9374	0.7577
$\overline{X}$ + SD	0.0039	0.0057	0.0049	0.0087	0.0199	0.0240
pH = 8.5 (ครั้งที่ 1)	0.3884	0.9025	0.8848	0.8945	1.3110	0.8126
pH = 8 .5 (ครั้งที่ 2)	0.3854	0.9019	0.8901	0.8764	1.3082	0.7839
pH = 8.5 (ครั้งที่ 3)	0.3755	0.8804	0.8856	0.9036	1.2976	0.8066
$\overline{X}$ + SD	0.0068	0.0126	0.0029	0.0138	0.0071	0.0151
pH = 9 (ครั้งที่ 1)	0.5399	0.8743	1.1750	2.2821	5.7157	3.9658
pH = 9 (ครั้งที่ 2)	0.5271	0.9036	1.1647	2.3541	5.6810	3.9724
pH = 9 (ครั้งที่ 3)	0.5409	0.8905	1.1912	2.3021	5.7309	3.9376
$\overline{X}$ + SD	0.0077	0.0147	0.0134	0.0372	0.0256	0.0185
pH = 9.5 (ครั้งที่ 1)	0.6569	1.1000	2.0787	10.8711	41.6037	66.4180
pH = 9.5 (ครั้งที่ 2)	0.6610	1.1099	2.0512	10.8089	41.6225	65.3912
pH = 9.5 (ครั้งที่ 3)	0.6488	1.0860	2.0751	10.6051	41.5911	66.4217
$\overline{X}$ + SD	0.0062	0.0120	0.0150	0.1391	0.0158	0.5939
pH = 10 (ครั้งที่ 1)	0.6648	10.7423	40.2202	53.0209	67.8691	81.9341
pH = 10 (ครั้งที่ 2)	0.6723	10.7355	40.2109	53.0229	68.9409	82.1127
pH = 10 (ครั้งที่ 3)	0.6543	10.7378	40.1825	52.8178	67.9471	80.8732
$\overline{X}$ + SD	0.0090	0.0035	0.0196	0.1178	0.5976	0.6700

ตารางที่ ค.2 ผลการศึกษาปริมาณซีโอดีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	590.72	590.72	664.56 *	590.72	23.81
pH = 8.5	664.56	812.24*	664.56	664.56	14.28
pH = 9	590.72	664.56*	590.72	590.72	23.81

หมายเหตุ * ค่าที่ไม่นำมาคำนวณ เนื่องจากมีความเบี่ยงเบนจากค่าอื่นๆ

ตารางที่ ค.3 ผลการศึกษาปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	280	275	292	282.33	33.41
pH = 8.5	250	255	250	251.67	40.64
pH = 9	222	218	214	218.00	48.58

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ผลการศึกษาปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 พีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	198.8	190.4 *	197.4	198.1	31.31
pH = 8.5	187.6	184.8*	187.6	187.6	35.00
pH = 9	187.6	191.8	182.0*	189.7	34.22

หมายเหตุ * ค่าที่ไม่นำมาคำนวณ เนื่องจากมีความเบี่ยงเบนจากค่าอื่นๆ

ตารางที่ ค.5 ผลการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	49.09	40.73	27.63*	44.91	48.17
pH = 8.5	46.55	63.27*	43.21	44.91	48.16
pH = 9	29.82	19.64*	29.09	29.71	65.71

หมายเหตุ * ค่าที่ไม่นำมาคำนวณ เนื่องจากมีความเบี่ยงเบนจากค่าอื่นๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.6 ผลการศึกษาปริมาณแมกนีเซียมในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของแมกนีเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	610.5	603	609	607.5	-783.89
pH = 8.5	585	588	598	590.5	-759.16
pH = 9	615	600	603	606	-782.23

ตารางที่ ค.7 ผลการศึกษาปริมาณแคลเซียมในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	97.10	95.16	92.26	94.84	-140.77
pH = 8.5	94.84	98.06	100.00	97.63	-147.85
pH = 9	98.06	91.94	93.55	94.52	-139.96

ตารางที่ ค.8 ผลการศึกษาปริมาณโพแทสเซียมในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของโพแทสเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	24.12	23.81	23.50	23.81	38.14
pH = 8.5	23.32	23.50	23.45	23.42	39.13
pH = 9	23.94	23.54	23.67	23.72	38.37

ตารางที่ ค.9 ผลการศึกษาปริมาณเหล็กในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของเหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	0.68	0.42	0.32	0.47	84.82
pH = 8.5	0.32	0.32	0.47	0.37	88.19
pH = 9	0.26	0.32	0.26	0.28	91.00

ตารางที่ ค.10 ผลการศึกษาปริมาณทองแดงในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	0.23	0.20	0.20	0.21	71.69
pH = 8.5	0.24	0.29	0.29	0.28	62.68
pH = 9	0.29	0.29	0.26	0.28	62.68

ตารางที่ ค.11 ผลการศึกษาปริมาณสังกะสีในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากตกผลึก MAP ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.2: 1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8 8.5 และ 9

อัตราส่วน Mg^{2+}: PO_4^{3-} = 1.2: 1	ความเข้มข้นของสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	ประสิทธิภาพการบำบัด (เปอร์เซ็นต์)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
pH = 8	1.15	1.05	0.89	1.03	61.82
pH = 8.5	1.12	1.44	1.20	1.25	53.41
pH = 9	1.03	0.97	0.90	0.97	63.97

ภาคผนวก ง
มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรและการระบายน้ำลงทางชลประทาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม
เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษ ประเภทการเลี้ยงสุกร

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๕๕ แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. ๒๕๓๕ อันเป็นพระราชบัญญัติที่มีบทบัญญัติบางประการเกี่ยวกับการจำกัดสิทธิและเสรีภาพของบุคคล ซึ่งมาตรา ๒๙ ประกอบกับมาตรา ๓๕ มาตรา ๔๘ มาตรา ๕๐ และมาตรา ๕๑ ของรัฐธรรมนูญแห่งราชอาณาจักรไทย บัญญัติให้กระทำได้โดยอาศัยอำนาจตามบทบัญญัติแห่งกฎหมาย รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม โดยคำแนะนำของคณะกรรมการควบคุมมลพิษ และโดยความเห็นชอบของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร ไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ในประกาศนี้

"การเลี้ยงสุกร" หมายความว่า การเลี้ยงสุกรพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ สุกรขุนหรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปตามน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์

"น้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ 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 ที่มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์เกินกว่า ๖๐๐ หน่วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

"การเลี้ยงสุกรประเภท ค" หมายความว่า การเลี้ยงสุกรพ่อพันธุ์แม่พันธุ์ สุกรขุน หรือลูกสุกร ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ที่มีน้ำหนักหน่วยปศุสัตว์ ตั้งแต่ ๖ หน่วย แต่ไม่ถึง ๖๐ หน่วย

"น้ำทิ้ง" หมายความว่า น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแล้วจนเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งตามที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ ๒ ให้แบ่งประเภทการเลี้ยงสุกรตามข้อ ๑ ออกเป็น ๓ ประเภท คือ

(๑) การเลี้ยงสุกรประเภท ก

(๒) การเลี้ยงสุกรประเภท ข

(๓) การเลี้ยงสุกรประเภท ค

ข้อ ๓ มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากการเลี้ยงสุกรประเภท ก ต้องมีค่าดังต่อไปนี้

(๑) ความเป็นกรดและด่าง (pH Value) ระหว่าง ๕.๕ ถึง ๙

(๒) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ไม่เกิน ๖๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๓) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่เกิน ๑๕๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๔) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่เกิน ๓๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๕) ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่เกิน ๑๒๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ ๔ มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากการเลี้ยงสุกรประเภท ข และประเภท ก ต้องมีค่าดังต่อไปนี้

(๑) ความเป็นกรดและด่าง ระหว่าง ๕.๕ ถึง ๙

(๒) บีโอดี ไม่เกิน ๑๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๓) สารแขวนลอย ไม่เกิน ๒๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๔) ซีโอดี ไม่เกิน ๔๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

(๕) ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น ไม่เกิน ๒๐๐ มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ ๕ การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งให้เก็บแบบจ้วง (Grab Sampling) จากจุดที่สถานที่เลี้ยงสุกรระบายน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม ในกรณีสถานที่เลี้ยงสุกรมีการระบายน้ำทิ้งหลายจุด ให้เก็บทุกจุดที่มีการระบายน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม

ข้อ ๖ การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากการเลี้ยงสุกรให้ใช้วิธีการดังต่อไปนี้

(๑) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter) แบบ Electrometric Titrator ที่มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า ๐.๑ หน่วย

(๒) การตรวจสอบค่าบีโอดีให้ใช้วิธีการอะไซด์ โมดิฟิเคชั่น (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ ๒๐ องศาเซลเซียส เป็นเวลา ๕ วัน ติดต่อกันหรือวิธีการ Membrane Electrode

(๓) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอยให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc) และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ ๑๐๓ - ๑๐๕ องศาเซลเซียส

(๔) การตรวจสอบค่าซีโอดีให้ใช้วิธีการย่อยสลายโดยโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion) แบบ Open Reflux หรือ Closed Reflux

(๕) การตรวจสอบค่าไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นให้ใช้วิธีการเจลดาห์ล (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 ของสหรัฐอเมริการ่วมกันกำหนดไว้ หรือตามวิธีการอื่นที่กรมควบคุมมลพิษประกาศในราชกิจจานุเบกษา

ประกาศ ณ วันที่ ๖ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๔๔
อาทิตย์ อุไรรัตน์
รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์
เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มาตรฐานการระบายน้ำลงทางน้ำชลประทานและทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทาน		
ดัชนีคุณภาพน้ำ	**หน่วย**	**ค่ามาตรฐาน(เกณฑ์กำหนดสูงสุด)**
1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6.5-8.5
2. ความนำไฟฟ้า	ไมโครโมล์/ซม.	2,000
3. ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS)	มิลลิกรัม/ลิตร	1,300
4. บีโอดี (BOD_5)	มิลลิกรัม/ลิตร	20
5. สารแขวนลอย (SS)	"	30
6. เปอร์มังกาเนต (PV)	"	6.0
7. ซัลไฟด์คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Sulfide as H_2S)	"	1.0
8. ไซยาไนด์คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (cyanide as HCN)	"	0.2
9. น้ำมันและไขมัน (Fat ,Oil and Grease)	"	5.0
10. ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde)	"	1.0
11. ฟีนอลและ/หรือครีโซลส (Phenol& Cresols)	"	1.0
12. คลอรีนอิสระ (Free chlorine)	"	1.0
13. ยาฆ่าแมลง	"	ไม่มีเลย
14. สารกัมมันตรังสี	"	ไม่มีเลย
15. สี และกลิ่น (Colour and Odour)	-	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
16. น้ำมันทาร์ (Tar)	-	ไม่มีเลย
17. โลหะหนัก -สังกะสี(Zn) -โครเมียม(Cr) -อาร์เซนิค(As) -ทองแดง(Cu) -ปรอท(Hg) -แคดเมียม(Cd) -แบเรียม(Ba) -ซิลิเนียม(Se) -ตะกั่ว(Pb) -นิคเกิล(Ni) -แมงกานีส(Mn)	มิลลิกรัม/ลิตร " " " " " " " " " "	5.0 0.3 0.25 1.0 0.005 0.03 1.0 0.02 0.1 0.2 0.5

แหล่งที่มา : คำสั่งกรมชลประทานที่ 883/2532 เรื่อง การป้องกันและการแก้ไขการระบายน้ำทิ้งที่มีคุณภาพต่ำลง ทางน้ำชลประทาน และทางน้ำที่ต่อเชื่อมกับทางน้ำชลประทานในเขตพื้นที่โครงการชลประทานลงวันที่ 19 ธันวาคม 2532

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิชญ์ภัค เจียรพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 17 เดือนตุลาคม พ.ศ.2528 ที่จังหวัดสุราษฎร์-ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2550 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2551

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย