

# การนำกลับฟอสฟอรัสในรูปผลึกสตรูไวท์จากสลัดจ์รีดน้ำ

นางสาวศิริกาญจน์ ดอกไม้จีน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECOVERY OF PHOSPHORUS AS STRUVITE PRECIPITATE FROM DEWATERED SLUDGE

Miss Sirikarn Dokmajeen



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำกลับฟอสฟอรัสในรูปผลึกस्टรูไว้ท์จากสลัดจ์รีดน้ำ
โดย	นางสาวศิริกาญจน์ ดอกไม้เงิน
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

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

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนัย)

.....กรรมการ  
(ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.เชาวลิต เสนานุรักษ์วรกุล)

ศิริกาญจน์ ดอกไม้จีน : การนำกลับฟอสฟอรัสในรูปผลึกสตรูไวท์จากสลัดจ์รีดน้ำ (RECOVERY OF PHOSPHORUS AS STRUVITE PRECIPITATE FROM DEWATERED SLUDGE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สุธา ขาวเจียร, 153 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการนำฟอสฟอรัสกลับคืนโดยการตกผลึกในรูปสตรูไวท์จากสลัดจ์ที่ผ่านการรีดน้ำแล้ว ฟอสฟอรัสในสลัดจ์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นสตรูไวท์ที่มีมูลค่าโดยผ่านกระบวนการชะละลายด้วยสารละลายกรดและกระบวนการตกผลึกทางเคมี ผลการทดลองพบว่า ถ้ำสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรมีปริมาณฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบปริมาณมาก ประมาณร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าถ้ำสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่พบปริมาณฟอสฟอรัสเพียงร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสในถ้ำสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรจะสูงถึงร้อยละ 99.9 เมื่อชะละลายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อถ้ำสลัดจ์ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม และระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง สภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ซึ่งมีผลึกเกิดขึ้น 0.4138 กรัมต่อถ้ำสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม และสามารถนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้ร้อยละ 90.16 และเมื่อนำโปรแกรมแบบจำลองสมดุลทางเคมี Visual MINTEQ Version 3.0 มาใช้ในการคำนวณสภาวะที่เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุดคือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9 เกิดผลึกสตรูไวท์น้ำหนัก 0.44 กรัมต่อถ้ำสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม ดังนั้นวิธีการชะละลายด้วยกรดและการตกผลึกในรูปสตรูไวท์สามารถใช้ในการบำบัดสลัดจ์และนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสลัดจ์ฟาร์มสุกรที่ผ่านการรีดน้ำแล้วถือเป็นแหล่งฟอสฟอรัสทดแทนที่มีศักยภาพอีกแหล่งหนึ่ง

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5570399821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: SWINE FARM DEWATERED SLUDGE; ACID LEACHING; CHEMICAL PRECIPITATION; STRUVITE; VISUAL MINTEQ

SIRIKARN DOKMAIJEEN: RECOVERY OF PHOSPHORUS AS STRUVITE PRECIPITATE FROM DEWATERED SLUDGE. ADVISOR: ASSOC. PROF.SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 153 pp.

This study investigated the phosphorus recovery process by struvite precipitation from dewatered sludge. Phosphorus in dewatered sludge can be converted to a valuable struvite through acid leaching and chemical precipitation processes. The results showed that ash from incinerated swine farm dewatered sludge contains high phosphorus content, approximately 13% (w/w) while only 6% (w/w) of phosphorus was found in the dewatered sewage sludge. Phosphorus leaching efficiency of swine farm dewatered sludge ash was 99.9% when 1M hydrochloric acid with liquid/solid ratio of 50 mL/g were used at leaching time of 2 hours. The most of crystallization condition were molar ratios of magnesium ammonium phosphate ions at 2:1:1 and solution pH of 10, which had 0.4138 g of crystals per 500 mg of sludge ash and phosphorus could be recovered at 90.16%. The best conditions of struvite precipitation were investigated using the Visual MINTEQ program. The results showed that at the molar ratios of magnesium ammonium phosphate ions of 1.6:1:1 and solution pH of 9, 0.44 g of struvite was formed per 500 mg of sludge ash. Therefore, acid leaching and struvite precipitation methods can be effectively used to treat sludge and recovery phosphorus. Swine farm dewatered sludge can be considered a potentially renewable source of phosphorus.

Department: Environmental  
Engineering

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Field of Study: Environmental  
Engineering

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยคามอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางหลักการในการดำเนินงานวิจัยอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง รวมทั้งตรวจทานแก้ไขสิ่งบกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์ อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ และดร.เชาวลิต เสนานุรักษ์วรกุล ที่กรุณาสละเวลอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ แก้ไขงานวิจัย ตรวจสอบความถูกต้อง และความเหมาะสมของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อปรับปรุงแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชา ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบพระคุณ พี่รามนรี เนตรวิเชียร ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ในการใช้เครื่องมือต่างๆ และการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณประชาฟาร์ม จังหวัดนครปฐม และโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดงที่ให้คามอนุเคราะห์สำหรับสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสีย ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนด้านงบประมาณจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา เป็นอย่างสูง สำหรับกำลังใจ การให้คำปรึกษา และการสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง จนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จสมบูรณ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูป.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	4
2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร.....	5
2.3 ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียชุมชน.....	9
2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน.....	11
2.5 สลัดจ์ดิบ (Raw Sludge).....	13
2.5.1 สลัดจ์ชีวภาพ.....	13
2.5.2 สลัดจ์เคมี.....	13
2.6 แหล่งกำเนิดของสลัดจ์.....	14
2.7 วิธีจัดการกับสลัดจ์.....	15
2.7.1 การบำบัดสลัดจ์ (Treatment).....	15

2.7.2 การกำจัดสลัดจ์ (Disposal).....	16
2.8 สมบัติของสลัดจ์.....	17
2.8.1 สมบัติทางเคมีของสลัดจ์.....	17
2.8.2 สมบัติทางกายภาพของสลัดจ์ .....	17
2.9 วิธีการนำกลับฟอสฟอรัสจากสลัดจ์ที่รีดน้ำแล้ว.....	18
2.10 การชะละลาย (Leaching) .....	19
2.11 กระบวนการตกผลึกทางเคมี.....	20
2.12 ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือสตรูไวท์ (Magnesium Ammonium Phosphate, MAP, Struvite).....	21
2.13 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์ .....	24
2.14 ประโยชน์ของผลึกสตรูไวท์ .....	25
2.15 โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	26
2.16 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	27
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 แผนงานวิจัย.....	36
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	36
3.3 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	39
3.4.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส .....	39
3.4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์.....	42
3.4.3 ศึกษาและนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณสมมูลทางเคมีของน้ำมาใช้ ในการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีและผลึกต่างๆ ที่เกิดขึ้น .....	44
3.5 สรุปแผนการดำเนินงานวิจัย .....	45
3.6 วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ .....	46



บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล .....	47
4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส .....	47
4.1.1 เวลาที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส .....	49
4.1.2 ความเข้มข้นของสารละลายกรด และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสัลดัจ์ที่ เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส .....	50
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ .....	57
4.2.1 ผลของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต .....	57
4.2.2 ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และความเป็นผลึกสตรูไวท์.....	60
4.3 ผลการศึกษานำโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 สำหรับการคำนวณสมดุล ทางเคมีของน้ำมาใช้ในการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีและผลึกต่างๆ ที่เกิดขึ้น .....	69
4.3.1 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ในการตกผลึก สตรูไวท์ เมื่อชะละลายเถ้าสัลดัจ์ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมล ต่อลิตร .....	69
4.3.2 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ในการตกผลึก สตรูไวท์ เมื่อชะละลายเถ้าสัลดัจ์ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อ ลิตร.....	71
4.3.3 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ในการตกผลึก สด รูไวท์ เมื่อชะละลายเถ้าสัลดัจ์ชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ...	73
4.3.4 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ในการตกผลึก สตรูไวท์ เมื่อชะละลายเถ้าสัลดัจ์ชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิว 1 โมลต่อลิตร .....	76
4.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณการตกผลึก ด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 กับการทดลองในห้องปฏิบัติการ .....	79
4.4.1 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดัจ์ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร.....	79
4.4.2 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดัจ์ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร.....	79
4.4.3 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดัจ์ชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร .....	79

4.4.4 เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จุ่มชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป .....	82
5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม .....	82
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการทุกชุดการทดลอง .....	88
ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometer).....	119
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	121
ภาคผนวก ง. ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 .....	126
ภาคผนวก จ. ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 .....	139
ภาคผนวก ฉ. วิธีการคำนวณ .....	148
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	153

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	แสดงลักษณะทั่วไปของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร .....	4
ตารางที่ 2.2	แสดงลักษณะทั่วไปของน้ำเสียชุมชน .....	10
ตารางที่ 2.3	แสดงลักษณะทางเคมีและกายภาพของตะกอนสลัดจ์ขั้นต้นและขั้นสองจากระบบ บำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเอเอส .....	13
ตารางที่ 2.4	ลักษณะของสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ .....	14
ตารางที่ 2.5	องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณโลหะหนักของสลัดจ์ตัวอย่าง รวมทั้งค่าจำกัด ของปุ๋ยตามกฎหมายของประเทศต่างๆ .....	17
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย .....	38
ตารางที่ 3.2	วิธีมาตรฐานในการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ .....	46
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณโลหะหนักของสลัดจ์ หลังเผาที่ 550 องศา เซลเซียส .....	48
ตารางที่ 4.2	แสดงร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัด.....	56

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	ระบบบำบัดน้ำเสียที่สมบูรณ์ .....	15
รูปที่ 2.2	รูปทรงของผลึกสตรูไวท์.....	22
รูปที่ 2.3	ลักษณะผลึกสตรูไวท์แบบต่างๆ .....	23
รูปที่ 2.4	กลไกในการเปลี่ยนรูปฟอร์มที่เป็นไปได้ของผลึกสตรูไวท์ .....	24
รูปที่ 2.5	หน้าหลักโปรแกรม Visual MINTEQ .....	27
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส .....	40
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์.....	43
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Visual MINTEQ .....	44
รูปที่ 3.4	สรุปแผนการดำเนินงานวิจัย .....	45
รูปที่ 4.1	ผลของระยะเวลาในการชะละลายฟอสฟอรัส ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้า สลัดจ์เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อกรัม.....	50
รูปที่ 4.2	ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และอัตราส่วนของสารละลายกรด ต่อเถ้าสลัดจ์ฟาร์มสุกร ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง .....	51
รูปที่ 4.3	ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริก และอัตราส่วนของสารละลายกรด ต่อเถ้าสลัดจ์ฟาร์มสุกร ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง .....	52
รูปที่ 4.4	ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และอัตราส่วนของสารละลาย กรดต่อเถ้าสลัดจ์ชุมชน ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง .....	54
รูปที่ 4.5	ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริก และอัตราส่วนของสารละลายกรด ต่อเถ้าสลัดจ์ชุมชน ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง .....	55
รูปที่ 4.6	แสดงน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเถ้าสลัดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อ ลิตร .....	57
รูปที่ 4.7	แสดงน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเถ้าสลัดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร... 58	
รูปที่ 4.8	แสดงน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเถ้าสลัดจ์ชุมชนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร.. 59	
รูปที่ 4.9	แสดงน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเถ้าสลัดจ์ชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร..... 60	

- รูปที่ 4.10 ผลึกสตรูโวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ..... 61
- รูปที่ 4.11 ผลึกสตรูโวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า..... 62
- รูปที่ 4.12 ผลึกสตรูโวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ชุมชนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ..... 63
- รูปที่ 4.13 ผลึกสตรูโวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 100 เท่า..... 63
- รูปที่ 4.14 ผลึกสตรูโวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ..... 64
- รูปที่ 4.15 แสดงความเป็นผลึกสตรูโวท์ เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ..... 65
- รูปที่ 4.16 แสดงความเป็นผลึกสตรูโวท์ เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ..... 65
- รูปที่ 4.17 แสดงขั้นตอนการนำฟอสฟอรัสกลับคืนในรูปผลึกสตรูโวท์จากสัลดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ..... 67
- รูปที่ 4.18 แสดงขั้นตอนการนำฟอสฟอรัสกลับคืนในรูปผลึกสตรูโวท์จากสัลดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์ด้วยกรดซัลฟิวริก ..... 68
- รูปที่ 4.19 แสดงน้ำหนักผลึกสตรูโวท์ เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 M ..... 70
- รูปที่ 4.20 แสดงน้ำหนักผลึกรวม เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 M ... 71

รูปที่ 4.21	แสดงน้ำหนักรวมผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จำพารมสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 M....	73
รูปที่ 4.22	แสดงน้ำหนักรวมผลึกรวม เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จำพารมสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 M.....	73
รูปที่ 4.23	แสดงน้ำหนักรวมผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จำพารมสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 M...	75
รูปที่ 4.24	แสดงน้ำหนักรวมผลึกรวม เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จำพารมสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 M .....	76
รูปที่ 4.25	แสดงน้ำหนักรวมผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จำพารมสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 M.....	78
รูปที่ 4.26	แสดงน้ำหนักรวมผลึกรวม เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จำพารมสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 M.....	78
รูปที่ 5.1	ขั้นตอนและสภาวะที่เหมาะสมในการนำฟอสฟอรัสกลับคืน .....	83



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟอสฟอรัสเป็นแหล่งธาตุอาหารที่มีความจำเป็นสำหรับพืชที่ใช้ในการเจริญเติบโตและยังไม่มีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่สามารถทดแทนได้ (Xu และคณะ, 2012) ปัจจุบันมีการใช้แร่ฟอสฟอรัสเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะการนำมาทำเป็นปุ๋ยใช้ในการเกษตรกรรม ทำให้แหล่งแร่ฟอสฟอรัสตามธรรมชาติมีปริมาณลดน้อยลง และมีรายงานว่าแร่ฟอสฟอรัสมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต (Franz, 2008) จึงมีการนำฟอสฟอรัสที่ผ่านการใช้แล้วในรูปแบบต่างๆ กลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการลดการหมดไปของทรัพยากรแร่ จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า สลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียยังคงมีปริมาณฟอสฟอรัสและโลหะที่ค่อนข้างสูง สลัดจ์ที่เกิดขึ้นนี้ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดโดยการเผาหรือฝังกลบ ซึ่งในระยะยาวอาจส่งผลกระทบต่อการบินปนลงในดินและแหล่งน้ำใต้ดิน และยังเป็นการสูญเสียธาตุอาหารดังกล่าวไปโดยไม่มีการนำกลับมาใช้อีก ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีการในการนำฟอสฟอรัสจากสลัดจ์กลับคืนมาในรูปของการตกผลึกสตรูไวท์

สตรูไวท์หรือผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตเกิดจากการตกผลึกทางเคมีของสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมกนีเซียม แอมโมเนียมและฟอสเฟตปริมาณที่เหมาะสมในสภาวะที่เป็นด่าง ซึ่งสตรูไวท์จะมีค่าการละลายที่ต่ำเมื่ออยู่ในช่วงพีเอชระหว่าง 8-10 โดยผลึกสตรูไวท์สามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อพืช ซึ่งถือได้ว่าส่งผลดีต่อภาคเกษตรกรรมอย่างมาก นอกจากนี้ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นยังช่วยลดความเข้มข้นของธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชันได้ รวมทั้งยังเป็นการนำธาตุอาหารกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้ง แต่การเกิดผลึกสตรูไวท์ในสารละลายหากไม่มีการควบคุมปัจจัยให้เหมาะสม ก็อาจก่อให้เกิดการตกผลึกร่วมของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ รวมทั้งผลึกอื่นๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการตกผลึกสตรูไวท์ ทำให้การตกผลึกสตรูไวท์เกิดได้น้อยลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ในระบบให้ได้มากที่สุด

การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณสมดุลทางเคมีของน้ำมาใช้ในการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีและผลึกที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ พร้อมทั้งใช้หาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ นับเป็นแนวทางที่มีความสำคัญเพื่อใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสม

ต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์และได้ปริมาณผลึกสตรูไวท์มากที่สุด เพื่อเป็นการช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมีต่างๆ ได้อีกด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาวิธีการนำฟอสฟอรัสกลับคืนจากสลัดจ์โดยการตกผลึกในรูปสตรูไวท์ หาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัสจากเถ้าสลัดจ์ ได้แก่ ระยะเวลาในการชะละลาย ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายกรด และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสลัดจ์ และสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียมที่ส่งผลต่อองค์ประกอบและปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้น รวมทั้งเปรียบเทียบปริมาณและชนิดของผลึกที่ได้จากการทดลองในสภาวะต่างๆ กับค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาขั้นตอนการนำฟอสฟอรัสกลับคืนจากสลัดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรและระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการตกผลึกในรูปสตรูไวท์

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัสจากเถ้าสลัดจ์ ได้แก่ ระยะเวลาในการชะละลาย ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายกรด และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสลัดจ์

1.2.3 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียมที่ส่งผลต่อองค์ประกอบและปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้น

1.2.4 เพื่อศึกษาและนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual MINTEQ Version 3.0 สำหรับการคำนวณสมดุลทางเคมีของน้ำมาใช้ในการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีและผลึกต่างๆ ที่เกิดขึ้น รวมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ และทำการตรวจสอบยืนยันกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สลัดจ์รีตน้ำแล้วที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรและระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

1.3.2 ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกในการชะละลายฟอสฟอรัสจากเถ้าสลัดจ์ที่ความเข้มข้น 0.0001-1 โมลต่อลิตร



1.3.3 ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย

1.3.4 ทำการตกผลึกสตรูไวท์ในช่วงพีเอช 8.5-10.0 โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 1.6:1:1 และ 2:1:1

1.3.5 การวิเคราะห์สมมูลเคมีจะใช้แบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual MINTEQ Version 3.0

1.3.6 การวิเคราะห์ผลึกประกอบด้วย การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD) และการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

1.3.7 ทำการวิเคราะห์โลหะแมงกานีส (Mn ) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) และนิกเกิล (Ni) ในน้ำชะละลายฟอสฟอรัสจากแก้วสไลด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก ICP-AES (Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy : ICP-AES)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัสจากแก้วสไลด์ ได้แก่ ระยะเวลาในการชะละลาย ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายกรด และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์

1.4.2 สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียมที่ส่งผลต่อองค์ประกอบและปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้น

1.4.3 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณการตกตะกอนและหาองค์ประกอบทางเคมีในน้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบค่อนข้างซับซ้อนได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฟาร์มสุกรก่อให้เกิดมลพิษหลักๆ คือ น้ำเสียและของเสีย โดยน้ำเสียส่วนใหญ่เกิดจากการล้างทำความสะอาดคอกและโรงเรือน ซึ่งผู้เลี้ยงจะทำการฉีดล้างทุกวัน ส่วนปัสสาวะของสุกรจัดว่ามีปริมาณน้อยมาก

#### 2.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะทั่วไปของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร (กรมควบคุมมลพิษ, 2546b)

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น	หน่วย
อัตราการเกิดน้ำเสีย	10-20	ลิตร/ตัว/วัน
บีโอดี	1,500-3,000	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีโอดี	4,000-7,000	มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	2,000-4,800	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น	400-800	มิลลิกรัมต่อลิตร
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	8-17	มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเป็นกรดต่างหรือพีเอช	6-8	-

น้ำเป็นแหล่งทรัพยากรที่มีการใช้ซ้ำวนเวียนหลายครั้งเป็นวัฏจักร และมีกระบวนการทำให้สะอาดด้วยตัวมันเอง (Self Purification) แต่กระบวนการนี้ก็มีขีดความสามารถที่จำกัดในแต่ละแหล่งน้ำ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียจึงเป็นกลไกสำคัญที่จะช่วยลดภาระของแหล่งน้ำในการทำความสะอาดตัวเองตามธรรมชาติและช่วยป้องกันการปนเปื้อนสารมลพิษลงสู่แหล่งน้ำ

การบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งตามกลไกที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย ได้ดังนี้

1. การบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) เป็นวิธีการแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย เช่น ของแข็งขนาดใหญ่ กรวด ทราาย ไขมัน และน้ำมัน โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดทางกายภาพ ได้แก่ ตะแกรงดักขยะ ถังดักกรวดทราาย ถังดักไขมันและน้ำมัน และถังตกตะกอน ซึ่งจะลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีในน้ำเสียเป็นหลัก

2. การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำเสีย วิธีนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไป มีสารพิษ โลหะหนัก ของแข็งแขวนลอยที่ตกตะกอนยาก ไขมันและน้ำมันที่ละลายน้ำ ไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่สูงเกินไป และเชื้อโรค โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดทางเคมี ได้แก่ ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า ถังตกตะกอน ถังกรอง และถังฆ่าเชื้อโรค

3. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียโดยเฉพาะสารอินทรีย์ คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยความสกปรกเหล่านี้จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ที่อยู่ในถังเลี้ยงเชื้อเพื่อการเจริญเติบโต ทำให้ค่าความสกปรกในน้ำเสียลดลง โดยจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นแบบใช้อากาศหรือไม่ใช้อากาศก็ได้ ได้แก่ ระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge : AS) ระบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor : RBC) ระบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch : OD) ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon : AL) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) ระบบบ่อผึ่ง (Stabilization Pond) ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) และระบบกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter : AF)

## 2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร

ระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในฟาร์มสุกร ที่ใช้งานอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2556) คือ

**2.2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังเกรอะ – ถังกรองไร้อากาศ** เป็นระบบบำบัดขนาดเล็กและขนาดกลาง รองรับน้ำเสียได้ปริมาณน้อย ไม่เหมาะสำหรับฟาร์มขนาดใหญ่ ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างระบบน้อย ราคาถูก ก่อสร้างง่าย และต้องการการดูแลรักษาอย่างสม่ำเสมอเพื่อป้องกันการอุดตัน ระบบบำบัดน้ำเสียแบบถังเกรอะ – ถังกรองไร้อากาศใช้กระบวนการบำบัดทางกายภาพร่วมกับกระบวนการทางชีวภาพโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Bacteria) เปลี่ยนความสกปรกในน้ำให้กลายเป็นตะกอนและก๊าซชีวภาพ ทำให้น้ำที่ผ่านระบบมีคุณภาพดีขึ้น หน่วยบำบัดของระบบประกอบด้วย

- 1) ถังแยกตะกอนหนัก ทำหน้าที่ช่วยให้มูลสุกรตกตะกอนจมลงสู่ก้นถัง

- 2) ถังเกราะ ทำหน้าที่ตกตะกอนหนักที่ยังตกตะกอนไม่หมดจากถังแยกตะกอนหนัก ฝ้าและไขจะถูกดักที่ผิวหน้าของถัง
- 3) ถังกรองไร้อากาศ ทำหน้าที่ตกตะกอนหนักที่ยังตกตะกอนไม่หมดจากถังแยก ตะกอนหนัก
- 4) บ่อผึ่ง ทำหน้าที่พักน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดให้ได้รับออกซิเจนจากสาหร่ายและพืช บนผิวหน้าของบ่อ

**2.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร** เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน สามารถรองรับ ปริมาณน้ำเสียได้มาก การเดินระบบไม่ยุ่งยากและง่ายต่อการดูแลรักษาประสิทธิภาพของระบบบำบัด ให้คงที่ ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างมาก แต่เนื่องจากในบ่อแรกทำหน้าที่เป็นบ่อหมัก ทำให้มีกลิ่นก๊าซมีเทน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และก๊าซอื่นๆ ที่เกิดจากการหมัก และน้ำมีสีดำคล้ำ จึงเหมาะสำหรับฟาร์มที่อยู่ ห่างไกลจากชุมชน ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อปรับเสถียร ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ บ่อหมัก (Anaerobic Pond) บ่อกึ่งหมัก (Facultative Pond) และบ่อบ่ม (Maturation Pond) น้ำเสียจะ ไหลเข้าแต่ละบ่อตามลำดับ ซึ่งชนิดของจุลินทรีย์ในแต่ละบ่อจะแตกต่างกันตามลักษณะและความลึก ของบ่อ ดังนี้

- 1) บ่อหมัก เป็นบ่อแรกที่รับน้ำเสียจากโรงเรือนและมีความลึกที่สุดประมาณ 3-3.5 เมตร ค่าความสกปรกของน้ำมีค่าสูง และมีภาวะไร้ออกซิเจนเกือบตลอดเวลา อาศัยการทำงานของ จุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งทำให้เกิดก๊าซและกลิ่นที่รุนแรง ตะกอนในบ่อมีสีดำเข้ม
- 2) บ่อกึ่งหมัก มีความลึกประมาณ 2 เมตร ทำให้แสงแดดส่องลงไปไม่ถึงตลอดความลึก ของบ่อ ทำให้บริเวณผิวหน้าของบ่อมีสาหร่ายและวัชพืชขึ้นปกคลุม อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ แบบใช้อากาศในการย่อยสลายความสกปรกบริเวณผิวหน้าของบ่อที่แสงแดดส่องถึง ส่วนบริเวณที่ แสงแดดส่องไม่ถึงนั้น อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศเช่นเดียวกับบ่อหมัก
- 3) บ่อบ่ม มีลักษณะค่อนข้างตื้นมีความลึกประมาณ 1-1.5 เมตร เพื่อให้แสงแดดส่อง ทะลุถึงก้นบ่อ จึงมีสาหร่ายและวัชพืชขึ้นปกคลุมและเกิดการเติมอากาศตามธรรมชาติ อาศัยการ ทำงานของจุลินทรีย์แบบใช้อากาศ น้ำเสียที่อยู่ในบ่อจึงมักมีสีเขียวเนื่องจากมีสาหร่ายปะปนอยู่ในน้ำ จึงควรมีการกำจัดสาหร่ายออกก่อนที่จะทิ้งน้ำลงแหล่งสาธารณะ

**2.2.3 ระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพแบบโดมคงที่ (Fixed Dome)** เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศที่มีการประยุกต์ใช้ในฟาร์มสุกรมากระบบหนึ่ง โดยเฉพาะฟาร์มขนาดกลางและขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดกลิ่นและแมลงวัน แต่มีพื้นที่เก็บก๊าซน้อย ประกอบด้วย รางรวบรวมน้ำเสีย บ่อเติมมูล (Mixing Chamber) บ่อหมัก (Digester Chamber) บ่อล้น (Expansion Chamber) ระบบบำบัดขั้นหลัง และลานตากตะกอน

**2.2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)** เป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย ประกอบด้วย

1) บ่อรวบรวมน้ำเสียหรือบ่อพักน้ำเสีย (Collection Tank : CT) ทำหน้าที่เป็นบ่อรวบรวมน้ำเสียและเก็บกักน้ำเสียเพื่อให้ น้ำเสียไหลเข้าระบบบ่อหมักได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดการผสมระหว่างน้ำเสียและแบคทีเรียหรือตะกอนหมุนเวียนที่ใช้อยู่สลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้ เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณคงที่และมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) สูงขึ้น ซึ่งภายในบ่อรวบรวมน้ำเสียมีเครื่องสูบน้ำเสียเข้าบ่อดักกรวดทรายและบ่อหมักทรงต่อไป

2) บ่อดักทราย (Sand Trapped Tank) ทำหน้าที่ในการแยกตะกอนกรวดและทราย ที่อาจปนเปื้อนมาจากส่วนผสมของอาหารที่มีส่วนประกอบของไขมันสำปะหลังหรือรำข้าว ซึ่งการแยกกรวดและทรายออกจากน้ำเสียจะช่วยยืดอายุการใช้งานของระบบบ่อหมักทรงให้ยาวนานขึ้น

3) บ่อหมักทรง (Channel Digester : CD) ทำหน้าที่เป็นบ่อหมักย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นกรดอินทรีย์และเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยจะมีก๊าซมีเทนเข้มข้นประมาณร้อยละ 65-70 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอื่นๆ ประมาณ ร้อยละ 30-35 ซึ่งเป็นผลจากการทำงานของแบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ด้านบนของบ่อหมักทรงจะติดตั้งโดมพลาสติกทำหน้าที่ในการกักเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ภายในบ่อหมักทรงจะติดตั้งท่อลำเลียงก๊าซชีวภาพสำหรับดึงก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ทั้งในรูปของพลังงานความร้อนหรือเชื้อเพลิงทดแทนในการเดินเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป นอกจากนี้บ่อหมักทรงยังทำหน้าที่ในการตกตะกอนแยกกากของแข็งที่หนักมากลงสู่ก้นบ่อ ส่วนตะกอนก้นบ่อที่ผ่านการหมักย่อยแล้วจะถูกระบายไปยังลานตากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ เพื่อควบคุมระดับชั้นของตะกอนในบ่อให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เป็นการควบคุมสภาพการทำงานจากระบบให้มีประสิทธิภาพคืออยู่

ตลอดเวลาและสามารถป้องกันการสะสมของตะกอนในบ่อหมักรางโดยการระบายตะกอนออกจากบ่อด้วยโครงสร้างท่อที่ออกแบบเป็นพิเศษและมีลักษณะเฉพาะเพื่อลดปริมาณตะกอนที่สะสมในระบบลง น้ำส่วนใสจะไหลออกจากบ่อเข้าสู่ถังหมักเร็วแบบยูเอเอสบี ซึ่งจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยในบ่อหมักรางประมาณร้อยละ 20-30 และทำให้คุณภาพของน้ำที่ผ่านการหมักมีปริมาณสารอินทรีย์ลดลง

4) บ่อยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) น้ำส่วนใสที่ผ่านการบำบัดจากบ่อหมักรางจะนำเข้าบ่อหมักแบบยูเอเอสบีเพื่อทำการบำบัดต่อในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศซึ่งสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีได้เพิ่มขึ้น สามารถรับปริมาณสารอินทรีย์ได้สูง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ลักษณะการทำงานและชนิดรูปร่างของแบคทีเรียในบ่อหมักรางและบ่อยูเอเอสบีจะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน การไหลของน้ำเสียในบ่อหมักรางจะเป็นการไหลในแนวนอน (Horizontal Flow) แต่การไหลในบ่อยูเอเอสบีจะเป็นการไหลย้อนขึ้นจากก้นบ่อสู่ผิวน้ำในแนวตั้ง (Vertical Flow) น้ำที่ผ่านการบำบัดในบ่อยูเอเอสบีแล้วจะถูกส่งไปบำบัดในระบบบำบัดขั้นหลังต่อไป

5) ลานตากตะกอน (Sand Drying Bed) ทำหน้าที่กรองและตากของแข็งหรือตะกอนที่ผ่านการหมักย่อยแล้วจากบ่อหมักรางซึ่งจะถูกส่งมาตามรางระบายสู่ลานตากตะกอน ตะกอนที่แห้งแล้วจะถูกรวบรวมไว้เพื่อนำไปกำจัดหรือทำปุ๋ยอินทรีย์ต่อไป

6) ระบบบำบัดขั้นหลัง (Post Wastewater Treatment System) น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นในบ่อหมักรางและบ่อยูเอเอสบีแล้วจะถูกส่งมาบำบัดต่อในระบบบำบัดขั้นหลัง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการบำบัดโดยธรรมชาติหรือระบบบ่อฝิ่งแบบผสมที่ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อยที่สุด

**2.2.5 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อคลุมไม่ใช้อากาศ (Covered Lagoon)** เป็นบ่อหมักก๊าซชีวภาพรูปแบบหนึ่ง เป็นบ่อเปิดที่ปิดคลุมบ่อด้วยพลาสติกเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายได้ แบ่งตามลักษณะการคลุมบ่อได้เป็น 2 แบบ คือ แบบคลุมเฉพาะส่วน (Partial Cover) และแบบคลุมทั้งบ่อ (Bank to Bank) ประกอบด้วยรางรวบรวมน้ำเสีย บ่อรวบรวมน้ำเสีย ตะแกรงหยาบ บ่อตกตะกอนขั้นต้น บ่อคลุมไม่ใช้อากาศ และระบบบำบัดขั้นหลัง (บ่อปรับเสถียร) และลานตากตะกอน การทำงานของระบบชนิดนี้จะใช้กระบวนการทางกายภาพร่วมกับกระบวนการทางชีวภาพโดยการทำงานของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Bacteria) ในการ

เปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นตะกอนและก๊าซ โดยเริ่มจากการรวบรวมน้ำเสียผ่านรางรวบรวมน้ำเสียเข้าสู่บ่อรวบรวมน้ำเสีย มีตะแกรงหนายับตัววัสดุอื่นที่ปะปนมากับน้ำเสีย เช่น เศษเชือก ถุงพลาสติก เป็นต้น จากนั้นน้ำเสียจะไหลเข้าสู่บ่อตกตะกอนขั้นต้น ซึ่งตกตะกอนหนักพวกหินหรือทรายที่ปะปนมากับน้ำเสีย เพื่อป้องกันการอุดตันของระบบ และไหลต่อไปยังบ่อคลุมไม่ใช้อากาศซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางชีวภาพเกิดก๊าซชีวภาพ และตะกอนส่วนเกินจะถูกดึงออกจากบ่อคลุมไม่ใช้อากาศเข้าสู่ท่อแยกตะกอน จากนั้นกากตะกอนที่หมักย่อยแล้วจะถูกนำไปตากยังลานตากตะกอน ส่วนน้ำที่ผ่านจากบ่อคลุมไม่ใช้อากาศจะมีความสกปรกน้อยและไหลไปสู่อุปกรณ์ปรับเสถียร ซึ่งภายในบ่อมีจุลินทรีย์แบบกึ่งใช้อากาศ (Facultative Bacteria) ในการย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำเสีย และน้ำเสียที่อยู่ในบ่อจะได้รับแสงแดดจึงมักมีสาหร่ายเกิดขึ้นซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำทำให้น้ำคุณภาพดีขึ้น

### 2.3 ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียชุมชน

**น้ำเสียชุมชน** หมายถึง ของเสียที่อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว รวมทั้งมลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น ที่เกิดจากการใช้น้ำสำหรับประกอบกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน และกิจกรรมที่เป็นอาชีพ ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารและชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายภายในครัวเรือน และอาคารประเภทต่างๆ เป็นต้น ปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากบ้านเรือน อาคาร จะมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำใช้

ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากบ้านพักอาศัยจะประกอบไปด้วยน้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน ซึ่งมีองค์ประกอบ ดังนี้

1. สารอินทรีย์ ได้แก่ พวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เช่น เศษอาหาร พืชผัก ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved Oxygen) ลดน้อยลง เกิดการเน่าเหม็นได้ เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำหรือค่าบีโอดี (BOD) ในน้ำสูง แสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ในน้ำมาก ทำให้เกิดการเน่าเหม็นได้ง่าย

2. สารอนินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆ ที่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส เป็นต้น

3. โลหะหนักและสารพิษ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สามารถสะสมอยู่ในวงจรรอาหารเกิดเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ เช่นปรอท ตะกั่ว แมงกานีส โครเมียม และทองแดง

ปกติจะอยู่ในสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชที่ปนมากับน้ำทิ้งจากการเกษตร สำหรับในเขตชุมชน อาจมีสารมลพิษนี้มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านชุบโลหะ ตู้ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาล

4. น้ำมันและสารลอยน้ำต่างๆ ซึ่งจัดเป็นอุปสรรคในการสังเคราะห์แสงและกีดขวางการกระจายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่น้ำ และอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

5. ของแข็ง เมื่อจมสู่ก้นแหล่งน้ำทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ท้องน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน และมีความขุ่นสูง ส่งผลกระทบต่อ การดำรงชีพของสัตว์น้ำ

6. สารก่อให้เกิดฟองหรือสารชักฟอง ได้แก่ ผงซักฟอกและสบู่ โดยฟองจะกีดกันการกระจายของออกซิเจนจากอากาศลงสู่แหล่งน้ำ และอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

7. จุลินทรีย์ ในน้ำเสียจะมีจุลินทรีย์เป็นจำนวนมาก ทั้งจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนในการดำรงชีวิต และจุลินทรีย์บางชนิดอาจเป็นเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อคน

8. ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งเมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของสาหร่าย (Algae Bloom) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดลงต่ำมากในช่วงกลางคืน และยังทำให้เกิดวัชพืชน้ำอีกด้วย

9. กลิ่น เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือก๊าซไข่เน่า ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน

**ตารางที่ 2.2** แสดงลักษณะทั่วไปของน้ำเสียชุมชน (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		น้อย	ปานกลาง	มาก
1. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	350	720	1,200
- ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	250	500	580
- ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	100	220	350
2. ปริมาณตะกอนหนัก (Settleable Solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	5	10	20
3. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	110	220	400



พารามิเตอร์	หน่วย	ความเข้มข้น		
		น้อย	ปานกลาง	มาก
4. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	250	500	1,000
5. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total as N)	มิลลิกรัมต่อลิตร	20	40	85
- อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic)	มิลลิกรัมต่อลิตร	8	15	35
- แอมโมเนีย (Free Ammonia)	มิลลิกรัมต่อลิตร	12	25	50
- ไนไตรท์ (Nitrites)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0	0	0
- ไนเตรท (Nitrate)	มิลลิกรัมต่อลิตร	0	0	0
6. ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total as P)	มิลลิกรัมต่อลิตร	4	8	15
- สารอินทรีย์ (Organic)	มิลลิกรัมต่อลิตร	1	3	5
- สารอนินทรีย์ (Inorganic)	มิลลิกรัมต่อลิตร	3	5	10
7. คลอไรด์ (Chloride)	มิลลิกรัมต่อลิตร	30	50	100
8. ซัลเฟต (Sulfate)	มิลลิกรัมต่อลิตร	20	30	50
9. สภาพด่าง (Alkalinity as CaCO <sub>3</sub> )	มิลลิกรัมต่อลิตร	50	100	200
10. ไขมัน (Grease)	มิลลิกรัมต่อลิตร	50	100	150

## 2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียชุมชน สามารถแบ่งตามขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

**2.4.1 การบำบัดขั้นต้น (Preliminary Treatment) หรือการบำบัดเบื้องต้น (Primary Treatment)** เป็นการบำบัดเพื่อแยกกรวด ทราบ และของแข็งขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสีย ประกอบด้วย ตะแกรงหยาบ ตะแกรงละเอียด ถังดักกรวดทราบ ถังตกตะกอนเบื้องต้น และเครื่องกำจัดไขมันและฝู การบำบัดน้ำเสียขั้นต้นสามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้ร้อยละ 50-70 และกำจัดสารอินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีได้ร้อยละ 25-40

**2.4.2 การบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Treatment)** เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นต้นและการบำบัดเบื้องต้นมาแล้ว แต่ยังคงมีของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กและสารอินทรีย์ที่ละลายและไม่ละลายในน้ำเสียเหลือค้างอยู่ โดยทั่วไปการบำบัดในขั้นนี้จะอาศัยหลักการเลี้ยงจุลินทรีย์ในระบบภายใต้สภาวะที่สามารถควบคุมได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกินสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำทิ้งโดยใช้ถังตกตะกอน (Secondary Sedimentation Tank) ทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดีขึ้น จากนั้นจึงผ่านเข้าระบบฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เพื่อไม่ให้จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคปนเปื้อน ก่อนจะระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติหรือนำกลับไปใช้ประโยชน์ (Reuse) การบำบัดน้ำเสียในขั้นนี้สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ซึ่งวัดในรูปของบีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 80

**2.4.3 การบำบัดขั้นสูง (Advance Treatment หรือ Tertiary Treatment)** เป็นกระบวนการกำจัดสารอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส สารแขวนลอยที่ตกตะกอนยากและอื่นๆ ซึ่งยังไม่ได้ถูกกำจัดด้วยกระบวนการบำบัดขั้นที่สอง เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดียิ่งขึ้นเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเจริญเติบโตที่ผิดปกติของสาหร่ายที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดน้ำเน่าเสีย แก้ไขปัญหาสีของน้ำที่พื้งนารังเกียจ และแก้ไขปัญหาคือที่ระบบบำบัดขั้นที่สองไม่สามารถกำจัดได้ กระบวนการบำบัดขั้นสูง ได้แก่

- 1) การกำจัดฟอสฟอรัส มีทั้งแบบใช้กระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวภาพ
- 2) การกำจัดไนโตรเจน มีทั้งแบบใช้กระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวภาพ โดยกระบวนการทางชีวภาพจะมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนให้เป็นไนเตรทที่เกิดขึ้นในสภาวะแบบใช้ออกซิเจนหรือที่เรียกว่า กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และขั้นตอนการเปลี่ยนไนเตรทให้เป็นก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจน หรือที่เรียกว่ากระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)
- 3) การกรอง (Filtration) เป็นกระบวนการที่ไม่ต้องการโดยวิธีการทางกายภาพ ได้แก่ สารแขวนลอยที่ตกตะกอนได้ยาก
- 4) การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีในน้ำเสียโดยการดูดซับบนพื้นผิวของของแข็ง รวมถึงการกำจัดกลิ่นและก๊าซที่เกิดขึ้น

## 2.5 สลัดจ์ดิบ (Raw Sludge)

สลัดจ์ดิบ (Raw Sludge) หมายถึง สลัดจ์ชั้นต้นและสลัดจ์ชั้นที่สองที่ยังไม่คงตัว (สามารถเนาเหม็นได้ง่าย) การบำบัดควรย่อยสลัดจ์ดิบให้กลายเป็นสลัดจ์คงตัวที่ย่อยแล้ว (Digested Sludge) ก่อนนำไปตากหรือบิบน้ำ สลัดจ์ดิบจำแนกได้เป็น 2 ประเภท (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) คือ

**2.5.1 สลัดจ์ชีวภาพ** หมายถึง สลัดจ์ดิบที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพแบบต่างๆ ส่วนประกอบหลักของสลัดจ์ชีวภาพจึงเป็นแบคทีเรียที่ถูกกำจัดทิ้ง รวมทั้งสลัดจ์ที่เกิดจากการตกตะกอนเบื้องต้นของน้ำเสีย

**2.5.2 สลัดจ์เคมี** หมายถึง สลัดจ์ที่เกิดจากการตกตะกอนด้วยวิธีเคมี ซึ่งอาจเป็นสลัดจ์ที่เกิดจากระบวนการโคแอกกูเลชันของสารแขวนลอยต่างๆ รวมทั้งน้ำมันและไขมัน หรือสลัดจ์ที่เกิดจากระบวนการตกผลึก (Precipitation) ของโลหะหนัก

สลัดจ์ชั้นต้น หมายถึง ตะกอนสลัดจ์ที่ระบายออกมาจากกันถังตกตะกอนชั้นแรก สลัดจ์ส่วนนี้จะเป็นตะกอนแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเสียที่มีน้ำหนักรวมกันจนสามารถตกตะกอนได้เองในกันถังตกตะกอนชั้นแรก ถ้าใช้สารเคมีช่วยให้เกิดการตกตะกอนสลัดจ์ที่เกิดขึ้นก็จะเรียกว่า สลัดจ์เคมี สลัดจ์ชั้นแรกจึงมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์รวมกันซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสีย

สลัดจ์ชั้นสอง หมายถึง ตะกอนจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบต่างๆ สลัดจ์ส่วนนี้จึงมีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบหลัก

**ตารางที่ 2.3** แสดงลักษณะทางเคมีและกายภาพของตะกอนสลัดจ์ชั้นต้นและชั้นสองจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบเอเอส (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

รายการ	ตะกอนสลัดจ์ชั้นต้น	ตะกอนสลัดจ์ชั้นสอง
ความถ่วงจำเพาะของสลัดจ์	1.02	1.005
ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง	1.4	1.08-1.25
ของแข็งทั้งหมด, TS (%)	2.5-5.5	0.5-1.2
ของแข็งระเหย (%TS)	60-80	60-80
เซลลูโลส (%TS)	8-15	7

รายการ	ตะกอนสลัดจ์ขั้นต้น	ตะกอนสลัดจ์ขั้นสอง
น้ำมันและไขมัน (%TS)	6-30	5-12
โปรตีน (%TS)	20-30	32-41
ไนโตรเจน (N) (%TS)	1.5-4.0	4.7-6.7
ฟอสฟอรัส (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (%TS)	0.8-2.8	2.8-11
โพแทสเซียม (K <sub>2</sub> O) (%TS)	0-1	0.4
พีเอช	5-8	6.5-8

การจำแนกความแตกต่างของน้ำเสียและสลัดจ์อาจทำได้โดยดูจากปริมาณตะกอนของแข็ง โดยปกติ น้ำเสียถ้ามีปริมาณตะกอนของแข็งสูงกว่าร้อยละ 1 อาจเรียกว่าเป็นสลัดจ์ได้ สลัดจ์ที่มีปริมาณตะกอนของแข็งไม่เกินร้อยละ 4 สามารถไหลได้ดีและจะเห็นเป็นของเหลวชั้นๆ มีลักษณะคล้ายเลน สลัดจ์ที่เริ่มเป็นก้อนและโยนเป็นก้อนได้จะมีปริมาณตะกอนของแข็งร้อยละ 20-25 เป็นอย่างน้อย ซึ่งแสดงว่าสลัดจ์ยังมีน้ำหรือความชื้นอยู่เป็นจำนวนมาก ลักษณะของสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	ลักษณะของสลัดจ์
0-4	สามารถไหลได้ดี
5-20	เป็นโคลนที่ไหลหนืดๆ
20-25	เป็ยกแต่ปั้นเป็นก้อนและโยนได้เป็นก้อนได้

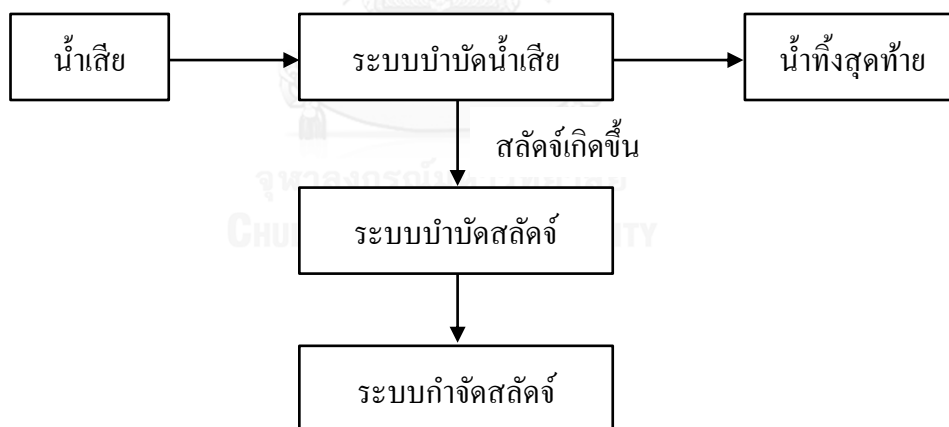
## 2.6 แหล่งกำเนิดของสลัดจ์

แหล่งกำเนิดของสลัดจ์จำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ ตะกอนแขวนลอยและสารละลาย ตะกอนแขวนลอยที่ถูกตกตะกอนหรือลอยตะกอนจะกลายเป็นสลัดจ์โดยตรง ส่วนสารละลายนั้นเป็น

แหล่งกำเนิดสลัดจ์ที่ซับซ้อนกว่าตะกอนแขวนลอย สารละลายอินทรีย์ เช่น ไอออนของโลหะหนัก จะกลายเป็นสลัดจ์โดยผ่านปฏิกิริยาการตกผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation) ตามด้วยการตกตะกอน ส่วนสารละลายอินทรีย์ เช่น บีโอดี บางส่วนจะกลายเป็นจุลินทรีย์ซึ่งกลายเป็นสลัดจ์ที่ต้องการบำบัด

## 2.7 วิธีจัดการกับสลัดจ์

การบำบัดน้ำเสียไม่ว่าจะด้วยกระบวนการแบบใดก็ตามจะมีสลัดจ์เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในการกินสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดสลัดจ์เหล่านั้นเพื่อไม่ให้เกิดการเน่าเหม็น และเป็นการทำลายเชื้อโรคด้วย ระบบบำบัดน้ำเสียที่สมบูรณ์จึงต้องมีระบบจัดการสลัดจ์อยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สลัดจ์ดังกล่าวจะเป็นตะกอนแข็งที่อยู่ในน้ำเสียหรืออาจจะเป็นสารอินทรีย์ละลายหรือไอออนต่างๆ ที่ถูกเปลี่ยนเป็นตะกอนของแข็ง สลัดจ์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นของเสียที่ต้องจัดการบำบัด การจัดการกับสลัดจ์แต่ละประเภทมีขั้นตอนแตกต่างกัน สลัดจ์ที่คงตัวสามารถถูกกำจัดได้ง่ายกว่าสลัดจ์ดิบ (ไม่คงตัว)



รูปที่ 2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียที่สมบูรณ์ (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

วิธีการจัดการกับสลัดจ์มี 2 ส่วนหลัก คือ การบำบัด (Treatment) และการกำจัด (Disposal)

### 2.7.1 การบำบัดสลัดจ์ (Treatment) ประกอบด้วยกระบวนการหลักๆ ดังนี้

1) การทำให้สลัดจ์ข้น (Thickening) ขั้นตอนแรกของการบำบัดสลัดจ์มักเป็นการเพิ่มความเข้มข้นให้กับสลัดจ์เพื่อลดปริมาณของสลัดจ์ที่ต้องนำไปบำบัด ซึ่งมีผลทำให้ระบบย่อยสลัดจ์มี

ขนาดเล็กกลง โดยถึงทำชั้นสลัดจ์จะมีใบกวนที่หมุนช้าๆ ทำหน้าที่สร้างรอยแยกในชั้นสลัดจ์เพื่อให้ น้ำหนึแยกออกจากชั้นสลัดจ์ เป็นการสร้างช่องว่างให้ชั้นสลัดจ์ทำให้สลัดจ์ยุบตัวได้เพิ่มขึ้นและเข้มข้นขึ้น วิธีหรืออุปกรณ์ที่ใช้ทำให้สลัดจ์เข้มข้นมีอยู่ 3 วิธี คือ การทำชั้นแบบตกตะกอนหรือใช้แรงดึงดูดโลก (Gravity Thickening) การทำชั้นแบบลอยตัว (Flotation) และการทำชั้นแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

2) การทำให้สลัดจ์คงตัว (Stabilization) โดยการย่อยสลัดจ์ด้วยกระบวนการใช้อากาศหรือกระบวนการไร้อากาศ เพื่อทำการลดปริมาณสารอินทรีย์ในสลัดจ์ ทำให้สลัดจ์คงตัวสามารถนำไปทิ้งได้โดยไม่เน่าเหม็น

3) การปรับสภาพสลัดจ์ (Conditioning) เพื่อให้สลัดจ์มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น ทำปุ๋ย การใช้ปรับสภาพดินสำหรับใช้ทางการเกษตร เป็นต้น

4) การแยกน้ำออกจากสลัดจ์ (Dewatering) หมายถึง การกำจัดน้ำออกจากสลัดจ์ที่ ย่อยแล้ว เพื่อลดปริมาณของสลัดจ์ที่จะนำไปกำจัดเป็นขั้นสุดท้ายหรือนำไปใช้ประโยชน์อื่น ปริมาณที่ ลดลงทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดและขนส่งสลัดจ์ลดลง นอกจากนี้สลัดจ์ที่แห้งขึ้นทำให้สะดวกต่อ การขนถ่ายและการเคลื่อนย้าย วิธีการแยกน้ำออกจากสลัดจ์ ได้แก่ วิธีการตากสลัดจ์บนลานทราย วิธีบีบสลัดจ์ด้วยเครื่องอัดสลัดจ์ (Filter Press) วิธีรีดสลัดจ์ด้วยเครื่องรีดสลัดจ์แบบสายพาน (Belt Press) และวิธีเหวี่ยงสลัดจ์ด้วยเครื่องเหวี่ยง (Centrifuge)

## 2.7.2 การกำจัดสลัดจ์ (Disposal) (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

หลังจากสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียได้รับการบำบัดให้มีความคงตัว ไม่มี กลิ่นเหม็นและปริมาณลดลงเพื่อให้เกิดความสะดวกในการขนไปกำจัดทิ้งหรือนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ แล้ว ในขั้นต่อมาก็คือ การนำสลัดจ์เหล่านี้ไปกำจัดทิ้ง วิธีการที่เหมาะสมและนิยมใช้ในปัจจุบัน คือ

1) การฝังกลบ (Landfill) เป็นการนำสลัดจ์มาฝังในสถานที่ที่จัดเตรียมไว้ และกลบ ด้วยชั้นดินทับอีกชั้นหนึ่ง

2) การทำปุ๋ยหมัก (Composting) เป็นการนำสลัดจ์มาหมักต่อเพื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ย เนื่องจากในสลัดจ์มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ แร่ธาตุต่างๆ

3) การเผา (Incineration) เป็นการนำสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40 ขึ้นไป มาเป็น เชื้อเพลิงในการเผา

## 2.8 สมบัติของสลัดจ์

สมบัติและปริมาณสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำเสีย ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบ รวมทั้งระดับของการบำบัดด้วย

### 2.8.1 สมบัติทางเคมีของสลัดจ์ (วิลโลว์ พันธ์จุฬหาญ, 2548)

องค์ประกอบทางเคมีของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย สามารถแบ่งกว้างๆ ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) องค์ประกอบที่เป็นประโยชน์ ได้แก่ กลุ่มธาตุอาหารหลัก ประกอบด้วยไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ซึ่งพืชมีความต้องการเป็นจำนวนมาก กลุ่มธาตุอาหารรอง ประกอบด้วย กำมะถัน (S) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) รวมทั้งกลุ่มธาตุอาหารเสริม เช่น ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) เป็นต้น โดยจะต้องมีในปริมาณที่เหมาะสม ถ้ามากเกินไปอาจเกิดพิษได้

2) องค์ประกอบที่ไม่เป็นประโยชน์ ก่อให้เกิดพิษและปัญหาทางสิ่งแวดล้อม ได้แก่ โลหะหนักที่เป็นพิษ เช่น แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) นิกเกิล (Ni) เป็นต้น

### 2.8.2 สมบัติทางกายภาพของสลัดจ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546a)

สลัดจ์ที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว มีสีน้ำตาลถึงดำ และหากอยู่ในรูปที่ไม่เสถียรจะมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ มีแก๊สและความร้อนออกมาเนื่องจากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์

**ตารางที่ 2.5** องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณโลหะหนักของสลัดจ์ตัวอย่าง รวมทั้งค่าจำกัดของปุ๋ยตามกฎหมายของประเทศไทย (Xu และคณะ, 2012)

พารามิเตอร์	สลัดจ์ A	สลัดจ์ B	Adam และคณะ, 2009	Franz, 2008	ค่าจำกัดของปุ๋ยตามกฎหมาย			
					ออสเตรเลีย	จีน	สวิสเซอร์แลนด์	ตุรกี
Na <sub>2</sub> O (%)	1.52	1.51	0.30-1.12	4.80-5.50	-	-	-	-
MgO (%)	2.72	3.94	1.79-3.63	2.30-3.10	-	-	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	15.1	9.89	8.9-24.9	6.50-9.10	-	-	-	-
SiO <sub>2</sub> (%)	49.1	43.1	19.6-43.4	18.2-20.0	-	-	-	-

พารามิเตอร์	สลัดจ์	สลัดจ์	Adam และ คณะ, 2009	Franz, 2008	ค่าจำกัดของปุ๋ยตามกฎหมาย			
	A	B			ออสเตรีย	จีน	สวิสเซอร์แลนด์	ตุรกี
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	15.2	27.4	13.7-25.7	8.9-21.0	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O (%)	2.83	3.38	0.95-2.77	0.5-0.6	-	-	-	-
CaO (%)	7.77	10.3	12.5-18.5	22.7-22.8	-	-	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.44	5.7	3.2-22.6	15.6-20.0	-	-	-	-
Cd (mg/kg)	ND	ND	2.23-4.71	1.9-3.0	15	10	3	-
Pb (mg/kg)	118.3	199.4	89.9-264	109-158	100	150	200	-
Cr (mg/kg)	124	89	70.0-130	102-200	667	500	200	270
Hg (mg/kg)	0.22	0.23	0.1-0.23	ND	1	5	-	-
Cu (mg/kg)	465.2	787.4	470-1267	400-625	778	-	400	-
Zn (mg/kg)	1930	3318	1540-2181	1300-1850	3333	-	1300	1100
Ni (mg/kg)	44.6	53.8	39.5-80.2	49.6-50	-	-	50	120

- \* หมายเหตุ (1) ND = Non Detectable หมายถึง ไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากมีค่าต่ำมาก  
(2) - หมายถึง ไม่ได้กำหนดค่า

จากตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณโลหะหนักของสลัดจ์ตัวอย่าง รวมทั้งค่าจำกัดของปุ๋ยตามกฎหมายของประเทศต่างๆ จะเห็นว่า ในสลัดจ์ยังคงมีธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อพืชเป็นส่วนประกอบอยู่ ดังนั้นหากมีการนำเอาธาตุอาหารหลักที่อยู่ในสลัดจ์เหล่านี้กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดก่อนที่จะนำไปกำจัดจะเป็นผลดีอย่างยิ่ง โดยเฉพาะฟอสฟอรัสซึ่งถือว่ายังคงมีปริมาณมากพอสมควร เป็นแหล่งธาตุอาหารสำคัญสำหรับพืชที่ใช้ในการเจริญเติบโตและยังไม่มีองค์ประกอบอื่นๆ ที่สามารถทดแทนได้ พร้อมทั้งมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต จึงได้มีการศึกษาวิธีการในการนำธาตุอาหารฟอสฟอรัสกลับคืนในรูปแบบต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการนำฟอสฟอรัสจากสลัดจ์กลับคืนในรูปของผลิตภัณฑ์

## 2.9 วิธีการนำกลับฟอสฟอรัสจากสลัดจ์ที่รีดน้ำแล้ว

การนำกลับฟอสฟอรัสจากสลัดจ์ที่รีดน้ำแล้ว เริ่มต้นจากการนำสลัดจ์ที่ผ่านการรีดน้ำแล้วมาทำการอบให้แห้งและเผาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ในสลัดจ์ โดยฟอสเฟตจะเสถียรและไม่เกิดการ



ระเหยในระหว่างขั้นตอนการทำสลัดจ์ให้แห้งหรือการเผาที่อุณหภูมิ 500-900 องศาเซลเซียส ทำให้สามารถนำกลับฟอสฟอรัสจากสลัดจ์ได้ โดยขั้นแรกจะชะละลายฟอสฟอรัสในเถ้าสลัดจ์ด้วยสารละลายกรด ซึ่งสารละลายกรดที่นิยมใช้ในการชะละลาย ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก เนื่องจากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการชะละลายฟอสฟอรัสได้เกือบร้อยละ 100 หลังจากนั้นทำการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายฟอสฟอรัสที่ได้ด้วยวิธีต่างๆ เช่น ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน หรือสารดูดซับ หรือกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เพื่อให้เวลาตกผลึกจะได้ผลึกที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น และขั้นสุดท้ายจะทำการปรับพีเอชเพื่อให้สารละลายมีสภาวะเป็นด่างเหมาะต่อการตกผลึกฟอสฟอรัสในรูปแบบต่างๆ แต่ที่นิยม คือ การตกผลึกในรูปแบบแกมมาเอมโมเนียมฟอสเฟตหรือสตรูไวท์ เพราะเป็นการสร้างมูลค่าที่ดีเนื่องจากผลึกสตรูไวท์สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าทางการเกษตรได้ ทำให้พืชสามารถดูดซึมธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด

## 2.10 การชะละลาย (Leaching)

การชะละลาย (Leaching) เป็นการสกัดด้วยตัวทำละลาย เพื่อให้ของแข็งละลายในรูปของเหลว โดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent) ที่เป็นของเหลวเข้าไปทำละลายตัวถูกละลาย (Solute) ที่อยู่ในของแข็งเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการชะละลาย (ชนัญญา หาวารี, 2549) ได้แก่

1. ชนิดของกรด กรดที่ใช้ในการชะละลาย ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นกรดแก่ที่แตกตัวได้ร้อยละ 100 ทำให้ชะละลายโลหะได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ
2. พีเอช ความสามารถในการชะละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-2
3. เวลาในการชะละลาย เวลาที่ใช้ในการชะละลายจะขึ้นกับตัวแปรหลายชนิด เช่น ค่าพีเอช ชนิดของโลหะ เป็นต้น
4. ชนิดของโลหะ โลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการถูกชะละลายได้ไม่เท่ากัน ขึ้นกับโลหะนั้นอยู่ในรูปสารประกอบชนิดใด โดยโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบไอออนิกที่เมื่ออยู่ในน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย
5. อุณหภูมิ การชะละลายส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้การชะละลายเพิ่มขึ้น
6. ปริมาณโลหะ เมื่อปริมาณโลหะเพิ่มขึ้น ค่าการชะละลายของฟอสฟอรัสจะน้อยลง

7. ปริมาณกรด ปริมาณกรดที่ต้องการขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ
8. ขนาดอนุภาคของตะกอนโลหะ โลหะจะอยู่ในรูปของตะกอน ถ้าตะกอนมีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่สัมผัสกับกรดน้อย ทำให้ค่าการชะละลายต่ำกว่าตะกอนที่มีขนาดเล็ก
9. ความชื้นของตะกอนโลหะ ตะกอนโลหะที่มีความชื้นน้อยๆ อนุภาคภายในตะกอนจะอยู่ชิดติดกันมาก ทำให้ตะกอนมีความเสถียร ค่าการชะละลายจึงลดลง

## 2.11 กระบวนการตกผลึกทางเคมี

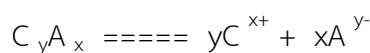
การตกผลึกทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้มาอยู่ในสถานะของแข็ง ซึ่งจะแยกออกจากสารละลายนั้นได้ การตกผลึกทางเคมีนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายน้ำของสารนั้นๆ การตกผลึกทางเคมีเกิดขึ้นได้หลายวิธี โดยมีกระบวนการเป็นไปตามขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งหรือหลายขั้นตอนรวมกันดังต่อไปนี้ (นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์, 2531)

1. ใส่สารที่สามารถทำปฏิกิริยาได้โดยตรงกับสารที่ละลายอยู่ในสารละลายนั้น เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้น้อย
2. ใส่สารที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาวะสมดุลของการละลายน้ำให้เลื่อนมาถึงจุดซึ่งสารที่ละลายอยู่ในน้ำไม่สามารถละลายได้อีกต่อไป
3. เปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัว หรือเกือบอิ่มตัวไปในทิศทางที่ทำให้มีค่าการละลายน้ำลดลง จนเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะของแข็งเนื่องจากค่าการละลายน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

กระบวนการการตกผลึกทางเคมีแตกต่างจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพราะการตกผลึกทางเคมีเป็นการเติมสารเคมีลงไปในน้ำ เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นตะกอนที่ใหญ่และหนักจนจับตัวได้ ส่วนกระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นการเติมสารเคมีเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายในน้ำเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งจะช่วยทำให้ตะกอนขนาดเล็กมารวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ และตกตะกอนในที่สุด

การตกผลึกทางเคมีเกิดขึ้นโดยความสัมพันธ์ของสภาวะสมดุลระหว่างสถานะที่ละลายน้ำและสถานะที่ไม่ละลายน้ำของสารที่ละลายน้ำได้เล็กน้อย การพิจารณาสถานะที่ละลายน้ำและสถานะที่ไม่ละลายน้ำต้องพิจารณาจากค่าคงที่การละลายน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ เขียนแทนด้วย  $K_{sp}$  ซึ่งเท่ากับผลคูณของความเข้มข้นของไอออนทั้งหมดในสารนั้น โดยแต่ละไอออนยกกำลังด้วยจำนวนไอออนนั้น

ที่สภาวะสมดุลอิมตัวพอดีที่อุณหภูมิอื่นๆ ยกตัวอย่างสารซึ่งมีสูตรเคมีเป็น  $C_yA_x$  อยู่ในสภาวะสมดุลอิมตัวพอดีในการละลายน้ำ แสดงได้ด้วยสมการเคมีดังนี้



และค่าคงที่การละลายน้ำที่อุณหภูมินั้นๆ เป็นดังนี้

$$K_{sp} = [C^{x+}]^y [A^{y-}]^x$$

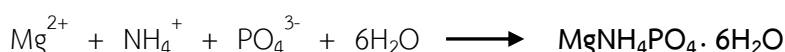
การตกผลึกทางเคมีจะเกิดขึ้นได้ เมื่อผลคูณดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่าคงที่การละลายน้ำ ณ อุณหภูมิที่กำหนด

ตัวอย่างเช่น แมกนีเซียมคาร์บอเนตสามารถตกตะกอนได้ก็ต่อเมื่อผลคูณของความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน และอนุมูลคาร์บอเนตมากกว่าค่าคงที่การละลายน้ำของแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $K_{sp} = 2.6 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส) ซึ่งแสดงเป็นผลคูณของความเข้มข้นไอออนดังนี้

$$[Mg^{2+}] [CO_3^{2-}] > 2.6 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร}$$

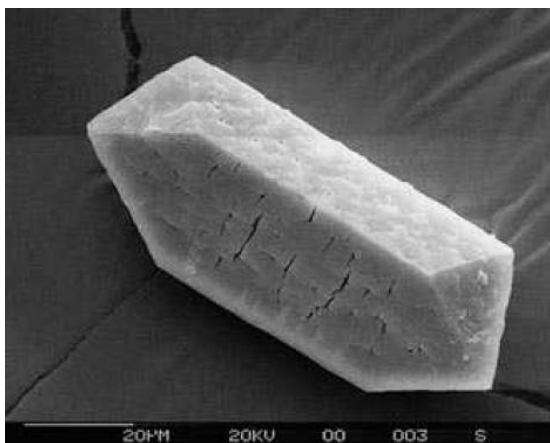
## 2.12 ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือสตรูไวท์ (Magnesium Ammonium Phosphate, MAP, Struvite)

ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือสตรูไวท์ (Struvite) เกิดจากการรวมตัวกันของไอออนแมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ ) แอมโมเนียม ( $NH_4^+$ ) และฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) ในอัตราส่วนโดยโมลที่เท่ากัน โดยมีแมกนีเซียมเป็นตัวประสานให้เกิดเป็นผลึกของแข็ง ซึ่งผลึกสตรูไวท์จะเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นต่างมีสูตรทางเคมี คือ  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 245.41 กรัมต่อโมล สมการการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังนี้ (พิชญภัค เจริญพันธ์, 2552)



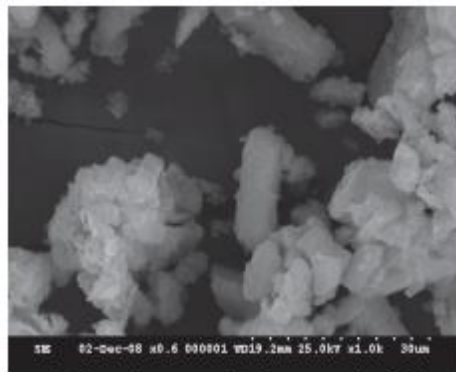
ผลึกสตรูไวท์มีสีขาวหรือขาวค่อนข้างเหลืองหรืออมน้ำตาล ระบบผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ที่แต่ละด้านทำมุมกัน 90 องศา แต่มีความยาวไม่เท่ากัน รูปทรงของผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 สตรูไวท์มีค่าความแข็งเท่ากับ 1.5 ถึง 2 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.7 โดยความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่ออยู่ในภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง แต่สามารถละลายได้

มากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด และสามารถเปลี่ยนรูปได้เมื่ออยู่ในสภาวะต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4

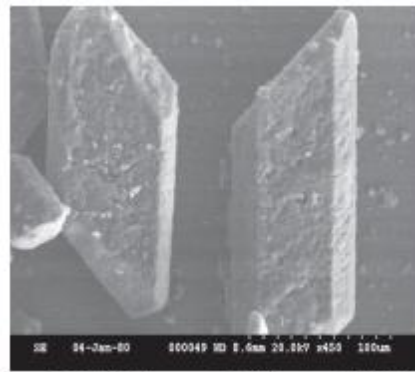


รูปที่ 2.2 รูปทรงของผลึกสตรูไวท์ (พิชญ์ภาค เจียรพันธ์, 2552)

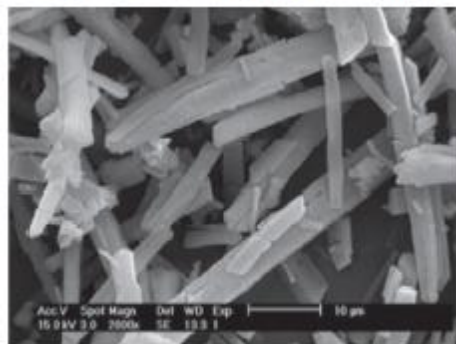




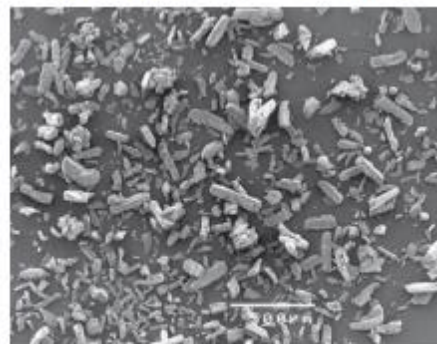
(a) Irregular crystal (Rahman et al., 2011)



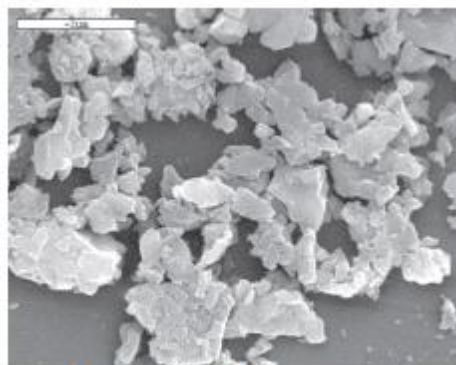
(b) Cube like crystal (Cho et al., 2009)



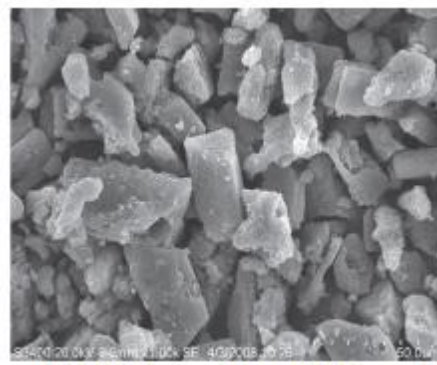
(c) Rod like irregular crystal (Le Corre et al., 2007)



(d) Irregular crystal (Ali, 2007)

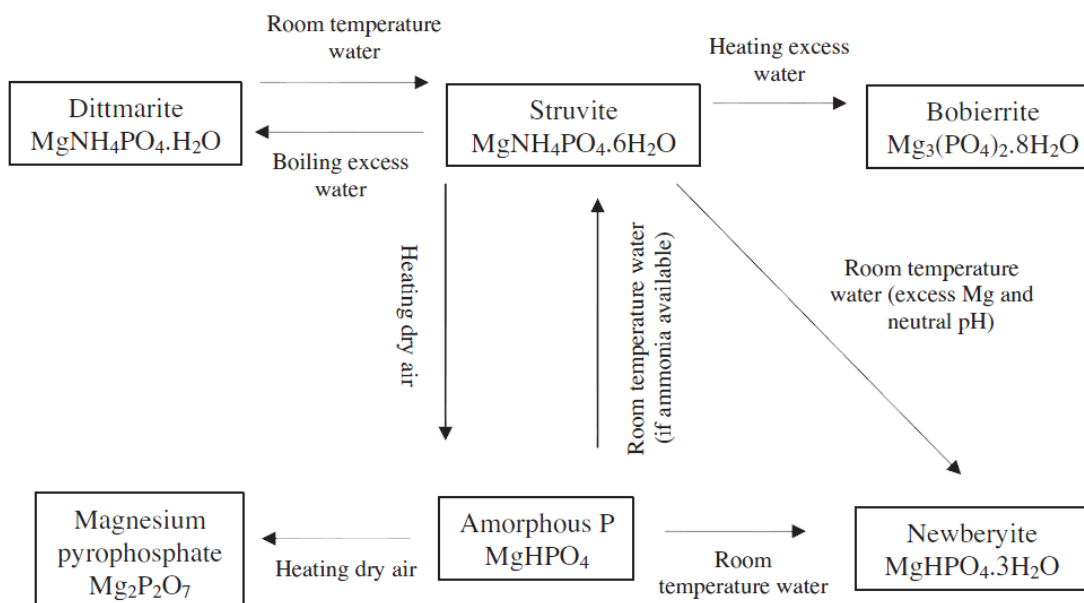


(e) Irregular crystal (Kim et al., 2004)



(f) Cube like irregular crystal (Zhang et al., 2009)

รูปที่ 2.3 ลักษณะผลึกสตรูไวท์แบบต่างๆ (Rahman และคณะ, 2014)



รูปที่ 2.4 กลไกในการเปลี่ยนรูปฟอร์มที่เป็นไปได้ของผลึกสตรูไวท์ (Bhuiyan และคณะ, 2008)

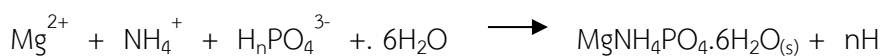
### 2.13 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์ มีดังนี้ (ดวงกมล พุทธิธโนปัจจัย, 2552)

**2.13.1 พีเอช** ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์มีค่าอยู่ระหว่าง 7-10 เมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 7 แมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตสามารถละลายน้ำได้ดีจึงไม่จับตัวกันเป็นผลึก เมื่อค่าพีเอชมากกว่า 10 จะเกิดสารประกอบในรูป  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  หรือ  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  และเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 9-10.5 จะเกิดการตกผลึกร่วมของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Calcium Hydroxyapatite,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ) ดังนั้นในการสร้างตะกอนผลึกสตรูไวท์ จึงต้องควบคุมค่าพีเอชในช่วง 7-10 เพื่อที่จะทำให้เกิดตะกอนผลึกสตรูไวท์อย่างสมบูรณ์

**2.13.2 อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม** การเกิดผลึกสตรูไวท์ตามทฤษฎีนั้นต้องการอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 หรือใกล้เคียง ปริมาณแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมยังขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย เช่น สารอินทรีย์และไอออนต่างๆ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมที่เติมลงไป จึงทำให้ต้องการปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้นเพื่อการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ดังนั้นปริมาณการเติมแมกนีเซียมเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเกิดผลึกสตรูไวท์

### 2.13.3 ค่าคงที่การละลาย แสดงดังสมการต่อไปนี้



จะได้  $K_{sp} = [\text{Mg}^{2+}][\text{NH}_4^+][\text{PO}_4^{3-}]$

กำหนดให้  $Q$  คือ ปฏิกริยาของสารที่สามารถละลายได้

$K_{sp}$  คือ ค่าคงที่สมดุลของการละลาย

$K_a$  คือ ค่าคงที่สมดุลของกรด

$K_d$  คือ ค่าคงที่ของการแตกตัวของแมกนีเซียม

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

$Q = K_{sp}$  (Saturated) หมายถึง อยู่ในภาวะสมดุล เริ่มมีการตกตะกอนเล็กน้อย

$Q < K_{sp}$  (Undersaturated) หมายถึง ไอออนในน้ำไม่รวมตัวกันไม่เกิดการตกผลึก

**2.13.4 ปริมาณไอออนในน้ำ** น้ำเสียที่มีปริมาณไอออนที่อยู่ในน้ำสูงจะมีผลต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์ โดยแคลเซียมไอออนจะรวมตัวกับฟอสเฟตเกิดเป็นผลึกแคลเซียมฟอสเฟต โดยฟอสเฟตจะตกผลึกออกมาในรูปของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ )



**2.13.5 การกวนผสม** ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสมมีผลต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์ โดยการกวนผสมที่มากเกินไปอาจทำให้ผลึกเกิดการแยกตัวออกจากกัน หรือการกวนผสมที่น้อยเกินไปอาจทำให้ผลึกไม่สามารถรวมตัวกันได้

**2.13.6 สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย** ได้แก่ ปริมาณสารแขวนลอย โลหะหนักต่างๆ ซึ่งมีผลต่อการตกตะกอนของผลึกต่างๆ ในน้ำ และปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมลงไป

## 2.14 ประโยชน์ของผลึกสตรูไวท์

1. การนำตะกอนผลึกสตรูไวท์ใช้เป็นปุ๋ยละลายช้า ซึ่งปุ๋ยละลายช้าจะค่อยๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องเป็นเวลานาน จึงแตกต่างจากปุ๋ยธรรมดาทั่วไปที่ละลายน้ำอย่างรวดเร็วและสลายธาตุอาหารออกมาสูงใน 2-3 วันแรก แล้วปริมาณปุ๋ยจะลดลงอย่างรวดเร็วและ

หมดไปในเวลาอันสั้น ปุ๋ยละลายช้าสามารถใส่ปริมาณมากได้ในครั้งเดียว โดยที่ไม่เป็นอันตรายต่อพืช ไม่ทำให้เกิดอาการรากไหม้และใบไหม้ สามารถใส่ชิดบริเวณรากพืชได้ ซึ่งพืชที่เหมาะสม ได้แก่ พืชยืนต้น อายุยาว ไม้พุ่ม พืชดอก ไม้ประดับ นาข้าว

2. ตะกอนผลึกสูตรไวท์ สามารถนำไปผสมกับสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ดี เช่น กรดฟอสฟอริกเพื่อนำไปผลิตเป็นปุ๋ยผสม

3. ตะกอนผลึกสูตรไวท์ สามารถนำไปทดแทนการผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ผลิตจากการใช้สารเคมีสองชนิด คือ กรดฟอสฟอริกและแอมโมเนีย

4. ตะกอนผลึกสูตรไวท์สามารถใช้ทดแทนแม่ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟตในการผสมปุ๋ยในสูตรต่างๆ ได้โดยเฉลี่ยร้อยละ 20-40 ของปริมาณที่ต้องการ

5. ตะกอนผลึกสูตรไวท์ที่ไม่ได้ผ่านการทำให้บริสุทธิ์สามารถนำไปผสมกับถ่านเพื่อใช้เป็นวัสดุทางการเกษตรในการปรับปรุงคุณภาพของดินให้ดีขึ้น

6. แมกนีเซียมที่เป็นส่วนประกอบของผลึกสูตรไวท์ ถือเป็นธาตุอาหารรองที่มีประโยชน์ต่อพืชตระกูลหัวใต้ดินบางชนิดและข้าว

## 2.15 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมแบบจำลองสมดุลทางเคมี Visual MINTEQ Version 3.0 ถูกพัฒนาขึ้นโดย Jon Petter Gustafsson ใช้ในการจำลองชนิดของโลหะ สมดุลการละลาย และการดูดซับ เป็นต้น โดยที่ภาวะสมดุลสามารถคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของสารละลายเจือจางทั้งในห้องปฏิบัติการและสารละลายทั่วไปที่พบตามธรรมชาติ คำนวณความสามารถในการละลายและสมดุลของของแข็ง คำนวณหาการกระจายมวลของของแข็งที่สภาวะแตกต่างกัน และใช้ประเมินการตกตะกอนของของแข็งในสารละลาย ซึ่งสามารถบอกชนิดของธาตุที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้น แบบจำลองสมดุลทางเคมี Visual MINTEQ Version 3.0 จึงถูกนำมาเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินส่วนประกอบทางเคมีและภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสูตรไวท์ เนื่องจากสามารถตอบสนององวัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ได้





รูปที่ 2.5 หน้าหลักโปรแกรม Visual MINTEQ

## 2.16 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### ปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส

Donatello และคณะ (2010) ศึกษาการชะละลายฟอสฟอรัสในเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ระยะเวลาในการชะละลาย ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการชะละลาย อัตราส่วนสารละลายกรดต่อเถ้าสัลดจ์ และองค์ประกอบของเถ้าสัลดจ์ ในการทดลองใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรในการชะละลาย พบว่า ที่เวลาการชะละลาย 30 นาที สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้ประมาณร้อยละ 85 เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 120 นาที จะชะละลายฟอสฟอรัสได้ประมาณร้อยละ 91 และจะชะละลายฟอสฟอรัสได้ประมาณร้อยละ 100 เมื่อเพิ่มเวลาในการชะละลายเป็น 720 นาที โดยเวลาที่เหมาะสมในการชะละลายเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร คือ ที่ 30 นาที แต่ถ้าใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้นระหว่าง 0.18-0.24 โมลต่อลิตร ควรเพิ่มเวลาในการชะละลายเป็น 120 นาที

Franz (2008) ทำการศึกษาการชะละลายฟอสฟอรัสจากเถ้าสัลดจ์ในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า เถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียมีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 4-9 โดยมวล ขึ้นแรก ทำการชะละลายฟอสฟอรัสด้วยกรดซัลฟิวริกที่พีเอชต่ำกว่า 2 และอัตราส่วนสารละลายกรด

ต่อเก้าสลัดจ์เท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อกรัม สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้มากกว่าร้อยละ 90 ชั้นที่สอง กำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน และเติมแคลเซียมออกไซด์เพื่อตกตะกอนโลหะซัลไฟด์ ฟอสฟอรัสจะตกตะกอนในรูปของแคลเซียมฟอสเฟต และสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยในทางการเกษตรได้

**Guney และคณะ (2008)** ศึกษาวิธีการนำกลับฟอสฟอรัสจากสลัดจ์ที่ย่อยแล้วในรูปผลึก แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยสลัดจ์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทดลองมี 4 ประเภท คือ สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย สลัดจ์ที่ผ่านการเจือจาง สลัดจ์ที่ผ่านการปั่นเหวี่ยง และสลัดจ์ที่ผ่านการเผา ทำการทดลอง 4 ขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่ง การชะละลายฟอสฟอรัสด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ขั้นที่สอง การกำจัดโลหะไอออนออกจากสารละลายโดยใช้แผ่นเมมเบรน แลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก ชนิด Nafion 117 (DuPont) ขั้นที่สาม การนำฟอสฟอรัสกลับคืนในรูปผลึกสตรูโวท์หรือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์และแมกนีเซียมคลอไรด์เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมและแมกนีเซียมให้มีค่าเหมาะสมต่อการเกิดผลึก และขั้นที่สี่ การตกตะกอน แยกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตโดยกรองผ่านกระดาษกรอง และทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง พบว่า การใช้สลัดจ์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 10 ในการชะละลายฟอสฟอรัส จะได้ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าการใช้สลัดจ์แบบอื่นๆ และอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสที่เหมาะสมต่อการตกผลึกเท่ากับ 1.5:1.2:1 ที่พีเอชเท่ากับ 8.5

**Biswas และคณะ (2009)** ศึกษาวิธีการชะละลายฟอสฟอรัสจากเก้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการเผาที่มีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบในปริมาณสูง ประมาณร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ทำการเปรียบเทียบการใช้สารละลายกรดและเบสในการชะละลายฟอสฟอรัสที่อยู่ในเก้าสลัดจ์ให้อยู่ในรูปไอออนในสารละลาย พบว่า การชะละลายฟอสฟอรัสในเก้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการเผาด้วยสารละลายกรดสามารถชะละลายได้ดีกว่าสารละลายเบส โดยสารละลายกรดสามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้เกือบร้อยละ 100 ส่วนสารละลายเบสสามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้น้อยกว่าร้อยละ 40 การชะละลายฟอสฟอรัสจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาการชะละลายฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมง และสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส คือ ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.05 โมลต่อลิตร หรือ

ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสัลดจ์ 150 มิลลิลิตรต่อกรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง

**Xu และคณะ (2012)** ศึกษาประสิทธิภาพการนำฟอสฟอรัสกลับคืนจากสัลดจ์ระบบบำบัดน้ำเสียในรูปผลึกสตรูไวท์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการชะละลายฟอสฟอรัสของสารละลายกรดและสารละลายเบส พบว่า การชะละลายเถ้าสัลดจ์ระบบบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสัลดจ์ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม และระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้มากกว่าร้อยละ 95 ของฟอสฟอรัสทั้งหมด โดยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกสามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้เกือบร้อยละ 100 ส่วนสารละลายเบสหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้น้อยกว่าร้อยละ 30 หลังจากการชะละลายจะทำการกำจัดโลหะหนักที่ถูกชะปนออกมา โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก 0.04 กรัมต่อมิลลิลิตร เพื่อให้สารละลายที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นก่อนที่จะนำไปทำการตกผลึกในรูปผลึกสตรูไวท์ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.6:1.6:1 และพีเอชเท่ากับ 10 สามารถนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้ร้อยละ 97.2

**Kaikake และคณะ (2009)** ศึกษาการนำฟอสฟอรัสกลับคืนจากเถ้ามูลไก่ ซึ่งพบว่า ในเถ้าจากการเผามูลไก่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 8 และทำการชะละลายฟอสฟอรัสด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสัลดจ์ 10 มิลลิลิตรต่อกรัม และระยะเวลาในการชะละลาย 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายฟอสฟอรัสพีเอช 2.8 หลังจากนั้นปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เพื่อตกตะกอนรอบแรกที่พีเอชเท่ากับ 3 พบว่า มีฟอสฟอรัสตกตะกอนร้อยละ 7 ซึ่งส่วนใหญ่ตกตะกอนร่วมกับเหล็ก ได้ตะกอนผลึกสีน้ำตาล และเมื่อปรับพีเอชให้เท่ากับ 4 พบฟอสฟอรัสตกตะกอนปริมาณมากร้อยละ 84 ส่วนใหญ่ตกตะกอนในรูป  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  หลังจากนั้นปรับพีเอชจนถึง 8 จะพบฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ในสารละลายตกตะกอนร้อยละ 8 โดยสังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) จะตกผลึกร่วมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ )

**Kalmykova และ Fedje (2013)** ศึกษาการนำฟอสฟอรัสกลับคืนจากเถ้าขยะเทศบาล โดยทำการเปรียบเทียบวิธีการชะละลายฟอสฟอรัสจาก 2 วิธีการทดลอง วิธีแรกจะใช้กรดไฮโดรคลอริก

ในการชะละลาย แล้วทำการตกผลึกฟอสฟอรัสโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 3 เพื่อเป็นการกำจัดสารประกอบของเหล็ก หลังจากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 4 เพื่อให้เกิดผลึกของฟอสฟอรัส พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการชะละลาย ฟอสฟอรัส คือ ใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์จ 5 มิลลิลิตรต่อกรัม สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้ถึงร้อยละ 93 วิธีที่สองจะใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ในการชะละลายที่พีเอชเท่ากับ 4 เพื่อเป็นการชะละลายแคลเซียมออกจากเถ้าขยะ หลังจากนั้นนำเถ้าขยะมาชะละลายต่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 12 จะได้น้ำชะละลายฟอสฟอรัส และมีแคลเซียมร้อยละ 9 ที่สามารถถูกชะละลายออกมาได้ในตอนแรก โดยแคลเซียมส่วนใหญ่ยังคงเหลือค้างอยู่ในเถ้าขยะ ทำให้ชะละลายฟอสฟอรัสได้เพียงร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 67 ดังนั้นวิธีการชะละลายฟอสฟอรัสวิธีแรกสามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้มากกว่า และสามารถนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้ถึงร้อยละ 72 ของฟอสฟอรัสที่ถูกชะละลายทั้งหมด

### ปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์

**Le Corre และคณะ (2007)** ศึกษาการรวมตัวกันของผลึกสตรูไวท์โดยใช้สารช่วยในการรวมตัวก่อให้เกิดผลึกที่ต่างกัน คือ hydrolyzing metals salts ( $Al^{3+}$  และ  $Fe^{3+}$ ) สารประกอบแคลเซียมและพอลิเมอร์ประจุบวกหรือ Polydiallyldimethylammoniumchloride (polyDADMAC) พบว่า ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ คือ ช่วงพีเอช 8.5-10.5 และการใช้ polyDADMAC จะช่วยให้เกิดการรวมตัวของผลึกสตรูไวท์ที่ดีที่สุด เมื่อพีเอชเท่ากับ 9 การใช้ polyDADMAC จะทำให้ขนาดอนุภาค( $d_{0.5}$ ) เพิ่มขึ้นจาก 79.7 เป็น 850.4 ไมโครเมตร

**Ryu และคณะ (2008)** ศึกษาการประยุกต์ใช้การตกผลึกสตรูไวท์ในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนในน้ำทิ้งของโรงงานผลิตวัสดุสารกึ่งตัวนำ ทำการทดลองแบบทีละเทในน้ำเสียสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าพีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตที่อยู่ในน้ำทิ้ง โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 9.2 และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 10.0 ซึ่งสอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดออร์โธฟอสเฟตจะเกิดขึ้นที่พีเอชสูงกว่า การกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจน โดยปริมาณแมกนีเซียมและออร์โธฟอสเฟตในน้ำที่มากเกินไปจะ

ส่งผลดีต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์ แต่ในการตกผลึกสตรูไวท์บางกรณี เช่น ที่ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 70 และมีค่าอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมไนโตรเจนต่อออร์โธฟอสเฟตมากกว่า 1.7:1.0:1.69 จะพบว่าปริมาณของออร์โธฟอสเฟตมีผลต่อการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนมากกว่าปริมาณแมกนีเซียมไอออน และถ้าในน้ำมีปริมาณความเข้มข้นของฟลูออไรด์ที่สูงกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ยากต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตที่จะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากฟลูออไรด์จะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมเกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมฟลูออไรด์ ดังนั้นก่อนการตกผลึกสตรูไวท์จึงควรมีการกำจัดฟลูออไรด์ออกก่อน แต่ถ้าไม่สามารถทำได้จำเป็นต้องมีการเติมแมกนีเซียมที่มากเกินไป

**Song และคณะ (2007)** ศึกษาการกำจัดและการนำกลับคืนของธาตุอาหารในรูปผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการแบบที่ละเทที่อุณหภูมิห้อง 22-25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อแมกนีเซียมเท่ากับ 8:1:1 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตอยู่ในช่วง 9.5-10.5 ส่วนในช่วงพีเอชมากกว่า 10 อนุภาคจะแขวนลอยไม่เกิดการตกตะกอน ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัสจาก 1:1 เป็น 2:1 ถ้าอัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมมากกว่า 0.5:1 แคลเซียมไอออนจะไปยับยั้งการเกิดผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตและจะส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของผลึกอย่างมีนัยสำคัญ และประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสจะสูงถึงร้อยละ 97 เมื่อทำการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 9.5 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.4:1

**Warmadewanthi และ Liu (2009)** ศึกษาการนำฟอสฟอรัสและแอมโมเนียมกลับคืนในรูปผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งของโรงงานผลิตสารกึ่งตัวนำ โดยศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและค่าพีเอช พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์เท่ากับ 9 เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 47.4 และสามารถกำจัดฟอสฟอรัสเพิ่มได้ถึงร้อยละ 92.1 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตให้เท่ากับ 3:1 สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตจาก 1:1 เป็น 2:1 และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อ

อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตมากกว่า 2.5:1 เนื่องจากสตรูไวท์จะถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นโบเปียร์ไรท์ (Bobierite) และภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตสูงถึงร้อยละ 92.5 คือ พีเอชเท่ากับ 9 และอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2.5:15:1

**Liu และคณะ (2011)** ศึกษาการนำธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรกลับมาใช้ในรูปของผลึกสตรูไวท์ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ พบว่า พีเอชเท่ากับ 8.55 อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 0.8-1:1 อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการตกผลึกของสตรูไวท์คือ 0.73 ลิตรต่อลิตรต่อนาที่ สามารถนำกลับฟอสเฟตและแอมโมเนียมไนโตรเจนในรูปของผลึกสตรูไวท์ได้ประมาณร้อยละ 65 และ 67 ตามลำดับ ซึ่งผลึกสตรูไวท์ที่ได้จะมีการตกตะกอนร่วมของโลหะไอออนต่างๆ รวมทั้งโลหะหนัก เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม สังกะสี และทองแดง ทำให้น้ำทิ้งหลังการตกผลึกสตรูไวท์มีค่าของโลหะต่างๆ รวมทั้งโลหะหนักลดลงและต่ำกว่าค่ามาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตและอัตราการเติมอากาศให้สูงขึ้นกว่าค่าดังกล่าวข้างต้น จะมีผลทำให้เกิดผลึกสตรูไวท์เพิ่มมากขึ้น

### การใช้แบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ ในการคำนวณสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์

**Ali และคณะ (2003)** ศึกษาแบบจำลองสมดุลทางเคมีของน้ำด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกร โดยใช้แบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ ในการคำนวณหาผลึกและองค์ประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในช่วงพีเอช 6-14 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของแมกนีเซียม 348 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแอมโมเนียม 261 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของฟอสเฟต 1790 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า จะเกิดผลึกสตรูไวท์ในช่วงพีเอช 7.75-9.27

**Lee และคณะ (2003)** ศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสฟอรัสโดยการตกผลึกเมื่อมีการเติมแมกนีเซียมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแอมโมเนียมและฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบ โดยใช้แบบจำลองสมดุลทางเคมีโปรแกรม MINTEQ ในการคำนวณ ข้อมูลที่ป้อนเข้า คือ ค่าความเข้มข้น

เริ่มต้นขององค์ประกอบต่างๆ ในน้ำเสีย ได้แก่ ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน แคลเซียมไอออน โพแทสเซียมไอออน โซเดียมไอออน แอมโมเนียมไอออน สารประกอบออร์โธฟอสเฟต และคลอไรด์ ไอออน จากการใช้โปรแกรมในการคำนวณพบว่า จะเกิดผลึกสตรูโวท์ในช่วงพีเอช 7.5-10 และจะเกิดผลึกแมกนีเซียมฟอสเฟตในช่วงพีเอช 8.5-11 และจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่า การกำจัดฟอสฟอรัสในรูปผลึกสตรูโวท์และผลึกแมกนีเซียมฟอสเฟตจะเกิดได้ดีที่สุดในช่วงพีเอช 9.6 ซึ่งสอดคล้องกับที่คำนวณได้จากโปรแกรม

**Celen และคณะ (2007)** ศึกษาแบบจำลองสมดุลทางเคมีด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูโวท์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร เพื่อลดความเข้มข้นของออร์โธฟอสเฟต โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการและผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน แคลเซียมไอออน โพแทสเซียมไอออน แอมโมเนียมไอออน สารประกอบออร์โธฟอสเฟต ค่าความกระด้างของน้ำ และค่าพีเอชของสารละลาย พบว่า ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการให้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยโปรแกรม คือ ที่พีเอชเท่ากับ 8.5 และอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 สามารถลดความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียฟาร์มสุกรได้ร้อยละ 94 ในขณะที่ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะสามารถลดความเข้มข้นของฟอสเฟตได้ร้อยละ 93.5 และจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.5:1 จะสามารถลดความเข้มข้นของฟอสเฟตได้สูงถึงร้อยละ 97

**Crutchik และคณะ (2013)** ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตโดยการตกผลึกในรูปสตรูโวท์ ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสีย 4 ตัวอย่าง ที่มีอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตที่แตกต่างกัน คือ 1.9:1.2:1.0 1.1:1.4:1.0 7.6:4.2:1.0 และอีกตัวอย่างมีปริมาณแคลเซียมที่มาก โดยให้อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแคลเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 11.8:2.3:1.0 ทำการทดลองในช่วงพีเอช 7.7-9.0 เปรียบเทียบผลการตกผลึกที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการและผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ โดยกำหนดค่าคงที่สมดุลการละลายของสตรูโวท์ ( $K_{sp}$ ) เท่ากับ  $10^{-13.27}$  ข้อมูลที่ป้อนเข้าโปรแกรม คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของแมกนีเซียมไอออน แคลเซียมไอออน โซเดียมไอออน คลอไรด์ไอออน แอมโมเนียมไอออน และสารประกอบออร์โธฟอสเฟต พบว่า ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการให้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual

MINTEQ คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1.4:1.0 จะสามารถกำจัดฟอสเฟตได้มากที่สุดร้อยละ 88 และจากโปรแกรมคำนวณได้ร้อยละ 89.3

จากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า สลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่จะมีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบโดยประมาณร้อยละ 8 โดยมวล จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการนำฟอสฟอรัสกลับคืนในรูปต่างๆ โดยวิธีที่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม คือการตกผลึกในรูปสตรูไวท์ เนื่องจากสามารถใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าทางการเกษตรต่อไปได้ ซึ่งสลัดจ์ที่นิยมนำมาศึกษา คือ สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการเผาแล้ว โดยทำการชะละลายฟอสฟอรัสออกจากเถ้าสลัดจ์ด้วยสารละลายกรด เนื่องจากสารละลายกรดจะเกิดการชะละลายได้เกือบร้อยละ 100 ต่างกับสารละลายเบสที่เกิดการชะละลายได้ต่ำกว่ามาก แล้วนำน้ำชะละลายฟอสฟอรัสที่ได้มาทำการตกผลึกสตรูไวท์ต่อไป

น้ำเสียฟาร์มสุกรมีศักยภาพที่จะนำมาตกผลึกสตรูไวท์ เนื่องจากมีแอมโมเนียมและฟอสเฟตปริมาณสูง ในการตกผลึกดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติถ้ามีอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมแอมโมเนียมและฟอสเฟตในปริมาณที่เหมาะสม โดยปริมาณการเติมแมกนีเซียมเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเกิดผลึกสตรูไวท์ เนื่องจากสารอินทรีย์และไอออนต่างๆ ในน้ำเสียจะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมทำให้ต้องการปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้นเพื่อการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ พีเอชที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ คือ ช่วงพีเอชระหว่าง 8-10 และที่ผ่านมาพบว่าจะไม่มีงานวิจัยที่ทำการศึกษการตกผลึกสตรูไวท์จากสลัดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำสลัดจ์ที่รีดน้ำแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรและระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมาตกผลึกสตรูไวท์ โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัสแปรผันระยะเวลาในการชะละลาย ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายกรด และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสลัดจ์ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ในช่วงค่าพีเอช 8-10 แปรผันความเข้มข้นของแมกนีเซียมซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญและส่งผลต่อองค์ประกอบและปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้น มีการนำโปรแกรมแบบจำลองสมดุลทางเคมี Visual MINTEQ Version 3.0 มาใช้ในการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีและผลึกที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ ซึ่งนับว่าเป็นแนวทางที่มีความสำคัญเพื่อใช้ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องให้เหมาะสมต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์และได้



ปริมาณผลึกสตรูไวท์มากที่สุด เพื่อเป็นการช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมีต่างๆ  
ได้อีกด้วย



## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาขั้นตอนการนำฟอสฟอรัสในสลัดจ์กลับคืนโดยการตกผลึกในรูป สตรูไวท์ สลัดจ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นสลัดจ์ที่ผ่านการรีดน้ำแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรและ ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ทำการเปรียบเทียบการชะละลายฟอสฟอรัสด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.0001-1 โมลต่อลิตร หาค่าพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อ แอมโมเนียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับ ผลที่ได้จากการคำนวณสมดุลเคมีของน้ำด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 โดยทำการ ทดลองที่อุณหภูมิตั้ง 25 องศาเซลเซียส ณ ห้องปฏิบัติการอาคารสี่ภาควิชา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ตู้อบความร้อน (Air Oven)
2. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
3. เตาเผา (Incinerator)
4. โถดูดความชื้น (Desiccator)
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)
6. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask)
7. ปีกเกอร์ (Beaker)
8. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
9. กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร
10. เครื่องกวนผสม (Magnetic Stirrer)
11. หลอดทดลอง
12. เครื่องบด (Ball Mill)

13. เครื่องวิเคราะห์โลหะ ICP-AES (Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy : ICP-AES)

14. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

16. เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบ XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometer : XRF)

17. เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatography)

### 3.2.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สลัดจ์ที่รีดน้ำแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร : ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (UASB) ของประชาฟาร์ม จังหวัดนครปฐม

2. สลัดจ์ที่รีดน้ำแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน : ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (AS) ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง กรุงเทพมหานคร

3. แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ )

4. แอมโมเนียมคลอไรด์ ( $NH_4Cl$ )

5. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ )

6. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ( $HCl$ )

7. สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )

8. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (Cation Exchange Resin)

9. สลัดจ์ที่รีดน้ำแล้วจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรและระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

10. น้ำกลั่น

### 3.3 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<p><b>ตัวแปรอิสระ</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. พีเอช</li> <li>2. ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก</li> <li>3. ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก</li> <li>4. อัตราส่วนของกรดต่อเกลือสังกะสี</li> <li>5. เวลาในการชะละลายฟอสฟอรัส</li> <li>6. อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต</li> </ol>	<p>8-10</p> <p>0.0001-1 โมลต่อลิตร</p> <p>0.0001-1 โมลต่อลิตร</p> <p>25-200 มิลลิกรัมต่อกรัม</p> <p>1-4 ชั่วโมง</p> <p>1:1:1 1.6:1:1 และ 2:1:1</p>
<p><b>ตัวแปรคงที่</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ปริมาณสังกะสี</li> <li>2. ความเร็วที่ใช้ในการปั่นกวนขณะทำการชะละลายฟอสฟอรัส</li> <li>3. ความเร็วที่ใช้ในการปั่นกวนขณะทำการตกผลึกสตรูไวท์ <ul style="list-style-type: none"> <li>- กวนเร็ว</li> <li>- กวนช้า</li> </ul> </li> <li>4. เวลาในการตกตะกอน</li> </ol>	<p>500 มิลลิกรัม</p> <p>120 รอบต่อนาที</p> <p>240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที</p> <p>120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที</p> <p>24 ชั่วโมง</p>
<p><b>ตัวแปรตาม</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ความสามารถในการชะละลายฟอสฟอรัสของกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริก</li> <li>2. ปริมาณผลึกสตรูไวท์</li> <li>3. ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบผลึกสตรูไวท์</li> </ol>	<p>ประสิทธิภาพในการชะละลายฟอสฟอรัส</p>

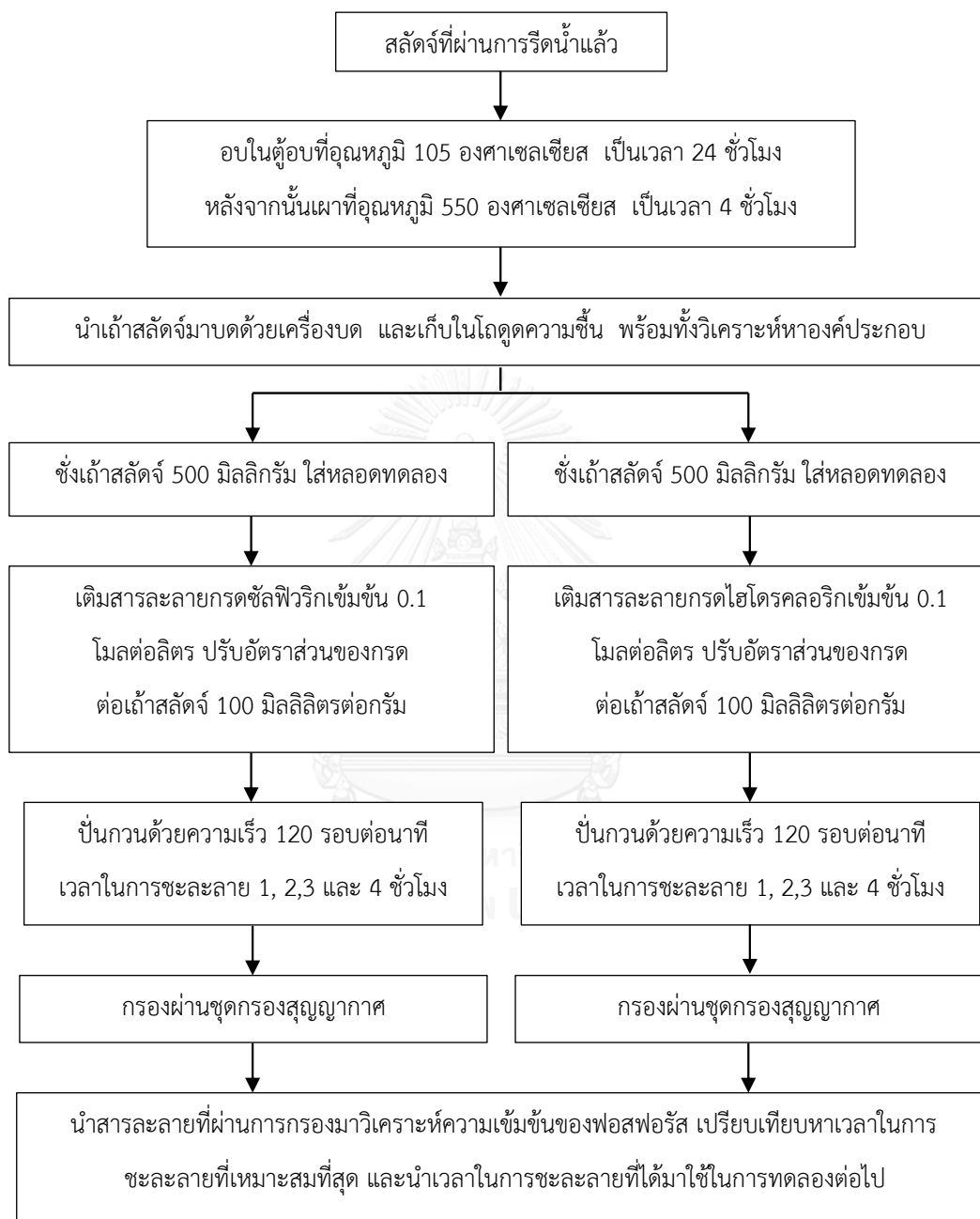
### 3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส

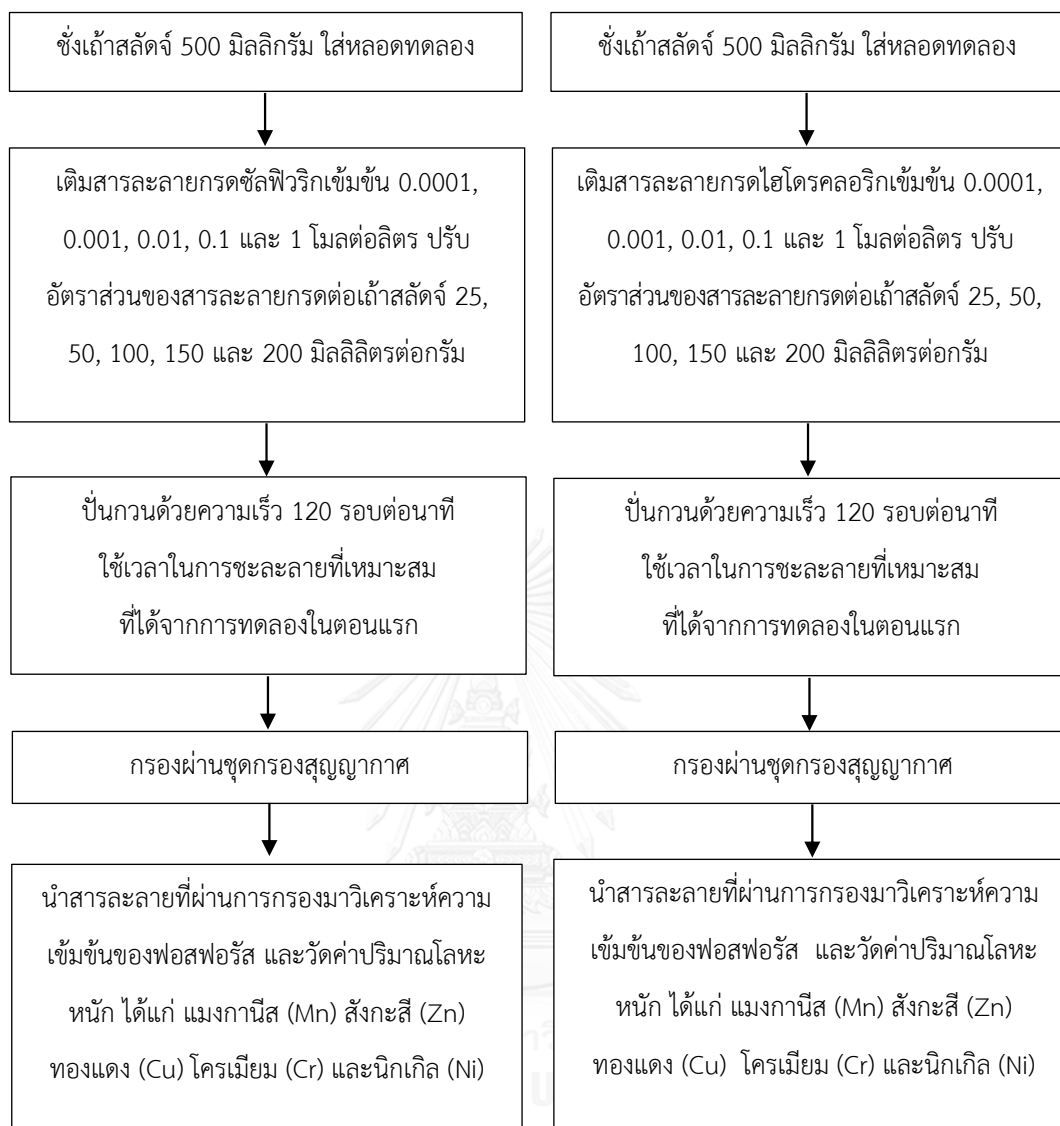
1. นำสลัดจ์ที่ผ่านการรีดน้ำแล้วอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. นำเถ้าสลัดจ์ที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด และเก็บในโถดูดความชื้น พร้อมทั้งนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่อง XRF
3. ชั่งเถ้าสลัดจ์จำนวน 500 มิลลิกรัม ใส่ในหลอดทดลองจำนวน 2 หลอด
4. เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ลงในหลอดทดลอง หลอดที่ 1 และเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ลงในหลอดทดลอง หลอดที่ 2 เพื่อชะละลายฟอสฟอรัสในเถ้าสลัดจ์ และปรับให้อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสลัดจ์ 100 มิลลิลิตรต่อกรัม ปั่นกวนด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการชะละลาย 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง
5. กรองผ่านชุดกรองสุญญากาศ และนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส เปรียบเทียบหาเวลาในการชะละลายที่เหมาะสมที่สุด
6. ชั่งเถ้าสลัดจ์จำนวน 500 มิลลิกรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 และ 1 โมลต่อลิตร เพื่อชะละลายฟอสฟอรัส โดยปรับให้อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสลัดจ์มีค่า 25, 50, 100, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อกรัม ปั่นกวนด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที และใช้ระยะเวลาในการชะละลายที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 5
7. กรองผ่านชุดกรองสุญญากาศ นำสารละลายที่ผ่านการกรองมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส และวัดค่าปริมาณโลหะหนักในสารละลาย ได้แก่ แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) และนิกเกิล (Ni)
8. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
9. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 6-8 แต่เปลี่ยนจากสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริกแทน

ขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัสจากสลัดจ์แสดงดังรูป

ที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส



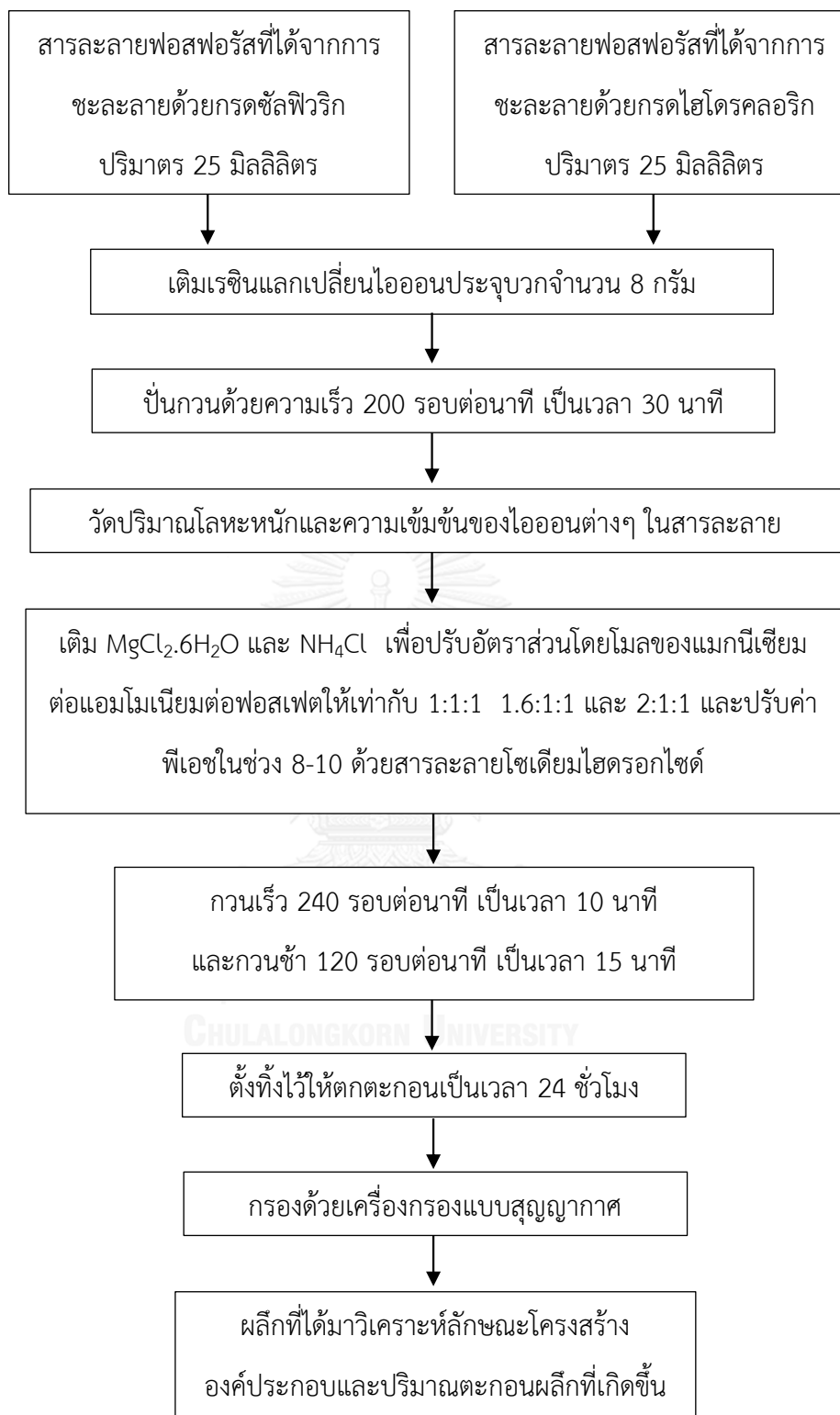
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส (ต่อ)

### 3.4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์

1. นำสารละลายฟอสฟอรัสที่ได้จากการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกที่สภาวะเหมาะสมอย่างละ 25 มิลลิลิตร เติมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกจำนวน 8 กรัม
2. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และกรองเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกออก
3. วัดปริมาณโลหะหนักในสารละลาย ได้แก่ แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) และนิกเกิล (Ni) และวัดค่าความเข้มข้นต่างๆ ของไอออนในสารละลาย ได้แก่ ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และแคลเซียม
4. เติม  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  และ  $NH_4Cl$  ลงในสารละลาย ปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตให้เท่ากับ 1:1:1 1.6:1:1 และ 2:1:1 และปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 8.5, 9.0, 9.5 และ 10.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
5. ผสมให้เข้ากัน โดยกวนเร็ว 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และกวนช้า 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. กรองผลึกออกจากสารละลายด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ผลึกที่กรองได้นำไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนัก
7. ที่สภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด นำผลึกที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างองค์ประกอบและปริมาณตะกอนผลึกที่เกิดขึ้น ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) และเครื่องชั่ง ตามลำดับ
8. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์แสดงดังรูปที่ 3.2





รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูว์เวท

### 3.4.3 ศึกษาและนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณสมดุลทางเคมีของน้ำมาใช้ ในการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีและผลึกต่างๆ ที่เกิดขึ้น

1. นำสารละลายที่ต้องการจะตกผลึกไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นต่างๆ ของไอออนในสารละลายนั้น ได้แก่ ความเข้มข้นของไนโตรเจน ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ความเข้มข้นของแมกนีเซียม ความเข้มข้นของโลหะไอออนต่างๆ เช่น แคลเซียม แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล
2. ป้อนค่าอุณหภูมิ พีเอช และความเข้มข้นของไอออนต่างๆ ในสารละลายลงในแบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 โปรแกรมจะคำนวณสมดุลทางเคมีของน้ำ ทำให้ทราบผลว่าจะเกิดผลึกอะไรและความเข้มข้นเท่าใด
3. เปรียบเทียบชนิดและปริมาณของผลึกในภาวะต่างๆ ที่ได้จากการทดลองกับที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

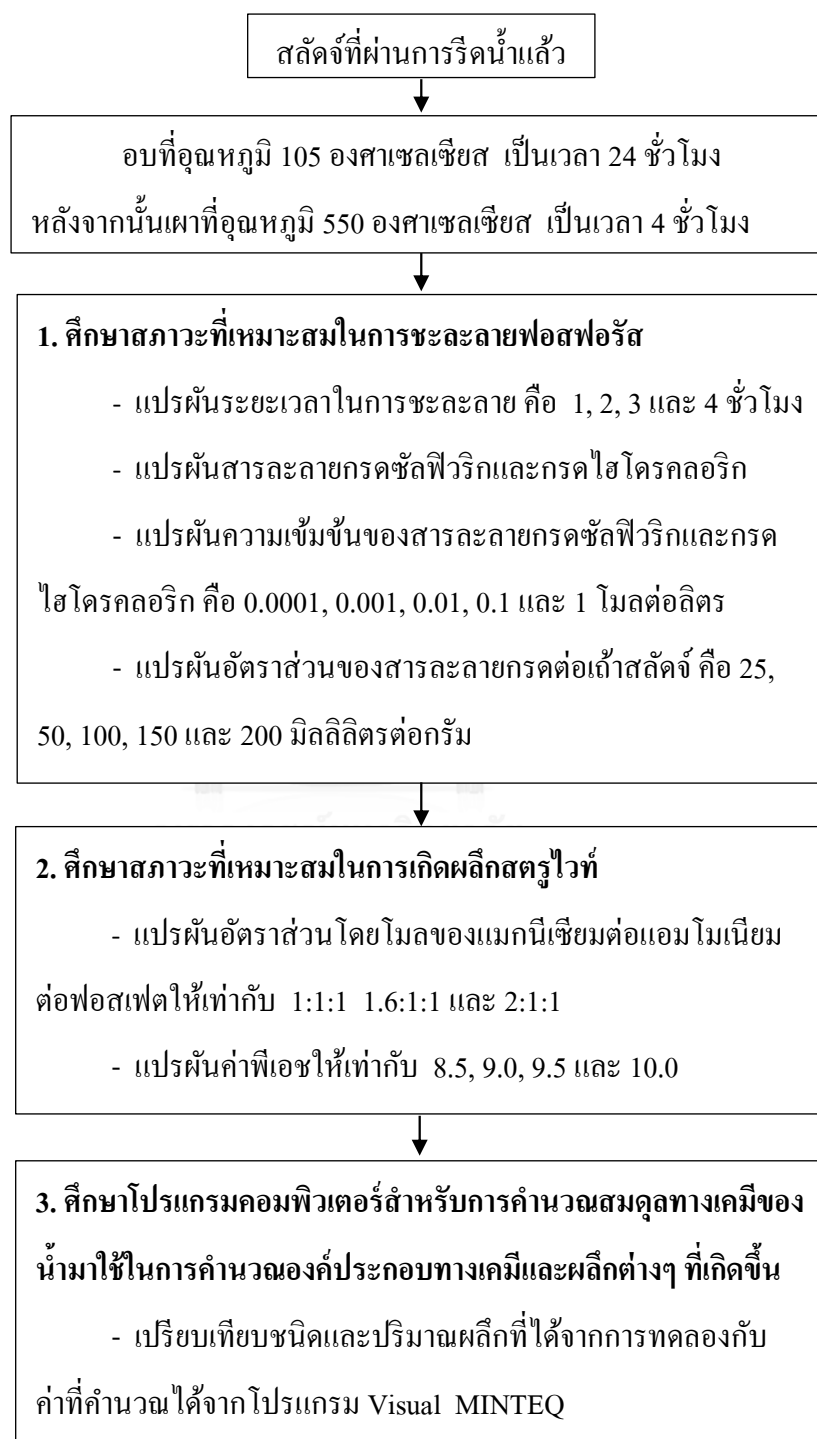
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Visual MINTEQ ที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Visual MINTEQ

### 3.5 สรุปแผนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาขั้นตอนการนำฟอสฟอรัสในสลัดจ์กลับคืนโดยการตกผลึกในรูปสตรูไวท์ สามารถสรุปแผนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สรุปแผนการดำเนินงานวิจัย

### 3.6 วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของงานวิจัยนี้ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ความเข้มข้นของโลหะไอออนต่างๆ เช่น แคลเซียม แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล โดยวิธีมาตรฐานในการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีมาตรฐานในการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือ
ค่าพีเอช	เครื่องวัดพีเอช
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก ICP
ปริมาณโลหะ	เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก ICP
ปริมาณคลอไรด์	เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (IC)
ปริมาณผลึก	เครื่องชั่งน้ำหนัก
ลักษณะโครงสร้างและขนาดของผลึก	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการนำฟอสฟอรัสกลับคืนจากสลัดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรและระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการตกผลึกในรูปสตรูไวท์ ผ่านกระบวนการชะละลายฟอสฟอรัสด้วยสารละลายกรดและการตกผลึกทางเคมี เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ รวมทั้งนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual MINTEQ Version 3.0 สำหรับการคำนวณสมดุลทางเคมีของน้ำมาใช้ในการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีและผลึกต่างๆ ที่เกิดขึ้น และทำการตรวจสอบยืนยันกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (UASB) ของประชาฟาร์ม จังหวัดนครปฐม (สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร) และสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทีเวเต็ดสลัดจ์ (AS) ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง กรุงเทพมหานคร (สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน) หลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบ XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometer) แสดงดังตารางที่ 5.1 พบว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ของเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร คือ แคลเซียม และฟอสฟอรัส โดยมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสในรูป  $P_2O_5$  สูงถึงร้อยละ 29.57 (คิดเป็น P ร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก) และองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน คือ ซิลิกอน และฟอสฟอรัส โดยมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสในรูป  $P_2O_5$  ร้อยละ 13.65 (คิดเป็น P ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก) ซึ่งฟอสฟอรัสที่พบในเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรถือว่าปริมาณมากเหมาะที่จะเป็นแหล่งทดแทนในการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่

นอกจากจะพบปริมาณฟอสฟอรัสมากแล้ว ยังพบปริมาณโลหะหนักของสังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) และทองแดง (Cu) ปริมาณมากด้วยเช่นกัน ดังนั้น จึงต้องมีการกำจัดโลหะหนักออกก่อนที่จะตกผลึกสตรูไวท์ เพื่อผลึกสตรูไวท์จะได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณโลหะหนักของสลัดจ์ หลังเผาที่ 550 องศาเซลเซียส

พารามิเตอร์	ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบทางเคมีและปริมาณโลหะหนักของสลัดจ์ หลังเผาที่ 550 องศาเซลเซียส	
	สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร	สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน
CaO	36.990	8.380
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<b>29.570</b>	<b>13.650</b>
SiO <sub>2</sub>	12.510	41.920
SO <sub>3</sub>	4.590	3.930
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.260	9.510
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.360	15.290
MgO	2.350	3.160
K <sub>2</sub> O	1.050	2.630
Na <sub>2</sub> O	0.380	0.390
Mn	0.662	0.115
Zn	0.703	0.413
Cu	0.494	0.157
Cr	0.012	0.018
Ni	0.004	0.012
Pb	0.000	0.024

- \* หมายเหตุ (1) สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบี (UASB) ของประชาฟาร์ม จังหวัดนครปฐม
- (2) สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (AS) ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง กรุงเทพมหานคร

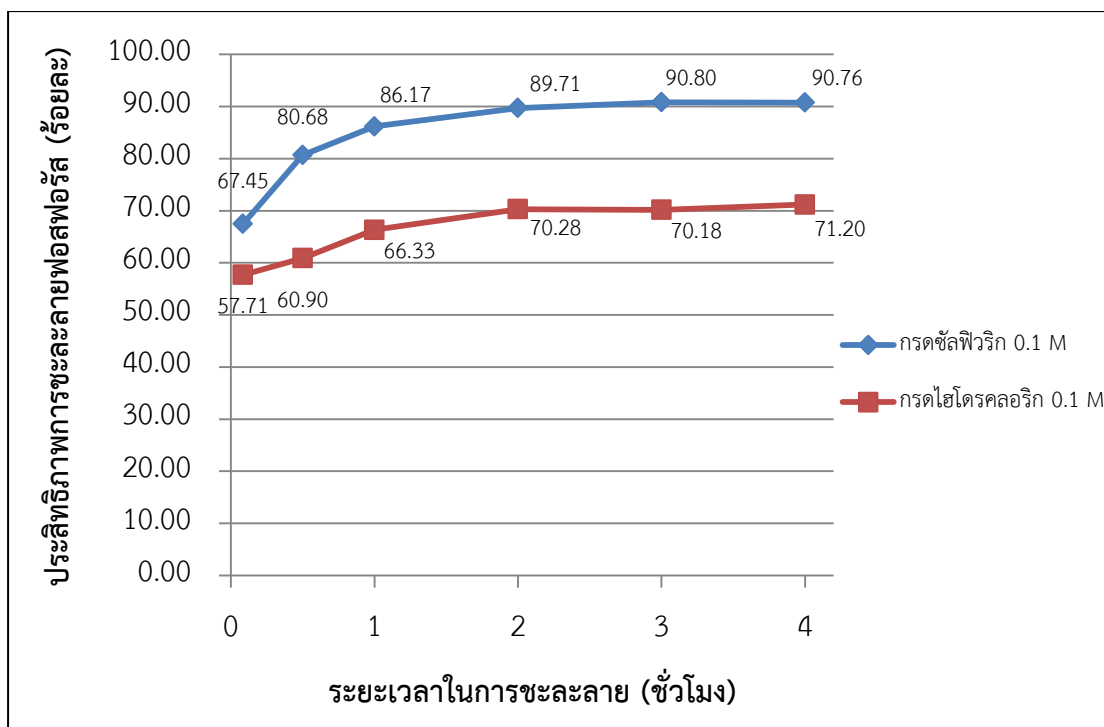
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ค่าฟอสฟอรัสในเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร และฟอสฟอรัสในเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบ XRF

คิดเป็นฟอสฟอรัสเริ่มต้นร้อยละ 100 หรือจะได้ว่าถ้าสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร ประกอบด้วยฟอสฟอรัสร้อยละ 12.9038 หรือคิดเป็นฟอสฟอรัส 129.038 กรัมต่อกิโลกรัม และถ้าสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนประกอบด้วยฟอสฟอรัสร้อยละ 5.9566 หรือคิดเป็นฟอสฟอรัส 59.566 กรัมต่อกิโลกรัม

ถ้าฟอสฟอรัสในถ้าสกัดจุกษะละลายได้ร้อยละ 100 ในสารละลายกรด 25 มิลลิลิตร ฟอสฟอรัสในถ้าสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรจะคิดเป็น 2,580.76 มิลลิกรัมต่อลิตร และฟอสฟอรัสในถ้าสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนจะคิดเป็น 1,191.32 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.1.1 เวลาที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส

ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส พบว่า ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสจากถ้าสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริกเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการชะละลาย แสดงดังรูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก หลังจากนั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งเริ่มคงที่ที่เวลา 2 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสหลังจาก 2 ชั่วโมง มีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นเวลาในการชะละลายฟอสฟอรัสจากถ้าสกัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมคือ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.1 ผลของระยะเวลาในการชะละลายฟอสฟอรัส ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสัลดจ์ เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อกรัม

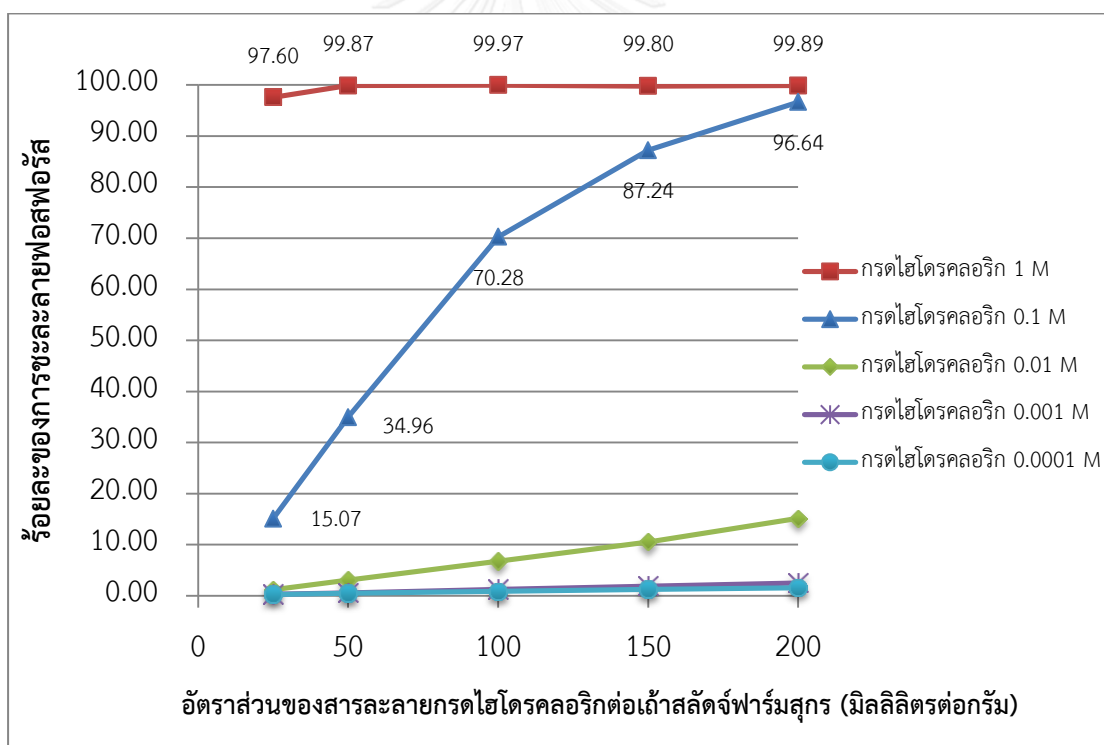
#### 4.1.2 ความเข้มข้นของสารละลายกรด และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสัลดจ์ที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส

ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายกรด และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสัลดจ์ที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส พบว่า ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดและอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสัลดจ์ แสดงดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5

แก้วสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร เมื่อถูกชะละลายฟอสฟอรัสในแก้วสัลดจ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสัลดจ์เท่ากับ 50 100 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าใกล้เคียงร้อยละ 100 ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.07 จนกระทั่งถึงร้อยละ 96.64 เมื่อเพิ่มอัตราส่วน



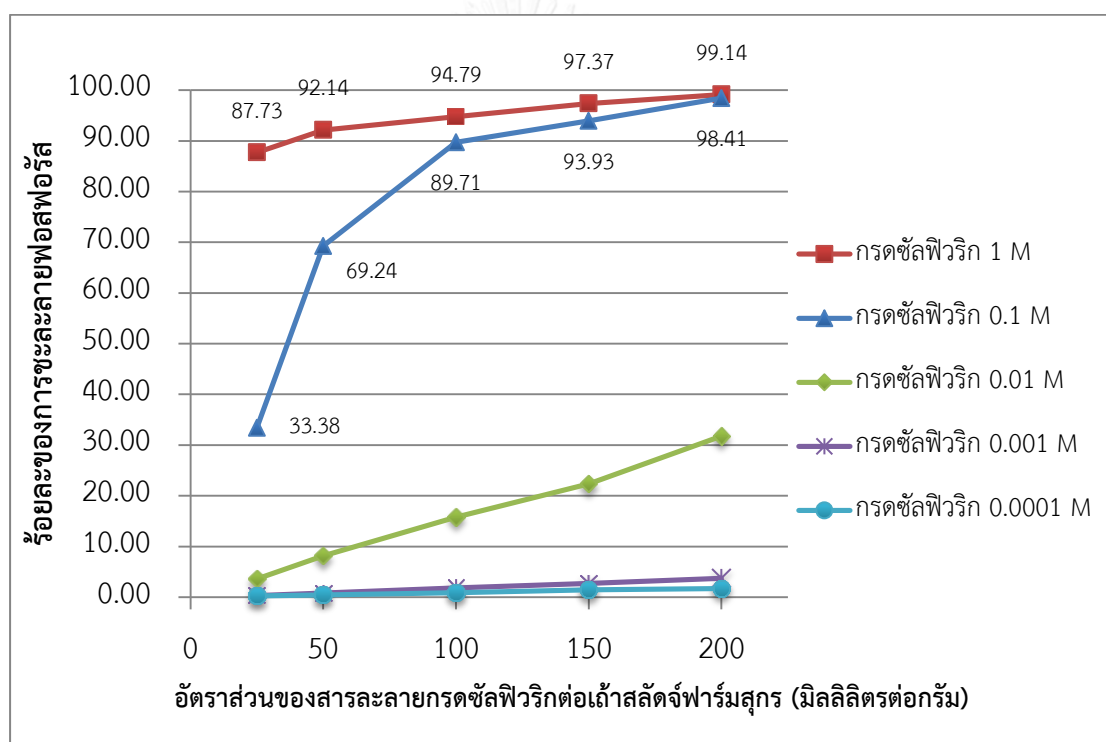
ของสารละลายกรดต่อเกลือสลิคจาก 25 ถึง 200 มิลลิลิตรต่อกรัม แต่ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.0001 0.001 และ 0.01 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสลิคค่าต่างๆ ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 20 ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสลิคมีค่า 50 มิลลิลิตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าสูงถึงร้อยละ 99.87 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสลิคจนถึง 200 มิลลิลิตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัสในเกลือสลิคจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก คือที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสลิค 50 มิลลิลิตรต่อกรัม สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้ 2,577.53 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสลิคฟาร์มสุกร ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

เกลือสลิคจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร เมื่อถูกชะละลายฟอสฟอรัสในเกลือสลิคด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า ที่ความ

เข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 และ 1 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าใกล้เคียงร้อยละ 100 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์จนถึง 200 มิลลิลิตรต่อกรัม แต่ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.0001 0.001 และ 0.01 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ค่าต่างๆ ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 35 ดังนั้น เมื่อชะละลายฟอสฟอรัสในแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์มีค่า 50 มิลลิลิตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าร้อยละ 92.14 สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้ 2,377.93 มิลลิกรัมต่อลิตร

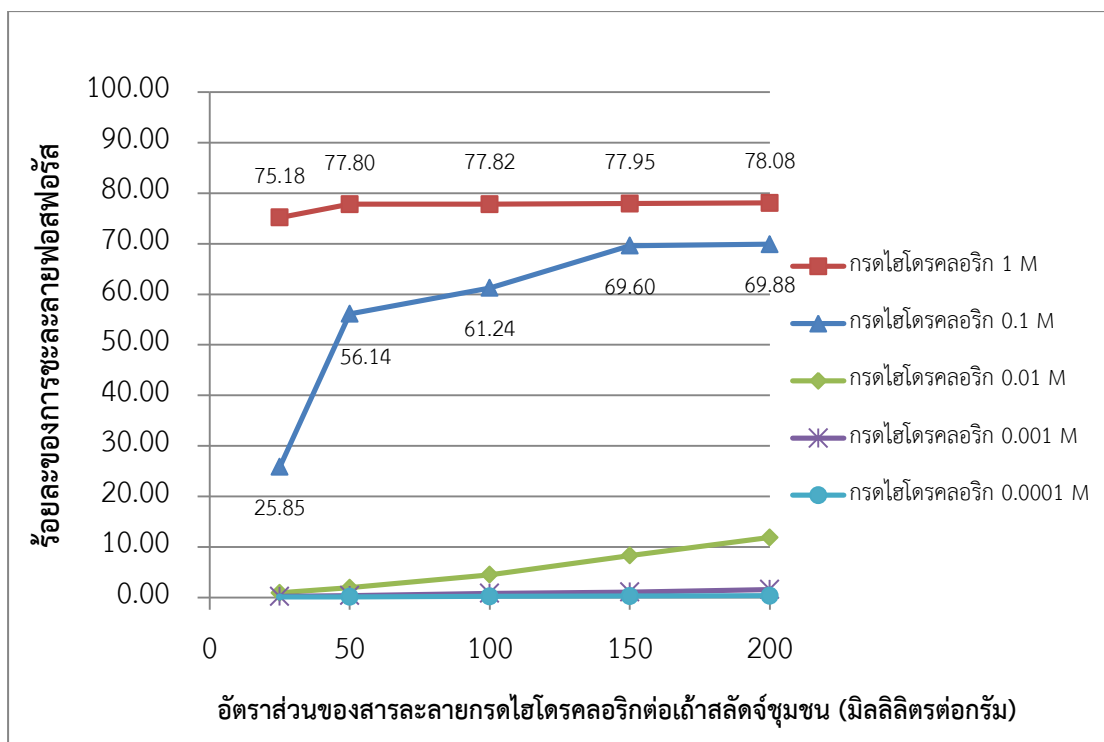


รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริก และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ฟาร์มสุกร ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสในแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรระหว่างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกกับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่างๆ จะพบว่า ที่ความเข้มข้นต่ำๆ ในช่วง 0.0001-0.1 โมลต่อลิตร กรดซัลฟิวริกสามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้มากกว่า แต่ที่ความเข้มข้นสูง 1 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพในการชะละลายฟอสฟอรัสจะใกล้เคียง

กัน และที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือลัตจ์ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม จะพบว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพในการชะละลายฟอสฟอรัสในเกลือลัตจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรได้ดีกว่า สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้ 2,577.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่สารละลายกรดซัลฟิวริกชะละลายฟอสฟอรัสได้ 2,377.93 มิลลิกรัมต่อลิตร

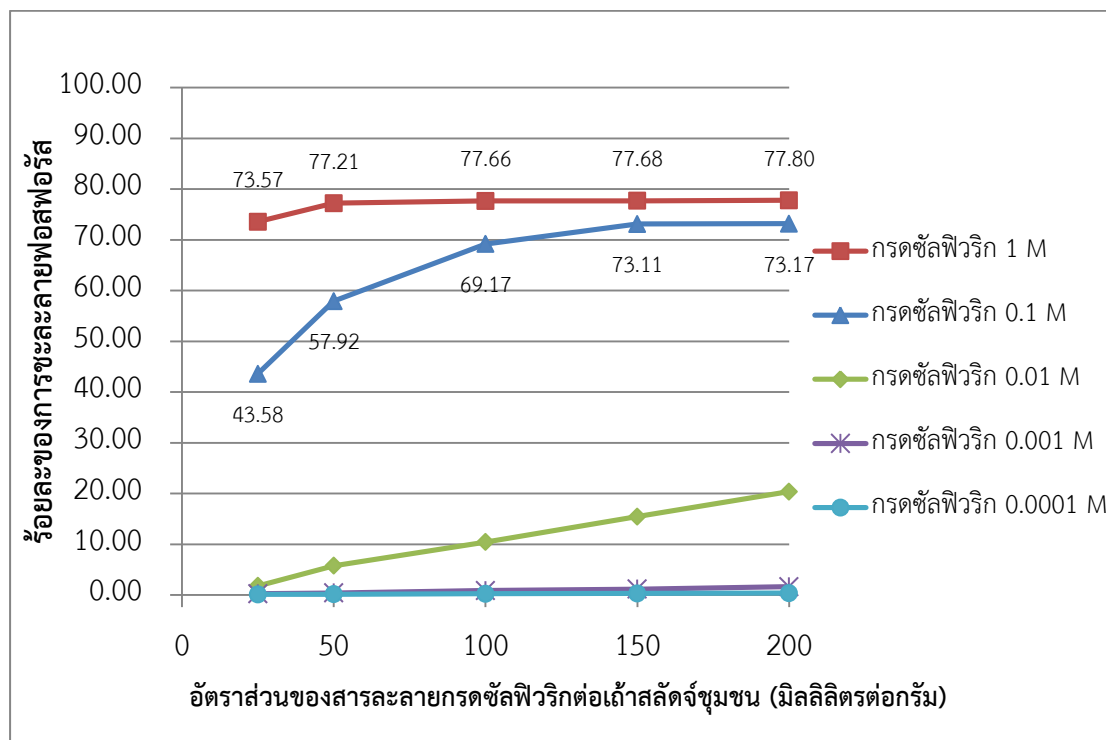
เกลือลัตจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เมื่อถูกชะละลายฟอสฟอรัสในเกลือลัตจ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.0001 0.001 และ 0.01 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือลัตจ์ค่าต่างๆ ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 15 ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 69.88 เมื่ออัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือลัตจ์มีค่า 200 มิลลิลิตรต่อกรัม และที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือลัตจ์เท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าสูงถึงร้อยละ 77.80 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือลัตจ์จนถึง 200 มิลลิลิตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัสในเกลือลัตจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก คือที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือลัตจ์ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้ 926.84 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสัลดิจซุมซัน ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

เกลือสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน เมื่อถูกชะละลายฟอสฟอรัสในเกลือสัลดิจด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.0001 0.001 และ 0.01 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสัลดิจค่าต่างๆ ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 25 ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 73.17 เมื่ออัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสัลดิจมีค่า 200 มิลลิลิตรต่อกรัม และที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสัลดิจเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าสูงถึงร้อยละ 77.21 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเกลือสัลดิจจนถึง 200 มิลลิลิตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการชะละลายฟอสฟอรัสมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัสในเกลือสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก คือที่ความเข้มข้นของสารละลายกรด

ซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์จ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม สามารถ  
 ละลายฟอสฟอรัสได้ 919.81 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริก และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อ  
 แก้วสไลด์จุ่มชน ที่ระยะเวลาในการละลาย 2 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการละลายฟอสฟอรัสในแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสีย  
 ชุมชนระหว่างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกกับสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่างๆ จะพบว่า  
 ที่ความเข้มข้นต่ำๆ ในช่วง 0.0001-0.1 โมลต่อลิตร กรดซัลฟิวริกสามารถละลายฟอสฟอรัสได้  
 มากกว่า แต่ที่ความเข้มข้นสูง 1 โมลต่อลิตร ประสิทธิภาพในการละลายฟอสฟอรัสจะใกล้เคียงกัน  
 และที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์จ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม  
 จะพบว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพในการละลายฟอสฟอรัสในแก้วสไลด์จจาก  
 ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ดีกว่า สามารถละลายฟอสฟอรัสได้ 926.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ขณะที่  
 สารละลายกรดซัลฟิวริกละลายฟอสฟอรัสได้ 919.81 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งประสิทธิภาพในการชะ  
 ละลายฟอสฟอรัสดังกล่าวมีลักษณะเหมือนของแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร

จะเห็นว่า ที่สภาวะการชะละลายที่เหมาะสม คือ ที่สารละลายกรดเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมี ประสิทธิภาพในการชะละลายฟอสฟอรัสดีกว่าสารละลายกรดซัลฟิวริก และที่สภาวะเดียวกัน ประสิทธิภาพในการชะละลายฟอสฟอรัสในแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรจะดีกว่าแก้ว สไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

การเติมสารละลายกรดลงในแก้วสไลด์ นอกจากจะเป็นการทำลายพันธะของฟอสฟอรัสที่อยู่ในแก้วสไลด์ให้แตกตัวอยู่ในรูปสารละลายแล้ว ยังส่งผลให้โลหะหนักละลายปนออกมาในสารละลาย กรดด้วย โดยโลหะหนักที่มีอยู่ในแก้วสไลด์ปริมาณมาก ได้แก่ สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) และ ทองแดง (Cu) ซึ่งโลหะหนักจะตกตะกอนร่วมกับฟอสฟอรัสทำให้เกิดการปนเปื้อนในการนำฟอสฟอรัส กลับคืน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักออกก่อนการตกผลึกฟอสฟอรัสในรูปผลึกสตรูไวท์เพื่อ ผลึกจะได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น โลหะหนักนี้จะถูกกำจัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก โดย โลหะหนักส่วนใหญ่ถูกกำจัดไปได้มากกว่าร้อยละ 65 นอกจากจะกำจัดโลหะหนักออกแล้ว ยังกำจัด ฟอสฟอรัสออกไปด้วยโดยกำจัดฟอสฟอรัสในแก้วสไลด์ออกไปประมาณร้อยละ 9 แสดงดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** แสดงร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัด

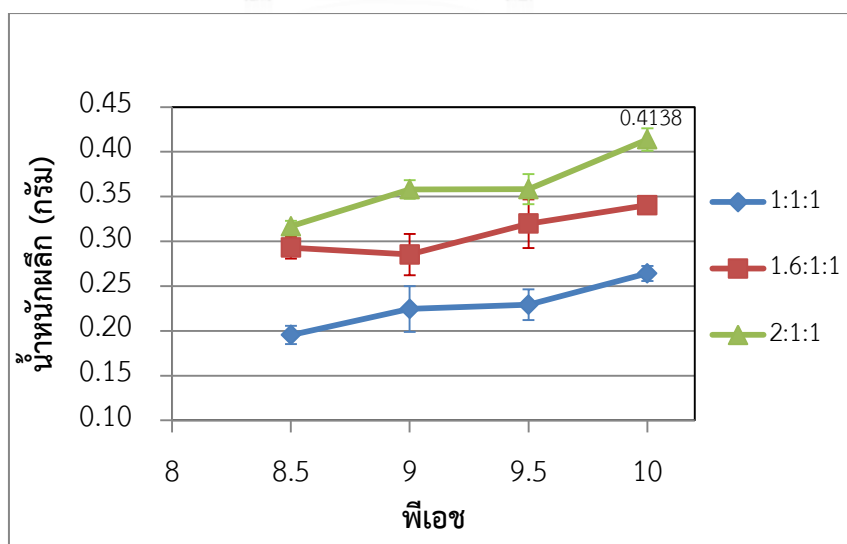
โลหะ	ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัด			
	แก้วสไลด์ฟาร์มสุกร		แก้วสไลด์ชุมชน	
	กรดไฮโดรคลอริก	กรดซัลฟิวริก	กรดไฮโดรคลอริก	กรดซัลฟิวริก
P	9.39	9.41	8.76	8.88
Ca	78.50	91.41	91.19	93.02
K	48.11	53.42	53.10	55.46
Zn	65.51	68.28	69.43	74.73
Mn	68.32	73.91	91.18	91.39
Cu	67.13	70.36	91.57	93.58
Cr	65.82	69.61	91.05	93.59
Ni	71.87	80.00	90.58	89.81
Pb	ไม่มี	ไม่มี	95.54	96.36

## 4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์

### 4.2.1 ผลของพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต

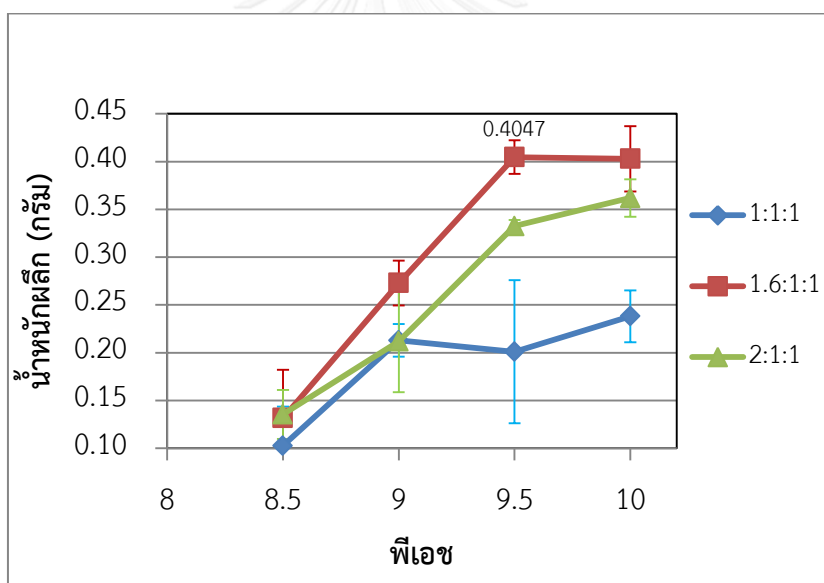
ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ พบว่า เมื่อพีเอชและอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเพิ่มขึ้น สามารถนำกลับฟอสฟอรัสได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.9 โดยสตรูไวท์จะเกิดในช่วงพีเอชที่ต่างกัน (7.0-10.0) เพราะค่าการละลายของสตรูไวท์จะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น

ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายแก้วสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและพีเอชต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเดียวกัน เมื่อพีเอชเพิ่มมากขึ้นจะเกิดผลึกมากขึ้นตามไปด้วย โดยที่พีเอชเท่ากับ 10 เกิดผลึกมากที่สุด และที่พีเอชเท่ากัน เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเพิ่มมากขึ้นจะเกิดผลึกมากขึ้นด้วย ดังนั้นสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด คือที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ซึ่งมีผลึกเกิดขึ้น 0.4138 กรัมต่อแก้วสัลดจ์ 500 มิลลิกรัม สามารถนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้ร้อยละ 99.63 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในสารละลายหลังเติมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก หรือร้อยละ 90.16 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในแก้วสัลดจ์



รูปที่ 4.6 แสดงน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายแก้วสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg_2^+$  :  $NH_4^+$  :  $PO_4^{3-}$  และค่า pH

ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและพีเอชค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตค่าต่างๆ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดผลึกมากขึ้น เนื่องจากที่ค่าพีเอชสูงๆ ค่าการละลายของสตรูไวท์จะลดลง ที่พีเอช 9-10 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 เกิดผลึกมากกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด คือที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ซึ่งมีผลึกเกิดขึ้น 0.4047 กรัมต่อเถ้าสัลดจ์ 500 มิลลิกรัม สามารถนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้ร้อยละ 99.37 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในสารละลายหลังเติมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก หรือร้อยละ 82.94 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในเถ้าสัลดจ์

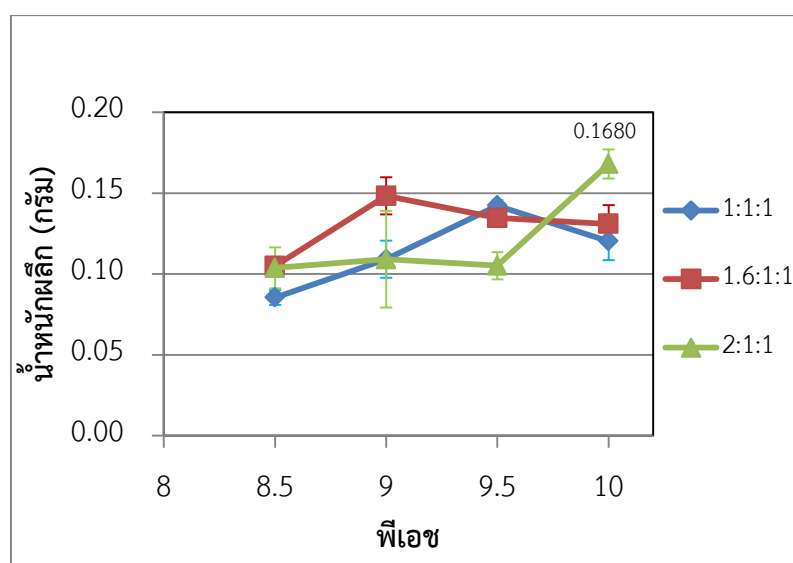


รูปที่ 4.7 แสดงน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg_2^+$ :  $NH_4^+$ :  $PO_4^{3-}$  และค่า pH

ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและพีเอชค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 เกิดผลึกมากที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 9.5 ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียม

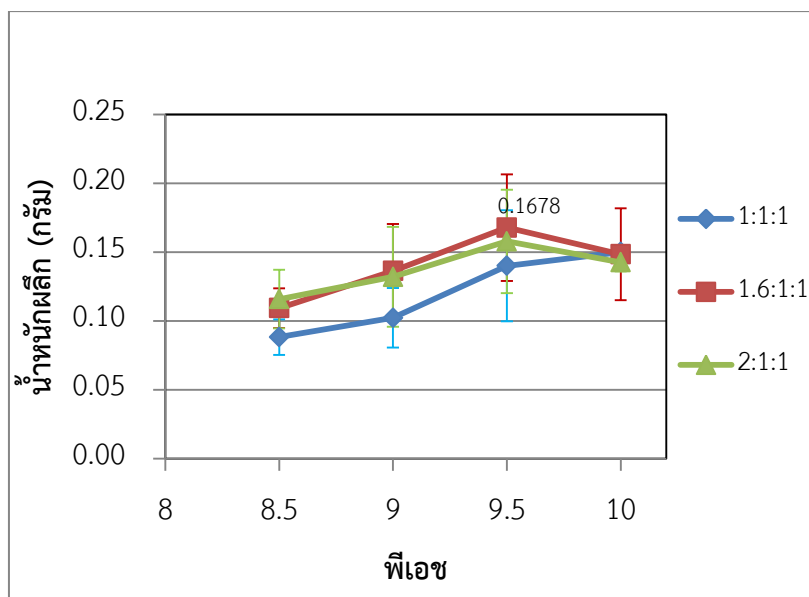


ต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 เกิดผลึกมากที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 9 และที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 เกิดผลึกมากที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 10 โดยสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด คือที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10.0 ซึ่งมีผลึกเกิดขึ้น 0.1680 กรัมต่อเกลือสไลด์ 500 มิลลิกรัม สามารถนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้ร้อยละ 99.84 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในสารละลายหลังเติมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก หรือร้อยละ 70.87 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในเกลือสไลด์



รูปที่ 4.8 แสดงน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเกลือสไลด์ชุมชนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg_2^+$ :  $NH_4^+$ :  $PO_4^{3-}$  และค่า pH

ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเกลือสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและพีเอชต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จะเกิดผลึกมากขึ้น และที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และ 2:1:1 เมื่อพีเอชเพิ่มจาก 8.5 ถึง 9.5 จะเกิดผลึกเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่พีเอชเท่ากับ 10 ผลึกเกิดน้อยลง และสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด คือที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 มีผลึกเกิดขึ้น 0.1678 กรัมต่อเกลือสไลด์ 500 มิลลิกรัม สามารถนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้ร้อยละ 97.58 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในสารละลายหลังเติมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก หรือร้อยละ 68.66 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในเกลือสไลด์



รูปที่ 4.9 แสดงน้ำหนักรวมผลึก เมื่อชะละลายเถ้าสลัดจ์ชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg_2^+ : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH

เนื่องจากปริมาณฟอสฟอรัสในเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรมีมากกว่าในเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน และประสิทธิภาพในการชะละลายฟอสฟอรัสในเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรยังดีกว่าเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ทำให้ปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรมีมากกว่าปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

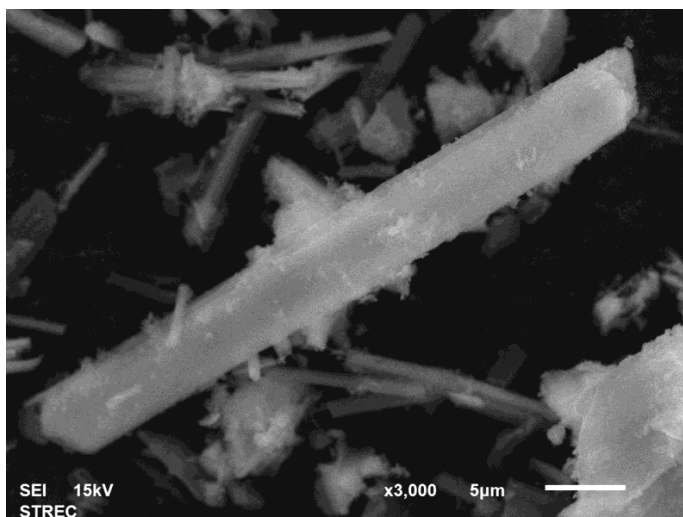
เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการนำฟอสฟอรัสกลับคืน จะพบว่า ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสลัดจ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะมากกว่าผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสลัดจ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยสามารถนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้สูงสุดถึงร้อยละ 99.63 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในสารละลายหลังเติมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก หรือร้อยละ 90.16 จากฟอสฟอรัสทั้งหมดในเถ้าสลัดจ์

#### 4.2.2 ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบ และความเป็นผลึกsturไวท์

ผลึกsturไวท์ มีลักษณะโครงสร้างระบบผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ที่แต่ละด้านทำมุมกัน 90 องศา แต่มีความยาวไม่เท่ากัน ส่วนมากมีรูปร่างปริซึมสามเหลี่ยมและหกเหลี่ยม ผลการวิเคราะห์ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรและเถ้า

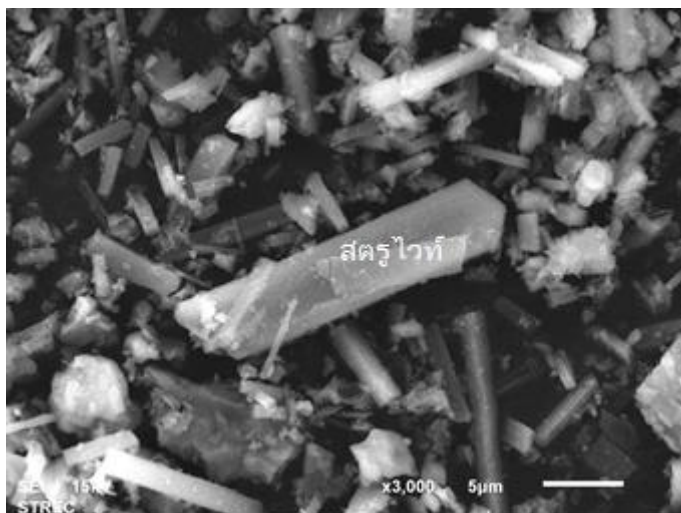
สลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดในสถานะที่เกิดผลึกมากที่สุด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผลึกที่ได้ส่วนใหญ่มีความเป็นผลึกตรงกับผลึกสตรูไวท์

ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 พบว่า เป็นผลึกสตรูไวท์ที่สมบูรณ์ มีปริมาณมาก ผลึกส่วนใหญ่มีขนาดใกล้เคียงกันประมาณ 50 ไมโครเมตร มีลักษณะของผลึกอื่นเกิดขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.10



**รูปที่ 4.10** ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสลัดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

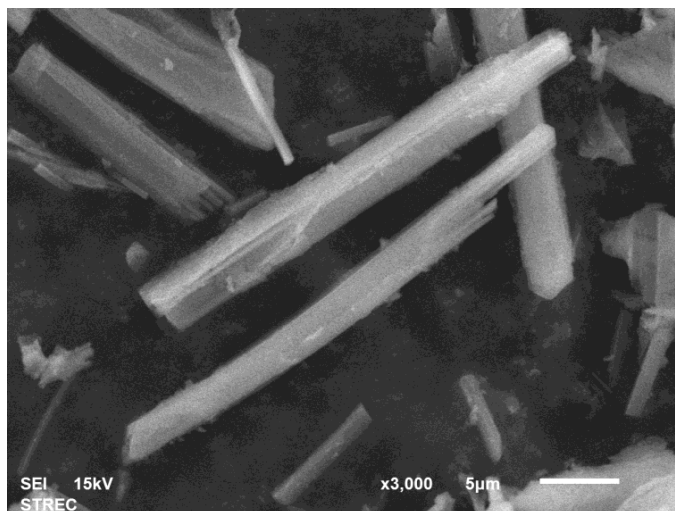
ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 พบว่า เป็นผลึกสตรูไวท์ที่มีขนาดเล็กประมาณ 20 ไมโครเมตร มีปริมาณมาก และมีลักษณะของผลึกอื่นปนหลายแบบ ดังรูปที่ 4.11



**รูปที่ 4.11** ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

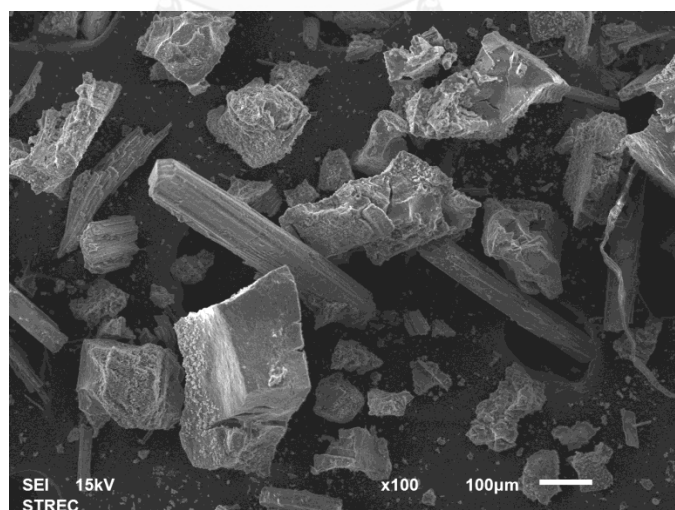
จากสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกจะมีผลึกเกิดขึ้นมากกว่ากรดไฮโดรคลอริก แต่ความสามารถในการนำฟอสฟอรัสกลับคืนมีค่าน้อยกว่า เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของผลึกด้วย จะพบว่า ผลึกที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ด้วยกรดซัลฟิวริกมีลักษณะของผลึกอื่นปนหลายแบบและมีปริมาณมาก มีผลึกสตรูไวท์ขนาดเล็กประมาณ 20 ไมโครเมตร แต่ผลึกที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีลักษณะของผลึกอื่นปนเล็กน้อย ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ประมาณ 50 ไมโครเมตร ทำให้ผลึกที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีความสามารถในการนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้ดีกว่า

ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 พบว่า ส่วนใหญ่เป็นผลึกสตรูไวท์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันประมาณ 40 ไมโครเมตร มีลักษณะของผลึกอื่นเกิดขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.12

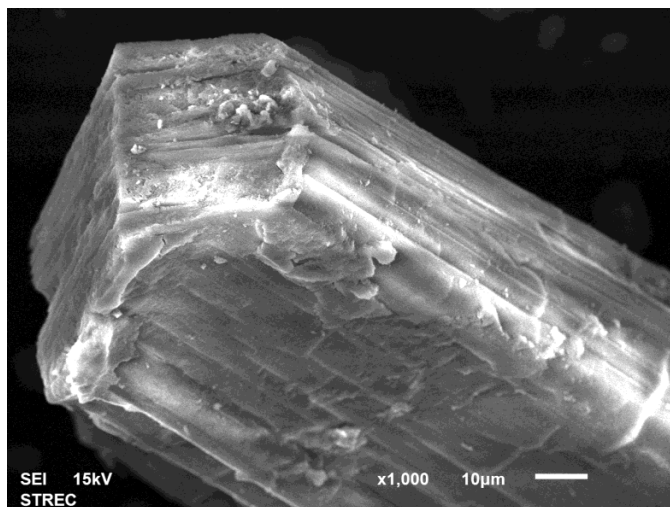


**รูปที่ 4.12** ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ชุมชนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

ผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 พบว่า เป็นผลึกสตรูไวท์ที่มีขนาดใหญ่มาก แต่มีปริมาณไม่มาก มีลักษณะของผลึกอื่นขนาดเล็กเกิดขึ้นหลายแบบ ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14



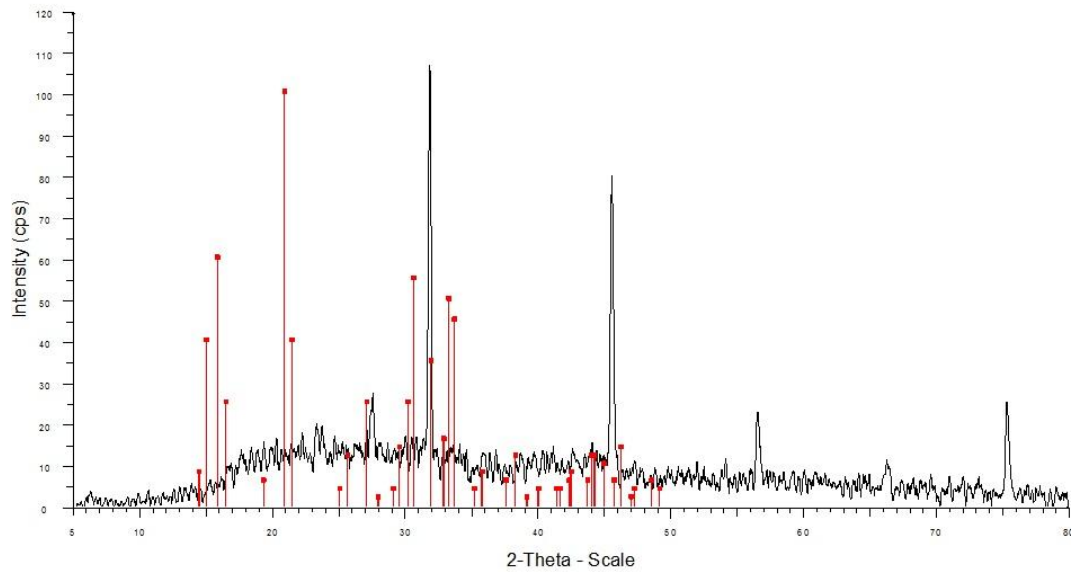
**รูปที่ 4.13** ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 100 เท่า



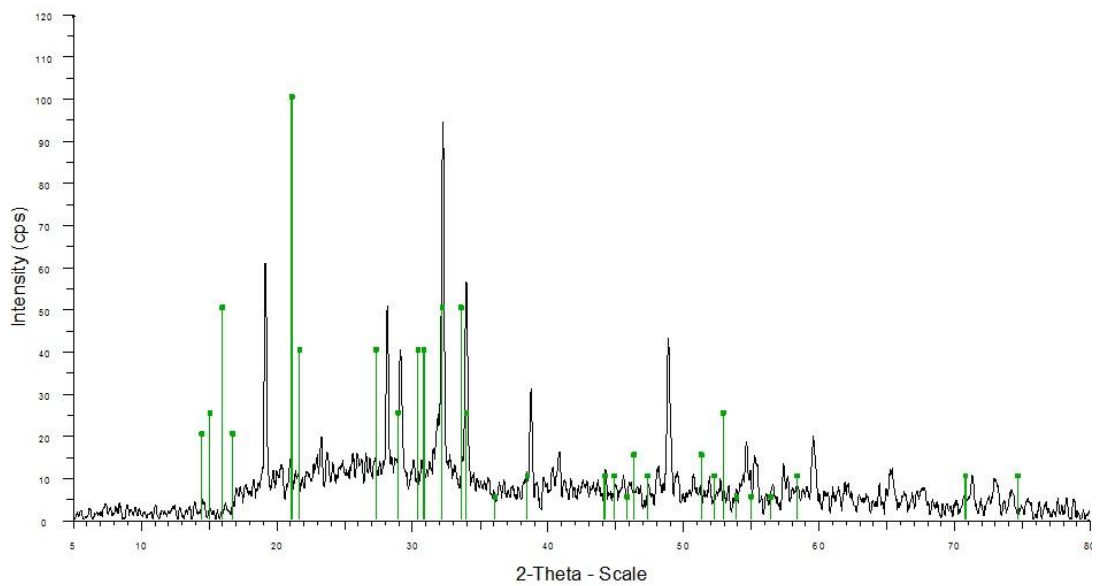
**รูปที่ 4.14** ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริกจะมีปริมาณผลึกเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน แต่ความสามารถในการนำฟอสฟอรัสกลับคืนเมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะมีค่ามากกว่า เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของผลึกด้วย จะพบว่า ผลึกที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ด้วยกรดซัลฟิวริกมีลักษณะของผลึกอื่นปนหลายแบบและมีปริมาณมาก มีผลึกสตรูไวท์เกิดขึ้นปริมาณน้อย แต่ผลึกที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีลักษณะของผลึกอื่นปนเล็กน้อย ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นมีขนาดใกล้เคียงกันประมาณ 40 ไมโครเมตร ทำให้ผลึกที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีความสามารถในการนำฟอสฟอรัสกลับคืนได้ดีกว่า

เมื่อนำผลึกที่เกิดขึ้นจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ไปวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่า พีคของผลึกที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับพีคมาตรฐานสตรูไวท์



รูปที่ 4.15 แสดงความเป็นผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเก้าสัลดัจฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10

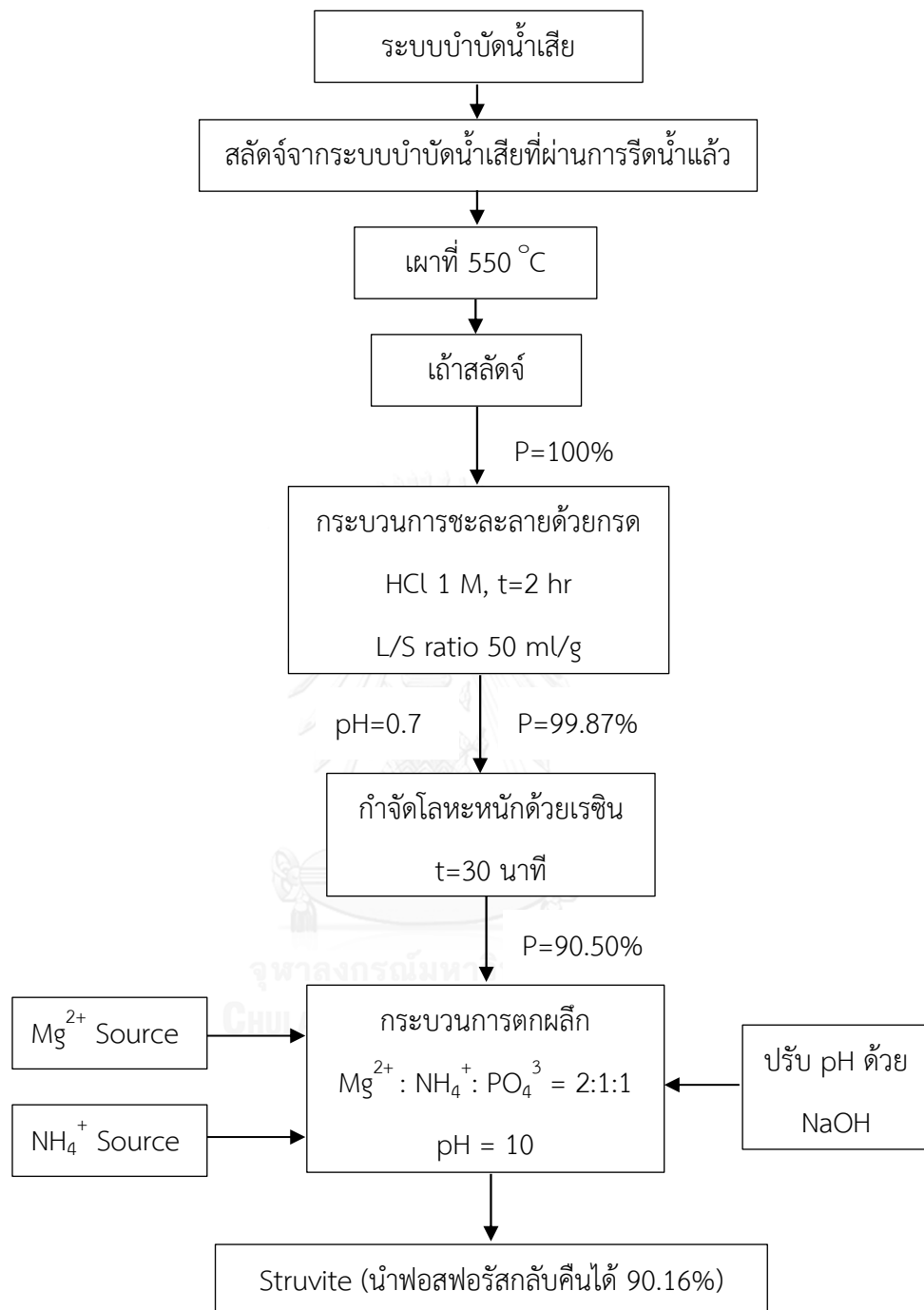


รูปที่ 4.16 แสดงความเป็นผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเก้าสัลดัจฟาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5

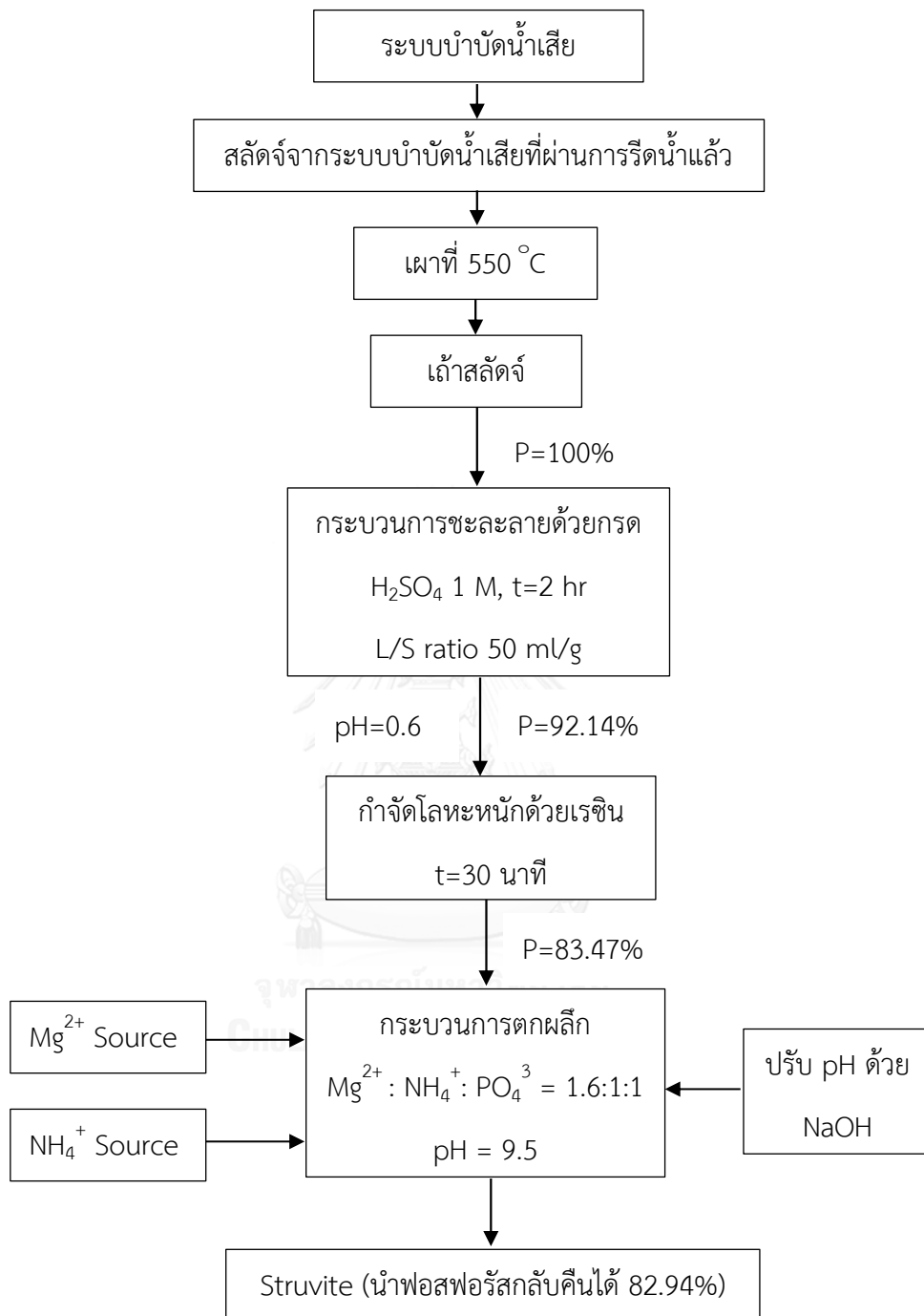
จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้าง ความเป็นผลึกสตรูไวท์ของผลึกที่เกิดขึ้น และ ประสิทธิภาพในการนำฟอสฟอรัสกลับคืน จะเห็นว่าวิธีการในการนำฟอสฟอรัสกลับคืนจากสลัดจ์ของ ระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรและระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยผ่านกระบวนการชะละลายด้วย สารละลายกรดและกระบวนการตกผลึกทางเคมีในรูปผลึกสตรูไวท์ วิธีการดังกล่าวสามารถนำกลับ ฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถสรุปขั้นตอนวิธีการที่เหมาะสมในการนำฟอสฟอรัสกลับคืน จากสลัดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรในรูปผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเข้าสู่สลัดจ์ด้วยสารละลาย กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก แสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ







รูปที่ 4.17 แสดงขั้นตอนการนำฟอสฟอรัสกลับคืนในรูปผลึกสตรูไวท์จากสลัดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสีย  
เมื่อชะละลายเถ้าสลัดจ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก



รูปที่ 4.18 แสดงขั้นตอนการนำฟอสฟอรัสกลับคืนในรูปผลึกสตรูไวท์จากสลัดจ์ของระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อชะละลายเถ้าสลัดจ์ด้วยกรดซัลฟิวริก

### 4.3 ผลการศึกษาการนำโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 สำหรับการคำนวณสมดุลทางเคมีของน้ำมาใช้ในการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีและผลึกต่างๆ ที่เกิดขึ้น

#### 4.3.1 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ในการตกผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายแร่สัลเฟอร์พาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร

เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลึกสตรูไวท์ มีการตกผลึกร่วมของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ ( $Ca_5(PO_4)_3OH$ ) และผลึกของโลหะหนักเล็กน้อย โดยที่พีเอชเท่ากับ 10 จะเกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

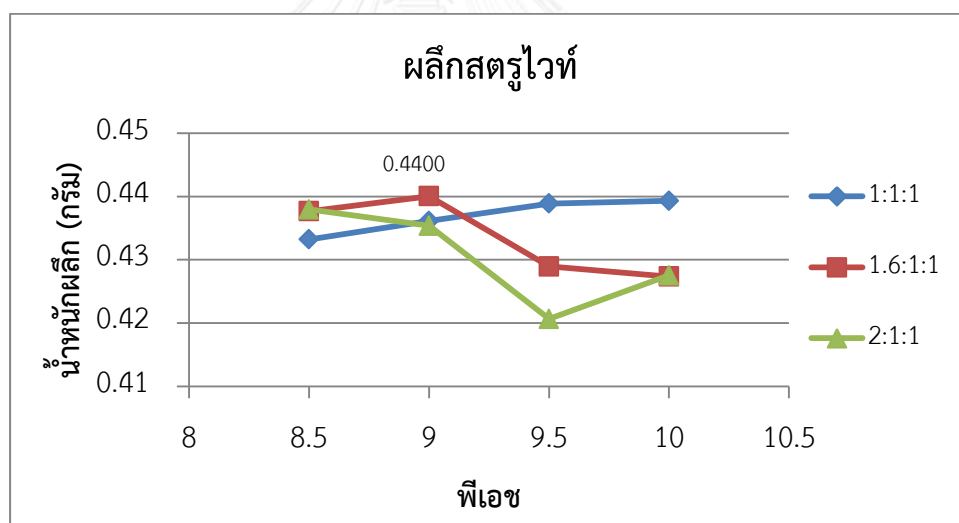
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มจาก 8.5 เป็น 9 จะเกิดผลึกสตรูไวท์เพิ่มมากขึ้น แต่ที่พีเอชเท่ากับ 9 และ 10 ปริมาณผลึกสตรูไวท์จะลดลงตามลำดับ เนื่องจากมีการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมและฟอสเฟตในระบบที่เป็นองค์ประกอบในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย โดยที่พีเอชเท่ากับ 9 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มจาก 8.5 เป็น 9.5 จะเกิดผลึกสตรูไวท์ลดลงตามลำดับ เนื่องจากที่พีเอช 9 และ 9.5 มีการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมและฟอสเฟตในระบบที่เป็นองค์ประกอบในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย และที่พีเอชเท่ากับ 10 ปริมาณผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  ลดลง และมีการตกผลึกร่วมของ  $Mg(OH)_2$  โดยที่พีเอชเท่ากับ 8.5 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

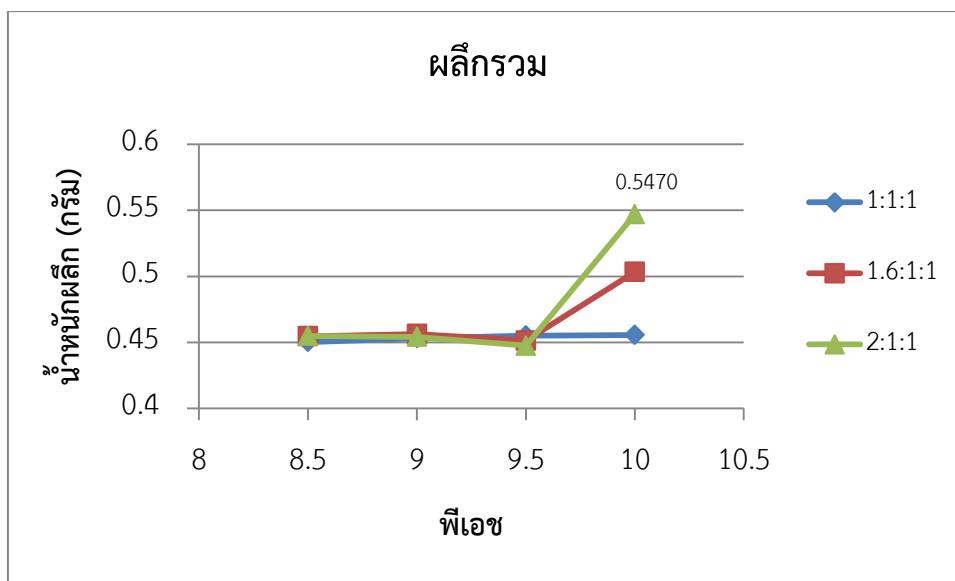
เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกสตรูไวท์ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและพีเอชที่ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด หนัก 0.44 กรัมต่อแร่สัลเฟอร์ 500 มิลลิกรัม แต่เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกรวม แสดงดังรูปที่ 4.20 จะพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 เกิดผลึกรวมมากที่สุด น้ำหนัก 0.5470 กรัมต่อแร่สัลเฟอร์ 500 มิลลิกรัม เนื่องจากการตกผลึกร่วมของ  $Mg(OH)_2$  โดย  $Mg(OH)_2$  จะเกิดขึ้นเมื่อพีเอชมีค่าตั้งแต่ 10 ขึ้นไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุดไม่ได้เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุดด้วย โดยสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด มีผลึกสตรูไวท์เกิดขึ้น

เพียง 0.4275 กรัมต่อเก้าสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม คิดเป็นผลึกสตรูไวท์ร้อยละ 78.15 จากผลึกทั้งหมด แต่ที่สภาวะที่เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด คิดเป็นผลึกสตรูไวท์ร้อยละ 96.44 จากผลึกทั้งหมด ซึ่งมีความบริสุทธิ์มากกว่า

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์เมื่อชะละลายเก้าสลัดจ์ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสภาวะดังกล่าวไม่ได้มีแต่ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อนำผลึกที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นลักษณะโครงสร้างรูปร่างของผลึกแบบอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วย สภาวะที่ได้จากห้องปฏิบัติการจึงเป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการตกผลึกรวมด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 จะพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10



รูปที่ 4.19 แสดงน้ำหนักผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเก้าสลัดจ์ฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 M



รูปที่ 4.20 แสดงน้ำหนักผลึกรวม เมื่อชะละลายเก้าสไลด์จาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 M

#### 4.3.2 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ในการตกผลึก สตรูไวท์ เมื่อชะละลายเก้าสไลด์จาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร

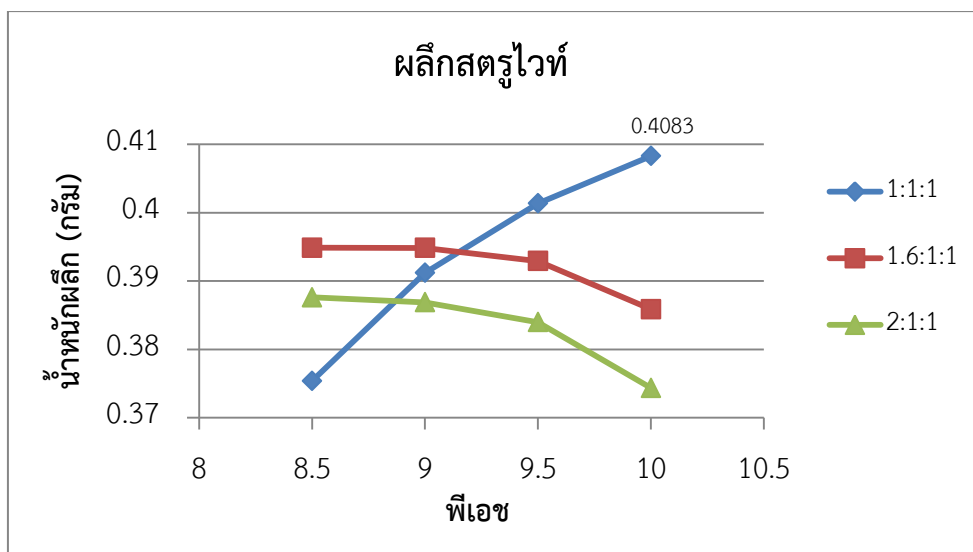
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลึกสตรูไวท์ มีการตกผลึกร่วมของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ ( $Ca_5(PO_4)_3OH$ ) และผลึกของโลหะหนักเล็กน้อย โดยที่พีเอชเท่ากับ 10 จะเกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด น้ำหนัก 0.4083 กรัมต่อเก้าสไลด์ 500 มิลลิกรัม

เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จะเกิดผลึกสตรูไวท์ลดลง เนื่องจากเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น มีการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมและฟอสเฟตในระบบที่เป็นองค์ประกอบในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย โดยที่พีเอชเท่ากับ 8.5 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

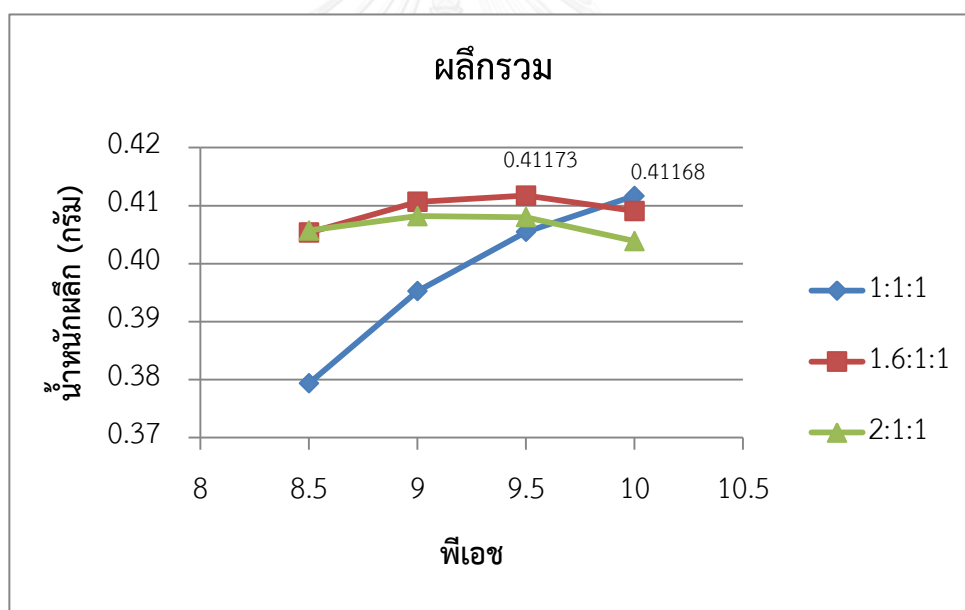
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จะเกิดผลึกสตรูไวท์ลดลง เนื่องจากเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น มีการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมและฟอสเฟตในระบบที่เป็นองค์ประกอบในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย โดยที่พีเอชเท่ากับ 8.5 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกสตรูไวท์ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและพีเอชที่ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด น้ำหนัก 0.4083 กรัมต่อแก้วสไลด์ 500 มิลลิกรัม แต่เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกรวม แสดงดังรูปที่ 4.22 จะพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมล ของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 เกิดผลึกรวมมากที่สุด น้ำหนัก 0.4117 กรัมต่อแก้วสไลด์ 500 มิลลิกรัม เนื่องจากการตกผลึกร่วมของ  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ,  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$  และผลึกของโลหะหนักเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุดไม่ได้เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุดด้วย โดยสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด มีผลึกสตรูไวท์เกิดขึ้นเพียง 0.3929 กรัมต่อแก้วสไลด์ 500 มิลลิกรัม คิดเป็นผลึกสตรูไวท์ร้อยละ 95.43 จากผลึกทั้งหมด แต่ที่สภาวะที่เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด คิดเป็นผลึกสตรูไวท์ร้อยละ 99.18 จากผลึกทั้งหมด ซึ่งมีความบริสุทธิ์มากกว่า

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์เมื่อชะละลายแก้วสไลด์ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสภาวะดังกล่าวไม่ได้มีแต่ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อนำผลึกที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นลักษณะโครงสร้างรูปร่างของผลึกแบบอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วย สภาวะที่ได้จากห้องปฏิบัติการจึงเป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการตกผลึกรวมด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 จะพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5



รูปที่ 4.21 แสดงน้ำหนักผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเก้าสไลด์จพาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 M



รูปที่ 4.22 แสดงน้ำหนักผลึกรวม เมื่อชะละลายเก้าสไลด์จพาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 M

#### 4.3.3 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ในการตกผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเก้าสไลด์จพาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร

เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจาก 8.5 ถึง 9.5 จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์เพิ่มมากขึ้นด้วย แต่ที่พีเอชเท่ากับ 10 ปริมาณผลึกสตรูไวท์จะลดลงตามลำดับ เนื่องจากมีการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  ทำให้ปริมาณ

แมกนีเซียมและฟอสเฟตในระบบที่เป็นองค์ประกอบในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย โดยที่พีเอชเท่ากับ 9.5 จะเกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด จำนวน 0.1573 กรัมต่อเก้าสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม

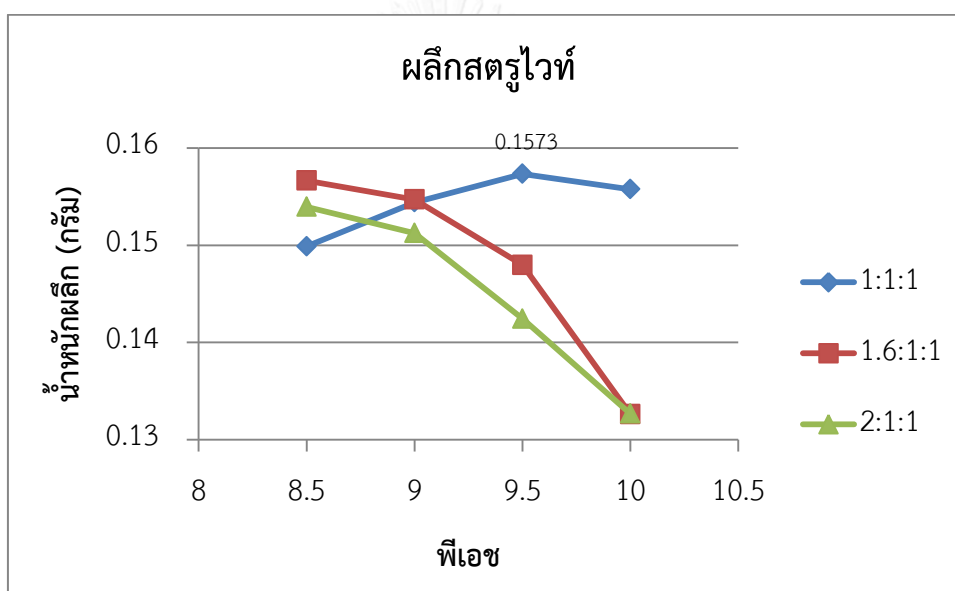
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จะเกิดผลึกสตรูไวท์ลดลง เนื่องจากเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น มีการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมและฟอสเฟตในระบบที่เป็นองค์ประกอบในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย และที่พีเอชเท่ากับ 10 ยังมีการตกผลึกร่วมของ  $Mg(OH)_2$  อีกด้วย ทำให้เกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง โดยที่พีเอชเท่ากับ 8.5 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จะเกิดผลึกสตรูไวท์ลดลง เนื่องจากเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น มีการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมและฟอสเฟตในระบบที่เป็นองค์ประกอบในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย และที่พีเอชเท่ากับ 10 ยังมีการตกผลึกร่วมของ  $Mg(OH)_2$  อีกด้วย ทำให้เกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง โดยที่พีเอชเท่ากับ 8.5 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

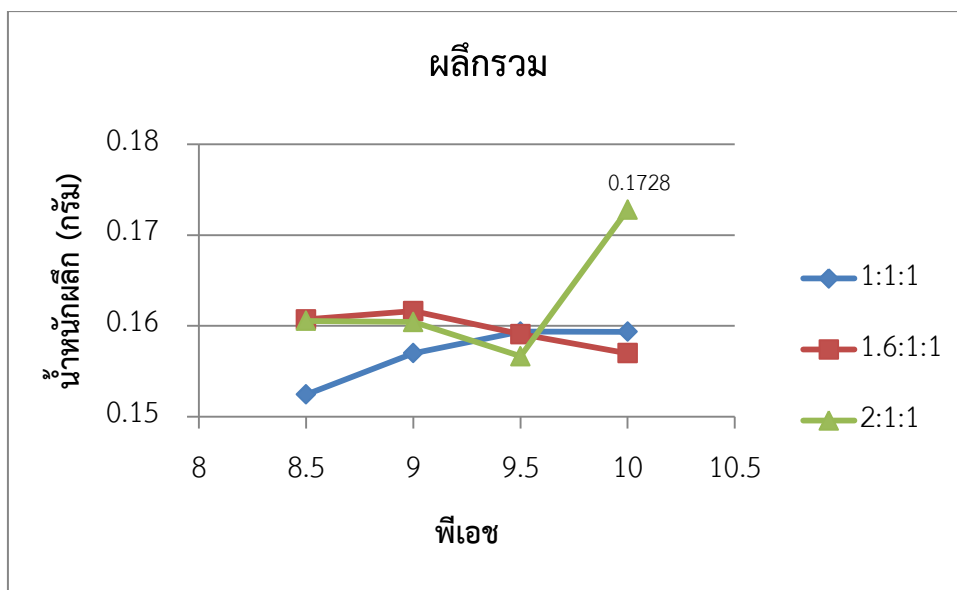
เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกสตรูไวท์ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและพีเอชที่ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด น้ำหนัก 0.1573 กรัมต่อเก้าสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม แต่เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกรวม แสดงดังรูปที่ 4.24 จะพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 เกิดผลึกรวมมากที่สุด น้ำหนัก 0.1728 กรัมต่อเก้าสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม เนื่องจากมีการตกผลึกร่วมของ  $Mg(OH)_2$  โดย  $Mg(OH)_2$  จะเกิดขึ้นเมื่อพีเอชมีค่าตั้งแต่ 10 ขึ้นไป และยังเกิดผลึก  $Ca_5(PO_4)_3OH$ ,  $Mg_3(PO_4)_2$  และผลึกของโลหะหนักเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุดไม่ได้เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุดด้วย โดยสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด มีผลึกสตรูไวท์เกิดขึ้นเพียง 0.1327 กรัมต่อเก้าสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม คิดเป็นผลึกสตรูไวท์ร้อยละ 76.78 จากผลึกทั้งหมด แต่ที่สภาวะที่เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด คิดเป็นผลึกสตรูไวท์ร้อยละ 97.74 จากผลึกทั้งหมด ซึ่งมีความบริสุทธิ์มากกว่า



ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์เมื่อชะละลายแก้วสัลดจ์ชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสภาวะดังกล่าวไม่ได้มีแต่ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อนำผลึกที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นลักษณะโครงสร้างรูปร่างของผลึกแบบอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วย สภาวะที่ได้จากห้องปฏิบัติการจึงเป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการตกผลึกรวมด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 จะพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10



รูปที่ 4.23 แสดงน้ำหนักผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายแก้วสัลดจ์ชุมชนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 M



รูปที่ 4.24 แสดงน้ำหนักผลึกรวม เมื่อชะละลายเก้าสลัดจ์ชุมชนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 M

#### 4.3.4 ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ในการตกผลึก สตรูไวท์ เมื่อชะละลายเก้าสลัดจ์ชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิว 1 โมลต่อลิตร

เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลึกสตรูไวท์ มีการตกผลึกร่วมของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ ( $Ca_5(PO_4)_3OH$ ) และผลึกของโลหะหนักเล็กน้อย โดยที่พีเอชเท่ากับ 10 จะเกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด น้ำหนัก 0.1516 กรัมต่อเก้าสลัดจ์ 500 มิลลิกรัม

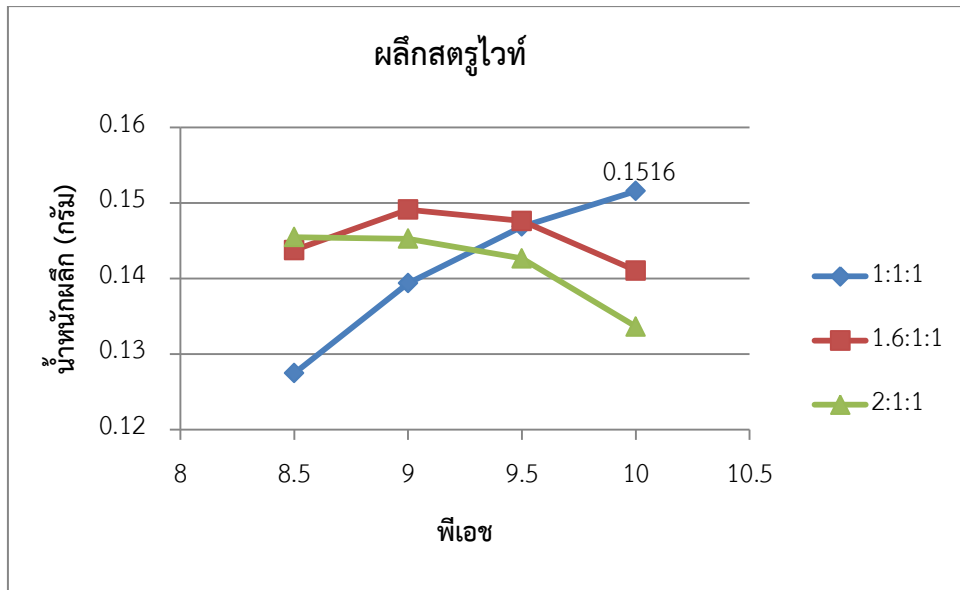
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 8.5 เป็น 9 จะเกิดผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้น และที่พีเอชเท่ากับ 9.5 และ 10 เกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง เนื่องจากมีการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมและฟอสเฟตในระบบที่เป็นองค์ประกอบในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย โดยที่พีเอชเท่ากับ 9 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จะเกิดผลึกสตรูไวท์ลดลง เนื่องจากเมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้น มีการตกผลึกร่วมของ  $Mg_3(PO_4)_2$  เพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมและฟอสเฟตในระบบที่เป็นองค์ประกอบในการเกิด

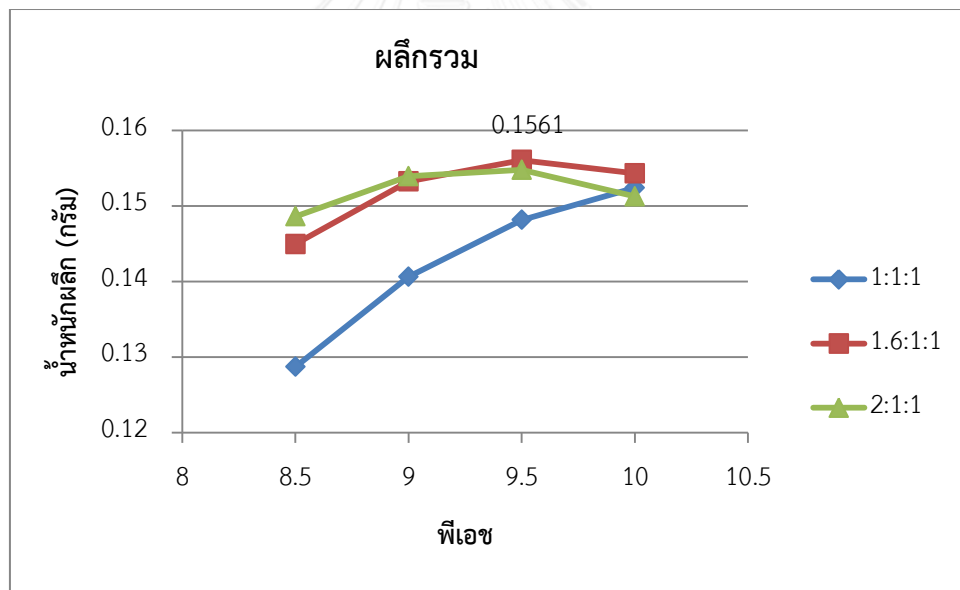
ผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย โดยที่พีเอชเท่ากับ 8.5 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกสตรูไวท์ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและพีเอชที่ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด น้ำหนัก 0.1516 กรัมต่อแก้วสไลด์ 500 มิลลิกรัม แต่เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกรวม แสดงดังรูปที่ 4.26 จะพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมล ของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 เกิดผลึกรวมมากที่สุด น้ำหนัก 0.1561 กรัมต่อแก้วสไลด์ 500 มิลลิกรัม เนื่องจากมีการตกผลึกร่วมของ  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ,  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$  และผลึกของโลหะหนักเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุดไม่ได้เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุดด้วย โดยสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด มีผลึกสตรูไวท์เกิดขึ้นเพียง 0.1476 กรัมต่อแก้วสไลด์ 500 มิลลิกรัม คิดเป็นผลึกสตรูไวท์ร้อยละ 94.58 จากผลึกทั้งหมด แต่ที่สภาวะที่เกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด คิดเป็นผลึกสตรูไวท์ร้อยละ 99.46 จากผลึกทั้งหมด ซึ่งมีความบริสุทธิ์มากกว่า

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์เมื่อชะละลายแก้วสไลด์ชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสภาวะดังกล่าวไม่ได้มี แต่ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อนำผลึกที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นลักษณะโครงสร้างรูปร่างของผลึกแบบอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วย สภาวะที่ได้จากห้องปฏิบัติการจึงเป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณการตกผลึกรวมด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 จะพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5



รูปที่ 4.25 แสดงน้ำหนักผลึกสตรูไวท์ เมื่อชะละลายเก้าสัลดัจชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 M



รูปที่ 4.26 แสดงน้ำหนักผลึกรวม เมื่อชะละลายเก้าสัลดัจชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 M

#### 4.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณการตกผลึก ด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 กับ การทดลองในห้องปฏิบัติการ

##### 4.4.1 เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร

ผลการคำนวณการตกผลึกรวมด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 สอดคล้องกับ ผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ คือที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และที่พีเอชเท่ากับ 10 เป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด

##### 4.4.2 เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร

ผลการคำนวณการตกผลึกรวมด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 สอดคล้องกับ ผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ คือที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และที่พีเอชเท่ากับ 9.5 เป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด

##### 4.4.3 เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จัมซุนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร

ผลการคำนวณการตกผลึกรวมด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 สอดคล้องกับ ผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ คือที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และที่พีเอชเท่ากับ 10 เป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด

##### 4.4.4 เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จัมซุนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร

ผลการคำนวณการตกผลึกรวมด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 สอดคล้องกับ ผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ คือที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และที่พีเอชเท่ากับ 9.5 เป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด

ผลการทดลองที่ได้จากห้องปฏิบัติการในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูโวไรท์ ซึ่ง แท้จริงแล้ว สภาวะที่ได้จากการทดลองจะเป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด จะไม่ใช่สภาวะที่เกิด ผลึกสตรูโวไรท์มากที่สุด เพราะผลึกที่เกิดขึ้นไม่ใช่ผลึกสตรูโวไรท์ทั้งหมด แต่ละสภาวะจะมีผลึกอื่นปะปน อยู่เล็กน้อยแตกต่างกันไป เนื่องจากเมื่อนำผลึกที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM) จะเห็นลักษณะโครงสร้างรูปร่างของผลึกแบบอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วยแตกต่างกัน แต่ไม่ สามารถบอกได้ว่ามีผลึกชนิดไหนเกิดขึ้นบ้างและแต่ละชนิดมีปริมาณเท่าใด จากการทดลองไม่ สามารถรู้ได้ว่าที่สภาวะไหนเกิดผลึกสตรูโวไรท์มากที่สุด ดังนั้นการใช้โปรแกรม Visual MINTEQ

Version 3.0 จะช่วยในการคำนวณหาชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ ได้ และ การใช้โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ยังบอกได้ว่าที่สภาวะไหนมีผลึกsturว์ท์เกิดขึ้นมากที่สุด ยกตัวอย่าง เช่น ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกsturว์ท์เมื่อชะละลายแก้วสัลดจ์ ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ จะพบว่า สภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด คือ ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 แต่เมื่อนำโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 มาใช้ในการคำนวณหาว่าสภาวะไหนมีผลึกsturว์ท์เกิดขึ้นมากที่สุด จะพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9 เกิดผลึกsturว์ท์มากที่สุด ดังนั้นถ้าทำการทดลองที่สภาวะตามที่โปรแกรมคำนวณให้ ผลึกที่เราได้จะมีsturว์ท์เป็นองค์ประกอบมากที่สุด ผลึกมีความบริสุทธิ์มากขึ้น และยังประหยัดสารเคมีในการเติมเพื่อปรับอัตราส่วนของแมกนีเซียมโดยไม่ต้องปรับสูงถึง 2 เท่าแต่ปรับแค่ 1.6 เท่า และสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชยังลดลงอีกด้วย

#### ข้อดีของการนำโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 มาใช้

1. สามารถใช้ทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกsturว์ท์ ที่สภาวะดังกล่าวจะมีปริมาณผลึกsturว์ท์มากที่สุด และผลึกที่ได้มีความบริสุทธิ์ เนื่องจากมีผลึกชนิดอื่นปนอยู่น้อย ซึ่งการทดลองในห้องปฏิบัติการไม่สามารถบอกได้ เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นมีหลายชนิด สภาวะที่ได้จากการทดลองจึงเป็นสภาวะที่เกิดผลึกรวมมากที่สุด
2. สามารถบอกชนิดและปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในสภาวะต่างๆ ได้
3. เมื่อใช้โปรแกรมช่วยในการคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมก่อน จะช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมีต่างๆ ได้

#### ข้อจำกัดของโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0

1. ค่าความเข้มข้นของผลึกที่เกิดขึ้น แสดงได้ครั้งละไม่เกิน 12 ค่า
2. การกำหนดให้แสดงผลในช่วง pH หลายๆ ค่า อาจแสดงผลขึ้นไม่ครบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการนำฟอสฟอรัสกลับคืนจากสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรและระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการรีดน้ำแล้วโดยการตกผลึกในรูปสตรูโวอิตหรือผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัสจากถ้ำสลัดจ์ ได้แก่ ระยะเวลาในการชะละลาย ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายกรด และอัตราส่วนของสารละลายกรดต่อถ้ำสลัดจ์ และสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูโวอิต ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียมที่ส่งผลต่อองค์ประกอบและปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. สลัดจ์ฟาร์มสุกรที่ผ่านการรีดน้ำแล้วมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบปริมาณมาก โดยถ้ำสลัดจ์ฟาร์มสุกรหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 13 (โดยน้ำหนัก) ซึ่งถือได้ว่าเป็นแหล่งที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูง เหมาะต่อการนำกลับฟอสฟอรัสโดยการตกผลึกในรูปสตรูโวอิตผ่านกระบวนการชะละลายฟอสฟอรัสด้วยสารละลายกรดและกระบวนการตกผลึกทางเคมี
2. สภาวะที่เหมาะสมในการชะละลายฟอสฟอรัส คือที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อถ้ำสลัดจ์ 50 มิลลิลิตรต่อกรัม และระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง สามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 99.87
3. สภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกเมื่อชะละลายถ้ำสลัดจ์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1 และที่พีเอชเท่ากับ 10 เป็นสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด และเมื่อชะละลายถ้ำสลัดจ์ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1 และที่พีเอชเท่ากับ 9.5 เป็นสภาวะที่เกิดผลึกมากที่สุด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการคำนวณการตกผลึกรวมด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0

4. จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ คือที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9 เกิดผลึกสตรูไวท์ 0.44 กรัมต่อแกลสไลต์จ 500 มิลลิกรัม

## 5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

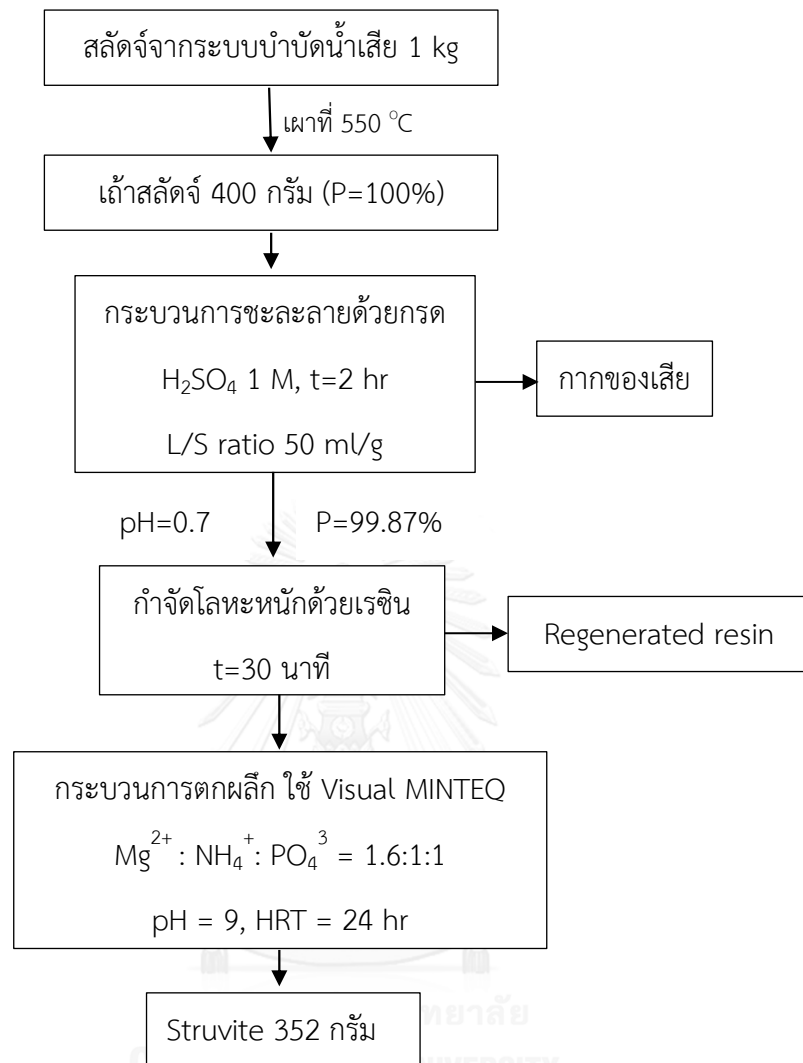
1. ในแกลสไลต์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบปริมาณสูงประมาณร้อยละ 13 (โดยน้ำหนัก) ถือว่าเป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่มีศักยภาพแหล่งหนึ่งในการนำฟอสฟอรัสกลับมาคืน เช่น วิธีการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) หรือใช้กระบวนการออกซิเดชันร่วมกับนาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration) เพื่อแยกฟอสฟอรัส

2. สามารถใช้โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ในการประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกที่ต้องการต่างๆ เมื่อทราบค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบในสารละลาย เพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง เช่น ใช้ประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกฟอสฟอรัสในแกลสไลต์ชนิดอื่นๆ หรือใช้ประเมินหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกอื่นๆ ที่ต้องการในน้ำทิ้ง

## 5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นแหล่งธาตุอาหารที่มีความจำเป็นสำหรับพืช และยังไม่มียอดองค์ประกอบอื่นๆ ที่สามารถทดแทนได้ และมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการในการนำฟอสฟอรัสในสไลต์จากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาคืนในรูปแบบผลึกสตรูไวท์ โดยพบว่า แกลสไลต์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบปริมาณสูง ประมาณร้อยละ 13 (โดยน้ำหนัก) ถือว่าเป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่มีศักยภาพแหล่งหนึ่ง และนำฟอสฟอรัสกลับมาคืนโดยผ่านกระบวนการชะละลายฟอสฟอรัสด้วยสารละลายกรดและกระบวนการตกผลึกทางเคมี ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถนำฟอสฟอรัสกลับมาคืนได้เกือบร้อยละ 100 และสามารถนำสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ที่ได้จากการใช้โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 ไปใช้งานจริง หรืออาจปรับใช้กับสไลต์ชนิดอื่นๆ โดยสไลต์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร 1 กิโลกรัม สามารถตกผลึกสตรูไวท์ได้ 352 กรัม





รูปที่ 5.1 ขั้นตอนและสภาวะที่เหมาะสมในการนำฟอสฟอรัสกลับคืน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. 2545. น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2546a. การจัดการกากตะกอนน้ำเสียชุมชน. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2546b. คู่มือการเลือกใช้ การดูแลและบำรุงรักษา ระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรตามแบบมาตรฐานกรมปศุสัตว์. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2556. คู่มือวิธีการหรือเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสุกรประเภท ค. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- ชัญญา หาวารี. 2549. การประเมินศักยภาพการนำกากตะกอนอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์โดยการทดสอบการชะละลายโลหะหนัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ดวงกมล พุทธิธโนปัจัย. 2552. การนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์. 2531. การกำจัดแอมโมเนียและฟอสเฟตพร้อมกันโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิชญ์ภาค เจียรพันธ์. 2552. ปริมาณธาตุอาหารจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่เหมาะสมต่อการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิไล พันธุ์งหาญ. 2548. การใช้ประโยชน์เถ้าลอยและกากตะกอนน้ำเสียชุมชน เป็นแหล่งธาตุปุ๋ยในการปลูกข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## ภาษาอังกฤษ

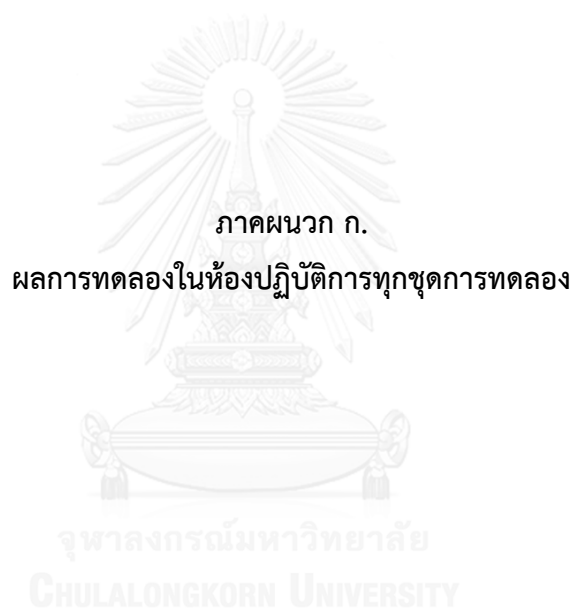
- Ali, M. I., Schneider, P. A. and Hudson, N. 2003. Assessing nutrient recovery from piggery effluents. International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM03). New Zealand.
- Bhuiyan, M. I., Mavinic, D. S. and Koch, F. A. 2008. Thermal decomposition of struvite and its phase transition. Chemosphere 70: 1347-1356.
- Biswas, B. K., Inoue, K., Harada, H., Ohto, K. and Kawakita, H. 2009. Leaching of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by means of acid extraction followed by adsorption on orange waste gel. Journal of Environmental Sciences 21: 1753-1760.
- 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 phosphorus as struvite in liquid swine manure. Water Research 41: 1689-1696.
- Crutchik, D., Sánchez, A. and Garrido, J. M. 2013. Simulation and experimental validation of multiple phosphate precipitates in a saline industrial wastewater. Separation and Purification Technology 118: 81-88.
- Donatello, S., Tong, D. and Cheeseman, C. R. 2010. Production of technical grade phosphoric acid from incinerator sewage sludge ash (ISSA). Waste Management 30: 1634-1642.
- Franz, M. 2008. Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). Waste Management 28: 1809-1818.
- Guney, K., Weideler, A. and Krampe, J. 2008. Phosphorus recovery from digested sewage sludge as MAP by the help of metal ion separation. Water Research 42: 4692-4698.
- Kaikake, K., Sekito, T. and Dote, Y. 2009. Phosphate recovery from phosphorus-rich solution obtained from chicken manure incineration ash. Waste Management 29: 1084-1088.
- Kalmykova, Y. and Fedje, K. K. 2013. Phosphorus recovery from municipal solid waste incineration fly ash. Waste Management 33: 1403-1410.

- Le Corre, K. S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., Jefferson, B. and Parsons, S. A. 2007. Agglomeration of struvite crystals. Water Research 41: 419-425.
- Lee, S. I., Weon, S. Y., Lee, C. W. and Koopman, B. 2003. Removal of nitrogen and phosphate from wastewater by addition of bittern. Chemosphere 51: 265-271.
- Liu, Y., Kwag, J.-H., Kim, J.-H. and Ra, C. 2011. Recovery of nitrogen and phosphorus by struvite crystallization from swine wastewater. Desalination 277: 364-369.
- Rahman, M. M., Salleh, M. A. M., Rashid, U., Ahsan, A., Hossain, M. M. and Ra, C. S. 2014. Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization – A review. Arabian Journal of Chemistry 7: 139-155.
- Ryu, H. D., Kim, D. and Lee, S. I. 2008. Application of struvite precipitation in treating ammonium nitrogen from semiconductor wastewater. Journal of Hazardous Materials 156: 163-169.
- 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.
- Warmadewanthi and Liu, J. C. 2009. Recovery of phosphate and ammonium as struvite from semiconductor wastewater. Separation and Purification Technology 64: 368-373.
- Xu, H., He, P., Gu, W., Wang, G. and Shao, L. 2012. Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash. Journal of Environmental Sciences 24: 1533-1538.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการทุกชุดการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ตารางที่ ก.1** ผลความเข้มข้นของฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ 100 มิลลิลิตรต่อกรัม และเวลาในการชะละลายค่าต่างๆ

เวลาในการชะละลาย (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0833	743.80	747.80	742.60	744.73	2.72
0.5	780.20	789.40	787.80	785.80	4.92
1	859.60	846.00	862.20	855.93	8.70
2	901.20	908.00	911.40	906.87	5.19
3	898.80	914.60	903.40	884.93	8.13
4	926.60	921.60	908.00	928.07	9.63

**ตารางที่ ก.2** ผลร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ 100 มิลลิลิตรต่อกรัม และเวลาในการชะละลายค่าต่างๆ

เวลาในการชะละลาย (ชั่วโมง)	ร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0833	57.64	57.95	57.55	57.71	0.21
0.5	60.46	61.18	61.05	60.90	0.38
1	66.62	65.56	66.82	66.33	0.67
2	69.84	70.37	70.63	70.28	0.40
3	69.65	70.88	70.01	70.18	0.63
4	71.81	71.42	70.37	71.20	0.75

**ตารางที่ ก.3** ผลความเข้มข้นของฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ 100 มิลลิลิตรต่อกรัม และเวลาในการชะละลายค่าต่างๆ

เวลาในการชะละลาย (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0833	866.60	868.00	876.60	870.40	5.41
0.5	1,042.40	1,044.60	1,036.40	1,041.13	4.24
1	1,107.00	1,119.80	1,108.80	1,111.87	6.93
2	1,153.80	1,164.60	1,154.40	1,157.60	6.07
3	1,160.40	1,175.40	1,179.20	1,171.67	9.94
4	1,160.80	1,179.40	1,173.20	1,171.13	9.47

**ตารางที่ ก.4** ผลร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ 100 มิลลิลิตรต่อกรัม และเวลาในการชะละลายค่าต่างๆ

เวลาในการชะละลาย (ชั่วโมง)	ร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0833	67.16	67.27	67.93	67.45	0.42
0.5	80.78	80.95	80.32	80.68	0.33
1	85.79	86.78	85.93	86.17	0.54
2	89.42	90.25	89.46	89.71	0.47
3	89.93	91.09	91.38	90.80	0.77
4	89.96	91.40	90.92	90.76	0.73



**ตารางที่ ก.5** ผลความเข้มข้นของฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0001	25	12.03	13.34	12.94	12.77	0.67
0.0001	50	11.82	11.68	12.02	11.84	0.17
0.0001	100	11.85	10.81	10.02	10.89	0.92
0.0001	150	10.81	11.31	10.24	10.79	0.54
0.0001	200	9.85	9.86	10.70	10.14	0.49
0.001	25	14.59	14.04	14.26	14.30	0.28
0.001	50	14.49	13.91	14.91	14.44	0.50
0.001	100	15.79	15.86	16.38	16.01	0.32
0.001	150	16.24	15.67	16.53	16.15	0.44
0.001	200	16.23	15.42	16.12	15.92	0.44
0.01	25	59.60	61.20	60.60	60.47	0.81
0.01	50	73.40	84.00	76.80	78.07	5.41
0.01	100	91.80	82.60	86.60	87.00	4.61
0.01	150	88.40	94.00	88.20	90.20	3.29
0.01	200	98.80	98.00	96.40	97.73	1.22
0.1	25	776.40	784.80	772.60	777.93	6.24
0.1	50	910.40	899.00	897.40	902.27	7.09
0.1	100	891.20	918.00	911.40	906.87	13.96
0.1	150	739.80	751.60	760.00	750.47	10.15
0.1	200	607.40	632.20	631.00	623.53	13.98
1	25	5,051.60	5,031.60	5,030.00	5,037.73	12.04
1	50	2,589.00	2,570.00	2,573.60	2,577.53	10.09
1	100	1,284.60	1,301.20	1,284.00	1,289.93	9.76
1	150	867.80	859.40	848.40	858.53	9.73
1	200	635.20	640.20	658.00	644.47	11.98

ตารางที่ ก.6 ผลร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายแล้วสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสีย ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	ร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0001	25	0.23	0.26	0.25	0.25	0.01
0.0001	50	0.46	0.45	0.47	0.46	0.01
0.0001	100	0.92	0.84	0.78	0.84	0.07
0.0001	150	1.26	1.31	1.19	1.25	0.06
0.0001	200	1.53	1.53	1.66	1.57	0.08
0.001	25	0.28	0.27	0.28	0.28	0.01
0.001	50	0.56	0.54	0.58	0.56	0.02
0.001	100	1.22	1.23	1.27	1.24	0.02
0.001	150	1.89	1.82	1.92	1.88	0.05
0.001	200	2.52	2.39	2.50	2.47	0.07
0.01	25	1.15	1.19	1.17	1.17	0.02
0.01	50	2.84	3.25	2.98	3.02	0.21
0.01	100	7.11	6.40	6.71	6.74	0.36
0.01	150	10.28	10.93	10.25	10.49	0.38
0.01	200	15.31	15.19	14.94	15.15	0.19
0.1	25	15.04	15.20	14.97	15.07	0.12
0.1	50	35.28	34.83	34.77	34.96	0.27
0.1	100	69.84	70.37	70.63	70.28	0.40
0.1	150	86.00	87.37	88.35	87.24	1.18
0.1	200	94.14	97.99	97.80	96.64	2.17
1	25	97.87	97.48	97.45	97.60	0.23
1	50	100.32	99.58	99.72	99.87	0.39
1	100	99.55	100.84	99.51	99.97	0.76
1	150	100.88	99.90	98.62	99.80	1.13
1	200	98.45	99.23	101.99	99.89	1.86

**ตารางที่ ก.7** ผลความเข้มข้นของฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายแก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0001	25	12.02	10.20	12.04	11.42	1.06
0.0001	50	12.04	11.86	11.94	11.95	0.09
0.0001	100	10.98	11.00	11.16	11.05	0.10
0.0001	150	13.35	11.13	12.46	12.31	1.12
0.0001	200	10.83	10.37	11.36	10.85	0.50
0.001	25	17.15	18.03	16.78	17.32	0.64
0.001	50	20.37	21.00	20.86	20.74	0.33
0.001	100	23.98	22.39	24.07	23.48	0.95
0.001	150	24.08	23.04	23.65	23.59	0.52
0.001	200	23.94	24.39	24.17	24.17	0.23
0.01	25	185.20	191.40	178.00	184.87	6.71
0.01	50	211.80	219.00	199.60	210.13	9.81
0.01	100	194.00	210.60	206.00	203.53	8.57
0.01	150	207.80	181.40	187.20	192.13	13.87
0.01	200	209.20	199.20	206.00	204.80	5.11
0.1	25	1,706.80	1,729.80	1,732.60	1,723.07	14.16
0.1	50	1,777.00	1,789.40	1,794.00	1,786.80	8.79
0.1	100	1,153.80	1,164.60	1,154.40	1,157.60	6.07
0.1	150	798.40	812.60	813.20	808.07	8.38
0.1	200	622.80	639.20	642.80	634.93	10.66
1	25	4,521.20	4,515.80	4,547.60	4,528.20	17.02
1	50	2,369.60	2,374.60	2,389.60	2,377.93	10.41
1	100	1,223.00	1,240.20	1,206.20	1,223.13	17.00
1	150	825.80	841.80	845.40	837.67	10.43
1	200	622.80	655.40	640.80	639.67	16.33

ตารางที่ ก.8 ผลร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้น กรดซัลฟิวริก (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วนของสารละลาย กรดต่อเถ้าสัลดจ์ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	ร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0001	25	0.23	0.20	0.23	0.22	0.02
0.0001	50	0.47	0.46	0.46	0.46	0.00
0.0001	100	0.85	0.85	0.86	0.86	0.01
0.0001	150	1.55	1.29	1.45	1.43	0.13
0.0001	200	1.68	1.61	1.76	1.68	0.08
0.001	25	0.33	0.35	0.33	0.34	0.01
0.001	50	0.79	0.81	0.81	0.80	0.01
0.001	100	1.86	1.74	1.87	1.82	0.07
0.001	150	2.80	2.68	2.75	2.74	0.06
0.001	200	3.71	3.78	3.75	3.75	0.03
0.01	25	3.59	3.71	3.45	3.58	0.13
0.01	50	8.21	8.49	7.73	8.14	0.38
0.01	100	15.03	16.32	15.96	15.77	0.66
0.01	150	24.16	21.09	21.76	22.33	1.61
0.01	200	32.42	30.87	31.93	31.74	0.79
0.1	25	33.07	33.51	33.57	33.38	0.27
0.1	50	68.86	69.34	69.51	69.24	0.34
0.1	100	89.42	90.25	89.46	89.71	0.47
0.1	150	92.81	94.46	94.53	93.93	0.97
0.1	200	96.53	99.07	99.63	98.41	1.65
1	25	87.59	87.49	88.11	87.73	0.33
1	50	91.82	92.01	92.59	92.14	0.40
1	100	94.78	96.11	93.48	94.79	1.32
1	150	95.99	97.85	98.27	97.37	1.21
1	200	96.53	101.58	99.32	99.14	2.53

**ตารางที่ ก.9** ผลความเข้มข้นของฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายเถ้าสัจจาจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสัจจา (มิลลิลิตรต่อกรัม)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.00	25.00	3.24	3.19	3.04	3.16	0.10
0.00	50.00	1.97	1.89	2.04	1.97	0.08
0.00	100.00	1.56	1.65	1.51	1.57	0.07
0.00	150.00	1.38	1.18	1.20	1.25	0.11
0.00	200.00	1.14	1.19	1.01	1.11	0.09
0.00	25.00	5.94	6.27	5.85	6.02	0.22
0.00	50.00	5.48	5.17	4.03	4.89	0.76
0.00	100.00	4.67	5.25	5.53	5.15	0.44
0.00	150.00	4.04	4.24	5.07	4.45	0.55
0.00	200.00	4.95	4.78	4.66	4.80	0.15
0.01	25.00	37.60	36.40	34.40	36.13	1.62
0.01	50.00	26.60	24.20	23.00	24.60	1.83
0.01	100.00	24.20	27.00	29.60	26.93	2.70
0.01	150.00	59.00	57.80	55.60	57.47	1.72
0.01	200.00	56.60	57.80	55.00	56.47	1.40
0.10	25.00	622.60	620.00	605.20	615.93	9.39
0.10	50.00	663.80	646.60	696.00	668.80	25.08
0.10	100.00	364.60	363.80	366.00	364.80	1.11
0.10	150.00	273.60	286.40	269.20	276.40	8.94
0.10	200.00	207.20	206.80	210.40	208.13	1.97
1.00	25.00	1,799.36	1,791.43	1,783.04	1,791.27	8.16
1.00	50.00	936.28	918.60	925.63	926.84	8.90
1.00	100.00	462.82	473.92	453.98	463.57	9.99
1.00	150.00	309.15	321.61	297.82	309.53	11.90
1.00	200.00	241.61	230.05	225.97	232.54	8.11

ตารางที่ ก.10 ผลร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายแล้วสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อแก้วสไลด์ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	ร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0001	25	0.14	0.13	0.13	0.13	0.00
0.0001	50	0.17	0.16	0.17	0.17	0.01
0.0001	100	0.26	0.28	0.25	0.26	0.01
0.0001	150	0.35	0.30	0.30	0.32	0.03
0.0001	200	0.38	0.40	0.34	0.37	0.03
0.001	25	0.25	0.26	0.25	0.25	0.01
0.001	50	0.46	0.43	0.34	0.41	0.06
0.001	100	0.78	0.88	0.93	0.86	0.07
0.001	150	1.02	1.07	1.28	1.12	0.14
0.001	200	1.66	1.60	1.56	1.61	0.05
0.01	25	1.02	0.95	0.86	0.94	0.08
0.01	50	2.06	1.86	1.93	1.95	0.10
0.01	100	4.06	4.53	4.97	4.52	0.45
0.01	150	8.31	8.66	7.96	8.31	0.35
0.01	200	12.69	11.75	11.21	11.89	0.75
0.1	25	26.13	26.02	25.40	25.85	0.39
0.1	50	55.72	54.28	58.42	56.14	2.10
0.1	100	61.21	61.08	61.44	61.24	0.19
0.1	150	68.90	72.12	67.79	69.60	2.25
0.1	200	69.57	69.44	70.64	69.88	0.66
1	25	75.52	75.19	74.83	75.18	0.34
1	50	78.59	77.11	77.70	77.80	0.75
1	100	77.70	79.56	76.21	77.82	1.68
1	150	77.85	80.99	75.00	77.95	3.00
1	200	81.12	77.24	75.87	78.08	2.72

**ตารางที่ ก.11** ผลความเข้มข้นของฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายเถ้าสัจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก (โมลต่อลิตร)	อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อเถ้าสัจ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0001	25	3.12	3.01	2.98	3.04	0.07
0.0001	50	2.02	1.99	2.14	2.05	0.08
0.0001	100	1.57	1.64	1.61	1.61	0.04
0.0001	150	1.34	1.37	1.27	1.33	0.05
0.0001	200	1.03	1.18	1.19	1.13	0.09
0.001	25	5.68	6.45	6.25	6.13	0.40
0.001	50	5.15	4.99	4.78	4.97	0.19
0.001	100	5.57	5.36	4.95	5.29	0.32
0.001	150	4.53	4.21	5.25	4.66	0.53
0.001	200	5.09	4.67	4.89	4.88	0.21
0.01	25	40.20	45.00	42.80	42.67	2.40
0.01	50	69.40	69.00	67.60	68.67	0.95
0.01	100	64.80	59.40	62.60	62.27	2.72
0.01	150	63.00	60.80	60.40	61.40	1.40
0.01	200	59.20	60.20	62.80	60.73	1.86
0.1	25	1,051.00	1,026.60	1,037.80	1,038.47	12.21
0.1	50	688.20	693.40	688.40	690.00	2.95
0.1	100	418.80	400.40	416.80	412.00	10.10
0.1	150	290.40	285.60	295.00	290.33	4.70
0.1	200	212.80	217.20	223.80	217.93	5.54
1	25	1,740.88	1,763.55	1,754.48	1,752.97	11.41
1	50	904.78	919.28	935.38	919.81	15.31
1	100	458.51	461.68	467.57	462.59	4.60
1	150	300.31	309.15	315.95	308.47	7.84
1	200	230.05	235.49	229.59	231.71	3.28

ตารางที่ ก.12 ผลร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส เมื่อชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย  
ชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้นกรด ซัลฟิวริก (โมล ต่อลิตร)	อัตราส่วนของสารละลาย กรดต่อเถ้าสัลดจ์ (มิลลิลิตรต่อกรัม)	ร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.0001	25	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00
0.0001	50	0.17	0.17	0.18	0.17	0.01
0.0001	100	0.26	0.28	0.27	0.27	0.01
0.0001	150	0.34	0.34	0.32	0.33	0.01
0.0001	200	0.35	0.40	0.40	0.38	0.03
0.001	25	0.24	0.27	0.26	0.26	0.02
0.001	50	0.43	0.42	0.40	0.42	0.02
0.001	100	0.94	0.90	0.83	0.89	0.05
0.001	150	1.14	1.06	1.32	1.17	0.13
0.001	200	1.71	1.57	1.64	1.64	0.07
0.01	25	1.69	1.89	1.80	1.79	0.10
0.01	50	5.83	5.79	5.67	5.76	0.08
0.01	100	10.88	9.97	10.51	10.45	0.46
0.01	150	15.86	15.31	15.21	15.46	0.35
0.01	200	19.88	20.21	21.09	20.39	0.62
0.1	25	44.11	43.09	43.56	43.58	0.51
0.1	50	57.77	58.20	57.78	57.92	0.25
0.1	100	70.31	67.22	69.97	69.17	1.69
0.1	150	73.13	71.92	74.29	73.11	1.18
0.1	200	71.45	72.93	75.14	73.17	1.86
1	25	73.07	74.02	73.64	73.57	0.48
1	50	75.95	77.17	78.52	77.21	1.28
1	100	76.97	77.51	78.50	77.66	0.77
1	150	75.62	77.85	79.56	77.68	1.97
1	200	77.24	79.07	77.09	77.80	1.10



ตารางที่ ก.13 ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัดในเถ้าสัจจาจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรเมื่อถูกชะละลายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

โลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัด
	ก่อนเติมเรซิน	หลังเติมเรซิน	
P	2,577.53	2,337.80	9.30
Mg	170.15	83.35	51.01
Ca	921.94	198.20	78.50
K	43.44	22.54	48.11
Zn	84.65	29.20	65.51
Mn	113.10	35.83	68.32
Cu	46.43	15.26	67.13
Cr	0.79	0.27	65.82
Ni	0.50	0.14	71.87
Pb	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ก.14 ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัดในเถ้าสัจจาจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรเมื่อถูกชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก

โลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัด
	ก่อนเติมเรซิน	หลังเติมเรซิน	
P	2,377.93	2,154.13	9.41
Mg	134.08	60.53	54.86
Ca	121.60	10.45	91.41
K	43.17	20.11	53.42
Zn	87.57	27.78	68.28
Mn	79.18	20.66	73.91
Cu	48.14	14.27	70.36
Cr	1.02	0.31	69.61

โลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัด
	ก่อนเติมเรซิน	หลังเติมเรซิน	
Ni	0.53	0.11	80.00
Pb	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ก.15 ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัดในถังสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเมื่อถูกชะละลายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

โลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัด
	ก่อนเติมเรซิน	หลังเติมเรซิน	
P	926.84	845.68	8.76
Mg	268.00	124.00	53.73
Ca	228.00	20.09	91.19
K	105.67	49.56	53.10
Zn	67.00	20.48	69.43
Mn	15.54	1.37	91.18
Cu	9.73	0.82	91.57
Cr	0.95	0.09	91.05
Ni	1.38	0.13	90.58
Pb	2.33	0.10	95.54

ตารางที่ ก.16 ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัดในถังสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเมื่อถูกชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก

โลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัด
	ก่อนเติมเรซิน	หลังเติมเรซิน	
P	919.81	838.17	8.88
Mg	218.35	93.58	57.14
Ca	30.95	2.16	93.02

โลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละของโลหะที่ถูกกำจัด
	ก่อนเติมเรซิน	หลังเติมเรซิน	
K	101.38	45.15	55.46
Zn	71.07	17.96	74.73
Mn	20.32	1.75	91.39
Cu	5.30	0.34	93.58
Cr	0.36	0.02	93.59
Ni	1.57	0.16	89.81
Pb	1.84	0.07	96.36

ตารางที่ ก.17 ผลของน้ำหนักรวม เมื่อชะละลายเข้าสู่สัตจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 1

$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1:1:1	8.5	0.7085	0.8271	0.1186	0.5	7.2
1:1:1	9.0	0.7120	0.8668	0.1548	0.6	7.7
1:1:1	9.5	0.7097	0.9132	0.2035	0.6	9.5
1:1:1	10.0	0.7328	0.9234	0.1906	0.5	9.8
1.6:1:1	8.5	0.6381	0.8211	0.1830	0.7	7.8
1.6:1:1	9.0	0.5396	0.7376	0.1980	0.7	8.5
1.6:1:1	9.5	0.5838	0.8037	0.2199	0.7	9.2
1.6:1:1	10.0	0.5773	0.8130	0.2357	0.7	9.5
2:1:1	8.5	0.5753	0.7881	0.2128	0.7	8.4
2:1:1	9.0	0.4355	0.6510	0.2155	0.7	8.7

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระตาศกรอง + ฟอยด์	กระตาศกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
2:1:1	9.5	0.4368	0.6968	0.2600	0.7	9.5
2:1:1	10.0	0.4383	0.6719	0.2336	0.7	9.1

ตารางที่ ก.18 ผลของน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเข้าสัตจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 2

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระตาศกรอง + ฟอยด์	กระตาศกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1:1:1	8.5	0.4406	0.6288	0.1882	0.6	7.0
1:1:1	9.0	0.4034	0.6460	0.2426	0.6	7.7
1:1:1	9.5	0.4402	0.6815	0.2413	0.8	8.7
1:1:1	10.0	0.4084	0.6667	0.2583	0.7	10.0
1.6:1:1	8.5	0.4452	0.7467	0.3015	0.7	7.6
1.6:1:1	9.0	0.4018	0.7034	0.3016	0.7	8.1
1.6:1:1	9.5	0.4408	0.7797	0.3389	0.8	9.4
1.6:1:1	10.0	0.4571	0.7965	0.3394	0.7	9.8
2:1:1	8.5	0.4460	0.7672	0.3212	0.6	7.8
2:1:1	9.0	0.4113	0.7619	0.3506	0.6	8.6
2:1:1	9.5	0.3949	0.7650	0.3701	0.7	9.2
2:1:1	10.0	0.4399	0.8626	0.4227	0.8	9.8

ตารางที่ ก.19 ผลของน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 3

$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1:1:1	8.5	0.3882	0.5907	0.2025	0.7	7.3
1:1:1	9.0	0.3905	0.5969	0.2064	0.7	7.6
1:1:1	9.5	0.4061	0.6232	0.2171	0.7	9.3
1:1:1	10.0	0.4251	0.6953	0.2702	0.7	10.0
1.6:1:1	8.5	0.5268	0.8111	0.2843	0.8	7.5
1.6:1:1	9.0	0.5217	0.7905	0.2688	0.7	7.8
1.6:1:1	9.5	0.4922	0.7927	0.3005	0.8	8.0
1.6:1:1	10.0	0.5331	0.8744	0.3413	0.7	9.7
2:1:1	8.5	0.5467	0.8590	0.3123	0.8	7.3
2:1:1	9.0	0.5081	0.8734	0.3653	0.7	8.8
2:1:1	9.5	0.5029	0.8493	0.3464	0.7	8.4
2:1:1	10.0	0.4881	0.8930	0.4049	0.7	9.6

ตารางที่ ก.20 ผลของน้ำหนักผลึกเฉลี่ย เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร

$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนักผลึกรวม (กรัม)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
1:1:1	8.5	0.1186	0.1882	0.2025	0.1954	0.0101
1:1:1	9.0	0.1548	0.2426	0.2064	0.2245	0.0256
1:1:1	9.5	0.2035	0.2413	0.2171	0.2292	0.0171

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนักผลิตรวม (กรัม)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
1:1:1	10.0	0.1906	0.2583	0.2702	0.2643	0.0084
1.6:1:1	8.5	0.1830	0.3015	0.2843	0.2929	0.0122
1.6:1:1	9.0	0.1980	0.3016	0.2688	0.2852	0.0232
1.6:1:1	9.5	0.2199	0.3389	0.3005	0.3197	0.0272
1.6:1:1	10.0	0.2357	0.3394	0.3413	0.3404	0.0013
2:1:1	8.5	0.2128	0.3212	0.3123	0.3168	0.0063
2:1:1	9.0	0.2155	0.3506	0.3653	0.3580	0.0104
2:1:1	9.5	0.2600	0.3701	0.3464	0.3583	0.0168
2:1:1	10.0	0.2336	0.4227	0.4049	0.4138	0.0126

หมายเหตุ : นำข้อมูลเฉพาะครั้งที่ 2 และ 3 มาคิดค่าเฉลี่ย เนื่องจากข้อมูลครั้งที่ 1 ค่าแตกต่างกันมาก

**ตารางที่ ก.21** ผลของน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเข้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 1

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1:1:1	8.5	0.4972	0.6354	0.1382	0.8	7.2
1:1:1	9.0	0.4569	0.6777	0.2208	0.8	7.9
1:1:1	9.5	0.5332	0.7789	0.2457	0.7	8.2
1:1:1	10.0	0.4253	0.6934	0.2681	0.8	9.6
1.6:1:1	8.6	0.3766	0.5004	0.1238	0.8	6.9
1.6:1:1	9.0	0.3760	0.6420	0.2660	0.7	7.8
1.6:1:1	9.5	0.4071	0.8319	0.4248	0.7	9.2

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1.6:1:1	10.0	0.3923	0.8326	0.4403	0.7	10.1
2:1:1	8.5	0.4098	0.5730	0.1632	0.7	7.4
2:1:1	9.0	0.4210	0.5798	0.1588	0.7	7.4
2:1:1	9.5	0.4095	0.7468	0.3373	0.7	8.4
2:1:1	10.0	0.3945	0.7790	0.3845	0.7	10.0

ตารางที่ ก.22 ผลของน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 2

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1:1:1	8.5	0.4368	0.4949	0.0581	0.5	7.5
1:1:1	9.0	0.4132	0.6378	0.2246	0.6	8.5
1:1:1	9.5	0.4441	0.5588	0.1147	0.6	7.4
1:1:1	10.0	0.4376	0.6526	0.2150	0.5	10.5
1.6:1:1	8.5	0.4294	0.5152	0.0858	0.6	6.3
1.6:1:1	9.0	0.4189	0.6727	0.2538	0.6	8.1
1.6:1:1	9.5	0.4113	0.8025	0.3912	0.6	9.4
1.6:1:1	10.0	0.4135	0.7868	0.3733	0.6	10.4
2:1:1	8.5	0.4315	0.5444	0.1129	0.6	8.1
2:1:1	9.0	0.4260	0.6378	0.2118	0.6	8.8

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะ ละลาย	หลังตก ผลึก
2:1:1	9.5	0.4337	0.7588	0.3251	0.6	9.5
2:1:1	10.0	0.4327	0.7841	0.3514	0.6	10.4

ตารางที่ ก.23 ผลของน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเข้าสัตจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 3

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษ กรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะ ละลาย	หลังตก ผลึก
1:1:1	8.5	0.5154	0.6272	0.1118	0.5	7.5
1:1:1	9.0	0.5615	0.7548	0.1933	0.5	8.1
1:1:1	9.5	0.4175	0.6603	0.2428	0.5	9.0
1:1:1	10.0	0.4142	0.6455	0.2313	0.6	10.0
1.6:1:1	8.5	0.6218	0.8073	0.1855	0.6	7.5
1.6:1:1	9.0	0.5042	0.8034	0.2992	0.7	8.0
1.6:1:1	9.5	0.4657	0.8639	0.3982	0.6	8.9
1.6:1:1	10.0	0.4833	0.8786	0.3953	0.6	9.8
2:1:1	8.5	0.4853	0.6155	0.1302	0.6	7.3
2:1:1	9.0	0.5005	0.7653	0.2648	0.6	8.4
2:1:1	9.5	0.4726	0.8074	0.3348	0.7	9.0
2:1:1	10.0	0.5073	0.8571	0.3498	0.6	10.2



ตารางที่ ก.24 ผลของน้ำหนักรวมผลึกเฉลี่ย เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร

Mg <sup>2+</sup> :NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> :PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	pH	น้ำหนักรวมผลึก (กรัม)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
1:1:1	8.5	0.1382	0.0581	0.1118	0.0408	0.1027
1:1:1	9.0	0.2208	0.2246	0.1933	0.0171	0.2129
1:1:1	9.5	0.2457	0.1147	0.2428	0.0748	0.2011
1:1:1	10.0	0.2681	0.2150	0.2313	0.0272	0.2381
1.6:1:1	8.5	0.1238	0.0858	0.1855	0.0503	0.1317
1.6:1:1	9.0	0.2660	0.2538	0.2992	0.0235	0.2730
1.6:1:1	9.5	0.4248	0.3912	0.3982	0.0177	0.4047
1.6:1:1	10.0	0.4403	0.3733	0.3953	0.0342	0.4030
2:1:1	8.5	0.1632	0.1129	0.1302	0.0256	0.1354
2:1:1	9.0	0.1588	0.2118	0.2648	0.0530	0.2118
2:1:1	9.5	0.3373	0.3251	0.3348	0.0064	0.3324
2:1:1	10.0	0.3845	0.3514	0.3498	0.0196	0.3619

ตารางที่ ก.25 ผลของน้ำหนักรวมผลึก เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วย สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ Mg<sup>2+</sup> : NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> และ ค่า pH ครั้งที่ 1

Mg <sup>2+</sup> :NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> :PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	pH	น้ำหนักรวม (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1:1:1	8.5	0.4855	0.5665	0.0810	0.8	7.7
1:1:1	9.0	0.5027	0.6215	0.1188	0.8	8.3

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยล์	กระดาษกรอง + ฟอยล์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะ ละลาย	หลัง ตก ผลึก
1:1:1	9.5	0.4619	0.6079	0.1460	0.8	9.3
1:1:1	10.0	0.4847	0.6135	0.1288	0.7	10.1
1.6:1:1	8.5	0.4408	0.5622	0.1214	0.7	7.7
1.6:1:1	9.0	0.4442	0.6200	0.1758	0.7	8.3
1.6:1:1	9.5	0.4369	0.5917	0.1548	0.7	9.3
1.6:1:1	10.0	0.4137	0.5452	0.1315	0.7	10
2:1:1	8.5	0.3899	0.5064	0.1165	0.8	7.3
2:1:1	9.0	0.4008	0.5314	0.1306	0.7	8.3
2:1:1	9.5	0.4533	0.5681	0.1148	0.7	9.2
2:1:1	10.0	0.4445	0.6225	0.1780	0.7	10

ตารางที่ ก.26 ผลของน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเข้าสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 2

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยล์	กระดาษกรอง + ฟอยล์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะ ละลาย	หลังตก ผลึก
1:1:1	8.5	0.5803	0.6705	0.0902	0.5	7
1:1:1	9.0	0.5336	0.6457	0.1121	0.5	8.1
1:1:1	9.5	0.5355	0.6753	0.1398	0.5	9.4
1:1:1	10.0	0.4615	0.5684	0.1069	0.7	7.5
1.6:1:1	8.5	0.5555	0.6469	0.0914	0.6	7.5

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาศกรอง + ฟอยด์	กระดาศกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะ ละลาย	หลังตก ผลึก
1.6:1:1	9.0	0.5479	0.6598	0.1119	0.7	6.9
1.6:1:1	9.5	0.5498	0.6859	0.1361	0.6	9
1.6:1:1	10.0	0.5734	0.7010	0.1276	0.6	9.4
2:1:1	8.5	0.5822	0.6734	0.0912	0.7	6.3
2:1:1	9.0	0.5843	0.6593	0.0750	0.7	7.2
2:1:1	9.5	0.4540	0.5534	0.0994	0.7	8.3
2:1:1	10.0	0.4105	0.5711	0.1606	0.7	8.6

ตารางที่ ก.27 ผลของน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเข้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 3

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาศกรอง + ฟอยด์	กระดาศกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะ ละลาย	หลัง ตก ผลึก
1:1:1	8.5	0.4413	0.5263	0.0850	0.7	7.5
1:1:1	9.0	0.4824	0.5789	0.0965	0.6	8.3
1:1:1	9.5	0.5042	0.6453	0.1411	0.7	9.4
1:1:1	10.0	0.5245	0.6498	0.1253	0.7	9.4
1.6:1:1	8.5	0.4793	0.5812	0.1019	0.6	7.7
1.6:1:1	9.0	0.4594	0.6167	0.1573	0.7	7.8
1.6:1:1	9.5	0.5042	0.6173	0.1131	0.6	8.1
1.6:1:1	10.0	0.4662	0.5999	0.1337	0.6	9.6

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาศกรอง + ฟอยด์	กระดาศกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะ ละลาย	หลัง ตก ผลึก
2:1:1	8.5	0.4293	0.5328	0.1035	0.7	6.7
2:1:1	9.0	0.4416	0.5634	0.1218	0.7	7.8
2:1:1	9.5	0.4160	0.5173	0.1013	0.8	8.6
2:1:1	10.0	0.4025	0.5679	0.1654	0.7	9.3

ตารางที่ ก.28 ผลของน้ำหนักผลึกเฉลี่ย เมื่อชะละลายเข้าสู่สัตจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนักผลึกรวม (กรัม)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
1:1:1	8.5	0.0810	0.0902	0.0850	0.0854	0.0046
1:1:1	9.0	0.1188	0.1121	0.0965	0.1091	0.0114
1:1:1	9.5	0.1460	0.1398	0.1411	0.1423	0.0033
1:1:1	10.0	0.1288	0.1069	0.1253	0.1203	0.0118
1.6:1:1	8.5	0.1214	0.0914	0.1019	0.1049	0.0152
1.6:1:1	9.0	0.1758	0.1119	0.1573	0.1483	0.0329
1.6:1:1	9.5	0.1548	0.1361	0.1131	0.1347	0.0209
1.6:1:1	10.0	0.1315	0.1276	0.1337	0.1309	0.0031
2:1:1	8.5	0.1165	0.0912	0.1035	0.1037	0.0127
2:1:1	9.0	0.1306	0.0750	0.1218	0.1091	0.0299
2:1:1	9.5	0.1148	0.0994	0.1013	0.1052	0.0084
2:01:01	10.0	0.1780	0.1606	0.1654	0.1680	0.0090

ตารางที่ ก.29 ผลของน้ำหนักผลึก เมื่อชะละลายเข้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 1

$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1:1:1	8.5	0.4370	0.5397	0.1027	0.5	7.8
1:1:1	9.0	0.4614	0.5886	0.1272	0.5	8.8
1:1:1	9.5	0.4616	0.6481	0.1865	0.6	9.6
1:1:1	10.0	0.4441	0.5930	0.1489	0.5	8.9
1.6:1:1	8.5	0.4598	0.5546	0.0948	0.6	7.8
1.6:1:1	9.0	0.4490	0.6233	0.1743	0.5	9.1
1.6:1:1	9.5	0.4498	0.6622	0.2124	0.6	9.3
1.6:1:1	10.0	0.4777	0.6638	0.1861	0.6	10.0
2:1:1	8.5	0.4924	0.6313	0.1389	0.6	8.1
2:1:1	9.0	0.4896	0.6623	0.1727	0.5	9.0
2:1:1	9.5	0.5054	0.7060	0.2006	0.6	9.3
2:1:1	10.0	0.4737	0.6114	0.1377	0.6	10.0

ตารางที่ ก.30 ผลของน้ำหนักรวมผลึก เมื่อชะละลายเข้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 2

$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1:1:1	8.5	0.4833	0.5676	0.0843	0.7	6.8
1:1:1	9.0	0.4281	0.5171	0.0890	0.7	6.4
1:1:1	9.5	0.4885	0.6079	0.1194	0.7	8.8
1:1:1	10.0	0.5020	0.6539	0.1519	0.7	9.5
1.6:1:1	8.5	0.4230	0.5465	0.1235	0.7	7.4
1.6:1:1	9.0	0.3782	0.4865	0.1083	0.7	3.8
1.6:1:1	9.5	0.4118	0.5560	0.1442	0.7	9.1
1.6:1:1	10.0	0.4253	0.5482	0.1229	0.7	9.5
2:1:1	8.5	0.5143	0.6260	0.1117	0.7	7.1
2:1:1	9.0	0.4427	0.5458	0.1031	0.7	5.9
2:1:1	9.5	0.5200	0.6627	0.1427	0.7	9.0
2:1:1	10.0	0.4315	0.5815	0.1500	0.7	9.5

ตารางที่ ก.31 ผลของน้ำหนักรวมผลึก เมื่อชะละลายเข้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปรับค่าอัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  และค่า pH ครั้งที่ 3

$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนัก (กรัม)			pH	
		กระดาษกรอง + ฟอยด์	กระดาษกรอง + ฟอยด์ + ผลึก	ผลึก	หลังชะละลาย	หลังตกผลึก
1:1:1	8.5	0.5567	0.6346	0.0779	0.7	6.9
1:1:1	9.0	0.5487	0.6395	0.0908	0.6	7.2
1:1:1	9.5	0.5034	0.6178	0.1144	0.7	9.0
1:1:1	10.0	0.5112	0.6606	0.1494	0.7	9.5
1.6:1:1	8.5	0.4897	0.5995	0.1098	0.6	7.5
1.6:1:1	9.0	0.5434	0.6698	0.1264	0.6	8.5
1.6:1:1	9.5	0.4618	0.6085	0.1467	0.7	8.6
1.6:1:1	10.0	0.5357	0.6718	0.1361	0.7	8.7
2:1:1	8.5	0.5245	0.6215	0.0970	0.7	7.0
2:1:1	9.0	0.5367	0.6569	0.1202	0.7	7.5
2:1:1	9.5	0.5338	0.6640	0.1302	0.7	8.7
2:1:1	10.0	0.5561	0.6961	0.1400	0.6	9.5

ตารางที่ ก.32 ผลของน้ำหนักรวมผลึกเฉลี่ย เมื่อชะละลายเข้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร

$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนักรวมผลึก (กรัม)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
1:1:1	8.5	0.1027	0.0843	0.0779	0.0883	0.0129
1:1:1	9.0	0.1272	0.0890	0.0908	0.1023	0.0216

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	น้ำหนักผลิตรวม (กรัม)				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
1:1:1	9.5	0.1865	0.1194	0.1144	0.1401	0.0403
1:1:1	10.0	0.1489	0.1519	0.1494	0.1501	0.0016
1.6:1:1	8.5	0.0948	0.1235	0.1098	0.1094	0.0144
1.6:1:1	9.0	0.1743	0.1083	0.1264	0.1363	0.0341
1.6:1:1	9.5	0.2124	0.1442	0.1467	0.1678	0.0387
1.6:1:1	10.0	0.1861	0.1229	0.1361	0.1484	0.0333
2:1:1	8.5	0.1389	0.1117	0.0970	0.1159	0.0213
2:1:1	9.0	0.1727	0.1031	0.1202	0.1320	0.0363
2:1:1	9.5	0.2006	0.1427	0.1302	0.1578	0.0376
2:1:1	10.0	0.1377	0.1500	0.1400	0.1426	0.0065

ตารางที่ ก.33 ผลร้อยละของการนำฟอสฟอรัสกลับคืน เมื่อชะละลายแล้วสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสีย ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	ฟอสเฟตที่เหลือในสารละลายหลังจากตกผลึก (mg/L)	ฟอสเฟตที่ตกผลึก (mg/L)	ร้อยละของฟอสเฟตที่เหลือในสารละลาย	% P กลับคืนจากสารละลาย	% P กลับคืนจากแล้วสกัด
1:1:1	8.5	199.74	6,962.11	2.79	97.21	87.97
1:1:1	9.0	150.58	7,011.28	2.10	97.90	88.59
1:1:1	9.5	95.88	7,065.98	1.34	98.66	89.29
1:1:1	10.0	80.62	7,081.24	1.13	98.87	89.48
1.6:1:1	8.5	129.23	7,032.62	1.80	98.20	88.86
1.6:1:1	9.0	78.72	7,083.13	1.10	98.90	89.50



$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย หลังจากตก ผลึก (mg/L)	ฟอสเฟตที่ ตกผลึก (mg/L)	ร้อยละของ ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย	% P กลับคืน จาก สารละลาย	% P กลับคืน จากแก้ว สลัดจ์
1.6:1:1	9.5	55.16	7,106.69	0.77	99.23	89.80
1.6:1:1	10.0	33.63	7,128.22	0.47	99.53	90.07
2:1:1	8.5	75.56	7,086.30	1.06	98.94	89.54
2:1:1	9.0	39.83	7,122.03	0.56	99.44	89.99
2:1:1	9.5	24.13	7,137.72	0.34	99.66	90.19
2:1:1	10.0	26.49	7,135.37	0.37	99.63	90.16

ตารางที่ ก.34 ผลร้อยละของการนำฟอสฟอรัสกลับคืน เมื่อชะละลายแก้วสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย  
ฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย หลังจากตก ผลึก (mg/L)	ฟอสเฟตที่ ตกผลึก (mg/L)	ร้อยละของ ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย	% P กลับคืน จาก สารละลาย	% P กลับคืน จากแก้ว สลัดจ์
1:1:1	8.5	715.19	5,890.47	10.83	89.17	74.43
1:1:1	9.0	485.08	6,120.59	7.34	92.66	77.34
1:1:1	9.5	374.87	6,230.80	5.67	94.33	78.73
1:1:1	10.0	253.99	6,351.68	3.85	96.15	80.26
1.6:1:1	8.5	216.45	6,389.22	3.28	96.72	80.73
1.6:1:1	9.0	69.06	6,536.61	1.05	98.95	82.60
1.6:1:1	9.5	41.57	6,564.10	0.63	99.37	82.94
1.6:1:1	10.0	10.44	6,595.23	0.16	99.84	83.34
2:1:1	8.5	97.77	6,507.90	1.48	98.52	82.23

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย หลังจากตก ผลึก (mg/L)	ฟอสเฟตที่ ตกผลึก (mg/L)	ร้อยละของ ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย	% P กลับคืน จาก สารละลาย	% P กลับคืน จากเถ้า สกัด
2:1:1	9.0	56.93	6,548.74	0.86	99.14	82.75
2:1:1	9.5	24.43	6,581.24	0.37	99.63	83.16
2:1:1	10.0	4.04	6,601.63	0.06	99.94	83.42

ตารางที่ ก.35 ผลร้อยละของการนำฟอสฟอรัสกลับคืน เมื่อชะละลายเถ้าสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสีย  
ชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย หลังจากตก ผลึก (mg/L)	ฟอสเฟตที่ ตกผลึก (mg/L)	ร้อยละของ ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย	% P กลับคืน จาก สารละลาย	% P กลับคืน จากเถ้า สกัด
1:1:1	8.5	196.37	2,396.92	7.57	92.43	65.61
1:1:1	9.0	162.61	2,430.67	6.27	93.73	66.54
1:1:1	9.5	113.88	2,479.41	4.39	95.61	67.87
1:1:1	10.0	110.22	2,483.06	4.25	95.75	67.97
1.6:1:1	8.5	72.98	2,520.31	2.81	97.19	68.99
1.6:1:1	9.0	33.39	2,559.90	1.29	98.71	70.07
1.6:1:1	9.5	17.61	2,575.67	0.68	99.32	70.50
1.6:1:1	10.0	5.02	2,588.27	0.19	99.81	70.85
2:1:1	8.5	45.96	2,547.33	1.77	98.23	69.73
2:1:1	9.0	27.43	2,565.86	1.06	98.94	70.24
2:1:1	9.5	4.71	2,588.57	0.18	99.82	70.86
2:1:1	10.0	4.22	2,589.06	0.16	99.84	70.87

ตารางที่ ก.36 ผลร้อยละของการนำฟอสฟอรัสกลับคืน เมื่อชะละลายเถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสีย  
ชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร

$Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$	pH	ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย หลังจากตก ผลึก (mg/L)	ฟอสเฟตที่ ตกผลึก (mg/L)	ร้อยละของ ฟอสเฟตที่ เหลือใน สารละลาย	% P กลับคืน จาก สารละลาย	% P กลับคืน จากเถ้า สัลดิจ
1:1:1	8.5	643.42	1,926.84	25.03	74.97	52.74
1:1:1	9.0	546.81	2,023.45	21.27	78.73	55.39
1:1:1	9.5	391.36	2,178.90	15.23	84.77	59.64
1:1:1	10.0	281.89	2,288.36	10.97	89.03	62.64
1.6:1:1	8.5	365.43	2,204.83	14.22	85.78	60.35
1.6:1:1	9.0	250.41	2,319.85	9.74	90.26	63.50
1.6:1:1	9.5	62.12	2,508.14	2.42	97.58	68.66
1.6:1:1	10.0	24.07	2,546.18	0.94	99.06	69.70
2:1:1	8.5	319.14	2,251.12	12.42	87.58	61.62
2:1:1	9.0	123.05	2,447.21	4.79	95.21	66.99
2:1:1	9.5	31.07	2,539.19	1.21	98.79	69.51
2:1:1	10.0	15.84	2,554.41	0.62	99.38	69.92

ตารางที่ ก.37 ผลร้อยละของการกำจัดโลหะ เมื่อชะละลายเถ้าสัลดิจฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรด  
ไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่ปริมาณเรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกต่างๆ

เรซิน (กรัม/สารละลาย 25 มิลลิลิตร )	ร้อยละของการกำจัดโลหะ					
	Mn	Zn	Cu	Cr	Ni	P
4	46.31	39.07	41.60	40.61	51.12	5.74
5	52.81	44.33	50.72	48.24	59.90	6.62

เรซิน (กรัม/สารละลาย 25 มิลลิลิตร )	ร้อยละของการกำจัดโลหะ					
	Mn	Zn	Cu	Cr	Ni	P
6	58.89	53.52	56.93	53.69	64.49	7.69
7	64.85	58.79	62.95	60.04	70.27	8.50
8	68.32	65.51	67.13	65.82	71.87	9.30
9	70.18	69.56	68.66	67.43	72.27	10.37



ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometer)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.1 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณโลหะหนักของสัลดจ์

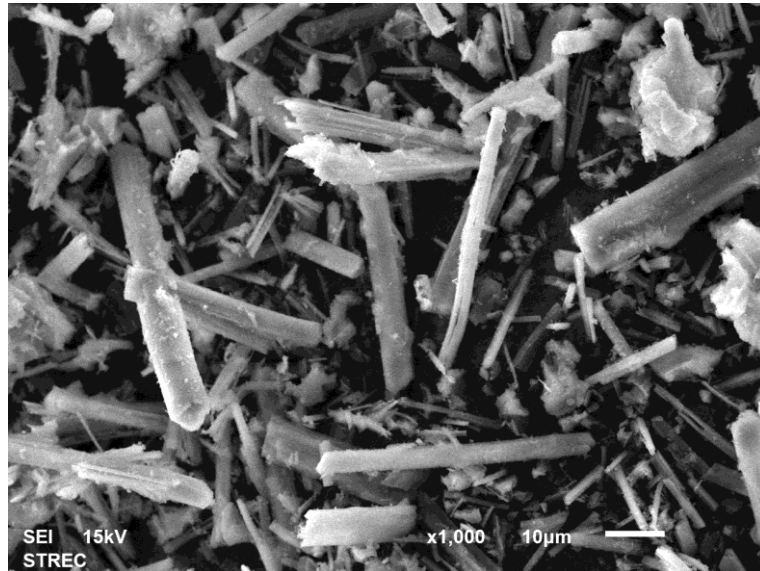
พารามิเตอร์	ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีและปริมาณโลหะหนักของสัลดจ์		
	หลังเผาที่ 850 °C	หลังเผาที่ 550 °C	
	สัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร	สัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร	สัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน
CaO	35.490	36.990	8.380
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<b>29.690</b>	<b>29.570</b>	<b>13.650</b>
SiO <sub>2</sub>	13.530	12.510	41.920
SO <sub>3</sub>	3.916	4.590	3.930
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.354	5.260	9.510
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.555	5.360	15.290
MgO	2.467	2.350	3.160
K <sub>2</sub> O	1.090	1.050	2.630
Na <sub>2</sub> O	0.814	0.380	0.390
Mn	0.630	0.662	0.115
Zn	0.673	0.703	0.413
Cu	0.465	0.494	0.157
Cr	0.010	0.012	0.018
Ni	0.003	0.004	0.012
Pb	0.000	0.000	0.024

หมายเหตุ : ปริมาณ P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> จากการเผาสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร ที่อุณหภูมิ 850 °C และ 550 °C มีค่าใกล้เคียงกันมาก

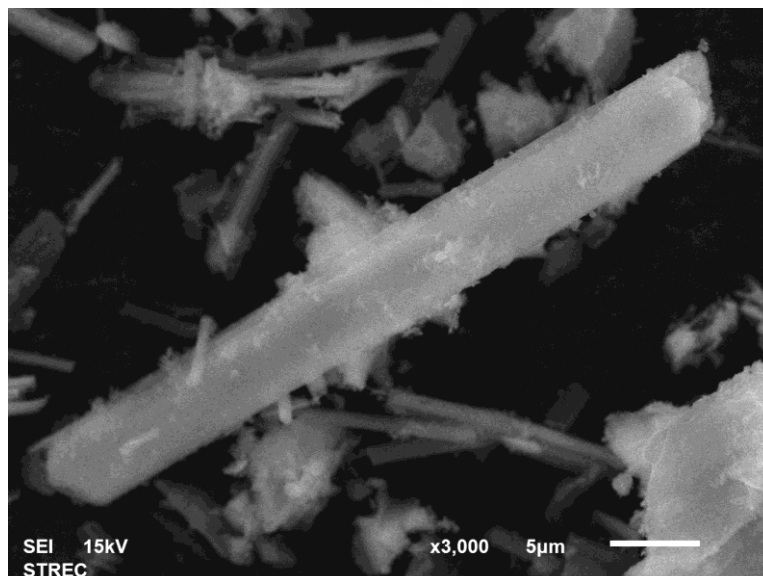
ภาคผนวก ค.  
ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**รูปที่ ค.1** ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัจจาจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

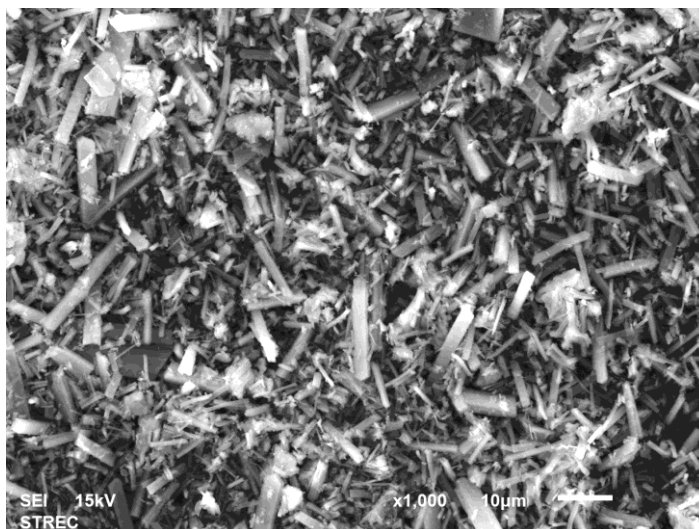


**รูปที่ ค.2** ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัจจาจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

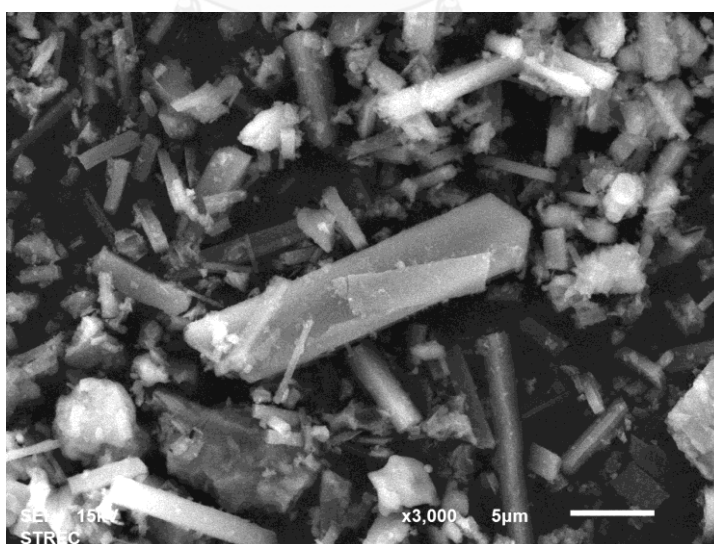




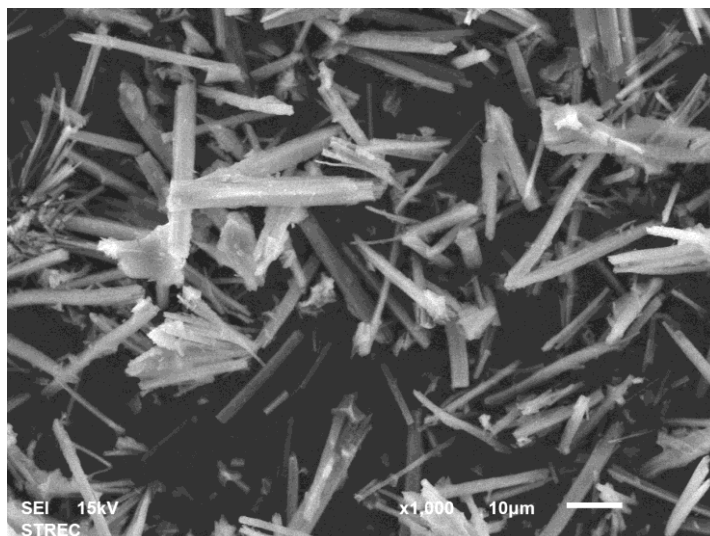
**รูปที่ ค.3** ผลึกsturว์ไท์ที่เกิดจากการชะละลายเ้าสลัดจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+}$ :  $NH_4^+$ :  $PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



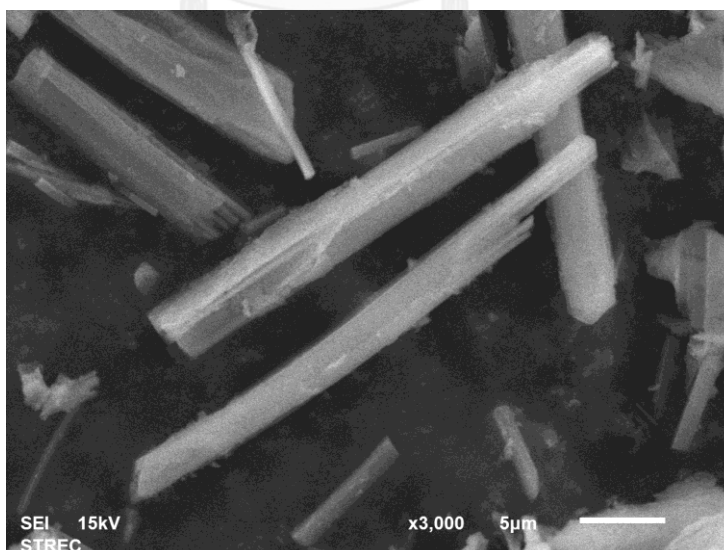
**รูปที่ ค.4** ผลึกsturว์ไท์ที่เกิดจากการชะละลายเ้าสลัดจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+}$ :  $NH_4^+$ :  $PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



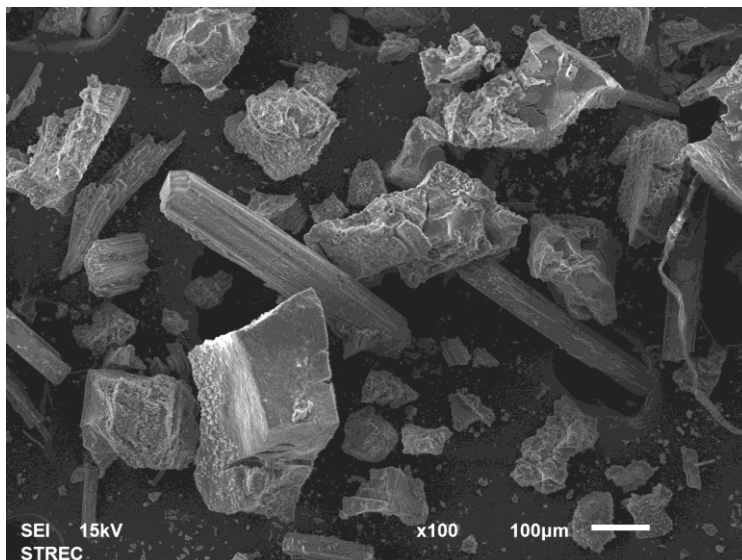
**รูปที่ ค.5** ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+}$ :  $NH_4^+$ :  $PO_4^{3-}$  เท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



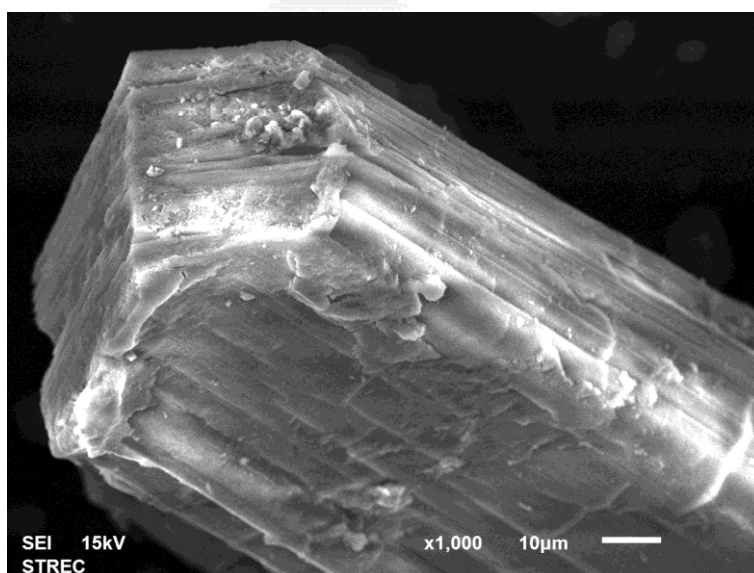
**รูปที่ ค.6** ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+}$ :  $NH_4^+$ :  $PO_4^{3-}$  เท่ากับ 2:1:1 และพีเอชเท่ากับ 10 ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



รูปที่ ค.7 ผลึกsturite ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัจชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ ค.8 ผลึกsturite ที่เกิดจากการชะละลายเถ้าสัจชุมชนด้วยกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$  เท่ากับ 1.6:1:1 และพีเอชเท่ากับ 9.5 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



ภาคผนวก ง.

ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ตารางที่ ง.1** ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 ในช่วงพีเอช

ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	1,832.51
2	9.00	แอมโมเนียม	1,357.41
3	9.50	ฟอสเฟต	7,161.86
4	10.00	คลอไรด์	40,305.47
		ซิลิเกต	488.97
		แคลเซียม	198.20
		โซเดียม	85.37
		โพแทสเซียม	22.54
		สังกะสี	29.20
		แมงกานีส	35.83
		ทองแดง	15.26
		โครเมียม	0.27
		นิกเกิล	0.14

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเก้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	2,932.01
2	9.00	แอมโมเนียม	1,357.41
3	9.50	ฟอสเฟต	7,161.86
4	10.00	คลอไรด์	43,518.01
		ซัลเฟต	488.97
		แคลเซียม	198.20
		โซเดียม	85.37
		โพแทสเซียม	22.54
		สังกะสี	29.20
		แมงกานีส	35.83
		ทองแดง	15.26
		โครเมียม	0.27
		นิกเกิล	0.14

**ตารางที่ ง.3** ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเก้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	3,665.01
2	9.00	แอมโมเนียม	1,357.41
3	9.50	ฟอสเฟต	7,161.86
4	10.00	คลอไรด์	45,659.70
		ซัลเฟต	488.97
		แคลเซียม	198.20
		โซเดียม	85.37
		โพแทสเซียม	22.54
		สังกะสี	29.20
		แมงกานีส	35.83
		ทองแดง	15.26
		โครเมียม	0.27
		นิกเกิล	0.14

**ตารางที่ ง.4** ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	1,690.20
2	9.00	แอมโมเนียม	1,252.00
3	9.50	ฟอสเฟต	6,605.67
4	10.00	คลอไรด์	7,420.49
		ซัลเฟต	87,993.21
		แคลเซียม	10.45
		โซเดียม	83.09
		โพแทสเซียม	20.11
		สังกะสี	27.78
		แมงกานีส	20.66
		ทองแดง	14.27
		โครเมียม	0.31
		นิกเกิล	0.11



ตารางที่ ง.5 ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	2,704.31
2	9.00	แอมโมเนียม	1,252.00
3	9.50	ฟอสเฟต	6,605.67
4	10.00	คลอไรด์	10,383.55
		ซัลเฟต	87,993.21
		แคลเซียม	10.45
		โซเดียม	83.09
		โพแทสเซียม	20.11
		สังกะสี	27.78
		แมงกานีส	20.66
		ทองแดง	14.27
		โครเมียม	0.31
		นิกเกิล	0.11

**ตารางที่ ง.6** ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	3,380.39
2	9.00	แอมโมเนียม	1,252.00
3	9.50	ฟอสเฟต	6,605.67
4	10.00	คลอไรด์	12,358.92
		ซัลเฟต	87,993.21
		แคลเซียม	10.45
		โซเดียม	83.09
		โพแทสเซียม	20.11
		สังกะสี	27.78
		แมงกานีส	20.66
		ทองแดง	14.27
		โครเมียม	0.31
		นิกเกิล	0.11

ตารางที่ ง.7 ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	663.55
2	9.00	แอมโมเนียม	491.52
3	9.50	ฟอสเฟต	2,593.29
4	10.00	คลอไรด์	37,829.62
		ซัลเฟต	185.74
		แคลเซียม	20.09
		โซเดียม	51.04
		โพแทสเซียม	49.56
		สังกะสี	20.48
		แมงกานีส	1.37
		ทองแดง	0.82
		โครเมียม	0.09
		นิกเกิล	0.13
		ตะกั่ว	0.10

ตารางที่ ง.8 ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเก้าสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช
1	8.50
2	9.00
3	9.50
4	10.00

ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
แมกนีเซียม	1,061.67
แอมโมเนียม	491.52
ฟอสเฟต	2,593.29
คลอไรด์	38,992.88
ซัลเฟต	185.74
แคลเซียม	20.09
โซเดียม	51.04
โพแทสเซียม	49.56
สังกะสี	20.48
แมงกานีส	1.37
ทองแดง	0.82
โครเมียม	0.09
นิกเกิล	0.13
ตะกั่ว	0.10

ตารางที่ ง.9 ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเก้าสัปดาห์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	1,327.09
2	9.00	แอมโมเนียม	491.52
3	9.50	ฟอสเฟต	2,593.29
4	10.00	คลอไรด์	39,768.38
		ซัลเฟต	185.74
		แคลเซียม	20.09
		โซเดียม	51.04
		โพแทสเซียม	49.56
		สังกะสี	20.48
		แมงกานีส	1.37
		ทองแดง	0.82
		โครเมียม	0.09
		นิกเกิล	0.13
		ตะกั่ว	0.10

ตารางที่ ง.10 ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเก้าสัปดาห์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	657.65
2	9.00	แอมโมเนียม	487.15
3	9.50	ฟอสเฟต	2,570.26
4	10.00	คลอไรด์	2,909.02
		ซัลเฟต	64,116.18
		แคลเซียม	2.16
		โซเดียม	45.61
		โพแทสเซียม	45.15
		สังกะสี	17.96
		แมงกานีส	1.75
		ทองแดง	0.34
		โครเมียม	0.02
		นิกเกิล	0.16
		ตะกั่ว	0.07

ตารางที่ ง.11 ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1


ครั้งที่	ค่าพีเอช	ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	8.50	แมกนีเซียม	1,052.25
2	9.00	แอมโมเนียม	487.15
3	9.50	ฟอสเฟต	2,570.26
4	10.00	คลอไรด์	4,061.94
		ซัลเฟต	64,116.18
		แคลเซียม	2.16
		โซเดียม	45.61
		โพแทสเซียม	45.15
		สังกะสี	17.96
		แมงกานีส	1.75
		ทองแดง	0.34
		โครเมียม	0.02
		นิกเกิล	0.16
		ตะกั่ว	0.07

ตารางที่ ง.12 ข้อมูลที่ป้อนใส่โปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลายเถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1

ครั้งที่	ค่าพีเอช
1	8.50
2	9.00
3	9.50
4	10.00

ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
แมกนีเซียม	1,315.31
แอมโมเนียม	487.15
ฟอสเฟต	2,570.26
คลอไรด์	4,830.56
ซัลเฟต	64,116.18
แคลเซียม	2.16
โซเดียม	45.61
โพแทสเซียม	45.15
สังกะสี	17.96
แมงกานีส	1.75
ทองแดง	0.34
โครเมียม	0.02
นิกเกิล	0.16
ตะกั่ว	0.07





ภาคผนวก จ.

ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ตารางที่ จ.1** ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 แก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่  
 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.43322230	0.43611810	0.43887892	0.43929611
Hydroxyapatite	0.01240533	0.01241086	0.01241500	0.01241739
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> :4H <sub>2</sub> O	0.00169536	0.00169261	-	-
MnHPO <sub>4</sub>	0.00246067	0.00246063	0.00246063	0.00246063
Tenorite	0.00047747	0.00047751	0.00047753	0.00047755
Zincite	-	-	0.00090442	0.00090491
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	4.47757E-06	5.39677E-06	5.52888E-06
ผลึกรวม	0.45026113	0.45316419	0.45514191	0.45556212

**ตารางที่ จ.2** ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 แก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่  
 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.43767030	0.44003233	0.42894609	0.42735095
Hydroxyapatite	0.01236754	0.01238537	0.01239340	0.01241400
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	0.00609449	0.00686256
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> :4H <sub>2</sub> O	0.00165962	-	-	-
MnHPO <sub>4</sub>	0.00246059	0.00246048	0.00246007	0.00246044
Tenorite	0.00047749	0.00047753	0.00047751	0.00047753
Zincite	-	0.00089907	0.00090438	0.00090493

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	4.58743E-06	5.34787E-06	5.51683E-06
ผลึกรวม	0.45463554	0.45625937	0.45128129	0.45047593

**ตารางที่ จ.3** ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 ฝ้าสลับจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่  
 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.43793411	0.43536347	0.42064522	0.42751046
Hydroxyapatite	0.01235071	0.01236829	0.01237947	0.01241387
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-	0.00260288	0.01058397	0.00678107
Mg(OH) <sub>2</sub>	-	-	-	0.09648699
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.00163912	-	-	-
MnHPO <sub>4</sub>	0.00246052	0.00246029	0.00245942	0.00246044
Tenorite	0.00047749	0.00047751	0.00047749	0.00047753
Zincite	-	0.00089868	0.00090430	0.00090495
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	4.52045E-06	5.29827E-06	5.51729E-06
ผลึกรวม	0.45486194	0.45417565	0.44745516	0.54704084

**ตารางที่ จ.4** ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 เถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วน  
 โดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.37536771	0.39118416	0.40135626	0.40830127
Hydroxyapatite	0.00061551	0.00063472	0.00064423	0.00064921
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> :4H <sub>2</sub> O	0.00151037	0.00155458	0.00157967	-
MnHPO <sub>4</sub>	0.00141885	0.00141885	0.00141885	0.00141885
Tenorite	0.00044639	0.00044655	0.00044657	0.00044657
Zincite	-	-	-	0.00085571
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	-	2.35687E-06	4.13223E-06
ผลึกรวม	0.37935883	0.39523886	0.40544793	0.41167574

**ตารางที่ จ.5** ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 เถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วน  
 โดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.39486526	0.39484685	0.39292655	0.38586497
Hydroxyapatite	0.00057589	0.00059508	0.00060868	0.00061885
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00666936	0.01193900	0.01551452	0.01986613
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> :4H <sub>2</sub> O	0.00138151	0.00139205	-	-
MnHPO <sub>4</sub>	0.00141885	0.00141881	0.00141870	0.00141836
Tenorite	0.00044643	0.00044655	0.00044657	0.00044657
Zincite	-	-	0.00080750	0.00085640

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	-	2.50891E-06	4.14498E-06
ผลึกรวม	0.40535729	0.41063833	0.41172502	0.40907542

**ตารางที่ จ.6** ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 แก้วสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วน  
 โดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.38760123	0.38688341	0.38396921	0.37435541
Hydroxyapatite	0.00053657	0.00056243	0.00058232	0.00059793
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.01445915	0.01762790	0.02077956	0.02619771
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.00125333	0.00125723	-	-
MnHPO <sub>4</sub>	0.00141881	0.00141874	0.00141851	0.00141776
Tenorite	0.00044645	0.00044655	0.00044657	0.00044657
Zincite	-	-	0.00081200	0.00085683
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	-	2.59652E-06	4.15216E-06
ผลึกรวม	0.40571554	0.40819625	0.40801076	0.40387635

ตารางที่ จ.7 ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 แก้วสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วน  
 โดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.14987591	0.15440980	0.15734240	0.15575340
Hydroxyapatite	0.00125072	0.00125467	0.00125678	0.00125754
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-	-	-	0.00158378
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.00119125	0.00119137	-	-
MnHPO <sub>4</sub>	9.40819E-05	9.40819E-05	9.40781E-05	9.40781E-05
Tenorite	2.56116E-05	2.56454E-05	2.56534E-05	2.56534E-05
Zincite	-	-	0.00063303	0.00063343
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	4.24279E-06	5.01458E-06	5.10265E-06
Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl	3.2731E-06	3.27316E-06	3.27316E-06	3.27296E-06
ผลึกรวม	0.15244085	0.15698308	0.15936023	0.15935626

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.8 ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 แก้วสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วน  
 โดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.15664300	0.15470428	0.14796174	0.13260542
Hydroxyapatite	0.00124174	0.00124612	0.00124920	0.00125328
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00152129	0.00492365	0.00911065	0.01747084
Mg(OH) <sub>2</sub>	-	-	-	0.00490119
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.00118461			

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
MnHPO <sub>4</sub>	9.40743E-05	9.40479E-05	9.39762E-05	9.38744E-05
Tenorite	2.56275E-05	2.56454E-05	2.56474E-05	2.56415E-05
Zincite		0.00062853	0.00063303	0.00063343
Ni(OH) <sub>2</sub>		4.29934E-06	4.98167E-06	5.08226E-06
Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl	3.27272E-06	3.27265E-06	3.27225E-06	3.27045E-06
ผลึกรวม	0.16071361	0.16162985	0.15908249	0.15699203

ตารางที่ จ.9 ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 เถ้าสัลดิจจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วน  
 โดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.15394352	0.15124405	0.14242782	0.13266064
Hydroxyapatite	0.00123315	0.00123909	0.00124362	0.00125324
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00407495	0.00718062	0.01221763	0.01744192
Mg(OH) <sub>2</sub>	-	-	-	0.02066412
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.00117751	-	-	-
MnHPO <sub>4</sub>	9.40592E-05	9.40064E-05	9.3848E-05	9.38744E-05
Tenorite	2.56256E-05	2.56434E-05	2.56395E-05	2.56415E-05
Zincite	-	0.00062841	0.00063301	0.00063345
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	4.24951E-06	4.95594E-06	5.08249E-06
Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl	3.27235E-06	3.27225E-06	3.27157E-06	3.27045E-06
ผลึกรวม	0.16055209	0.16041934	0.15664979	0.17278125

**ตารางที่ จ.10** ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 แก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมล  
 ของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.12745802	0.13935410	0.14685741	0.15157535
Hydroxyapatite	0.00010544	0.00012019	0.00012750	0.00013123
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> :4H <sub>2</sub> O	0.00099038	0.00101360	0.00102506	-
MnHPO <sub>4</sub>	0.00012018	0.00012018	0.00012017	0.00012017
Tenorite	1.05374E-05	1.06239E-05	1.06336E-05	1.06338E-05
Zincite	-	-	-	0.00055390
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	-	5.38564E-06	6.20959E-06
Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl	2.29051E-06	2.29081E-06	2.29098E-06	2.29095E-06
ผลึกรวม	0.12868685	0.14062098	0.14814845	0.15239978

**ตารางที่ จ.11** ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 แก้วสไลด์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมล  
 ของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.6:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.14374688	0.14910288	0.14761203	0.14102900
Hydroxyapatite	0.00009293	0.00010942	0.00011669	0.00012144
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-	0.00291430	0.00765967	0.01246734
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> :4H <sub>2</sub> O	0.00096255	0.00098334	-	-
MnHPO <sub>4</sub>	0.00012017	0.00012016	0.00012013	0.00012002
Tenorite	1.05543E-05	1.06261E-05	1.06338E-05	1.06334E-05



ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Zincite	-	-	0.00053788	0.00055398
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	-	5.41948E-06	6.21028E-06
Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl	2.29024E-06	2.29047E-06	2.29044E-06	2.28983E-06
ผลึกรวม	0.14493538	0.15324302	0.15606475	0.15431092

ตารางที่ จ.12 ผลึกที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ Version 3.0 เมื่อชะละลาย  
 แก้วสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนโดยโมล  
 ของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1

ผลึก (กรัม)	pH			
	8.5	9.0	9.5	10.0
Struvite	0.14547086	0.14525000	0.14265482	0.13361773
Hydroxyapatite	0.00008425	0.00009770	0.00010673	0.00011342
Mg <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.00197971	0.00749145	0.01133902	0.01682158
Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.00094348	0.00094983	-	-
MnHPO <sub>4</sub>	0.00012017	0.00012014	0.00012006	0.00011983
Tenorite	1.05595E-05	1.06263E-05	1.06334E-05	1.06324E-05
Zincite	-	-	0.00053851	0.00055404
Ni(OH) <sub>2</sub>	-	-	5.43339E-06	6.20982E-06
Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl	2.29007E-06	2.29010E-06	2.29000E-06	2.28898E-06
ผลึกรวม	0.14861132	0.15392203	0.15477751	0.15124572



### ฉ.1 การคำนวณหาฟอสฟอรัส

ถ้าสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร ประกอบด้วย  $P_2O_5$  ร้อยละ 29.57

เมื่อกำหนดให้

น้ำหนักโมเลกุลของฟอสฟอรัส (P) เท่ากับ 30.97 g/mol

น้ำหนักโมเลกุลของออกซิเจน (O) เท่ากับ 16 g/mol

จะได้ น้ำหนักโมเลกุลของ  $P_2O_5 = (2 \times 30.97) + (5 \times 16) = 141.94$  g/mol

คิดในรูปร้อยละของฟอสฟอรัส จะได้

$$\% P = \frac{29.57}{141.94} \times \left( 2 \times 30.97 \frac{g}{mol} \right)$$

$$\% P = 12.9038$$

ดังนั้น ถ้าสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร ประกอบด้วยฟอสฟอรัสร้อยละ 12.90

ถ้าใช้ถ้าสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร 500 มิลลิกรัม ต่อสารละลาย 25 มิลลิลิตร จะมีฟอสฟอรัสคิดเป็น

$$P = \frac{500 \text{ mg}}{25 \text{ ml}} \times \frac{12.9038}{100} \times \frac{1,000 \text{ ml}}{1 \text{ l}}$$

$$P = 2,580.76 \text{ mg/l}$$

ดังนั้น ถ้าสกัดจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร ประกอบด้วยฟอสฟอรัส 2,580.76 มิลลิกรัมต่อลิตร

### ฉ.2 การคำนวณหาร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส

เมื่อชะละลายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดต่อถ้าสกัด 50 มิลลิลิตรต่อกรัม และระยะเวลาในการชะละลาย 2 ชั่วโมง วัดปริมาณฟอสฟอรัสในสารละลายได้เท่ากับ 2,577.53 มิลลิกรัมต่อลิตร การคำนวณหาร้อยละของการชะละลายฟอสฟอรัส ได้ดังนี้

ฟอสฟอรัสทั้งหมด 2,580.76 mg/l คิดเป็น 100 %

$$\text{วัดฟอสฟอรัสได้} \quad 2,577.53 \text{ mg/l} \quad \text{คิดเป็น} \quad \frac{2,577.53 \times 100}{2,580.76} = 99.87 \%$$

ดังนั้น ที่สภาวะดังกล่าว สามารถละลายฟอสฟอรัส ได้ร้อยละ 99.87

### จ.3 การคำนวณการเตรียมสารละลายเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 1:1:1

เมื่อกำหนดให้

น้ำหนักโมเลกุลของฟอสฟอรัส (P)	เท่ากับ	30.97	g/mol
น้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียม (Mg)	เท่ากับ	24.3	g/mol
น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน (N)	เท่ากับ	14	g/mol
น้ำหนักโมเลกุลของออกซิเจน (O)	เท่ากับ	16	g/mol
น้ำหนักโมเลกุลของคลอรีน (Cl)	เท่ากับ	35.5	g/mol
น้ำหนักโมเลกุลของไฮโดรเจน (H)	เท่ากับ	1	g/mol

จะได้

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของ } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 24.3 + (2 \times 35.5) + (6 \times 18) = 203.3 \text{ g/mol}$$

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของ } \text{NH}_4\text{Cl} = 14 + (4 \times 1) + 35.5 = 53.5 \text{ g/mol}$$

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของ } \text{NH}_4^+ = 14 + (4 \times 1) = 18 \text{ g/mol}$$

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของ } \text{PO}_4^{3-} = 30.97 + (4 \times 16) = 94.97 \text{ g/mol}$$

วัดความเข้มข้นของ  $\text{PO}_4^{3-}$  ได้เท่ากับ 7,161.86 mg/l

คำนวณความเข้มข้นของ  $\text{PO}_4^{3-}$  ในหน่วยโมลต่อลิตร

$$[\text{PO}_4^{3-}] = \frac{7,161.86 \text{ mg}}{\text{l}} \times \frac{1 \text{ mol}}{94.97 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ g}}{1,000 \text{ mg}} = 0.07541 \text{ mol/l}$$

ต้องเตรียมที่อัตราส่วนของ  $\text{Mg}_2^+ : \text{NH}_4^+ : \text{PO}_4^{3-} = 1:1:1 = 0.07541 \text{ M} : 0.07541 \text{ M} : 0.07541 \text{ M}$

วัดความเข้มข้นของ Mg ในสารละลาย ได้เท่ากับ 83.35 mg/l

ต้องเตรียม Mg ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.07541 mol/l

คำนวณความเข้มข้นของ Mg ที่ต้องเตรียมในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

$$[\text{Mg}] = \frac{0.07541 \text{ mol}}{\text{l}} \times \frac{24.3 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{1,000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 1,832.46 \text{ mg/l}$$

ดังนั้น ต้องเติมแมกนีเซียม =  $1,832.46 - 83.35 = 1,749.11$  มิลลิกรัมต่อลิตร

ทำการทดลองที่ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ต้องเติมแมกนีเซียม} &= \frac{1,749.11 \text{ mg}}{\text{l}} \times 25 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ l}}{1,000 \text{ ml}} \\ &= 43.73 \text{ mg} = 43.73 \times 10^{-3} \text{ g} \end{aligned}$$

โดยเตรียม Mg 24.3 กรัม จาก  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  203.3 กรัม

ถ้าต้องการเตรียม Mg  $43.73 \times 10^{-3}$  กรัม ต้องเตรียมจาก  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

$$= \frac{(43.73 \times 10^{-3} \text{ g}) \times 203.3 \text{ g}}{24.3 \text{ g}} = 0.36586 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องเติม  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 0.36586 กรัม หรือเท่ากับ 365.86 มิลลิกรัม

วัดความเข้มข้นของ  $\text{NH}_4^+$  ได้เท่ากับ 88.48 mg/l

ต้องเตรียม  $\text{NH}_4^+$  ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.07541 mol/l

คำนวณความเข้มข้นของ  $\text{NH}_4^+$  ที่ต้องเตรียมในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

$$[\text{NH}_4^+] = \frac{0.07541 \text{ mol}}{\text{l}} \times \frac{18 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{1,000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 1,357.38 \text{ mg/l}$$

ดังนั้น ต้องเติม  $\text{NH}_4^+$  =  $1,357.38 - 88.48 = 1,268.90$  มิลลิกรัมต่อลิตร

ทำการทดลองที่ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ต้องเติม } \text{NH}_4^+ &= \frac{1,268.90 \text{ mg}}{\text{l}} \times 25 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ l}}{1,000 \text{ ml}} \\ &= 31.72 \text{ mg} = 31.72 \times 10^{-3} \text{ g} \end{aligned}$$

โดยเตรียม  $\text{NH}_4^+$  18 กรัม จาก  $\text{NH}_4\text{Cl}$  53.5 กรัม

ถ้าต้องการเตรียม  $\text{NH}_4^+$   $31.72 \times 10^{-3}$  กรัม ต้องเตรียมจาก  $\text{NH}_4\text{Cl}$

$$= \frac{(31.72 \times 10^{-3} \text{ g}) \times 53.5 \text{ g}}{18 \text{ g}} = 0.09428 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องเติม  $\text{NH}_4\text{Cl}$  เท่ากับ 0.09428 กรัม หรือเท่ากับ 94.28 มิลลิกรัม



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิริกาญจน์ ดอกไม้จีน เกิดเมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2529 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555

