

การประเมินส่วนประกอบทางเคมีและสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียม
ฟอสเฟตจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร



นางสาวกรรณิการ์ แสงอรุณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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.

ASSESSMENT OF CHEMICAL SPECIATION AND CONDITION FOR MAGNESIUM
AMMONIUM PHOSPHATE PRECIPITATION FROM SWINE EFFLUENT BY USING
COMPUTER PROGRAM

Miss Kannika Saeng-aroon



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินส่วนประกอบทางเคมีและสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร
โดย	นางสาวกรรณิการ์ แสงอรุณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธิกุล)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนัย)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ดนยภรณ์ พรรณสวัสดิ์)

กรณีการ แสงอรุณ : การประเมินส่วนประกอบทางเคมีและสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร. (ASSESSMENT OF CHEMICAL SPECIATION AND CONDITION FOR MAGNESIUM AMMONIUM PHOSPHATE PRECIPITATION FROM SWINE EFFLUENT BY USING COMPUTER PROGRAM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สุชา ขาวเขียว, 296 หน้า.

น้ำทิ้งฟาร์มสุกรประกอบด้วยธาตุอาหารโดยเฉพาะธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณมาก การตกผลึก สตรูไวท์ (MAP) จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเพื่อนำมาทำปุ๋ยละลายช้าสามารถลดปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้และยังเป็นการลดสาเหตุการเกิดปัญหาโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำธรรมชาติได้อีกด้วย จากการนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ มาใช้ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก สตรูไวท์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์คือเมื่อน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีอัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1 และพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 โดยที่สภาวะดังกล่าวจะเกิดผลึกสตรูไวท์ (MAP) และผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAP) ซึ่งมีผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น ปริมาณโลหะหนัก และปริมาณซีโอติละลายจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรลดลงอีกด้วย ซึ่งผลจากการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ ให้ผลที่สอดคล้องเมื่อทำการทดลองตกผลึกทางเคมีจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5370201021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: SWINE EFFLUENT / CHEMICAL PRECIPITATION / STRUVITE / VISUAL
MINTEQ

KANNIKA SAENG-AROON: ASSESSMENT OF CHEMICAL SPECIATION AND
CONDITION FOR MAGNESIUM AMMONIUM PHOSPHATE PRECIPITATION
FROM SWINE EFFLUENT BY USING COMPUTER PROGRAM. ADVISOR:
ASSOC. PROF. SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., 296 pp.

Large quantities of nutrient especially nitrogen and phosphorus in swine farm effluent can be precipitated in form of struvite (MAP). MAP can be used as a slow release fertilizers for agriculture purpose and reduced pollutant for eutrofication in water stream. The optimum condition of MAP precipitation was investigated using the Visual MINTEQ software program. Results indicated the highest amount of MAP precipitated at pH 9 condition with a molar ratio of $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ of 1.1:1. In addition to the Struvite (MAP) precipitation, other solids phases such as hydroxyapatite (HAP) were determined from the calculation. Furthermore, the amount of total phosphorus, nitrogen(TKN) and heavy metals were reduced from swine farm effluents by all solids. The Visual MINTEQ shows similar results to experimental analysis for removal efficiencies of total phosphorus and nitrogen(TKN) from swine farm effluent were considered.



Department: Environmental
Engineering

Student's Signature

Advisor's Signature

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลทั้งหลาย ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขสิ่งบกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำงานวิจัยให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ และอาจารย์ ดร.दनยภรณ์ พรรณสวัสดิ์ ที่ได้ให้คำชี้แนะ และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรัฏฐ์ แสนทน อาจารย์ประจำภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะการนำแบบจำลองธรณีเคมีต่างๆ มาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชาย พี่สาว และน้องชายที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆและน้องๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และดูแลกันและกันตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ระบบการเลี้ยงสุกรในประเทศไทย.....	5
2.1.1 ประเภทของการเลี้ยงสุกร.....	5
2.1.2 ฟาร์มสุกร	5
2.1.3 การให้อาหารสุกร	5
2.1.4 การใช้ยาและการรักษาสุกร	6
2.1.5 ขongเสียจากฟาร์มสุกร	8
2.3 กระบวนการตกผลึกทางเคมี.....	14
2.4 ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP).....	15
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP)	17
2.4.2 ประโยชน์ของผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต	19
2.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	21
2.5.1 แบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC Version 2.18.5570.....	21
2.5.2 แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ.....	23
2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.6.1 ปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต.....	28

2.6.2 การใช้แบบจำลองโปรแกรม PHREEQC ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต.....	32
2.6.3 การใช้แบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต	36
2.6.4 การใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์อื่นๆในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต.....	39
2.6.5 การใช้แบบจำลองโปรแกรม PHREEQC ในการศึกษางานวิจัยด้านอื่นๆ.....	41
2.6.6 การใช้แบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ ในการศึกษางานวิจัยด้านอื่นๆ.....	44
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	46
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.2 แผนการทดลอง.....	47
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	49
3.3.1 การตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร.....	49
3.3.2 การศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร.....	50
3.3.2.1 การศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกร.....	50
3.3.2.2 การตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร.....	51
3.3.3 การนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ในการประมวลผล..	54
3.3.3.1 การสอบทานความถูกต้องการใช้งานของแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยเรื่อง Assessing Nutrient Recovery from Piggery Effluent โดย M.L. Ali, P.A. Schneider and N. Hudson (2003).....	54
3.3.3.2 การนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกร.....	55
3.3.3.3 การนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีน	59
3.4 ขั้นตอนการบันทึกข้อมูลขาเข้า การประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูลขาออกของแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0.....	61
3.5 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร.....	70
3.6 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	70

3.6.1 สารเคมีต่างๆที่ใช้ในการวิจัย	70
3.6.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	71
3.6.3 อุปกรณ์และเครื่องมือในการกวนผสมตัวอย่าง	71
3.6.4 อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลึก	72
3.7 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิจัย	72
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล	75
4.1 ผลการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร	75
4.1.1 ผลการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร	75
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและความเป็นผลึกจากการตกผลึกสตรูไวท์จาก น้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร	78
4.1.2.1 โครงสร้างของผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ ฟาร์มสุกร	78
4.1.2.2 ความเป็นผลึกของผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ ฟาร์มสุกร	79
4.2 ผลการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	80
4.2.1 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ	80
4.2.2 ผลการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	81
4.2.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและความเป็นผลึกจากการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้ง ฟาร์มสุกร	83
4.2.3.1 โครงสร้างของผลึกจากการทดลองตกผลึกทางเคมีจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	83
4.2.3.2 ความเป็นผลึกของผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	85
4.2.4 ผลการศึกษาปริมาณซีโอดี (Chemical Oxygen Demand:COD) จากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	87
4.2.5 ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	88
4.2.6 ผลการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	90
4.2.7 ผลการศึกษาปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จาก น้ำทิ้งฟาร์มสุกร	91
4.3 ผลการศึกษาการนำแบบจำลองคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย	92

4.3.1 การสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 ...	92
4.3.2 ผลการศึกษาการนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ในการ ทำนายสถานะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำ ทิ้งฟาร์มสุกร.....	94
4.3.2.1 ผลการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสม ต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร	94
4. ผลการเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดผลึกจากการทดลองและจากการประมวลผลด้วย แบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่อ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ	100
4.3.2.2 ผลการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมต่อ การตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	103
4.3.3 ผลการศึกษาการนำแบบจำลอง Visual MINTEQ มาประยุกต์ใช้กับน้ำเสีย สังเคราะห์ยูรีนเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์	134
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	136
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	136
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป	138
รายการอ้างอิง	139
ภาคผนวก.....	145
ภาคผนวก ก.....	146
ภาคผนวก ข.....	156
ภาคผนวก ค.....	164
ภาคผนวก ง	167
ภาคผนวก จ.....	173
ภาคผนวก ฉ.....	185
ภาคผนวก ช.....	200
ภาคผนวก ซ.....	291
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	296

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	สารอาหารและอาหารสุกร (พิชญ์ภาค เจียรพันธ์, 2552).....	6
ตารางที่ 2.2	ยาที่ใช้ในการรักษาโรคของสุกร (พิชญ์ภาค เจียรพันธ์, 2552)	7
ตารางที่ 2.3	ที่มาและการเกิดของเสียจากฟาร์มสุกร (พิชญ์ภาค เจียรพันธ์, 2552).....	9
ตารางที่ 2.4	แนวทางการจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร (พิชญ์ภาค เจียรพันธ์, 2552)	10
ตารางที่ 2.5	คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ (พิชญ์ภาค เจียรพันธ์, 2552)	11
ตารางที่ 2.6	อัตราการเกิดน้ำเสียและลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตามขนาด ฟาร์ม (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ,2550).....	12
ตารางที่ 2.7	ปริมาณน้ำเสียสูงสุดที่เกิดขึ้นต่อวันจำแนกตามขนาดฟาร์มสุกร (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2546)	13
ตารางที่ 2.8	ค่ามาตรฐานเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ,2546)	13
ตารางที่ 2.9	เปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลอง PHREEQC และแบบจำลอง Visual MINTEQ.....	27
ตารางที่ 2.10	ปัจจัยและสถานะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต.....	31
ตารางที่ 2.11	การเปรียบเทียบการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจริงและจากการศึกษา จากแบบจำลองโปรแกรม PHREEQC	35
ตารางที่ 2.12	การเปรียบเทียบการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจริงและจากการศึกษา จากแบบจำลองโปรแกรมVisual MINTEQ	38
ตารางที่ 2.13	การเปรียบเทียบการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจริงและจากการศึกษา จากแบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นๆ	40
ตารางที่ 2.14	ค่าคงที่สมดุลการละลายของแต่ละแร่ที่ในดินน้ำใต้ดินชุมชน	41
ตารางที่ 2.15	การใช้แบบจำลองโปรแกรม PHREEQC ในการศึกษางานวิจัยด้านอื่นๆ.....	43
ตารางที่ 2.16	การใช้แบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ ในการศึกษางานวิจัยด้านอื่นๆ.....	45
ตารางที่ 3.1	ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ต่างๆจากงานวิจัย Assessing Nutrient Recovery from Piggery Effluent โดย M.L. Ali, P.A. Schneider and N. Hudson (2003)	55
ตารางที่ 3.2	ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีน (Wilsenach และคณะ , 2006)	60
ตารางที่ 3.3	วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร.....	70
ตารางที่ 3.4	สารเคมีต่างๆที่ใช้ในการวิจัย	70
ตารางที่ 3.5	อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	71

ตารางที่ 3.6 อุปกรณ์และเครื่องมือในการกวนผสมตัวอย่าง	71
ตารางที่ 3.7 อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลึก.....	72
ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์ (MAP) จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร ...	73
ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์ (MAP) จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	74
ตารางที่ 4.1 คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (ธงชัย อัมพรพะงา , 2556).....	80



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปทรงของผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (http://www.paques.nl . [2552, สิงหาคม 13])	16
รูปที่ 2.2 ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (http://www.cranfield.ac.uk/sas/water/scale/struvite.htm . [2552, สิงหาคม 13])	16
รูปที่ 2.3 แบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC Version 2.18.5570	22
รูปที่ 2.4 แสดงการดูดซับไอออนที่พื้นผิวของของแข็ง (http://www.americanpharmaceuticalreview.com)	25
รูปที่ 2.5 แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0	26
รูปที่ 3.1 แผนการทดลอง	48
รูปที่ 3.2 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียประจำฟาร์มและตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจากบ่อพักน้ำ	53
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกร	54
รูปที่ 3.4 หน้าหลักของโปรแกรม Visual MINTEQ version 3.0	61
รูปที่ 3.5 การบันทึกชนิดไอออนต่างๆลงในแบบจำลอง	62
รูปที่ 3.6 บันทึกชนิดของของแข็งที่คาดว่าจะเกิดขึ้น	64
รูปที่ 3.7 ชนิดของของแข็งทั้งหมดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล	64
รูปที่ 3.8 สภาวะการเลือกช่วงค่าพีเอชในการประเมินผล และความเข้มข้นของของแข็งที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล	66
รูปที่ 3.9 เข้าสู่หน้าหลักของโปรแกรมเพื่อเลือกเตรียมประเมินผล	66
รูปที่ 3.10 หน้าหลักของข้อมูลขาออกจากการประเมินผล	67
รูปที่ 3.11 ชนิดและปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้นที่สภาวะสมดุล	67
รูปที่ 3.12 ชนิดของสารประกอบต่างๆที่เกิดขึ้น	68
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ของของแข็งที่ทำการเลือกและค่าดัชนีความอิ่มตัวของของแข็ง	68
รูปที่ 3.14 ความเข้มข้นของไอออนที่ถูกดูดซับ ละลายและตกผลึก	69
รูปที่ 3.15 การประเมินผลรวมความเข้มข้นของของแข็งที่เกิดขึ้นที่สภาวะสมดุล	69

รูปที่ 4.1 ปริมาณผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร.....	77
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง ของผลึกสตรูไวท์จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์.....	78
รูปที่ 4.3 ผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9.....	79
รูปที่ 4.4 ปริมาณผลึกเฉลี่ยจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ.....	83
รูปที่ 4.5 โครงสร้างของผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของผลึก สตรูไวท์จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์.....	85
รูปที่ 4.6 ผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	87
รูปที่ 4.7 ปริมาณซีโอดีเฉลี่ยหลังการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร.....	88
รูปที่ 4.8 ปริมาณไอออนของโลหะหนักหลังการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร.....	89
รูปที่ 4.9 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดหลังการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่สถานะสมดุล.....	90
รูปที่ 4.10 ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นจากการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่สถานะ สมดุลเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ.....	92
รูปที่ 4.11 ชนิดและความเข้มข้นของผลึกจากงานวิจัยเรื่อง Assessing Nutrient Recovery from Piggery Effluent โดย M.L. Ali, P.A. Schneider and N. Hudson.....	93
รูปที่ 4.12 ชนิดและความเข้มข้นของผลึกต่างๆจากการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อสอบทานความถูกต้องของการใช้งานของ แบบจำลองในครั้งนี้.....	93
รูปที่ 4.13 ชนิดและปริมาณผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร เมื่ออัตราส่วนโดย โมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ1:1:1.....	95
รูปที่ 4.14 ชนิดและปริมาณผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร เมื่ออัตราส่วนโดย โมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1.....	97
รูปที่ 4.15 ชนิดและปริมาณผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดย โมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1.....	99

รูปที่ 4.16 ปริมาณผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์ในน้ำที่สังเคราะห์ฟาร์มสุกร	102
รูปที่ 4.17 ปริมาณและชนิดผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำที่ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.8:1:1	104
รูปที่ 4.18 ปริมาณและชนิดผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำที่ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.9:1:1	106
รูปที่ 4.19 ปริมาณและชนิดผลึกและชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประมวลผลด้วย แบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำที่ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโม ลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1.....	108
รูปที่ 4.20 ปริมาณและชนิดผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำที่ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1	110
รูปที่ 4.21 ปริมาณและชนิดผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการทำนายด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำที่ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1	112
รูปที่ 4.22 ปริมาณผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์และจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำที่ฟาร์มสุกร	115
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะหนักภายหลังการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำที่ ฟาร์มสุกรและจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0	117
รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส (%) ที่สภาวะสมดุลจากการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำ ที่ฟาร์มสุกรและจากการทำนายผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ	119
รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (%) ที่สภาวะสมดุลจากการตกผลึก สตรูไวท์จากน้ำที่ฟาร์มสุกรและจากการทำนายผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ.....	120
รูปที่ 4.26 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1.....	122
รูปที่ 4.27 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1.....	124

รูปที่ 4.28 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1	125
รูปที่ 4.29 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1	127
รูปที่ 4.30 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมี เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1	128
รูปที่ 4.31 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมี เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1	129
รูปที่ 4.32 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมี เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1	130
รูปที่ 4.33 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมี เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1	131
รูปที่ 4.34 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมี เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1	132
รูปที่ 4.35 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมีเมื่อ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1	133
รูปที่ 4.36 ชนิดและปริมาณผลึกจากน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนเมื่อประมวลผลด้วย แบบจำลอง Visual MINTEQ	135

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขยายตัวของปริมาณการเลี้ยงสุกรในประเทศไทยก่อให้เกิดของเสียจากระบบการเลี้ยงเป็นจำนวนมาก ทั้งของเสียที่เกิดจากการขับถ่าย การให้อาหารและยารักษาโรค น้ำเสียจากการล้างทำความสะอาดโรงเรือนและน้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสุกร ซึ่งของเสียทั้งหมดนี้เกษตรกรมักจะรวบรวมโดยการฉีดล้างออกมาในรูปของน้ำเสีย แม้ผ่านขั้นตอนการบำบัดอย่างถูกวิธีแล้ว ยังมีผลทำให้น้ำทิ้งที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณและมีความสกปรกอยู่มาก โดยวัดออกมาในรูปของปริมาณบีโอดี ปริมาณซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบอีกว่าองค์ประกอบของน้ำทิ้งนั้นมีความเข้มข้นของธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูง ซึ่งธาตุอาหารทั้งสองชนิดนี้เป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดปัญหายูโทรฟิเคชัน ดังนั้นหากแหล่งน้ำธรรมชาติถูกปนเปื้อนด้วยน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ขาดการบำบัดอย่างถูกวิธีก็อาจก่อให้เกิดมลพิษและปัญหาดังกล่าวได้ ปริมาณความเข้มข้นของธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีมากในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรนั้น หากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปของปุ๋ยละลายช้าได้จะเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้แก่เกษตรกรและยังช่วยลดปัญหามลพิษที่อาจเกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

สตรูไวท์หรือผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) เป็นผลึกที่เกิดจากการตกผลึกทางเคมีของสารละลายที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียและฟอสเฟตในปริมาณสูงเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นกลางหรือด่าง โดยผลึกสตรูไวท์สามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อพืช ซึ่งถือได้ว่าเกิดผลดีต่อภาคเกษตรกรรมอย่างมาก นอกจากนี้ผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นยังช่วยลดความเข้มข้นของอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งได้ แต่การเกิดผลึกสตรูไวท์ในสารละลายหากไม่มีการควบคุมปัจจัยและสถานะในการเกิดการตกผลึกทางเคมีให้มีความเหมาะสม ก็อาจก่อให้เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์ (HAP) รวมทั้งผลึกอื่นๆ ซึ่งเป็นผลึกที่มีผลรบกวนต่อ

ระบบการตกผลึกสตรูไวท์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ในระบบให้ได้มากที่สุด

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาคำนวณและทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดการตกผลึกทางเคมีของผลึกสตรูไวท์จึงเป็นแนวทางที่มีความสำคัญเนื่องจากการช่วยให้สามารถทำนายสภาวะและค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ให้ได้มากที่สุด ช่วยประเมินองค์ประกอบและผลึกอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ และยังช่วยประหยัดเวลาตลอดจนลดค่าใช้จ่ายต่างๆของสารเคมีที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและแมกนีเซียมและองค์ประกอบของผลึกที่เกิดขึ้น
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณสมดุลทางเคมีของน้ำมาใช้ในการทำนายองค์ประกอบทางเคมี และผลึกต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการตกผลึกน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรด้วยสารเคมีที่สภาวะต่างๆ ทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์และทำการตรวจสอบยืนยันกับผลการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบสมดุลเคมีของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรโดยใช้แบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทดลองตกผลึกสตรูไวท์ จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกรในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นการสอบทานแบบจำลองและใช้แบบจำลองในการทำนายปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร โดยงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงการใช้แบบจำลองในงานวิจัยจากแบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC ที่ได้นำเสนอในการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ เป็นแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อความสะดวกและความแม่นยำของการทำงาน และการประมวลผลของผู้วิจัยในงานวิจัย โดยกำหนดขอบเขตต่างๆดังนี้

- 1.3.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการการศึกษาและวิจัยคือ แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 พัฒนาโดย U.S.EPA. โดยมีการพัฒนาในครั้งแรกในปี 2000
- 1.3.2 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายลักษณะ ชนิดและองค์ประกอบทางเคมีต่างๆของผลึกและน้ำเสีย เมื่อมีการจำลองการเติมสารเคมีและปรับเปลี่ยนค่าพีเอช โดยใช้ น้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรที่เตรียมขึ้นและน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรเป็นข้อมูลตั้งต้น
- 1.3.3 ทำการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกรโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 1.1:1:1 1.2:1:1 สำหรับน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร และ 0.8:1:1 0.9:1:1 1:1:1 1.1:1:1 1.2:1:1 สำหรับน้ำทิ้งฟาร์มสุกร และปรับค่าพีเอชในช่วง 7-10
- 1.3.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร และน้ำทิ้งฟาร์มสุกร และผลจากการคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถทำนายองค์ประกอบทางเคมีและผลึกต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการตกผลึกสตรู-ไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรด้วยสารเคมีที่สภาวะต่างๆ รวมทั้งทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ได้จากการคำนวณสมดุลทางเคมีของน้ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 1.4.2 สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ได้จากค่าพีเอช ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและแมกนีเซียม และหาองค์ประกอบของผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นได้
- 1.4.3 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปในการแก้ปัญหาการตกผลึกและสมดุลทางเคมีในน้ำทิ้ง และ/หรือน้ำเสียที่มีองค์ประกอบค่อนข้างซับซ้อนได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบการเลี้ยงสุกรในประเทศไทย

ระบบการเลี้ยงสุกรของไทย เป็นระบบการผลิตแบบเสรี มีการเปลี่ยนแปลงตามตลาดและราคาสุกร (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม , 2546)

2.1.1 ประเภทของการเลี้ยงสุกร

- แบบรายย่อย คือ ฟาร์มที่เลี้ยงสุกรไม่เกินรายละ 50 ตัว
- แบบการค้า คือ ฟาร์มที่เลี้ยงสุกรตั้งแต่ 50 ตัวขึ้นไป

2.1.2 ฟาร์มสุกร แบ่งออกเป็น 3 ขนาด ได้แก่

1. ฟาร์มขนาดเล็ก ผู้นำหนักหน่วยปศุสัตว์รวมตั้งแต่ 6-น้อยกว่า 60 หน่วยปศุสัตว์ (เทียบเท่าสุกรขุนตั้งแต่ 50-500 ตัว)
2. ฟาร์มขนาดกลาง ผู้นำหนักหน่วยปศุสัตว์รวมตั้งแต่ 60-600 หน่วยปศุสัตว์ (เทียบเท่าสุกรขุนตั้งแต่ 500-5,000 ตัว)
3. ฟาร์มขนาดใหญ่ ผู้นำหนักหน่วยปศุสัตว์รวมมากกว่า 600 หน่วยปศุสัตว์ (เทียบเท่าสุกรขุนมากกว่า 5,000 ตัว)

2.1.3 การให้อาหารสุกร

สุกรเป็นสัตว์กระเพาะเดี่ยว ไม่สามารถย่อยอาหารที่มีใยอาหารมากได้ดีเหมือนสัตว์กระเพาะรวม ระบบย่อยอาหารมีหน้าที่ย่อยอาหารที่สุกรกินเข้าไปให้แตกตัวจนมีขนาดเล็กลง เพื่อให้สามารถดูดซึมไปใช้เสริมสร้างส่วนต่างๆของร่างกาย สารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมี 6 ชนิด ตามที่แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารอาหารและอาหารสุกร (พิชญ์ภักดิ์ เจียรพันธ์, 2552)

อาหาร	รายละเอียด
น้ำ	ให้น้ำสะอาดแก่สุกรตลอดเวลา โดยปกติสุกรจะกินน้ำประมาณ 5-20 ลิตรต่อวัน ตามขนาดของสุกร
โปรตีน	มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต ช่วยสร้างเนื้อเยื่อและเป็นส่วนประกอบหลักของร่างกาย เช่น กากถั่วเหลือง กากเมล็ดฝ้าย
คาร์โบไฮเดรต	เป็นอาหารที่ให้พลังงาน เช่น แป้งและน้ำตาล รวมถึงเยื่อที่เป็นส่วนประกอบในวัตถุดิบอาหารสัตว์ เช่น รำละเอียด
ไขมัน	เป็นอาหารที่ให้พลังงาน เช่น ไขมันจากสัตว์
แร่ธาตุ	ทำหน้าที่เสริมสร้างกระดูกและต้านโรค ในร่างกายสุกรมีแร่ธาตุมากกว่า 40 ชนิด ส่วนที่จำเป็นและสำคัญต่อร่างกาย ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียม เหล็ก ทองแดง ไอโอดีน สังกะสี แมงกานีส โพแทสเซียม แมกนีเซียม และซิลิเนียม เป็นต้น
วิตามิน	เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิต เช่น กระจุกปน

2.1.4 การใช้ยาและการรักษาสุกร

การใช้ยาป้องกันและรักษาสุกรที่เจ็บป่วยเป็นรายละเอียดที่ต้องมีการปรึกษาสัตวแพทย์ ซึ่งสามารถอธิบายพอสังเขปได้ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ยาที่ใช้ในการรักษาโรคของสุกร (พิชญ์ภัค เจียรพันธ์, 2552)

ยา	รายละเอียด
ยาปฏิชีวนะ	เป็นสารที่สกัดจากจุลชีพบางชนิด ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคหรือทำให้เชื้อโรคนั้นๆ ถูกทำลายได้ ซึ่งใช้ในการป้องกันและรักษาโรค เช่น โรคปอดบวม หลอดลมอักเสบ การอักเสบต่างๆ เป็นต้น
ยาซัลฟา	เป็นยาที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อใช้ป้องกันและรักษาโรค ยาในกลุ่มนี้ เช่น สไตรเมช ไบรีน่า ไตรซัลฟาน ไตรเวทตริน เป็นต้น
ยาบำรุง	ส่วนใหญ่เป็นยาบำรุงที่อยู่ในรูปฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม น้ำตาล กลูโคส ตลอดจนวิตามิน และแร่ธาตุที่จำเป็นสำหรับร่างกาย ช่วยกระตุ้นให้การดูดซึมของระบบการย่อยอาหารให้ดีขึ้น
ยาฆ่าเชื้อโรค	ใช้ล้างคอกโดยทั่วไป เช่น ไอซาล ไอโอดีน พอร์มาลีน จุนลี โซดาไฟ เป็นต้น
ยาฆ่าพยาธิ ภายนอก	ใช้ฆ่าพวกเห็บ ไร ขี้เรื้อน ขี้เรื้อนแห้งในสุกร เช่น เอ็นโก้ เย็นโก้ไฟสเปรย์ เป็นต้น
ยาถ่ายพยาธิ	ยาถ่ายพยาธิในลำไส้ของสัตว์ที่ใช้กันมากที่สุด คือ ตัวยาปิเพเพอร์ราซีน คาร์บอนเตตราคลอไรด์ เป็นต้น
ยาที่ใช้กรอกปาก ลูกสุกร	เพื่อป้องกันและรักษาลูกสุกรท้องเสีย เช่น ฟาร์โมซินป้ายลิ้น โคโลการ์ด ไดอะตริมีซินดน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้อาจจะใช้ยาผงละลายน้ำให้ลูกสุกรกิน หรือกรอกปากลูกสุกรก็ได้ เช่น นีโอเม็กซ์ 325 เคคินีโอ เป็นต้น
ธาตุเหล็ก	เพื่อป้องกันโรคโลหิตจางในลูกสุกร

จากตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าอาหารและยารักษาโรคสุกรที่ได้รับนั้นมีความหลากหลาย ทำให้มีของเสียที่เกิดจากฟาร์มสุกรในปริมาณที่สูงด้วยเช่นกัน โดยของเสียหลักจากสุกรได้แก่ มูลสุกรและน้ำจากกิจกรรมของสุกร ทั้งน้ำกิน น้ำฉีดล้างโรงเรือนและเศษจากการให้อาหารและยารักษาโรค ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดความสกปรกอย่างมาก หากขาดการจัดการของเสียที่ถูกต้องและเหมาะสมย่อมส่งผลให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาน้ำเน่าเสียที่มีความสกปรกและมีปริมาณสูงด้วยเช่นกัน

2.1.5 ของเสียจากฟาร์มสุกร

ของเสียจากฟาร์มสุกร มี 2 ประเภทหลักๆ คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง ได้แก่ มูลสุกร เศษอาหารและยารักษาโรคที่ตกค้างในโรงเรือน และส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำที่เกิดจากการทำความสะอาดโรงเรือน และปัสสาวะสุกร

1. มูลสุกร การเลี้ยงสุกรทำให้เกิดมูลสุกรเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะบริเวณพื้นโรงเรือนและบริเวณใต้พื้นโรงเรือนที่มีการตกค้างของมูลสุกร
2. น้ำเสียหรือของเหลว ได้แก่ น้ำล้างทำความสะอาดโรงเรือน ปัสสาวะ น้ำดื่มที่เกิดการรั่วซึม ส่วนใหญ่เกิดจากการล้างทำความสะอาดโรงเรือน ในการทำความสะอาดโรงเรือนนั้นควรมีการเก็บกวาดมูลสุกรแยกออกจากพื้นก่อน เพื่อลดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียที่เกิดระหว่างการฉีดล้างโรงเรือน
3. ของเสียอื่นๆ เช่น ขวดยา ขวดน้ำ เข็มฉีดยา รก และซากสุกรที่ตายต้องมีการฝังกลบให้เรียบร้อย สำหรับถุงใส่อาหารสัตว์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ หรือใช้เป็นถุงบรรจุมูลสุกรเพื่อนำไปขายเป็นปุ๋ยได้ เป็นต้น

จากข้อมูลทั้งหมดนี้สามารถสรุปที่มาและของเสียที่เกิดขึ้นจากฟาร์มสุกรได้ดังตารางที่ 2.3 และแสดงแนวทางการจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ที่มาและการเกิดของเสียจากฟาร์มสุกร (พิชญ์ภาค เจียรพันธ์, 2552)

กิจกรรม	ของเสียที่เกิดขึ้น	ผลกระทบ	การจัดการที่ถูกต้อง
การให้อาหารสุกร	มูลสุกร	มูลสุกรปนกับน้ำจากกิจกรรมต่างๆของสุกร ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกสูงมากและเกิดมลภาวะทางอากาศเนื่องจากกลิ่นของมูลสุกร	ควรแยกเก็บมูลสุกรใส่ถุงเพื่อนำไปขาย ไม่ควรให้เกิดการสัมผัสหรือปนเปื้อนไปกับน้ำจากกิจกรรมต่างๆภายในฟาร์มสุกร
น้ำดื่มสุกรและน้ำฉีดล้างโรงเรือนและสุกร	น้ำเสีย	เกิดน้ำเสียปริมาณมาก	ติดตั้งระบบน้ำดื่มที่ลดการรั่วซึมของน้ำและทำรางรับน้ำเสียที่ง่ายต่อการทำความสะอาดและตรวจสอบดูแล
การให้ยา	มูลสุกร เศษขวดยาและเข็มฉีดยา	เกิดขยะที่ต้องจัดการเป็นจำนวนมากขึ้น	กำจัดขยะให้ถูกกรรมวิธีและควรได้รับความรู้จากสัตวแพทย์ผู้ชำนาญการเพื่อป้องกันการแพร่ระบาดของโรคที่อาจเกิดขึ้นได้และใช้ยาในส่วนที่จำเป็นเท่านั้น
สุกรคลอดลูก	เศษรก เลือดและผลิตภัณฑ์บรรจุยาในการทำคลอด	เกิดน้ำเสียและขยะเพิ่มขึ้น	ควรแบ่งสัดส่วนพื้นที่ทำการรักษาอย่างชัดเจนเพื่อง่ายต่อการทำความสะอาดเป็นการลดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียที่เกิดขึ้น
สุกรที่ตาย	ซากสุกร	เกิดกลิ่นเน่าเหม็น	ควรทำการฝังกลบอย่างถูกวิธี

ตารางที่ 2.4 แนวทางการจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร (พิชญ์ภักดิ์ เจียรพันธ์, 2552)

ของเสียที่เกิดขึ้น	แนวทางการจัดการที่ถูกต้อง
มูลสุกร	<ol style="list-style-type: none"> เก็บรวบรวมแยกจากของเสียประเภทอื่น ขยสดให้แก่เกษตรกรเพื่อนำไปทำปุ๋ย ตากแห้งในโรงเรือนที่มีหลังคาและพลาสติกคลุมลานตากเพื่อป้องกันความชื้นเพื่อนำไปเป็นอาหารสัตว์และขายเป็นปุ๋ยแก่เกษตรกร การหมักปุ๋ยมูลสุกรไม่ควรพลิกกลับช่วงหัวค่ำกับเช้ามืดเพราะจะทำให้เกิดกลิ่นฟุ้งกระจาย
น้ำเสียที่เกิดขึ้น	สร้างระบบรวบรวมน้ำเสียที่ถูกต้องเพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนจากของเสียประเภทอื่น
กลิ่นเหม็น	<ol style="list-style-type: none"> ติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นด้านท้ายฟาร์มระบบระบายอากาศของโรงเรือนปิด ปลูกต้นไม้ลักษณะเป็นพุ่ม มีใบเล็ก รอบทุกด้านของฟาร์มสุกร

ปัญหาสำคัญประการหนึ่งของของเสียที่เกิดจากฟาร์มสุกรนั้น คือน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะมีปริมาณมากและมีความสกปรกค่อนข้างสูง วิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาหมักภาวะดังกล่าวที่ได้รับความนิยม คือ กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศเพราะสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีความสกปรกและมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงและได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้

อย่างไรก็ตามน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศยังคงมีค่าความสกปรกสูงโดยเฉพาะปริมาณซีโอดี ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณฟอสฟอรัส ทั้งหมดและปริมาณโลหะหนักในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ (พิชญ์ภักดิ์ เจียรพันธ์, 2552)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	คุณภาพน้ำทิ้ง	หน่วย	มาตรฐานน้ำทิ้งฟาร์มสุกร
1. ลักษณะของตัวอย่างน้ำ	สีน้ำตาล เหลือง	-	ไม่ระบุค่า
2. ค่าพีเอช	8.35	-	5.5-9*
3. ซีโอดี	776	มิลลิกรัมต่อลิตร	400*
4. ของแข็งแขวนลอย	424	มิลลิกรัมต่อลิตร	200*
5. ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น	286.30	มิลลิกรัมต่อลิตร	200*
6. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	74.25	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
7. ปริมาณโลหะ			
- แมกนีเซียม	68.73	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- แคลเซียม	39.39	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- โพแทสเซียม	38.48	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- เหล็ก	3.12	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่ระบุค่า
- ทองแดง	0.74	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.0**
- สังกะสี	2.69	มิลลิกรัมต่อลิตร	5.0**

หมายเหตุ : * มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรสำหรับฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก

** มาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน

แนวทางในการจัดการน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของฟาร์มสุกรในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะเป็นการกักเก็บน้ำไว้ในบ่อพักน้ำภายในบริเวณพื้นที่ของฟาร์ม ฟาร์มสุกรบางแห่งได้มีความพยายามที่จะนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ล้างทำความสะอาดคอกสัตว์ การนำไปรดน้ำต้นไม้ เป็นต้น แต่จากลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศพบว่า น้ำทิ้งมีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ธาตุโลหะอื่นๆโดยเฉพาะแมกนีเซียมที่มีปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งลักษณะน้ำทิ้งดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อเป็นการสร้างรายได้และลดรายจ่ายให้แก่เจ้าของฟาร์มสุกร

หรือเกษตรกร และยังเป็น การช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์แทน การปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยตรง แนวทางในการเพิ่มมูลค่าน้ำทิ้งที่ได้รับความสนใจใน การศึกษาและพัฒนา คือ การตกตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือสตรูไวท์ (ดวงกมล พฤทธิธโนปจัย, 2552)

2.2 น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียจนเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง ตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐาน ควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวง ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2552)

ตารางที่ 2.6 อัตราการเกิดน้ำเสียและลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจำแนกตามขนาดฟาร์ม (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ,2550)

ขนาดฟาร์ม สุกร	อัตราการเกิดน้ำ เสีย (ลิตร/ตัว/วัน)	ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)				
		ค่าบีโอดี	ค่าซีโอดี	ของแข็ง แขวนลอย	ทีเคเอ็น	ฟอสฟอรัส ทั้งหมด
ขนาดใหญ่	10	3,000	7,000	4,800	540	8
ขนาดกลาง	15	2,500	6,800	3,000	540	9.5
ขนาดเล็ก	20	1,500	4,000	2,000	400	17

ตารางที่ 2.7 ปริมาณน้ำเสียสูงสุดที่เกิดขึ้นต่อวันจำแนกตามขนาดฟาร์มสุกร (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2546)

ขนาดฟาร์ม	ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อวัน (ลูกบาศก์เมตร)
ขนาดเล็ก	10
ขนาดกลาง	75
ขนาดใหญ่	มากกว่า 75

ตารางที่ 2.8 ค่ามาตรฐานเพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ,2546)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐาน	
		มาตรฐาน ก	มาตรฐาน ข
ค่าความเป็นกรดและด่าง	-	5.5 – 9	5.5 – 9
บีโอดี	มก./ล	60	100
ซีโอดี	มก./ล	300	400
สารแขวนลอย	มก./ล	150	200
ทีเคเอ็น	มก./ล	120	200

หมายเหตุ : มาตรฐาน ก ใช้ควบคุมการระบายน้ำทิ้งสำหรับฟาร์มสุกรขนาดใหญ่

มาตรฐาน ข ใช้ควบคุมการระบายน้ำทิ้งสำหรับฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก

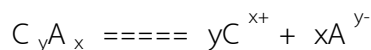
2.3 กระบวนการตกผลึกทางเคมี (นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์, 2531)

การตกผลึกทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปของสารละลายให้มาอยู่ในสถานะของแข็งซึ่งจะแยกออกจากสารละลายนั้นได้ การตกผลึกทางเคมีนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายน้ำของสารนั้นๆ การตกผลึกทางเคมีเกิดขึ้นได้หลายวิธี โดยมีกระบวนการเป็นไปตามขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งหรือหลายขั้นตอนรวมกันดังต่อไปนี้

1. ใส่สารซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายอยู่ในน้ำ เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้น้อย
2. ใส่สารซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาวะสมดุลของการละลายน้ำให้เลื่อนมาจุดซึ่งสารที่ละลายอยู่ในน้ำไม่สามารถละลายอยู่ได้อีกต่อไป
3. เปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัว หรือเกือบอิ่มตัวไปในทิศทางที่ทำให้มีค่าการละลายน้ำลดลง จนเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะของแข็งเนื่องจากค่าการละลายน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

กระบวนการการตกผลึกทางเคมีแตกต่างจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพราะการตกผลึกทางเคมีเป็นการเติมสารเคมีลงไปในน้ำ เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นตะกอนที่ใหญ่และหนักจนตัวได้ ส่วนกระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นการเติมสารเคมี เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายในน้ำเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งจะช่วยทำให้ตะกอนขนาดเล็กมารวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่และตกตะกอนในที่สุด

การตกผลึกทางเคมีเกิดขึ้นโดยความสัมพันธ์ของสภาวะสมดุลระหว่างสถานะที่ละลายน้ำและสถานะที่ไม่ละลายน้ำของสารที่ละลายน้ำได้เล็กน้อย การพิจารณาสถานะที่ละลายน้ำและสถานะที่ไม่ละลายน้ำ ต้องพิจารณาจากค่าคงที่การละลายน้ำที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เขียนแทนด้วย K_{sp} ซึ่งเท่ากับผลคูณของความเข้มข้นของไอออนทั้งหมดในสารนั้น โดยแต่ละไอออนยกกำลังด้วยจำนวนไอออนนั้นที่สภาวะสมดุลอิ่มตัวพอดีที่อุณหภูมินั้นๆ ยกตัวอย่างสารที่มีสูตรเคมีเป็น C_xA_y อยู่ในสภาวะสมดุลอิ่มตัวพอดีในการละลายน้ำ แสดงได้ด้วยสมการเคมีดังนี้



และค่าคงที่การละลายน้ำที่อุณหภูมิอื่นๆ เป็นดังนี้

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

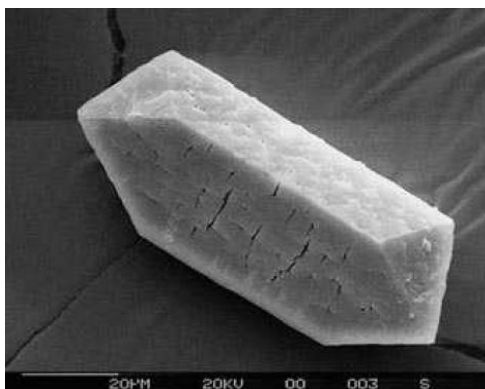
การตกผลึกทางเคมีจะเกิดขึ้นได้ เมื่อผลคูณดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่าคงที่การละลายน้ำ ณ อุณหภูมิที่กำหนด

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

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

2.4 ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) (พิชญ์ภักดิ์ เจียรพันธ์, 2552)

ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตเกิดจากการรวมตัวกันของไอออนของแมกนีเซียมแอมโมเนียม และฟอสเฟต มีสูตรทางเคมี คือ $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ มีสีขาวค่อนข้างเหลือง มีรูปทรงของผลึกเป็นพีระมิด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 มีค่าความแข็งเท่ากับ 1.5 ถึง 2 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.7 โดยความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง แต่สามารถละลายได้มากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด



รูปที่ 2.1 รูปทรงของผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

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



รูปที่ 2.2 ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

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

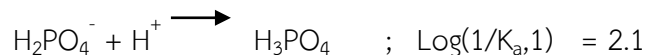
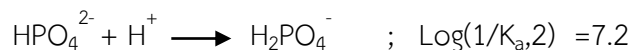
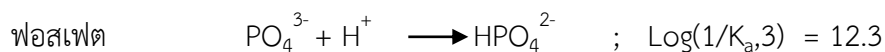
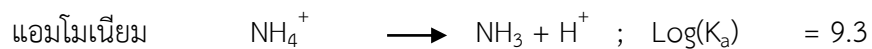
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP)

1. พีเอช ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตมีค่าอยู่ระหว่าง 7-9 โดยอาจเกิดการตกผลึกร่วมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทท์ได้ เมื่อค่าพีเอชของน้ำมีค่าน้อยกว่า 7 แมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตจะสามารถละลายน้ำได้ดีจึงไม่จับตัวกันเป็นผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต เมื่อค่าพีเอชมากกว่า 10 จะเกิดสารประกอบในรูป $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ หรือ $Mg(OH)_2$ ดังนั้นในการสร้างผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจึงต้องการการควบคุมค่าพีเอชในช่วง 7-10 เพื่อที่จะทำให้เกิดตะกอนผลึกอย่างสมบูรณ์ ผลึก MAP เป็นการควบคุมแมกนีเซียม (Magnesium, Mg^{2+}) แอมโมเนียม (Ammonium, NH_4^+) และฟอสเฟต (Phosphate, PO_4^{3-}) โดยใช้แมกนีเซียมเป็นตัวประสานให้เกิดเป็นผลึกของแข็งและตกตะกอนแยกออกจากน้ำ ซึ่งสามารถเกิดได้ตามธรรมชาติหรืออาจพบการสะสมผลึกในรูปของตะกอนตามชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบบำบัดน้ำเสีย

2. อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม การเกิดผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตตามทฤษฎีนั้นต้องการอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมคือ แมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1: 1: 1 หรือใกล้เคียง ปริมาณแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมยังขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย เช่น สารอินทรีย์และไอออนต่างๆซึ่งจะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมที่เติมลงไป จึงทำให้ต้องการปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้นเพื่อการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ดังนั้นปริมาณการเติมแมกนีเซียมเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเกิดผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

3. อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดผลึก MAP โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเกิดการตกตะกอนของผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตได้ดีที่สุด

4. 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 ความเข้มข้นของไอออนในน้ำมีค่า

สูงกว่าจุดอิ่มตัวในน้ำ เกิดการตกตะกอน

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

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

ตกตะกอน

5. ปริมาณไอออนในน้ำ น้ำเสียที่มีปริมาณไอออนในน้ำสูงจะมีผลต่อการเกิดผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต ซึ่งในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรจะประกอบด้วยแคลเซียมไอออน โพแทสเซียมไอออน เหล็กไอออน เป็นต้น ทั้งนี้แคลเซียมไอออนสามารถรวมตัวกับฟอสเฟตเกิดผลึกแคลเซียมฟอสเฟตได้ โดยฟอสเฟตจะตกผลึกออกมาในรูปของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์



6. การกวนผสม ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสมมีผลต่อการเกิดผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยการกวนผสมที่มากเกินไปอาจทำให้ผลึกเกิดการแยกตัวออกจากกัน หรือการกวนผสมที่น้อยไปอาจทำให้ผลึกไม่สามารถรวมตัวกันได้

7. สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ได้แก่ ปริมาณสารแขวนลอยซึ่งมีผลต่อการตกตะกอนของผลึกต่างๆในน้ำ และปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมลงไป

2.4.2 ประโยชน์ของผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

1. ประโยชน์ของผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตต่อภาคการเกษตรและสิ่งแวดล้อม

- เป็นการกำจัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในน้ำเสียในขั้นตอนเดียว

- ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยน้ำทิ้งที่มีปริมาณธาตุอาหารที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชทำให้เกิดการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดิน และยังเป็น การช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันที่ส่งผลเสียต่อระบบนิเวศทางน้ำ

- เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชั้นหลัง เนื่องจากมีการบำบัดฟอสฟอรัสและไนโตรเจนก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงกับการเพาะปลูกและการเกษตร เนื่องจากมีปริมาณของธาตุฟอสฟอรัสที่ไม่มากเกินไปต่อความต้องการของพืช

2. ประโยชน์ของผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตในรูปของปุ๋ยทางการเกษตร

- การนำตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าที่สามารถใส่ในปริมาณมากในครั้งเดียวโดยไม่เป็นอันตรายต่อพืช ซึ่งพืชที่เหมาะสมได้แก่ พืชยืนต้นอายุยาว พืชดอก ไม้ประดับ นาข้าว

- ตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต สามารถนำไปผสมกับสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ดี เช่น กรดฟอสฟอริกเพื่อนำไปใช้ในการปลูกพืชหรือไม้กระถาง

- ตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต สามารถนำไปทดแทนปุ๋ยแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ผลิตจากการใช้สารเคมีสองชนิด คือ กรดฟอสฟอริกและแอมโมเนียม

- การผลิตปุ๋ยโดยใช้ตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตผสมกับกรดฟอสฟอริกจะทำให้ได้ปุ๋ยละลายช้าและปุ๋ยละลายเร็ว ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับการผลิตแบบเก่า

- ตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ไม่ได้ผ่านการทำให้บริสุทธิ์สามารถนำไปผสมกับถ่านเพื่อใช้เป็นวัสดุทางการเกษตร

- ตะกอนผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตเป็นธาตุอาหารรองที่มีประโยชน์ต่อพืชจำพวกตระกูลหัวใต้ดิน เช่น หัวบีทที่ใช้ทำน้ำตาลและข้าว เป็นต้น

2.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

การศึกษาสมดุลทางเคมีของปฏิกิริยาเคมีต่างๆที่เกิดขึ้นในน้ำ ไม่สามารถคำนวณได้โดยวิธีทั่วไป เนื่องจากสารละลายมีไอออนอยู่มากมายหลายชนิด โดยแต่ละไอออนต่างมีอันตรกิริยาต่อกัน เป็นผลให้มีจำนวนตัวแปร (ความเข้มข้น) และจำนวนสมการคณิตศาสตร์ (สมการเคมี) เป็นจำนวนมากที่จำเป็นต้องพิจารณา การศึกษาสภาวะทางเคมีที่ผ่านมามีข้อจำกัดและความซับซ้อนค่อนข้างมาก ดังนั้นการศึกษาและนำความรู้เรื่องโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้จึงช่วยให้การศึกษาสมดุลทางเคมีของน้ำทำได้ง่ายขึ้น ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้ดังนี้

2.5.1 แบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC Version 2.18.5570

แบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC Version 2.18.5570 แสดงในรูปแบบที่ 2.3 (Parkhurst and Appelo, 1999) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับการคำนวณสมดุลทางเคมีในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โดยเฉพาะตัวอย่างสารละลายที่มาจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แหล่งน้ำผิวดินหรือแหล่งน้ำใต้ดินมักจะมีไอออนในสารละลายอยู่เป็นจำนวนมาก การคำนวณสภาวะสมดุลทางเคมีเพื่อจำแนกธาตุออกเป็นสปีชีส์ต่างๆ (Chemical Speciation) ไม่สามารถคำนวณได้ด้วยมือ แบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว โดยคำนวณสภาวะสมดุลทางเคมีของสารต่างๆในตัวอย่างน้ำพร้อมกัน ซึ่งใช้ฐานข้อมูลอุณหพลศาสตร์ของโปรแกรม MINTEQ ในการคำนวณค่าคงที่สมดุลและใช้โปรแกรม Aquachem เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ โดยผลลัพธ์ที่แสดงออกมานั้นจะสามารถบอกชนิดของของแข็งและแร่ธาตุที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวของสารละลายชนิดนั้นๆ

แบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC Version 2.18.5570 ทำงานโดยอาศัยหลักความสมดุลทางเคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในของสารละลายต่อแร่ธาตุ ก๊าซ สารละลายของแข็ง

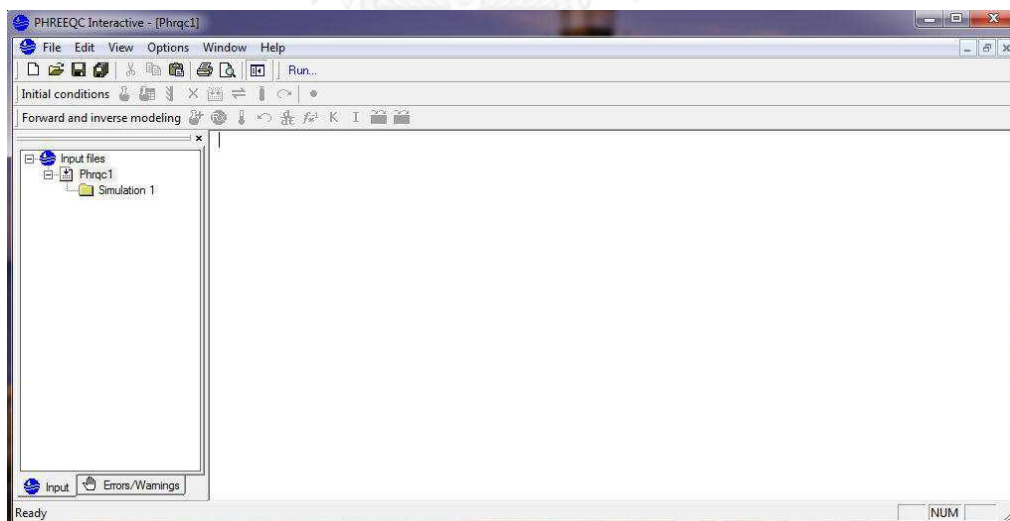
การแลกเปลี่ยนไอออนและการดูดซับที่พื้นผิว รวมทั้งสามารถจำลองกลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้วยสมการเคมีที่สภาวะสมดุลได้อีกด้วย

นอกจากนี้ประโยชน์ของแบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC Version 2.18.5570 ได้แก่

1. ศึกษากลไกการแพร่ของสารทั้งที่พื้นผิวและการแพร่ผ่านรูพรุนของตัวกลาง
2. จำแนกโลหะออกเป็นสถานะออกซิเดชันต่างๆได้
3. ศึกษาคุณภาพของน้ำใต้ดิน น้ำผิวดินและน้ำฝน

ข้อจำกัดของแบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC Version 2.18.5570

แบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC Version 2.18.5570 ไม่เหมาะกับสารละลายที่มีค่าปริมาณคลอไรด์ไอออนในน้ำสูง เช่น น้ำทะเล ดังนั้นในระบบที่มีปริมาณของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สูงมากอาจไม่เหมาะกับการใช้แบบจำลองของสารละลายจากโปรแกรมนี้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC Version 2.18.5570

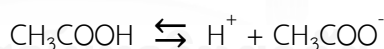
2.5.2 แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ

แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ นำมาใช้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 2000 โดย U.S.EPA ประเทศสหรัฐอเมริกา พัฒนามาจากแบบจำลอง MINTEQ ซึ่งเกิดจากการนำโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง MINTEQ และหลักอุณหพลศาสตร์ของโปรแกรม WATEQ3 มาประยุกต์รวมกัน โดยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ (จิริกฐ์ แสนทน, 2554) เป็นแบบจำลองที่ใช้คำนวณสถานะสมดุลทางเคมีในสารละลาย ทั้งกรณีสารละลายเจือจางและสารละลายเข้มข้น ในกรณีที่สารละลายมีตะกอนแขวนลอยที่ประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆหรือออกไซด์ของโลหะ แบบจำลอง Visual MINTEQ สามารถจำลองหรือคำนวณสมดุลเคมีที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการละลาย ปฏิกิริยาการตกผลึกและปฏิกิริยาการดูดซับของไอออนที่พื้นผิวของตะกอนได้อีกด้วย นอกจากนี้แบบจำลอง Visual MINTEQ ยังสามารถใช้ได้ในกรณีที่อุณหภูมิของสารละลายมีอุณหภูมิไม่ใช่ 25 องศาเซลเซียสตามฐานข้อมูลที่ใช้ซึ่ง เป็นประโยชน์อย่างมากในการหาค่าประกอบของผลึกที่เกิดขึ้น

การนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ จำลองปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

1. การแตกตัวของกรด-เบส

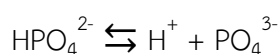
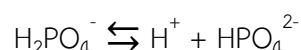
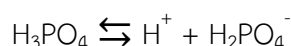
กรดที่ให้โปรตอนตัวเดียว เช่น กรดอะซิติก



เบสที่ให้ไฮดรอกไซด์ไอออน เช่น แอมโมเนีย



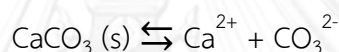
กรดที่ให้โปรตอนหลายตัว เช่น กรดฟอสฟอริก



นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าของพีเอชของสารละลายที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารละลายเกลือของเบสอ่อนหรือกรดอ่อนได้อีกด้วย

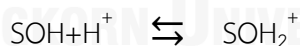
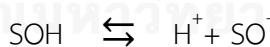
2. การละลายและการตกผลึกของของแข็ง

แบบจำลอง Visual MINTEQ สามารถแสดงผลถึงสถานะสมดุลเคมีให้เห็นว่าระบบอยู่ในสถานะอิ่มตัวยังยวด สภาวะไม่อิ่มตัว หรือสถานะสมดุลกับชนิดของของแข็งที่อยู่ในฐานข้อมูล นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณความสามารถในการละลายของของแข็งทั้งในน้ำบริสุทธิ์และน้ำที่มีไอออนอยู่มากมายหลายชนิด เช่น การละลายน้ำของแคลไซต์ในน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งความสามารถในการละลายนอกจากขึ้นอยู่กับค่าคงที่การละลาย (K_{sp}) แล้ว ยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาอื่นๆอีกด้วย เนื่องจากคาร์บอเนตไอออนเป็นเบสอ่อนที่สามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต่อไปได้

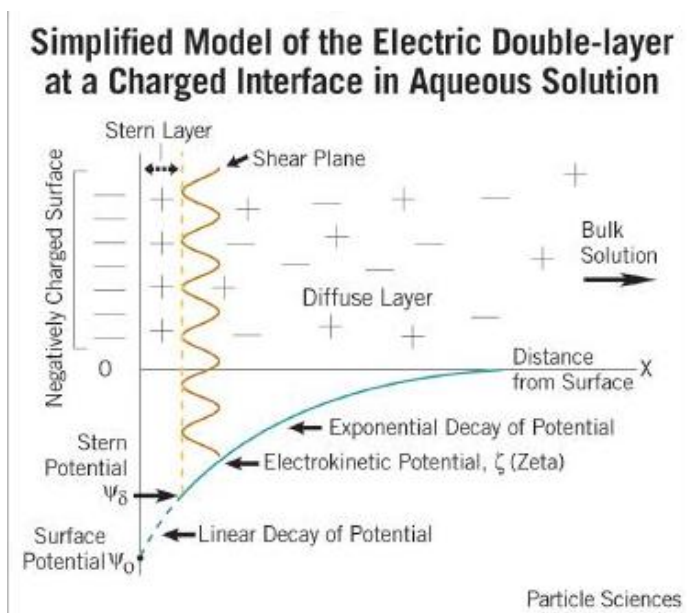


3. การดูดซับไอออนที่พื้นผิวของของแข็ง

โดยปฏิกิริยาดูดซับประเภทนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาเชิงซ้อนของพื้นผิว โดยแบบจำลองธรณี Visual MINTEQ จะจำลองให้พื้นผิวของของแข็งมีแขนหรือลิแกนด์ ซึ่งเป็นคู่อิเล็กตรอนอิสระบนพื้นผิวที่สามารถยึดเกาะติดกับไอออนบวกอื่นๆได้ ซึ่งพื้นผิวของของแข็งใดๆที่เปียกน้ำจะทำตัวเสมือนเป็นกรดหรือเบสที่สามารถให้และรับโปรตรอนได้ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



เมื่อ S คือพื้นผิวของของแข็งที่อยู่ในสารละลาย



รูปที่ 2.4 แสดงการดูดซับไอออนที่พื้นผิวของของแข็ง

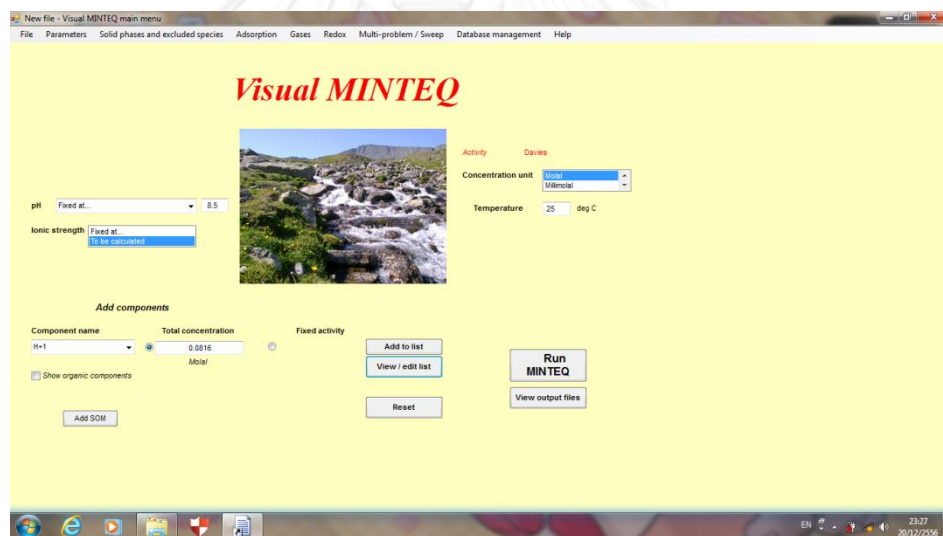
(<http://www.americanpharmaceuticalreview.com>)

ขอบเขตการทำงานของแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ

แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ นี้สามารถใช้คำนวณจุดสมดุลของสารละลายเจือจางและสารละลายเข้มข้นทั้งในห้องปฏิบัติการและสารละลายทั่วไปที่พบตามธรรมชาติ และใช้คำนวณหาการกระจายความเข้มข้นของไอออน และความเข้มข้นของของแข็งที่เกิดขึ้นที่สถานะแตกต่างกัน ทั้งของแข็งที่สามารถแตกตัวได้ ของแข็งที่สามารถรวมตัวกันเองได้และการดูดซับไอออนที่พื้นผิวของของแข็ง

ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ ต่อการแก้ปัญหา สิ่งแวดล้อม

1. กำหนดขอบเขตและเงื่อนไขของสิ่งที่ต้องการศึกษาให้ชัดเจน
2. เลือกและบันทึกข้อมูลที่ต้องการที่ตรงกับฐานข้อมูลของโปรแกรมในรูปแบบของสัญลักษณ์และสูตรทางเคมี
3. โปรแกรมจะวิเคราะห์ ประมวลผลและแสดงผลลัพธ์จากข้อมูลที่บันทึกไว้โดยใช้วิธีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
4. วิเคราะห์และสรุปผลโดยผู้ใช้โปรแกรม



รูปที่ 2.5 แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลอง PHREEQC และแบบจำลอง Visual MINTEQ

แบบจำลอง PHREEQC	แบบจำลอง Visual MINTEQ
เริ่มใช้ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1999	เริ่มใช้ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1991
พัฒนามาจากฐานข้อมูลของโปรแกรม MINTEQ และโปรแกรม Aquachem และมีการปรับปรุง พัฒนาอย่างต่อเนื่อง	ขาดการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง
นำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนได้ดี	ไม่เหมาะสมกับระบบสมดุลเคมีที่ความซับซ้อนมาก
ผู้ใช้โปรแกรมต้องมีความรู้ความเข้าใจและความชำนาญในการใช้งานโปรแกรมเป็นอย่างดี	ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน

การเลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัย

จากการศึกษาหลักการทำงานของแบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC และแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ พบว่าแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ สามารถใช้งานได้ง่าย ไม่ซับซ้อนมากนักเมื่อเทียบกับการใช้งานจากแบบจำลองธรณีเคมี PHREEQC ถึงแม้การแสดงผลจากแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ จะต้องนำมาคำนวณถึงผลลัพธ์ที่ต้องการโดยผู้ใช้งานโปรแกรมอีกครั้ง หากพิจารณาโดยรวมจะเห็นได้ว่าแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ ยังคงสามารถใช้งานได้ดีเมื่อต้องการศึกษาสมดุลทางเคมีของสารละลายถึงแม้ฐานข้อมูลของแบบจำลองจะขาดการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่คุณสมบัติโดยทั่วไปของโปรแกรมนั้นมีความสอดคล้องและตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้

2.6 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 ปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

จักราช คุณาเขมากร และอานนท์ ดวงพาลี (2550) ศึกษาผลของความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนที่มีต่ออัตราและปริมาณการเกิดผลึกสตรูไวท์โดยทำการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ จากผลการทดลองพบว่าในตัวอย่างน้ำเสียที่ไม่มีสารละลายแคลเซียมไอออนผสมอยู่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียในโตรเจนมีผลทำให้อัตราการลดปริมาณสารละลายฟอสเฟตเกิดได้เร็วขึ้น แต่เมื่อตัวอย่างน้ำเสียมีสารละลายแคลเซียมไอออนผสมอยู่จะเกิดผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์นอกจากนี้ยังพบว่าผลึกสตรูไวท์จะเกิดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 และปริมาณผลึกจะคงที่เมื่อมีความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียในโตรเจนมากเกินไป

สุธา ขาวเจียร (2553) ศึกษาการบำบัดธาตุอาหารของพืชที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกร 4 แห่งมาตกผลึกสตรูไวท์ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 ในช่วงพีเอชที่เหมาะสมคือ 8-9 เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและเกิดผลึกสตรูไวท์ประมาณ 0.75-0.78 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร โดยคุณภาพน้ำภายหลังการแยกผลึกสตรูไวท์ออกจากน้ำเสียฟาร์มสุกรพบว่า ค่าซีไอดี ค่าไนโตรเจนทั้งหมดและค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียมีแนวโน้มที่ลดลง

Song และคณะ (2007) ศึกษาการนำธาตุอาหารในน้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกรกลับมาใช้ใหม่ในรูปของผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ ผลจากการทดลองพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 9.5-10.5 เป็นช่วงที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์มากที่สุดเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟอสเฟตจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยสามารถกำจัดออกมาได้ในรูป

ของผลึกสตรูไวท์ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสม คือ 1.4:1 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเข้มข้นสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงและมีผลต่อรูปร่างและองค์ประกอบของผลึกสตรูไวท์

Wilsenach และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการตกผลึกสตรูไวท์และผลึกอะพาไทท์ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทและถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟอสเฟต จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการทดลองด้วยถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทจะเกิดผลึกสตรูไวท์เมื่อในน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียไนโตรเจนและสารประกอบคาร์บอนมากเกินพอ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 9.4 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟอสเฟตเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์ และเกิดผลึกอะพาไทท์เมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 9.1 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อโพแทสเซียมเท่ากับ 1:1 ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟอสเฟตเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยยังพบอีกว่าสามารถลดความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียสังเคราะห์จาก 40 มิลลิกรัมแอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตรเหลือ 18 มิลลิกรัมแอมโมเนียไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อทำการทดลองด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ พบผลึกสตรูไวท์โดยสามารถลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตจาก 460 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตรเหลือ 18 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร

Korchef และคณะ (2008) ศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกรด้วยกระบวนการไล่อากาศออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 400 มิลลิลิตรในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเทโดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อเติมอากาศลงในน้ำเสียสังเคราะห์มีผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นและทำให้อัตราการเกิดผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชต่ำกว่า 6 ไม่พบการตกผลึกสตรูไวท์ แต่เมื่อมีการเติมอากาศทำให้ค่าพีเอชค่อยๆสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเกิดการตกผลึก

เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยที่พีเอชเท่ากับ 9 จะเกิดผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุดและสามารถลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ถึง 78 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อัตราการเติมอากาศ 10 – 25 ลิตรต่อนาที เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1

Pastor และคณะ (2008) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการนำธาตุฟอสฟอรัสจากน้ำเสียกลับมาใช้ในรูปของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์และผลึกสตรูไวท์ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเกิดการตกผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทท์ มีผลช่วยลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียได้ 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 8.25 ถึง 9.5 และอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตและแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเพิ่มขึ้นโดยมีเวลากักเก็บ 2-11 ชั่วโมง และระบบสามารถกำจัดสารละลายฟอสเฟตได้สูงขึ้นเมื่อเกิดการตกผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์และผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อลดระยะเวลาเก็บน้ำลงพบว่าเกิดผลึกขนาดเล็กขึ้นจำนวนมากทำให้มีโอกาสหลุดออกนอกระบบได้ และที่อัตราส่วนโดยโมลของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมเท่ากับ 2:1 สารละลายฟอสเฟตมีแนวโน้มที่จะเป็นผลึกอสัณฐานแคลเซียมฟอสเฟตและลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียได้ 40 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

Liu และคณะ (2011) ศึกษาการนำธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียฟาร์มสุกรกลับมาใช้ในรูปของปุ๋ยละลายช้า (สตรูไวท์) โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ จากการทดลองพบว่าผลึกสตรูไวท์จะเริ่มก่อตัวและตกผลึกที่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยาโดยทำการเติมอากาศด้วยอัตรา 0.73 ลิตรต่อนาที เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตให้สูงขึ้นจาก 0.8 : 1 ถึง 1:1 มีผลต่อทำให้เกิดผลึกสตรูไวท์เพิ่มมากขึ้น โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 25 องศาเซลเซียสและสามารถลดความเข้มข้นของฟอสเฟตและแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำเสียลงได้ 66 เปอร์เซ็นต์

Xu และคณะ (2011) ศึกษาการกำจัดธาตุโพแทสเซียมและฟอสฟอรัสจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการตกผลึกแมกนีเซียมโพแทสเซียมฟอสเฟตจากการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนและฟอสเฟตขึ้นอยู่กับค่าพีเอช

และอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อโพแทสเซียมต่อฟอสเฟต เมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 10 และอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 2:1:2 ประสิทธิภาพการกำจัดความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนและฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์และ 77 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการตกผลึกร่วมของผลึกแมกนีเซียมโซเดียมฟอสเฟตและผลึกแมกนีเซียมโพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นผลจากการเติมแมกนีเซียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ฟอสเฟต

ตารางที่ 2.10 ปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

ผู้วิจัย	สภาวะที่เหมาะสม	ผลการทดลอง
จักราช คุณาเขมากร และอานนท์ ดวงพาลี (2550)	อัตราส่วนแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1	ผลึกsturว์ท์จะเกิดได้ดีที่สุด
สุธา ขาวเธียร (2553)	แมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 ค่าพีเอชเท่ากับ 8-9	เกิดผลึกsturว์ท์ปริมาณสูงที่สุดและค่าซีไอดี ค่าไนโตรเจนทั้งหมดและค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำเสียมีแนวโน้มที่ลดลง
Song และคณะ (2007)	พีเอชเท่ากับ 9.5-10.5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1.4:1	เป็นช่วงที่เหมาะสมในการตกผลึกsturว์ท์มากที่สุด
Wilsenach และคณะ (2007)	ที่พีเอชเท่ากับ 9.4 และอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1	สามารถลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนจาก 460 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตรเหลือ 18 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร
Korchef และคณะ (2008)	ที่พีเอชเท่ากับ 9 อัตราการเติมอากาศ 10 – 25 ลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1	เกิดผลึกsturว์ท์ได้ดีที่สุดและสามารถลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ 78 เปอร์เซ็นต์
Pastor และคณะ (2008)	พีเอชมีค่าเท่ากับ 8.25 ถึง 9.5 เวลาพักเก็บ 2-11 ชั่วโมง	เกิดการตกผลึกของไฮดรอกไซด์อะพาไทท์ มีผลช่วยลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียได้ 80 เปอร์เซ็นต์

ผู้วิจัย	สภาวะที่เหมาะสม	ผลการทดลอง
Liu และคณะ (2011)	เติมอากาศด้วยอัตรา 0.73 ลิตร ต่อ นาที อัตราส่วนโดยโมลของ แมกนีเซียมต่อฟอสเฟตจาก 0.8:1 ถึง 1:1 โอxygen ที่เหมาะสมคือ 25 องศาเซลเซียส	มีผลต่อทำให้เกิดผลึกสตรูไวท์เพิ่มมากขึ้น สามารถลดความเข้มข้นของสารละลาย ฟอสเฟตและแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำ เสียลงได้ 66 เปอร์เซ็นต์
Xu และคณะ (2011)	ค่าพีเอชเท่ากับ 10 และ อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 2:1:2	ประสิทธิภาพการกำจัดความเข้มข้นของ สารละลายโพแทสเซียมไอออนและ สารละลายฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์และ 77 เปอร์เซ็นต์

2.6.2 การใช้แบบจำลองโปรแกรม PHREEQC ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

Marti และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดสารละลายฟอสเฟตจากน้ำทิ้งในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศในรูปการตกผลึกสตรูไวท์ด้วยโปรแกรม PHREEQC โดยเปรียบเทียบกับ การคำนวณค่าดัชนีความอิ่มตัวของสารละลายจากระบบ ผลการทดลองพบว่าหากตะกอนจากระบบ 100 เปอร์เซ็นต์ จะพบฟอสฟอรัสถูกตรึงอยู่ในรูปของผลึกสตรูไวท์ 58 เปอร์เซ็นต์ และ ตรึงอยู่ในการตกผลึกร่วมของไฮดรอกซีอะพาไทท์ 15 เปอร์เซ็นต์ และเป็นฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับบนผิวของกากตะกอน 27 เปอร์เซ็นต์ โดยพบความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออนในน้ำทิ้งลดลงเนื่องจากเกิดการตกตะกอนของเกลือแคลเซียมและเกลือแมกนีเซียมในรูปของไฮดรอกซีอะพาไทท์และสตรูไวท์ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำทิ้งที่มีค่าลดลง และจากการคำนวณค่าดัชนีความอิ่มตัวของสารละลายของระบบพบว่า เมื่อค่าดัชนีความอิ่มตัวของสารละลายเท่ากับ 0 ระบบจะเกิดสภาวะสมดุลและมีแนวโน้มที่จะเกิดผลึกสตรูไวท์ เมื่อค่าดัชนีความอิ่มตัวของสารละลายน้อยกว่า 0 จะเกิดสภาวะความไม่อิ่มตัวของสารละลายและมีแนวโน้มที่จะไม่เกิดการตกผลึกสตรูไวท์ (จากการทดลองพบว่าเกิดผลึกอะพาไทท์ที่ค่าดัชนีความอิ่มตัวของสารละลายน้อยกว่า 0) เมื่อค่าดัชนีความอิ่มตัวของสารละลายมากกว่า 0 จะเกิดสภาวะสารละลายมีความอิ่มตัว

ยิ่งยวดและมีแนวโน้มที่จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ (จากการทดลองพบว่าเกิดผลึกสตรูไวท์ เนื่องจากมีค่าดัชนีความอิมตัวของสารละลายมากกว่า 0 มาก)

Ronteltap และคณะ (2007) ศึกษาอุณหภูมิศาสตร์ของการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำ ปัสสาวะด้วยโปรแกรม PHREEQC version 2.10 เพื่อหาค่าคงที่การละลายของสตรูไวท์และ สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ โดยเปรียบเทียบจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการเมื่อใช้ถังปฏิกริยาแบบที่ละเท จากผลการศึกษาดูด้วยโปรแกรม PHREEQC version 2.10 พบว่า ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าคงที่การละลายสตรูไวท์เท่ากับ $10^{-13.26 \pm 0.06}$ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้สภาพการละลายของผลึกสตรูไวท์สูงขึ้น ค่าพีเอช ที่เหมาะสมต่อการตกผลึกเท่ากับ 9 โดยอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 0.96:1 – 1.96:1 เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการคือ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและค่าพีเอชเท่ากับ 9 เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุด โดยอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตที่เหมาะสมคือ 1:1–2:1

Ali และ Schneider (2008) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จาก น้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโปรแกรม PHREEQC จากค่าสารละลายอิมตัวยิ่งยวด โดยเปรียบเทียบ ระหว่างผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการและการศึกษาแบบจำลองการตกผลึกสตรูไวท์ จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่ ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกผลึก ค่าความเข้มข้นของ สารละลายเริ่มต้นและค่าปริมาณของไอออนต่างๆในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยจากผลการทดลอง พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 8.5-10 น้ำเสียสังเคราะห์มีความเป็นสารละลายอิมตัวยิ่งยวดสูงสุดและมี แนวโน้มที่จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาจากแบบจำลองการ ตกผลึกของสตรูไวท์ที่แสดงในรูปของค่าดัชนีความอิมตัวคือ ที่พีเอชเท่ากับ 8.0-10 สารละลายมีสภาพความอิมตัวยิ่งยวดสูงสุด นอกจากนี้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้จาก ผลึกจริงมีขนาดใกล้เคียงกับการศึกษาและทำนายจากแบบจำลองโดยเมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลา

เดียวกัน และค่าปริมาณของไอออนต่างๆในสารละลายมีผลต่อการละลายและการเกิดผลึก
 สตรูไวท์ของสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์โดยตรง

Hafner และ Bisogni (2009) ศึกษาแบบจำลองและทำนายผลของการกำจัด
 สารละลายแอมโมเนียจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ผ่านกระบวนการหมักแบบไร้อากาศโดยการใช้
 โปรแกรม PHREEQC version 2.15.0-2697 แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองใน
 ห้องปฏิบัติการ จากการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 พบผลึกสตรูไวท์
 มากที่สุดและความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียในน้ำเสียน้อยลงตามปริมาณผลึกสตรูไวท์ที่
 เกิดขึ้น ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษาแบบจำลองพบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 7 ถึง 8 พบ
 การตกผลึกของสตรูไวท์มากขึ้นและค่าความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียในน้ำเสียมีค่า
 ลดลง โดยแสดงออกมาในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นที่พร้อมทำปฏิกิริยา ($\gamma_{\text{NH}_4^+}$) ของ
 สารละลายแอมโมเนียที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าระบบที่มีการ
 ตกผลึกสตรูไวท์ร่วมด้วยจะช่วยกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียได้ดีกว่าระบบที่ไม่มีการตก
 ผลึกสตรูไวท์

Zhang และคณะ (2010) ศึกษาการใช้โปรแกรม PHREEQC ทำนายแนวโน้มการ
 ตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำเสียชุมชนเพื่อนำสารละลายแอมโมเนียไนโตรเจนกลับมาใช้ในรูปแบบของ
 ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือสตรูไวท์ โดยนำแบบจำลองมาวิเคราะห์สถานะและ
 ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์ จากผลการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
 จากโปรแกรม PHREEQC พบว่า ค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดต่ออัตราการตกผลึก
 สตรูไวท์ โดยค่าพีเอชเท่ากับ 8.9-9.2 เป็นช่วงที่สารละลายมีความอิ่มตัวยังขาดและผลึกมี
 แนวโน้มที่จะเกิดมากขึ้นและมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย
 แมกนีเซียมไอออนในน้ำเสียสูงขึ้น ค่าดัชนีความอิ่มตัวของสตรูไวท์จะมีค่าสูงขึ้นและมีแนวโน้ม
 ที่จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับการผลการทดลองใน
 ห้องปฏิบัติการคือ เมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 9 เป็นช่วงที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์มากที่สุด

และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียจาก 1:1 เป็น 2 : 1 จะสามารถลดความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียไนโตรเจนได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.11 การเปรียบเทียบการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจริงและจากการศึกษาจากแบบจำลองโปรแกรม PHREEQC

ผู้วิจัย	การทดลองตกผลึกสตรูไวท์จริง	การศึกษาจากแบบจำลอง PHREEQC
Marti และคณะ (2007)	เกิดผลึกอะพาไทท์ที่ค่าดัชนีความอิ่มตัวของสารละลายน้อยกว่า 0	เมื่อค่าดัชนีความอิ่มตัวของสารละลายน้อยกว่า 0 จะเกิดสภาวะความไม่อิ่มตัวของสารละลายและมีแนวโน้มที่จะไม่เกิดการตกผลึกสตรูไวท์
Ronteltap และคณะ (2007)	ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชเท่ากับ 9 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 - 2:1 เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุด	เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้สภาพการละลายของผลึกสตรูไวท์สูงขึ้น ค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 9 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 0.96:1 - 1.96:1
Ali และ Schneider (2008)	พีเอชเท่ากับ 8.5-10.0 น้ำเสียสังเคราะห์มีความเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดสูงสุดและมีแนวโน้มที่จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุด	พีเอชเท่ากับ 8.0-10.0 สารละลายมีสภาพความอิ่มตัวยิ่งยวดสูงสุด
Hafner และ Bisogni (2009)	ที่พีเอชเท่ากับ 8 พบผลึกสตรูไวท์มากที่สุดและความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียในน้ำเสียน้อยลง	เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 7 ถึง 8 พบการตกผลึกของสตรูไวท์มากขึ้นและค่าความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียในน้ำเสียน้อยลง
Zhang และคณะ (2010)	ที่พีเอชเท่ากับ 9 เป็นช่วงที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์มากที่สุด	พีเอชเท่ากับ 8.9-9.2 เป็นช่วงที่สารละลายมีความอิ่มตัวยิ่งยวดและผลึกมีแนวโน้มที่จะเกิดมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.6.3 การใช้แบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

Celen และคณะ (2007) ศึกษาแบบจำลองความสมดุลทางเคมีด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์เพื่อลดความเข้มข้นของสารประกอบออร์โธฟอสเฟตในน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน แคลเซียมไอออน โพแทสเซียมไอออน แอมโมเนียมไอออน สารประกอบออร์โธฟอสเฟต ค่าความกระด้างของน้ำและค่าพีเอชของสารละลาย ประโยชน์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการใช้โปรแกรมนี้คือ สามารถเลือกความเข้มข้นเบื้องต้นที่เหมาะสมของสารละลายเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการตกผลึกสตรูไวท์โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการและผลจากการศึกษาแบบจำลองด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ โดยจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการให้ผลที่ใกล้เคียงกับการศึกษาจากแบบจำลองคือที่พีเอช 8.5 สามารถลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียฟาร์มสุกรได้ 55 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผลจากการทำนายด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ คาดว่าที่พีเอช 8.5 จะสามารถลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตได้ 62 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ที่พีเอช 8.5 เมื่อใช้อัตราส่วนแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 สามารถลดความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตได้ประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกันทั้งจากการทดลองและจากการใช้แบบจำลองในการทำนายผล

Ali และคณะ (2003) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์โดยนำแบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ มาใช้ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมและชนิดของผลึกทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้นจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าพีเอชเป็นปัจจัยสำคัญในการตกผลึกทางเคมีของของแข็ง โดยเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.75-9.27 จะพบผลึกสตรูไวท์ได้ดีกว่าผลึกชนิดอื่นๆ และผลึกสตรูไวท์จะเกิดได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 ในสถานะสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด

Lee และคณะ (2013) ศึกษาการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการทำนายปริมาณผลึกสตรูไวท์และการนำธาตุอาหารฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ในกรณีที่เกิดการตกผลึกร่วมของแคลเซียมไอออนแทนแมกนีเซียมไอออน เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสารประกอบไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออนและสารประกอบฟอสเฟตเป็นหลัก โดยใช้โปรแกรม Visual MINTEQ เป็นโปรแกรมพื้นฐานในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการทดลองการตกผลึกสตรูไวท์และการนำธาตุอาหารฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่จากน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการทดลองจากน้ำเสียสังเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการทำนายจากโปรแกรม Visual MINTEQ ซึ่งระบุว่าความเข้มข้นของสารประกอบฟอสเฟตมีผลโดยตรงต่อการเกิดการตกผลึกร่วมของแคลเซียมไอออนและปริมาณผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของแอมโมเนียมไอออนแมกนีเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออนโดยให้ผลการประมวลผลที่แม่นยำมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการทดลองจริง

ตารางที่ 2.12 การเปรียบเทียบการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจริงและจากการศึกษา
จากแบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ

ผู้วิจัย	การทดลองตกผลึกสตรูไวท์จริง	การศึกษาจากแบบจำลอง Visual MINTEQ
Celen และคณะ (2007)	ที่พีเอช 8.5 สามารถลดความเข้มข้น ของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสีย ฟาร์มสุกรได้ 55 เปอร์เซ็นต์	โปรแกรม Visual Minteq คาดว่าที่ พีเอช 8.5 จะสามารถลดความเข้มข้น ของสารละลายฟอสเฟตได้ 62 เปอร์เซ็นต์
Ali และคณะ (2003)	การตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์ม สุกรสามารถลดปริมาณธาตุในน้ำทิ้ง ได้	เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.75-9.27 จะพบ ผลึกสตรูไวท์ได้ดีกว่าผลึกชนิดอื่นๆ และ ผลึกสตรูไวท์จะเกิดได้ดีที่สุดที่ค่าพีเอช เท่ากับ 8.5 ในสภาวะสารละลายอิ่มตัว ยิ่งยวด
Lee และคณะ (2013)	ปริมาณผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นจะ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของ แอมโมเนียมไอออน แมกนีเซียม ไอออนและฟอสเฟตไอออน	ความเข้มข้นของฟอสเฟตมีผลโดยตรงต่อ การเกิดการตกผลึกร่วมของแคลเซียม ไอออน และปริมาณผลึกสตรูไวท์ที่ เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้น ของแอมโมเนียมไอออน แมกนีเซียม ไอออนและฟอสเฟตไอออน โดยให้ผล การประมวลผลที่แม่นยำมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการทดลองจริง

2.6.4 การใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์อื่น ๆ ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก

แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

Ye และคณะ (2010) ศึกษาการกำจัดสารละลายฟอสเฟตจากน้ำเสียสังเคราะห์ ฟาร์มสุกรโดยกระบวนการตกผลึกทางเคมี เมื่อวิเคราะห์ด้วยหลักการพื้นผิวตอบสนองและโปรแกรม MATLAB R2006a จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟอสเฟตสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 9.7 และพบว่าเมื่อพีเอชมีค่าสูงมากๆจะทำให้เกิดการตกผลึกของบรูไคท์ ซึ่งเป็นการลดปริมาณแมกนีเซียมไอออนทำให้เกิดการตกผลึกของสตรูไวท์ที่น้อยลง เมื่อพีเอชมีค่ามากกว่า 9 สารละลายแอมโมเนียมมีแนวโน้มที่จะกลายเป็นก๊าซแอมโมเนียได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดผลึกสตรูไวท์ที่น้อยลงเช่นกัน เนื่องจากมีผลไปลดความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเสียสังเคราะห์และเมื่อพีเอชมีค่ามากกว่า 10 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสเฟตจะลดลง ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยหลักการพื้นผิวตอบสนอง คือ เมื่อพีเอชมีค่ามากกว่า 9 จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ที่น้อยลงและเมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 10.5 ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีค่าเท่ากับ 0 แต่หากฟอสเฟตและแมกนีเซียมไอออนมีความเข้มข้นสูง แนวโน้มการเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

Hanhoun และคณะ (2010) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการละลายของผลึกสตรูไวท์ในน้ำเสียที่มีความเข้มข้นตัวยั้งยวดจากแบบจำลองอุณหพลศาสตร์ของการตกผลึกทางเคมีจากโปรแกรม MINTEQA2 เพื่อทำนายแนวโน้มการตกผลึกของสารละลายฟอสเฟตในน้ำเสียซึ่งหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา โดยคำนวณจากสมการของกิบส์และศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการตกผลึกของสตรูไวท์ได้แก่ ค่าคงที่การละลายของสตรูไวท์ที่สภาวะสมดุล ค่าพีเอชและค่าปริมาณไอออนของธาตุองค์ประกอบในน้ำเสียโดยวิธีนิวตันราฟสัน ที่อัตราส่วนแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 ทำการทดลองที่พีเอชเริ่มต้น 8.5 และอุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส จากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จริงในถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ พบว่าเกิดการตกผลึกได้ดีในช่วงพีเอช 8.5-10.0

และอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 25 องศาเซลเซียส โดยสอดคล้องกับผลจากการศึกษาด้วยแบบจำลองอุณหพลศาสตร์ของการตกผลึกทางเคมีที่แสดงในรูปของค่าคงที่การละลายคือค่าคงที่การละลายของสตรูไวท์ที่มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นช่วงที่เกิดการตกผลึกของสตรูไวท์ได้ดีที่สุด

ตารางที่ 2.13 การเปรียบเทียบการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจริงและจากการศึกษาจากแบบจำลองโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นๆ

ผู้วิจัย	การทดลองตกผลึกสตรูไวท์จริง	การศึกษาจากแบบจำลองอื่นๆ
Ye และคณะ (2010)	ประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายฟอสเฟตสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 9.7	เมื่อวิเคราะห์ด้วยหลักการพื้นผิวตอบสนองและโปรแกรม MATLAB R2006a ที่พีเอชเท่ากับ 10.5 แนวโน้มเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ก็จะสูงขึ้น
Hanhoun และคณะ (2010)	เกิดการตกผลึกได้ดีในช่วงพีเอช 8.5-10.0 และอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 25 องศาเซลเซียส	จากการศึกษาด้วยโปรแกรม MINTEQA2 พบว่าค่าคงที่การละลายของสตรูไวท์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่เกิดการตกผลึกของสตรูไวท์ได้ดีที่สุด

2.6.5 การใช้แบบจำลองโปรแกรม PHREEQC ในการศึกษางานวิจัยด้านอื่นๆ

Kim และคณะ (2008) วิเคราะห์องค์ประกอบและศึกษาการค่าคงที่สมดุลการละลายของแร่แอคทีไนต์ในน้ำใต้ดินชุมชนและช่องว่างน้ำของแร่เบนทอไนต์โดยการคำนวณจากโปรแกรม PHREEQC Version 2 พบว่าช่องว่างน้ำของแร่เบนทอไนต์ประกอบด้วยสารประกอบเชิงซ้อนของคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ จากผลการศึกษาพบว่าแร่แอคทีไนต์ของน้ำใต้ดินชุมชนมีองค์ประกอบและค่าคงที่สมดุลการละลายดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ค่าคงที่สมดุลการละลายของแร่แอคทีไนต์ในน้ำใต้ดินชุมชน

ธาตุ	รูปที่พบ	ค่าคงที่สมดุลการละลาย (โมลต่อลิตร)
U	$\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$	2.2×10^{-5}
Am	$\text{Am}(\text{OH})_2^+$	1.2×10^{-7}
Th	$\text{Th}(\text{OH})_4 (\text{aq})$	3.1×10^{-9}
Np	$\text{Np}(\text{OH})_3 \text{CO}_3^-$	3.4×10^{-9}
Pu	$\text{Pu}(\text{OH})_3 \text{CO}_3^-$	6.3×10^{-11}

Charton และ Parkhurst (2011) ศึกษาการใช้งานแบบจำลองทางธรณีเคมีด้วยโปรแกรม PHREEQC ผลจากการศึกษาพบว่าโปรแกรม PHREEQC สามารถนำมาใช้ในการศึกษาสถานะสมดุลทางธรณีเคมีของน้ำและแร่ธาตุ การแลกเปลี่ยนไอออน การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับตัวกลาง สารละลายของแข็งและก๊าซ ทั้งยังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาการละลายและการตกผลึกทางเคมีในรูปแบบทั่วไปได้เป็นอย่างดี โปรแกรม PHREEQC ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้ใช้งานได้ง่ายและสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมพื้นฐานของคอมพิวเตอร์ได้หลายประเภท นอกจากนี้ยังใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาทางธรณีเคมีอื่นๆ เช่น แบบจำลองการส่งผ่านของน้ำผิวดิน น้ำใต้ดินและลุ่มน้ำต่างๆ ทั้งยังพบอีกว่าสามารถนำ

โปรแกรม PHREEQC ไปใช้ในงานภาคสนาม งานในห้องปฏิบัติการและงานทางทฤษฎีได้อีกด้วย และเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมอื่นๆอีกต่อไปเพื่อนำมาใช้งานทางด้านธรณีเคมีที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นไป

Marsac และคณะ (2011) ศึกษาองค์ประกอบของธาตุหายากและกรดฮิวมิกส์ โดยใช้แบบจำลองทางธรณีเคมีจากโปรแกรม PHREEQC Model VI Coupling จากการศึกษาพบว่าโปรแกรมนี้นี้แสดงองค์ประกอบของ ธาตุหายากเบาและธาตุหายากหนัก โดยธาตุหายากเบาประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอกซี ในขณะที่ธาตุหายากหนัก ประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอกซีฟีนอลิกและกลุ่มฟีนอลิก และพบว่าหากเกิดทั้งธาตุหายากและโลหะอื่นๆพร้อมกันในระบบจะทำให้ได้รูปแบบของธาตุหายากและกรดฮิวมิกส์ที่แตกต่างกัน เช่น หากพบว่าเกิดอะลูมิเนียมจะได้รูปแบบของธาตุหายากและกรดฮิวมิกส์เป็นธาตุหายากหนัก แต่จะไม่พบรูปแบบที่มีกรดฮิวมิกส์รวมอยู่ด้วย ทำให้เกิดแบบจำลองใหม่ของปฏิกิริยาเคมีของน้ำของธาตุหายาก ดังนั้นหากมีการนำโปรแกรม PHREEQC มาใช้ในปฏิกิริยาเคมีที่มีการแตกตัวของแร่ธาตุหรือการตกผลึกทางเคมีที่สภาวะสมดุลหรือปฏิกิริยารีดอกซ์ควรมีการควบคุมกลไกการเกิดปฏิกิริยาและกำหนดให้มีการเคลื่อนที่ของมวลสาร 1 มิติ

ตารางที่ 2.15 การใช้แบบจำลองโปรแกรม PHREEQC ในการศึกษางานวิจัยด้านอื่นๆ

ผู้วิจัย	การศึกษาแบบจำลองโปรแกรม PHREEQC	ผลการทดลอง
Kimและคณะ (2008)	วิเคราะห์ห้องค์ประกอบและศึกษาค่าคงที่สมดุลการละลายของแร่แอคทีไนต์ในน้ำใต้ดินชุมชนและช่องว่างน้ำของแร่เบนทอไนต์	แสดงในตารางที่ 2.14
Chartonและ Parkhurst (2011)	ศึกษาการใช้งานแบบจำลองทางธรณีเคมีด้วยโปรแกรม PHREEQC	โปรแกรม PHREEQC สามารถนำมาใช้ในการศึกษาสภาวะสมดุลทางธรณีเคมีของน้ำและแร่ธาตุ ทั้งยังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาการละลายและการตกผลึกทางเคมีในรูปทั่วไปได้เป็นอย่างดี
Marsacและคณะ (2011)	ศึกษาองค์ประกอบของธาตุหายากและกรดฮิวมิกส์ โดยใช้แบบจำลองทางธรณีเคมีจากโปรแกรม PHREEQC Model VI Coupling	ธาตุหายากเบาประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอกซี ในขณะที่ธาตุหายากหนัก ประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอกซีฟีนอลิกและกลุ่มฟีนอลิก และพบว่าหากเกิดทั้งธาตุหายากและโลหะอื่นๆพร้อมกันในระบบจะทำให้ได้รูปแบบของธาตุหายากและกรดฮิวมิกส์ที่แตกต่างกัน

2.6.6 การใช้แบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ ในการศึกษางานวิจัยด้านอื่นๆ

Yan และคณะ (2008) นำแบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ มาใช้ศึกษาพฤติกรรมของโลหะหนักของกากของแข็งจากของเสียบ้านเรือน เพื่อให้สามารถทำนายผลการกำจัดโลหะหนักในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความเสถียรในการใช้งาน โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการนำแบบจำลอง Visual MINTEQ มาประยุกต์ใช้ ซึ่งค่าพีเอชของการชะล้างของกากของแข็งจากของเสียบ้านเรือน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของโลหะหนัก โดยปรอทและแคดเมียมจะศึกษากลไกการสลายตัวและการตกผลึกทางเคมี ส่วนสังกะสีและนิกเกิลจะศึกษากระบวนการดูดซับที่พื้นผิว โดยแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าโลหะหนักบางตัวเกิดทั้งปฏิกิริยาการสลายตัว ปฏิกิริยาการตกผลึกและปฏิกิริยาการดูดซับที่พื้นผิว ในขณะที่เดียวกันการศึกษากระบวนการสร้างเสถียรภาพในการทำนายสามารถคำนวณได้จากชนิดของไอออนทุกชนิดในระบบและสามารถทำนายโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย

Navarro และคณะ (2008) ศึกษาการเคลื่อนที่ของสารปรอทและแคลเซียมในบริเวณเหมืองปรอทเก่า โดยพบว่าของเสียจากเหมืองที่พบมากที่สุดคือสารปรอทและแคลเซียม จากการศึกษาหน้าชะล้างหน้าดินปรากฏผลว่าสารปรอทอาจเคลื่อนที่ของในรูปของสารประกอบของปรอทที่สลายตัวเป็นธาตุปรอทและจากการศึกษาโดยแบบจำลอง Visual MINTEQ แสดงให้เห็นว่าชนิดของปรอทที่พบได้มากที่สุดคือเมอร์คิวรีไฮดรอกไซด์ เมอร์คิวรี-คลอไรด์ เมอร์คิวรีคลอไรด์ และธาตุปรอท

Liu และคณะ (2011) ศึกษาการกำจัดซิงค์ไอออนออกจากบริเวณที่เคยเป็นโรงงานถ่านไฟฉายและโรงงานย้อมสี โดยทดลองกำจัดซิงค์ไอออนออกจากสารละลายไฮโดรคาลูไมท์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทำนายจากโปรแกรม Visual MINTEQ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสามารถสูงสุดในการกำจัดซิงค์ไอออนเท่ากับ 7.34 6.72 7.57 มิลลิโมลต่อลิตร โดยสารประกอบซัลเฟต สารประกอบไนเตรทและสารประกอบคลอไรด์ตามลำดับ เมื่อความ

เข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบซิงค์ซัลเฟต 10.20 มิลลิโมลต่อลิตร โดยจะตกผลึกออกมาในรูปของ ZnAl-CI-LDHs เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทำนายจากโปรแกรม Visual MINTEQ จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดซิงค์ไอออนมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์สามารถเกิดได้ดีในรูปของการตกผลึก ZnAl-LDHs โดยปัจจัยในการตกผลึกขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนลบในสารละลายและความเข้มข้นเริ่มต้นของซิงค์ไอออนในสารละลาย

ตารางที่ 2.16 การใช้แบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ ในการศึกษางานวิจัยด้านอื่นๆ

ผู้วิจัย	การศึกษาแบบจำลองโปรแกรม Visual MINTEQ
Yan และคณะ (2008)	ศึกษาพฤติกรรมของโลหะหนักของกากของแข็งจากของเสียบ้านเรือนโดยแบบจำลอง Visual MINTEQ ซึ่งค่าพีเอชของการชะล้างของกากของแข็งจากของเสียบ้านเรือน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของโลหะหนักโดยแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าโลหะหนักบางตัวเกิดทั้งปฏิกิริยาการสลายตัว ปฏิกิริยาการตกผลึกและปฏิกิริยาการดูดซับที่พื้นผิว การศึกษากระบวนการสร้างเสถียรภาพในการทำนายสามารถคำนวณได้จากชนิดของไอออนทุกชนิดในระบบและสามารถทำนายโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้
Navarro และคณะ (2008)	ศึกษาการเคลื่อนที่ของสารปรอทและแคลเซียมในบริเวณเหมืองปรอทเก่า ปรากฏผลว่าสารปรอทอาจเคลื่อนที่ของในรูปของธาตุปรอทและจากการศึกษาโดยแบบจำลอง Visual MINTEQ แสดงให้เห็นว่าชนิดของปรอทที่พบได้มากที่สุดคือเมอร์คิวรีไฮดรอกไซด์ เมอร์คิวรีคลอไรด์ เมอร์คิวรีคลอออกไซด์ และธาตุปรอท
Liu และคณะ (2011)	ศึกษาการกำจัดซิงค์ไอออนออกจากบริเวณที่เคยเป็นโรงงานถ่านไฟฉายและโรงงานย้อมสี ประสิทธิภาพการกำจัดซิงค์ไอออนมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์สามารถเกิดได้ดีในรูปของการตกผลึก ZnAl-LDHs โดยปัจจัยในการตกผลึกขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนลบในสารละลายและความเข้มข้นเริ่มต้นของซิงค์ไอออนในสารละลาย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้เป็นการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการประเมินส่วนประกอบและสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (สตรูไวท์) จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ภายใต้คุณสมบัติห้อง ที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย (Hazardous waste laboratory) อาคารสรีภาควิทยา (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิศวกรรมเคมี และวิศวกรรมโลหการ) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีแผนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและวางแผนการวิจัย
2. ศึกษาหลักการทำงานและขอบเขตการทำงานของแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0
3. เตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย
4. เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจากประชาฟาร์ม อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม
5. วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการทดลองตกผลึกสตรูไวท์ โดยพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณซีโอดี ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณไอออนของโลหะ ได้แก่ แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก สังกะสี และทองแดง
6. เตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรที่มีอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตใกล้เคียงกับน้ำทิ้งฟาร์มสุกร (ตารางที่ 2.5) โดยปรับปริมาตรน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรขนาด 1 ลิตร
7. ศึกษาและเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตและช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

8.ทดลองการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเพื่อศึกษา ลักษณะโครงสร้างผลึก ความเป็นผลึก ปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นทั้งหมดและเปรียบเทียบคุณภาพน้ำ หลังจากตกผลึกสตรูไวท์แล้ว โดยการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการตกผลึกจะทำการวิเคราะห์คุณภาพ น้ำจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเท่านั้น ส่วนการตกผลึกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรจะศึกษาเฉพาะลักษณะ ของน้ำก่อนการตกผลึกทางเคมี ปริมาณและลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นเท่านั้น

9.นำค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการ ตกผลึกสตรูไวท์เป็นข้อมูลนำเข้าในการประมวลผลและวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0

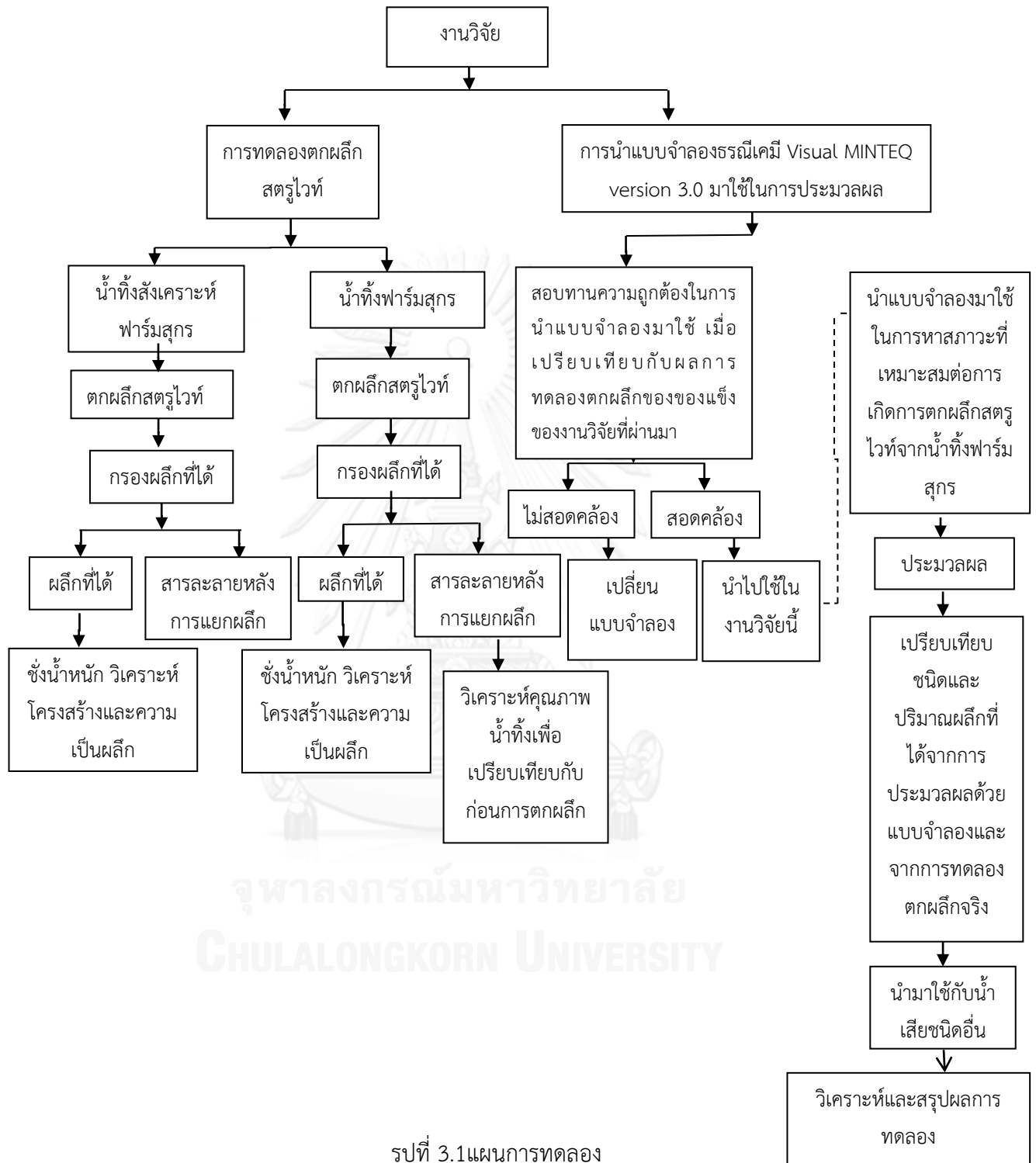
10.เปรียบเทียบปริมาณของผลึกที่ได้จากการทดลอง และคุณภาพน้ำหลังจากแยกผลึกออก แล้ว กับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0

11.วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3.2 แผนการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

1. ส่วนของการทดลองตกผลึกสตรูไวท์ในห้องปฏิบัติการ
2. ส่วนของการนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ในการประมวลผล เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมวลผลและผลจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากห้องปฏิบัติการ โดยแผนการทดลองในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1แผนการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การตกผลึกสเตรวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

1. เตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรโดยมีลักษณะตัวอย่างน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร ปริมาตร 1 ลิตร ตามคุณสมบัติเบื้องต้นดังตารางที่ 2.5 โดยเตรียมจากผลึกแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) และผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($NH_4H_2PO_4$) (การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมแสดงในภาคผนวก ก)
2. ปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต ออกเป็น 3 สภาวะ ดังนี้
 - 2.1 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1
 - 2.2 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1
 - 2.3 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1
3. กวนผสมตัวอย่างน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรที่เตรียมได้ โดยกวนเร็วด้วยความเร็ว 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และกวนช้าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
4. ปรับค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรที่กวนผสมแล้วด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ทั้ง 3 สภาวะ เพื่อให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 7.5 8 8.5 9 9.5 และ 10
5. นำตัวอย่างน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรที่ปรับพีเอชแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที

6. เมื่อครบกำหนดเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน 30 นาที นำตัวอย่างน้ำทิ้งสังเคราะห์ ฟาร์มสุกรไปกรองผลึกที่ได้ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 ยี่ห้อ Whatman (ขนาดรูพรุน 20-25 ไมโครเมตร)
7. นำผลึกที่ได้จากการกรองไปผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งน้ำหนักผลึกที่ได้และนำผลึกไปวิเคราะห์โครงสร้างและความเป็นผลึก บันทึกผลการทดลอง

3.3.2 การศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

3.3.2.1 การศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

ตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรในการทดลองในครั้งนี้เก็บมาจากประชาฟาร์ม อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม เก็บโดยวิธีจ้วงจากบ่อกักน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มขนาดกลาง โดยเก็บจากจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด 7 จุด ได้แก่ ด้านบนซ้าย-ขวา ตรงกลาง และด้านล่างซ้าย-ขวา ตรงกลาง และที่จุดกลางบ่อ แสดงดังรูปที่ 3.2 (ก และ ข) และวิเคราะห์พารามิเตอร์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณซีโอดี ปริมาณไนโตรเจน ในรูปทีเคเอ็น ปริมาณฟอสฟอรัส ปริมาณไอออนของโลหะ ได้แก่ แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก สังกะสี และทองแดง

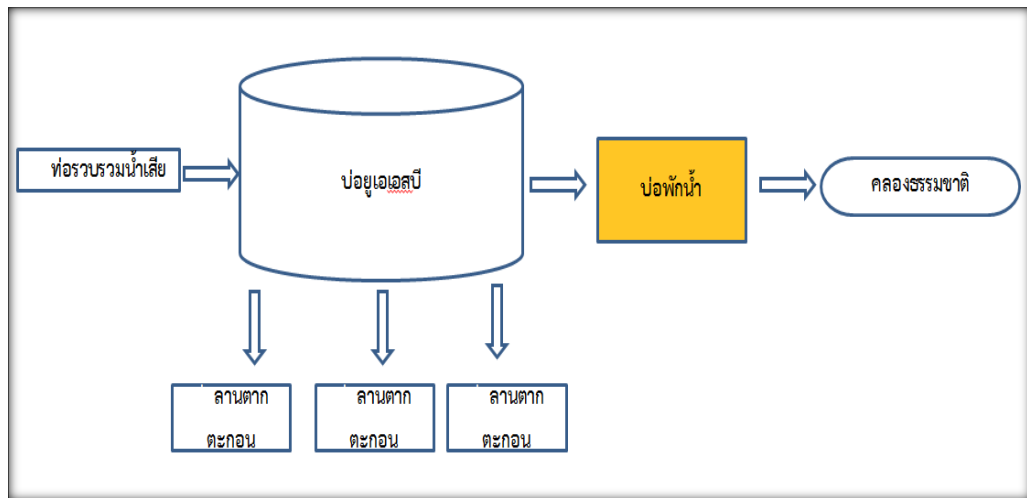
เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองในช่วงระยะเวลาที่ใกล้เคียงกับระยะเวลาที่ได้มีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรซึ่งวิเคราะห์โดยนายธงชัย อัมพรพะงา โดยทำการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 วัน (วันที่ 28 ตุลาคม ถึง 6 พฤศจิกายน 2556) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจากข้อมูลนายธงชัย อัมพรพะงา เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิจัย

3.3.2.2 การตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

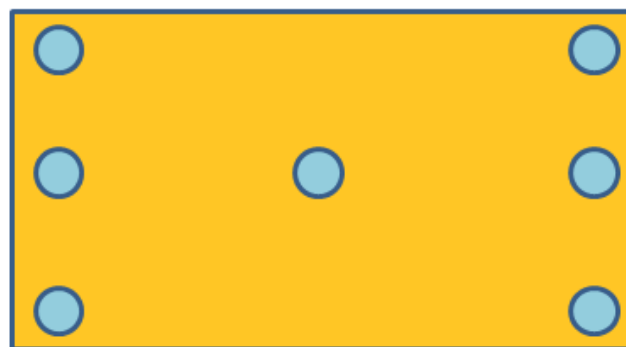
มีขั้นตอนดังนี้

1. นำตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรปริมาตร 1 ลิตร มาปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต โดยเติมผลึกแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) และผลึกโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) ออกเป็น 5 สภาวะ ดังนี้
 - 1.1 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1
 - 1.2 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1
 - 1.3 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1
 - 1.4 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1
 - 1.5 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1
2. กวนผสมตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่เตรียมได้ โดยกวนเร็วด้วยความเร็ว 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และกวนช้าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
3. ปรับค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่กวนผสมแล้วด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ทั้ง 3 สภาวะ เพื่อให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 8 9 และ 10
4. นำตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ปรับพีเอชแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที
5. เมื่อครบกำหนดเวลาที่ใช้ในการตกตะกอน 30 นาที นำตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรไปกรองผลึกที่ได้ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 ยี่ห้อ Whatman (ขนาดรูพรุน 20-25 ไมโครเมตร)

6. นำผลึกที่ได้จากการกรองไปฝังให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักผลึกที่ได้ และนำผลึกไปวิเคราะห์โครงสร้างและความเป็นผลึก บันทึกผลการทดลอง
7. วิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังจากแยกผลึกออกแล้ว ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณซีโอดี ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณไอออนของโลหะ ได้แก่ แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม เหล็ก สังกะสี และทองแดง บันทึกผลการทดลอง
8. เปรียบเทียบและวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังการตกผลึกสตรูไวท์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึกสตรูไวท์



(ก) แผนผังแสดงระบบบำบัดน้ำเสียประชาฟาร์ม อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม



● จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

(ข) ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจากบ่อพักน้ำ

รูปที่ 3.2 แผนผังระบบบำบัดน้ำเสียประชาฟาร์มและตำแหน่งการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจากบ่อพักน้ำ



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

3.3.3 การนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ในการประมวลผล

3.3.3.1 การสอบทานความถูกต้องการใช้งานของแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับ

งานวิจัยเรื่อง Assessing Nutrient Recovery from Piggery

Effluent โดย M.L. Ali, P.A. Schneider and N. Hudson (2003)

จากงานวิจัยของ M.L. Ali, P.A. Schneider and N. Hudson ซึ่งได้นำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้ดีที่สุด ซึ่งมีลักษณะการใช้งานของแบบจำลองตรงกับการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการใช้งานของแบบจำลองของผู้วิจัย จึงได้ทำการสอบทานความถูกต้องของการใช้งานแบบจำลองธรณีเคมี ในครั้งนี้โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยของ

M.L. Ali, P.A. Schneider and N. Hudson โดยนำลักษณะน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ปรากฏในงานวิจัยเป็นข้อมูลขาเข้าของการสอบทานครั้งนี้

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนชนิดต่างๆในการนำมาเป็นข้อมูลขาเข้าในการสอบทานแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ โดยอ้างอิงความเข้มข้นจากงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ต่างๆจากงานวิจัย Assessing Nutrient Recovery from Piggery Effluent โดย M.L. Ali, P.A. Schneider and N. Hudson (2003)

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)
Mg^{2+}	0.0143
NH_4^+	0.0186
PO_4^{3-}	0.0578

3.3.3.2 การนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

1. การประมวลผลด้วยแบบจำลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1.1 นำค่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรของแต่ละสถานะบันทึกเป็นข้อมูลขาเข้าของการประมวลผลของแบบจำลอง (รายละเอียดการคำนวณและค่าความเข้มข้นที่เป็นข้อมูลขาเข้าแสดงดังภาคผนวก ข)

1.2 กำหนดข้อมูลพื้นฐานของการประมวลผลของแต่ละสภาวะ ดังนี้

1.2.1 ค่าพีเอช เท่ากับ 7 7.5 8 8.5 9 9.5 และ 10

1.2.2 อุณหภูมิในการประมวลผล เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

1.2.3 หน่วยของความเข้มข้น คือ หน่วยโมลแลล

1.2.4 ชนิดของของแข็งที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อสภาวะสมดุล ได้แก่

1. Artinite
2. Brucite
3. Calcite
4. Dolomite(Ordered)
5. Dolomite(Disordered)
6. Magnesite
7. Hydroxyapatite
8. Hydromagnesite
9. Huntite
10. $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$
11. Struvite
12. $Mg_3(PO_4)_2(s)$

1.2.5 ทำการประมวลผลด้วยแบบจำลอง บันทึก วิเคราะห์และ
สรุปผลการทดลอง

2. การประมวลผลด้วยแบบจำลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึก
สตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังนี้

2.1 นำค่าความเข้มข้นของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรของแต่ละสภาวะ บันทึก เป็นข้อมูลเข้าของการประมวลผลของแบบจำลอง (รายละเอียดการ คำนวณและค่าความเข้มข้นที่เป็นข้อมูลเข้าแสดงดังภาคผนวก ข)

2.2 กำหนดข้อมูลพื้นฐานของการประมวลผลของแต่ละสภาวะ ดังนี้

2.2.1 ค่าพีเอช เท่ากับ 7 8 9 และ 10

2.2.2 อุณหภูมิในการประมวลผล เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

2.2.3 หน่วยของความเข้มข้น คือ หน่วยโมลแลต

2.2.4 ชนิดของของแข็งที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อสภาวะสมดุล ได้แก่

1. Artinite
2. Brucite
3. Calcite
4. Dolomite(Ordered)
5. Dolomite(Disordered)
6. Magnesite
7. Hydroxyapatite
8. Hydromagnesite
9. Huntite
10. $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$
11. Struvite
12. $Mg_3(PO_4)_2(s)$

2.2.5 ทำการประมวลผลด้วยแบบจำลอง บันทึก วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

3. การศึกษาสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) จากการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 และจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

เพื่อเป็นการศึกษาและเปรียบเทียบความเป็นไปได้ของการเกิดผลึกสตรูไวท์ขึ้นจริงในระบบในด้านของปริมาณที่มีโอกาสเกิดขึ้น เมื่อมีการนำค่าความเข้มข้นของพารามิเตอร์ต่างๆที่วิเคราะห์ได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเป็นข้อมูลนำเข้าของการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อเป็นการยืนยันข้อมูลการทดลองและการประมวลผลว่ามีความสอดคล้องและมีโอกาสเกิดผลึกสตรูไวท์ได้จริงในปริมาณที่เป็นไปได้ โดยทำการเลือกศึกษาสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน เนื่องจากแอมโมเนียมไอออนเป็นสารตั้งต้นหลักชนิดหนึ่งในการเกิดผลึกสตรูไวท์ และมีโอกาสหายไปจากระบบได้ง่ายเมื่อมีการปรับค่าพีเอชให้มีสภาวะที่เป็นต่างมากขึ้น ดังนั้นปริมาณของแอมโมเนียมไอออนจึงเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญตัวหนึ่งในการกำหนดปริมาณผลึกสตรูไวท์ที่จะเกิดขึ้นได้ โดยได้ทำการตรวจสอบควบคู่กับปริมาณแอมโมเนียมไอออนที่เหลือในระบบเมื่อสภาวะสมดุลทั้งจากการประมวลผลและการทดลอง

โดยงานวิจัยนี้ทำการตรวจสอบปริมาณแอมโมเนียมไอออนในช่วงพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 ในทุกๆอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูล เนื่องจากการศึกษาค้นคว้าพบว่า ผลึกสตรูไวท์เป็นผลึกที่ละลายได้น้อยในสภาวะที่ต่าง โดยช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดการตกผลึกสตรูไวท์คือค่าพีเอชประมาณ 8-9

3.3.3.3 การนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีน

นำความเข้มข้นเริ่มต้นจากน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนจากงานวิจัยเรื่อง Phosphate and potassium recovery from source separated urine through struvite precipitation โดย Wilsenach และคณะ (2006) เป็นข้อมูลขาเข้าในการประมวลผล (แสดงดังตารางที่ 3.2 และการคำนวณการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนแสดงในภาคผนวก ง) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ เมื่อมีการปรับอัตราส่วนของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เป็น 3 สถานะ โดยแต่ละสถานะปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7 8 และ 9

1. เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1
2. เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.5:1:1
3. เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 2:1:1

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีน (Wilsenach และคณะ , 2006)

สารประกอบ	ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.0044
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.0032
NaCl	0.0787
Na_2SO_4	0.0162
KH_2PO_4	0.0309
KCl	0.0215
NH_4Cl	0.0187

3.4 ขั้นตอนการบันทึกข้อมูลขาเข้า การประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูลขาออกของ แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0

1. เปิดหน้าต่างเพื่อเข้าสู่โปรแกรม เลือกเงื่อนไขการประมวลผลตามวัตถุประสงค์

- pH => เลือก calc. from mass and charge balance
- Ionic strength => เลือก to be calculated
- Concentration unit => เลือก Molal
- Temperature => เลือก 25°C



รูปที่ 3.4 หน้าหลักของโปรแกรม Visual MINTEQ version 3.0

2. Add components => กรอกชนิดและความเข้มข้นของข้อมูลเข้าในรูปของความเข้มข้นของไอออน เช่น ข้อมูลเข้าของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0.0218 \text{ molal}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.0750 \text{ molal}$$

$$[\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \text{ molal}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0182 \text{ molal}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0344 \text{ molal}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0017 \text{ molal}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.0172 \text{ molal}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0035 \text{ molal}$$

$$[\text{NO}_2^- \text{-N}] = 0.0254 \text{ molal}$$

$$[\text{NO}_3^- \text{-N}] = 0.0049 \text{ molal}$$

โดยเมื่อกรอกข้อมูลแต่ละชนิดเสร็จแล้ว => เลือก Add to list

Component name	Total concentration* Molal	Act guess?*
H-1	0.0408	<input checked="" type="checkbox"/>
Mg-2	0.0224	<input checked="" type="checkbox"/>
Cl-1	0.0448	<input checked="" type="checkbox"/>
N (NH4+)	0.0204	<input checked="" type="checkbox"/>
P (PO4)	0.0204	<input checked="" type="checkbox"/>

*The total concentration unit is the one chosen on Main menu
**No tick in this box means an activity guess of 10⁻¹⁶ M

รูปที่ 3.5 การบันทึกชนิดไอออนต่างๆลงในแบบจำลอง

3. เลือกเงื่อนไขที่ต้องการจากการประมวลผล

=> เลือก Solid phases and excluded species ที่แถบเมนู

=> เลือก Possible solid phases (เป็นชนิดของของแข็งที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล)

- โปรแกรมจะกำหนดให้เลือกชนิดของของแข็งที่ต้องการในการประมวลผล

=> Name of solid โดยเมื่อเลือกชนิดของของแข็งที่ต้องการแล้ว

โปรแกรมจะแสดงค่า $\log K_s$ และ ΔH_f ของของแข็งชนิดนั้น ซึ่ง

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการเลือกชนิดของของแข็งที่คาดว่าจะ

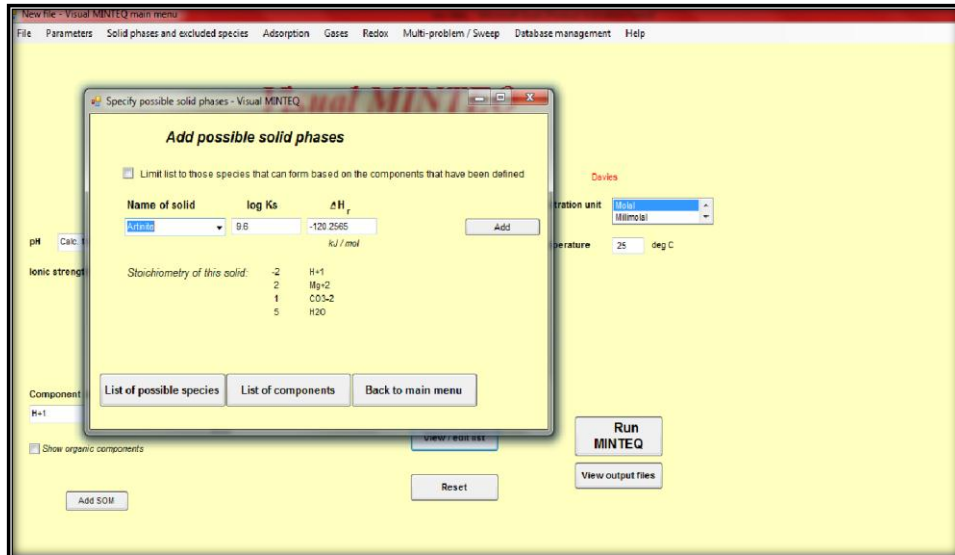
เกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล (M.I. Ali และคณะ, 2003)

ดังนี้

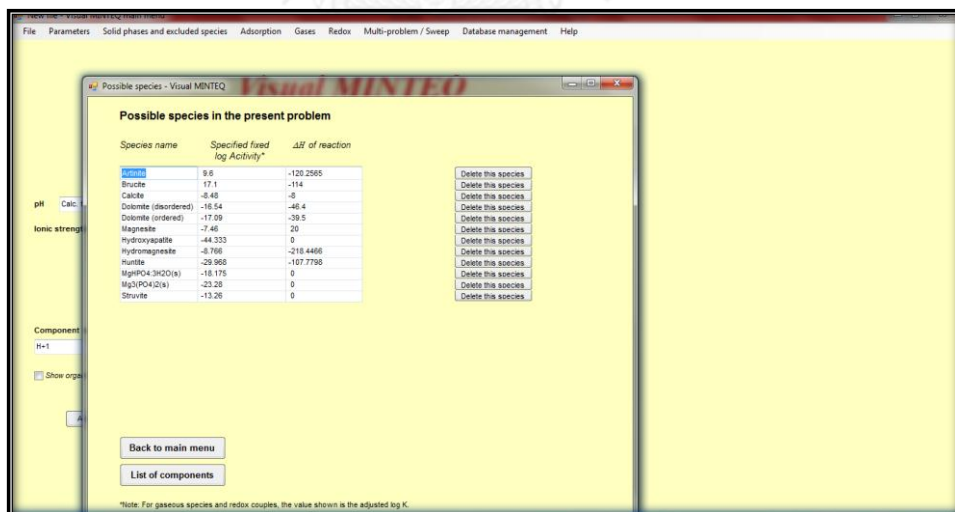
1. Artinite
2. Brucite
3. Calcite
4. Dolomite(Ordered)
5. Dolomite(Disordered)
6. Magnesite
7. Hydroxyapatite
8. Hydromagnesite
9. Huntite
10. $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$
11. Struvite
12. $Mg_3(PO_4)_2(s)$

- ทุกครั้งที่เลือกชนิดของของแข็ง => เลือก Add

- เมื่อเลือกชนิดของของแข็งครบตามที่ต้องการแล้ว
=> เลือก List of possible species



รูปที่ 3.6 บันทึกชนิดของของแข็งที่คาดว่าจะเกิดขึ้น



รูปที่ 3.7 ชนิดของของแข็งทั้งหมดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล

4. เลือก Multi-problem/sweep ที่แถบเมนู

=> เลือก Sweep one parameter is varied

=> State the number of problems => 4 (จำนวนพีเอชที่ต้องการให้

โปรแกรมประมวลผล เช่น พีเอชเท่ากับ 7 8 9 และ 10)

=> Choose sweep component => เลือก pH

=> Start value => เลือก 7

=> Increment between values => เลือก 1 (พีเอชเท่ากับ 7 8 9 และ 10)

=> Choose components/ species for sweep output

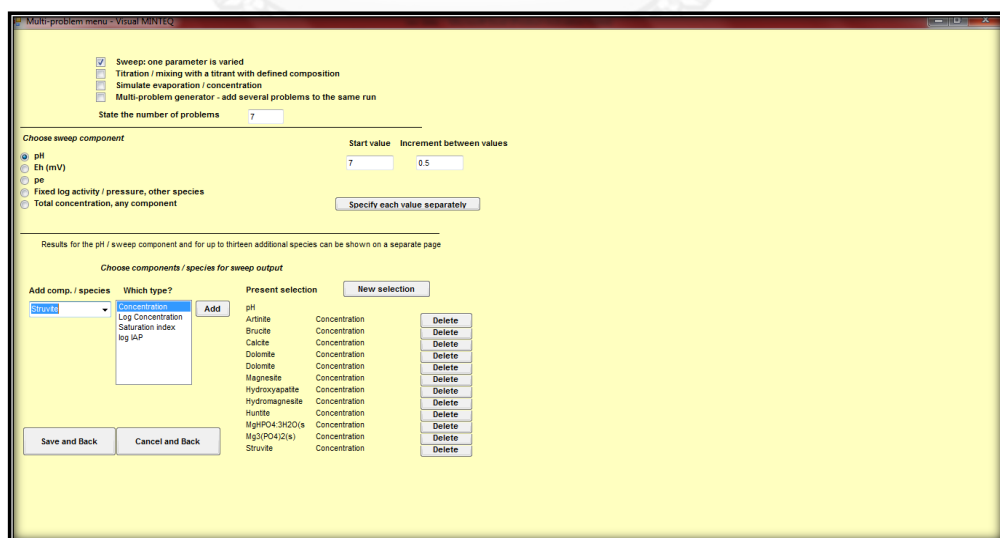
=> Add comp. /species => เลือกชนิดของของแข็งที่คาดว่าจะ

จะเกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล (ดังข้อ 3)

=> Which type ? => เลือก concentration

=> เลือก Add

=> เลือก Save and Back เพื่อกลับเข้าสู่หน้าหลักอีกครั้ง



รูปที่ 3.8 สถานะการเลือกช่วงค่าพีเอชในการประมวลผลและความเข้มข้นของของแข็งที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล

5. เมื่อเข้าสู่หน้าหลัก => เลือก Run MINTEQ



รูปที่ 3.9 เข้าสู่หน้าหลักของโปรแกรมเพื่อเลือกเตรียมประมวลผล

6. วิเคราะห์ผลการประมวลผล โดยหน้าหลักในการแสดงผลคือ

- ผลการประมวลผลโดยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 แสดงสภาวะสมดุลเมื่อค่าพีเอชของระบบต่างๆ
 - => แสดงผลการคำนวณ Ionic strength
 - => แสดงผลการคำนวณ Sum of cation (eq/kg)
 - => แสดงผลการคำนวณ Sum of anion (eq/kg)
 - => แสดงผลการคำนวณ Charge difference (%)
 - => แสดงผลการคำนวณ Concentration and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

Visual MINTEQ - Output

This is a sweep output file - Select Problem no. 1 No. of iterations 18

pH 7.000 Sum of cations (eq/kg) 1.6851E-02
 Ionic strength 0.0368 Sum of anions (eq/kg) 4.8135E-02
 Charge difference (%) 45.494056

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol / l)

Species	Concentration	Activity	Log activity
CaNH32+2	1.3294E-25	6.5649E-26	-25.183
Ca+2	7.7621E-17	3.8332E-17	-16.416
Ca+2	3.9022E-18	3.2712E-18	-17.485
CaCO3 (aq)	2.0562E-33	2.0737E-33	-32.683
CaH2PO4+	1.5265E-18	1.2796E-18	-17.893
CaHCO3+	4.0490E-32	3.2943E-32	-31.469
CaHPO4 (aq)	1.6421E-17	1.6551E-17	-16.781
CaNH3+2	5.7784E-21	2.8535E-21	-20.545
CaOH+	9.1645E-23	7.6826E-23	-22.114
CaPO4-	5.2564E-19	4.4064E-19	-18.356
Cl-1	4.0528E-02	3.3974E-02	-1.469
CO3-2	6.6009E-20	3.2599E-20	-19.487
H+1	1.1829E-07	1.0000E-07	-7.000
HCO3-1 (aq)	1.5506E-17	1.5638E-17	-16.806
H2PO4-	1.7788E-03	1.4912E-03	-2.826
H3PO4	2.0785E-08	2.0966E-08	-7.678

View species distribution

Execution time (s): 1.21875

รูปที่ 3.10 หน้าหลักของข้อมูลขาออกจากการประมวลผล

=> แสดงชนิดและปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล

Visual MINTEQ - Output

This is a sweep output file - Select Problem no. 1 No. of iterations 15

pH 7.000 Sum of cations (eq/kg) 1.9206E-02
 Ionic strength 0.0401 Sum of anions (eq/kg) 4.8834E-02
 Charge difference (%) 43.539400

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol / l)

Species	Concentration	Activity
Cl-1	4.4419E-02	3.7029E-02
H+1	1.1996E-07	1.0000E-07
H2PO4-	1.3859E-03	1.1532E-03
HPO4-	1.6094E-08	1.6243E-08
HPO4-2	1.5166E-03	7.3226E-04
MgNH32+2	1.5429E-11	7.4478E-12
Mg+2	4.5168E-02	2.1609E-03
Mg+2	3.8562E-04	3.2145E-04
MgHPO4 (aq)	9.9838E-04	1.0076E-03
MgOH+	9.9904E-08	8.3279E-08
MgPO4-	3.6421E-07	3.0360E-07
NH3 (aq)	4.6009E-05	4.6026E-05
NH4+1	9.7892E-03	8.1602E-03
OH-	1.2048E-07	1.0045E-07
PO4-3	1.5890E-08	3.0879E-09

View species distribution

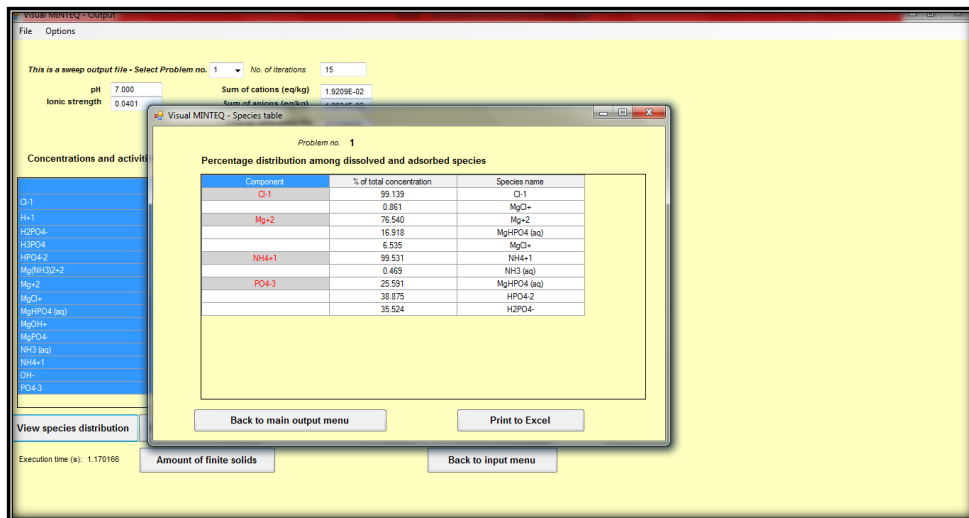
Execution time (s): 1.170168

Partial pressures of gases - Visual MINTEQ

Gas	Partial pressure (bars)
NH3 (g)	7.9744E-07

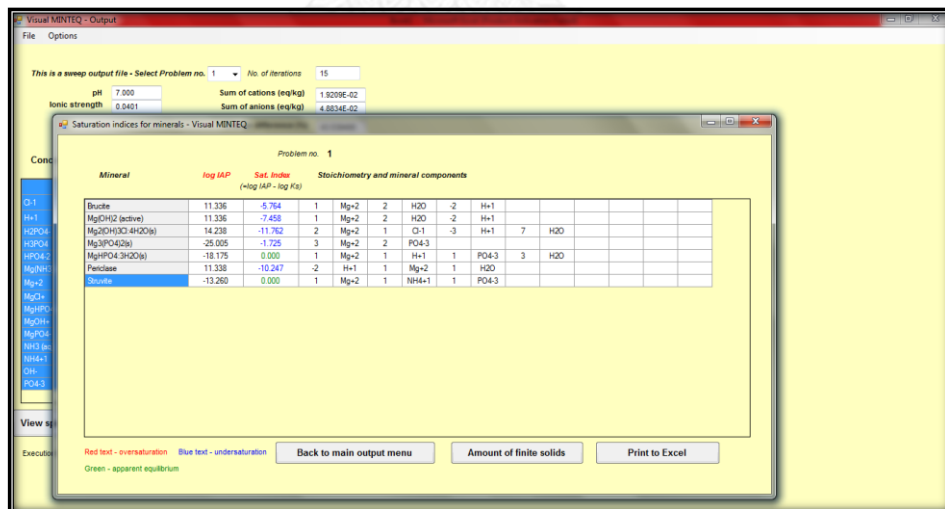
รูปที่ 3.11 ชนิดและปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้นที่สภาวะสมดุล

=> แสดงผลการคำนวณ Percentage distribution among dissolved and adsorbed species



รูปที่ 3.12 ชนิดของสารประกอบต่างๆที่เกิดขึ้น

=> แสดงผลการคำนวณ Saturation indices for minerals



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ของของแข็งที่ทำการเลือกและค่าดัชนีความอิ่มตัวของของแข็ง

=> แสดงผลการคำนวณ Distribution of components between dissolved, sorbed and precipitated phases

Equilibrated mass distribution - Visual MINTEQ

Problem no. 1

Distribution of components between dissolved, sorbed and precipitated phases
(Concentrations in moles)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Cl-1	4.4509E-02	100.000	0	0.000	0	0.000
H+1	5.2405E-03	100.000	0	0.000	0	0.000
Mg+2	5.9013E-03	26.345	0	0.000	1.6499E-02	73.655
NH4+1	9.8353E-03	48.212	0	0.000	1.0565E-02	51.788
PO4-3	3.9012E-03	19.124	0	0.000	1.6499E-02	80.876

Back to main output menu Print to Excel

View species distribution Display saturation indices Equilibrated mass distribution Selected sweep results

Execution time (s): 1.170166 Amount of finite solids Back to input menu

รูปที่ 3.14 ความเข้มข้นของไอออนที่ถูกดูดซับ ละลายและตกผลึก

=> แสดงผลการคำนวณ Selected sweep results

Visual MINTEQ - Selected sweep results

Problem no.	pH	Atrite Concentration	Brucite Concentration	Calcite Concentration	Dolomite (sorbed) Concentration
1	7.000	0	0	0	0
2	7.500	0	0	0	0
3	8.000	0	0	0	0
4	8.500	0	0	0	0
5	9.000	0	0	0	0
6	9.500	0	0	0	0
7	10.000	0	0	0	0

Main output menu Print to Excel

Include last column when printing to Excel

รูปที่ 3.15 การประมวลผลรวมความเข้มข้นของของแข็งที่เกิดขึ้นที่สภาวะสมดุล

3.5 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

ตารางที่ 3.3 วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

ลำดับที่	พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์	รหัสมาตรฐาน
1.	ค่าพีเอช	pH Value (Electrometric Method)	4500-H ⁺ (B)
2.	ปริมาณซีโอดี (ซีโอดีละลายน้ำ)	Closed Reflux (Titrimetric Method)	5220C
3.	ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น	Semi-Micro-Kjeldahl Method	4500-N _{org} (C)
4.	ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	Vanadomolybdophosphoric acid colorimetric method	4500-P (C)
5.	ปริมาณไอออนของโลหะ	Metals by flame atomic absorption spectrometry	(A)

3.6 สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.6.1 สารเคมีต่างๆที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3.4 สารเคมีต่างๆที่ใช้ในการวิจัย

ลำดับที่	สารเคมี	คุณภาพ	บริษัท
1.	Ammonium dihydrogen phosphate	A.R. Grade	Carlo Erba
2.	Sodium Hydroxide	A.R. Grade	Ajax Finechem Pty Ltd
3.	Sodium dihydrogen phosphate anhydrous	A.R. Grade	QReC
4.	Magnesium chloride	A.R. Grade	Ajax Finechem Pty Ltd
5.	Hydrochloric acid 36%	A.R. Grade	Ajax Finechem Pty Ltd
6.	Sulfuric Acid 98%	A.R. Grade	Ajax Finechem Pty Ltd
7.	Nitric Acid 6	A.R. Grade	Carlo Erba

3.6.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ตารางที่ 3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ลำดับที่	อุปกรณ์ และเครื่องมือ	ยี่ห้อ(รุ่น)
1.	เครื่องวัดค่าพีเอชของน้ำ	DENVAR INSTRUMENT
2.	กระดาษกรอง ขนาดรูพรุน 20-25 ไมโครเมตร	Whatman
3.	เครื่อง UV-spectrophotometer	Thermo Electron Corporation
4.	เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy	GBC (รุ่นAvanta)
5.	เครื่องแก้วทั่วไป	
6.	ชุดกรวยกรองสุญญากาศ	บริษัท KF NEUBERGER(รุ่น D-7912F)

3.6.3 อุปกรณ์และเครื่องมือในการกวนผสมตัวอย่าง

ตารางที่ 3.6 อุปกรณ์และเครื่องมือในการกวนผสมตัวอย่าง

ลำดับที่	อุปกรณ์ และเครื่องมือ	ยี่ห้อ(รุ่น)
1.	เครื่องแม่เหล็กกวนผสม	LABINCO (Model LD-716)
2.	เครื่องแก้วทั่วไป	

3.6.4 อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลึก

ตารางที่ 3.7 อุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลึก

ลำดับที่	อุปกรณ์ และเครื่องมือ	ยี่ห้อ(รุ่น)
1.	เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง	DRAGON 204, METTLER TOLEDO
2.	เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)	Model D8 Advance: Bruker AXS
3.	เครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM)	OXFORD Instruments
4.	โถดูดความชื้น	

3.7 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิจัย

การทดลองในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร คือ

1. ตัวแปรอิสระ คือ ตัวแปรที่กำหนดขึ้น เป็นสาเหตุให้เกิดผลในการทดลอง
2. ตัวแปรควบคุม คือ ตัวแปรที่ควบคุมให้มีค่าคงที่ในการทดลอง
3. ตัวแปรตาม คือ ตัวแปรซึ่งเป็นผลมาจากตัวแปรอิสระในการทดลอง

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์ (MAP) จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. พีเอช	- ปรับพีเอชอยู่ในช่วง 7-10
2.อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต	- ปรับให้อยู่ในช่วง 1:1:1 1.1:1:1 1.2:1:1
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม	
- กวนเร็ว	- 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- กวนช้า	- 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
2. เวลาในการตกตะกอน	- 30 นาที
ตัวแปรตาม	เครื่องมือที่ใช้วัด
1. ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบผลึก MAP	
- ลักษณะโครงสร้างของผลึก	- เครื่อง Scanning Eletron Microscope
- องค์ประกอบของผลึก	- เครื่อง X-Ray Diffractrometer
2. ปริมาณของตะกอน(ผลึก)	- กรองผ่านกระดาษกรองขนาดรูพรุน 20-25 ไมโครเมตร ฝั่งให้แห้ง นำมาชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์ (MAP) จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. พีเอช	- ปรับพีเอชอยู่ในช่วง 7-10
2. อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต	- ปรับให้อยู่ในช่วง 0.8:1:1 0.9:1:1 1:1:1 1.1:1:1 1.2:1:1
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเร็วที่ใช้ในการกวนผสม	
- กวนเร็ว	- 240 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที
- กวนช้า	- 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
2. เวลาในการตกตะกอน	- 30 นาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์/ เครื่องมือที่ใช้วัด
1. ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบผลึก MAP	
- ลักษณะโครงสร้างของผลึก	- เครื่อง Scanning Eletron Microscope
- องค์ประกอบของผลึก	- เครื่อง X-Ray Diffractometer
2. ปริมาณของตะกอน	- กรองผ่านกระดาษกรองขนาดรูพรุน 20-25 ไมโครเมตร ฝั่งให้แห้ง นำมาชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
3. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งหลังตกตะกอน	- ปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น ปริมาณซีโอดีละลายและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด
4. ธาตุโลหะ ได้แก่ Mg^{2+} Ca^{2+} K^+ Fe^{2+} Zn^{2+} Cu^{2+}	เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบสมดุลเคมีของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรโดยใช้แบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกรในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นการสอบทานแบบจำลองและใช้แบบจำลองในการทำนายปริมาณสารเคมีและสถานะที่เหมาะสมสำหรับน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเพื่อให้เกิดผลึกสตรูไวท์ได้มากที่สุด

เนื่องจากแผนการทดลองของงานวิจัยนี้ต้องนำปริมาณผลึกที่ได้จากการทดลองตกผลึกในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับปริมาณผลึกที่ได้จากการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 ทั้งนี้ชนิดของผลึกหลักที่ทำการศึกษาคือผลึกสตรูไวท์ ซึ่งสามารถเกิดการตกผลึกได้ดีในสถานะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง ดังนั้นผู้ดำเนินการวิจัยจึงมุ่งนำเสนอและให้ความสำคัญกับค่าพีเอชที่สถานะสมดุลของสารละลาย (น้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกร) ที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางหรือเป็นด่างเท่านั้น โดยจะทำการเลือกสารละลายที่มีค่าพีเอชที่สถานะสมดุลใกล้เคียงกับค่าพีเอช 7 8 และ 9 เพื่อความสะดวกและความแม่นยำของการเปรียบเทียบชุดข้อมูลของงานวิจัยในครั้งนี้

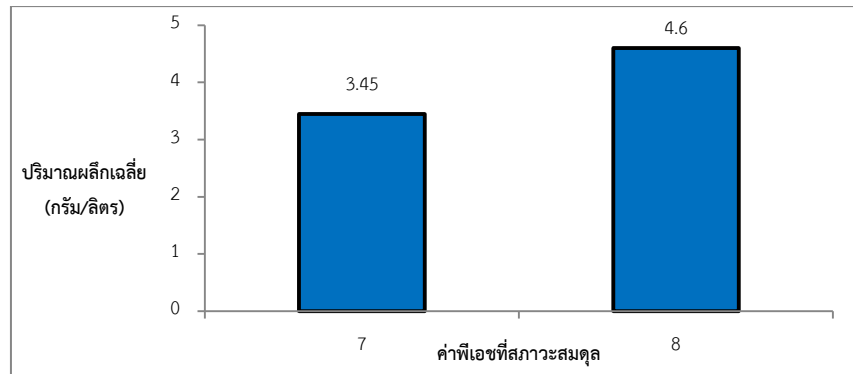
4.1 ผลการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

4.1.1 ผลการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

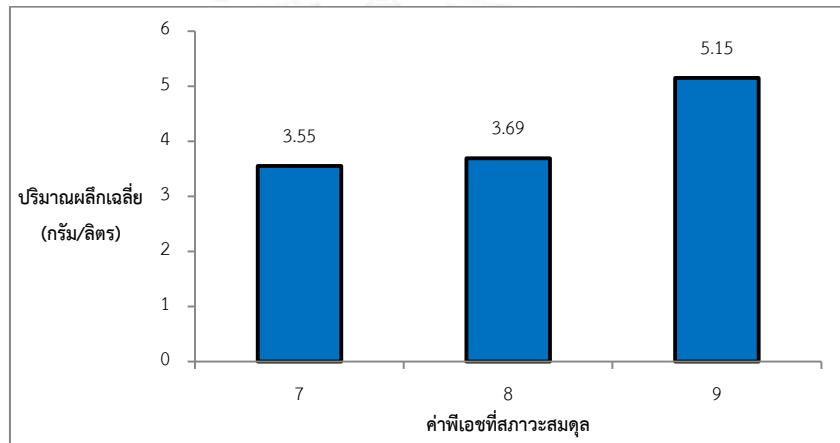
จากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรพบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 และค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 7.5 8 8.5 9 9.5 และ 10 เมื่อถึงสถานะสมดุลน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรจะมีค่าพีเอชลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชเริ่มต้น โดยที่สถานะสมดุลน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรมีค่าพีเอชเท่ากับ 5.8 6.3 6.4 6.7 6.9 7.2 และ 8.2 ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ

7 7.5 8 8.5 9 9.5 และ 10 จะมีค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 6 6.3 6.7 6.9 7.1 8.1 และ 8.8 ตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 น้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรจะมีค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 6.1 6.4 7 7.1 8.2 8.5 และ 8.8 ตามลำดับ โดยพบว่าในทุกๆอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต จะมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลึกสตรูโวท์จะสามารถละลายได้น้อยลงในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง แต่จะสามารถละลายได้ดีขึ้นในสภาวะที่เป็นกรด และเมื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตกับปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นเมื่อสภาวะสมดุลพบว่า เมื่อมีการปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตให้มีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากแมกนีเซียมไอออนที่ได้เติมลงไปจะไปทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างแอมโมเนียมไอออนและฟอสเฟตไอออน ทำให้เกิดการตกผลึกสตรูโวท์ได้ดีขึ้น โดยพบว่าที่อัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 จะเกิดปริมาณผลึกเฉลี่ยมากที่สุด (ความสัมพันธ์ของปริมาณผลึกเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่สภาวะสมดุลกับค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลต่างๆของระบบแสดงในภาคผนวก ฉ)

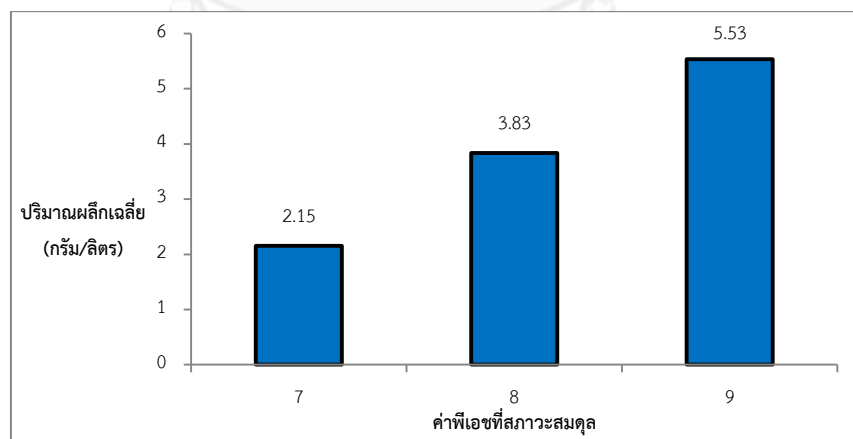
ดังนั้นปริมาณผลึกเฉลี่ยจากการตกผลึกสตรูโวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 เมื่อค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 3.45 กรัมต่อลิตรและ 4.60 กรัมต่อลิตรตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.1(ก) เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1 ปริมาณผลึกเฉลี่ยเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 8 และ 9 มีค่าเท่ากับ 3.55 กรัมต่อลิตร 3.69 กรัมต่อลิตรและ 5.15 กรัมต่อลิตรตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.1(ข) และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 ปริมาณผลึกเฉลี่ยเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 8 และ 9 มีค่าเท่ากับ 2.15 กรัมต่อลิตร 3.83 กรัมต่อลิตร และ 5.53 กรัมต่อลิตรตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.1(ค)



(ก) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1



(ข) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1



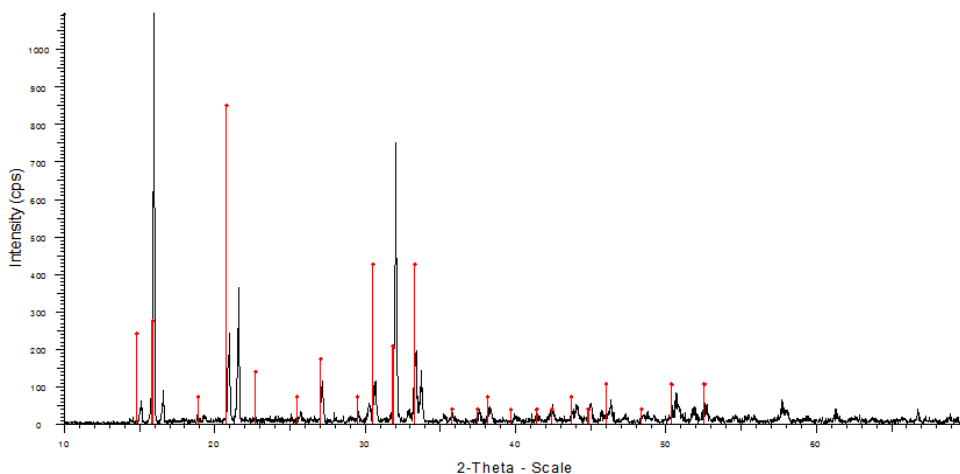
(ค) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1


รูปที่ 4.1 ปริมาณผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและความเป็นผลึกจากการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

4.1.2.1 โครงสร้างของผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยมุมขนาด 60-70 องศา ชนิด 2 Theta พบว่าผลึกที่ได้จากการตกผลึกในน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 ผลึกที่ได้มีโครงสร้างตรงกับผลึกสตรูไวท์จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลึกที่ได้จากการตกผลึกในน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 คือผลึกสตรูไวท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

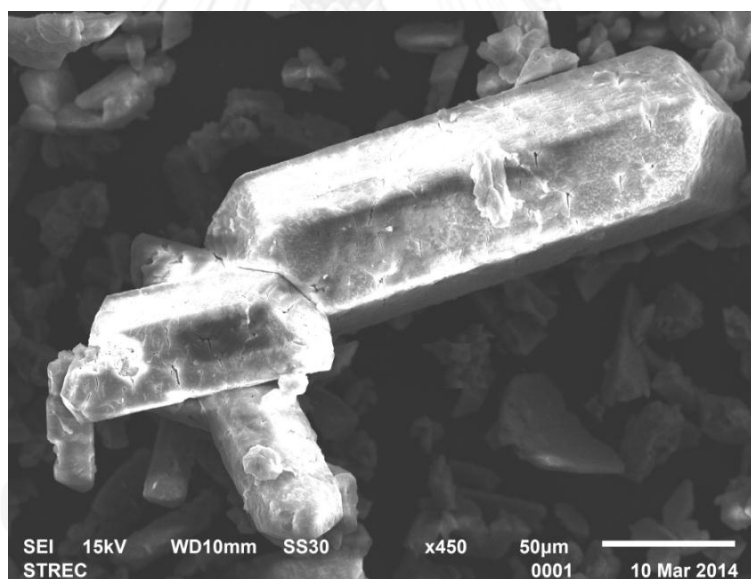


คือผลึก MAP จากฐานข้อมูลเครื่อง XRD  คือ ผลึกจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่อค่าพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9

รูปที่ 4.2 โครงสร้างของผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของผลึกสตรูไวท์จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

4.1.2.2 ความเป็นผลึกของผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ ฟาร์มสุกร

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของผลึกที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกำลังขยาย 450 เท่าพบว่า ผลึกที่ได้จากการตกผลึกในน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 ผลึกที่ได้มีความเป็นผลึกตรงกับผลึกสตรูไวท์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลึกที่ได้จากการตกผลึกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 คือผลึกสตรูไวท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9

4.2 ผลการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

4.2.1 ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ

คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศซึ่งวิเคราะห์โดย นายธงชัย อัมพรพะงา โดยทำการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 วัน (วันที่ 28 ตุลาคม ถึง 6 พฤศจิกายน 2556) แสดงดังตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (ธงชัย อัมพรพะงา, 2556)

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	คุณภาพน้ำทิ้ง	หน่วย	S.D.	มาตรฐานน้ำทิ้ง
1. ลักษณะของตัวอย่างน้ำ	สีน้ำตาลเหลือง	-	-	ไม่ระบุค่า
2. อุณหภูมิ	31	องศาเซลเซียส	0	ไม่ระบุค่า
3. ค่าพีเอช	7.23	-	0.15	5.5-9*
4. ปริมาณซีโอดี	476	มิลลิกรัมต่อลิตร	25.85	400*
5. ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น	254.5	มิลลิกรัมต่อลิตร	8.64	200*
6. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	37.73	มิลลิกรัมต่อลิตร	6.35	ไม่ระบุค่า
7. ปริมาณโลหะ				
1) แมกนีเซียม	55.47	มิลลิกรัมต่อลิตร	3.13	ไม่ระบุค่า
2) แคลเซียม	68.76	มิลลิกรัมต่อลิตร	1.64	ไม่ระบุค่า
3) โพแทสเซียม	225.32	มิลลิกรัมต่อลิตร	19.26	ไม่ระบุค่า
4) เหล็ก	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	ไม่ระบุค่า
5) ทองแดง	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	1.0**
6) สังกะสี	ตรวจไม่พบ	มิลลิกรัมต่อลิตร	-	5.0**

* มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก

** มาตรฐานการระบายน้ำลงทางชลประทาน

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ พบว่า น้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีสีน้ำตาลค่อนข้างเหลือง อุณหภูมิของน้ำทิ้งมีค่าประมาณ 31 องศาเซลเซียส มีค่าพีเอชประมาณ 7.23 ปริมาณซีโอดีเท่ากับ 476 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเท่ากับ 254.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดเท่ากับ 37.73 มิลลิกรัมต่อลิตร ชนิดและปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบได้แก่ แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม เท่ากับ 55.47 68.76 และ 225.32 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้น จะพบว่าปริมาณซีโอดีและปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นมีปริมาณที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็กได้กำหนดไว้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

และจากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีค่าเท่ากับ 0.0023:0.0182:0.0010 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเติมผลึกแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) และผลึกโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) เพื่อปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตให้มีอัตราส่วนเป็น 0.8:1:1 0.9:1:1 1:1:1 1.1:1:1 และ 1.2:1:1 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก)

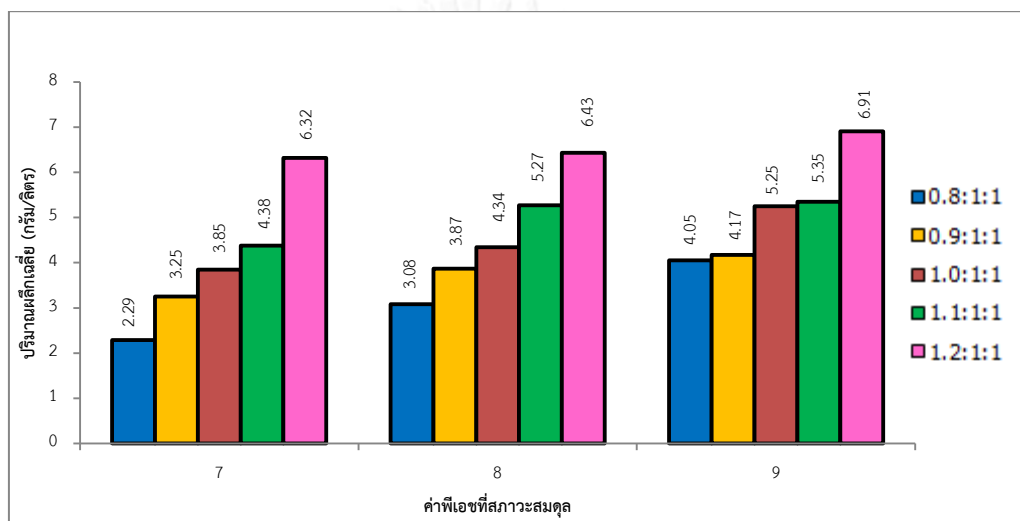
4.2.2 ผลการศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

จากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรพบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1 และค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 8 9 และ 10 เมื่อถึงสภาวะสมดุลน้ำทิ้งฟาร์มสุกรจะมีค่าพีเอชลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอชเริ่มต้น โดยที่สภาวะสมดุลน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีค่าพีเอชเท่ากับ 6.8 7 8 และ 9 ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1 เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 8 9 และ 10 จะมีค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 6.7 7.2 7.9 และ 9 ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้น

เท่ากับ 7 8 9 และ 10 จะมีค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 6.4 7.3 7.8 และ 9 ตามลำดับ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 8 9 และ 10 จะมีค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 6.3 7.2 8 และ 9.1 ตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 น้ำทิ้งฟาร์มสุกร จะมีค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 6.5 7.2 8.4 และ 9.1 ตามลำดับ โดยพบว่าในทุกๆ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตจะมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลึกสตรูไวท์จะสามารถละลายได้น้อยลงในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นด่าง แต่จะสามารถละลายได้ดีขึ้นในสภาวะที่เป็นกรด และเมื่อศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตกับปริมาณผลึกที่สภาวะสมดุลพบว่า เมื่อมีการปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตให้มีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกจะเพิ่มขึ้น เนื่องแมกนีเซียมไอออนที่ได้เติมลงไปให้มีอัตราส่วนโดยโมลเพิ่มขึ้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างแอมโมเนียมไอออนและฟอสเฟตไอออนในการเกิดผลึก ทำให้เกิดการตกผลึกสตรูไวท์ได้ดีขึ้น โดยพบว่าที่อัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 จะเกิดปริมาณผลึกเฉลี่ยมากที่สุด (ความสัมพันธ์ของปริมาณผลึกเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่สภาวะสมดุลของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรกับค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลของระบบแสดงในภาคผนวก ฉ)

ดังนั้นจากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่อมีการปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1 0.9:1:1 1:1:1 1.1:1:1 และ 1.2:1:1 พบว่าเมื่อมีการปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกเฉลี่ยที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกับอัตราส่วนโดยโมลที่ปรับเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 ในทุกๆช่วงพีเอชที่สภาวะสมดุลจะพบปริมาณผลึกเฉลี่ยมากที่สุด โดยเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 8 และ 9 จะมีปริมาณผลึกเฉลี่ยเท่ากับ 6.32 กรัมต่อลิตร 6.43 กรัมต่อลิตรและ 6.91 กรัมต่อลิตรตามลำดับ เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าว น้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีปริมาณแมกนีเซียมไอออนมากที่สุด ทำให้แมกนีเซียม

ไอออนเกิดการรวมตัวกับแอมโมเนียมไอออนและฟอสเฟตไอออนได้ดี ดังนั้นจึงเกิดการตกผลึก สตรูไวท์ได้ดีที่สุด สอดคล้องกับ Zhang และคณะ (2010) ที่พบว่าเมื่อสารละลายมีความเข้มข้น เพิ่มขึ้น โดยที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 8.9-9.2 สารละลายมีแนวโน้มที่จะเกิดการตกผลึก ได้มากขึ้นและผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณผลึกเฉลี่ยจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรแสดงได้ ดังรูปที่ 4.4



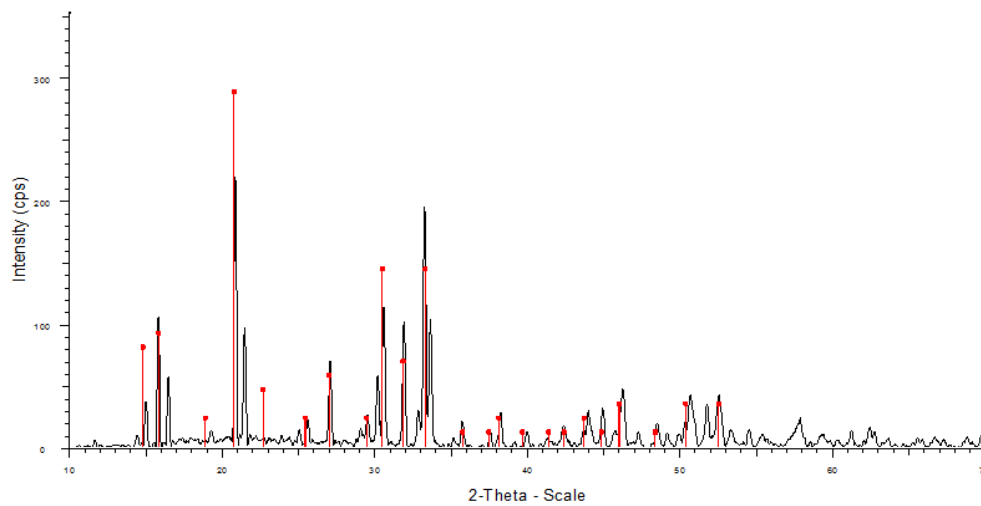
รูปที่ 4.4 ปริมาณผลึกเฉลี่ยจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

4.2.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกและความเป็นผลึกจากการตกผลึกสตรูไวท์จาก น้ำทิ้งฟาร์มสุกร

4.2.3.1 โครงสร้างของผลึกจากการทดลองตกผลึกทางเคมีจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

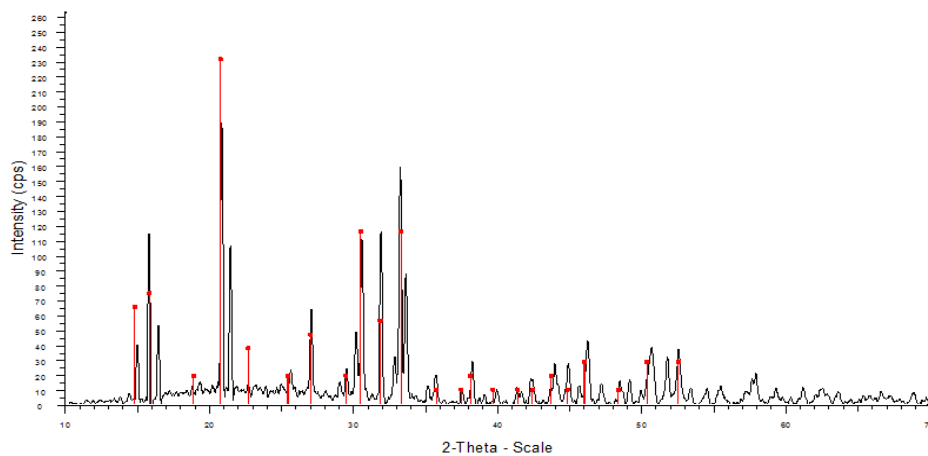
จากการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยมุมขนาด 60-70 องศา ชนิด 2 Theta พบว่าผลึกที่ได้จากการตกผลึกในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8 และ 9 และที่ 1.2:1:1 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 ผลึกที่ได้มีโครงสร้างของผลึกตรงกับผลึกสตรูไวท์

จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลึกที่ได้จากการตกผลึกในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8 และ 9 และที่ 1.2:1:1 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 คือผลึกสตรูไวท์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5



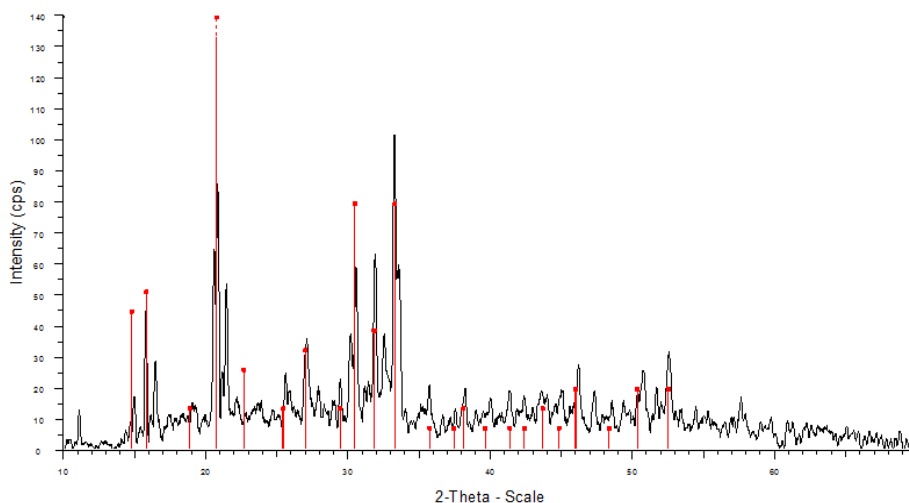
(ก) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1

พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8



(ข) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1

พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9



(ค) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1

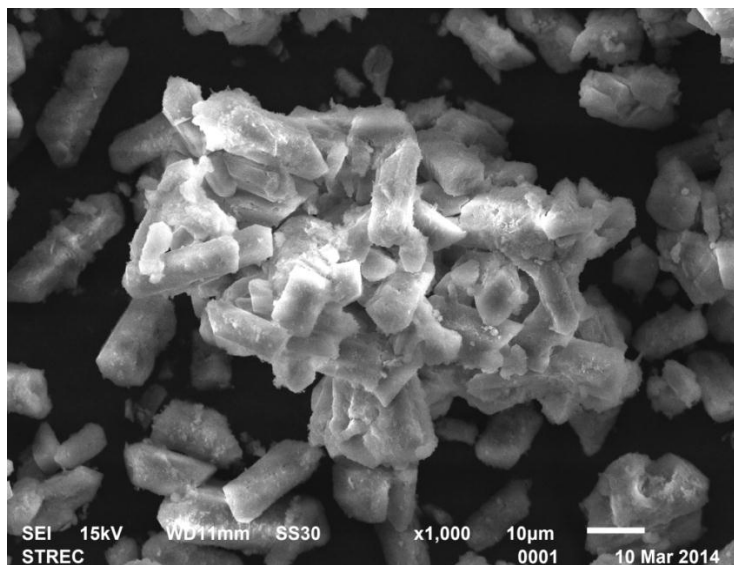
พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9

คือผลึก MAP จากฐานข้อมูลเครื่อง XRD คือผลึกจากการทดลองในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

รูปที่ 4.5 โครงสร้างของผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของผลึกสตรูไวท์จากฐานข้อมูลของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

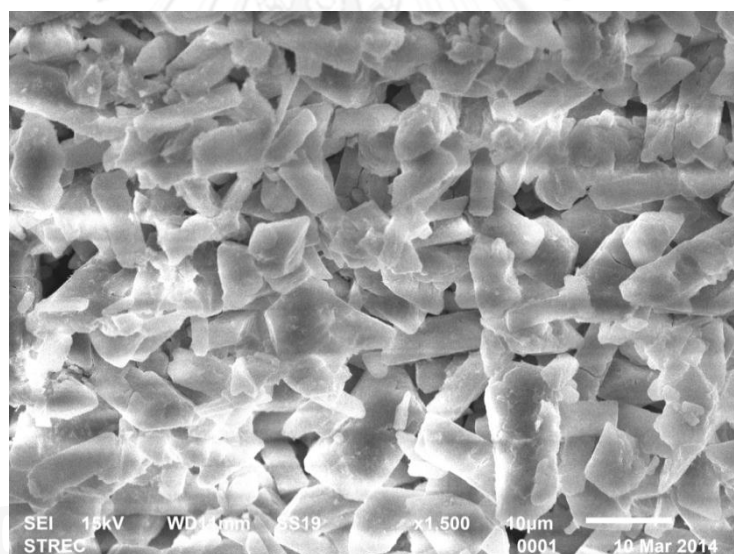
4.2.3.2 ความเป็นผลึกของผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของผลึกที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยกำลังขยาย 450 เท่า พบว่าผลึกที่ได้จากการตกผลึกของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8 และ 9 และที่ 1.2:1:1 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 ผลึกที่ได้ส่วนใหญ่มีความเป็นผลึกตรงกับผลึกสตรูไวท์ และมีลักษณะของผลึกอื่นๆเกิดขึ้นร่วมด้วยเป็นส่วนน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลึกที่ได้จากการทดลองตกผลึกในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร มีผลึกสตรูไวท์เกิดขึ้นเป็นผลึกส่วนใหญ่ของผลึกทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.6



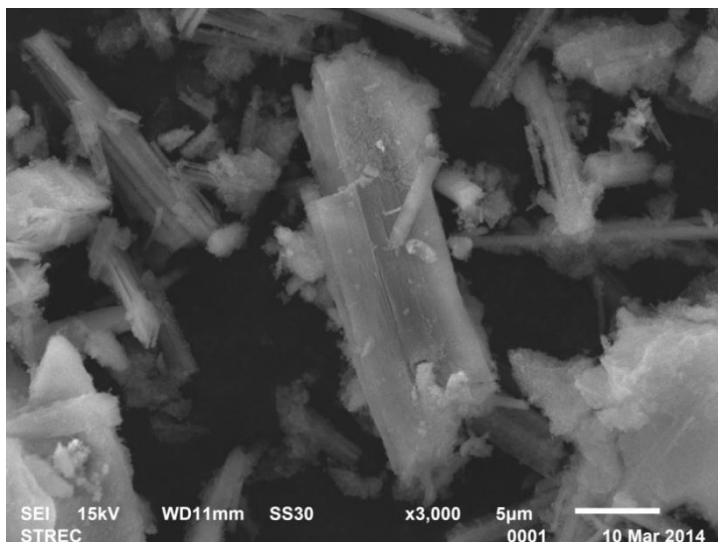
(ก) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8



(ข) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9



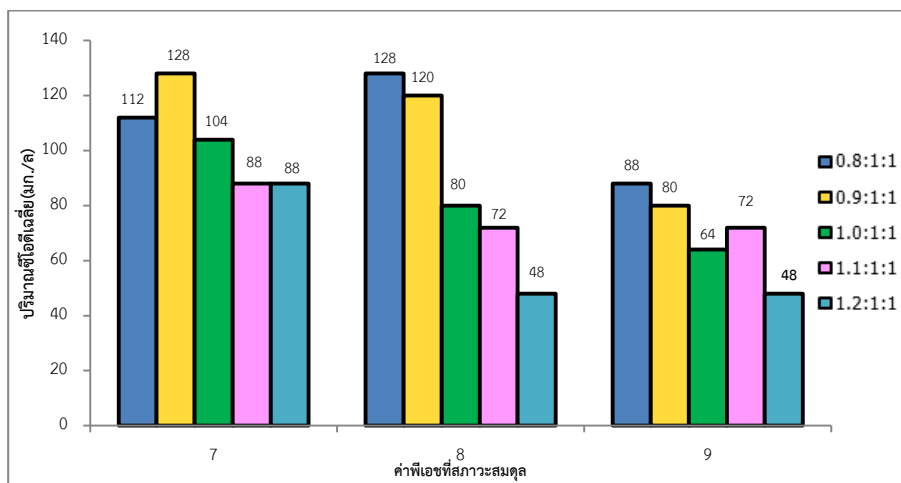
(ค) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1
 พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9

รูปที่ 4.6 ผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง
 Scanning Electron Microscope (SEM)

4.2.4 ผลการศึกษาปริมาณซีโอดี (Chemical Oxygen Demand:COD) จากการทดลอง ตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีเฉลี่ยหลังการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่าง ๆ กัน พบว่าปริมาณซีโอดีเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อเกิดการตกผลึกได้เพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับปริมาณผลึกเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ 4.2.2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเกิดการตกตะกอนแยกออกมากับผลึก ทำให้ปริมาณซีโอดีเฉลี่ยในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่สภาวะสมดุลมีค่าลดลง ซึ่งทำให้คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังการตกผลึกสตรูไวท์ในการทดลองครั้งนี้มีปริมาณซีโอดีเฉลี่ยที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรขนาดกลางและขนาดเล็ก ซึ่งกำหนดให้คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีปริมาณซีโอดี

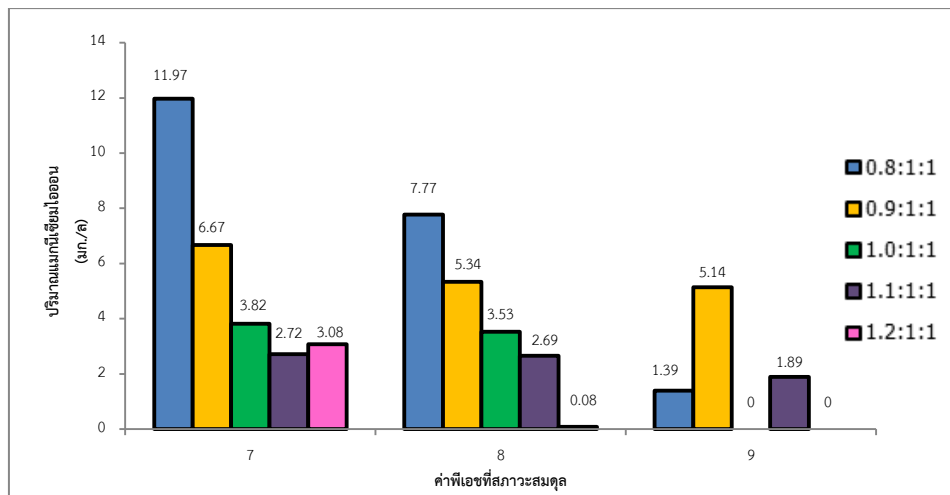
ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณซีโอดีเฉลี่ยหลังจากการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรแสดงได้ดังรูปที่ 4.7



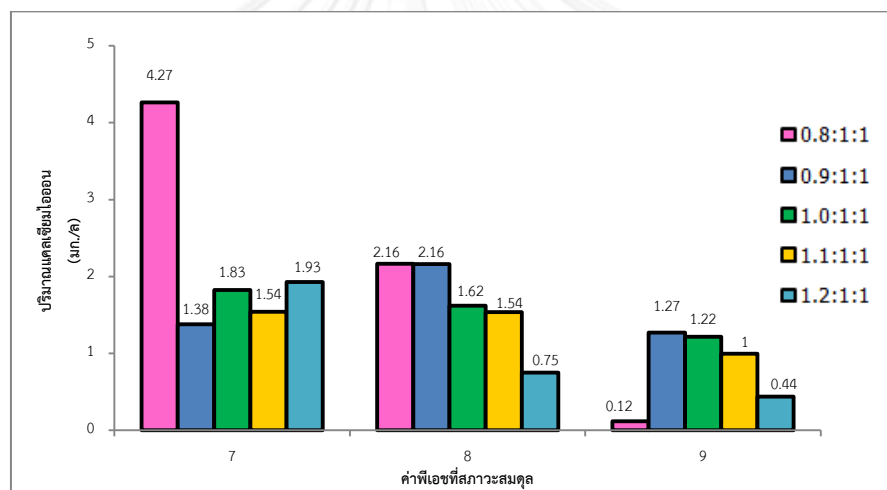
รูปที่ 4.7 ปริมาณซีโอดีเฉลี่ยหลังการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

4.2.5 ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังการทดลองตกผลึกสตรูไวท์โดยพิจารณาปริมาณแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเดียวกัน พบว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีแนวโน้มลดลงเมื่อเกิดการตกผลึกเพิ่มขึ้น โดยแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เกิดการรวมตัวกับไอออนชนิดต่างๆที่อยู่ในสารละลาย เกิดเป็นสารประกอบที่มีองค์ประกอบของไอออนของโลหะหนักชนิดนั้นๆ ทำให้พบปริมาณไอออนของโลหะหนักในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังการตกผลึกสตรูไวท์ได้น้อยลง สอดคล้องกับงานวิจัยของพิชญภัค (2552) พบว่าแมกนีเซียมไอออนตกผลึกร่วมกับไอออนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเกิดเป็นผลึกสตรูไวท์ (MAP) ในขณะที่แคลเซียมไอออนรวมตัวกับฟอสเฟตไอออนเกิดเป็นผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) การวิเคราะห์ปริมาณไอออนของโลหะหนักแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 (ก-ข)



(ก) แมกนีเซียมไอออน



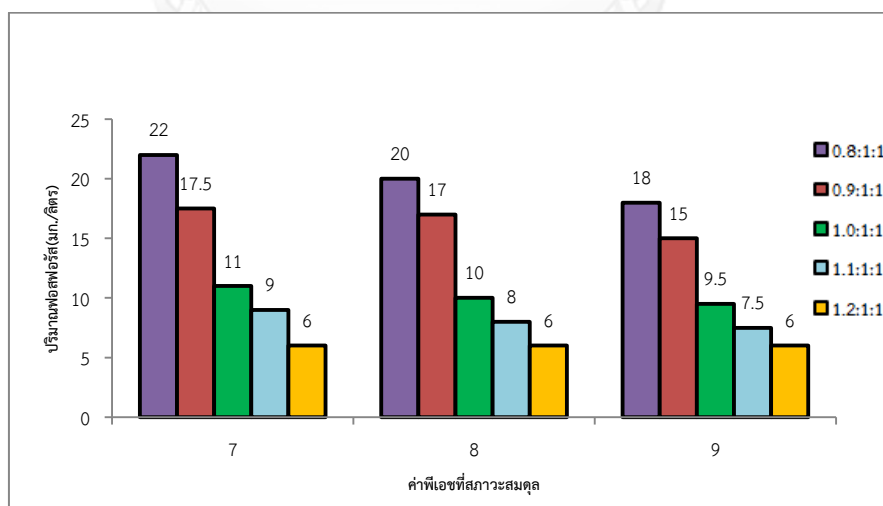
(ข) แคลเซียมไอออน

รูปที่ 4.8 ปริมาณไอออนของโลหะหนักหลังการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

เมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

4.2.6 ผลการศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

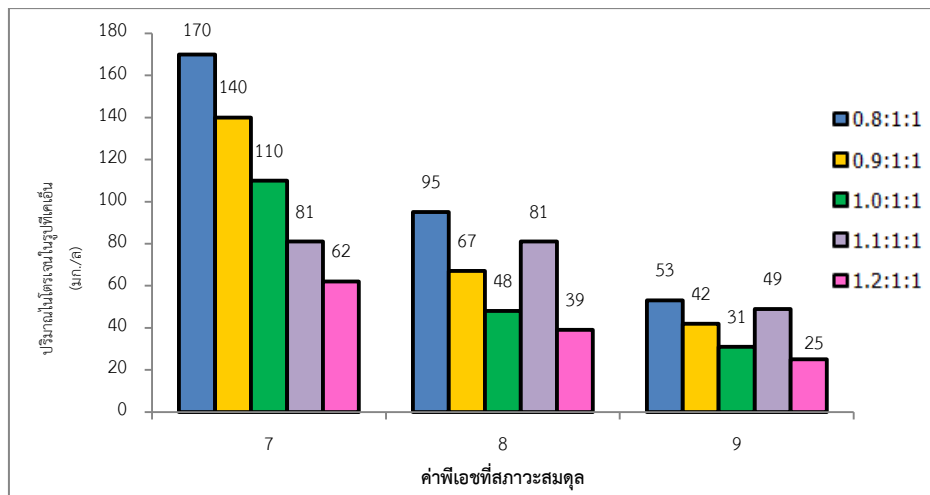
จากการทดลองและวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังการทดลองตกผลึกสตรูไวท์ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆกันพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีค่าลดลงเมื่อเกิดการตกผลึกในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเพิ่มขึ้น และจากการทดลองในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเหลือน้อยที่สุด เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าว น้ำทิ้งฟาร์มสุกรเกิดการตกผลึกได้ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเกิดการรวมตัวกับไอออนชนิดต่างๆ แล้วตกผลึกแยกออกมาจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ทำให้พบปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรปริมาณต่ำสุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Song และคณะ (2007) ที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออนเพิ่มขึ้น ฟอสฟอรัสจะรวมกับไอออนชนิดต่างๆเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสลดลง ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดหลังการทดลองตกผลึกสตรูไวท์แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดหลังการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่สภาวะสมดุลเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

4.2.7 ผลการศึกษาปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

จากการทดลองและวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังการทดลองตกผลึกสตรูไวท์ที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆกันพบว่า ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีปริมาณลดลงเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนโดยโมลเดียวกัน โดยเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 พบปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นมากกว่าเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8 และ 9 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าสูงแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) จะเปลี่ยนเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ระบายออกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร และยังพบว่าปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 ซึ่งเป็นสภาวะที่สารละลายมีความอิ่มตัวของแมกนีเซียมไอออนและเกิดการตกผลึกได้ดีที่สุด จะพบปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นเหลือในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรน้อยที่สุด เนื่องจากที่สภาวะนี้แอมโมเนียมไอออนเกิดการรวมตัวกับแมกนีเซียมไอออนและฟอสเฟตไอออนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเกิดเป็นผลึกสตรูไวท์ ส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียมไอออนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีค่าลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2010) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียจาก 1:1 เป็น 2 : 1 (สารละลายมีความอิ่มตัวยิ่งยวด) จะสามารถลดความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียไนโตรเจนได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าการตกผลึกสตรูไวท์จะสามารถช่วยกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นออกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้ดี ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นจากการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ปริมาณไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นจากการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่สภาวะสมดุล เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

4.3 ผลการศึกษาการนำแบบจำลองคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

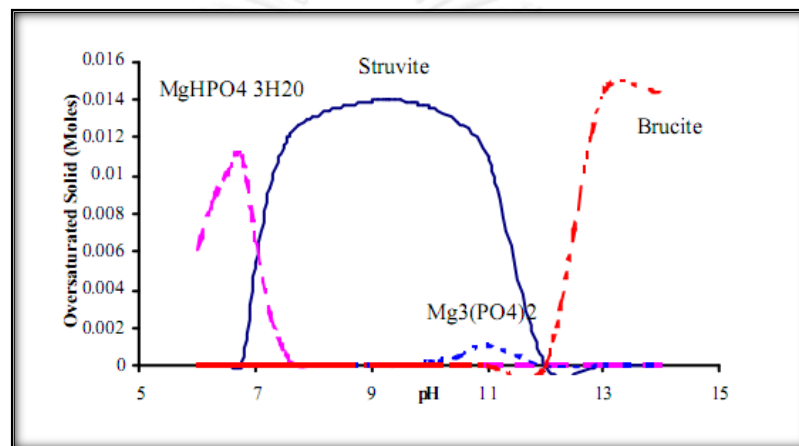
เนื่องจากการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาระบบสมดุลเคมีของน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกรโดยนำแบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการทำนายปริมาณสารเคมีและสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ในการวิจัยครั้งนี้ได้นำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 ซึ่งถูกพัฒนาโดย U.S.EPA เพื่อคำนวณหาสภาวะสมดุลทางเคมีของสารละลายทั้งจากธรรมชาติและจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

4.3.1 การสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0

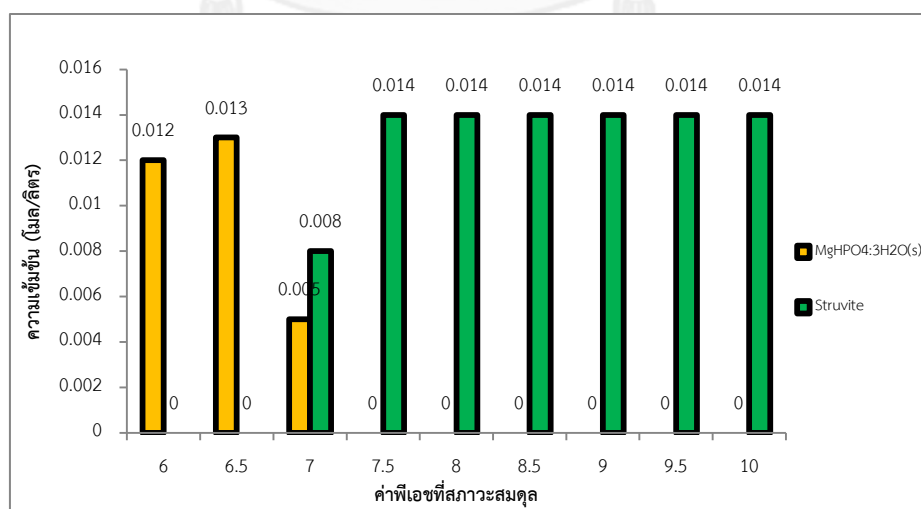
กับงานวิจัยเรื่อง Assessing Nutrient Recovery from Piggery Effluent โดย M.L. Ali, P.A. Schneider and N. Hudson (2003)

จากการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ พบว่าระบบสมดุลเคมีของน้ำทิ้งฟาร์มสุกร จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์ได้ดีในช่วงพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7.5 – 10 โดยที่สภาวะดังกล่าวจะพบเฉพาะผลึกสตรูไวท์เท่านั้น และเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าต่ำกว่า 7.5 จะพบการเกิดผลึก $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ ร่วมด้วย สอดคล้อง

กับงานวิจัยของ Ali และคณะ (2003) ที่พบว่าผลึกสตรูไวท์จะเกิดได้ดีในระบบที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7.75-9.27 โดยเมื่อพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.75 และมากกว่า 9.27 จะพบการเกิดผลึกชนิดอื่นร่วมด้วย เช่น ผลึก $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ ผลึก Brucite และผลึก Farringtonite แสดงดังรูปที่ 4.11 และผลการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อสอบทานความถูกต้องของการใช้งานในครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ชนิดและความเข้มข้นของผลึกจากงานวิจัยเรื่อง Assessing Nutrient Recovery from Piggery Effluent โดย M.L. Ali, P.A. Schneider and N. Hudson (2003)



รูปที่ 4.12 ชนิดและความเข้มข้นของผลึกต่างๆจากการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อสอบทานความถูกต้องของการใช้งานของแบบจำลองในครั้งนี้

4.3.2 ผลการศึกษาการนำแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 มาใช้ใน

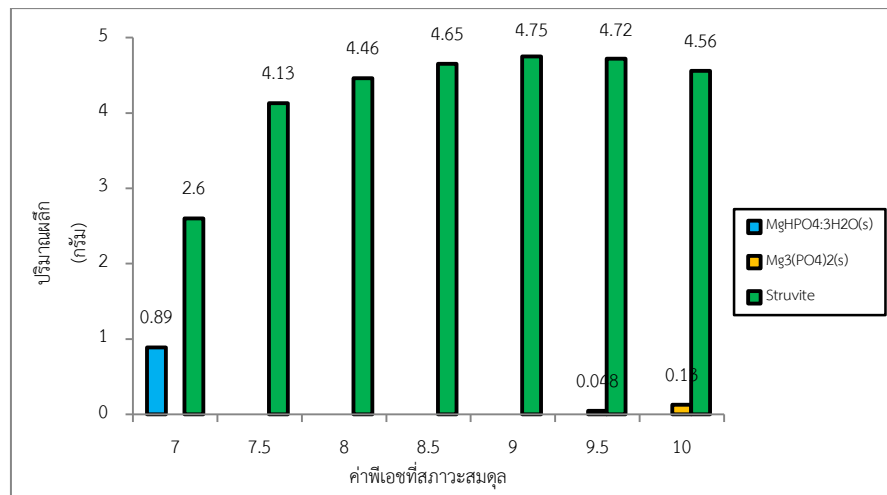
การทำนายสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร
และน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

4.3.2.1 ผลการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

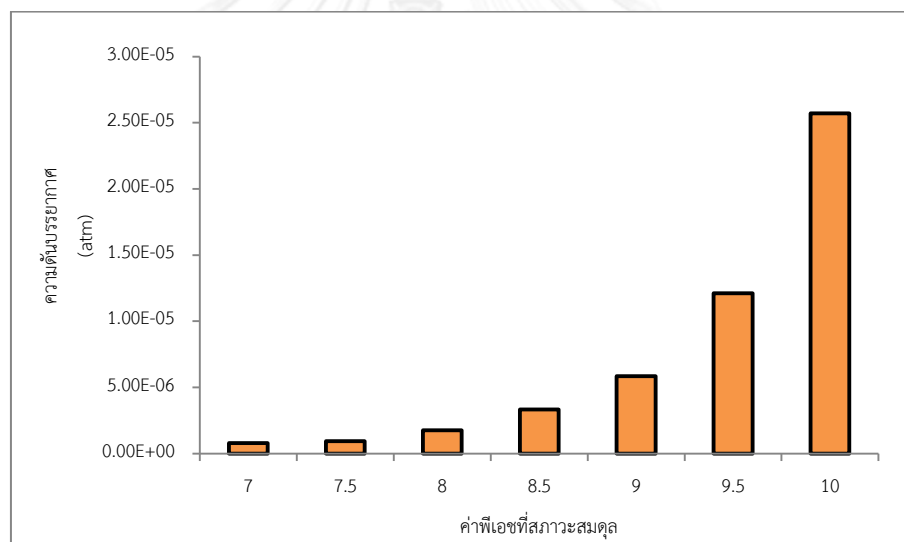
ต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

1. ผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

จากการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ เพื่อทำนายชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พบว่าผลึกที่เกิดขึ้นได้แก่ผลึกสตรูไวท์ ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ผลึก $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ และผลึก $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ โดยเมื่อค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้น จะเกิดผลึก สตรูไวท์ได้มากขึ้นและจะเกิดได้ดีที่สุดเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 แต่เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าสูงกว่า 9 จะพบปริมาณผลึกสตรูไวท์น้อยลง เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เกิดเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3)_(g) ทำให้มีสารตั้งต้น (NH_4^+) ในการเกิดผลึกสตรูไวท์น้อยลง จึงพบผลึกสตรูไวท์ในระบบได้น้อยลง ชนิดและปริมาณผลึกจากการคำนวณด้วยแบบจำลองของน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรแสดงดังรูปที่ 4.13 (ก) และปริมาณก๊าซแอมโมเนียที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.13 (ข)



(ก) ชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น



(ข) ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย

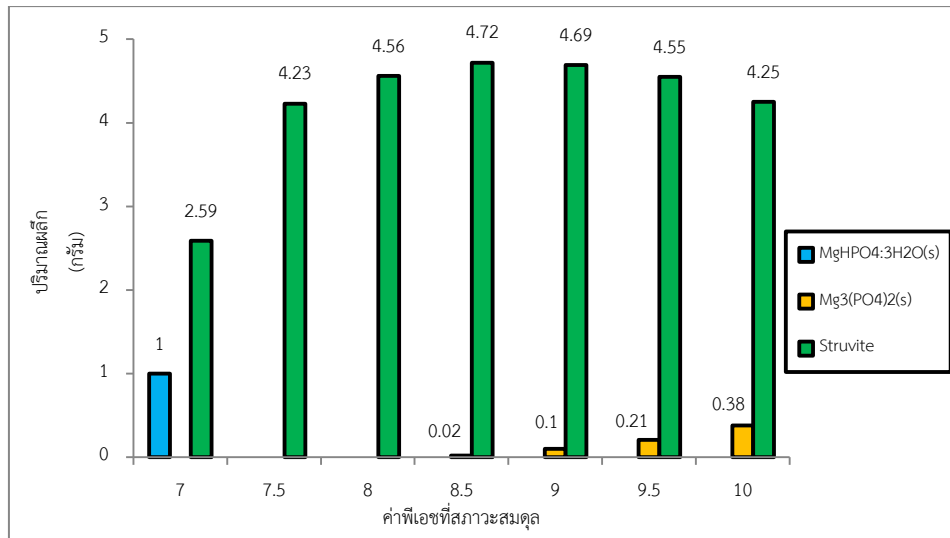
รูปที่ 4.13 ชนิดและปริมาณผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง

Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

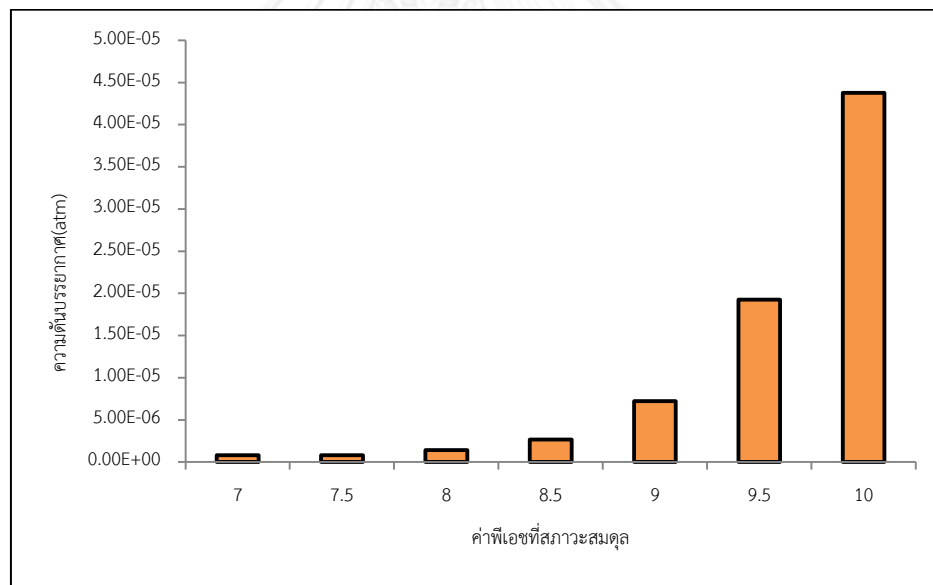
แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

2. ผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ ในการทำนาย สภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร เมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1

จากการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ เพื่อทำนายชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 พบว่าผลึกที่เกิดขึ้นได้แก่ ผลึกสตรูไวท์ ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) ผลึก $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ และผลึก $Mg_3(PO_4)_2$ โดยเมื่อค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้นปริมาณผลึกสตรูไวท์ก็จะเพิ่มขึ้น และพีเอชที่ สภาวะสมดุลเท่ากับ 8.5 เป็นสภาวะที่เกิดการตกผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุด แต่เมื่อค่า พีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าสูงกว่า 8.5 กลับพบว่าปริมาณผลึกสตรูไวท์เกิดขึ้นน้อยลง แต่พบปริมาณผลึก $Mg_3(PO_4)_2$ มากขึ้น เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวแอมโมเนียม ไอออน (NH_4^+) เกิดเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3)_(g) ทำให้มีแอมโมเนียมไอออนในระบบ น้อยลง การเกิดผลึกสตรูไวท์จึงเกิดได้น้อยลง จึงพบผลึกสตรูไวท์ในระบบได้น้อยลง ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1 จะเกิด ปริมาณผลึกสตรูไวท์ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรได้ดีที่สุดเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8.5 ชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นจากการคำนวณด้วยแบบจำลองของน้ำทิ้ง สังเคราะห์ฟาร์มสุกรแสดงดังรูปที่ 4.14 (ก) และปริมาณก๊าซแอมโมเนียแสดงดังรูป ที่ 4.14 (ข)



(ก) ชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น



(ข) ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย

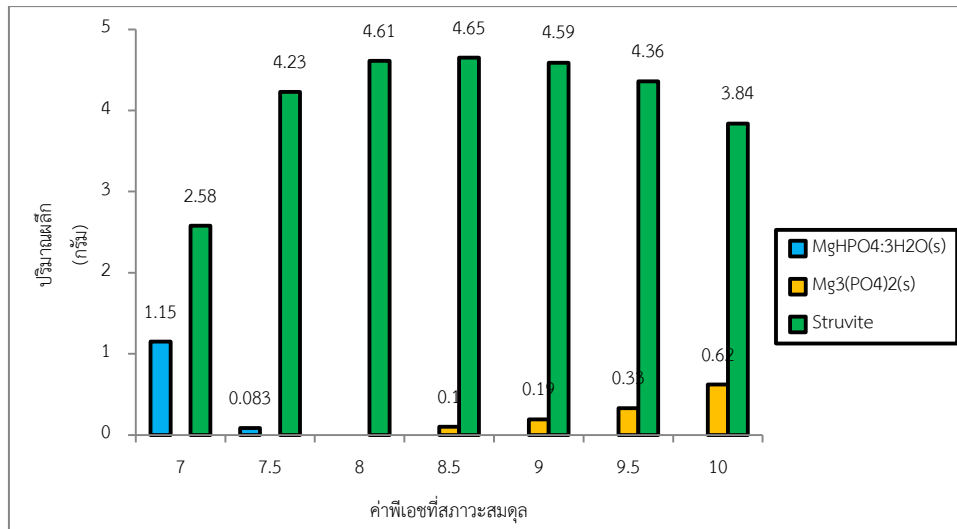
รูปที่ 4.14 ชนิดและปริมาณผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง

Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

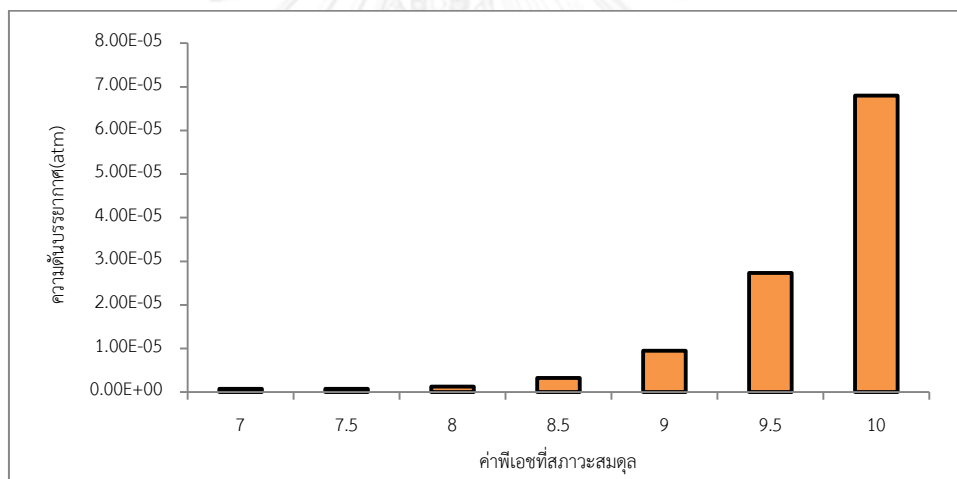
แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1

3. ผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1

จากการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ เพื่อทำนายชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 พบว่าผลึกที่เกิดขึ้นได้แก่ ผลึกสตรูไวท์ ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ผลึก $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ และผลึก $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ ผลึกสตรูไวท์เกิดมากที่สุดเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8.5 แต่เมื่อค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าสูงกว่า 8.5 กลับพบปริมาณผลึกสตรูไวท์เกิดขึ้นน้อยลง ในขณะที่พบผลึก $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ เพิ่มขึ้น เนื่องจากแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เกิดเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3)_(g) ได้มากขึ้น ทำให้มีแอมโมเนียมไอออนในระบบน้อยลง การเกิดผลึกสตรูไวท์จึงเกิดได้น้อยลง ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรได้มากที่สุดเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8.5 ชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นจากการคำนวณด้วยแบบจำลองของน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรแสดงดังรูปที่ 4.15 (ก) และปริมาณก๊าซแอมโมเนียแสดงดังรูปที่ 4.15 (ข)



(ก) ชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น



(ข) ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย

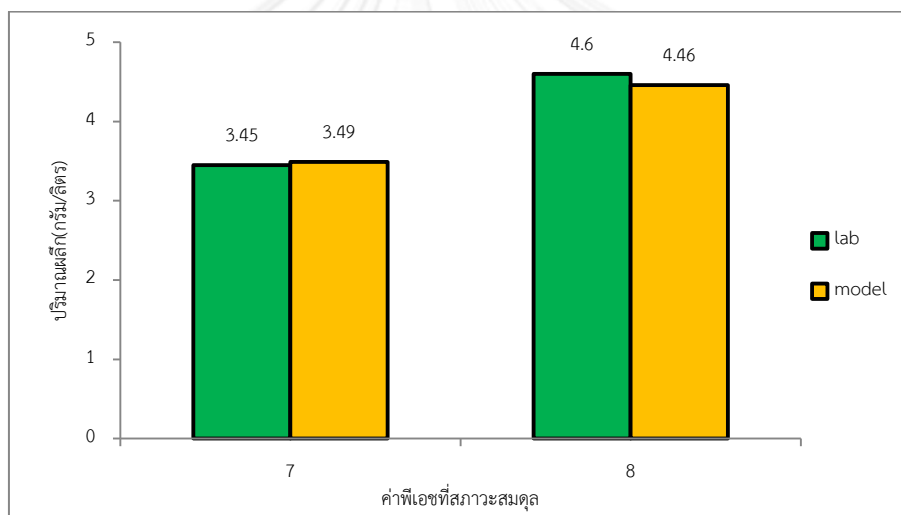
รูปที่ 4.15 ชนิดและปริมาณผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1

จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อตรวจสอบชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 1.1:1:1 และ 1.2:1:1 โดยนำความเข้มข้นของไอออนทุกชนิดจากการทดลองตกผลึกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเป็นข้อมูลเข้าในการประมวลผล พบว่าผลึกสตรูไวท์จะสามารถเกิดได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 เมื่อพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 โดยมีปริมาณผลึกสตรูไวท์เท่ากับ 4.75 กรัมต่อลิตร ดังนั้นต้องทำการเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรโดยเติมแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) ปริมาณ 4.15 กรัมและเติมแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($NH_4H_2PO_4$) ปริมาณ 1.94 กรัม และปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อให้พีเอชที่สถานะสมดุลมีค่าอยู่ในช่วงเท่ากับ 9 สอดคล้องกับจักราชและอานนท์ (2550) ที่พบว่าอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตเท่ากับ 1:1 จะเกิดผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุด

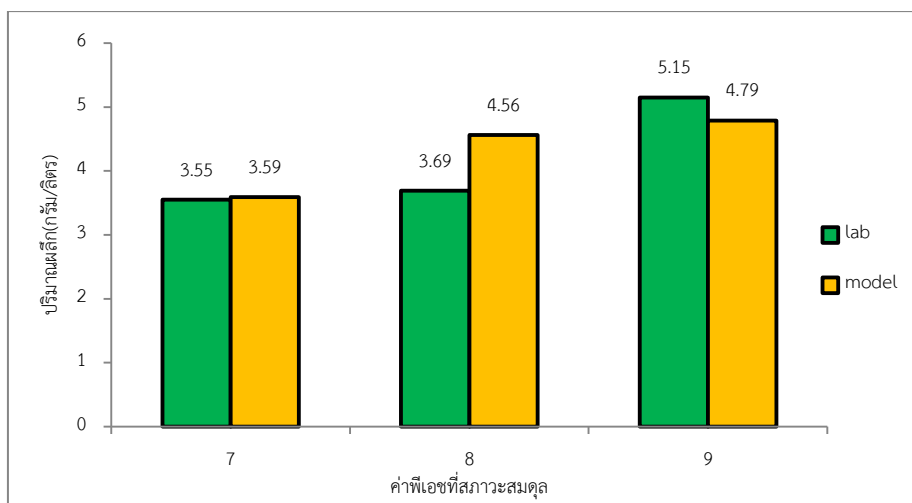
4. ผลการเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดผลึกจากการทดลองและจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

จากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อตรวจสอบชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 1.1:1:1 และ 1.2:1:1 นั้น ให้ผลการทดลองและการประมวลผลที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อพีเอชที่สถานะสมดุลเพิ่มขึ้น แนวโน้มการเกิดปริมาณผลึกทั้งหมดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.16 เมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 7 และ 8

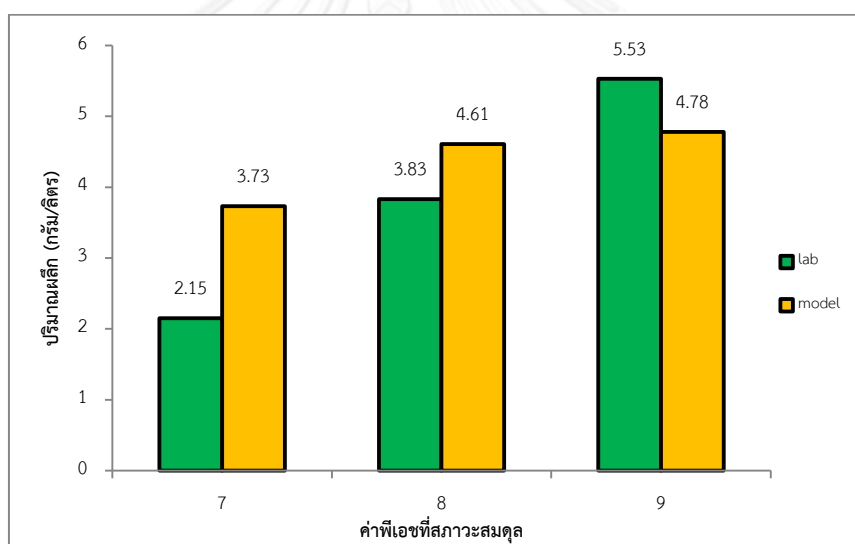
โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลึกที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลเมื่ออัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:1:1 จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน 0.57 และ 1.55 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7.8 และ 9 โดยอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.1:1:1 ปริมาณผลึกที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน 0.56 10.55 และ 3.62 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.2:1:1 ปริมาณผลึกที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน 26.87 9.24 และ 7.27 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



(ก) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต=1:1:1



(ข) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต=1.1:1:1



(ค) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต=1.2:1:1

รูปที่ 4.16 ปริมาณผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

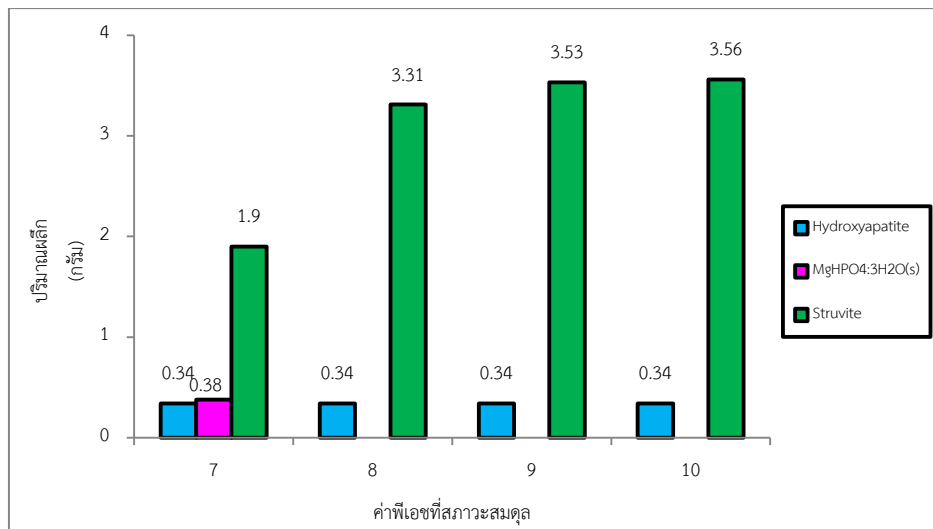
และจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0

4.3.2.2 ผลการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมต่อ

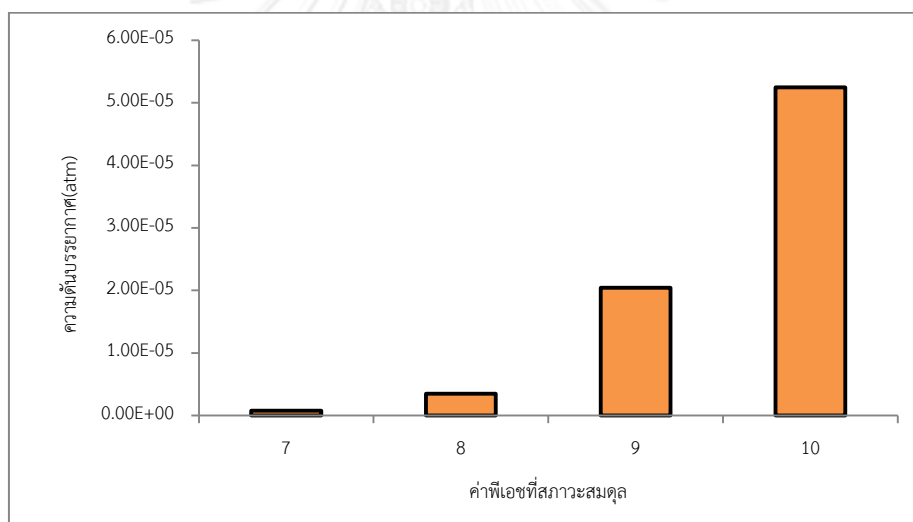
การตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

1. ผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1

จากการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อทำนายชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.8:1:1 พบว่า น้ำทิ้งฟาร์มสุกรจะเกิดผลึกสตรูไวท์ ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) ร่วมกับผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ (HAP) ในทุกช่วงค่าพีเอชที่สถานะสมดุล ผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ของระบบได้แก่ ผลึกสตรูไวท์โดยเมื่อค่าพีเอชที่สถานะสมดุลเพิ่มขึ้นจะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้น ในขณะที่เกิดผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ในปริมาณคงที่เท่ากับ 0.34 กรัมต่อลิตร และพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 10 มีปริมาณผลึกสตรูไวท์มากที่สุดเท่ากับ 3.56 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบปริมาณก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในระบบค่อยๆลดน้อยลง ทำให้ปัจจัยในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง และเนื่องจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรในห้องปฏิบัติการ พบว่าค่าพีเอชที่สถานะสมดุลหลังการตกผลึกจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9 ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 มาประมวลผลและเปรียบเทียบเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.8:1:1 จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้มากที่สุดเมื่อพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 โดยคาดว่าจะมีปริมาณผลึกสตรูไวท์เท่ากับ 3.53 กรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.17



(ก) ชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น



(ข) ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย

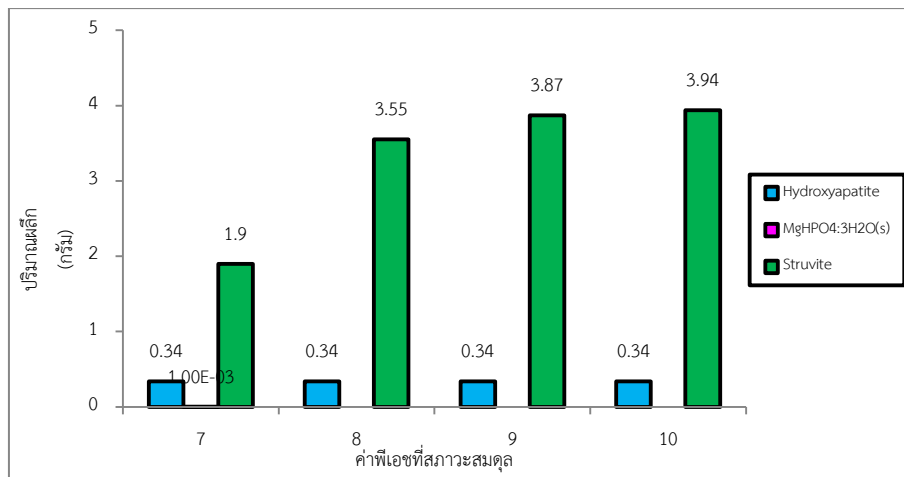
รูปที่ 4.17 ปริมาณและชนิดผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง

Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

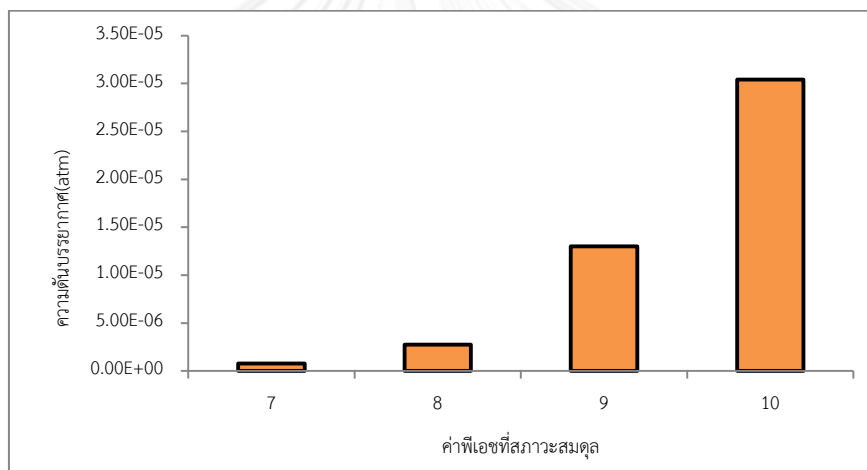
แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.8:1:1

2.ผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1

จากการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อทำนายชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.9:1:1 พบว่า เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 ผลึกที่เกิดขึ้นได้แก่ผลึกสตรูไวท์ ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ผลึก $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (ในปริมาณที่น้อยมาก) และผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 8 9 และ 10 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์และผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ จากการประมวลผลพบว่าผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือผลึกสตรูไวท์ โดยพบปริมาณมากที่สุด 3.94 กรัมต่อลิตรเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 10 นอกจากนี้ยังพบปริมาณก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในระบบค่อยๆลดน้อยลง ทำให้ปัจจัยในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง และเนื่องจากการทดลองตกผลึกทางเคมีจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรในห้องปฏิบัติการ พบว่าค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลหลังตกผลึกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9 ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลอง Visual MINTEQ มาประมวลผลและเปรียบเทียบเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.9:1:1 จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้มากที่สุดเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 โดยมีปริมาณผลึกสตรูไวท์เท่ากับ 3.87 กรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.18



(ก) ชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น



(ข) ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย

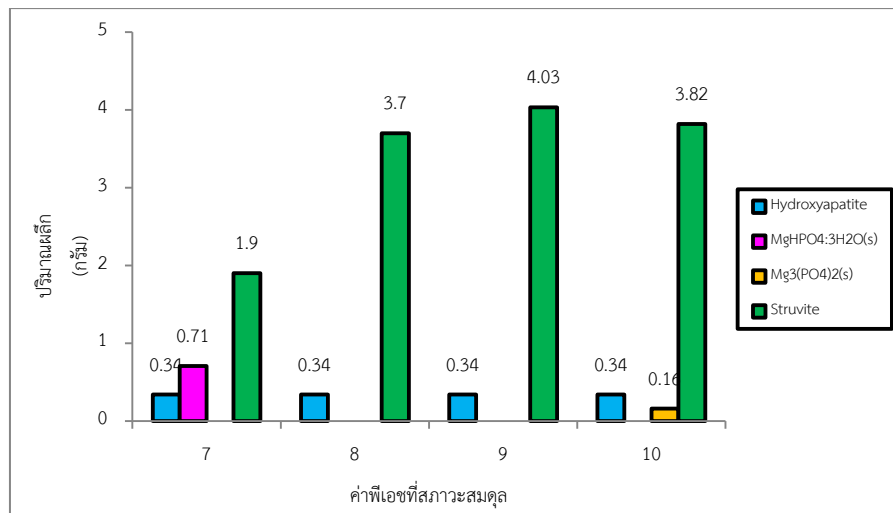
รูปที่ 4.18 ปริมาณและชนิดผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง

Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

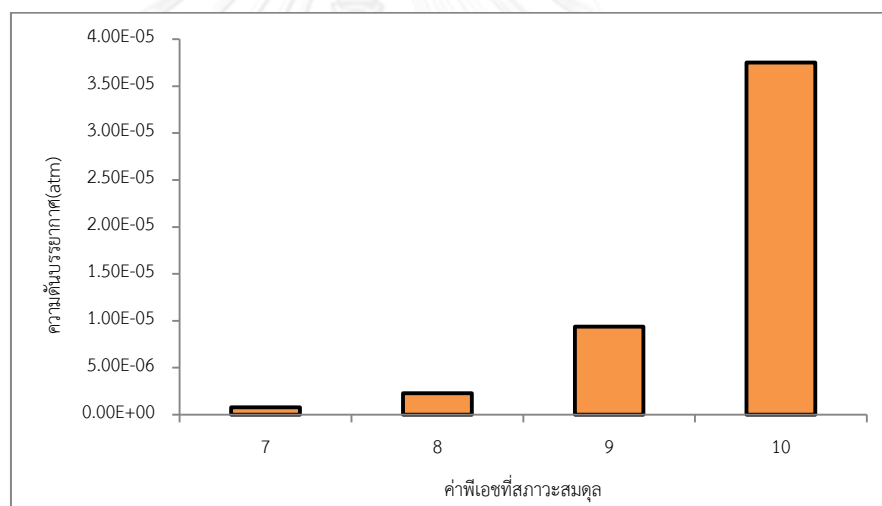
แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.9:1:1

3. ผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

จากการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อทำนายชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พบว่าเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์ ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) ผลึก $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ และผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8 และ 9 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์และผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ และเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 10 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์ ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์และผลึก $Mg_3(PO_4)_2$ ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือผลึกสตรูไวท์ โดยพบว่าเมื่อค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้นจาก 7 8 และ 9 จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้นมากกว่า 9 จะพบปริมาณผลึกสตรูไวท์น้อยลงและที่พีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 มีปริมาณผลึกสตรูไวท์มากที่สุดเท่ากับ 4.03 กรัมต่อลิตร โดยพบปริมาณก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น และพบก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นสูงมากเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 10 แสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในระบบลดน้อยลง ปัจจัยในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง จึงพบผลึกสตรูไวท์ในระบบน้อยลง และเนื่องจากการทดลองตกผลึกทางเคมีจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรในห้องปฏิบัติการ พบว่าค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลหลังตกผลึกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9 ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 มาประมวลผลและเปรียบเทียบเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้มากที่สุดเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 โดยคาดว่าจะมีปริมาณผลึกสตรูไวท์เท่ากับ 4.03 กรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.19



(ก) ชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้น



(ข) ปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง

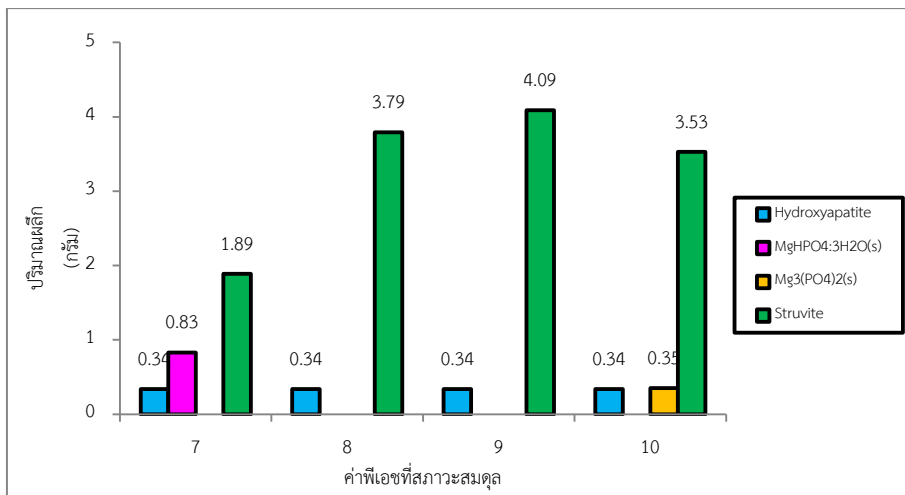
รูปที่ 4.19 ปริมาณและชนิดผลึกและชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประมวลผลด้วย

แบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ

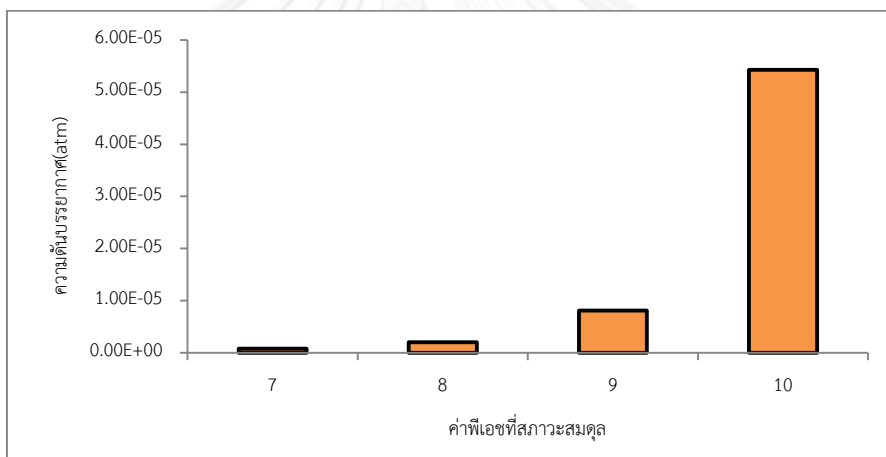
แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1

4.ผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1

จากการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อทำนายชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1 พบว่าเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์ ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) ผลึก $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ และผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8 และ 9 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์และผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ และเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 10 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์ ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์และผลึก $Mg_3(PO_4)_2$ ผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือผลึกสตรูไวท์ โดยพบว่าเมื่อค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้นจาก 7 8 และ 9 จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้น แต่จะพบปริมาณผลึกสตรูไวท์น้อยลงเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้นมากกว่า 9 โดยเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 มีปริมาณผลึกสตรูไวท์มากที่สุดเท่ากับ 4.09 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบปริมาณก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยพบปริมาณก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นสูงมากเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 10 แสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในระบบลดน้อยลง ทำให้ปัจจัยในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง จึงพบผลึกสตรูไวท์ในระบบน้อยลงและเนื่องจากการทดลองตกผลึกทางเคมีจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรในห้องปฏิบัติการ พบว่าค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลหลังตกผลึกทางเคมีมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9 ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 มาประมวลผลและเปรียบเทียบเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1 จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้มากที่สุดเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 โดยมีปริมาณผลึกสตรูไวท์เท่ากับ 4.09 กรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.20



(ก) ชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น



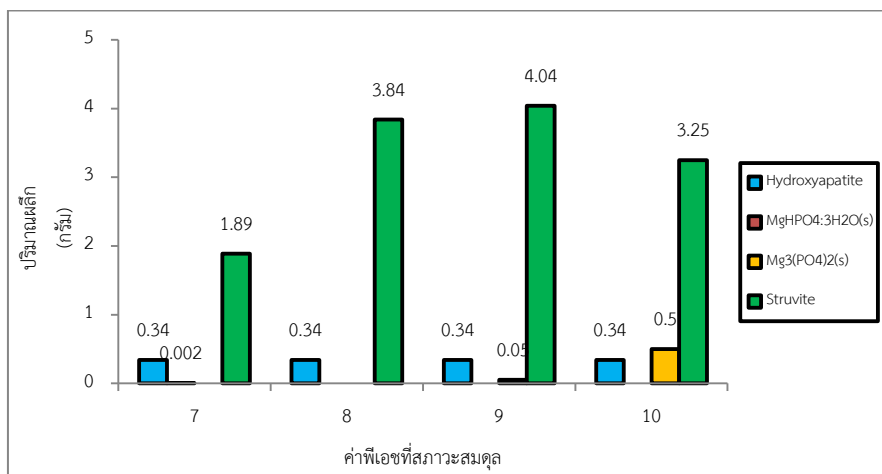
(ข) ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย

รูปที่ 4.20 ปริมาณและชนิดผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1

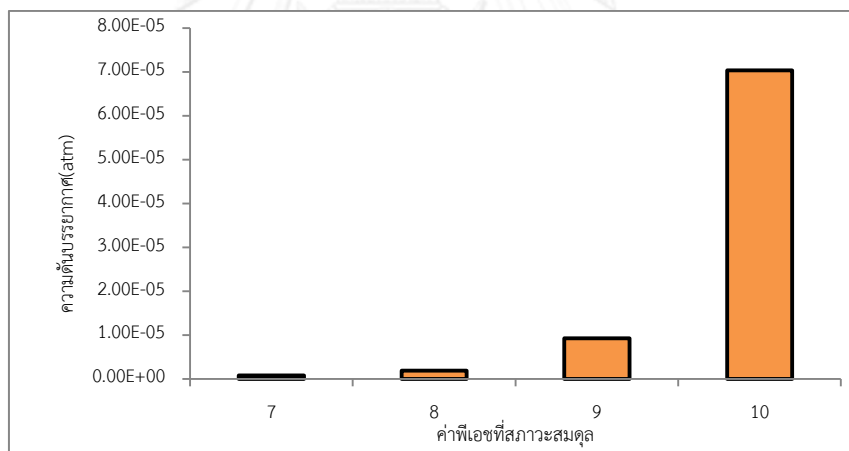
5. ผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1

จากการศึกษาการประมวลผลด้วยโปรแกรม Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อทำนายชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 พบว่าเมื่อพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 7 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์ ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ผลึก $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ และผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ เมื่อพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 8 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์และผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ และเมื่อพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 และ 10 เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกสตรูไวท์ ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ และผลึก $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือผลึกสตรูไวท์ โดยพบว่าเมื่อค่าพีเอชที่สถานะสมดุลเพิ่มขึ้นจาก 7 8 และ 9 จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพีเอชที่สถานะสมดุลเพิ่มขึ้นมากกว่า 9 จะพบปริมาณผลึกสตรูไวท์น้อยลง ในขณะที่พบผลึก $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ เพิ่มขึ้น โดยเมื่อพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 มีปริมาณผลึกสตรูไวท์มากที่สุดเท่ากับ 4.04 กรัมต่อลิตร ในขณะที่พบปริมาณก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 10 จะพบปริมาณก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้นสูงมาก แสดงให้เห็นว่าแอมโมเนียม-ไอออน (NH_4^+) ในระบบลดน้อยลง ทำให้ปัจจัยในการเกิดผลึกสตรูไวท์ลดน้อยลง จึงพบผลึกสตรูไวท์ในระบบน้อยลง และเนื่องจากการทดลองตกผลึกทางเคมีจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรในห้องปฏิบัติการ พบว่าค่าพีเอชที่สถานะสมดุลหลังตกผลึกทางเคมีมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9 ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 มาประมวลผลและเปรียบเทียบเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 จะเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้มากที่สุดเมื่อพีเอช

ที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 โดยมีปริมาณผลึกสตรูไวท์เท่ากับ 4.04 กรัมต่อลิตร แสดง
ดังรูปที่ 4.21



(ก) ชนิดและปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น



(ข) ปริมาณก๊าซแอมโมเนีย

รูปที่ 4.21 ปริมาณและชนิดผลึกและปริมาณก๊าซแอมโมเนียจากการทำนายด้วยแบบจำลอง
Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ
แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1

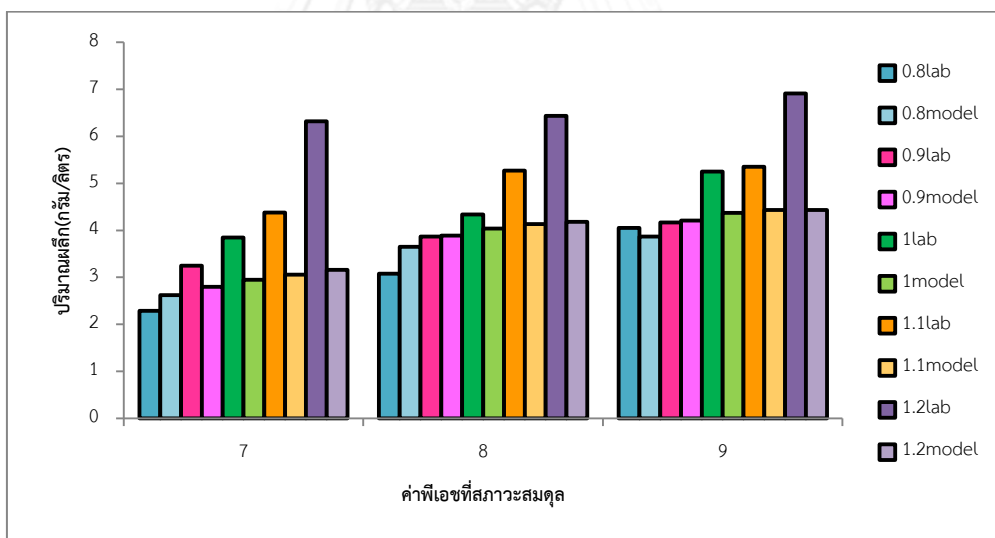
6.ผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ในการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

จากการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อทำนายปริมาณผลึกสตรูไวท์ที่เกิดขึ้นเมื่อสถานะสมดุลที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.8:1:1 0.9:1:1 1:1:1 1.1:1:1 และ 1.2:1:1 เพื่อนำผลที่ได้มาหาสถานะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์มากที่สุด พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1 พีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 เป็นสถานะที่เหมาะสมในการเกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์มากที่สุด ซึ่งที่สถานะนี้มีปริมาณผลึกสตรูไวท์เท่ากับ 4.09 กรัมต่อลิตร ในขณะที่จะเกิดผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์รวม 0.34 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงต้องทำการเติมผลึกแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) ปริมาณ 3.61 กรัมและผลึกโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) ปริมาณ 2.06 กรัม เพื่อให้เกิดปริมาณผลึกสตรูไวท์ได้มากที่สุดในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรนี้

7. ผลการเปรียบเทียบแนวโน้มการเกิดผลึกทั้งหมดจากการทดลองและจากการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต และค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลต่างๆ

จากการทดลองตกผลึกและการศึกษาการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อตรวจสอบชนิดและปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 0.8:1:1 0.9:1:1 1:1:1 1.1:1:1 และ 1.2:1:1 เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 8 และ 9 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองและการประมวลผลมีแนวโน้มการเกิดปริมาณผลึกในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อมีการปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตและค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลให้มีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน จากการเปรียบเทียบปริมาณผลึกทั้งหมดจะพบว่าปริมาณผลึกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีค่ามากกว่าปริมาณผลึกทั้งหมดที่ได้จากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ซึ่งอาจเนื่องมาจากเกิดการตกตะกอนร่วมของของแข็งแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่นำมาใช้ในการตกผลึกในกระบวนการทดลอง นอกจากนี้เมื่อมีการเติมแมกนีเซียมไอออนในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเพิ่มขึ้น จะพบปริมาณผลึกเกิดขึ้นมากกว่าการประมวลผล โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวมีการเติมปริมาณแมกนีเซียมไอออนเพิ่มเข้าไปมากที่สุด ดังนั้นจึงเพิ่มโอกาสให้แมกนีเซียมไอออนเกิดการประสานตัวกับไอออนชนิดต่างๆในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้มากขึ้น จึงเกิดปริมาณผลึกโดยรวมของระบบได้มากที่สุด การเปรียบเทียบปริมาณผลึกจากการทดลองและการประมวลผล แสดงดังในรูปที่ 4.22 เมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 7 8 และ 9 โดยเมื่ออัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.8:1:1

ปริมาณผลึกที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน 6.72 8.47 และ 2.27 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.9:1:1 ปริมาณผลึกที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน 7.44 0.26 และ 0.48 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1:1:1 ปริมาณผลึกที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน 13.24 4.60 และ 9.15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.1:1:1 ปริมาณผลึกที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน 17.74 12.13 และ 9.41 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.8:1:1 ปริมาณผลึกที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกัน 33.33 21.26 และ 21.87 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 ปริมาณผลึกจากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์และจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง

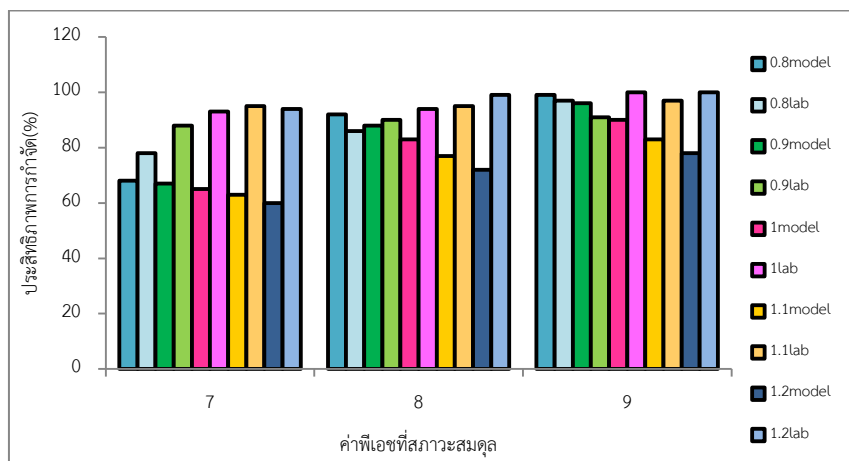
Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

8. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจากการทดลองและ
 จากผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จาก
 น้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:
 ฟอสเฟตต่างๆ

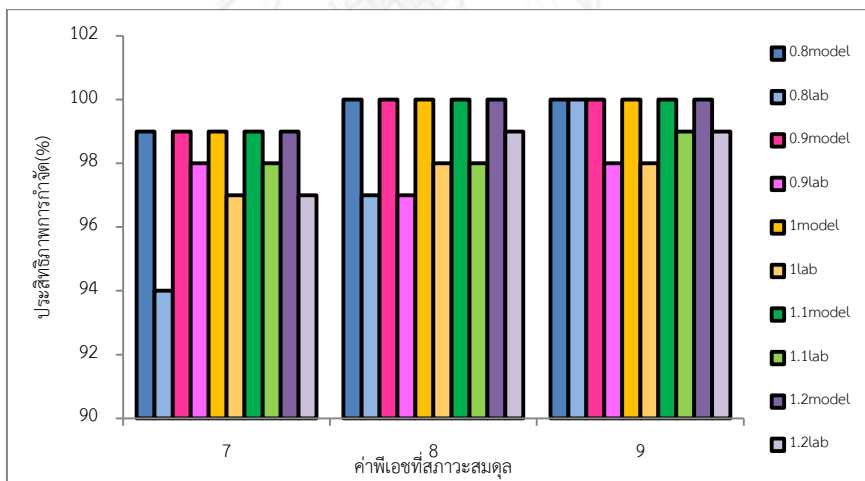
จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแมกนีเซียมไอออนจากการ
 ทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและการประมวลผลด้วยแบบจำลอง
 Visual MINTEQ version 3.0 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแมกนีเซียมไอออนมีค่า
 เพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต
 เดียวกันเมื่อค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเกิดการตกผลึก
 สตรูไวท์และผลึกชนิดอื่นที่มีแมกนีเซียมไอออนเป็นองค์ประกอบ เช่น ผลึก
 $Mg_3(PO_4)_2$ ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมไอออนถูกกำจัดออกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้
 โดยเมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแมกนีเซียม
 ไอออนที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่
 ในช่วง 1.02-22.08 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมไอออนจากการตกผลึกสตรูไวท์และการ
 ประมวลผลจากแบบจำลอง โดยประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อ
 พิจารณาที่อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเดียวกันเมื่อค่า
 พีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมไอออนเกิดการตกผลึกในรูปของ
 ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) ทำให้ปริมาณแคลเซียมไอออนในน้ำทิ้ง
 ฟาร์มสุกรถูกกำจัด ทำนองเดียวกับ Pastor และคณะ (2008) พบว่าเมื่อพีเอชมีค่า
 เท่ากับ 8.25 ถึง 9.5 เวลาพัก-เก็บมีค่าเท่ากับ 2 ถึง 11 ชั่วโมงจะเกิดการตกผลึก
 ไฮดรอกซีอะพาไทท์ในระบบการทดลอง โดยเมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล
 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแคลเซียมไอออนที่ได้จากการทดลองและการ

ประมวลผลโดยรวมจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.50–2.59 เปอร์เซ็นต์ การวิเคราะห์ปริมาณไอออนของโลหะหนักแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 (ก-ข)



(ก) แมกนีเซียมไอออน

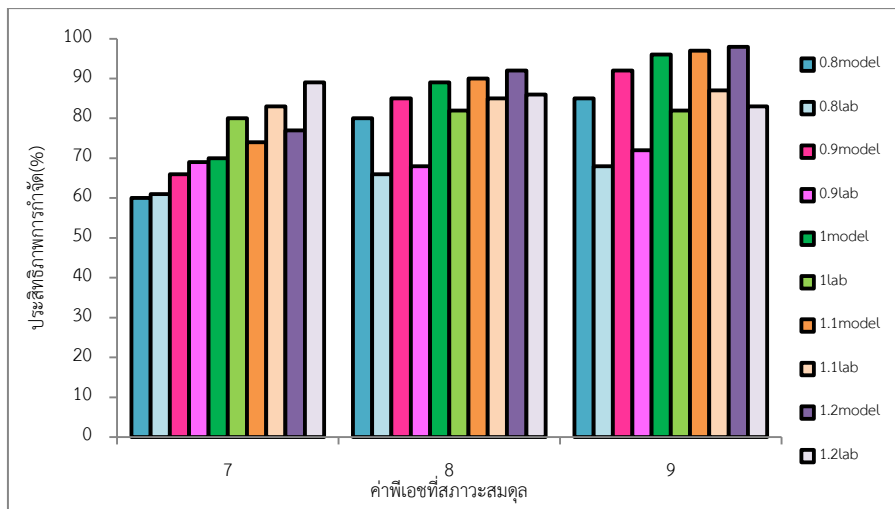


(ข) แคลเซียมไอออน

รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะหนักภายหลังการตกผลึกสตรูโวไรต์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0

9.ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดจากการทดลอง และจากผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

จากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกัน ทำนองเดียวกันเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดจะมีค่าสูงสุด 98 เปอร์เซ็นต์เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 และพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 เนื่องจากเกิดการตกผลึกของผลึกสตรูไวท์ ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) และผลึก $Mg_3(PO_4)_2$ ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรตกผลึกแยกตัวออกมา ซึ่ง Celen และคณะ (2007) พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มสุกรจากการทดลองและการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ มีความสอดคล้องกันคือ จากการทดลองพบว่าเมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 8.5 สามารถลดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสลงได้ 55 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แบบจำลอง Visual MINTEQ คาดว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสามารถลดลงได้ถึง 62 เปอร์เซ็นต์เมื่อพีเอชมีค่าเท่ากับ 8.5 การวิเคราะห์ ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสแสดงได้ดังรูปที่ 4.24 โดยเมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง และการประมวลผลโดยรวมจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.83–12.20 เปอร์เซ็นต์

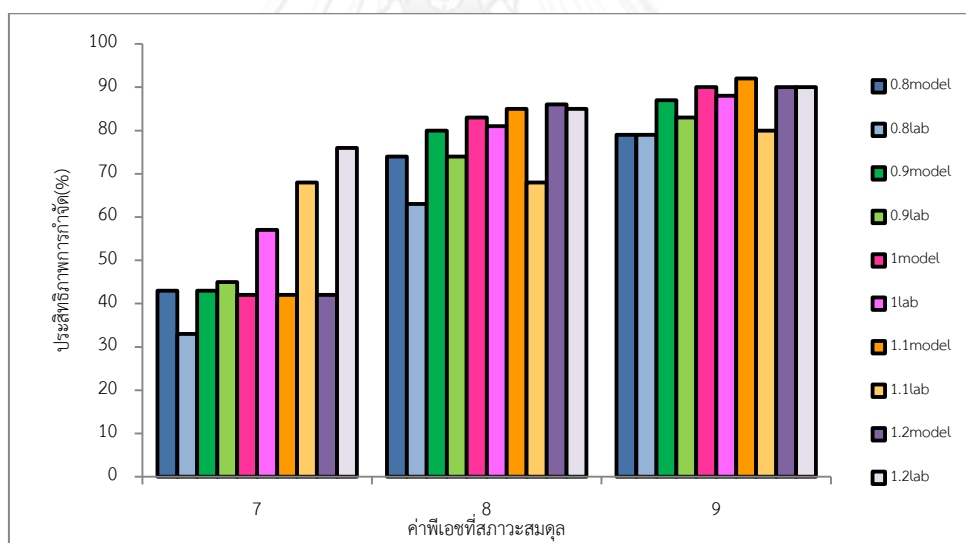


รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัส (%) ที่สภาวะสมดุลจากการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและจากการทำนายผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

10.ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นจากการทดลองและจากผลการประมวลผลจากแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

จากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 เพื่อศึกษาปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นที่เหลืออยู่ในระบบเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งแสดงออกมาในรูปของประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น โดยเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นจากการทดลองและการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตและค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพ

การกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นจะเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8 และ 9 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการตกผลึกสตรูไวท์ได้ดี ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นจะมีค่าค่อนข้างสูง แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นออกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้ โดยที่สภาวะดังกล่าวระบบเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้ เปลี่ยนเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ระบายออกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ทำให้ปริมาณแอมโมเนียมไอออนลดลง ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 โดยเมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นที่ได้จากการทดลองและการประมวลผลโดยรวมจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ในช่วง 0.58–28.82 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (%) ที่สภาวะสมดุลจากการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและจากการทำนายผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0

เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตต่างๆ

11. ผลการศึกษาสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) จากการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 และจากการทดลองตกผลึกทางเคมี

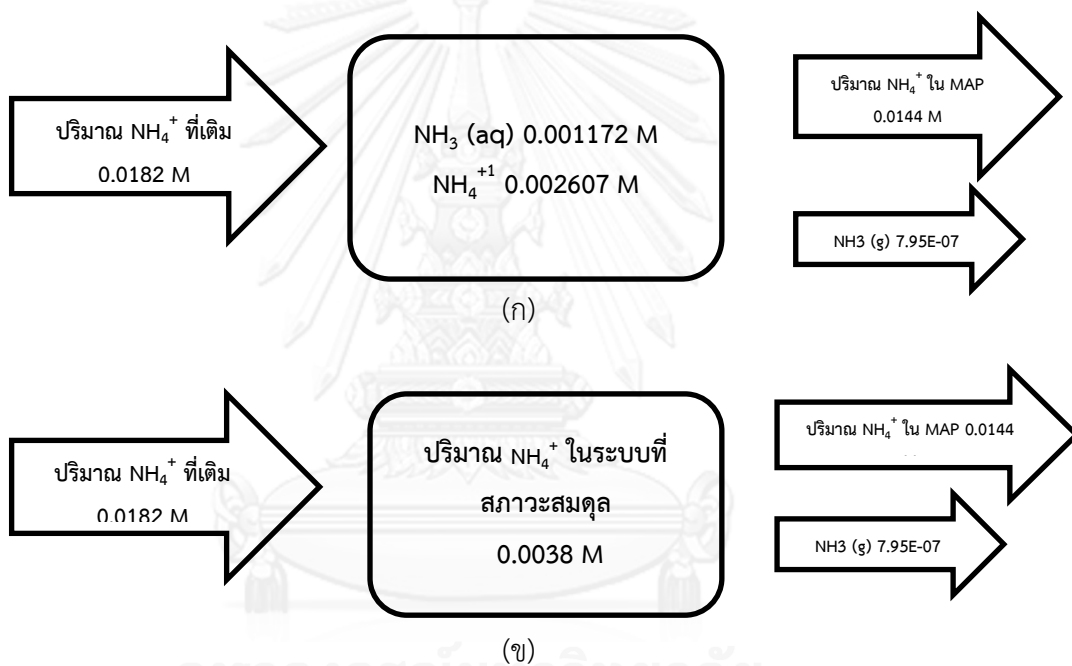
11.1 การศึกษาสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) จากการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0

จากผลการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 จะเห็นได้ว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เกิดเป็นสารประกอบของแอมโมเนียมไอออน ซึ่งมีความสำคัญต่อการเกิดผลึกสตรูโวอิตของระบบเมื่อสภาวะสมดุล ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนในทุกอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต โดยทำการตรวจสอบในช่วงพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 เพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลเนื่องจากเป็นสภาวะที่เกิดผลึกสตรูโวอิตได้ดีที่สุด

11.1.1 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1

จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก (เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เหลืออยู่ในระบบ (ละลายอยู่ในสารละลายน้ำที่ฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0038 โมลต่อลิตร และเกิดเป็นผลึกโดยเป็นองค์ประกอบของผลึกสตรูโวอิตเท่านั้น (ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0144 โมลต่อลิตร ในขณะที่ระเหยเป็นก๊าซแอมโมเนีย ($\text{NH}_3(g)$) 7.59×10^{-7} atm จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้งต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มข้น

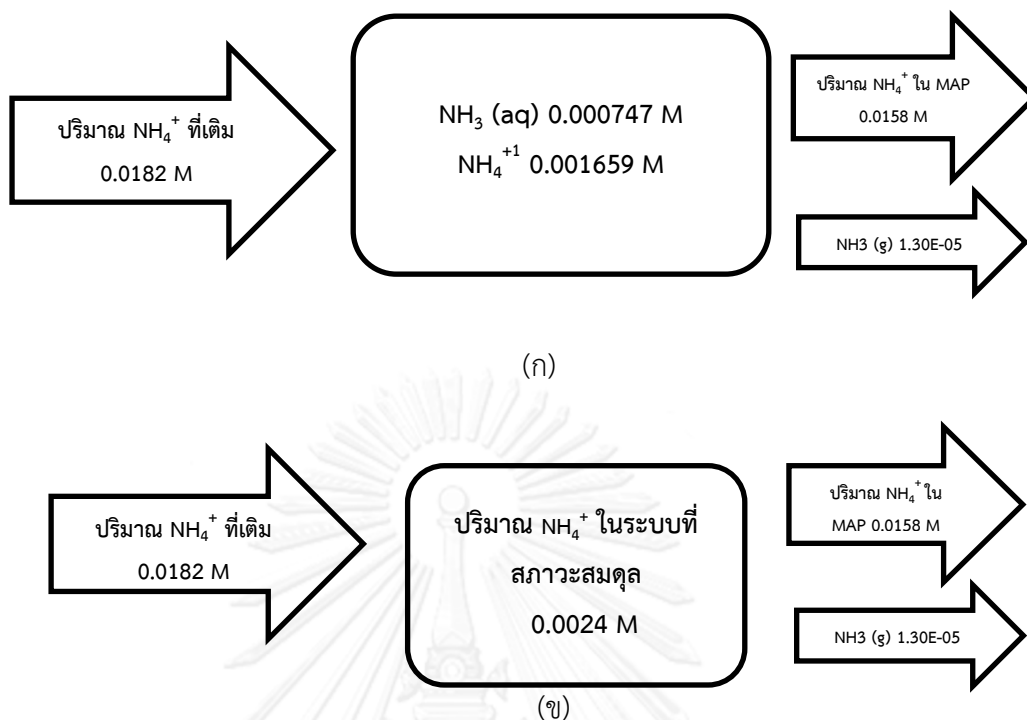
ของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและแอมโมเนียมไอออนที่เกิดผลึกสตรูไวท์ ($0.0182 = 0.0038 + 0.0144$) ดังนั้นระบบการตกผลึกทางเคมีของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1 จากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ นี้มีความสมดุลความเข้มข้นของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ก-ข)



รูปที่ 4.26 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1

11.1.2 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1

จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก (เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เหลืออยู่ในระบบ (ละลายอยู่ในสารละลายน้ำที่ฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0024 โมลต่อลิตร และเกิดเป็นผลึกโดยเป็นองค์ประกอบของผลึกสตรูไวท์เท่านั้น (ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0158 โมลต่อลิตร ในขณะที่ระเหยเป็นก๊าซแอมโมเนีย ($\text{NH}_3(g)$) 1.30×10^{-5} atm จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้งต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำที่ฟาร์มสุกรและแอมโมเนียมไอออนที่เกิดผลึกสตรูไวท์ ($0.0182 = 0.0024 + 0.0158$) ดังนั้นระบบการตกผลึกทางเคมีของน้ำที่ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1 จากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ นี้มีความสมดุลความเข้มข้นของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 (ก-ข)

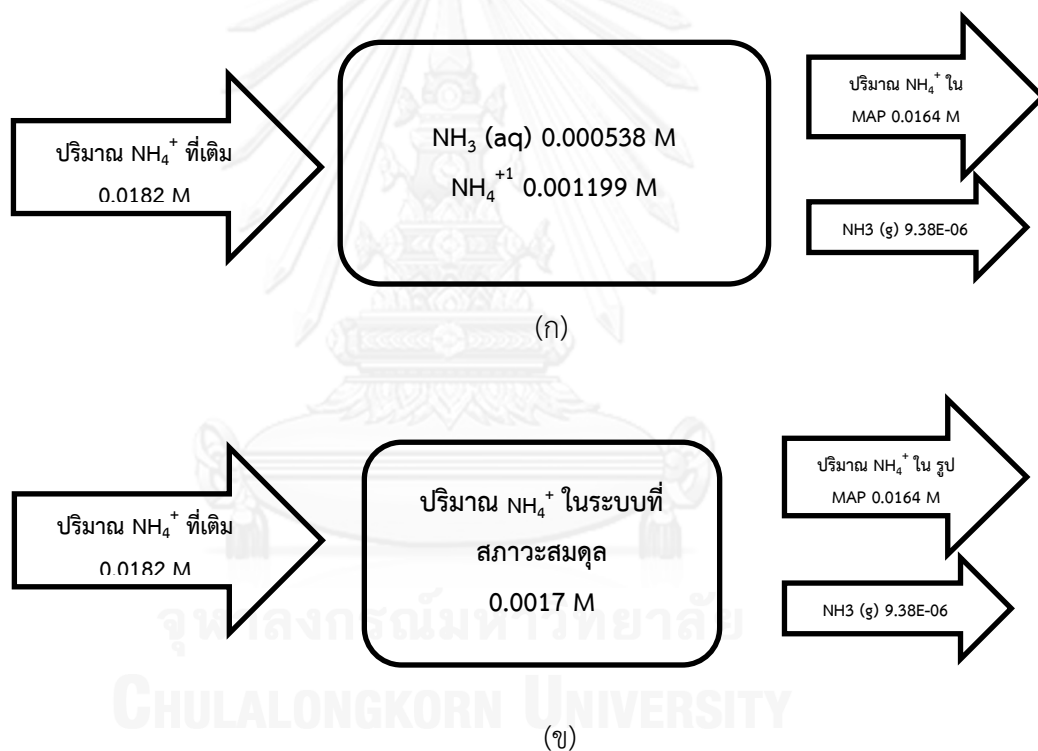


รูปที่ 4.27 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1

11.1.3 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1

จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่อ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก (เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เหลืออยู่ในระบบ (ละลาย อยู่ในสารละลายน้ำที่ฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0017 โมลต่อลิตร และเกิดเป็นผลึกโดยเป็นองค์ประกอบของผลึกสตรูไวท์เท่านั้น (ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0164 โมลต่อลิตร ในขณะที่ระเหย เป็นก๊าซแอมโมเนีย ($\text{NH}_3(\text{g})$) 9.38×10^{-6} atm จะเห็นได้ว่าความ

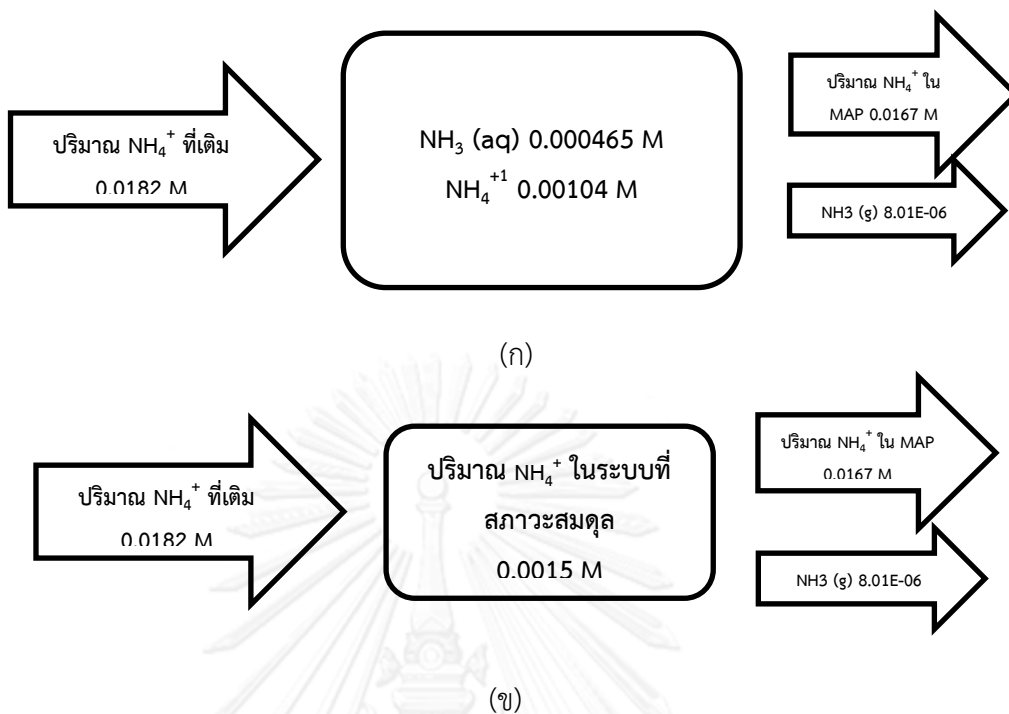
เข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้งต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำที่ฟาร์มสุกรและแอมโมเนียมไอออนที่เกิดผลึกสตรูไวท์ ($0.0182 = 0.0017 + 0.0164$) ดังนั้นระบบการตกผลึกทางเคมีของน้ำที่ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 จากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ นี้มีความสมดุล ความเข้มข้นของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ก-ข)



รูปที่ 4.28 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1

11.1.4 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต
เท่ากับ 1.1:1:1

จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่อ
อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ
1.1:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก
(เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เหลืออยู่ในระบบ (ละลาย
อยู่ในสารละลายน้ำที่ฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0015 โมลต่อลิตร
และเกิดเป็นผลึกโดยเป็นองค์ประกอบของผลึกสตรูไวท์เท่านั้น
(ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0167 โมลต่อลิตร ในขณะที่ระเหย
เป็นก๊าซแอมโมเนีย ($\text{NH}_3(g)$) 8.01×10^{-6} atm จะเห็นได้ว่าความ
เข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้งต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความ
เข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำที่ฟาร์มสุกรและ
แอมโมเนียมไอออนที่เกิดผลึกสตรูไวท์ ($0.0182 = 0.0015 +$
 0.0167) ดังนั้นระบบการตกผลึกทางเคมีของน้ำที่ฟาร์มสุกรเมื่อ
อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ
1.1:1:1 จากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ นี้มี
ความสมดุลความเข้มข้นของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (ก-ข)

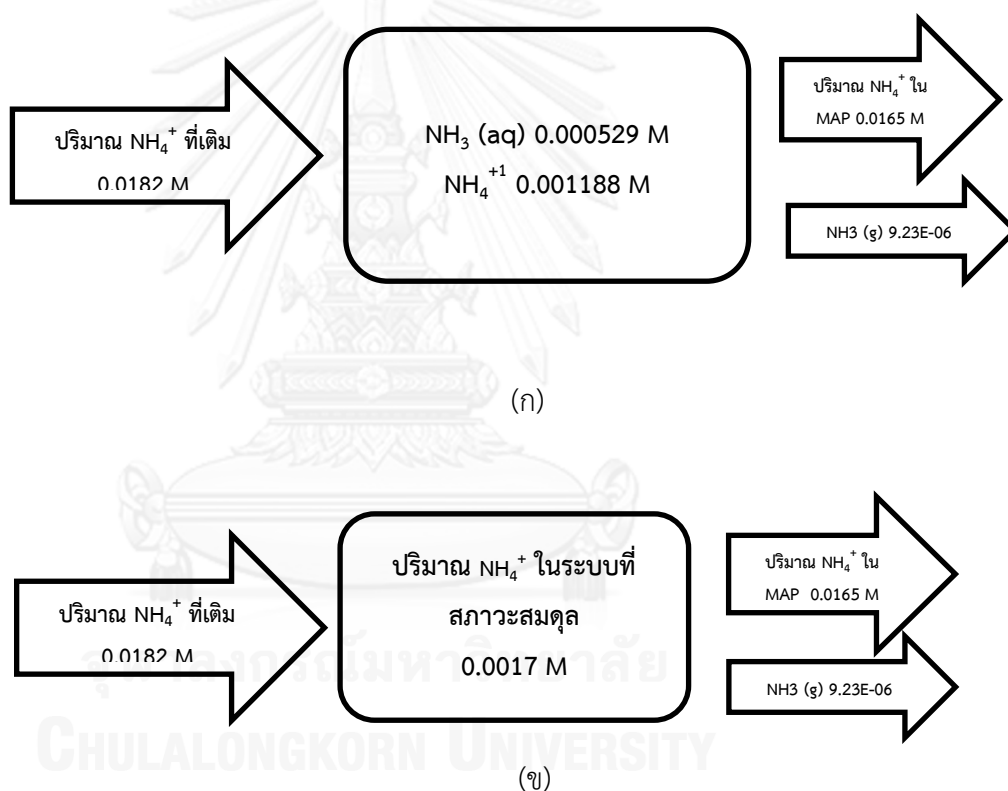


รูปที่ 4.29 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของ แมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1

11.1.5 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1

จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่อ อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก (เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เหลืออยู่ในระบบ (ละลาย อยู่ในสารละลายน้ำที่ฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0017 โมลต่อลิตร และเกิดเป็นผลึกโดยเป็นองค์ประกอบของผลึกสตรูไวท์เท่านั้น (ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0165 โมลต่อลิตร ในขณะที่ระเหย เป็นก๊าซแอมโมเนีย ($\text{NH}_3(\text{g})$) 9.23×10^{-6} atm จะเห็นได้ว่าความ

เข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้งต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำที่ฟาร์มสุกรและแอมโมเนียมไอออนที่เกิดผลึกสตรูไวท์ ($0.0182 = 0.0017 + 0.0165$) ดังนั้นระบบการตกผลึกทางเคมีของน้ำที่ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 จากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ นี้มีความสมดุลความเข้มข้นของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ก-ข)

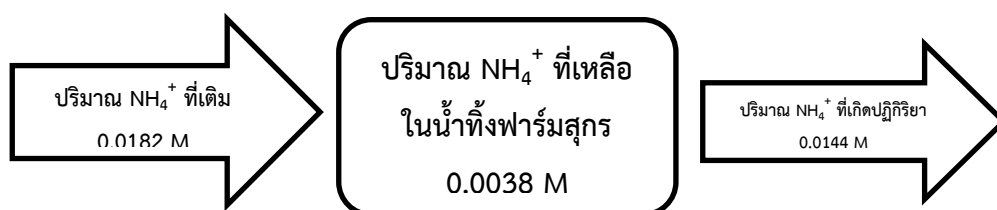


รูปที่ 4.30 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมีเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1

11.2 การศึกษาสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) จากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

11.2.1 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1

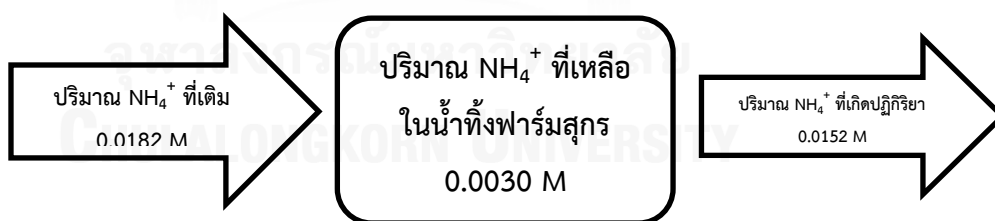
จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก (เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เกิดปฏิกิริยาระหว่างการทดลอง (ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0144 โมลต่อลิตร และเหลืออยู่ในระบบ (ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0038 โมลต่อลิตร จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้งต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและแอมโมเนียมไอออนที่เกิดปฏิกิริยา ($0.0182 = 0.0038 + 0.0144$) ดังนั้นระบบการตกผลึกของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1 จากการทดลองนี้มีความสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมีเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1

11.2.2 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต
เท่ากับ 0.9:1:1

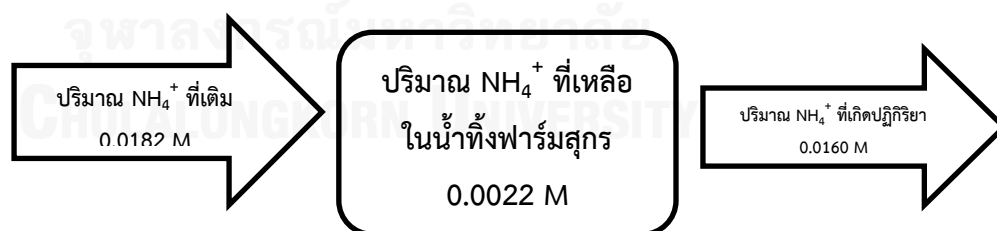
จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก (เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เกิดปฏิกิริยาระหว่างการทดลอง (ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0152 โมลต่อลิตร และเหลืออยู่ในระบบ (ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0030 โมลต่อลิตร จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้งต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและแอมโมเนียมไอออนที่เกิดปฏิกิริยา ($0.0182 = 0.0030 + 0.0152$) ดังนั้นระบบการตกผลึกของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1 จากการทดลองนี้มีความสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมี
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1

11.2.3 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1

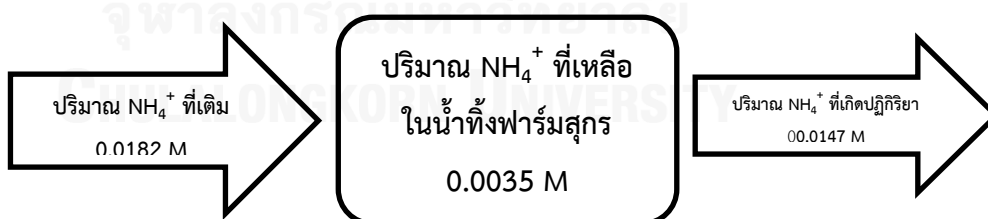
จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก (เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เกิดปฏิกิริยาระหว่างการทดลอง (ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0160 โมลต่อลิตร และเหลืออยู่ในระบบ (ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0022 โมลต่อลิตร จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้งต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและแอมโมเนียมไอออนที่เกิดปฏิกิริยา ($0.0182 = 0.0022 + 0.0160$) ดังนั้นระบบการตกผลึกของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 จากการทดลองนี้มีความสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมี
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1

11.2.4 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต
เท่ากับ 1.1:1:1

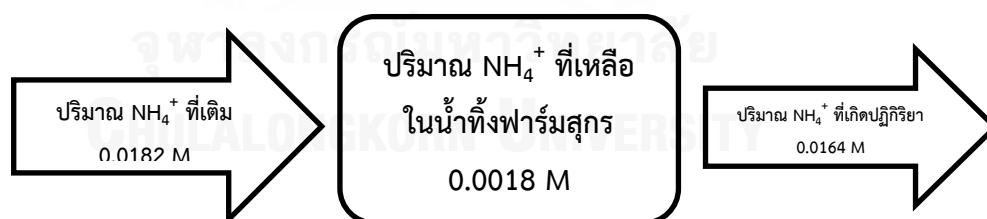
จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก (เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เกิดปฏิกิริยาระหว่างการทดลอง (ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0147 โมลต่อลิตร และเหลืออยู่ในระบบ (ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0035 โมลต่อลิตร จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้งต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและแอมโมเนียมไอออนที่เกิดปฏิกิริยา ($0.0182 = 0.0035 + 0.0147$) ดังนั้นระบบการตกผลึกของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 จากการทดลองนี้มีความสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมี
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1

11.2.5 อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต
เท่ากับ 1.2:1:1

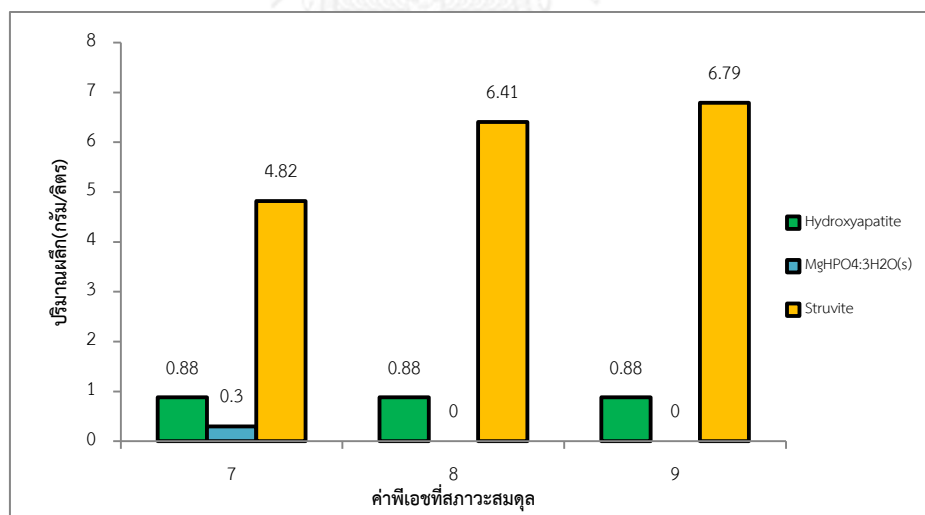
จากสมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนเมื่อ
อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ
1.2:1:1 พบว่าแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ตั้งต้นก่อนการตกผลึก
(เข้าในระบบ) มีค่า 0.0182 โมลต่อลิตร เกิดปฏิกิริยาระหว่างการ
ทดลอง (ออกจากระบบ) ประมาณ 0.0164 โมลต่อลิตร และ
เหลืออยู่ในระบบ (ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกร) ประมาณ 0.0018
โมลต่อลิตร จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนตั้ง
ต้น มีค่าเท่ากับผลรวมของความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนที่
ละลายในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรและแอมโมเนียมไอออนที่เกิดปฏิกิริยา
($0.0182 = 0.0018 + 0.0164$) ดังนั้นระบบการตกผลึกของน้ำทิ้ง
ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:
ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 จากการทดลองนี้มีความสมดุลความ
เข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.35



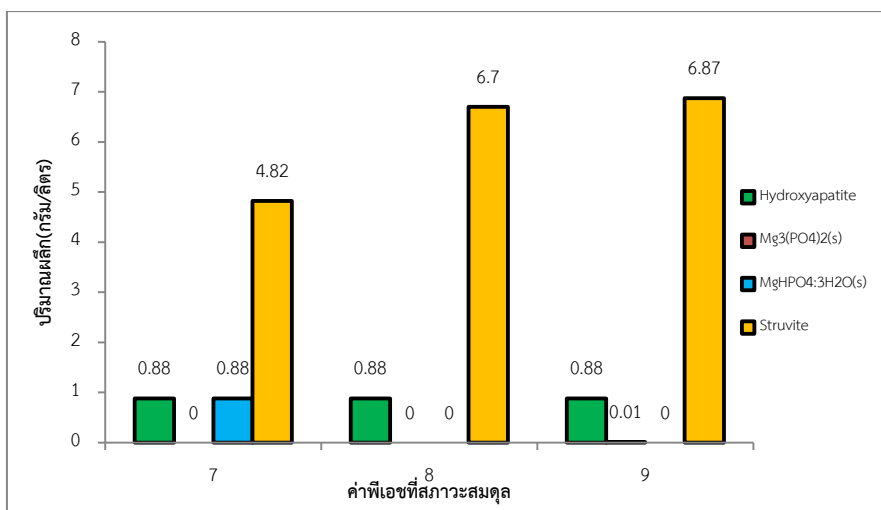
รูปที่ 4.35 สมดุลความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ของระบบการตกผลึกทางเคมีเมื่อ
อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1

4.3.3 ผลการศึกษาการนำแบบจำลอง Visual MINTEQ มาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์

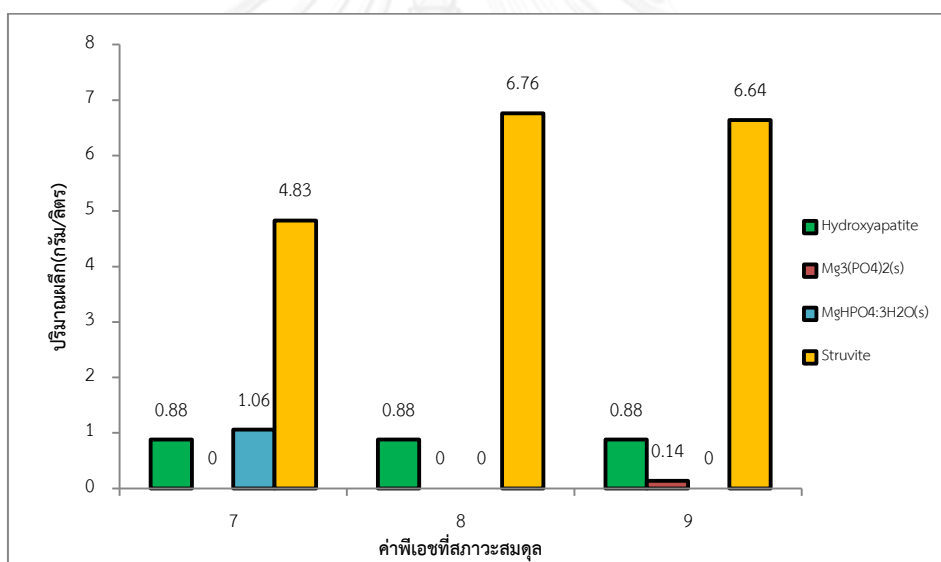
จากตารางที่ 3.2 แสดงความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนมีอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.0032:0.0187:0.0309 เมื่อทำการปรับอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 1.5:1:1 และ 2:1:1 พบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.5:1:1 พีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุดเท่ากับ 6.87 กรัมต่อลิตร ในขณะที่เกิดการตกผลึกร่วมของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทท์ (HAP) และผลึก $Mg_3(PO_4)_2(s)$ เท่ากับ 0.88 และ 0.01 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ดังนั้นเมื่อต้องการให้เกิดการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนได้ดีที่สุด ต้องเติมผลึกแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) ปริมาณ 8.79 กรัมและเติมผลึกแอมโมเนียมไนเตรด (NH_4NO_3) ปริมาณ 1 กรัม ผลึกที่เกิดขึ้นที่แต่ละอัตราส่วนโดยโมลแสดงดังรูปที่ 4.36



(ก) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1



(ข) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.5:1:1



(ค) อัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 2:1:1

รูปที่ 4.36 ชนิดและปริมาณผลึกจากน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนเมื่อประมวลผลด้วย

แบบจำลอง Visual MINTEQ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์ (MAP) ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น ฟอสฟอรัสและแมกนีเซียม พร้อมทั้งศึกษาองค์ประกอบของผลึกที่เกิดขึ้น โดยนำแบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณสมดุลทางเคมีมาทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลึกสตรูไวท์และทำนายองค์ประกอบทางเคมีและผลึกที่เกิดขึ้นจากการตกผลึกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร สามารถสรุปการศึกษาได้ดังนี้

1. น้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศประกอบด้วยปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น 254.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 31.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแมกนีเซียมไอออน 55.47 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมไอออน 68.76 มิลลิกรัมต่อลิตรและโพแทสเซียมไอออน 225.32 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการนำน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมาตกผลึกสตรูไวท์ เนื่องจากในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีองค์ประกอบหลักของการเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ ($MgNH_4PO_3 \cdot 6H_2O$) ดังนั้นผลึกสตรูไวท์จะช่วยลดความเข้มข้นของพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นได้เมื่อทำการตกผลึกสตรูไวท์ในสภาวะที่เหมาะสม
2. จากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ คืออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 โดยผลึกสตรูไวท์มีออกซิเจน แมกนีเซียมและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ 49 21 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ
3. จากการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรพบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์ คืออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.2:1:1 เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9 โดยผลึกสตรูไวท์มีออกซิเจน แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมและแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ 52 22 24 1 และ 1 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

สามารถลดปริมาณซีโอติ ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็นและ ปริมาณโลหะหนักออกจากรูน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้

4. จากการสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ผลการสอบทานจากงานวิจัยมีความสอดคล้องกัน โดยในช่วงพีเอชเท่ากับ 7.5-10 จะพบผลึกสตรูไวท์เป็นผลึกหลักของระบบ ในขณะที่เมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 7.5 จะพบผลึก $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ เกิดขึ้น
5. จากการทำนายสถานะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์จากรูน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรโดยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 ระบุว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1:1:1 พีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 สามารถเกิด ปริมาณผลึกสตรูไวท์ได้มากที่สุดเท่ากับ 4.75 กรัมต่อลิตร
6. จากการทำนายด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 ระบุว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1 พีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 จะพบผลึกสตรูไวท์ในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรได้มากที่สุดเท่ากับ 4.09 กรัมต่อลิตร
7. แนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น และปริมาณโลหะหนักจากการประมวลผลด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 มีความสอดคล้องกับผลการทดลองตกผลึกสตรูไวท์จากรูน้ำทิ้งฟาร์มสุกร
8. จากองค์ประกอบของน้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังผ่านการบำบัดแบบไร้อากาศในงานวิจัย เมื่อต้องการตกผลึกสตรูไวท์เพื่อให้เกิดปริมาณมากที่สุด ต้องทำการปรับความเข้มข้นของ $[Mg^{2+}]$ และ $[PO_4^{3-}-P]$ โดยเติมโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) 2.06 กรัม และแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) 3.61 กรัม เพื่อให้รูน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมีอัตราส่วนแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.1:1:1
9. จากการทำนายสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกสตรูไวท์จากรูน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 ระบุว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟตเท่ากับ 1.5:1:1 พีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9 จะเกิด

การตกผลึกสตรูไวท์ได้ดีที่สุดเท่ากับ 6.87 กรัมต่อลิตร ในขณะที่เกิดการตกผลึกร่วมของ ผลึกไฮดรอก-ซีอะพาไทท์ (HAP) และผลึก $Mg_3(PO_4)_2(s)$ เท่ากับ 0.88 และ 0.01 กรัมต่อ ลิตรตามลำดับ

10.แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 สามารถนำมาใช้ในการทำนายสภาวะ ที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุลทางเคมี ได้

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

1. เนื่องจากการวิจัยในครั้งนี้เป็นการนำของเสียจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมาใช้ทำปุ๋ยละลายช้าใน รูปของผลึกสตรูไวท์ (MAP) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อพืชและเกิดผลดีต่อภาคเกษตรกรรม นอกจากนี้ยังช่วยลดความเข้มข้นของธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่มีมากในน้ำทิ้ง ฟาร์มสุกรได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าควรสนับสนุนแนวความคิดการตกผลึกสตรูไวท์จากน้ำทิ้ง ฟาร์มสุกรต่อไป เนื่องจากสามารถลดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำธรรมชาติได้และยังก่อให้เกิด การเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้แก่เกษตรกรได้อีกด้วย
2. นอกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรแล้วควรมีการนำน้ำเสียชนิดอื่นๆ เช่น น้ำเสียชุมชนหรือน้ำเสียยูรีน มาศึกษาคุณลักษณะเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งตกผลึกสตรูไวท์ เนื่องจากน้ำเสียชุมชนและ น้ำเสียยูรีนเป็นน้ำเสียที่มีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณสูง เช่นกัน (Uludag-Demirer และ Othman (2009) และ Wilsenach และคณะ (2006))

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร. [ออนไลน์]. 2546. แหล่งที่มา:

www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html. [2555, สิงหาคม 9]

กรมควบคุมมลพิษ. น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา:

www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html. [2555, สิงหาคม 9]

กรมควบคุมมลพิษ. น้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา:

www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html. [2555, สิงหาคม 9]

จักรราช คุณาเขมากร และอานนท์ ดวงพาลี. 2550. ศึกษาผลของความเข้มข้นแอมโมเนียที่มีต่ออัตราและปริมาณการเกิดผลึกสตรูไวท์. โครงการการศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.

จิรัฏฐ์ แสนทน. 2554. วิธีการใช้โปรแกรม Visual MINTEO เบื้องต้น, เอกสารประกอบการเรียนการสอน ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์. 2553. การกำจัดแอมโมเนียและฟอสเฟตพร้อมกันโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธงชัย อัมพรพะงา. 2556. การตกผลึกแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟตจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรในถังปฏิกริยาแบบไหลต่อเนื่อง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธันัน วัชรมัย. นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สัมภาษณ์, พฤศจิกายน 2555.

ดวงกมล พทธรธีโนปจัย. 2552. การนำธาตุอาหารในน้ำทิ้งฟาร์มสุกรกลับมาใช้ประโยชน์โดยการตก

ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม

สิ่งแวดล้อมคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิชญ์ภาค เจียรพันธ์. 2552. ปริมาณธาตุอาหารจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรที่เหมาะสมต่อการตกผลึก

แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม

สิ่งแวดล้อมคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รูปทรงผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา:

<http://www.paques.nl>. [2555, สิงหาคม 7]

รูปการดูดซับไอออนที่พื้นผิวของของแข็ง. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา:

<http://www.americanpharmaceuticalreview.com>. [2557, มกราคม 15]

ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา

<http://www.cranfield.ac.uk/sas/water/scale/struvite.htm>. [2555, สิงหาคม 7]

สุธา ขาวเธียร. 2555. ศึกษาการบำบัดธาตุอาหารของพีชที่ปนเปื้อนในน้ำเสียและการนำกลับมาใช้

ประโยชน์ใหม่ด้วยกระบวนการทางเคมี. เอกสารประกอบการสัมมนา วช. ผลักดันงานวิจัย

ด้านการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาคุณค่าความหลากหลายทางชีวภาพ เพื่อ

ชีวิตที่เป็นสุขและความเป็นอยู่ที่ยั่งยืน :1-7.

ภาษาอังกฤษ

- Ali, M.I. and Schneider, P. 2008. An approach of estimating struvite growth kinetic incorporating thermodynamic and solution chemistry, kinetic and process description. Journal of Engineering Science 63: 3514-3525.
- Ali, M.I., Schneider, P. and Hudson, N. 2003. Assessing nutrient recovery from piggery effluents. Journal of MODSIM03 NZ.
- Allison, J., Brown, D. and Novo-Gradac, K.J. 1991. Minteqa2/prodefa2, A chemical assessment model for environmental systems: version 3.0 user's manual. Environmental Research Laboratory: HydroGeoLogic, Inc.
- Celen, I., Buchanan, J.R., Burns, R. T., Robinson, R.B. and Raman, D. 2007. Using a chemical equilibrium model to predict amendments required to precipitate phosphorus as struvite in liquid swine manure. Journal of Water Research 41: 1689-1696.
- Charlton, S. and Parkhurst, D. 2011. Modules based on the Geochemical model PHREEQC for use in scripting and programming languages. Journal of Computers and Sciences 37: 1653-1663.
- General Chemical Team. 2008. Struvite Control in Wastewater [Online]. Available from: <http://www.generalchemical.com> (2012, August 8)
- Hafner, S.D. and Bisogni, J.J. 2009. Modeling of ammonia speciation in anaerobic digesters. Journal of Water Research 43: 4105-4114.

- Hanhoun, M., Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., Biscans, B., Freche, M. And Pibouleau, L. 2011. Temperature impact assessment on struvite solubility product: A thermodynamic modeling approach. Journal of Chemical Engineering 167: 50-58.
- Kim, S., Baik, M., Kang, K., Know, S. and Choi, J. 2008. Solubilities of actinides in a domestic groundwater and a bentonite porewater calculated by using PHREEQC. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 14: 739–746.
- Korchef, A., Saidou, H. and Amor, M. 2008. Phosphate recovery through struvite precipitation by CO₂ removal: Effect of magnesium, phosphate and ammonium concentrations. Journal of Hazardous Materials 186: 602-613.
- Koutsoukos, P. 2002. Current knowledge of calcium phosphate chemistry and in particular solid surface-water interface interactions. 1-10. Greece: University of Patras.
- Lee, Sang-Hun., Yoo, Byeoung-Hak., Lim, Seung., Kim, Tak-Hyun., Kim, Sun-Kyoung. and Kim, Jun-Young. 2013. Development and validation of an equilibrium model for struvite formation with calcium co-precipitation. Journal of Crystal growth 372: 129-137.
- Liu, Y., Kwang, J., Kim, J. and Ra, C.S. 2011. Recovery of nitrogen and Phosphorus by struvite crystallization from swine wastewater. Journal of Desalination 277: 364-369.
- Marsac, R., Davranche, M., Gruau, G., Coz, M. and Dia, A. 2011. An improved description of the interactions between rare earth elements and humic acids

by modeling:PHREEQC-Model VI coupling. Journal of Geochemical et Cosmochimica Acta 75: 5625-5637.

Marti, N., Bouzas, A. and Ferrer, J. 2008. Struvite precipitation assessment in anaerobic digestion processes. Journal of Chemical Engineering 141: 67-74.

Navarro, Andres., Cardellach, Esteve. and Corbella, Merce. 2008. Mercury mobility in mine waste from Hg-mining areas in Almeria, Andalusia (Se Spain). Journal of Geochemical Exploration 101: 236-246.

Parkhurst, D. and Appelo, C.A.J.1999. User's guide to phreeqc(version 2) a computer program for speciation, batch reaction, one-dimentional transport and inverse geochemical calcultions. Water-Resources Investigations. 99-4259. Colorado: Denver Federal Center.

Paster, L., Mangin, D., Barat, R. and Seco, A. 2008. A pilot-scale study of struvite precipitation in stirred tank reactor: Conditions influencing the process. Journal of Bioresource Technology 99: 6285-6291.

Ronteltap, M., Maurer, M. and Gujer, W. 2007. Struvite precipitation thermodynamics in source-separated urine. Journal of Water Research 41: 977-984.

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. Journal of Chemosphere 69: 319-324.

Wilsenach, J.A., Schuurbiers, C.A.H. and Loosdrecht, M.C.M. 2007. Phosphate and Potassium recovery from source separated urine through struvite precipitation. Journal of Water research 41: 458-466.

Yan, ZHANG., Jianguo, JIANG. and Maozhe, CHEN. 2008. MINTEQ modeling for evaluating the leaching behavior of heavy metals in MSWI fly ash. Journal of Environmental Sciences 20: 1398-1402.

Ye, Z.L., Chen, S.H., Wang, S.M., Lin, L.F., Yan, Y.J., Zhang, Z.J. and Chen, J.S. 2010. Phosphorus recovery from synthetic swine wastewater by chemical precipitation using response surface methodology. Journal of Hazardous Materials 176: 1083-1088.

Zhang, T., Li, Q., Ding, L., Ren, H., Xu, K., Wu, Y. and Sheng, D. 2010. Modeling assessment for ammonia nitrogen recovery from wastewater by chemical precipitation. Journal of Environmental Science 23(6): 881-889



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณการเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรและน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณการเตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

น้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด	เท่ากับ 68.73	mg/l
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	เท่ากับ 286.30	mg/l
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	เท่ากับ 74.25	mg/l

กำหนดให้

- น้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียม (Mg^{2+})	เท่ากับ 24.305	g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน (N)	เท่ากับ 14.0067	g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของฟอสฟอรัส (P)	เท่ากับ 30.973	g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของแคลเซียม (Ca)	เท่ากับ 40.078	g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของโพแทสเซียม (K)	เท่ากับ 39.098	g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)	เท่ากับ 203.31	g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4)	เท่ากับ 120	g/mol
- น้ำหนักโมเลกุลของแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($NH_4H_2PO_4$)	เท่ากับ 114.98	g/mol

คำนวณความเข้มข้นในหน่วยโมล

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

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

$$[PO_4^{3-} - P] = \frac{74.25 \text{ mg P}}{L} \times \frac{1 \text{ mol P}}{30.973 \text{ g P}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.0024 \text{ M}$$

อัตราส่วน	$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-} = 0.0028 : 0.0204 : 0.0024 \text{ M}$
ต้องการ	$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-} = 1:1:1$
	$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-} = 1.1:1:1$
	$Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-} = 1.2:1:1$

1.ที่อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1:1:1$

$$\text{จะมีอัตราส่วน } Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0204 : 0.0204 : 0.0204$$

$$\text{ต้องเติม } [Mg^{2+}] = 0.0204 \text{ M} \quad [NH_4^+ -N] = 0.0204 \text{ M} \quad [PO_4^{3-} -P] = 0.0204 \text{ M}$$

- การเตรียม $[Mg^{2+}] = 0.0204 \text{ M}$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุล (MW) ของ } MgCl_2 \cdot 6H_2O &= 24.31 + (2 \times 35.5) + (6 \times 18) \\ &= 203.31 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักโมเลกุลของ } MgCl_2 &= 203.31 - (6 \times 18) \\ &= 95.31 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ความเข้มข้น 0.0204 M

$$\text{จาก } \frac{g}{MW} = \frac{CV}{1000}$$

$$\frac{g}{95.31 \text{ g/mol}} = \frac{(0.0204 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000}$$

$$g_{(MgCl_2)} = 1.94 \text{ g}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 1.94 กรัม

$$\text{แต่ } MgCl_2 \quad 95.31 \quad \text{ได้จาก } MgCl_2 \cdot 6H_2O \quad 203.31 \text{ g}$$

$$\text{ถ้าต้องการ } MgCl_2 \quad 1.94 \text{ g} \quad \text{ต้องชั่ง } MgCl_2 \cdot 6H_2O = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (1.94 \text{ g})}{95.31 \text{ g}}$$

$$\text{จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย} = 4.15 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) เท่ากับ 4.15 กรัม

- การเตรียม $[\text{NH}_4^+ - \text{N}] = 0.0204 \text{ M}$ และ $[\text{PO}_4^{3-} - \text{P}] = 0.0204 \text{ M}$
 น้ำหนักโมเลกุล (MW) ของ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 = 114.98 \text{ g/mol}$
 ต้องการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) ความเข้มข้น 0.0204 M

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{114.98 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0204 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ S_{(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)} &= 2.35 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ทั้งหมดเท่ากับ 1.94 กรัม

2. ที่อัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 1.1:1:1$

จะมีอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0224 : 0.0204 : 0.0204$

ต้องเติม $[\text{Mg}^{2+}] = 0.0224 \text{ M}$ $[\text{NH}_4^+ - \text{N}] = 0.0204 \text{ M}$ $[\text{PO}_4^{3-} - \text{P}] = 0.0204 \text{ M}$

- การเตรียม $[\text{Mg}^{2+}] = 0.0224 \text{ M}$

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ความเข้มข้น 0.0224 M

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0224 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ S_{(\text{MgCl}_2)} &= 2.13 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 2.13 กรัม

$$\begin{aligned} \text{แต่ } \text{MgCl}_2 \quad 95.31 \text{ g} &\text{ ได้จาก } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \quad 203.31 \text{ g} \\ \text{ถ้าต้องการ } \text{MgCl}_2 \quad 2.13 \text{ g} &\text{ ต้องชั่ง } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (2.13 \text{ g})}{95.31 \text{ g}} \end{aligned}$$

$$= 4.55 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เท่ากับ 4.55 กรัม

3. ที่อัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 1.2:1:1$

จะมีอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0245 : 0.0204 : 0.0204$

ต้องเติม $[\text{Mg}^{2+}] = 0.0245 \text{ M}$ $[\text{NH}_4^+ - \text{N}] = 0.0204 \text{ M}$ $[\text{PO}_4^{3-} - \text{P}] = 0.0204 \text{ M}$

- การเตรียม $[\text{Mg}^{2+}] = 0.0245 \text{ M}$

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ความเข้มข้น 0.0245 M

$$\text{จาก } \frac{\text{g}}{\text{MW}} = \frac{\text{CV}}{1000}$$

$$\frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} = \frac{(0.0245 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000}$$

$$S_{(\text{MgCl}_2)} = 2.33 \text{ g}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 2.33 กรัม

แต่ MgCl_2 95.31 g ได้จาก $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 203.31 g

ถ้าต้องการ MgCl_2 2.33 g ต้องชั่ง $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (2.33 \text{ g})}{95.31 \text{ g}}$

$$= 4.98 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เท่ากับ 4.98 กรัม

การคำนวณการเตรียมน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

น้ำทิ้งฟาร์มสุกร

ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด	เท่ากับ 55.47 mg/l
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	เท่ากับ 254.50 mg/l
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	เท่ากับ 31.01 mg/l
ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด	เท่ากับ 68.76 mg/l
ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด	เท่ากับ 225.32 mg/l

คำนวณความเข้มข้นในหน่วยโมล

$$[\text{Mg}^{2+}] = \frac{55.47 \text{ mg Mg}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol Mg}}{24.305 \text{ g Mg}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.0023 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+-\text{N}] = \frac{254.50 \text{ mg N}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol N}}{14.0067 \text{ g N}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-}-\text{P}] = \frac{31.01 \text{ mg P}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol P}}{30.973 \text{ g P}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.0010 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = \frac{68.76 \text{ mg Ca}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol Ca}}{40.078 \text{ g Ca}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.0017 \text{ M}$$

$$[\text{K}^+] = \frac{225.32 \text{ mg K}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mol K}}{39.098 \text{ g K}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.0058 \text{ M}$$

อัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+-\text{N} : \text{PO}_4^{3-}-\text{P} = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010 \text{ M}$

ต้องการ $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+-\text{N} : \text{PO}_4^{3-}-\text{P} = 0.8:1:1$

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+-\text{N} : \text{PO}_4^{3-}-\text{P} = 0.9:1:1$$

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+-\text{N} : \text{PO}_4^{3-}-\text{P} = 1:1:1$$

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+-\text{N} : \text{PO}_4^{3-}-\text{P} = 1.1:1:1$$

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+-\text{N} : \text{PO}_4^{3-}-\text{P} = 1.2:1:1$$

1. ต้องการอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+-\text{N} : \text{PO}_4^{3-}-\text{P} = 0.8:1:1$

ดังนั้นจะมี $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+-\text{N} : \text{PO}_4^{3-}-\text{P} = 0.0146 : 0.0182 : 0.0182$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมี

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+-\text{N} : \text{PO}_4^{3-}-\text{P} = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

จาก $[\text{Mg}^{2+}] = 0.0146 \text{ M}$ $[\text{NH}_4^+-\text{N}] = 0.0182 \text{ M}$ $[\text{PO}_4^{3-}-\text{P}] = 0.0182 \text{ M}$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} และ $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$

$$- \text{Mg}^{2+} \text{ ที่เติม} = 0.0146 - 0.0023 = 0.0123 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} เท่ากับ 0.0123 M

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ความเข้มข้น 0.0123 M

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0123 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ S_{(\text{MgCl}_2)} &= 1.17 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 1.17 กรัม

$$\begin{aligned} \text{แต่ } \text{MgCl}_2 \quad 95.31 \text{ g} &\quad \text{ได้จาก } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \quad 203.31 \text{ g} \\ \text{ถ้าต้องการ } \text{MgCl}_2 \quad 1.17 \text{ g} &\quad \text{ต้องชั่ง } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (1.17 \text{ g})}{95.31 \text{ g}} \\ &= 2.50 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เท่ากับ 2.50 กรัม

2. ต้องการอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.9:1:1$

$$\text{ดังนั้นจะมี } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0164 : 0.0182 : 0.0182$$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมี

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

$$\text{จาก } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0164 \text{ M} \quad [\text{NH}_4^+ - \text{N}] = 0.0182 \text{ M} \quad [\text{PO}_4^{3-} - \text{P}] = 0.0182 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} และ $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

$$- \text{Mg}^{2+} \text{ ที่เติม} = 0.0164 - 0.0023 = 0.0141 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} เท่ากับ 0.0141 M

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ความเข้มข้น 0.0141 M

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0141 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \end{aligned}$$

$$S_{(MgCl_2)} = 1.35 \text{ g}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 1.35 กรัม

$$\text{แต่ } MgCl_2 \quad 95.31 \text{ g} \quad \text{ได้จาก } MgCl_2 \cdot 6H_2O \quad 203.31 \text{ g}$$

$$\text{ถ้าต้องการ } MgCl_2 \quad 1.35 \text{ g} \quad \text{ต้องชั่ง } MgCl_2 \cdot 6H_2O = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (1.35 \text{ g})}{95.31 \text{ g}}$$

$$= 2.87 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) เท่ากับ 2.87 กรัม

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

$$\text{ดังนั้นจะมี } Mg^{2+} : NH_4^+ - N : PO_4^{3-} - P = 0.0182 : 0.0182 : 0.0182$$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมี

$$Mg^{2+} : NH_4^+ - N : PO_4^{3-} - P = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

$$\text{จาก } [Mg^{2+}] = 0.0182 \text{ M} \quad [NH_4^+ - N] = 0.0182 \text{ M} \quad [PO_4^{3-} - P] = 0.0182 \text{ M}$$

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

$$- Mg^{2+} \text{ ที่เติม} = 0.0182 - 0.0023 = 0.0159 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} เท่ากับ 0.0159 M

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ความเข้มข้น 0.0159 M

$$\text{จาก } \frac{\text{g}}{\text{MW}} = \frac{\text{CV}}{1000}$$

$$\frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} = \frac{(0.0159 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000}$$

$$S_{(MgCl_2)} = 1.52 \text{ g}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 1.52 กรัม

$$\text{แต่ } MgCl_2 \quad 95.31 \text{ g} \quad \text{ได้จาก } MgCl_2 \cdot 6H_2O \quad 203.31 \text{ g}$$

$$\text{ถ้าต้องการ } MgCl_2 \quad 1.52 \text{ g} \quad \text{ต้องชั่ง } MgCl_2 \cdot 6H_2O = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (1.52 \text{ g})}{95.31 \text{ g}}$$

$$= 3.23 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เท่ากับ 3.23 กรัม

4. ต้องการอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 1.1:1:1$

$$\text{ดังนั้นจะมี } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0200 : 0.0182 : 0.0182$$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมี

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

$$\text{จาก } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0200 \text{ M} \quad [\text{NH}_4^+ - \text{N}] = 0.0182 \text{ M} \quad [\text{PO}_4^{3-} - \text{P}] = 0.0182 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} และ $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

$$- \text{Mg}^{2+} \text{ ที่เติม} = 0.0200 - 0.0023 = 0.0177 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} เท่ากับ 0.0177 M

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ความเข้มข้น 0.0177 M

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0177 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ S_{(\text{MgCl}_2)} &= 1.69 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 1.69 กรัม

$$\text{แต่ } \text{MgCl}_2 \quad 95.31 \text{ g} \quad \text{ได้จาก } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \quad 203.31 \text{ g}$$

$$\text{ถ้าต้องการ } \text{MgCl}_2 \quad 1.69 \text{ g} \quad \text{ต้องชั่ง } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (1.69 \text{ g})}{95.31 \text{ g}}$$

$$= 3.61 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เท่ากับ 3.61 กรัม

5. ต้องการอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 1.2:1:1$

$$\text{ดังนั้นจะมี } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0218 : 0.0182 : 0.0182$$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกรมี

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

$$\text{จาก } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0218 \text{ M} \quad [\text{NH}_4^+ - \text{N}] = 0.0182 \text{ M} \quad [\text{PO}_4^{3-} - \text{P}] = 0.0182 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} และ $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

$$- \text{Mg}^{2+} \text{ ที่เติม} = 0.0218 - 0.0023 = 0.0196 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} เท่ากับ 0.0196 M

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ความเข้มข้น 0.0196 M

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0196 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ \text{g}(\text{MgCl}_2) &= 1.86 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 1.69 กรัม

$$\begin{aligned} \text{แต่ } \text{MgCl}_2 \quad 95.31 \text{ g} &\text{ ได้จาก } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \quad 203.31 \text{ g} \\ \text{ถ้าต้องการ } \text{MgCl}_2 \quad 1.86 \text{ g} &\text{ ต้องชั่ง } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (1.86 \text{ g})}{95.31 \text{ g}} \\ &= 3.98 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เท่ากับ 3.98 กรัม

$$\begin{aligned} 6. \text{ PO}_4^{3-}\text{-P ที่เติมคงที่ในทุกๆอัตราส่วนความเข้มข้น} &= 0.0182 - 0.0010 \\ &= 0.0172 \text{ M} \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องเติม $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ เท่ากับ 0.0172 M

- การเตรียม $[\text{PO}_4^{3-}\text{-P}] = 0.0172 \text{ M}$ เตรียมในรูปแบบ NaH_2PO_4

น้ำหนักโมเลกุล (MW) ของ $\text{NaH}_2\text{PO}_4 = 120 \text{ g/mol}$

ต้องการเตรียมสารละลายโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4)

ความเข้มข้น 0.0172 M

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{120 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0172 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ \text{g}(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) &= 2.06 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้ NaH_2PO_4 ทั้งหมด เท่ากับ 2.06 กรัม

ภาคผนวก ข

การคำนวณข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0
ในการวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0 ในการวิจัย

น้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

1. อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1:1:1$

จะมีอัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0204 : 0.0204 : 0.0204$

ต้องเติม $[Mg^{2+}] = 0.0204 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0204 \text{ M}$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0204 \text{ M}$

เนื่องจากเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.0204 M

เติม $NH_4H_2PO_4$ 0.0204 M

ดังนั้น ในระบบจะประกอบด้วย $[Mg^{2+}] = 0.0204 \text{ M}$

$[Cl^-] = 0.0408 \text{ M}$

$[NH_4^+ -N] = 0.0204 \text{ M}$

$[PO_4^{3-} -P] = 0.0204 \text{ M}$

$[H^+] = 0.0408 \text{ M}$

2. อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1.1:1:1$

จะมีอัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0224 : 0.0204 : 0.0204$

ต้องเติม $[Mg^{2+}] = 0.0224 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0204 \text{ M}$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0204 \text{ M}$

เนื่องจากเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.0224 M

เติม $NH_4H_2PO_4$ 0.0204 M

ดังนั้น ในระบบจะประกอบด้วย $[Mg^{2+}] = 0.0224 \text{ M}$

$[Cl^-] = 0.0448 \text{ M}$

$[NH_4^+ -N] = 0.0204 \text{ M}$

$[PO_4^{3-} -P] = 0.0204 \text{ M}$

$[H^+] = 0.0408 \text{ M}$

3. อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1.2:1:1$

จะมีอัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0245 : 0.0204 : 0.0204$

ต้องเติม $[Mg^{2+}] = 0.0245 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0204 \text{ M}$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0204 \text{ M}$

เนื่องจากเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.0245 M

เติม $NH_4H_2PO_4$ 0.0204 M

ดังนั้น ในระบบจะประกอบด้วย $[Mg^{2+}] = 0.0245 \text{ M}$

$[Cl^-] = 0.0490 \text{ M}$

$[NH_4^+ -N] = 0.0204 \text{ M}$

$[PO_4^{3-} -P] = 0.0204 \text{ M}$

$[H^+] = 0.0408 \text{ M}$

น้ำทิ้งฟาร์มสุกร

จากคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกร ประกอบด้วย

$[Mg^{2+}] = 0.0023 \text{ M}$

$[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$

$[PO_4^{3-} -P] = 0.0010 \text{ M}$

$[Ca^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$

และจากการอ้างอิงข้อมูลแสดงคุณภาพน้ำทิ้งฟาร์มสุกร (A. Capdevielle และคณะ, 2013) ประกอบด้วย

$[Cl^-] = 0.0360 \text{ M}$

$[SO_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$

$[NO_2^- -N] = 0.0254 \text{ M}$

$[NO_3^- -N] = 0.0049 \text{ M}$

ขณะนี้จำนวนและชนิด species ต่างๆดังนี้

$[Mg^{2+}] = 0.0023 \text{ M}$

$[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$

$[PO_4^{3-} -P] = 0.0010 \text{ M}$

$[Ca^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$

$[Cl^-] = 0.0360 \text{ M}$

$[SO_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$

$[NO_2^- -N] = 0.0254 \text{ M}$

$[NO_3^- -N] = 0.0049 \text{ M}$

$$1. \text{ อัตราส่วน } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 0.8 : 1 : 1$$

$$\text{ดังนั้นจะมี } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 0.0146 : 0.0182 : 0.0182$$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ฟาร์มสุกรมี

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

$$\text{ต้องเติม } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0123 \text{ M} \quad [\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \quad [\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0182 \text{ M}$$

เนื่องจากเติม $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.0123 M

$$\text{เติม } \text{NaH}_2\text{PO}_4 \quad 0.0172 \text{ M}$$

$$\text{ดังนั้น ในระบบจะประกอบด้วย } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0023 + 0.0123 = 0.0146 \text{ M}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.0360 + 0.0246 = 0.0606 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0010 + 0.0172 = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0344 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.0172 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_2^- \text{-N}] = 0.0254 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_3^- \text{-N}] = 0.0049 \text{ M}$$

ดังนั้นข้อมูลขาเข้าในการทำนายด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ประกอบด้วย

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0.0146 \text{ M}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.0606 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0344 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.0172 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_2^- \text{-N}] = 0.0254 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_3^- \text{-N}] = 0.0049 \text{ M}$$

$$2. \text{ อัตราส่วน } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 0.9 : 1 : 1$$

$$\text{ดังนั้นจะมี } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 0.0164 : 0.0182 : 0.0182$$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ฟาร์มสุกรมี

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

$$\text{ต้องเติม } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0141 \text{ M} \quad [\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \quad [\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0182 \text{ M}$$

เนื่องจากเติม $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.0141 M

$$\text{เติม } \text{NaH}_2\text{PO}_4 \quad 0.0172 \text{ M}$$

$$\text{ดังนั้น ในระบบจะประกอบด้วย } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0141 + 0.0023 = 0.0164 \text{ M}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.0360 + 0.0282 = 0.0642 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0010 + 0.0172 = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0344 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.0172 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_2^- \text{-N}] = 0.0254 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_3^- \text{-N}] = 0.0049 \text{ M}$$

ดังนั้นข้อมูลขาเข้าในการทำนายด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ประกอบด้วย

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0.0164 \text{ M}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.0642 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0344 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.0172 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_2^- \text{-N}] = 0.0254 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_3^- \text{-N}] = 0.0049 \text{ M}$$

$$3. \text{ อัตราส่วน } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 1 : 1 : 1$$

$$\text{ดังนั้นจะมี } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 0.0182 : 0.0182 : 0.0182$$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ฟาร์มสุกรมี

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

$$\text{ต้องเติม } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0159 \text{ M} \quad [\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \quad [\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0182 \text{ M}$$

เนื่องจากเติม $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.0159 M

$$\text{เติม } \text{NaH}_2\text{PO}_4 \quad 0.0172 \text{ M}$$

$$\text{ดังนั้น ในระบบจะประกอบด้วย } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0159 + 0.0023 = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.0360 + 0.0318 = 0.0678 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0010 + 0.0172 = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0344 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.0172 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_2^- \text{-N}] = 0.0254 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_3^- \text{-N}] = 0.0049 \text{ M}$$

ดังนั้นข้อมูลขาเข้าในการทำนายด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ประกอบด้วย

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.0678 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0182 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0344 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.0172 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_2^- \text{-N}] = 0.0254 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_3^- \text{-N}] = 0.0049 \text{ M}$$

4. อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1.1 : 1 : 1$

ดังนั้นจะมี $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0200 : 0.0182 : 0.0182$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ฟาร์มสุกรมี

$$Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

ต้องเติม $[Mg^{2+}] = 0.0177 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0182$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0182 \text{ M}$

เนื่องจากเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.0177 M

เติม NaH_2PO_4 0.0172 M

ดังนั้น ในระบบจะประกอบด้วย $[Mg^{2+}] = 0.0177 + 0.0023 = 0.0200 \text{ M}$

$[Cl^-] = 0.0360 + 0.0354 = 0.0714 \text{ M}$

$[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$

$[PO_4^{3-} -P] = 0.0010 + 0.0172 = 0.0182 \text{ M}$

$[H^+] = 0.0344 \text{ M}$

$[Ca^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$

$[Na^+] = 0.0172 \text{ M}$

$[SO_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$

$[NO_2^- -N] = 0.0254 \text{ M}$

$[NO_3^- -N] = 0.0049 \text{ M}$

ดังนั้นข้อมูลขาเข้าในการทำนายด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ประกอบด้วย

$[Mg^{2+}] = 0.0200 \text{ M}$

$[Cl^-] = 0.0714 \text{ M}$

$[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$

$[PO_4^{3-} -P] = 0.0182 \text{ M}$

$[H^+] = 0.0344 \text{ M}$

$[Ca^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$

$[Na^+] = 0.0172 \text{ M}$

$[SO_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$

$[NO_2^- -N] = 0.0254 \text{ M}$

$[NO_3^- -N] = 0.0049 \text{ M}$

5. อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1.2 : 1 : 1$

ดังนั้นจะมี $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0218 : 0.0182 : 0.0182$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่ฟาร์มสุกรมี

$$Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0023 : 0.0182 : 0.0010$$

ต้องเติม $[Mg^{2+}] = 0.0195 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0182$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0182 \text{ M}$

เนื่องจากเติม $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.0195 M

เติม NaH_2PO_4 0.0172 M

ดังนั้น ในระบบจะประกอบด้วย $[Mg^{2+}] = 0.0195 + 0.0023 = 0.0218 \text{ M}$

$[Cl^-] = 0.0360 + 0.0390 = 0.0750 \text{ M}$

$[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$

$[PO_4^{3-} -P] = 0.0010 + 0.0172 = 0.0182 \text{ M}$

$[H^+] = 0.0344 \text{ M}$

$[Ca^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$

$[Na^+] = 0.0172 \text{ M}$

$[SO_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$

$[NO_2^- -N] = 0.0254 \text{ M}$

$[NO_3^- -N] = 0.0049 \text{ M}$

ดังนั้นข้อมูลขาเข้าในการทำนายด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0 ประกอบด้วย

$[Mg^{2+}] = 0.0218 \text{ M}$

$[Cl^-] = 0.0750 \text{ M}$

$[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$

$[PO_4^{3-} -P] = 0.0182 \text{ M}$

$[H^+] = 0.0344 \text{ M}$

$[Ca^{2+}] = 0.0017 \text{ M}$

$[Na^+] = 0.0172 \text{ M}$

$[SO_4^{2-}] = 0.0035 \text{ M}$

$[NO_2^- -N] = 0.0254 \text{ M}$

$[NO_3^- -N] = 0.0049 \text{ M}$

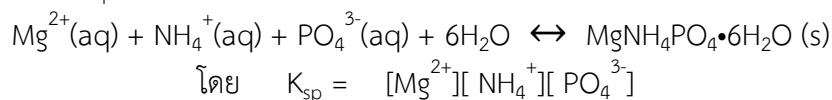
ภาคผนวก ค

การคำนวณแนวโน้มการเกิดผลึก MAP จากการทดลองเมื่อคิดเทียบจากค่าคงที่การละลาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณแนวโน้มการเกิดผลึก MAP

ค่าคงที่การละลาย (K_{sp}) ของผลึก MAP แสดงได้ดังสมการ



ซึ่งค่าคงที่การละลายของผลึก MAP ตามทฤษฎี คือ

$$K_{sp} = 10^{-13.26} \text{ โมลต่อลิตร}$$

การคำนวณแนวโน้มการเกิดผลึก MAP จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

1.ที่อัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+\text{-N} : \text{PO}_4^{3-}\text{-P} = 1:1:1$

จะมีอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+\text{-N} : \text{PO}_4^{3-}\text{-P} = 0.0204 : 0.0204 : 0.0204$

เติม $[\text{Mg}^{2+}] = 0.0204 \text{ M}$ $[\text{NH}_4^+\text{-N}] = 0.0204 \text{ M}$ $[\text{PO}_4^{3-}\text{-P}] = 0.0204 \text{ M}$

จะได้ K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลอง = $0.0204 \times 0.0204 \times 0.0204 = 8.49 \times 10^{-6}$ โมลต่อลิตร

จะเห็นได้ว่า K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลองมีค่ามากกว่า K_{sp} ของผลึก MAP ตามทฤษฎี ดังนั้นในน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรจะสามารถเกิดการตกผลึก MAP ได้

2.ที่อัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+\text{-N} : \text{PO}_4^{3-}\text{-P} = 1.1:1:1$

จะมีอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+\text{-N} : \text{PO}_4^{3-}\text{-P} = 0.0224 : 0.0204 : 0.0204$

เติม $[\text{Mg}^{2+}] = 0.0224 \text{ M}$ $[\text{NH}_4^+\text{-N}] = 0.0204 \text{ M}$ $[\text{PO}_4^{3-}\text{-P}] = 0.0204 \text{ M}$

จะได้ K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลอง = $0.0224 \times 0.0204 \times 0.0204 = 9.32 \times 10^{-6}$ โมลต่อลิตร

จะเห็นได้ว่า K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลองมีค่ามากกว่า K_{sp} ของผลึก MAP ตามทฤษฎี ดังนั้นในน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรจะสามารถเกิดการตกผลึก MAP ได้

3.ที่อัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+\text{-N} : \text{PO}_4^{3-}\text{-P} = 1.2:1:1$

จะมีอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+\text{-N} : \text{PO}_4^{3-}\text{-P} = 0.0245 : 0.0204 : 0.0204$

เติม $[\text{Mg}^{2+}] = 0.0245 \text{ M}$ $[\text{NH}_4^+\text{-N}] = 0.0204 \text{ M}$ $[\text{PO}_4^{3-}\text{-P}] = 0.0204 \text{ M}$

จะได้ K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลอง = $0.0245 \times 0.0204 \times 0.0204 = 1.02 \times 10^{-5}$ โมลต่อลิตร

จะเห็นได้ว่า K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลองมีค่ามากกว่า K_{sp} ของผลึก MAP ตามทฤษฎี ดังนั้นในน้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกรจะสามารถเกิดการตกผลึก MAP ได้

การคำนวณปริมาณผลึก MAP จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร

1.ที่อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.8:1:1$

จะมีอัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0146 : 0.0182 : 0.0182$

เติม $[Mg^{2+}] = 0.0146 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0182 \text{ M}$

จะได้ K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลอง = $0.0146 \times 0.0182 \times 0.0182 = 4.84 \times 10^{-6}$ โมลต่อลิตร

จะเห็นได้ว่า K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลองมีค่ามากกว่า K_{sp} ของผลึก MAP ตามทฤษฎี ดังนั้นในน้ำทิ้งส้วกเคราะห์ฟาร์มสุกรจะสามารถเกิดการตกผลึก MAP ได้

2.ที่อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.9:1:1$

จะมีอัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0164 : 0.0182 : 0.0182$

เติม $[Mg^{2+}] = 0.0164 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0182 \text{ M}$

จะได้ K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลอง = $0.0164 \times 0.0182 \times 0.0182 = 5.43 \times 10^{-6}$ โมลต่อลิตร

จะเห็นได้ว่า K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลองมีค่ามากกว่า K_{sp} ของผลึก MAP ตามทฤษฎี ดังนั้นในน้ำทิ้งส้วกเคราะห์ฟาร์มสุกรจะสามารถเกิดการตกผลึก MAP ได้

3.ที่อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1:1:1$

จะมีอัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0182 : 0.0182 : 0.0182$

เติม $[Mg^{2+}] = 0.0182 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0182 \text{ M}$

จะได้ K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลอง = $0.0182 \times 0.0182 \times 0.0182 = 6.03 \times 10^{-6}$ โมลต่อลิตร

จะเห็นได้ว่า K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลองมีค่ามากกว่า K_{sp} ของผลึก MAP ตามทฤษฎี ดังนั้นในน้ำทิ้งส้วกเคราะห์ฟาร์มสุกรจะสามารถเกิดการตกผลึก MAP ได้

4.ที่อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1.1:1:1$

จะมีอัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0200 : 0.0182 : 0.0182$

เติม $[Mg^{2+}] = 0.0200 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0182 \text{ M}$

จะได้ K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลอง = $0.0200 \times 0.0182 \times 0.0182 = 6.62 \times 10^{-6}$ โมลต่อลิตร

จะเห็นได้ว่า K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลองมีค่ามากกว่า K_{sp} ของผลึก MAP ตามทฤษฎี ดังนั้นในน้ำทิ้งส้วกเคราะห์ฟาร์มสุกรจะสามารถเกิดการตกผลึก MAP ได้

5.ที่อัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1.2:1:1$

จะมีอัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0218 : 0.0182 : 0.0182$

เติม $[Mg^{2+}] = 0.0218 \text{ M}$ $[NH_4^+ -N] = 0.0182 \text{ M}$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0182 \text{ M}$

จะได้ K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลอง = $0.0218 \times 0.0182 \times 0.0182 = 7.22 \times 10^{-6}$ โมลต่อลิตร

จะเห็นได้ว่า K_{sp} ของผลึก MAP จากการทดลองมีค่ามากกว่า K_{sp} ของผลึก MAP ตามทฤษฎี ดังนั้นในน้ำทิ้งส้วกเคราะห์ฟาร์มสุกรจะสามารถเกิดการตกผลึก MAP ได้



ภาคผนวก ง

การคำนวณการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีน
น้ำเสียสังเคราะห์ยูรีน

ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด	เท่ากับ 0.0032 M
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	เท่ากับ 0.0187 M
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	เท่ากับ 0.0309 M
ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด	เท่ากับ 0.0044 M
ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด	เท่ากับ 0.0524 M
ปริมาณโซเดียมทั้งหมด	เท่ากับ 0.1111 M
ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด	เท่ากับ 0.1341 M
ปริมาณซัลเฟตทั้งหมด	เท่ากับ 0.0162 M
ปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมด	เท่ากับ 0.0620 M
ปริมาณไนเตรตทั้งหมด	เท่ากับ 0.0122 M

อัตราส่วน	$Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0032 : 0.0187 : 0.0309 M$
ต้องการ	$Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1:1:1$
	$Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1.5:1:1$
	$Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 2:1:1$

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

ดังนั้นจะมี $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0309 : 0.0309 : 0.0309$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนมี

$$Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0032 : 0.0187 : 0.0309$$

จาก $[Mg^{2+}] = 0.0309 M$ $[NH_4^+ -N] = 0.0309 M$ $[PO_4^{3-} -P] = 0.0309 M$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} และ $NH_4^+ -N$

$$- Mg^{2+} \text{ ที่เติม} = 0.0309 - 0.0032 = 0.0277 M$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} เท่ากับ 0.0277 M

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ความเข้มข้น 0.0277 M

จาก	$\frac{g}{MW}$	=	$\frac{CV}{1000}$
	$\frac{g}{95.31 \text{ g/mol}}$	=	$\frac{(0.0277 M) \times (1,000 \text{ mL})}{1000}$
	$g_{(MgCl_2)}$	=	2.64 g

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 2.64 กรัม

$$\begin{aligned} \text{แต่ } \text{MgCl}_2 & \quad 95.31 \text{ g} \quad \text{ได้จาก } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} & \quad 203.31 \text{ g} \\ \text{ถ้าต้องการ } \text{MgCl}_2 & \quad 2.64 \text{ g} \quad \text{ต้องชั่ง } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = & \quad \frac{(203.31 \text{ g}) \times (2.64 \text{ g})}{95.31 \text{ g}} \\ & & = & \quad 5.63 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เท่ากับ 5.63 กรัม

2. ต้องการอัตราส่วน $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 1.5:1:1$

$$\text{ดังนั้นจะมี } \text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0464 : 0.0309 : 0.0309$$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนมี

$$\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 0.0032 : 0.0187 : 0.0309$$

$$\text{จาก } [\text{Mg}^{2+}] = 0.0464 \text{ M} \quad [\text{NH}_4^+ - \text{N}] = 0.0309 \text{ M} \quad [\text{PO}_4^{3-} - \text{P}] = 0.0309 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} และ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

$$- \text{Mg}^{2+} \text{ ที่เติม} = 0.0464 - 0.0032 = 0.0432 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} เท่ากับ 0.0432 M

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) ความเข้มข้น 0.0432 M

$$\begin{aligned} \text{จาก} & \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} = \frac{\text{CV}}{1000} \\ & \quad \frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} = \frac{(0.0432 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ & \quad \text{g}_{(\text{MgCl}_2)} = 4.12 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 4.12 กรัม

$$\begin{aligned} \text{แต่ } \text{MgCl}_2 & \quad 95.31 \text{ g} \quad \text{ได้จาก } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} & \quad 203.31 \text{ g} \\ \text{ถ้าต้องการ } \text{MgCl}_2 & \quad 4.12 \text{ g} \quad \text{ต้องชั่ง } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = & \quad \frac{(203.31 \text{ g}) \times (4.12 \text{ g})}{95.31 \text{ g}} \\ & & = & \quad 8.79 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เท่ากับ 8.79 กรัม

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

$$\text{ดังนั้นจะมี } Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0618 : 0.0309 : 0.0309$$

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนมี

$$Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 0.0032 : 0.0187 : 0.0309$$

$$\text{จาก } [Mg^{2+}] = 0.0618 \text{ M} \quad [NH_4^+ -N] = 0.0309 \text{ M} \quad [PO_4^{3-} -P] = 0.0309 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม Mg^{2+} และ $NH_4^+ -N$

$$- Mg^{2+} \text{ ที่เติม} = 0.0618 - 0.0032 = 0.0586 \text{ M}$$

$$\text{ดังนั้น ต้องเติม } Mg^{2+} \text{ เท่ากับ } 0.0586 \text{ M}$$

ต้องการเตรียมสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ความเข้มข้น 0.0586 M

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \frac{\text{g}}{\text{MW}} &= \frac{\text{CV}}{1000} \\ \frac{\text{g}}{95.31 \text{ g/mol}} &= \frac{(0.0586 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ S_{(MgCl_2)} &= 5.59 \text{ g} \end{aligned}$$

ต้องใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ทั้งหมด เท่ากับ 5.59 กรัม

$$\text{แต่ } MgCl_2 \quad 95.31 \text{ g} \quad \text{ได้จาก } MgCl_2 \cdot 6H_2O \quad 203.31 \text{ g}$$

$$\text{ถ้าต้องการ } MgCl_2 \quad 5.59 \text{ g} \quad \text{ต้องชั่ง } MgCl_2 \cdot 6H_2O = \frac{(203.31 \text{ g}) \times (5.59 \text{ g})}{95.31 \text{ g}}$$

$$= 12 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) เท่ากับ 12 กรัม

$$4. \text{NH}_4^+ \text{-N ที่เติมคงที่ในทุกๆอัตราส่วนความเข้มข้น} = 0.0309 - 0.0187 \\ = 0.0122 \text{ M}$$

ดังนั้น ต้องเติม $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ เท่ากับ 0.0122 M

- การเตรียม $[\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0122 \text{ M}$ เตรียมในรูป NH_4NO_3

น้ำหนักโมเลกุล (MW) ของ $\text{NH}_4\text{NO}_3 = 80 \text{ g/mol}$

ต้องการเตรียมสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) ความเข้มข้น 0.0122 M

$$\begin{array}{rcl} \text{จาก} & \frac{\text{g}}{\text{MW}} & = & \frac{\text{CV}}{1000} \\ & \frac{\text{g}}{80 \text{ g/mol}} & = & \frac{(0.0122 \text{ M}) \times (1,000 \text{ mL})}{1000} \\ & \text{g}(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4) & = & 0.97 \text{ g} \end{array}$$

ต้องใช้ NH_4NO_3 ทั้งหมด เท่ากับ 0.97 กรัม

ข้อมูลขาเข้าในการทำนายปริมาณผลึก MAP จากน้ำเสียสังเคราะห์ยูรีนด้วยแบบจำลอง Visual MINTEQ version 3.0

1. เมื่อ $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ \text{-N} : \text{PO}_4^{3-} \text{-P} = 1:1:1$

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0.0309 \text{ M}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.1895 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+ \text{-N}] = 0.0309 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} \text{-P}] = 0.0309 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0620 \text{ M}$$

$$[\text{K}^+] = 0.0524 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0044 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.1111 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0162 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_3^- \text{-N}] = 0.0122 \text{ M}$$

2. เมื่อ $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 1.5:1:1$

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0.0464 \text{ M}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.2205 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+ - \text{N}] = 0.0309 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} - \text{P}] = 0.0309 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0620 \text{ M}$$

$$[\text{K}^+] = 0.0524 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0044 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.1111 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0162 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_3^- - \text{N}] = 0.0122 \text{ M}$$

3. เมื่อ $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 2:1:1$

$$[\text{Mg}^{2+}] = 0.0618 \text{ M}$$

$$[\text{Cl}^-] = 0.2513 \text{ M}$$

$$[\text{NH}_4^+ - \text{N}] = 0.0309 \text{ M}$$

$$[\text{PO}_4^{3-} - \text{P}] = 0.0309 \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] = 0.0620 \text{ M}$$

$$[\text{K}^+] = 0.0524 \text{ M}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = 0.0044 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+] = 0.1111 \text{ M}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0.0162 \text{ M}$$

$$[\text{NO}_3^- - \text{N}] = 0.0122 \text{ M}$$

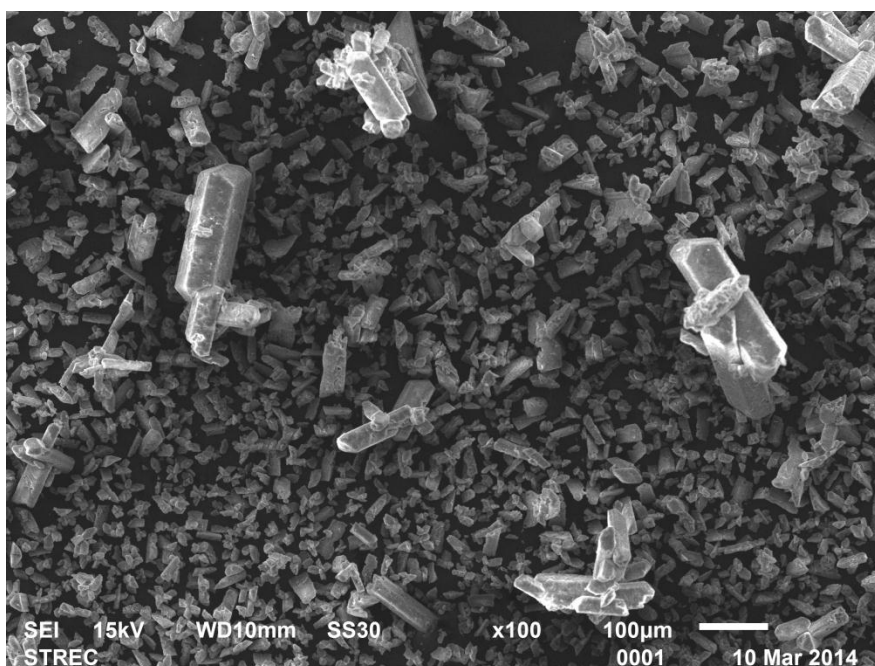
ภาคผนวก จ

องค์ประกอบของผลึกจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Eletron Microscope (SEM)

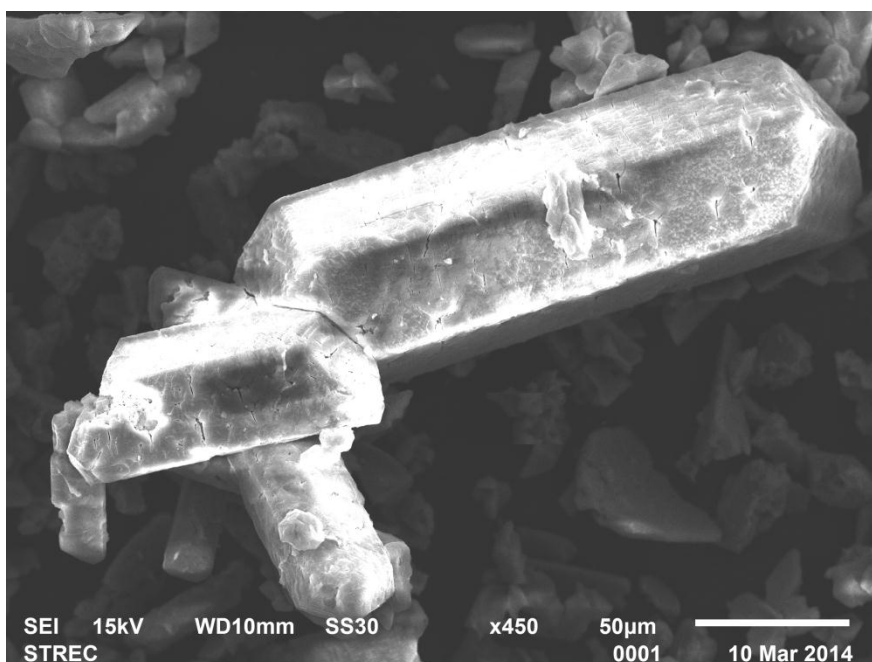
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

องค์ประกอบของผลึกจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Eletron Microscope (SEM)

ผลึกจากน้ำทิ้งล้างเคราะห์ฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1:1:1$
พีเอชที่สถานะสมดุลเท่ากับ 9



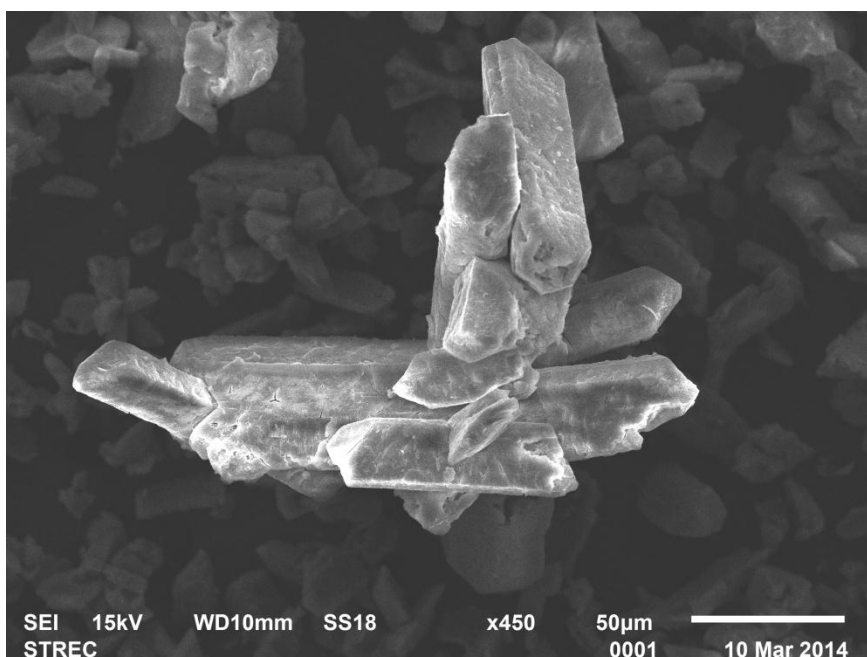
รูป ก ภาพถ่ายลักษณะบริเวณทั่วไปของผลึกจากการทดลอง



รูป ข ภาพถ่ายผลึก MAP จากการทดลอง

ชนิดธาตุและปริมาณองค์ประกอบของธาตุจากผลึก MAP รูป ข

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
ออกซิเจน	49
แมกนีเซียม	21
ฟอสฟอรัส	30

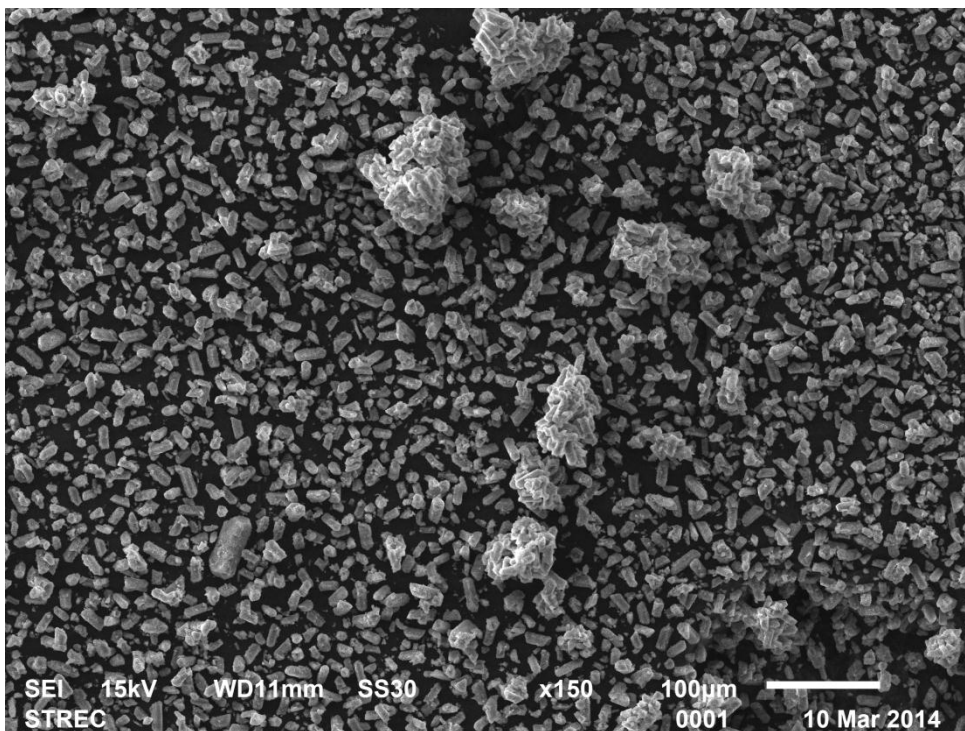


รูป ค ภาพถ่ายผลึก MAP จากการทดลอง

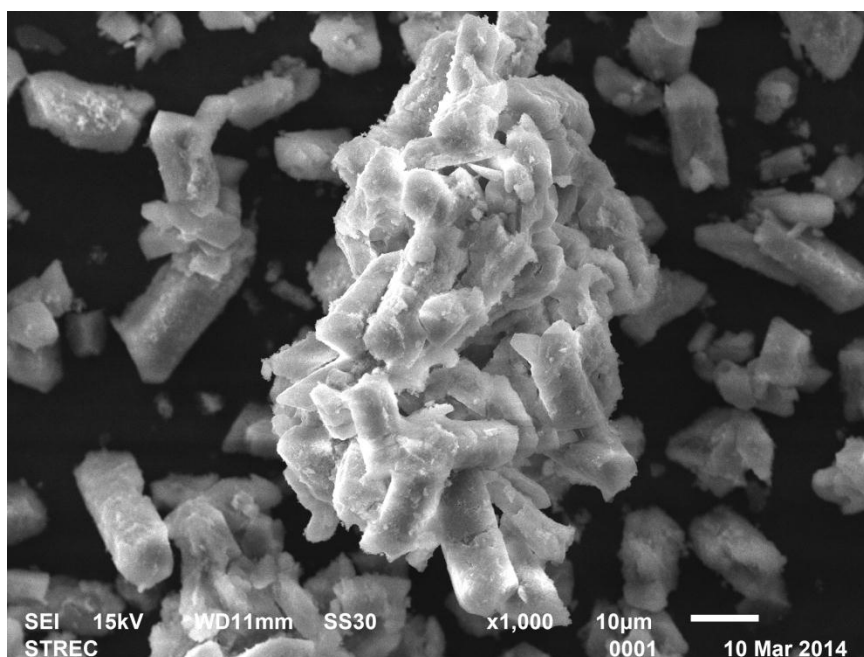
ชนิดธาตุและปริมาณองค์ประกอบของธาตุจากผลึก MAP รูป ค

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
ออกซิเจน	47
แมกนีเซียม	20
ฟอสฟอรัส	33

ผลึกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1:1:1$
เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9



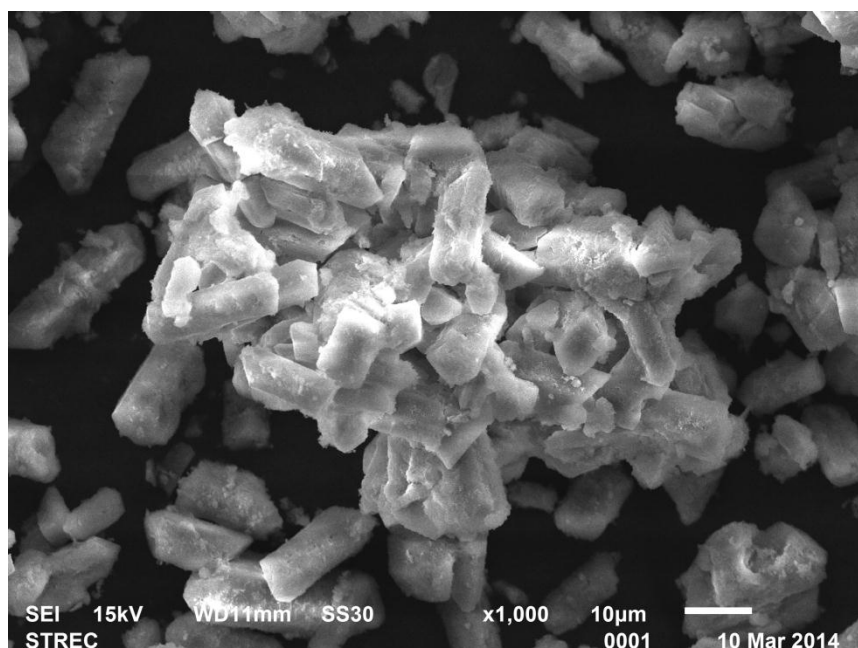
รูป ก ภาพถ่ายลักษณะบริเวณทั่วไปของผลึกจากการทดลอง



รูป ข ภาพถ่ายผลึก MAP จากการทดลอง

ชนิดธาตุและปริมาณองค์ประกอบของธาตุจากผลึก MAP รูป ข

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
ออกซิเจน	51
แมกนีเซียม	14
ฟอสฟอรัส	26
โพแทสเซียม	1
แคลเซียม	8

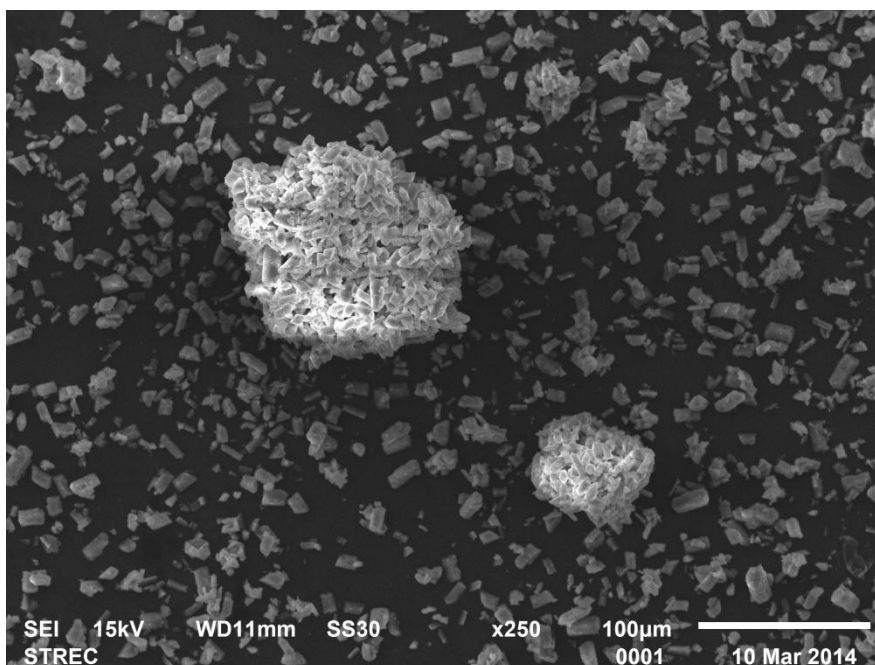


รูป ค ภาพถ่ายผลึก MAP จากการทดลอง

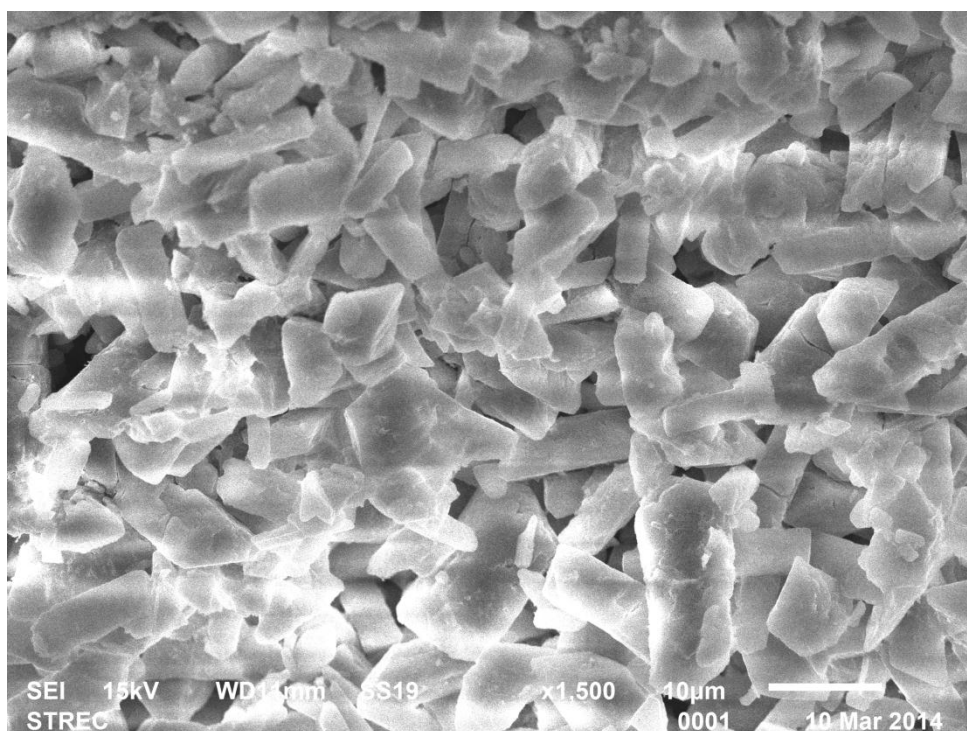
ชนิดธาตุและปริมาณองค์ประกอบของธาตุจากผลึก MAP รูป ค

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
ออกซิเจน	51
แมกนีเซียม	15
ฟอสฟอรัส	27
โพแทสเซียม	1
แคลเซียม	6

ผลึกจากน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1.1:1:1$
เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 8



รูป ก ภาพถ่ายลักษณะบริเวณทั่วไปของผลึกจากการทดลอง

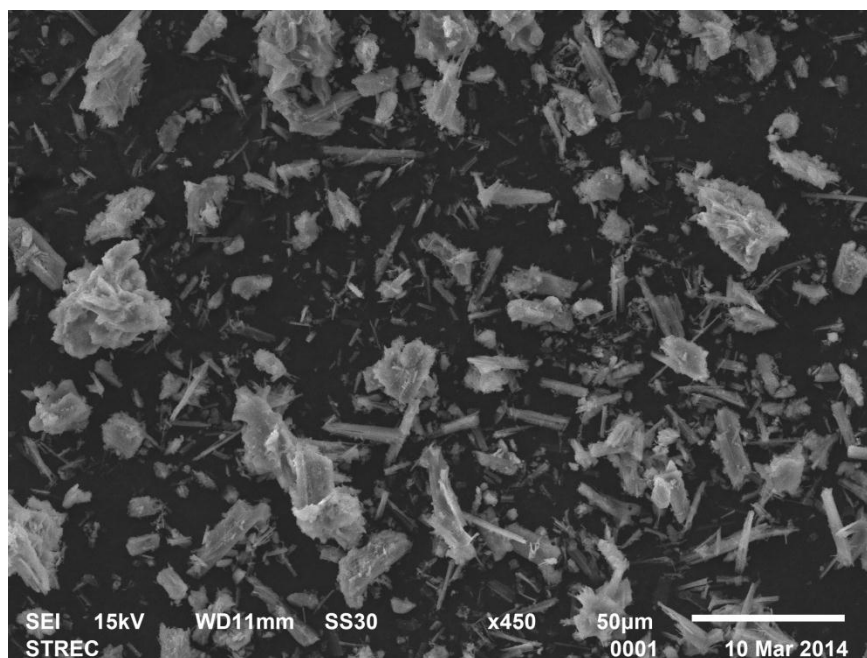


รูป ข ภาพถ่ายผลึก MAP จากการทดลอง

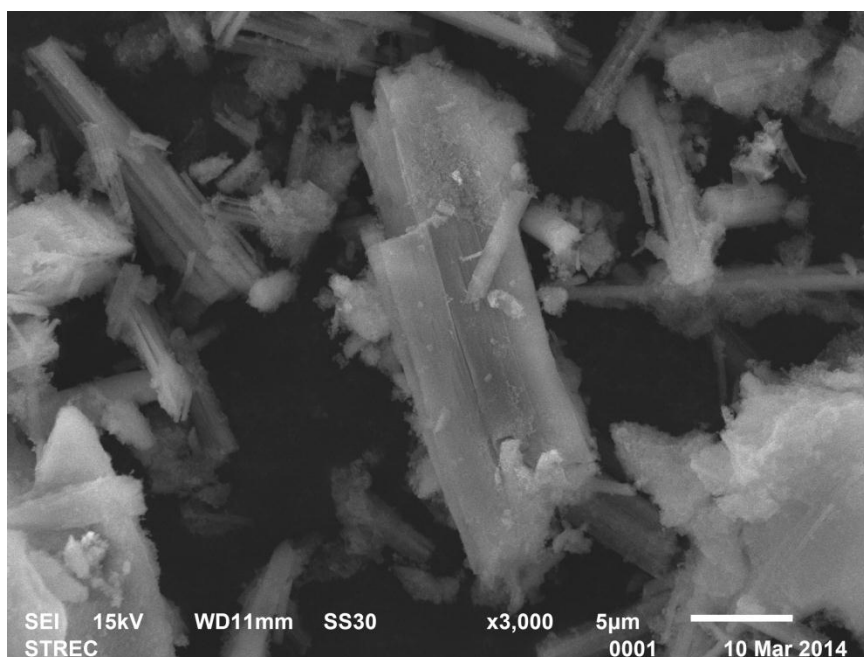
ชนิดธาตุและปริมาณองค์ประกอบของธาตุจากผลึก MAP รูป ข

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
ออกซิเจน	51
แมกนีเซียม	17
ฟอสฟอรัส	29
โพแทสเซียม	1
แคลเซียม	2

ผลึกน้ำทิ้งฟาร์มสุกรเมื่ออัตราส่วน $Mg^{2+} : NH_4^+ -N : PO_4^{3-} -P = 1.2:1:1$
เมื่อพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 9



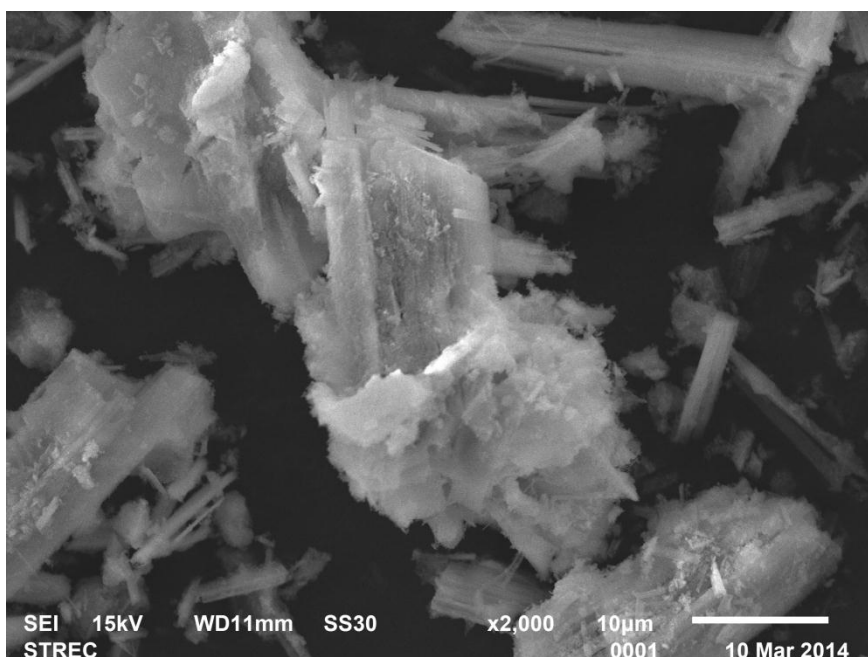
รูป ก ภาพถ่ายลักษณะบริเวณทั่วไปของผลึกจากการทดลอง



รูป ข ภาพถ่ายผลึก MAP จากการทดลอง

ชนิดธาตุและปริมาณองค์ประกอบของธาตุจากผลึก MAP รูป ข

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
ออกซิเจน	52
แมกนีเซียม	22
ฟอสฟอรัส	24
โพแทสเซียม	1
แคลเซียม	1



รูป ค ภาพถ่ายผลึก MAP จากการทดลอง

ชนิดธาตุและปริมาณองค์ประกอบของธาตุจากผลึก MAP รูป ค

ธาตุ	น้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)
ออกซิเจน	54
แมกนีเซียม	19
ฟอสฟอรัส	26
โพแทสเซียม	0.7
แคลเซียม	0.3



ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองการตกผลึกทางเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

น้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

ผลการทดลองการตกผลึกทางเคมี

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1

pH ก่อนตกผลึก	pH หลังตกผลึก	นน. กระจดาษกรอง(g)	นน.กระจดาษกรอง+ผลึก(g)	นน.ผลึก(g)	pH เฉลี่ย	นน. ผลึกเฉลี่ย(g)
7	5.82	0.822	0.845	0.023	5.82	0.0221
7	5.82	0.8342	0.8554	0.0212		
7.5	6.26	0.8351	0.9022	0.0671	6.28	0.0466
7.5	6.3	0.8564	0.8825	0.0261		
8	6.37	0.8189	2.0079	1.189	6.415	1.25915
8	6.46	0.8093	2.1386	1.3293		
8.5	6.66	0.8224	2.3437	1.5213	6.665	1.53655
8.5	6.67	0.8128	2.3646	1.5518		
9	6.83	0.8097	3.0928	2.2831	6.895	2.08055
9	6.96	0.8374	2.7154	1.878		
9.5	7.12	0.8212	4.9922	4.171	7.175	3.4506
9.5	7.23	0.8294	3.5596	2.7302		
10	8.29	0.8189	5.4452	4.6263	8.2	4.59705
10	8.11	0.8222	5.39	4.5678		

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1

pH ก่อน ตกผลึก	pH หลัง ตกผลึก	นน. กระดาษ กรอง(g)	นน.กระดาษ กรอง+ผลึก(g)	นน.ผลึก (g)	pH เฉลี่ย	นน. ผลึก เฉลี่ย(g)
7	5.89	0.8517	0.8611	0.0094	5.97	0.0162
7	6.05	0.83	0.853	0.023		
7.5	6.31	0.8115	0.8295	0.018	6.305	0.0226
7.5	6.3	0.8275	0.8547	0.0272		
8	6.69	0.8118	0.8851	0.0733	6.715	0.0704
8	6.74	0.8327	0.9002	0.0675		
8.5	6.8	0.8307	4.434	3.6033	6.9	3.5593
8.5	7	0.8099	4.3252	3.5153		
9	7.1	0.8181	4.2	3.3819	7.09	3.545
9	7.08	0.8262	4.5343	3.7081		
9.5	8	0.819	4.349	3.53	8.125	3.6892
9.5	8.25	0.8324	4.6808	3.8484		
10	8.76	0.821	5.8778	5.0568	8.81	5.15045
10	8.86	0.8199	6.064	5.2441		



อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1

pH ก่อน ตกผลึก	pH หลัง ตกผลึก	นน. กระจดาษ กรอง(g)	นน.กระจดาษ กรอง+ผลึก(g)	นน.ผลึก (g)	pH เฉลี่ย	นน. ผลึก เฉลี่ย(g)
7	5.98	0.82	0.8383	0.0183	6.05	0.01895
7	6.12	0.8373	0.8569	0.0196		
7.5	6.23	0.8065	0.8292	0.0227	6.35	0.0232
7.5	6.47	0.82	0.8437	0.0237		
8	6.97	0.8105	0.879	0.0685	6.98	0.0529
8	6.99	0.82	0.8573	0.0373		
8.5	7.1	0.8316	4.2314	3.3998	7.095	3.5537
8.5	7.09	0.8389	4.5465	3.7076		
9	8.12	0.8275	4.8205	3.993	8.23	3.83445
9	8.34	0.8254	4.5013	3.6759		
9.5	8.56	0.8382	5.5645	4.7263	8.525	4.65245
9.5	8.49	0.8333	5.4119	4.5786		
10	8.89	0.8123	6.404	5.5917	8.84	5.5337
10	8.79	0.8223	6.298	5.4757		

น้ำทิ้งฟาร์มสุกร

ผลการทดลองการตกผลึกทางเคมี

อัตราส่วนและ pH ก่อนตกผลึก	pH หลังตก ผลึก	pH เฉลี่ย	นน. กระตาศ กรอง(g)	นน.กระตาศ กรอง+ผลึก (g)	นน.ผลึก (g)	นน. ผลึก เฉลี่ย(g)
0.8pH7,1	6.83	6.83	0.82	1.6546	0.8346	0.94945
0.8pH7,2	6.82		0.8373	1.9016	1.0643	
0.8pH8,1	7.06	7.06	0.8065	2.6665	1.86	2.065
0.8pH8,2	7.06		0.82	3.09	2.27	
0.8pH9,1	8.84	7.95	0.8105	3.1705	2.36	3.08
0.8pH9,2	7.07		0.82	4.62	3.8	
0.8pH10,1	8.75	9.05	0.8316	4.9316	4.1	4.05
0.8pH10,2	9.35		0.8389	4.8389	4	
0.9pH7,1	6.89	6.72	0.8275	2.4932	1.6657	1.48075
0.9pH7,2	6.54		0.8254	2.1212	1.2958	
0.9pH8,1	7.12	7.17	0.8382	4.3382	3.5	3.25
0.9pH8,2	7.21		0.8333	3.8333	3	
0.9pH9,1	7.75	7.87	0.8123	4.9523	4.14	3.87
0.9pH9,2	7.98		0.8223	4.4223	3.6	
0.9pH10,1	8.85	8.99	0.8417	4.8417	4	4.17
0.9pH10,2	9.12		0.83	5.17	4.34	
1pH7,1	6.47	6.41	0.8115	2.6615	1.85	1.86035
1pH7,2	6.35		0.8275	2.6982	1.8707	
1pH8,1	7.34	7.3	0.8118	4.8118	4	3.85
1pH8,2	7.25		0.8327	4.5327	3.7	
1pH9,1	7.52	7.84	0.8307	4.9307	4.1	4.34
1pH9,2	8.15		0.8099	5.3899	4.58	
1pH10,1	8.73	8.97	0.8181	5.7381	4.92	5.25
1pH10,2	9.21		0.8262	6.4062	5.58	

อัตราส่วนและ pH ก่อนตกผลึก	pHหลังตก ผลึก	pH เฉลี่ย	นน. กระดาศ กรอง(g)	นน.กระดาศ กรอง+ผลึก (g)	นน.ผลึก (g)	นน. ผลึก เฉลี่ย(g)
1.1pH7,1	6.34	6.27	0.819	2.9072	2.0882	2.12
1.1pH7,2	6.19		0.8324	2.9785	2.1461	
1.1pH8,1	7.26	7.22	0.821	5.181	4.36	4.38
1.1pH8,2	7.18		0.8199	5.2199	4.4	
1.1pH9,1	7.98	8.03	0.822	6.622	5.8	5.27
1.1pH9,2	8.07		0.8342	5.5742	4.74	
1.1pH10,1	9.32	9.11	0.8351	6.2351	5.4	5.35
1.1pH10,2	8.9		0.8564	6.1564	5.3	
1.2pH7,1	6.25	6.51	0.8189	3.95	3.1311	2.69
1.2pH7,2	6.76		0.8093	3.0568	2.2475	
1.2pH8,1	6.98	7.23	0.8224	7.0824	6.26	6.32
1.2pH8,2	7.48		0.8128	7.1928	6.38	
1.2pH9,1	8.13	8.36	0.8097	7.6497	6.84	6.43
1.2pH9,2	8.58		0.8374	6.8547	6.0173	
1.2pH10,1	8.93	9.1	0.8212	8.3012	7.48	6.91
1.2pH10,2	9.27		0.8294	7.1694	6.34	



ผลการวิเคราะห์การหาซีไอทีละลายน้ำ

อัตราส่วนและpH ก่อนตกผลึก	vol. of FAS	N of FAS	ml of sample		COD	COD เฉลี่ย
0.8pH8,1	3.1	0.05	2.5	8000	112	112
0.8pH8,2	3.1	0.05	2.5	8000	112	
0.8pH9,1	3	0.05	2.5	8000	128	128
0.8pH9,2	3	0.05	2.5	8000	128	
0.8pH10,1	3.2	0.05	2.5	8000	96	88
0.8pH10,2	3.3	0.05	2.5	8000	80	
0.9pH8,1	3	0.05	2.5	8000	128	128
0.9pH8,2	3	0.05	2.5	8000	128	
0.9pH9,1	3.1	0.05	2.5	8000	112	120
0.9pH9,2	3	0.05	2.5	8000	128	
0.9pH10,1	3.2	0.05	2.5	8000	96	80
0.9pH10,2	3.4	0.05	2.5	8000	64	
1pH8,1	3.1	0.05	2.5	8000	112	104
1pH8,2	3.2	0.05	2.5	8000	96	
1pH9,1	3.2	0.05	2.5	8000	96	80
1pH9,2	3.4	0.05	2.5	8000	64	
1pH10,1	3.3	0.05	2.5	8000	80	64
1pH10,2	3.5	0.05	2.5	8000	48	
1.1pH8,1	3.2	0.05	2.5	8000	96	88
1.1pH8,2	3.3	0.05	2.5	8000	80	
1.1pH9,1	3.4	0.05	2.5	8000	64	72
1.1pH9,2	3.3	0.05	2.5	8000	80	
1.1pH10,1	3.3	0.05	2.5	8000	80	72
1.1pH10,2	3.4	0.05	2.5	8000	64	
1.2pH8,1	3.3	0.05	2.5	8000	80	88
1.2pH8,2	3.2	0.05	2.5	8000	96	
1.2pH9,1	3.6	0.05	2.5	8000	32	48
1.2pH9,2	3.4	0.05	2.5	8000	64	
1.2pH10,1	3.5	0.05	2.5	8000	48	48
1.2pH10,2	3.5	0.05	2.5	8000	48	
blank	3.8					

ผลการวิเคราะห์โลหะหนัก (ความเข้มข้น มก./ล)

อัตราส่วนและpH หลังตกผลึก	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺
0.8,8	11.971	4.265	132.65
0.8,9	7.768	2.164	128.15
0.8,10	1.391	0.118	103.37
0.9,8	6.666	1.377	159.233
0.9,9	5.341	2.161	86.762
0.9,10	5.141	1.27	50.785
1,8	3.824	1.825	89.78
1,9	3.525	1.619	75.201
1,10	0	1.217	61.67
1.1,8	2.716	1.543	87.519
1.1,9	2.659	1.537	69.644
1.1,10	1.891	0.995	50.381
1.2,8	3.08	1.93	82.138
1.2,9	0.08	0.75	63.216
1.2,10	0	0.44	30.968



ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น

อัตราส่วนและpH หลังตกผลึก	ก่อนตก ผลึก (มก./ล)	หลังตก ผลึก (มก./ล)	ปริมาณที่ ลดลง (มก./ล)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)
0.8,8	254.5	170	84.5	33.20236
0.8,9	254.5	95	159.5	62.67191
0.8,10	254.5	53	201.5	79.17485
0.9,8	254.5	140	114.5	44.99018
0.9,9	254.5	67	187.5	73.67387
0.9,10	254.5	42	212.5	83.49705
1,8	254.5	110	144.5	56.778
1,9	254.5	48	206.5	81.13949
1,10	254.5	31	223.5	87.81925
1.1,8	254.5	81	173.5	68.17289
1.1,9	254.5	81	173.5	68.17289
1.1,10	254.5	49	205.5	80.74656
1.2,8	254.5	62	192.5	75.63851
1.2,9	254.5	39	215.5	84.67583
1.2,10	254.5	25	229.5	90.17682

ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด

อัตราส่วนและ pH หลัง ตกผลึก	0.8(8,1)	0.8(8,2)	0.8(9,1)	0.8(9,2)	0.8(10,1)	0.8(10,2)
Absorbance	0.834659875	0.71156	0.68715	0.6569	0.64205	0.63621
Mg P	23.84742499	20.3302	19.6328	18.7687	18.3442	18.1774
Mg P/L Dilute 10 เท่า	238.4742499	203.302	196.328	187.687	183.442	181.774
Final Mg P/L		220.888		192.007		182.608
avg P	22		20		18	
%removal		60.8493		65.9682		67.6342

อัตราส่วนและ pH หลังตกผลึก	0.9(8,1)	0.9(8,2)	0.9(9,1)	0.9(9,2)	0.9(10,1)	0.9(10,2)
Absorbance	0.60384	0.63674	0.63143	0.58209	0.53062	0.52796
Mg P	17.2526	18.1926	18.041	16.631	15.1605	15.0847
Mg P/L Dilute 10 เท่า	172.526	181.926	180.41	166.31	151.605	150.847
Final Mg P/L		177.226		173.36		151.226
avg P	17.5		17		15	
%removal		68.5881		68.2607		72.3131

อัตราส่วนและ pH หลัง ตกผลึก	1(8,1)	1(8,2)	1(9,1)	1(9,2)	1(10,1)	1(10,2)
Absorbance	0.371432	0.384166	0.349676	0.353921	0.339064	0.330044
Mg P	10.61233	10.97618	9.990752	10.11204	9.687543	9.429815
Mg P/L Dilute 10 เท่า	106.1233	109.7618	99.90752	101.1204	96.87543	94.29815
Final Mg P/L		107.9426		100.5139		95.58679
avg P	11		10		9.5	
%removal		80.23754		81.59759		82.49967

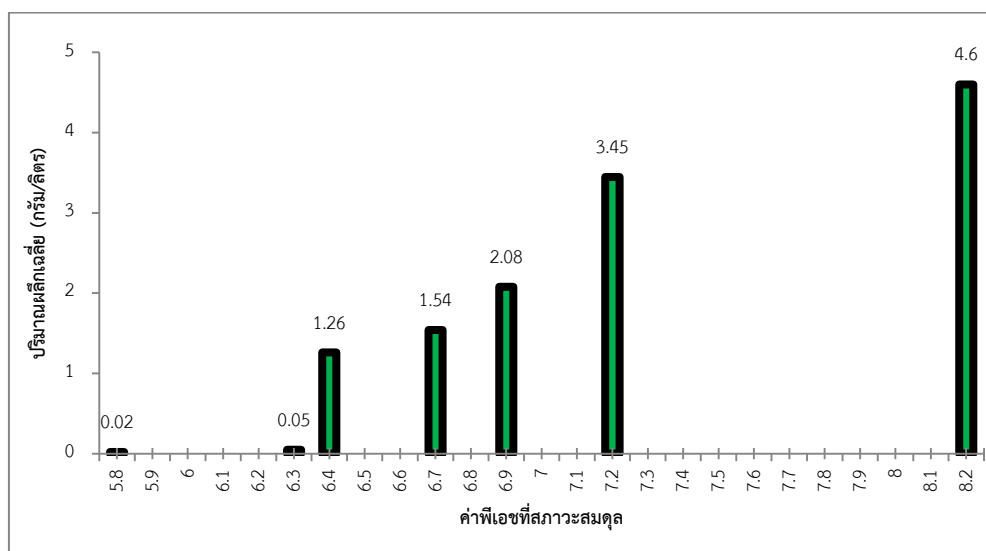
อัตราส่วนและ pH หลังตกผลึก	1.1(8,1)	1.1(8,2)	1.1(9,1)	1.1(9,2)	1.1(10,1)	1.1(10,2)
Absorbance	0.314125	0.317839	0.297145	0.291309	0.274329	0.232941
Mg P	8.975	9.081124	8.489865	8.3231	7.837965	6.655448
Mg P/L Dilute 10 เท่า	89.75	90.81124	84.89865	83.231	78.37965	66.55448
Final Mg P/L		90.28062		84.06483		72.46706
avg P	9		8		7.5	
%removal		83.47114		84.60915		86.7325

อัตราส่วนและ pH หลังตกผลึก	1.2(8,1)	1.2(8,2)	1.2(9,1)	1.2(9,2)	1.2(10,1)	1.2(10,2)
Absorbance	0.210124	0.200042	0.239839	0.286002	0.2929	0.34437
Mg P	6.003548	5.715499	6.852534	8.171495	8.368581	9.839147
Mg P/L Dilute 10 เท่า	60.03548	57.15499	68.52534	81.71495	83.68581	98.39147
Final Mg P/L		58.59523		75.12015		91.03864
avg P	6		6		6	
%removal		89.2722		86.24677		83.33236

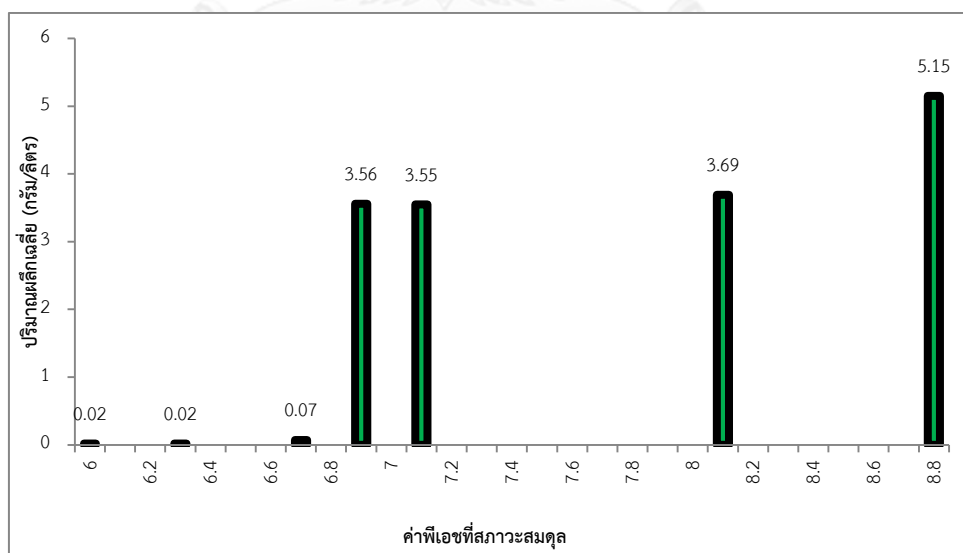
ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลกับปริมาณผลึกจากการทดลอง

น้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

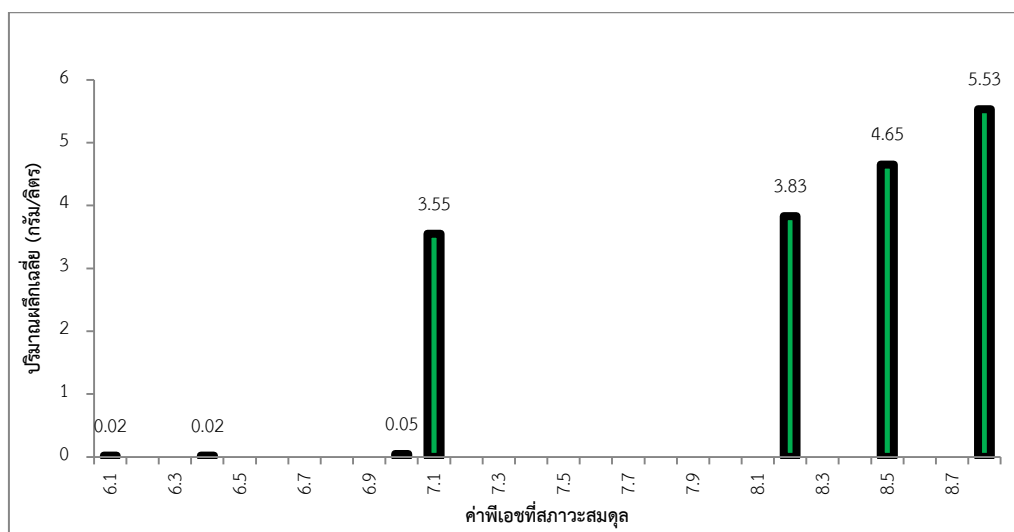
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1



เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1

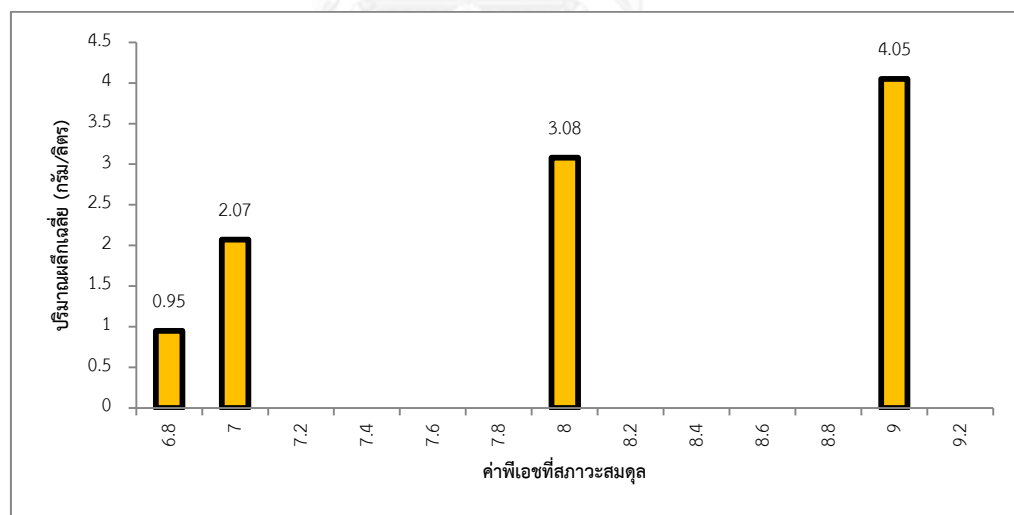


เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1

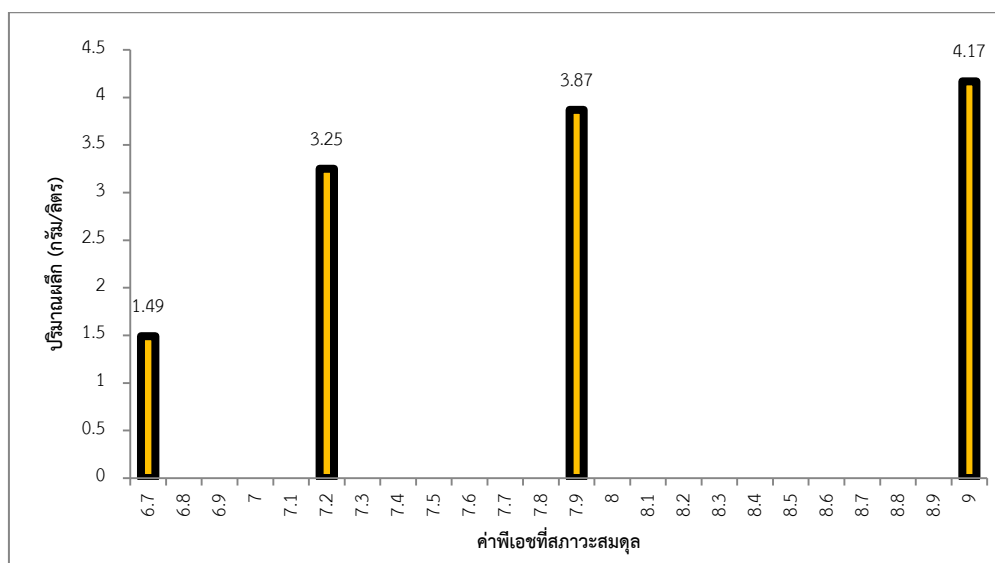


น้ำทิ้งฟาร์มสุกร

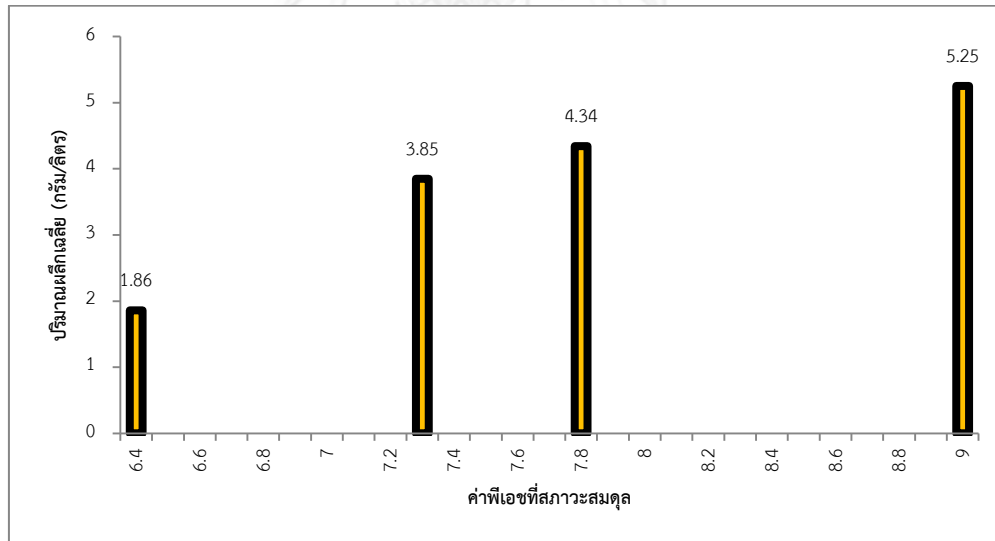
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1



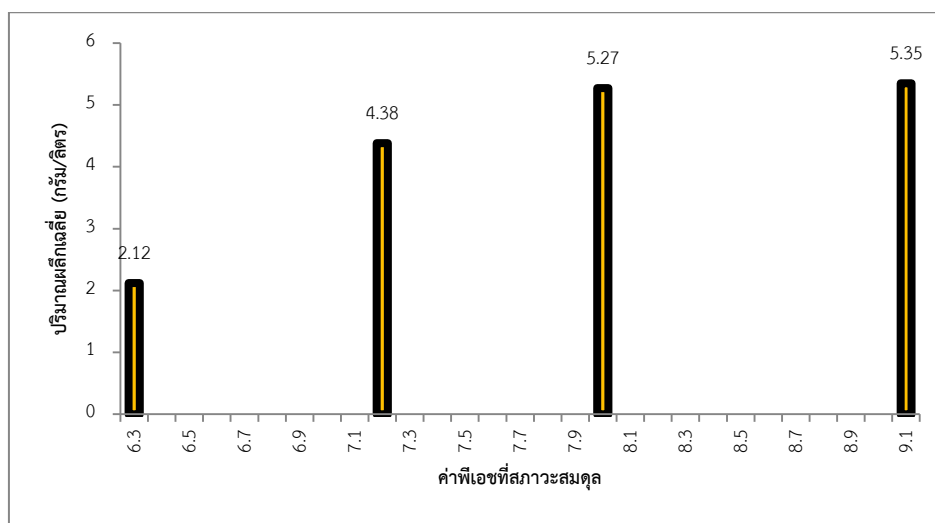
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1



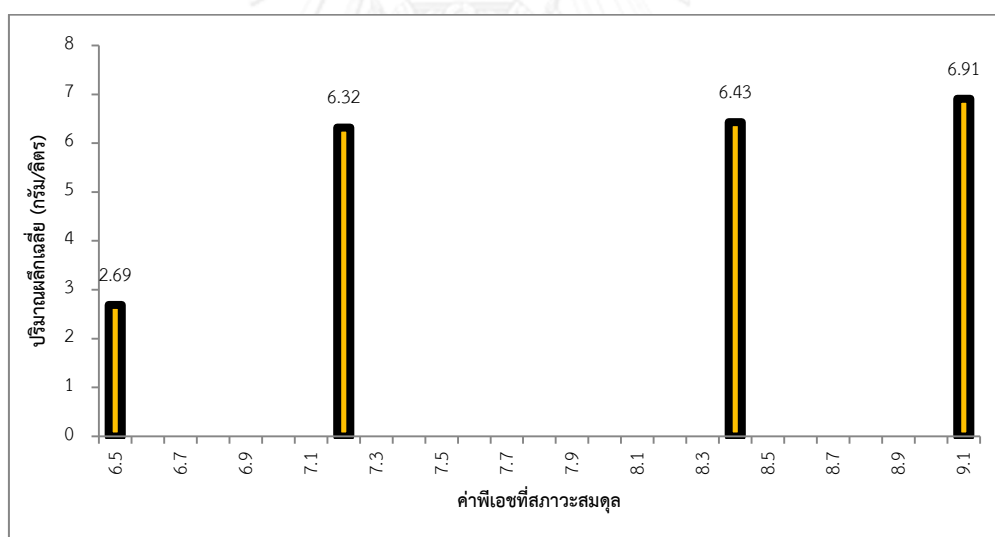
เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1




เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1



เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียม:แอมโมเนียม:ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1





ภาคผนวก ข

ผลการประมวลผลด้วยแบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชนิดและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการประมวลผลเพื่อสอบทานความถูกต้องของ
แบบจำลองธรณีเคมี Visual MINTEQ version 3.0

ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 6

pH 6	
ionic strength	0.0417
sum of cation(eq/kg)	2.17E-02
sum of anion(eq/kg)	4.95E-02
charge difference(%)	39

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	1.5133E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
H+1	1.2E-06	0.000001	-6
H2PO4-	0.040585	0.03374	-1.472
HPO4-2	0.004477	0.002139	-2.67
Mg+2	0.001559	0.000745	-3.128
MgHPO4 (aq)	0.000995	0.001005	-2.998
NH4+1	0.018627	0.015485	-1.81

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
CO3-2	34.97	HCO3-
	64.76	H2CO3* (aq)
NH4+1	99.953	NH4+1
PO4-3	9.72	HPO4-2
	88.109	H2PO4-

Ca+2	52.687	Ca+2
	24.367	CaHPO4 (aq)
	22.866	CaH2PO4+
Mg+2	61.034	Mg+2
	38.965	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.983	-0.723	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1E-16	100	0	0	0	0
CO3-2	1E-16	100	0	0	0	0
H+1	0.086649	100	0	0	0	0
Mg+2	0.002554	17.836	0	0	0.011764	82.164
NH4+1	0.018636	100	0	0	0	0
PO4-3	0.046062	79.656	0	0	0.011764	20.344

ค่าพีเอชที่สถานะสมดุล เท่ากับ 6.5

pH 6.5	
ionic strength	0.0503
sum of cation(eq/kg)	1.99E-02
sum of anion(eq/kg)	5.59E-02
charge difference(%)	47.45

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	4.7184E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
H ₂ PO ₄ ⁻	0.032407	0.026591	-1.575
HPO ₄ ⁻²	0.011758	0.00533	-2.273
Mg ⁺²	0.000659	0.000299	-3.525
MgHPO ₄ (aq)	0.000993	0.001005	-2.998
NH ₄ ⁺¹	0.018608	0.015269	-1.816

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
CO ₃ ⁻²	63.282	HCO ₃ ⁻
	36.505	H ₂ CO ₃ * (aq)
NH ₄ ⁺¹	99.854	NH ₄ ⁺¹
PO ₄ ⁻³	26.037	HPO ₄ ⁻²
	71.761	H ₂ PO ₄ ⁻
Ca ⁺²	41.119	Ca ⁺²
	44.891	CaHPO ₄ (aq)
	13.523	CaH ₂ PO ₄ ⁺
Mg ⁺²	39.885	Mg ⁺²
	60.108	MgHPO ₄ (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	-18.175	0	1	Mg ⁺²	1	H ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³	3	H ₂ O
Struvite	-13.489	-0.229	1	Mg ⁺²	1	NH ₄ ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1E-16	100	0	0	0	0
CO3-2	1E-16	100	0	0	0	0
H+1	0.077542	100	0	0	0	0
Mg+2	0.001652	11.539	0	0	0.012666	88.461
NH4+1	0.018635	100	0	0	0	0
PO4-3	0.045159	78.096	0	0	0.012666	21.904

ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.0637
sum of cation(eq/kg)	1.08E-02
sum of anion(eq/kg)	6.78E-02
charge difference(%)	72.36

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.9981E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
H2PO4-	0.019883	0.016042	-1.795
HPO4-2	0.023993	0.010169	-1.993
Mg+2	0.000369	0.000157	-3.805
MgHPO4 (aq)	0.00099	0.001005	-2.998
NH4+1	0.010144	0.008184	-2.087

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
CO ₃ -2	84.648	HCO ₃ ⁻
	15.137	H ₂ CO ₃ * (aq)
Ca+2	31.3	Ca+2
	60.76	CaHPO ₄ (aq)
PO ₄ -3	53.477	HPO ₄ -2
	44.315	H ₂ PO ₄ ⁻
Mg+2	27.169	Mg+2
	72.803	MgHPO ₄ (aq)
NH ₄ +1	99.549	NH ₄ +1

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1E-16	100	0	0	0	0
CO ₃ -2	1E-16	100	0	0	0	0
H+1	0.064703	100	0	0	0	0
Mg+2	0.00136	9.497	0	0	0.012958	90.503
NH ₄ +1	0.01019	54.68	0	0	0.008445	45.32
PO ₄ -3	0.044867	77.591	0	0	0.012958	22.409

ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7.5

pH 7.5	
ionic strength	0.0771
sum of cation(eq/kg)	5.42E-03
sum of anion(eq/kg)	7.86E-02
charge difference(%)	87

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	1.2450E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
H ₂ PO ₄ ⁻	0.008777	0.006985	-2.156
Mg ⁺²	0.000182	7.31E-05	-4.136
MgHPO ₄ (aq)	0.000634	0.000645	-3.19
NH ₄ ⁺¹	0.005063	0.004029	-2.395

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
PO ₄ ⁻³	78.763	HPO ₄ ⁻²
	19.802	H ₂ PO ₄ ⁻
NH ₄ ⁺¹	98.61	NH ₄ ⁺¹
Mg ⁺²	22.299	Mg ⁺²
	77.605	MgHPO ₄ (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	-18.367	-0.192	1	Mg ⁺²	1	H ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg ⁺²	1	NH ₄ ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
H+1	0.053029	100	0	0	0	0
Mg+2	0.000817	5.706	0	0	0.013501	94.294
NH4+1	0.005134	27.55	0	0	0.013501	72.45
PO4-3	0.044326	76.653	0	0	0.013501	23.347

ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.0848
sum of cation(eq/kg)	4.53E-03
sum of anion(eq/kg)	8.39E-02
charge difference(%)	90

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	3.4095E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
H2PO4-	0.003147	0.002487	-2.604
HPO4-2	0.040415	0.015767	-1.802
MgHPO4 (aq)	0.000231	0.000236	-3.628
NH3 (aq)	0.000195	0.000199	-3.701
NH4+1	0.004415	0.003489	-2.457

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
CO ₃ -2	97.348	HCO ₃ -
Ca+2	21.134	Ca+2
	58.273	CaHPO ₄ (aq)
	20.005	CaPO ₄ -
PO ₄ -3	92.272	HPO ₄ -2
NH ₄ +1	95.768	NH ₄ +1
Mg+2	20.742	Mg+2
	78.947	MgHPO ₄ (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	-18.805	-0.63	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1E-16	100	0	0	0	0
CO ₃ -2	1E-16	100	0	0	0	0
H+1	0.046744	100	0	0	0	0
Mg+2	0.000293	2.045	0	0	0.014025	97.955
NH ₄ +1	0.00461	24.736	0	0	0.014025	75.264
PO ₄ -3	0.0438	75.745	0	0	0.014025	24.255

ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8.5

pH 8.5	
ionic strength	0.0875
sum of cation(eq/kg)	3.92E-03
sum of anion(eq/kg)	8.60E-02
charge difference(%)	91

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	9.4578E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
H ₂ PO ₄ ⁻	0.001039	0.000819	-3.087
HPO ₄ ⁻²	0.042471	0.016415	-1.785
NH ₃ (aq)	0.000541	0.000552	-3.258
NH ₄ ⁺¹	0.003882	0.003061	-2.514

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
CO ₃ ⁻²	96.534	HCO ₃ ⁻
Ca ⁺²	14.396	Ca ⁺²
	40.913	CaHPO ₄ (aq)
	44.548	CaPO ₄ ⁻
PO ₄ ⁻³	97.383	HPO ₄ ⁻²
NH ₄ ⁺¹	87.771	NH ₄ ⁺¹
	12.229	NH ₃ (aq)
Mg ⁺²	20.113	Mg ⁺²
	78.902	MgHPO ₄ (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-19.248	-1.073	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1E-16	100	0	0	0	0
CO ₃ -2	1E-16	100	0	0	0	0
H+1	0.044086	100	0	0	0	0
Mg+2	0.000106	0.737	0	0	0.014213	99.263
NH ₄ +1	0.004422	23.732	0	0	0.014213	76.268
PO ₄ -3	0.043612	75.421	0	0	0.014213	24.579

ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.0882
sum of cation(eq/kg)	3.04E-03
sum of anion(eq/kg)	8.67E-02
charge difference(%)	93

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	2.3315E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
H ₂ PO ₄ ⁻	0.000333	0.000262	-3.581
HPO ₄ ⁻²	0.043122	0.016628	-1.779
NH ₃ (aq)	0.001333	0.00136	-2.866
NH ₄ ⁺¹	0.003028	0.002386	-2.622

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
CO ₃ ⁻²	8.728	CO ₃ ⁻²
	91.102	HCO ₃ ⁻
Ca ⁺²	20.852	CaHPO ₄ (aq)
	71.85	CaPO ₄ ⁻
PO ₄ ⁻³	99.018	HPO ₄ ⁻²
NH ₄ ⁺¹	69.432	NH ₄ ⁺¹
	30.568	NH ₃ (aq)
Mg ⁺²	19.527	Mg ⁺²
	77.415	MgHPO ₄ (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-19.64	-1.465	1	Mg ⁺²	1	H ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg ⁺²	1	NH ₄ ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1E-16	100	0	0	0	0
CO3-2	1E-16	100	0	0	0	0
H+1	0.042476	100	0	0	0	0
Mg+2	4.36E-05	0.305	0	0	0.014274	99.695
NH4+1	0.004361	23.399	0	0	0.014274	76.601
PO4-3	0.04355	75.314	0	0	0.014274	24.686

ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9.5

pH 9.5	
ionic strength	0.0883
sum of cation(eq/kg)	1.82E-03
sum of anion(eq/kg)	8.71E-02
charge difference(%)	96

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	4.4193E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
H2PO4-	0.000105	8.31E-05	-4.08
HPO4-2	0.043216	0.016661	-1.778
NH3 (aq)	0.002527	0.002578	-2.589
NH4+1	0.001815	0.00143	-2.845
PO4-3	0.00019	2.22E-05	-4.653

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
CO ₃ -2	23.241	CO ₃ -2
	76.703	HCO ₃ -
Ca+2	88.981	CaPO ₄ -
PO ₄ -3	99.276	HPO ₄ -2
NH ₄ +1	41.803	NH ₄ +1
	58.197	NH ₃ (aq)
Mg+2	18.29	Mg+2
	72.638	MgHPO ₄ (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	-19.917	-1.742	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1E-16	100	0	0	0	0
CO ₃ -2	1E-16	100	0	0	0	0
H+1	0.040878	100	0	0	0	0
Mg+2	2.45E-05	0.171	0	0	0.014294	99.829
NH ₄ +1	0.004341	23.297	0	0	0.014294	76.703
PO ₄ -3	0.043531	75.281	0	0	0.014294	24.719

ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 10

pH 10	
ionic strength	0.0889
sum of cation(eq/kg)	8.09E-04
sum of anion(eq/kg)	8.77E-02
charge difference(%)	98

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	6.1832E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
HPO4-2	0.04288	0.016496	-1.783
NH3 (aq)	0.003534	0.003608	-2.443
NH4+1	0.000803	0.000633	-3.199
OH-	0.000128	0.000101	-3.998
PO4-3	0.000597	6.96E-05	-4.158

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
CO3-2	48.959	CO3-2
	51.012	HCO3-
Ca+2	96.221	CaPO4-
PO4-3	98.512	HPO4-2
NH4+1	18.521	NH4+1
	81.479	NH3 (aq)
Mg+2	15.448	Mg+2
	23.664	MgPO4-
	60.6	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
			1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
MgHPO4:3H2O(s)	-20.063	-1.888	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1E-16	100	0	0	0	0
CO3-2	1E-16	100	0	0	0	0
H+1	0.039297	100	0	0	0	0
Mg+2	2.1E-05	0.147	0	0	0.014297	99.853
NH4+1	0.004338	23.278	0	0	0.014297	76.722
PO4-3	0.043528	75.275	0	0	0.014297	24.725

Selected sweep results (Concentration in mol/l)

Problem no.	pH	MgHPO4:3H2O(s)	Struvite
		Concentration	Concentration
1	6	0.011764	0
2	6.5	0.012666	0
3	7	0.004513	0.008445
4	7.5	0	0.013501
5	8	0	0.014025
6	8.5	0	0.014213
7	9	0	0.014274
8	9.5	0	0.014294
9	10	0	0.014297

น้ำทิ้งสังเคราะห์ฟาร์มสุกร

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.0368
sum of cation(eq/kg)	1.69E-02
sum of anion(eq/kg)	4.61E-02
charge difference(%)	46.49406

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.98E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.05E-02	3.40E-02	-1.469
Mg+2	3.42E-03	1.69E-03	-2.772
MgCl+	2.73E-04	2.28E-04	-3.641
MgPO4-	3.62E-07	3.04E-07	-6.518
NH3 (aq)	4.61E-05	4.65E-05	-4.332
NH4+1	9.74E-03	8.16E-03	-2.088
PO4-3	1.95E-08	3.99E-09	-8.399

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.332	Cl-1
Mg+2	72.895	Mg+2
	21.287	MgHPO4 (aq)
NH4+1	99.528	NH4+1
PO4-3	40.793	HPO4-2
	37.911	H2PO4-

	21.288	MgHPO4 (aq)
--	--------	-------------

Saturation indices for minerals

	log IAP	Sat index=log IAP-log Ks	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-25.116	-1.836	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	4.69E-03	23	0	0	1.57E-02	77
NH4+1	9.78E-03	47.958	0	0	1.06E-02	52.042
PO4-3	4.69E-03	23	0	0	1.57E-02	77

Selected sweep results

Problem no.	pH	MgHPO4:3H2O(s)	Mg3(PO4)2(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration
1	7	5.09E-03	0	1.06E-02
2	7.5	0	0	1.68E-02
3	8	0	0	1.82E-02
4	8.5	0	0	1.89E-02
5	9	0	0	1.94E-02
6	9.5	0	1.85E-04	1.92E-02
7	10	0	5.05E-04	1.86E-02

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7.5

pH 7.5	
ionic strength	0.0317
sum of cation(eq/kg)	8.75E-03
sum of anion(eq/kg)	4.54E-02
charge difference(%)	67.67348

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	9.23E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.06E-02	3.44E-02	-1.464
Mg+2	2.51E-03	1.29E-03	-2.89
MgCl+	2.08E-04	1.76E-04	-3.754
MgHPO4 (aq)	8.64E-04	8.71E-04	-3.06
MgOH+	1.84E-07	1.56E-07	-6.808
MgPO4-	9.80E-07	8.29E-07	-6.081
NH3 (aq)	5.35E-05	5.39E-05	-4.269
NH4+1	3.53E-03	2.99E-03	-2.525
PO4-3	6.39E-08	1.43E-08	-7.845

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.49	Cl-1
NH4+1	98.507	NH4+1
PO4-3	58.215	HPO4-2
	17.623	H2PO4-
	24.132	MgHPO4 (aq)

Mg+2	70.022	Mg+2
	24.132	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

	log IAP	Sat index=log IAP-log Ks	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-24.36	-1.08	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4·3H2O(s)	-18.238	-0.063	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	3.58E-03	17.555	0	0	1.68E-02	82.445
NH4+1	3.58E-03	17.556	0	0	1.68E-02	82.444
PO4-3	3.58E-03	17.555	0	0	1.68E-02	82.445

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.028
sum of cation(eq/kg)	5.48E-03
sum of anion(eq/kg)	4.40E-02
charge difference(%)	77.87257

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	1.76E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.07E-02	3.47E-02	-1.46
Mg+2	1.61E-03	8.56E-04	-3.068
MgCl+	1.39E-04	1.18E-04	-3.927
MgHPO4 (aq)	4.54E-04	4.57E-04	-3.34
NH3 (aq)	1.02E-04	1.03E-04	-3.989
NH4+1	2.11E-03	1.80E-03	-2.745

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.66	Cl-1
PO4-3	72.274	HPO4-2
	20.562	MgHPO4 (aq)
NH4+1	95.389	NH4+1
Mg+2	73.076	Mg+2
	20.562	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index=log IAP-log Ks	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-24.097	-0.817	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.518	-0.343	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	2.21E-03	10.83	0	0	1.82E-02	89.17
NH4+1	2.21E-03	10.83	0	0	1.82E-02	89.17
PO4-3	2.21E-03	10.83	0	0	1.82E-02	89.17

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8.5

pH 8.5	
ionic strength	0.0256
sum of cation(eq/kg)	3.58E-03
sum of anion(eq/kg)	4.31E-02
charge difference(%)	84.66864

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	3.33E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Mg+2	0.001111	0.000602	-3.221
MgHPO4 (aq)	0.00024	0.000241	-3.618
NH3 (aq)	0.000193	0.000195	-3.711
NH4+1	0.001258	0.001079	-2.967

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.761	Cl-1
Mg+2	76.532	Mg+2
	16.507	MgHPO4 (aq)
NH4+1	86.672	NH4+1
	13.328	NH3 (aq)
PO4-3	80.742	HPO4-2
	16.507	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index=log IAP-log Ks	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-23.807	-0.527	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.796	-0.621	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	1.45E-03	7.114	0	0	1.89E-02	92.886
NH4+1	1.45E-03	7.114	0	0	1.89E-02	92.886
PO4-3	1.45E-03	7.114	0	0	1.89E-02	92.886

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.0242
sum of cation(eq/kg)	2.40E-03
sum of anion(eq/kg)	4.25E-02
charge difference(%)	89.29423

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	5.85E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.07E-02	3.51E-02	-1.455
MgHPO4 (aq)	1.37E-04	1.37E-04	-3.862
NH3 (aq)	3.39E-04	3.41E-04	-3.467
NH4+1	6.95E-04	5.98E-04	-3.223

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.821	Cl-1
PO4-3	85.378	HPO4-2
	13.221	MgHPO4 (aq)
NH4+1	67.197	NH4+1
	32.803	NH3 (aq)
Mg+2	79.076	Mg+2
	13.221	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-23.421	-0.141	3	Mg+2	2	PO ₄ -3				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-19.04	-0.865	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	1.03E-03	5.068	0	0	1.94E-02	94.932
NH ₄ +1	1.03E-03	5.068	0	0	1.94E-02	94.932
PO ₄ -3	1.03E-03	5.068	0	0	1.94E-02	94.932

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9.5

pH 9.5	
ionic strength	0.023
sum of cation(eq/kg)	1.46E-03
sum of anion(eq/kg)	4.22E-02
charge difference(%)	93.30746

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	1.21E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.08E-02	3.52E-02	-1.454
Mg+2	4.80E-04	2.67E-04	-3.574
MgCl+	4.33E-05	3.74E-05	-4.427
MgHPO4 (aq)	6.60E-05	6.63E-05	-4.178
NH3 (aq)	7.03E-04	7.07E-04	-3.151
NH4+1	4.54E-04	3.92E-04	-3.407

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.894	Cl-1
PO4-3	90.136	HPO4-2
NH4+1	39.239	NH4+1
	60.761	NH3 (aq)
Mg+2	79.967	Mg+2

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-19.356	-1.181	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	6.01E-04	2.945	0	0	1.98E-02	97.055
NH4+1	1.16E-03	5.671	0	0	1.92E-02	94.329
PO4-3	7.86E-04	3.854	0	0	1.96E-02	96.146

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.0401
sum of cation(eq/kg)	1.92E-02
sum of anion(eq/kg)	4.88E-02
charge difference(%)	43.5394

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.97E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

Cl-1	4.44E-02	3.70E-02	-1.432
Mg+2	4.52E-03	2.18E-03	-2.661
MgCl+	3.86E-04	3.21E-04	-3.493
MgHPO4 (aq)	9.98E-04	1.01E-03	-2.997
NH3 (aq)	4.61E-05	4.65E-05	-4.332
NH4+1	9.79E-03	8.16E-03	-2.088

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.139	Cl-1
Mg+2	76.54	Mg+2
	16.918	MgHPO ₄ (aq)
NH ₄ +1	99.531	NH ₄ +1
PO ₄ -3	25.591	MgHPO ₄ (aq)
	38.875	HPO ₄ -2
	35.524	H ₂ PO ₄ -

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-25.005	-1.725	3	Mg+2	2	PO ₄ -3				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	5.90E-03	26.345	0	0	1.65E-02	73.655
NH ₄ +1	9.84E-03	48.212	0	0	1.06E-02	51.788
PO ₄ -3	3.90E-03	19.124	0	0	1.65E-02	80.876

Selected sweep results

Problem no.	pH	MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration
1	7	5.93E-03	0	1.06E-02
2	7.5	0	0	1.73E-02
3	8	0	0	1.86E-02
4	8.5	0	6.15E-05	1.92E-02
5	9	0	4.07E-04	1.91E-02
6	9.5	0	8.07E-04	1.86E-02
7	10	0	1.44E-03	1.73E-02

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7.5

pH 7.5	
ionic strength	0.0351
sum of cation(eq/kg)	1.11E-02
sum of anion(eq/kg)	4.83E-02
charge difference(%)	62.71223

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	8.05E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl ⁻¹	4.45E-02	3.74E-02	-1.427
Mg ⁺²	3.81E-03	1.91E-03	-2.72
MgCl ⁺	3.38E-04	2.84E-04	-3.547
MgHPO ₄ (aq)	9.90E-04	9.98E-04	-3.001
NH ₃ (aq)	4.66E-05	4.70E-05	-4.328
NH ₄ ⁺¹	3.10E-03	2.60E-03	-2.584

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
NH ₄ +1	98.518	NH ₄ +1
Mg+2	74.154	Mg+2
	19.256	MgHPO ₄ (aq)
Cl-1	99.247	Cl-1
PO ₄ -3	31.506	MgHPO ₄ (aq)
	52.796	HPO ₄ -2
	15.661	H ₂ PO ₄ -

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-24.071	-0.791	3	Mg+2	2	PO ₄ -3				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-18.179	-0.004	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	5.14E-03	22.962	0	0	1.73E-02	77.038
NH ₄ +1	3.14E-03	15.409	0	0	1.73E-02	84.591
PO ₄ -3	3.14E-03	15.41	0	0	1.73E-02	84.59

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.0315
sum of cation(eq/kg)	7.94E-03
sum of anion(eq/kg)	4.69E-02
charge difference(%)	71.0469

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	1.43E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.45E-02	3.77E-02	-1.424
Mg+2	2.97E-03	1.53E-03	-2.816
MgCl+	2.71E-04	2.30E-04	-3.639
NH3 (aq)	8.26E-05	8.32E-05	-4.08
NH4+1	1.72E-03	1.46E-03	-2.836

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.395	Cl-1
Mg+2	78.112	Mg+2
NH4+1	95.426	NH4+1
PO4-3	30.972	MgHPO4 (aq)
	62.886	HPO4-2

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index=log IAP-log Ks	stoichiometry and mineral components							
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-23.664	-0.384	3	Mg+2	2	PO ₄ -3				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-18.427	-0.252	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	3.81E-03	16.991	0	0	1.86E-02	83.009
NH ₄ +1	1.81E-03	8.853	0	0	1.86E-02	91.147
PO ₄ -3	1.81E-03	8.853	0	0	1.86E-02	91.147

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8.5

pH 8.5	
ionic strength	0.0292
sum of cation(eq/kg)	6.13E-03
sum of anion(eq/kg)	4.60E-02
charge difference(%)	76.49793

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	2.65E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.46E-02	3.79E-02	-1.421
Mg+2	2.45E-03	1.28E-03	-2.892
MgCl+	2.27E-04	1.94E-04	-3.713
MgHPO4 (aq)	3.01E-04	3.03E-04	-3.519
NH3 (aq)	1.54E-04	1.55E-04	-3.81
NH4+1	1.01E-03	8.59E-04	-3.066

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.492	Cl-1
Mg+2	82.093	Mg+2
NH4+1	86.776	NH4+1
	13.224	NH3 (aq)
PO4-3	28.909	MgHPO4 (aq)
	68.634	HPO4-2

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.697	-0.522	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	2.98E-03	13.298	0	0	1.94E-02	86.702
NH4+1	1.16E-03	5.702	0	0	1.92E-02	94.298
PO4-3	1.04E-03	5.099	0	0	1.94E-02	94.901

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.0271
sum of cation(eq/kg)	4.58E-03
sum of anion(eq/kg)	4.54E-02
charge difference(%)	81.64938

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.21E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.46E-02	3.82E-02	-1.418
Mg+2	1.77E-03	9.47E-04	-3.024
MgCl+	1.68E-04	1.44E-04	-3.842
MgHPO4 (aq)	1.11E-04	1.11E-04	-3.953
NH3 (aq)	4.18E-04	4.21E-04	-3.376
NH4+1	8.64E-04	7.38E-04	-3.132

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.624	Cl-1
Mg+2	86.06	Mg+2
NH4+1	67.365	NH4+1
	32.635	NH3 (aq)
PO4-3	23.695	MgHPO4 (aq)
	74.66	HPO4-2

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-19.132	-0.957	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	2.06E-03	9.195	0	0	2.03E-02	90.805
NH4+1	1.28E-03	6.284	0	0	1.91E-02	93.716
PO4-3	4.67E-04	2.29	0	0	1.99E-02	97.71

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9.5

pH 9.5	
ionic strength	0.0256
sum of cation(eq/kg)	3.35E-03
sum of anion(eq/kg)	4.51E-02
charge difference(%)	86.18075

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	1.93E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.47E-02	3.83E-02	-1.416
Mg+2	1.25E-03	6.74E-04	-3.171
MgCl+	1.20E-04	1.03E-04	-3.987
NH ₃ (aq)	1.12E-03	1.12E-03	-2.95
NH ₄ +1	7.26E-04	6.23E-04	-3.206

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.732	Cl-1
Mg+2	87.643	Mg+2
NH ₄ +1	39.407	NH ₄ +1
	60.593	NH ₃ (aq)
PO ₄ -3	18.174	MgHPO ₄ (aq)
	79.318	HPO ₄ -2

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO ₄ -3				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-19.558	-1.383	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	1.42E-03	6.344	0	0	2.10E-02	93.656
NH ₄ +1	1.84E-03	9.034	0	0	1.86E-02	90.966
PO ₄ -3	2.28E-04	1.119	0	0	2.02E-02	98.881

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.0442
sum of cation(eq/kg)	2.22E-02
sum of anion(eq/kg)	5.20E-02
charge difference(%)	40.23247

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	7.97E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.85E-02	4.01E-02	-1.397
Mg+2	5.89E-03	2.77E-03	-2.558
MgCl+	5.34E-04	4.42E-04	-3.354
MgHPO4 (aq)	9.98E-04	1.01E-03	-2.997
NH4+1	9.85E-03	8.16E-03	-2.088

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	98.91	Cl-1
Mg+2	79.359	Mg+2
	13.438	MgHPO4 (aq)
NH4+1	99.535	NH4+1
PO4-3	30.01	MgHPO4 (aq)
	36.918	HPO4-2
	33.06	H2PO4-

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-24.901	-1.621	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	7.42E-03	30.305	0	0	1.71E-02	69.695
NH4+1	9.90E-03	48.521	0	0	1.05E-02	51.479
PO4-3	3.32E-03	16.297	0	0	1.71E-02	83.703

Selected sweep results

Problem no.	pH	MgHPO4:3H2O(s)	Mg3(PO4)2(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration
1	7	6.57E-03	0	1.05E-02
2	7.5	4.75E-04	0	1.73E-02
3	8	0	0	1.88E-02
4	8.5	0	3.80E-04	1.90E-02
5	9	0	7.27E-04	1.87E-02
6	9.5	0	1.26E-03	1.78E-02
7	10	0	2.35E-03	1.56E-02

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7.5

pH 7.5	
ionic strength	0.0393
sum of cation(eq/kg)	1.41E-02
sum of anion(eq/kg)	5.15E-02
charge difference(%)	56.93471

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.97E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.85E-02	4.05E-02	-1.393
Mg+2	5.27E-03	2.56E-03	-2.592
MgCl+	4.94E-04	4.12E-04	-3.385
MgHPO4 (aq)	9.99E-04	1.01E-03	-2.997
NH4+1	3.09E-03	2.58E-03	-2.588

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	98.993	Cl-1
Mg+2	77.907	Mg+2
NH4+1	98.531	NH4+1
PO4-3	37.524	MgHPO4 (aq)
	48.396	HPO4-2
	14.035	H2PO4-

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-23.936	-0.656	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	6.76E-03	27.6	0	0	1.77E-02	72.4
NH4+1	3.14E-03	15.377	0	0	1.73E-02	84.623
PO4-3	2.66E-03	13.049	0	0	1.77E-02	86.951

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.0363
sum of cation(eq/kg)	1.12E-02
sum of anion(eq/kg)	5.04E-02
charge difference(%)	63.55186

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	1.26E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.86E-02	4.07E-02	-1.39
Mg+2	4.63E-03	2.29E-03	-2.639
MgCl+	4.43E-04	3.72E-04	-3.429
MgHPO4 (aq)	6.33E-04	6.38E-04	-3.195
NH4+1	1.54E-03	1.29E-03	-2.89

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
NH ₄ +1	95.471	NH ₄ +1
Mg+2	81.086	Mg+2
Cl-1	99.095	Cl-1
PO ₄ -3	39.357	MgHPO ₄ (aq)
	55.339	HPO ₄ -2

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-23.379	-0.099	3	Mg+2	2	PO ₄ -3				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-18.373	-0.198	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	5.71E-03	23.299	0	0	1.88E-02	76.701
NH ₄ +1	1.61E-03	7.884	0	0	1.88E-02	92.116
PO ₄ -3	1.61E-03	7.884	0	0	1.88E-02	92.116

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8.5

pH 8.5	
ionic strength	0.0335
sum of cation(eq/kg)	9.15E-03
sum of anion(eq/kg)	4.95E-02
charge difference(%)	68.78356

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	3.24E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.86E-02	4.10E-02	-1.387
Mg+2	3.77E-03	1.91E-03	-2.72
MgCl+	3.69E-04	3.12E-04	-3.506
MgHPO4 (aq)	2.46E-04	2.48E-04	-3.605
NH3 (aq)	1.87E-04	1.89E-04	-3.724
NH4+1	1.24E-03	1.05E-03	-2.98

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.246	Cl-1
Mg+2	85.846	Mg+2
NH4+1	86.886	NH4+1
PO4-3	36.834	MgHPO4 (aq)
	60.904	HPO4-2

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO ₄ -3				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-18.784	-0.609	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	4.39E-03	17.911	0	0	2.01E-02	82.089
NH ₄ +1	1.43E-03	7.007	0	0	1.90E-02	92.993
PO ₄ -3	6.69E-04	3.277	0	0	1.97E-02	96.723

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.0318
sum of cation(eq/kg)	7.89E-03
sum of anion(eq/kg)	4.90E-02
charge difference(%)	72.26767

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	9.51E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.87E-02	4.12E-02	-1.385
Mg+2	3.21E-03	1.65E-03	-2.784
MgCl+	3.19E-04	2.70E-04	-3.569
NH3 (aq)	5.51E-04	5.55E-04	-3.256
NH4+1	1.15E-03	9.73E-04	-3.012

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.349	Cl-1
Mg+2	88.586	Mg+2
NH4+1	67.612	NH4+1
	32.388	NH3 (aq)
PO4-3	33.936	MgHPO4 (aq)
	64.171	HPO4-2

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-19.252	-1.077	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	3.62E-03	14.778	0	0	2.09E-02	85.222
NH4+1	1.70E-03	8.336	0	0	1.87E-02	91.664
PO4-3	2.47E-04	1.212	0	0	2.02E-02	98.788

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9.5

pH 9.5	
ionic strength	0.0304
sum of cation(eq/kg)	6.56E-03
sum of anion(eq/kg)	4.89E-02
charge difference(%)	76.33194

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	2.73E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	4.87E-02	4.14E-02	-1.383
Mg+2	2.62E-03	1.36E-03	-2.867
MgCl+	2.64E-04	2.24E-04	-3.65
NH3 (aq)	1.58E-03	1.59E-03	-2.797
NH4+1	1.04E-03	8.85E-04	-3.053

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	99.462	Cl-1
Mg+2	89.247	Mg+2
NH4+1	39.687	NH4+1
	60.312	NH3 (aq)
PO4-3	29.512	MgHPO4 (aq)
	66.746	HPO4-2

Saturation indices for minerals

	Log IAP	Sat index	stoichiometry and mineral components							
Mg3(PO4)2(s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-19.71	-1.535	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	2.94E-03	11.981	0	0	2.16E-02	88.019
NH4+1	2.63E-03	12.872	0	0	1.78E-02	87.128
PO4-3	9.89E-05	0.485	0	0	2.03E-02	99.515

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.0818
sum of cation(eq/kg)	3.89E-02
sum of anion(eq/kg)	1.06E-01
charge difference(%)	46.28305

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.95E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.059899	0.047464	-1.324
Mg+2	0.003125	0.001232	-2.909
MgCl+	0.000294	0.000233	-3.633
Na+1	0.016468	0.013049	-1.884
NaCl (aq)	0.000305	0.00031	-3.508
NH4+1	0.010269	0.008137	-2.09

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	98.841	Cl-1
PO4-3	45.42	HPO4-2
	35.65	H2PO4-
Ca+2	69.953	Ca+2
NH4+1	98.334	NH4+1
Mg+2	66.95	Mg+2
	21.243	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1.78E-05	1.046	0	0	0.001682	98.954
Cl-1	0.060601	100	0	0	0	0
Mg+2	0.004668	31.974	0	0	0.009932	68.026
Na+1	0.0172	100	0	0	0	0
NH4+1	0.010443	57.378	0	0	0.007757	42.622
PO4-3	0.007259	39.884	0	0	0.010941	60.116

Selected sweep results (Concentration in mol/l)

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	MgHPO4:3H2O(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration
1	7	0.000336	0.002175	0.007757

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	Struvite
		Concentration	Concentration
1	8	0.000339	0.013481
2	9	0.00034	0.014383
3	10	0.00034	0.014507

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.0727
sum of cation(eq/kg)	2.81E-02
sum of anion(eq/kg)	1.03E-01
charge difference(%)	57.2443

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	3.48E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.060109	0.048041	-1.318
Mg+2	0.000747	0.000305	-3.516
MgHPO4 (aq)	0.000227	0.000231	-3.637
Na+1	0.016513	0.013198	-1.879
NaCl (aq)	0.000313	0.000318	-3.498
NH3 (aq)	0.0002	0.000203	-3.692
NH4+1	0.004457	0.003562	-2.448
SO4-2	0.003197	0.001304	-2.885

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
NH4+1	94.448	NH4+1
PO4-3	79.509	HPO4-2
Na+1	96.008	Na+1
SO4-2	91.328	SO4-2
Ca+2	67.339	Ca+2

	14.828	CaHPO ₄ (aq)
Mg ⁺²	66.747	Mg ⁺²
	20.288	MgHPO ₄ (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca ⁺²	3	PO ₄ ⁻³	1	H ₂ O	-1	H ⁺¹
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-18.816	-0.641	1	Mg ⁺²	1	H ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg ⁺²	1	NH ₄ ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca ⁺²	2.97E-06	0.174	0	0	0.001697	99.826
Mg ⁺²	0.001119	7.664	0	0	0.013481	92.336
Na ⁺¹	0.0172	100	0	0	0	0
NH ₄ ⁺¹	0.004719	25.928	0	0	0.013481	74.072
PO ₄ ⁻³	0.003701	20.333	0	0	0.014499	79.667

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 0.8:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.0697
sum of cation(eq/kg)	2.50E-02
sum of anion(eq/kg)	1.02E-01
charge difference(%)	60.71561

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	2.04E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.060164	0.048232	-1.317
Mg+2	0.000147	6.07E-05	-4.217
Na+1	0.016544	0.013263	-1.877
NaCl (aq)	0.000316	0.000321	-3.494
NH3 (aq)	0.001172	0.001191	-2.924
NH4+1	0.002607	0.00209	-2.68

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
NH4+1	68.292	NH4+1
Cl-1	99.28	Cl-1
PO4-3	88.917	HPO4-2
Na+1	96.183	Na+1
Ca+2	49.227	Ca+2
	31.689	CaPO4-
Mg+2	67.825	Mg+2
	17.87	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
MgHPO4:3H2O(s)	-19.585	-1.41	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	6.97E-07	0.041	0	0	0.001699	99.959
Mg+2	0.000217	1.484	0	0	0.014383	98.516
NH4+1	0.003817	20.971	0	0	0.014383	79.029
PO4-3	0.002797	15.369	0	0	0.015403	84.631

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.0835
sum of cation(eq/kg)	4.03E-02
sum of anion(eq/kg)	1.08E-01
charge difference(%)	45.5395

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.95E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.063397	0.050158	-1.3
HPO4-2	0.002764	0.001083	-2.965
Mg+2	0.003775	0.001479	-2.83
MgCl+	0.000373	0.000295	-3.53
Na+1	0.016504	0.013058	-1.884
NaCl (aq)	0.000322	0.000328	-3.484
NaHPO4-	0.00021	0.000166	-3.78
NH4+1	0.010282	0.008135	-2.09

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	98.746	Cl-1
PO4-3	44.332	HPO4-2
	34.638	H2PO4-
	15.905	MgHPO4 (aq)
Na+1	95.95	Na+1
SO4-2	83.464	SO4-2
Ca+2	72.199	Ca+2
	13.738	CaHPO4 (aq)
NH4+1	98.358	NH4+1
Mg+2	69.361	Mg+2
	18.218	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1.93E-05	1.137	0	0	0.001681	98.863
Mg+2	0.005443	33.187	0	0	0.010957	66.813
Na+1	0.0172	100	0	0	0	0
NH4+1	0.010453	57.436	0	0	0.007747	42.564
PO4-3	0.006234	34.254	0	0	0.011966	65.746

Selected sweep results (Concentration in mol/l)

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration
1	7	0.000336	0.003211	0.007747

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	Struvite
		Concentration	Concentration
1	8	0.000339	0.014476
2	9	0.00034	0.01577
3	10	0.00034	0.01606

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.0733
sum of cation(eq/kg)	2.86E-02
sum of anion(eq/kg)	1.05E-01
charge difference(%)	57.19858

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	2.75E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl ⁻¹	0.063616	0.050812	-1.294
H ₂ PO ₄ ⁻	0.000165	0.000132	-3.881
HPO ₄ ⁻²	0.002048	0.000834	-3.079
Mg ⁺²	0.001367	0.000556	-3.255
MgCl ⁺	0.000141	0.000113	-3.949
Na ⁺¹	0.016569	0.013234	-1.878
NaCl (aq)	0.000331	0.000337	-3.472

NH ₃ (aq)	0.000158	0.00016	-3.795
NH ₄ +1	0.003518	0.00281	-2.551

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
NH ₄ +1	94.47	NH ₄ +1
Cl-1	99.09	Cl-1
PO ₄ -3	75.688	HPO ₄ -2
	10.63	MgHPO ₄ (aq)
Na+1	96.332	Na+1
SO ₄ -2	90.163	SO ₄ -2
Ca+2	71.685	Ca+2
	10.932	CaHPO ₄ (aq)
Mg+2	71.016	Mg+2
	14.95	MgHPO ₄ (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO ₄ -3	1	H ₂ O	-1	H+1
MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	-18.713	-0.538	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	3.48E-06	0.204	0	0	0.001697	99.796
Mg+2	0.001924	11.734	0	0	0.014476	88.266
Na+1	0.0172	100	0	0	0	0
NH ₄ +1	0.003724	20.464	0	0	0.014476	79.537
PO ₄ -3	0.002706	14.871	0	0	0.015494	85.129

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 0.9:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH	9
ionic strength	0.069
sum of cation(eq/kg)	2.49E-02
sum of anion(eq/kg)	1.03E-01
charge difference(%)	61.17218

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	1.30E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.063701	0.051103	-1.292
HPO ₄ -2	0.001215	0.000503	-3.298
Mg+2	0.00047	0.000195	-3.711
Na+1	0.016626	0.013338	-1.875
NaCl (aq)	0.000336	0.000342	-3.466
NH ₃ (aq)	0.000747	0.000759	-3.12
NH ₄ +1	0.001659	0.001331	-2.876

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
NH ₄ +1	68.277	NH ₄ +1
Cl-1	99.223	Cl-1
PO ₄ -3	86.114	HPO ₄ -2
Na+1	96.662	Na+1
Ca+2	62.129	Ca+2
	19.628	CaPO ₄ -
Mg+2	74.555	Mg+2

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
MgHPO4:3H2O(s)	-19.389	-1.214	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	8.46E-07	0.05	0	0	0.001699	99.95
Mg+2	0.00063	3.842	0	0	0.01577	96.158
Na+1	0.0172	100	0	0	0	0
NH4+1	0.00243	13.352	0	0	0.01577	86.648
PO4-3	0.001411	7.751	0	0	0.016789	92.249

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.0857
sum of cation(eq/kg)	4.21E-02
sum of anion(eq/kg)	1.10E-01
charge difference(%)	44.62175

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.95E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.066874	0.052809	-1.277
HPO4-2	0.00232	0.000902	-3.045
Mg+2	0.004568	0.001776	-2.75
MgCl+	0.000473	0.000373	-3.428
Na+1	0.016532	0.013055	-1.884
NaCl (aq)	0.000339	0.000346	-3.462
NH4+1	0.010299	0.008133	-2.09

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
PO4-3	43.118	HPO4-2
	33.497	H2PO4-
	18.426	MgHPO4 (aq)
Cl-1	98.633	Cl-1
Ca+2	74.221	Ca+2
	11.667	CaHPO4 (aq)
Mg+2	71.521	Mg+2
	15.52	MgHPO4 (aq)
NH4+1	98.387	NH4+1

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-25.091	-1.811	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	0.006387	35.096	0	0	0.011813	64.904
Na+1	0.0172	100	0	0	0	0
NH4+1	0.010467	57.513	0	0	0.007733	42.487
PO4-3	0.00538	29.561	0	0	0.01282	70.44

Selected sweep results (Concentration in mol/l)

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	MgHPO4:3H2O(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration
1	7	0.000336	0.00408	0.007733

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	Mg3(PO4)2(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration
1	8	0.000339	0	0.015091
2	9	0.00034	0	0.016446
3	10	0.00034	0.000617	0.015561

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.0754
sum of cation(eq/kg)	3.00E-02
sum of anion(eq/kg)	1.07E-01
charge difference(%)	56.18805

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	2.29E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.067085	0.053474	-1.272
H ₂ PO ₄ ⁻	0.000118	9.43E-05	-4.026
HPO ₄ ⁻²	0.00148	0.000598	-3.224
Mg ⁺²	0.002306	0.000931	-3.031
MgCl ⁺	0.000249	0.000198	-3.703
Na ⁺¹	0.016603	0.013234	-1.878
NH ₃ (aq)	0.000131	0.000134	-3.874
NH ₄ ⁺¹	0.002939	0.002342	-2.63

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg ⁺²	74.171	Mg ⁺²
	11.095	MgHPO ₄ (aq)
Cl-1	98.946	Cl-1
PO ₄ ⁻³	70.764	HPO ₄ ⁻²
	16.493	MgHPO ₄ (aq)
Na ⁺¹	96.526	Na ⁺¹
Ca ⁺²	74.957	Ca ⁺²
NH ₄ ⁺¹	94.515	NH ₄ ⁺¹

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca ⁺²	3	PO ₄ ⁻³	1	H ₂ O	-1	H ⁺¹
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-24.29	-1.01	3	Mg ⁺²	2	PO ₄ ⁻³				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-18.634	-0.459	1	Mg ⁺²	1	H ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg ⁺²	1	NH ₄ ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	4.09E-06	0.241	0	0	0.001696	99.759
Mg+2	0.003109	17.084	0	0	0.015091	82.916
NH4+1	0.003109	17.083	0	0	0.015091	82.917
PO4-3	0.002092	11.493	0	0	0.016108	88.507

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.071
sum of cation(eq/kg)	2.64E-02
sum of anion(eq/kg)	1.05E-01
charge difference(%)	59.90994

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	9.38E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.067175	0.05378	-1.269
Mg+2	0.001379	0.000567	-3.247
MgCl+	0.000152	0.000121	-3.916
Na+1	0.016664	0.013341	-1.875
NaCl (aq)	0.000354	0.00036	-3.444
NH3 (aq)	0.000538	0.000547	-3.262
NH4+1	0.001199	0.00096	-3.018

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
NH ₄ +1	68.349	NH ₄ +1
	30.694	NH ₃ (aq)
Cl-1	99.079	Cl-1
PO ₄ -3	79.441	HPO ₄ -2
	11.481	MgHPO ₄ (aq)
Na+1	96.885	Na+1
Ca+2	71.867	Ca+2
	10.749	CaPO ₄ -
Mg+2	78.657	Mg+2

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO ₄ -3	1	H ₂ O	-1	H+1
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-23.731	-0.451	3	Mg+2	2	PO ₄ -3				
MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	-19.247	-1.072	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1.15E-06	0.068	0	0	0.001699	99.932
Mg+2	0.001754	9.635	0	0	0.016446	90.365
NH ₄ +1	0.001754	9.635	0	0	0.016446	90.365
PO ₄ -3	0.000734	4.034	0	0	0.017466	95.966

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.0884
sum of cation(eq/kg)	4.41E-02
sum of anion(eq/kg)	1.12E-01
charge difference(%)	43.55723

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.95E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.070332	0.055414	-1.256
H2PO4-	0.001514	0.001193	-2.923
HPO4-2	0.001962	0.000756	-3.121
Mg+2	0.005501	0.00212	-2.674
MgCl+	0.000594	0.000468	-3.33
MgHPO4 (aq)	0.000991	0.001011	-2.995
NaCl (aq)	0.000355	0.000362	-3.441
NaHPO4-	0.000147	0.000116	-3.936
NH4+1	0.010319	0.00813	-2.09

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	73.372	Mg+2
	13.217	MgHPO4 (aq)
Cl-1	98.502	Cl-1
Na+1	96.236	Na+1
Ca+2	75.97	Ca+2

NH4+1	98.419	NH4+1
PO4-3	41.826	HPO4-2
	32.273	H2PO4-
	21.124	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-25.014	-1.734	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in mola)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	2.32E-05	1.363	0	0	0.001677	98.637
Mg+2	0.007497	37.487	0	0	0.012503	62.513
NH4+1	0.010485	57.608	0	0	0.007715	42.392
PO4-3	0.004691	25.775	0	0	0.013509	74.225

Selected sweep results (Concentration in mol/l)

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	MgHPO4:3H2O(s)	Mg3(PO4)2(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration	Concentration
1	7	0.000335	0.004788	0	0.007715
2	8	0.000339	0	0	0.015449
3	9	0.00034	0	0	0.016682
4	10	0.00034	0	0.00133	0.014382

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.0785
sum of cation(eq/kg)	3.22E-02
sum of anion(eq/kg)	1.09E-01
charge difference(%)	54.59139

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	2.02E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.070524	0.056051	-1.251
HPO4-2	0.00114	0.000455	-3.342
Mg+2	0.003472	0.001386	-2.858
MgCl+	0.000389	0.000309	-3.51
MgHPO4 (aq)	0.00039	0.000398	-3.401
Na+1	0.01662	0.013209	-1.879
NaCl (aq)	0.000364	0.000371	-3.431
NH3 (aq)	0.000116	0.000118	-3.928
NH4+1	0.002602	0.002068	-2.684

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	76.29	Mg+2
Cl-1	98.773	Cl-1
PO4-3	65.732	HPO4-2
	22.517	MgHPO4 (aq)
Na+1	96.626	Na+1

Ca+2	77.223	Ca+2
NH4+1	94.573	NH4+1

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-24.01	-0.73	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.58	-0.405	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	4.73E-06	0.279	0	0	0.001695	99.722
Mg+2	0.004551	22.757	0	0	0.015449	77.243
NH4+1	0.002751	15.117	0	0	0.015449	84.883
PO4-3	0.001734	9.528	0	0	0.016466	90.472

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.0746
sum of cation(eq/kg)	2.90E-02
sum of anion(eq/kg)	1.08E-01
charge difference(%)	57.69956

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	8.10E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.070603	0.05632	-1.249
HPO4-2	0.000359	0.000146	-3.837
Mg+2	0.002667	0.00108	-2.967
MgCl+	0.000304	0.000242	-3.616
MgSO4 (aq)	0.000241	0.000245	-3.61
Na+1	0.016673	0.0133	-1.876
NaCl (aq)	0.000369	0.000375	-3.425
NH3 (aq)	0.000465	0.000473	-3.325
NH4+1	0.00104	0.000829	-3.081

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	80.382	Mg+2
Cl-1	98.884	Cl-1
Na+1	96.937	Na+1
SO4-2	88.031	SO4-2
NH4+1	68.472	NH4+1
	30.612	NH3 (aq)
Ca+2	76.395	Ca+2
PO4-3	71.991	HPO4-2
	19.527	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-23.324	-0.044	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-19.184	-1.009	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1.48E-06	0.087	0	0	0.001699	99.913
Mg+2	0.003318	16.591	0	0	0.016682	83.409
NH4+1	0.001518	8.342	0	0	0.016682	91.658
PO4-3	0.000499	2.742	0	0	0.017701	97.258

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.0915
sum of cation(eq/kg)	4.64E-02
sum of anion(eq/kg)	1.15E-01
charge difference(%)	42.38922

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.94E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.07377	0.057976	-1.237
HPO4-2	0.00168	0.000641	-3.193
Mg+2	0.006556	0.002501	-2.602
MgCl+	0.000735	0.000577	-3.239
MgHPO4 (aq)	0.000991	0.001012	-2.995
Na+1	0.016567	0.01302	-1.885
NaCl (aq)	0.00037	0.000378	-3.422
NaHPO4-	0.000125	9.81E-05	-4.008
NH4+1	0.010342	0.008128	-2.09

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	74.902	Mg+2
	11.316	MgHPO4 (aq)
Cl-1	98.358	Cl-1
Na+1	96.321	Na+1
Ca+2	77.438	Ca+2
NH4+1	98.453	NH4+1
PO4-3	40.51	HPO4-2
	31.022	H2PO4-
	23.88	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-24.942	-1.662	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	2.54E-05	1.492	0	0	0.001675	98.508
Mg+2	0.008753	40.151	0	0	0.013047	59.849
NH4+1	0.010505	57.718	0	0	0.007695	42.282
PO4-3	0.004148	22.791	0	0	0.014052	77.209

Selected sweep results (Concentration in mol/l)

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration	Concentration
1	7	0.000335	0.005352	0	0.007695
2	8	0.000339	0	0	0.015666
3	9	0.00034	0	0.000189	0.016468
4	10	0.00034	0	0.001931	0.013247

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.0821
sum of cation(eq/kg)	3.47E-02
sum of anion(eq/kg)	1.12E-01
charge difference(%)	52.75941

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	1.86E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.07394	0.05857	-1.232
HPO ₄ -2	0.000928	0.000365	-3.437
Mg+2	0.004768	0.001877	-2.727
MgCl+	0.000553	0.000438	-3.359
Na+1	0.016627	0.013171	-1.88
NaCl (aq)	0.000379	0.000387	-3.413
NH ₃ (aq)	0.000106	0.000108	-3.965

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	77.72	Mg+2
Cl-1	98.587	Cl-1
PO4-3	61.17	HPO4-2
	27.99	MgHPO4 (aq)
Na+1	96.669	Na+1
Ca+2	78.814	Ca+2
NH4+1	94.635	NH4+1

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-23.804	-0.524	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.544	-0.369	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	5.36E-06	0.315	0	0	0.001695	99.685
Mg+2	0.006134	28.139	0	0	0.015666	71.861
NH4+1	0.002534	13.924	0	0	0.015666	86.076
PO4-3	0.001517	8.337	0	0	0.016683	91.663

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.0784
sum of cation(eq/kg)	3.17E-02
sum of anion(eq/kg)	1.11E-01
charge difference(%)	55.55526

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	9.23E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.07403	0.058838	-1.23
HPO4-2	0.000223	8.91E-05	-4.05
Mg+2	0.003882	0.001549	-2.81
MgCl+	0.000457	0.000363	-3.44
Na+1	0.016674	0.013253	-1.878
NaCl (aq)	0.000384	0.000391	-3.408
NH3 (aq)	0.000529	0.000538	-3.269
NH4+1	0.001188	0.000944	-3.025

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	81.455	Mg+2
Cl-1	98.707	Cl-1
Na+1	96.944	Na+1
Ca+2	79.425	Ca+2
NH4+1	68.593	NH4+1
	30.528	NH3 (aq)

PO4-3	66.495	HPO4-2
	25.471	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-19.24	-1.065	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1.94E-06	0.114	0	0	0.001698	99.886
Mg+2	0.004766	21.862	0	0	0.017034	78.138
NH4+1	0.001732	9.515	0	0	0.016468	90.485
PO4-3	0.000336	1.845	0	0	0.017864	98.155

น้ำเสี้ยวสังเคราะห์ยูรีน

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.2000
sum of cation(eq/kg)	1.27E-01
sum of anion(eq/kg)	2.31E-01
charge difference(%)	29.21

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.8369E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.18314	0.13664	-0.864
H ₂ PO ₄ ⁻	0.001849	0.001379	-2.86
Mg ⁺²	0.005998	0.001859	-2.731
MgCl ⁺	0.001355	0.001011	-2.995
Na ⁺¹	0.10242	0.076417	-1.117
NaCl (aq)	0.004998	0.005233	-2.281
NH ₄ ⁺¹	0.010749	0.008019	-2.096

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	96.646	Cl-1
Na ⁺¹	92.19	Na ⁺¹
Mg ⁺²	62.677	Mg ⁺²
	14.16	MgCl ⁺
Ca ⁺²	64.535	Ca ⁺²
	16.756	CaSO ₄ (aq)
NH ₄ ⁺¹	95.684	NH ₄ ⁺¹
PO ₄ ⁻³	40.607	HPO ₄ ⁻²
	26.606	H ₂ PO ₄ ⁻

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca ⁺²	3	PO ₄ ⁻³	1	H ₂ O	-1	H ⁺¹
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-18.175	0	1	Mg ⁺²	1	H ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg ⁺²	1	NH ₄ ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	3.11E-05	0.707	0	0	0.004369	99.293
Mg+2	0.00957	30.971	0	0	0.02133	69.029
NH4+1	0.011233	36.354	0	0	0.019667	63.646
PO4-3	0.006949	22.488	0	0	0.023951	77.512

Selected sweep results (Concentration in mol/l)

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	MgHPO4:3H2O(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration
1	7	0.000874	0.001663	0.019667
2	8	0.000878	0	0.026131
3	9	0.000879	0	0.027695

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.1883
sum of cation(eq/kg)	1.14E-01
sum of anion(eq/kg)	2.27E-01
charge difference(%)	33.08

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	3.2165E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.1837	0.13752	-0.862
HPO4-2	0.001288	0.000405	-3.393
Mg+2	0.003116	0.000979	-3.009
MgCl+	0.000716	0.000536	-3.271
MgHPO4 (aq)	0.000239	0.00025	-3.602
Na+1	0.10297	0.077091	-1.113
NaCl (aq)	0.005088	0.005313	-2.275
NH3 (aq)	0.00018	0.000188	-3.727
NH4+1	0.004397	0.003292	-2.483

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	96.937	Cl-1
NH4+1	92.198	NH4+1
PO4-3	60.371	HPO4-2
	22.943	NaHPO4-
Na+1	92.686	Na+1
Ca+2	65.989	Ca+2
	18.567	CaSO4 (aq)
Mg+2	65.339	Mg+2
	15.009	MgCl+
	14.603	MgSO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
MgHPO4:3H2O(s)	-18.788	-0.613	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in mola)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	7.56E-06	0.172	0	0	0.004392	99.828
Mg+2	0.004769	15.432	0	0	0.026131	84.568
NH4+1	0.004769	15.432	0	0	0.026131	84.568
PO4-3	0.002133	6.903	0	0	0.028767	93.097

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.1838
sum of cation(eq/kg)	1.10E-01
sum of anion(eq/kg)	2.26E-01
charge difference(%)	34.36

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	1.6144E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.18387	0.13785	-0.861
HPO4-2	0.000367	0.000116	-3.936
Mg+2	0.002157	0.000681	-3.167
MgCl+	0.000499	0.000374	-3.427
Na+1	0.10326	0.077413	-1.111
NaHPO4-	0.00014	0.000105	-3.977
NH3 (aq)	0.000903	0.000942	-3.026
NH4+1	0.002204	0.001652	-2.782

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Cl-1	97.031	Cl-1
Na+1	92.942	Na+1
PO4-3	64.698	HPO4-2
	24.795	NaHPO4-
NH4+1	68.751	NH4+1
	28.17	NH3 (aq)
Ca+2	65.581	Ca+2
Mg+2	67.285	Mg+2
	15.559	MgCl+
	15.497	MgSO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-24.123	-0.843	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-19.489	-1.314	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	2.54E-06	0.058	0	0	0.004398	99.942
Mg+2	0.003205	10.372	0	0	0.027695	89.628
NH4+1	0.003205	10.372	0	0	0.027695	89.628
PO4-3	0.000567	1.834	0	0	0.030333	98.166

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.5:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.2260
sum of cation(eq/kg)	1.46E-01
sum of anion(eq/kg)	2.52E-01
charge difference(%)	26.54

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.8181E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.21115	0.15654	-0.805
H2PO4-	0.000794	0.000589	-3.23
HPO4-2	0.001235	0.000373	-3.428
Mg+2	0.014451	0.004365	-2.36
MgCl+	0.00367	0.00272	-2.565
Na+1	0.10274	0.076171	-1.118
NaCl (aq)	0.005673	0.005976	-2.224
NH4+1	0.010791	0.008	-2.097

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	66.686	Mg+2
	16.934	MgCl+
Cl-1	95.76	Cl-1
Na+1	92.481	Na+1
Ca+2	68.866	Ca+2
NH4+1	96.1	NH4+1
PO4-3	34.69	HPO4-2
	22.3	H2PO4-
	27.4	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-	H+1
MgHPO4:3H2O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	4.99E-05	1.134	0	0	0.00435	98.866
Mg+2	0.02167	46.703	0	0	0.024729	53.297
NH4+1	0.011229	36.34	0	0	0.019671	63.66
PO4-3	0.003561	11.524	0	0	0.027339	88.476

Selected sweep results (Concentration in mol/l)

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration	Concentration
1	7	0.00087	0	0.005058	0.019671
2	8	0.000877	0	0	0.027313
3	9	0.000879	4.28E-05	0	0.028019
4	10	0.00088	0.001586	0	0.025023

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.5:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.2179
sum of cation(eq/kg)	1.36E-01
sum of anion(eq/kg)	2.50E-01
charge difference(%)	29.62

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	2.4144E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl ⁻¹	0.21144	0.15704	-0.804
HPO ₄ ⁻²	0.000438	0.000133	-3.875
Mg ⁺²	0.013009	0.003958	-2.402
MgCl ⁺	0.003332	0.002475	-2.606
Na ⁺¹	0.10301	0.076505	-1.116

NaCl (aq)	0.005727	0.006021	-2.22
NH ₃ (aq)	0.000134	0.000141	-3.851
NH ₄ ⁺¹	0.003327	0.002471	-2.607

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg ⁺²	68.155	Mg ⁺²
	17.457	MgCl ⁺
Cl ⁻¹	95.891	Cl ⁻¹
PO ₄ ⁻³	45.84	HPO ₄ ⁻²
	33.132	MgHPO ₄ (aq)
Na ⁺¹	92.716	Na ⁺¹
Ca ⁺²	69.799	Ca ⁺²
NH ₄ ⁺¹	92.745	NH ₄ ⁺¹

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca ⁺²	3	PO ₄ ⁻³	1	H ₂ O	-1	H ⁺¹
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-23.708	-0.428	3	Mg ⁺²	2	PO ₄ ⁻³				
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	-18.665	-0.49	1	Mg ⁺²	1	H ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg ⁺²	1	NH ₄ ⁺¹	1	PO ₄ ⁻³		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1.44E-05	0.326	0	0	0.004386	99.674
Mg+2	0.019087	41.135	0	0	0.027313	58.865
NH4+1	0.003587	11.608	0	0	0.027313	88.392
PO4-3	0.000955	3.092	0	0	0.029945	96.908

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 1.5:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.2158
sum of cation(eq/kg)	1.34E-01
sum of anion(eq/kg)	2.49E-01
charge difference(%)	30.24

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	1.4516E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/L)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.21152	0.15718	-0.804
Mg+2	0.012575	0.003834	-2.416
MgCl+	0.003229	0.002399	-2.62
Na+1	0.10311	0.076622	-1.116
NaCl (aq)	0.005743	0.006036	-2.219
NH3 (aq)	0.000806	0.000847	-3.072
NH4+1	0.001999	0.001485	-2.828

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	68.901	Mg+2
	17.69	MgCl+
	13.001	MgSO ₄ (aq)
Cl-1	95.931	Cl-1
Na+1	92.814	Na+1
Ca+2	70.076	Ca+2
	11.352	CaCl+
	16.646	CaSO ₄ (aq)
NH ₄ +1	69.374	NH ₄ +1
	27.968	NH ₃ (aq)
PO ₄ -3	47.008	HPO ₄ -2
	32.992	MgHPO ₄ (aq)
	17.363	NaHPO ₄ -

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO ₄ -3	1	H ₂ O	-1	H+1
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO ₄ -3				
MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	-19.444	-1.269	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in mola)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	0.018251	39.336	0	0	0.028147	60.664
NH ₄ +1	0.002881	9.325	0	0	0.028019	90.675
PO ₄ -3	0.00016	0.517	0	0	0.03074	99.483

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 7

pH 7	
ionic strength	0.2579
sum of cation(eq/kg)	1.69E-01
sum of anion(eq/kg)	2.75E-01
charge difference(%)	23.83

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	7.7996E-07

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.23817	0.17554	-0.756
H ₂ PO ₄ ⁻	0.000484	0.000357	-3.447
HPO ₄ ⁻²	0.000767	0.000226	-3.645
Mg ⁺²	0.024464	0.007218	-2.142
MgCl ⁺	0.006844	0.005044	-2.297
Na ⁺¹	0.10259	0.075608	-1.121
NaCl (aq)	0.006268	0.006652	-2.177
NH ₄ ⁺¹	0.010829	0.007981	-2.098

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Na+1	92.339	Na+1
Ca+2	70.663	Ca+2
	13.731	CaSO ₄ (aq)
NH ₄ +1	96.465	NH ₄ +1
PO ₄ -3	29.974	HPO ₄ -2
	18.931	H ₂ PO ₄ -
	37.954	MgHPO ₄ (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO ₄ -3	1	H ₂ O	-1	H+1
MgHPO ₄ :3H ₂ O(s)	-18.175	0	1	Mg+2	1	H+1	1	PO ₄ -3	3	H ₂ O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH ₄ +1	1	PO ₄ -3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase (concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	6.72E-05	1.528	0	0	0.004333	98.472
Mg+2	0.036055	58.344	0	0	0.025742	41.656
NH ₄ +1	0.011226	36.33	0	0	0.019674	63.67
PO ₄ -3	0.002558	8.278	0	0	0.028342	91.722

Selected sweep results (Concentration in mol/l)

Problem no.	pH	Hydroxyapatite	Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	Struvite
		Concentration	Concentration	Concentration	Concentration
1	7	0.000867	0	0.006069	0.019674
2	8	0.000876	0	0	0.02754
3	9	0.000878	0.000556	0	0.027069

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 8

pH 8	
ionic strength	0.2512
sum of cation(eq/kg)	1.60E-01
sum of anion(eq/kg)	2.74E-01
charge difference(%)	26.39

Gas	Partial pressure (atm)
NH ₃ (g)	2.2569E-06

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl ⁻¹	0.23837	0.17587	-0.755
HPO ₄ ⁻²	0.000273	8.09E-05	-4.092
MgCl ⁺	0.006621	0.004885	-2.311
MgHPO ₄ (aq)	0.000336	0.000356	-3.449
Na ⁺¹	0.10274	0.075802	-1.12
NaCl (aq)	0.006306	0.006682	-2.175
NH ₄ ⁺¹	0.00313	0.00231	-2.636

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	68.724	Mg+2
	19.325	MgCl+
Cl-1	94.855	Cl-1
PO4-3	37.322	HPO4-2
	45.948	MgHPO4 (aq)
Na+1	92.475	Na+1
Ca+2	71.225	Ca+2
NH4+1	93.173	NH4+1

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-23.403	-0.123	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-18.636	-0.461	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Mg+2	0.03426	55.436	0	0	0.02754	44.564
NH4+1	0.00336	10.872	0	0	0.02754	89.128
PO4-3	0.000731	2.367	0	0	0.030169	97.633

อัตราส่วนแมกนีเซียม : แอมโมเนียม : ฟอสเฟต เท่ากับ 2:1:1 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุล เท่ากับ 9

pH 9	
ionic strength	0.2493
sum of cation(eq/kg)	1.58E-01
sum of anion(eq/kg)	2.74E-01
charge difference(%)	26.91

Gas	Partial pressure (atm)
NH3 (g)	1.9308E-05

Concentrations and activities of aqueous inorganic species (mol/l)

	Concentration	Activity	Log activity
Cl-1	0.23853	0.17605	-0.754
Mg+2	0.022863	0.006784	-2.169
MgCl+	0.006442	0.004754	-2.323
MgSO4 (aq)	0.003681	0.003898	-2.409
Na+1	0.1028	0.075871	-1.12
NaCl (aq)	0.006321	0.006694	-2.174
NH3 (aq)	0.001064	0.001127	-2.948
NH4+1	0.002677	0.001976	-2.704

Percentage distribution among dissolved and adsorbed species

Component	% of total concentration	Species name
Mg+2	69.154	Mg+2
	19.485	MgCl+
Cl-1	94.921	Cl-1
Na+1	92.531	Na+1

Ca+2	71.449	Ca+2
	14.48	CaSO4 (aq)
NH4+1	69.871	NH4+1
	27.762	NH3 (aq)
PO4-3	37.948	HPO4-2
	45.505	MgHPO4 (aq)

Saturation indices for minerals

Mineral	log IAP	Sat. index	Stoichiometry							
Hydroxyapatite	-44.333	0	5	Ca+2	3	PO4-3	1	H2O	-1	H+1
Mg3(PO4)2(s)	-23.28	0	3	Mg+2	2	PO4-3				
MgHPO4:3H2O(s)	-19.569	-1.394	1	Mg+2	1	H+1	1	PO4-3	3	H2O
Struvite	-13.26	0	1	Mg+2	1	NH4+1	1	PO4-3		

Distribution of components between dissolved, sorbed, and precipitated phase
(concentration in molal)

Component	Total dissolved	% dissolved	Total sorbed	% sorbed	Total precipitated	% precipitated
Ca+2	1.1E-05	0.249	0	0	0.004389	99.751
Mg+2	0.033061	53.499	0	0	0.028736	46.501
NH4+1	0.003831	12.399	0	0	0.027069	87.601
PO4-3	8.64E-05	0.279	0	0	0.030814	99.721



ภาคผนวก ซ

อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY



กระดาษกรองสำหรับกรองผลึกขนาดรูพรุน 20-25 ไมโครเมตร



การตกผลึกจากน้ำเสียสังเคราะห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



น้ำทิ้งฟาร์มสุกรก่อนการตกผลึก



น้ำทิ้งฟาร์มสุกรหลังการตกผลึก



ของแข็งที่กรองได้จากน้ำเสียสังเคราะห์

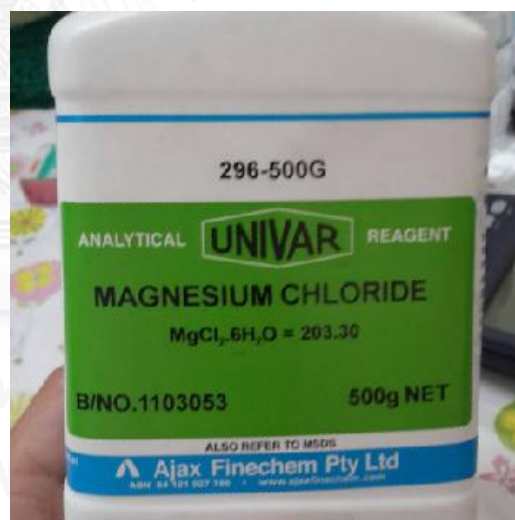
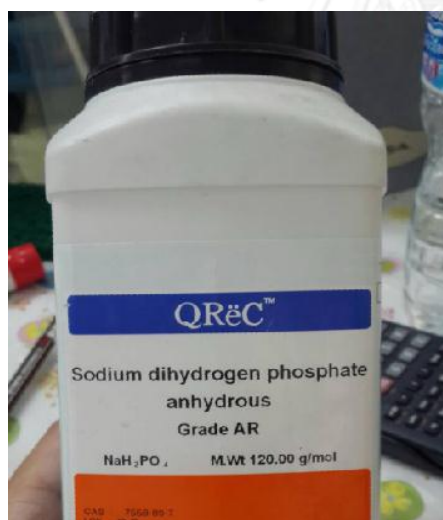
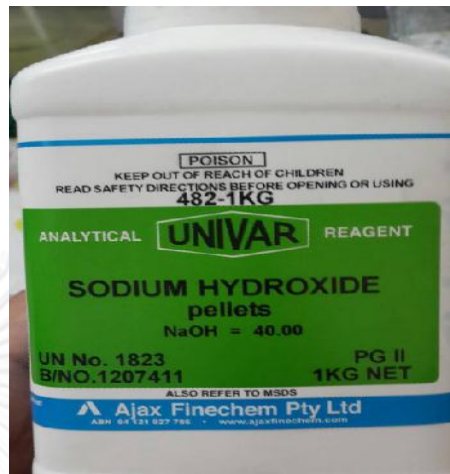
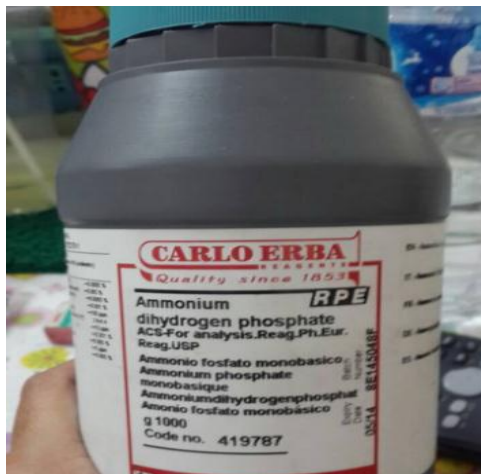


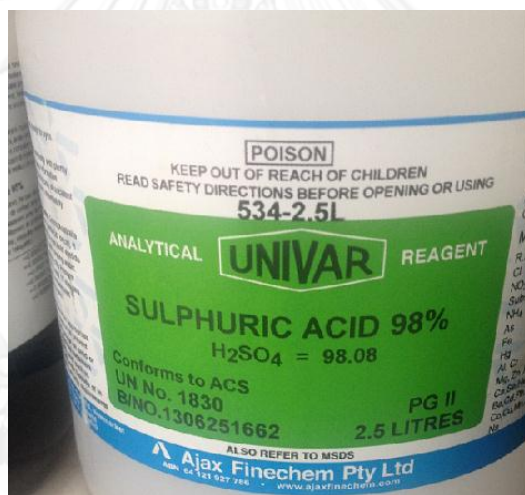
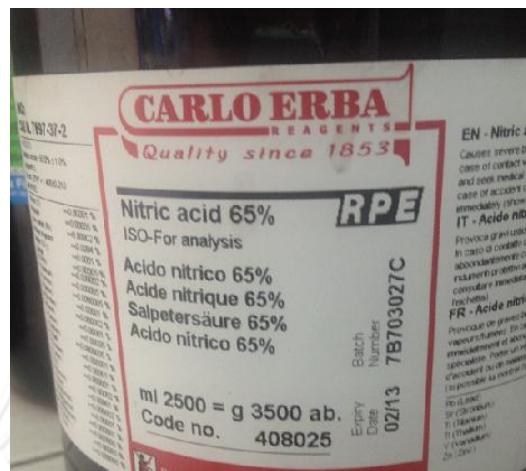
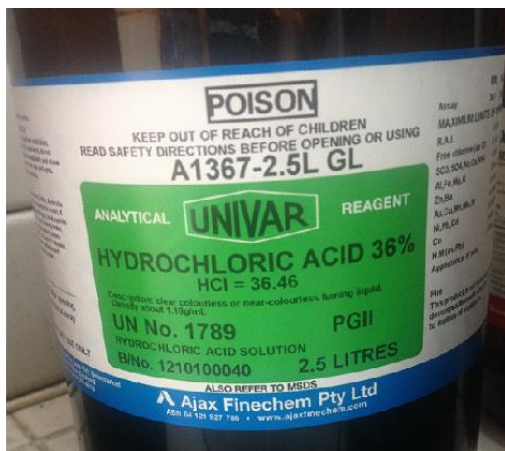
ของแข็งที่กรองได้จากน้ำทิ้งฟาร์มสุกร



ชุดอุปกรณ์การกรองผลึก

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกรรณิการ์ แสงอรุณ เกิดเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ.2528 ที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เมื่อปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY