



รายงานการวิจัย

การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์
เพื่อนำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟต
(Assessment of the Phosphorus Recovery Potential from
Livestock Wastewater for Phosphate Fertilizer Production)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์
เพื่อนำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟต

(Assessment of the Phosphorus Recovery Potential from
Livestock Wastewater for Phosphate Fertilizer Production)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.ญาดา ปิ่นธนา
สาขาวิชานาฏยสังคีตศิลป์
สำนักวิชาสารานุกรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ.2566
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2568

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ.2566 ผู้วิจัยขอใช้โอกาสนี้แสดงความขอบคุณและความซาบซึ้งใจต่อทุกท่านที่มีส่วนทำให้โครงการวิจัยและรายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันดับแรกผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพัฒน์ เป็นตามวา ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาแนะนำในการจัดเตรียมร่างโครงการวิจัย ตลอดจนการอภิปรายผลการศึกษ ขอบขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีณา รองจะโปะ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกฤต เนียมหอม ผู้ซึ่งให้การสนับสนุน และให้คำปรึกษาแนะนำโดยเฉพาะในส่วนการวิเคราะห์ผล และการอภิปรายผล คำแนะนำอันทรงคุณค่าซึ่งช่วยปรับปรุงโครงการวิจัยนี้ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อหน่วยงานที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย รวมถึงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และทรัพยากรอันจำเป็นในการดำเนินงาน ขอบขอบคุณ นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการอนามัยสิ่งแวดล้อม และนักวิทยาศาสตร์ประจำฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการให้ความช่วยเหลือการวิเคราะห์ตัวอย่างต่าง ๆ ในโครงการวิจัยนี้ ขอบขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ประจำฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับความอนุเคราะห์ในการจัดเตรียมตัวอย่างน้ำเสียและข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อให้การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล นันทพงษ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก สำหรับข้อเสนอแนะอันทรงคุณค่าต่อรายงานการวิจัยฉบับนี้ รวมถึงขอขอบคุณครอบครัวและผู้สนับสนุนทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของโครงการวิจัยนี้ ด้วยความเข้าใจ กำลังใจ และการสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน

ญาดา ปินะลา
หัวหน้าโครงการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชื่อโครงการวิจัย: การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เพื่อนำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟต

หัวหน้าโครงการวิจัย: อาจารย์ ดร.ณฐาดา ปินะธา

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ด้วยกระบวนการก่อก่อนทางเคมีของแข็งฟอสเฟต ศึกษาผลการชะละลายฟอสเฟตและผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โดยน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นแหล่งของฟอสฟอรัส ได้แก่ น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ผลการศึกษา พบว่า การก่อก่อนของแข็งฟอสเฟตด้วยน้ำหลังจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิดมีประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 86.73 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 8.5 อัตราส่วนโมลแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส (Mg/P molar ratio) เท่ากับ 1.95 และค่าเฉลี่ยร้อยละฟอสฟอรัสในของแข็งฟอสเฟตอยู่ระหว่างร้อยละ 9.25 – 12.87 ของน้ำหนักแห้ง

ปุ๋ยสูตรไวท์มีอัตราการชะละลายฟอสเฟตช้ากว่าปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) ซึ่งมีร้อยละสะสมของการชะละลายฟอสเฟตเฉลี่ยวันที่ 30 ของการทดลอง เท่ากับ ร้อยละ 50.56, 61.96 และ 65.55 ตามลำดับ โดยจลนศาสตร์การชะละลายฟอสเฟตของปุ๋ยทั้ง 3 ชนิด เป็นไปตามสมการการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง ของแบบจำลอง Shrinking core model ผลของปุ๋ยฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของต้นดาวเรือง พบว่า ต้นดาวเรืองมีความสูงเฉลี่ยและความยาวรากเฉลี่ยใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง ในขณะที่ชุดควบคุมมีจำนวนใบมากกว่าชุดการทดลองอื่น ปุ๋ยสูตรไวท์และปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตส่งผลให้ต้นดาวเรืองมีจำนวนดอกมากและดอกมีขนาดใหญ่ การกระจายตัวของฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของพืช ของปุ๋ยสูตรไวท์และปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตมีลักษณะและระดับที่ใกล้เคียงกัน แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของปุ๋ยสูตรไวท์สำหรับการนำมาใช้เป็นปุ๋ยทางเลือกทดแทนปุ๋ยฟอสเฟตแบบดั้งเดิมได้

สำหรับการประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มสุกร พบว่า การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร 15.47 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ปุ๋ยสูตรไวท์ ให้ผลผลิตผลิตภัณฑ์ปุ๋ยสูตรไวท์ 10.95 กิโลกรัมต่อวัน หรือเทียบเท่ากับฟอสฟอรัส 1.28 กิโลกรัมต่อวัน การประเมินเชิงเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก พบว่า ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและการลงทุนรวมต่ำสุด เท่ากับ 2,769.96 และ 3,943.10 ดอลลาร์สหรัฐต่อปี ตามลำดับ รายได้จากการขายผลิตภัณฑ์ปุ๋ยสูตรไวท์ประมาณการเท่ากับ 3,778.04 ดอลลาร์สหรัฐ โดยมีค่าใช้จ่ายการผลิตต่อหน่วย เท่ากับ 6.56 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส มีระยะเวลาคืนทุนที่สั้นที่สุด 3.91 ปี และการเพิ่มค่าใช้จ่ายหรือลดรายได้ร้อยละ 5 จะขยายระยะเวลาคืนทุนนานขึ้นร้อยละ 18

คำสำคัญ: การปลดปล่อยธาตุอาหาร; การนำกลับฟอสฟอรัส; ปุ๋ยฟอสเฟต; น้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์; ศักยภาพการนำของเสียมาใช้ประโยชน์

Project title: Assessment of the Phosphorus Recovery Potential from Livestock Wastewater for Phosphate Fertilizer Production

Principal investigator: Dr.Yada Pinatha

Abstract

This research project aims to investigate phosphorus (P) recovery from livestock wastewater through the chemical precipitation process, examine phosphate dissolution kinetic and effects on plant growth, and assess the feasibility of P recovery from livestock wastewater based on techno-economic aspect. Swine wastewater was identified as a viable P source in this study. The results found that P recovery efficiency from swine effluent from covered lagoon system averaged 86.73% at a pH of 8.5, with a magnesium-to-phosphorus (Mg/P) molar ratio of 0.59. The percentage of P content in the recovered phosphate solids averaged between 9.25 – 12.87% of dry weight.

Struvite fertilizer showed a slower phosphate dissolution rate compared to Triple Superphosphate (TSP) and Monoammonium Phosphate (MAP), with cumulative phosphate release on day 30 averaging 50.56%, 61.96% and 65.55%, respectively. Phosphate dissolution kinetics of these fertilizers aligned with the Shrinking Core Model's film diffusion control. The effect of phosphate fertilizers on marigold growth indicated similar plant height and root length across all experiments, although the control group had more leaves. Struvite and TSP resulted in greater number and size of flowers. The P distribution patterns in plant components of Struvite appear comparable to TSP, suggesting Struvite's potential as an alternative to conventional phosphate fertilizers.

The potential for P recovery from swine wastewater was further assessed, estimating that treating $15.47 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ could yield struvite crystals $10.95 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, equivalent to $1.28 \text{ kg P} \cdot \text{d}^{-1}$. A techno-economic assessment for small-scale swine farms indicated minimum annual operating and investment costs of USD 2,769.96 and USD 3,943.10, respectively. Estimated revenue from struvite sales amounted to USD 3,778.04, with a production cost at $6.56 \text{ USD} \cdot \text{kg P}^{-1}$, resulting in a minimum payback period of 3.91 years. Sensitivity analysis showed that a 5% increase in costs or decrease in revenue would extend the payback period by approximately 18%.

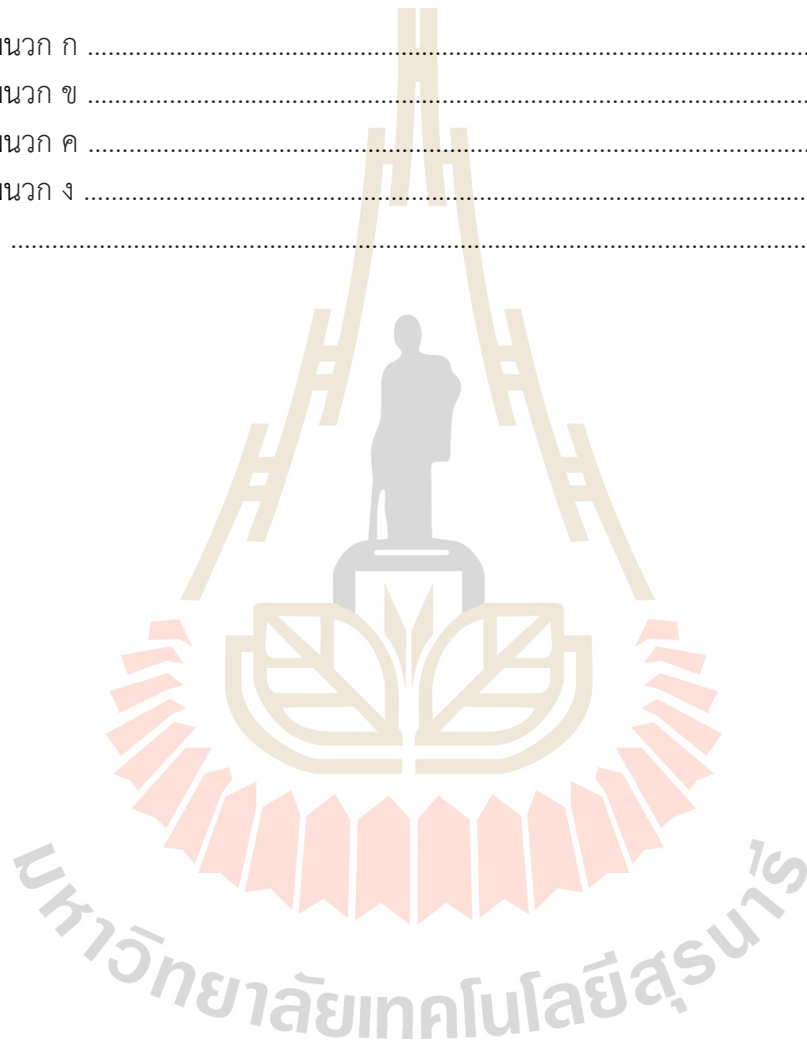
Keywords: Nutrient dissolution; Phosphorus recovery; Phosphate fertilizer; Livestock wastewater; Waste recovery potential

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
สมมติฐานการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ตัวแปรของการวิจัย	4
นิยามศัพท์เฉพาะ	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
ฟอสฟอรัส	6
น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์	9
การบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย	11
การนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางเคมี	14
การปลดปล่อยธาตุอาหาร (Nutrient leaching)	15
การประเมินเชิงเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ (Techno-economic assessment; TEA)	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง	20
วิธีการทดลอง	20
การคำนวณ	22
การวิเคราะห์ข้อมูล	26
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	
คุณลักษณะของน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์	27
คาดการณ์การเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์	29
การนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียด้วยกระบวนการก่อก้อนทางเคมี	33
การปลดปล่อยธาตุอาหารจากของแข็งฟอสเฟต (Phosphate leaching)	40
การนำของแข็งฟอสเฟตไปใช้ในการปลูกพืช	44
การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
สรุปผลการศึกษา	65
ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	77
ภาคผนวก ข	80
ภาคผนวก ค	86
ภาคผนวก ง	90
ประวัติผู้วิจัย	94



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ประเภทของสารประกอบฟอสเฟต (phosphate compounds)	6
ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบของน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์	9
ตารางที่ 2-3 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร	10
ตารางที่ 2-4 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด	11
ตารางที่ 4-1 คุณลักษณะของน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์	27
ตารางที่ 4-2 พารามิเตอร์จลนศาสตร์ของการชะละลายฟอสเฟต	44
ตารางที่ 4-3 จำนวนดอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกดาวเรือง (วันที่ 45)	47
ตารางที่ 4-4 คาคำนวณปริมาณของแข็งฟอสเฟตที่สามารถผลิตได้จากน้ำเสียฟาร์มสุกร	53
ตารางที่ 4-5 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงเทคนิคโครงสร้างศาสตร์ของระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของ ผลิตภัณฑ์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร	58
ตารางที่ 4-6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการผลิตวัสดุไวท์โดยชนิดของน้ำเสียและวิธีการ นำกลับแบบต่าง ๆ	61



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1-1 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	3
รูปที่ 2-1 วัฏจักรฟอสฟอรัส	8
รูปที่ 2-2 แหล่งที่มาของฟอสฟอรัสสู่สิ่งแวดล้อม	9
รูปที่ 2-3 เมตาบอลิซึมของ PAOs ภายใต้สภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน	13
รูปที่ 2-4 การปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดิน	16
รูปที่ 2-5 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิด์เบด	18
รูปที่ 4-1 ค่าคงที่สมดุลสารละลายในน้ำเสียฟาร์มสุกรก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อ ปิดที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 0 – 14	31
รูปที่ 4-2 ค่าคงที่สมดุลสารละลายในน้ำเสียฟาร์มสุกรหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แบบบ่อปิดที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 0 – 14	32
รูปที่ 4-3 กราฟ pC-pH การเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่าง ๆ ..	33
รูปที่ 4-4 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสและ ร้อยละฟอสฟอรัสในของแข็งฟอสเฟต	34
รูปที่ 4-5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลึกของแข็งฟอสเฟตจาก SEM	36
รูปที่ 4-6 องค์ประกอบธาตุของผลึกของแข็งฟอสเฟตจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM - EDS สำหรับของแข็งฟอสเฟตจากน้ำเสียฟาร์มสุกร	37
รูปที่ 4-7 XRD pattern ของผลิตภัณฑ์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรหลังออกจากระบบผลิตก๊าซ ชีวภาพ	38
รูปที่ 4-8 การกระจายขององค์ประกอบผลึกของแข็งฟอสเฟตที่ได้จากการนำกลับฟอสฟอรัส จากน้ำเสียฟาร์มสุกร	39
รูปที่ 4-9 อัตราการปลดปล่อยฟอสเฟต (phosphate leaching rate) ของแข็งฟอสเฟตจาก ฟาร์มสุกรเทียบกับปุ๋ยเคมี	41
รูปที่ 4-10 จลนศาสตร์การชะละลายของฟอสเฟตในดินตามแบบจำลอง Shrinking core model	43
รูปที่ 4-11 ความสูงของต้นดาวเรืองจากการทดลองด้วยของแข็งฟอสเฟตจากฟาร์มสุกร เปรียบเทียบกับปุ๋ยฟอสเฟตเคมี	45
รูปที่ 4-12 จำนวนใบของต้นดาวเรืองจากการทดลองด้วยของแข็งฟอสเฟตจากฟาร์มสุกร เปรียบเทียบกับปุ๋ยฟอสเฟตเคมี	46
รูปที่ 4-13 ความยาวรากของต้นดาวเรืองจากการทดลองด้วยของแข็งฟอสเฟตจากฟาร์มสุกร เปรียบเทียบกับปุ๋ยฟอสเฟตเคมี	48
รูปที่ 4-14 เปรียบเทียบผลผลิตสะสมของต้นดาวเรือง (กรัม/ต้น) ของการทดลอง แบ่งตาม ส่วนต่างๆ ของพืช	49
รูปที่ 4-15 การกระจายของฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของพืช จากการทดลองด้วยของแข็ง ฟอสเฟตจากฟาร์มสุกรเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีและชุดทดลอง	50

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4-16 แผนผังโรงเรือนเลี้ยงสุกรและระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	52
รูปที่ 4-17 แผนผังระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของฟาร์มสุกร 55	55
รูปที่ 4-18 ค่าใช้จ่ายของระบบก่อดักตะกอนทางเคมีฟาร์มสุกรขนาดเล็ก 57	57
รูปที่ 4-19 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของฟาร์มสุกรจากน้ำเสียฟาร์มสุกร	60



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการในการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อการเกษตรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลปุ๋ยเคมีของประเทศไทย พบว่า ร้อยละ 100 ของปุ๋ยเคมีที่ใช้ภายในประเทศไทยต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยนำเข้าแม่ปุ๋ยประมาณปีละ 5 ล้านตัน เพื่อใช้ในการผลิตสินค้าเกษตรสำหรับการอุปโภคบริโภค รวมถึงรองรับการขยายตัวของการใช้พืชพลังงาน (DOA, 2024) หนึ่งในธาตุอาหารที่สำคัญที่พืชต้องการ ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus) ซึ่งเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยเป็นส่วนประกอบของฟอสโฟลิพิด เยื่อหุ้มเซลล์ กรดนิวคลีอิก และฟอสโฟโปรตีน ฟอสฟอรัสในร่างกายมนุษย์มักจะมีอยู่ในรูปฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ซึ่งมีหน้าที่สำคัญในการเป็นบัฟเฟอร์ และต้นกำเนิดของอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine triphosphate; ATP) ซึ่งใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับเซลล์ต่างๆ ทำหน้าที่ในการควบคุมเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน สิ่งมีชีวิตมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักแห้ง ด้วยเหตุนี้ฟอสฟอรัสจึงจัดเป็นหนึ่งในองค์ประกอบของห่วงโซ่อาหาร สารประกอบฟอสฟอรัสถูกนำมาใช้ในชีวิตประจำวันมากมาย เช่น ผลิตปุ๋ยเพื่อใช้ในการเกษตร อาหารสัตว์ และผลิตภัณฑ์ซักล้างทำความสะอาดหรือผงซักฟอก เป็นต้น

Cordell et al. (2009) ได้รายงานว่าแหล่งแร่หินฟอสเฟตซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของปุ๋ยฟอสฟอรัสกำลังจะหมดลงไปจากโลกใน 50 – 100 ปีข้างหน้า และเสนอแนะให้ทำการนำกลับและรีไซเคิลฟอสฟอรัสจากของเสียกลับไปใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูก เพื่อหลีกเลี่ยงมหันตภัยของสถานะการขาดแคลนอาหารของประชากรโลกอันเนื่องมาจากปริมาณความต้องการใช้แหล่งแร่หินฟอสเฟตทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาความต้องการฟอสฟอรัสในตลาดโลกขยายตัวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 1.9 (Heffer and Prud'homme, 2014) ในขณะเดียวกันสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2563) ได้มีการคาดการณ์ว่าเนื้อที่เพาะปลูกพืชเศรษฐกิจมีทิศทางขยายพื้นที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มการเพิ่มสูงขึ้นของดัชนีราคาอาหาร และจากข้อมูลดังกล่าวจึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าปริมาณความต้องการใช้ปุ๋ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการใช้พื้นที่เพาะปลูกของประเทศเช่นกัน จากแนวโน้มการเพิ่มปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีดังกล่าวทำให้มีการศึกษาการประเมินการเคลื่อนตัวของฟอสฟอรัสผ่านการวิเคราะห์การไหลของสาร (Mass Flow Analysis) ซึ่งพบว่า การเคลื่อนตัวของฟอสฟอรัสในเขตเมืองชี้ให้เห็นว่าปลายทางที่ฟอสฟอรัสเคลื่อนตัวไปสะสม ได้แก่ ขยะมูลฝอย เศษอาหาร น้ำเสียชุมชน และสิ่งปฏิกูล (Thitanuwat et al., 2016) และการเคลื่อนตัวของฟอสฟอรัสในภาคเกษตรกรรม ชี้ให้เห็นว่าปลายทางที่ฟอสฟอรัสเคลื่อนตัวไปสะสม ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์ มูลสัตว์ ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์ม และตะกอนปากแม่น้ำ (Prathumchai et al., 2018)

จากข้อมูลข้างต้น ทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับฟอสฟอรัสจากของเสียประเภทต่าง ๆ เช่น มูลสัตว์ (Pedizzi et al., 2018) น้ำปัสสาวะ (Pinatha et al., 2020; Ronteltap et al., 2007) ขยะมูลฝอยชุมชน (Zabaleta and Rodic, 2015) น้ำทิ้งจากบ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

(supernatant) (Rahaman et al., 2014) และน้ำเสียจากฟาร์มสุกร (Amini et al., 2017; Wang et al., 2019) เป็นต้น ในของเสียเหล่านี้ น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์เป็นหนึ่งในของเสียที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำกลับฟอสฟอรัส เนื่องจากมีความเข้มข้นของธาตุอาหารสูง ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เมื่อเทียบกับน้ำเสียจากชุมชน การนำฟอสฟอรัสจากน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ไม่เพียงแค่อนุรักษ์ทรัพยากรของแร่ฟอสฟอรัสที่มีอยู่อย่างจำกัด แต่ยังช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำ (Strokal et al., 2014)

การศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ กระบวนการทางชีวภาพ เช่น การทำปุ๋ยหมักจากขยะมูลฝอย เป็นต้น และกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างรวดเร็ว และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นยังชะลอการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสู่พืช ทำให้พืชสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้อย่างช้า ๆ ได้แก่ การก่อดตะกอนทางเคมีในรูปของแข็งฟอสเฟต เช่น สตรูไวท์ (Struvite) และแคลเซียมฟอสเฟต (Le Corre et al., 2009; Tervahauta et al., 2014) โดยสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้จริง การทำให้เกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตเป็นการนำกลับฟอสฟอรัสที่มีประสิทธิภาพสูงและมีค่าใช้จ่ายไม่มาก ทั้งยังช่วยกำจัดฟอสฟอรัสและแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสียอีกด้วย (Wang et al., 2005) แต่ในประเทศไทยยังมีข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับฟอสฟอรัสกลับมาใช้ประโยชน์ในรูปของปุ๋ยฟอสเฟตอย่างจำกัด

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการศึกษาศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์เพื่อนำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟต โดยเริ่มจากการศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์เพื่อเลือกน้ำเสียที่เหมาะสมต่อการนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการก่อดตะกอนทางเคมี ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เมื่อได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งฟอสเฟตแล้ว จะทำการศึกษาการปลดปล่อยของธาตุอาหารและผลต่อการเจริญเติบโตของพืชจากปุ๋ยฟอสเฟตที่ผลิตได้จากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยละลายช้าเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมี ผลจากการศึกษานี้จะถูกรวบรวมเพื่อนำมาประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์สำหรับการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต โครงการวิจัยนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นในการนำฟอสฟอรัสจากของเสียกลับมาใช้ประโยชน์เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งานของประเทศ ลดการพึ่งพาการนำเข้าปุ๋ยเคมีและพลังงาน และเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานและอาหารในอนาคตอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

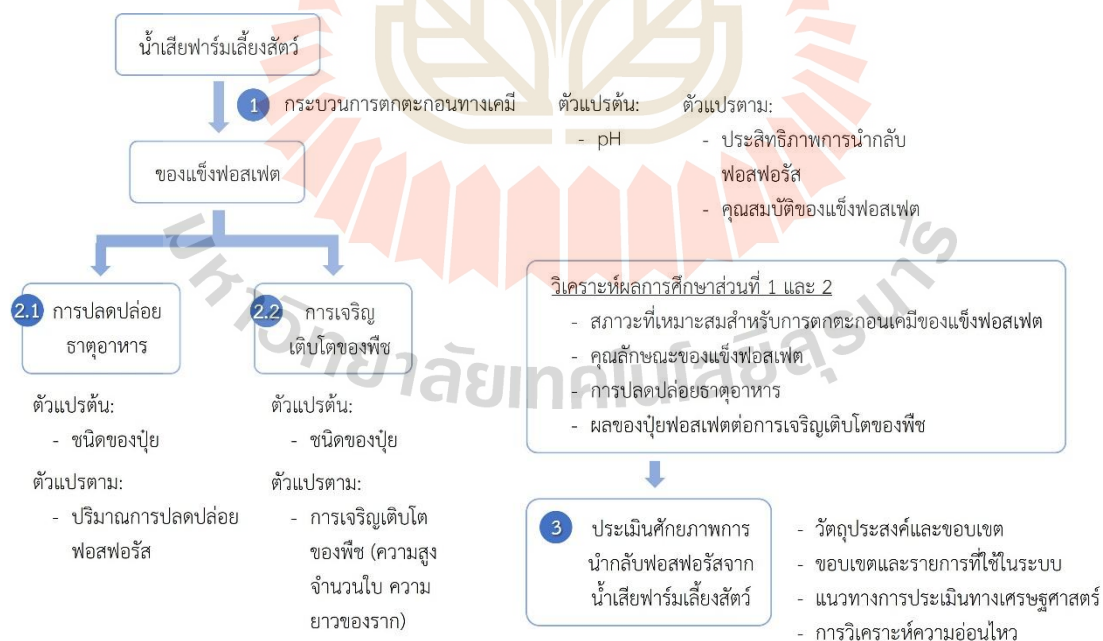
- 1) เพื่อนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ให้อยู่ในรูปของแข็งฟอสเฟตเพื่อนำมาใช้เป็นปุ๋ยฟอสเฟต
- 2) เพื่อศึกษาการปลดปล่อยของธาตุอาหารและผลต่อการเจริญเติบโตของพืชจากปุ๋ยฟอสเฟตที่ผลิตได้จากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์เปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมี
- 3) เพื่อประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์เพื่อนำมาผลิตเป็นปุ๋ยฟอสเฟต

1.3 สมมติฐานการวิจัย

- 1) น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นแหล่งของฟอสฟอรัสในการก่อก้อนทางเคมีให้เป็นของแข็งฟอสเฟต
- 2) ผลิตภัณฑ์ของแข็งฟอสเฟตสามารถชะละลายฟอสฟอรัสได้มากกว่าร้อยละ 50 และช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมี
- 3) น้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์มีศักยภาพที่จะนำมาผลิตของแข็งฟอสเฟตและมีความเป็นไปได้ในเชิงเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ (techno-economic feasibility)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการ “การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์เพื่อนำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟตสำหรับใช้ประโยชน์ทางการเกษตร” มีวัตถุประสงค์เพื่อนำฟอสเฟตที่ละลายในน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์กลับมาในรูปของแข็งที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งสามารถนำไปเก็บรอที่จะใช้นาน ชนส่ง และใช้งานได้สะดวก เพื่อใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเพาะปลูกพืช โดยเก็บรวบรวมน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อนำมาศึกษาปัจจัยสำคัญต่อการก่อผลึกของแข็งฟอสเฟต ได้แก่ ความเป็นกรดและด่าง (pH) จากนั้นจะนำผลึกของแข็งฟอสเฟตไปใช้เป็นแหล่งแร่ธาตุสำรองสำหรับพืช โดยการศึกษาการปลดปล่อยของฟอสฟอรัสในดิน (phosphate leaching) และผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (ต้นดาวเรือง) จากผลึกของแข็งฟอสเฟต และประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์เพื่อนำมาผลิตเป็นปุ๋ยฟอสเฟตสำหรับใช้ประโยชน์ทางการเกษตร โดยสามารถนำเสนอเป็นกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย แสดงดังรูปที่ 1-1



รูปที่ 1-1 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

1.5 ตัวแปรของการวิจัย

1.3.1 การนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการก่ตะกอนทางเคมี

(1) ตัวแปรต้น

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

(2) ตัวแปรตาม

- ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัส
- คุณสมบัติของแข็งฟอสเฟต

(3) ตัวแปรควบคุม

- ความเร็วรอบในการกวน
- ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา
- ปริมาณน้ำเสีย

1.3.2 การปลดปล่อยธาตุอาหารจากของแข็งฟอสเฟต

(1) ตัวแปรต้น

- ชนิดของปุ๋ย

(2) ตัวแปรตาม

- ประสิทธิภาพการปลดปล่อยฟอสฟอรัส

(3) ตัวแปรควบคุม

- ปริมาณฟอสฟอรัสในของแข็ง (ปุ๋ย)
- ระยะเวลาในการทดลอง
- ปริมาณดินในกระถาง
- ปริมาณน้ำที่ไ้รดดิน

1.3.3 การนำของแข็งฟอสเฟตไปใช้ในการปลูกพืช

(1) ตัวแปรต้น

- ชนิดของปุ๋ย

(2) ตัวแปรตาม

- การเจริญเติบโตของพืช (ความสูงพืช จำนวนใบ ความยาวของราก)

(3) ตัวแปรควบคุม

- ปริมาณฟอสฟอรัสในของแข็ง (ปุ๋ย)
- ระยะเวลาในการทดลอง
- ปริมาณดินในกระถาง
- ปริมาณน้ำที่ไ้รดดิน

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1) การก่ตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) หมายถึง ปฏิบัติการรวมตัวกันของไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำ ในการศึกษาี้หมายถึง การก่ตะกอนทางเคมีของแข็งฟอสเฟต

กล่าวคือ ฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) จะรวมตัวกับไอออนบวกของโลหะ เช่น แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และ แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เป็นต้น เกิดเป็นตะกอนของแข็งฟอสเฟตซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้

2) การชะละลาย (leaching) หมายถึง การละลายของสารจากแหล่งดั้งเดิมโดยการให้ของเหลวไหลผ่าน ในการศึกษานี้หมายถึง การชะละลายของธาตุอาหาร (ฟอสฟอรัส) จากปุ๋ยสูตรดินและน้ำชะ

3) น้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการล้างทำความสะอาดโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ ซึ่งเป็นการกวาดล้างเอาสิ่งขี้ถ่าย (มูลและปัสสาวะ) ของสัตว์ เช่น สุกร วัว แกะ แพะ เป็นต้น ซึ่งหมายรวมถึงน้ำที่เกิดขึ้นจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น ปลา กุ้ง เป็นต้น

4) ฟอสเฟต (Phosphate) หมายถึง โครงสร้างเคมีของฟอสฟอรัสที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เป็นสารประกอบไอออนชนิดลบของฟอสฟอรัส ประกอบด้วย โมเลกุลของฟอสฟอรัสและออกซิเจน (PO_4^{3-})

5) สตรูไวท์ (Struvite) หมายถึง ของแข็งฟอสเฟตชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) มีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยละลายช้า

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยฟอสเฟต เพื่อเพิ่มการหมุนเวียนธาตุอาหาร โดยเฉพาะฟอสฟอรัส ในภาคการเกษตร
- 2) ลดมลพิษสิ่งแวดล้อม โดยลดปริมาณฟอสฟอรัสที่ปนเปื้อนออกมากับน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ที่จะปลดปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ
- 3) แนวทางการขยายไปสู่การผลิตปุ๋ยฟอสเฟตอย่างเป็นระบบ เพื่อนำปุ๋ยที่ผลิตได้หมุนเวียนมาใช้ภายในฟาร์มหรือจำหน่าย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัส (P) เป็นธาตุอาหารสำคัญที่มีบทบาทในกระบวนการเมตาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต โดยเป็นส่วนประกอบของเซลล์ ส่วนประกอบทางพันธุกรรม (DNA และ RNA) และเป็นส่วนสำคัญในการถ่ายโอนพลังงาน ในรูปของอะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine Triphosphate; ATP) นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสยังเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการผลิตอาหารอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูงและไม่สามารถพบได้ในรูปอิสระในธรรมชาติ โดยทั่วไปจะพบในรูปของสารประกอบกับออกซิเจน รวมตัวกันเป็นสารประกอบฟอสเฟต สารประกอบฟอสเฟตสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ (1) ออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate) (PO_4^{3-}) (2) คอนเดนส์ฟอสเฟต (condensed phosphate) ซึ่งประกอบด้วยเมตาฟอสเฟต (metaphosphate) ไพโรฟอสเฟต (pyrophosphate) และโพลีฟอสเฟต (polyphosphate) คอนเดนส์ฟอสเฟตเกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลออร์โธฟอสเฟตสองตัวขึ้นไปเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างแบบเชิงเส้น P-O-P ในรูปโพลีฟอสเฟต หรือเป็นวงแบบเมตาฟอสเฟต และ (3) ออร์แกนิกฟอสเฟตหรือฟอสเฟตอินทรีย์ (organic phosphate) เกิดจากการที่โมเลกุลออร์โธฟอสเฟตเชื่อมติดกับสารประกอบอินทรีย์ เช่น ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) นิวคลีโอไทด์ (nucleotides) ฟอสโฟเอไมด์ (phosphoamides) เป็นต้น การจำแนกประเภทของสารประกอบฟอสเฟต แสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ประเภทของสารประกอบฟอสเฟต (phosphate compounds)

ประเภท	โครงสร้างทางเคมี	สารประกอบสำคัญ	pK_a^* at 25°C
ออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate)	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{O}-\text{P}-\text{O}^- \\ \\ \text{O}^- \end{array}$	H_3PO_4 , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} complexes	$\text{pK}_{a,1} = 2.1$ $\text{pK}_{a,2} = 7.2$ $\text{pK}_{a,3} = 12.3$
โพลีฟอสเฟต (Polyphosphates)	$\begin{array}{c} \text{O} \qquad \qquad \text{O} \\ \qquad \qquad \\ \text{O}-\text{P}-\text{O}-\text{P}-\text{O}^- \\ \qquad \qquad \\ \text{O}^- \qquad \qquad \text{O}^- \end{array}$	$\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$, $\text{H}_3\text{P}_2\text{O}_7^-$, $\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7^{2-}$, $\text{HP}_2\text{O}_7^{3-}$, $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, $\text{HP}_2\text{O}_7^{3-}$ complexes	$\text{pK}_{a,1} = 1.52$ $\text{pK}_{a,2} = 2.4$ $\text{pK}_{a,3} = 6.6$ $\text{pK}_{a,4} = 9.3$
	Pyrophosphate (ไพโรฟอสเฟต)		

ตารางที่ 2-1 ประเภทของสารประกอบฟอสเฟต (phosphate compounds) (ต่อ)

ประเภท	โครงสร้างทางเคมี	สารประกอบสำคัญ	pK _a * at 25°C
		$\text{H}_3\text{P}_3\text{O}_{10}^{2-}$, $\text{H}_2\text{P}_3\text{O}_{10}^{3-}$, $\text{HP}_3\text{O}_{10}^{4-}$, $\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$, $\text{HP}_3\text{O}_{10}^{4-}$ complexes	$\text{pK}_{a,3} = 2.3$ $\text{pK}_{a,4} = 6.5$ $\text{pK}_{a,5} = 9.2$
เมตาฟอสเฟต (Metaphosphates)	Triphosphate (ไตรโพลีฟอสเฟต) 	$\text{HP}_3\text{O}_9^{2-}$, $\text{P}_3\text{O}_9^{3-}$	$\text{pK}_{a,3} = 2.1$
ฟอสเฟตอินทรีย์ (Organic phosphates)	Trimetaphosphate (ไตรเมตาฟอสเฟต) 	Very many types including phospholipids, sugar, nucleotides, phosphoamides, etc.	
	Glucose 6-phosphate (กลูโคส-6-ฟอสเฟต)		

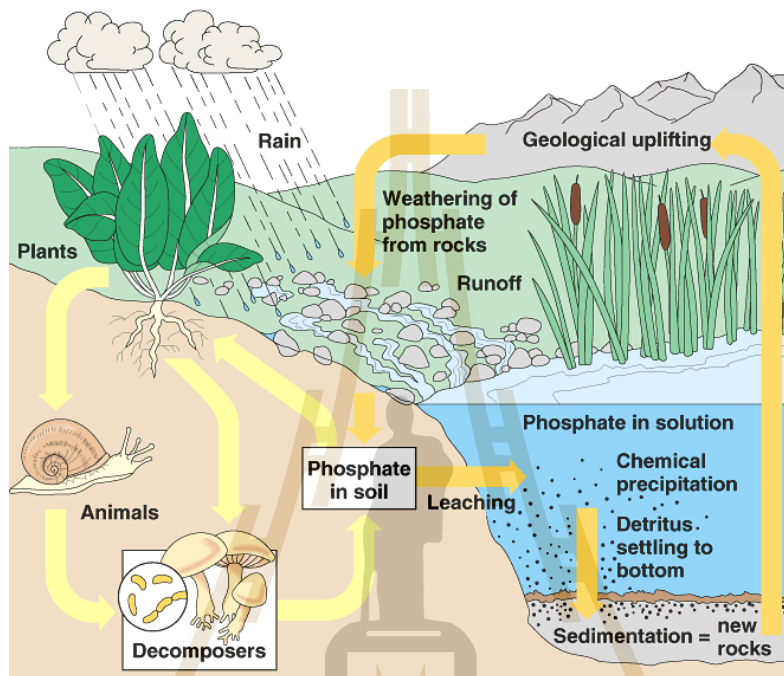
ที่มา: Snoeyink and Jenkins (1980)

* pK_a คือ ค่าคงที่ในการแตกตัวของกรด

2.1.1 วัฏจักรฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสแตกต่างจากธาตุสำคัญอื่นๆ เช่น คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) เนื่องจากไม่พบฟอสฟอรัสในบรรยากาศ โดยฟอสฟอรัสจะหมุนเวียนหลัก ๆ ผ่านระบบการผลิตและการบริโภคอาหาร (Childers et al., 2011) วัฏจักรฟอสฟอรัสเริ่มต้นจากหินฟอสฟอรัสซึ่งนำมาใช้ในการผลิตปุ๋ยฟอสฟอรัสสำหรับการเจริญเติบโตของพืชและการผลิตอาหารสัตว์ พืชจะดูดซึมฟอสฟอรัสอินทรีย์เข้าไปในเซลล์ จากนั้นฟอสฟอรัสจะเคลื่อนย้ายไปยังสัตว์ผ่านการบริโภค ฟอสฟอรัสในเซลล์ของพืชและสัตว์จะถูกรวมเข้ากับโมเลกุลอินทรีย์ เช่น อะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (ATP) กรดไรโบนิวคลีอิก (RNA) และกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (DNA) เป็นต้น จุลินทรีย์ในดินจะทำหน้าที่เปลี่ยนฟอสฟอรัสอินทรีย์จากเซลล์ที่ตายของพืช/สัตว์และจากมูลสัตว์ให้กลับมาเป็น

ฟอสฟอรัส อนินทรีย์ ซึ่งฟอสฟอรัสจะหมุนเวียนกลับคืนสู่ดินอีกครั้ง ฟอสฟอรัสจะปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ ผ่านการชะล้าง (runoff) แต่ก็อาจปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำได้จากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ จากภาคครัวเรือน การเกษตร และอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลให้ฟอสฟอรัสเหล่านี้มักสะสมอยู่ในก้นทะเลสาบหรือมหาสมุทรในรูปของตะกอน วัฏจักรฟอสฟอรัสแบบเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นภายในระบบนิเวศทางน้ำด้วยเช่นกัน วัฏจักรฟอสฟอรัส แสดงดังรูปที่ 2-1

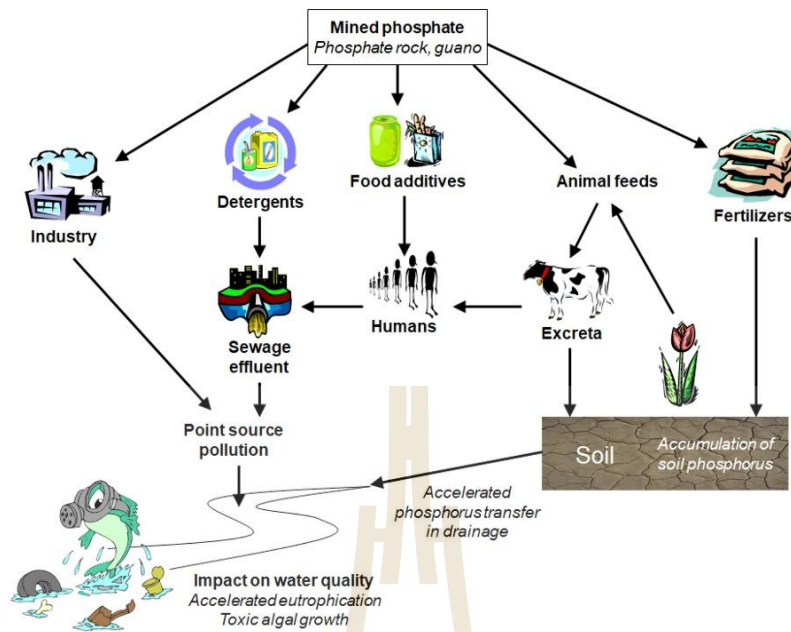


รูปที่ 2-1 วัฏจักรฟอสฟอรัส

(ที่มา: http://www.bio.miami.edu/ecosummer/lectures/lec_biogeochemical.html)

2.1.2 การปนเปื้อนของฟอสฟอรัสสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

แหล่งที่มาของฟอสฟอรัสในน้ำ ประกอบด้วย (1) จากธรรมชาติ เช่น การละลายของแร่ฟอสเฟตลงสู่แหล่งน้ำ การสะสมจากเศษซากพืชซากสัตว์ เป็นต้น และ (2) จากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ได้แก่ น้ำทิ้งจากชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม และการเกษตร เป็นต้น การปนเปื้อนของฟอสฟอรัสสู่แหล่งน้ำธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นได้จากการที่น้ำจากแหล่งต่าง ๆ ปนเปื้อนฟอสฟอรัสและถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (เช่น อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ซักล้าง อุตสาหกรรมปุ๋ย และอุตสาหกรรมทางการเกษตร เช่น อุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น) น้ำทิ้งจากชุมชน (จากผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน เช่น น้ำยาซักล้าง น้ำยาล้างจาน ยาสีฟัน รวมถึงสิ่งขับถ่ายจากมนุษย์ เช่น ปัสสาวะ อุจจาระ เป็นต้น) และการเกษตร (จากมูลสัตว์ น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ การใช้ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยในพื้นที่เพาะปลูก เป็นต้น) ซึ่งฟอสฟอรัสจากกิจกรรมต่าง ๆ อาจปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำโดยตรง หรือปนเปื้อนลงสู่ดินแล้วถูกน้ำชะละลายจากดินลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ การปนเปื้อนของฟอสฟอรัสสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 แหล่งที่มาของฟอสฟอรัสสู่สิ่งแวดล้อม
(ที่มา: Turner and Raboy, 2019)

2.2 น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์

2.2.1 คุณลักษณะของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์

น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์เศรษฐกิจ เช่น ฟาร์มสุกร (swine or piggery farm) และ ฟาร์มโคนม (dairy farm) เป็นต้น เป็นแหล่งของธาตุอาหารที่เหมาะสมสำหรับน้ำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากประกอบด้วยธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองของพืช การนำกลับธาตุอาหารจากน้ำเสียในรูปของแข็งฟอสเฟตเป็นการกำจัดธาตุอาหารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากภาคเกษตรกรรม ช่วยให้สามารถหมุนเวียนธาตุอาหารกลับมาสู่วงจรการผลิตอาหาร เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางอาหาร และช่วยลดปริมาณธาตุอาหารที่จะปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) อีกด้วย องค์ประกอบของน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ แสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบของน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์

พารามิเตอร์	ตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์			
	ฟาร์มสุกร ^a	ฟาร์มสุกร ^b	ฟาร์มสุกร ^c	ฟาร์มโคนม ^d
pH	8.04 ± 0.04	6.7 ± 0.1	7.10 ± 0.1	4.35
NH ₄ -N (mg·L ⁻¹)	194.3 ± 2.8 ^e	385 ± 5	251.6 ± 30	600
PO ₄ -P (mg·L ⁻¹)	99.2 ± 1.6	55 ± 1	96.3 ± 30	698
K (mg·L ⁻¹)	-	31.0 ± 1.7	-	1,640
Mg (mg·L ⁻¹)	27.5 ± 3.2	4.5 ± 0.2	12.31 ± 1.5	108
Ca (mg·L ⁻¹)	6.4 ± 0.8	36.8 ± 0.9	90.23 ± 1.5	1,310

หมายเหตุ: (-) = ไม่มีข้อมูล

c = Wang et al. (2019)

a = Guam et al. (2021)

d = Numviyimana et al. (2022)

b = You et al. (2021)

e = Nitrogen as TAN

อย่างไรก็ตาม การนำน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ไปใช้เป็นปุ๋ยโดยตรงไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากก่อให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็น ไม่สะดวกต่อการใช้งาน และไม่ถูกสุขลักษณะ (Tun et al., 2016) ดังนั้นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ คือ การก่อดักตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) เพื่อนำฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปละลายน้ำกลับมาในรูปของผลึกของแข็งฟอสเฟตซึ่งมีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยละลายช้า (slow-release fertilizer) โดยผลิตภัณฑ์ที่เป็นที่นิยมสำหรับการนำกลับฟอสฟอรัสจากของเสีย ได้แก่ ของแข็งฟอสเฟตในรูปสตรูไวท์ (Struvite; MgNH_4PO_4 (s)) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสฟอรัส มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว และมีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยละลายช้า ทำให้พืชสามารถดูดซึมน้ำธาตุอาหารไปใช้ได้เรื่อย ๆ ตามช่วงการเจริญเติบโต (Latifian et al., 2012)

2.2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์

การเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างมากโดยเฉพาะสุกรเป็นสัตว์ที่นิยมเลี้ยงเพื่อบริโภคภายในประเทศและเป็นสินค้าปศุสัตว์ส่งออกที่สำคัญ ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกร และจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด ซึ่งมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรฉบับล่าสุด พ.ศ.2564 (แสดงดังตารางที่ 2-3) มีการกำหนดความเข้มข้นของธาตุอาหารสำคัญ ได้แก่ ความเข้มข้นของทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen; TKN) ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับฟาร์มขนาดใหญ่ และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับฟาร์มขนาดกลางและขนาดเล็ก และกำหนดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus; TP) เพิ่มขึ้นขึ้นมาจากประกาศเดิม (ประกาศฉบับเดิมไม่กำหนดค่ามาตรฐานฟอสฟอรัส) โดยกำหนดให้น้ำทิ้งจากการเลี้ยงสุกรมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสทั้งหมด ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับฟาร์มทุกขนาด (MNRE, 2021) อย่างไรก็ตาม น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบดั้งเดิมสำหรับฟาร์มสุกรมักมีความเข้มข้นของไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) สูงกว่ามาตรฐานดังกล่าว ทำให้จำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นที่สอง (secondary treatment) เพื่อให้แน่ใจว่าความเข้มข้นของธาตุอาหารในน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรสอดคล้องกับมาตรฐานนี้

ตารางที่ 2-3 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่ามาตรฐาน		
		ประเภท ก	ประเภท ข	ประเภท ค
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	5.5 – 9.0	5.5 – 9.0	5.5 – 9.0
บีโอดี	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 80	ไม่เกิน 80
ซีโอดี	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	ไม่เกิน 250	ไม่เกิน 350	ไม่เกิน 350
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	ไม่เกิน 300	ไม่เกิน 400	ไม่เกิน 400
ทีเคเอ็น (TKN)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	ไม่เกิน 150	ไม่เกิน 200	ไม่เกิน 200
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	ไม่เกิน 5	ไม่เกิน 5	ไม่เกิน 5

หมายเหตุ: ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร

ประเภท ก สุกรพ่อแม่พันธุ์ สุกรขุนหรือลูกสุกร มากกว่า 600 หน่วยปศุสัตว์ (มากกว่า 5,000 ตัว)

ประเภท ข สุกรพ่อแม่พันธุ์ สุกรขุนหรือลูกสุกร ตั้งแต่ 60 - 600 หน่วยปศุสัตว์ (ตั้งแต่ 500 - 5,000 ตัว)

ประเภท ค สุกรพ่อแม่พันธุ์ สุกรขุนหรือลูกสุกร ตั้งแต่ 6 - น้อยกว่า 60 หน่วยปศุสัตว์ (ตั้งแต่ 50 - น้อยกว่า 500 ตัว)

มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด (แสดงดังตารางที่ 2-4) มีการกำหนดความเข้มข้นของธาตุอาหารสำคัญ ได้แก่ ความเข้มข้นของทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen; TKN) ไม่เกิน 4 มิลลิกรัมต่อลิตร และกำหนดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus; TP) ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ ยังมีการกำหนดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ (pH 6.5 – 8.5) และความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจน ไม่เกิน 1.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากหากในน้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนสูงเกินไป จะส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ (MNRE, 2008)

ตารางที่ 2-4 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่ามาตรฐาน
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6.5 – 8.5
บีโอดี	mg.L ⁻¹	ไม่เกิน 20
การนำไฟฟ้า (Conductivity)	dS/m	ไม่เกิน 0.75
ของแข็งแขวนลอย	mg.L ⁻¹	ไม่เกิน 80
ไนโตรเจนรวม (TN)	mg.L ⁻¹	ไม่เกิน 4
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	mg.L ⁻¹	ไม่เกิน 0.5
แอมโมเนียไนโตรเจน (NH ₃ -N)	mg.L ⁻¹	ไม่เกิน 1.1

หมายเหตุ: ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด

2.3 การบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย

การบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ทางเคมี หรือทางกายภาพ-เคมี เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้ดังนี้

2.3.1 การบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการก่ตะกอนทางเคมี

การก่ตะกอนทางเคมี (chemical precipitation) หรือการตกผลึก (crystallization) เป็นวิธีที่ใช้ในการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย ซึ่งต้องการความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเพียงพอที่จะสร้างสภาวะอิ่มตัว (supersaturation) เชิงเทอร์โมไดนามิก การก่ตะกอนทางเคมีของผลึกฟอสฟอรัสจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยการทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ ได้ผลึกฟอสฟอรัสที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีคุณสมบัติในการปลดปล่อยธาตุอาหารจากผลึกช้ากว่าปุ๋ยชนิดอื่น ซึ่งพืชสามารถดูดซึมธาตุอาหารได้ก่อนที่จะถูกชะล้าง นอกจากนี้ การก่ตะกอนทางเคมีอาจมีศักยภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสและแอมโมเนีย (NH₃-N) จากน้ำเสียในรูปของสตรูไวต์ได้ในราคาถูก (Wang et al., 2005)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการก่ตะกอนทางเคมี อาจช่วยหรือขัดขวางกระบวนการในการควบคุมการก่ตัวและความบริสุทธิ์ของผลึกฟอสฟอรัสที่ได้ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ไอออนแปลกปลอม (foreign ions) ความปั่นป่วน (turbulence) และอุณหภูมิ (temperature) เป็นต้น ซึ่งแต่ละปัจจัยส่งผลต่อกระบวนการก่ตะกอนทางเคมี ดังนี้

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เริ่มต้นของสารละลาย โดยค่าความเป็นกรด-ด่างมีความสำคัญในการเปลี่ยนรูปแบบของฟอสเฟต หากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่ำกว่า 12.3 ความเข้มข้นของฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) ในสารละลายจะลดลงและอาจเปลี่ยนรูปเป็นไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างสามารถควบคุมอัตราการก่อตะกอนและเวลาของปฏิกิริยาได้ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการตกผลึกของสตรูไวต์อยู่ในช่วง 8–12 (Le Corre et al., 2005; Mavinic et al., 2007)

2) อีออนแปลกปลอม (foreign ions) การมีอยู่ของอีออนแปลกปลอม เช่น คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) อีออนของเหล็ก (Fe^{3+}) และอีออนของโลหะหนัก เป็นต้น จะรบกวนการก่อตัวของผลึกฟอสฟอรัส (Cao และ Harris, 2008; Xu et al., 2012) ซึ่งอาจทำให้ตะกอนที่ได้ไม่บริสุทธิ์หรือยับยั้งการก่อตะกอนของผลึกฟอสฟอรัสได้ เช่น แคลเซียมอีออน (Ca^{2+}) เป็นอีออนบวกที่พบได้ทั่วไปในน้ำเสียและเป็นอีออนที่รบกวนต่อการก่อตัวของสตรูไวต์ ยิ่งความเข้มข้นของแคลเซียมอีออน สูงขึ้น การก่อตัวของผลึกสตรูไวต์ก็จะลดลง โดยอัตราส่วนโมลของแมกนีเซียมต่อแคลเซียม (Mg/Ca molar ratio) ที่ 2:1 จะสามารถพบผลึกสตรูไวต์ร่วมกับตะกอนที่ไม่มีรูปร่างชัดเจน ในขณะที่อัตราส่วนโมลของแมกนีเซียมต่อแคลเซียม (Mg/Ca molar ratio) ที่ 1:2 จะยับยั้งการก่อตัวของสตรูไวต์อย่างสมบูรณ์และทำให้เกิดสารประกอบที่ไม่มีรูปร่าง (Acelas et al., 2014)

3) ความปั่นป่วน (turbulence) ส่งผลกระทบต่อกระบวนการก่อตะกอนทางเคมีของผลึกฟอสเฟตน้อย โดยความปั่นป่วนสูงอาจเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ละลายในสารละลายซึ่งช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลาย (Le Corre et al., 2009) นอกจากนี้ ยังอาจทำให้เกิดการแตกของผลึกหรือทำให้ผลึกมีขนาดเล็กลง (Ye et al., 2014)

4) อุณหภูมิ (temperature) เช่นเดียวกับความปั่นป่วน อุณหภูมิส่งผลต่อการก่อตะกอนทางเคมีของผลึกฟอสเฟตน้อยกว่าพารามิเตอร์อื่น ๆ โดยอุณหภูมิส่งผลต่ออัตราส่วนของการแพร่กระจายและการรวมตัวของพื้นผิว โดยประสิทธิภาพในการก่อตะกอนทางเคมีของผลึกฟอสเฟตจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Mezenner and Bensmaili, 2009)

2.3.2 การบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการดูดซับ (adsorption)

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การถ่ายโอนสารถูกดูดซับ (adsorbate) (ในสถานะของเหลว) ไปยังสารดูดซับ (adsorbent) (ในสถานะของแข็ง) โดยมวลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับคงที่ การสูญเสียสารถูกดูดซับในสารละลายจะเท่ากับการเพิ่มขึ้นของสารถูกดูดซับในสารดูดซับ การถ่ายโอนมวลในกระบวนการดูดซับ แสดงดังสมการที่ (2-1)

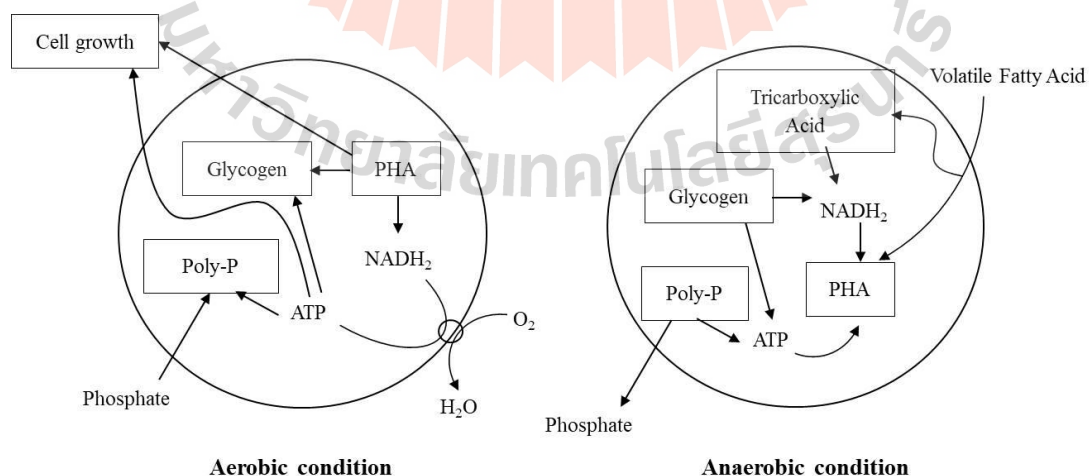
$$B(Q_e - Q_0) = V(C_0 - C_e) \quad \text{Eq. (2-1)}$$

- เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_e คือ ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลของสารถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
 Q_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับในสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 Q_e คือ ความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลของสารถูกดูดซับในสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 B คือ มวลของสารดูดซับ (กรัม)

การดูดซับมีประโยชน์ในการควบคุมมลพิษในสิ่งแวดล้อมโดยการกำจัดสารประกอบที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษและสารประกอบอื่น ๆ ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพจากน้ำเสีย กระบวนการบำบัดน้ำและน้ำเสียสามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้โดยการดูดซับร่วมกับการเกิดการก่อตะกอนทางเคมี จากนั้นตามด้วยการตกตะกอน (sedimentation) และการกรอง (Rittmann et al., 2011) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นหนึ่งในวิธีการบำบัดทางกายภาพ-เคมี (physicochemical method) ที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมีราคาสูง ดังนั้น จึงมีการนำวัสดุเหลือใช้ที่มีต้นทุนต่ำมาใช้และ/หรือสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับฟอสเฟตจากน้ำเสีย เช่น เปลือกไข่ (Köse and Kivanc, 2011; Mezenner and Bensmaili, 2009) แคลไซต์ (Karageorgiou et al., 2007) แก้วลอยจากถ่านหิน (Pengthamkeerati et al., 2008) และเถ้าจากขยะมูลฝอย (Rout et al., 2014) เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มักมีส่วนที่สำคัญของโลหะ ไตรวาเลนต์ (+2) หรือไตรวาเลนต์ (+3) เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก และแคลเซียม เป็นต้น ซึ่งสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ดี (Rittmann et al., 2011)

2.3.3 การบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (biological uptake)

การบำบัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพใช้จุลินทรีย์ในการดูดซับฟอสฟอรัสเข้าสู่เซลล์ โดยปกติฟอสฟอรัสจะถูกเก็บในรูปแบบของโพลิเมอร์คาร์บอน (เช่น โพลีไฮดรอกซีแอลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoate; PHA) และไกลโคเจน) หรือฟอสฟอรัส (โพลิฟอสเฟต หรือ Poly-P) (Rodgers et al., 2010) จุลินทรีย์ที่เก็บและใช้สารประกอบที่มีฟอสฟอรัสเป็นแหล่งพลังงานเรียกว่า Poly-P accumulating organisms (PAOs) (Monclús et al., 2010; Rodgers et al., 2010; Yuan et al., 2012) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการ Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR) โดยโพลิฟอสเฟตในเซลล์จุลินทรีย์สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการเจริญเติบโตของเซลล์ได้ PAOs สามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน (aerobic) และไม่มีออกซิเจน (anaerobic) PAOs จะสะสมฟอสฟอรัสในเซลล์ในสภาวะที่มีออกซิเจนและปล่อยฟอสฟอรัสในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน อย่างไรก็ตาม PAOs จะปล่อยฟอสฟอรัสน้อยกว่าปริมาณที่ดูดซับได้ (Hirota et al., 2010) เมตาบอลิซึมของ PAOs ภายใต้สภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน แสดงดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 เมตาบอลิซึมของ PAOs ภายใต้สภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน
(ที่มา: Yuan et al., 2012)

หลังจากที่ฟอสฟอรัสถูกดูดซับโดย PAOs ขั้นตอนต่อไป คือ การกำจัดฟอสฟอรัสในตะกอนน้ำเสียหรือในเซลล์จุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียด้วยการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง เนื่องจากฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ในน้ำเสียถูกดูดซับโดย PAOs ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจึงลดลง ส่งผลให้ฟอสฟอรัสในปริมาณมากสะสมอยู่ในตะกอนน้ำเสีย (Hirota et al., 2010; Yuan et al., 2012) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการ EBPR สร้างตะกอนน้ำเสียที่อุดมไปด้วย PAOs ประมาณร้อยละ 60 – 90 โดยมีฟอสฟอรัส ประมาณร้อยละ 15 – 20 ของน้ำหนักแห้งของเซลล์ (Yuan et al., 2012) ฟอสฟอรัสที่อยู่ในตะกอนนี้เป็นฟอสฟอรัสในรูปแบบสารอินทรีย์และอาจต้องการการบำบัดเพิ่มเติมก่อนที่จะนำมาใช้ใหม่ได้ อย่างไรก็ตาม อีกหนึ่งทางเลือก คือ นำมวลชีวภาพที่ได้มาใช้โดยตรงในภาคเกษตรกรรมเป็นปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ

2.3.4 การบำบัดฟอสฟอรัสด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นกระบวนการที่ไอออนที่ละลายอยู่ในสารละลายถูกแทนที่ด้วยไอออนของเรซินบนพื้นฐานของความสามารถในการดึงดูดไอออน เมื่อเทียบกับการดูดซับ การแลกเปลี่ยนไอออนให้ความสามารถในการคัดแยกไอออนจากสารละลายได้อย่างมีความจำเพาะสูงกว่า และเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับการยอมรับในการใช้บำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย (Lan et al., 2006) แม้ว่าการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีต้นทุนในการดำเนินการสูง แต่มีความง่ายในการปฏิบัติงานและสามารถปรับใช้กับอัตราการไหลของน้ำเสียที่หลากหลายได้ (Chen et al., 2002) ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดฟอสฟอรัสด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ อัตราการไหลของสารละลาย ความเข้มข้น ความกระด้าง การมีอยู่ของไอออนที่แข่งขันกัน (competitive ions) และของแข็งแขวนลอย ผลกระทบจากขั้นตอนการบำบัดในกระบวนการนี้ คือ สารละลายที่มีฟอสฟอรัสเข้มข้นสูง ซึ่งต้องการถังปฏิกรณ์ตกตะกอนเพื่อก่อตะกอนผลึกฟอสฟอรัสต่อไป

ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) อาจถูกบำบัดจากสารละลายด้วยการรวมตัวทางไฟฟ้า (electrocoagulation) หรือด้วยการก่อตะกอนทางเคมีของฟอสฟอรัสร่วมกับไอออนของโลหะที่สะสมอยู่ที่ขั้วบวก (Cathode) เช่น แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นต้น (Rittmann et al., 2011) ไอออนของโลหะและไฮดรอกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้นมีบทบาทในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสผ่านกระบวนการดูดซับและการก่อตะกอนทางเคมี เช่น ไฮโดรทัลไซต์ (Hydrotalcite) ซึ่งเป็นชั้นประจุบวกที่เกิดจากการแทนที่บางส่วนของโลหะไดวาเลนต์ (+2) และไตรวาเลนต์ (+3) ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย และสามารถนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) จากสารละลายที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูง ด้วยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) (Rittmann et al., 2011)

2.4 การนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางเคมี

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นที่นิยมสำหรับการนำกลับฟอสฟอรัสจากของเสีย ได้แก่ ของแข็งฟอสเฟตในรูปสตรูไวท์ (struvite; MgNH_4PO_4 (s)) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสฟอรัส โดยอาศัยกระบวนการก่อตะกอนทางเคมี (chemical precipitation or crystallization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและราคาถูกสำหรับการกำจัดฟอสฟอรัสและ

ไนโตรเจนออกจากน้ำเสีย ทำให้ไอออนบวกและไอออนลบในสารละลายรวมตัวกันเกิดเป็นตะกอนหรือผลึกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ

จลนศาสตร์ของการก่อตะกอน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การรวมตัวอนุภาค (nucleation) การเติบโตของผลึก (crystal growth) และการก่อตัวของแข็ง (agglomeration) โดยทั่วไปการก่อตะกอนจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะเกินกว่าค่าอิ่มตัว (supersaturation)

(1) การรวมตัวอนุภาค (nucleation) การก่อตัวของตะกอนของแข็งเกิดจากการเกาะกลุ่มของโมเลกุลของสารที่จะก่อตะกอน โดยถ้าเป็นสารละลายบริสุทธิ์จะเกิดจากไอออนชนิดเดียวกันในสารละลายมารวมตัวกัน เรียกว่า การรวมตัวอนุภาคแบบเดี่ยว (homogenous nucleation) แต่ถ้าการรวมตัวเกิดจากอนุภาค (nuclei) มากกว่าหนึ่งชนิดมารวมตัวกัน เรียกว่า การรวมตัวอนุภาคแบบผสม (heterogeneous nucleation) ซึ่งเกิดขึ้นทั่วไปตามแหล่งน้ำต่าง ๆ

(2) การเติบโตของผลึก (crystal growth) อัตราการเติบโตของผลึกเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนในสารละลายในหนึ่งช่วงเวลา

(3) การก่อตัวของแข็ง (agglomeration) เมื่อปฏิกิริยาก่อตะกอนเกิดขึ้น ผลึกของแข็งที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นจะไม่มีเสถียรภาพพอที่จะเป็นของแข็งสมบูรณ์ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูปแบบที่มีเสถียรภาพสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลานี้ เรียกว่า กระบวนการอายุ (aging process) โดยกระบวนการดังกล่าว จะส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของผลึก ทำให้ผลึกมีขนาดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ระดับค่าความเข้มข้นของไอออนในสารละลายและที่ก่อตัวเป็นของแข็งจะอยู่ในสภาวะที่สมดุล (pseudo-equilibrium)

ประสิทธิภาพของการก่อตะกอนสามารถคำนวณได้จากประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัส (Phosphorus recovery efficiency) ดังสมการที่ (2-2)

$$P \text{ Recovery efficiency (\%)} = \frac{C}{C_0} \times 100\% \quad \text{Eq. (2-2)}$$

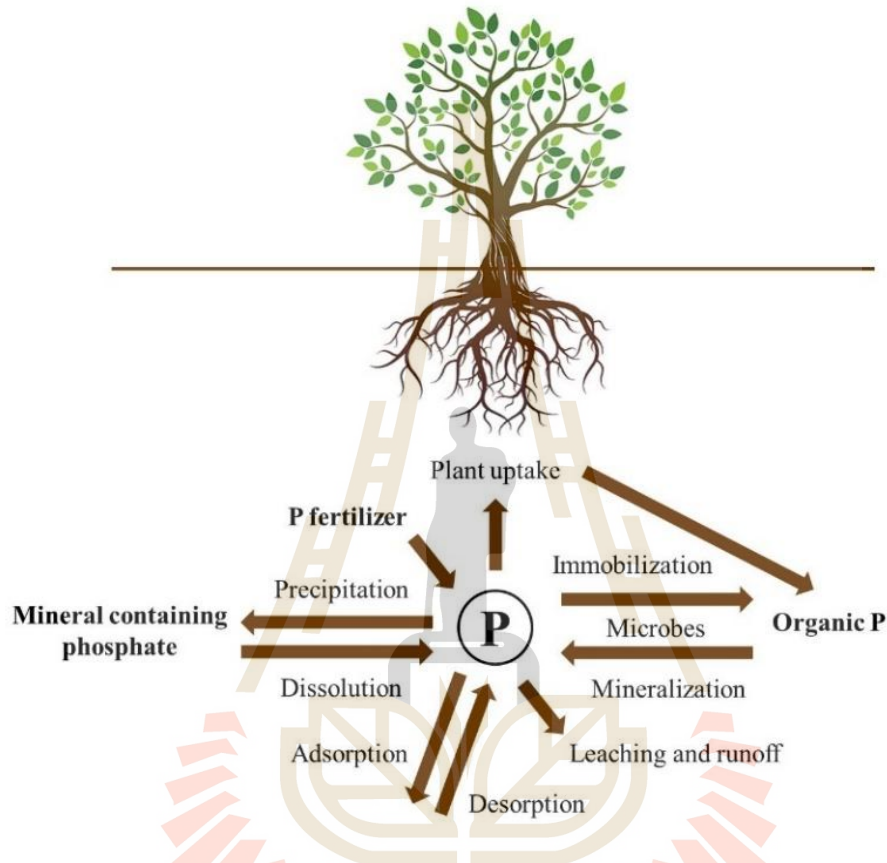
เมื่อ *P Recovery efficiency* คือ ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัส และ C_0 และ C คือ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายก่อนและหลังการก่อตะกอนทางเคมี ตามลำดับ

2.5 การปลดปล่อยธาตุอาหาร (Nutrient leaching)

การเพิ่มธาตุอาหารพืชสู่ดิน เช่น การใส่ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก หรือปุ๋ยพืชสด เป็นต้น มีวัตถุประสงค์เพื่อให้พืชสามารถนำธาตุอาหารเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ได้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการนำธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ของพืช เช่น ความชื้นในดิน ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน ลักษณะทางชีวภาพของดิน อินทรีย์วัตถุในดิน ความสามารถในการอุ้มน้ำ และการกักเก็บธาตุอาหารพืช เป็นต้น โดยความชื้นในดินทำให้ธาตุอาหารพืชอยู่ในรูปสารละลายและเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณรากพืช และพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (วีณา นิลวงศ์, 2560)

จากการศึกษาการปลดปล่อยของธาตุอาหารจากผลึกสตรูไวท์ในระยะเวลา 150 วัน พบว่าการปลดปล่อยไนโตรเจนร้อยละ 9.6 – 23.2 ฟอสฟอรัสร้อยละ 8.4 – 26.7 และแมกนีเซียมร้อยละ 11.3 – 32.6 (Latifian et al., 2012) เนื่องจากพืชสามารถดูดซึมนำธาตุอาหารไปใช้ได้เรื่อยๆ ตามช่วงการเจริญเติบโต จึงมีความเหมาะสมสำหรับการดูดซึมของรากพืชและสามารถนำไปใช้ได้ในการเกษตรโดยตรง โดยฟอสฟอรัสในดินสามารถอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟตอินทรีย์และ

ฟอสเฟตอินทรีย์ เมื่อฟอสฟอรัสถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยสู่ดินจะเปลี่ยนเป็นธาตุอาหารที่พืชและจุลินทรีย์ในดินสามารถดูดซับได้ นอกจากนี้ ยังมีกระบวนการสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปของฟอสฟอรัสในดิน ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมีของฟอสฟอรัสกับแร่ธาตุอื่นๆ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ดินมีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต (Barker and Pilbeam, 2006) การปลดปล่อยของฟอสฟอรัสในดินแสดงดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 การปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดิน (ดัดแปลงจาก Barker and Pilbeam, 2006)

เนื่องจากฟอสฟอรัส (P) เป็นหนึ่งในธาตุอาหารหลักของพืช (NPK) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก (nucleic acids) นิวคลีโอโปรตีน (nucleoproteins) เยื่อหุ้มเซลล์ และสารประกอบอะดีโนซีน ไตรฟอสเฟต (Adenosine triphosphate; ATP) และยังทำหน้าที่สำคัญในกระบวนการถ่ายทอดพลังงานระหว่างสารต่างๆ ภายในเซลล์พืชอีกด้วย ฟอสฟอรัสจึงเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยมีหน้าที่ช่วยเร่งการเจริญเติบโตและการแพร่กระจายของราก ควบคุมการออกดอก ออกผล และการสร้างเมล็ด ถ้าพืชขาดธาตุอาหารชนิดนี้ ระบบรากจะไม่เจริญเติบโต ใบแก่จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง กลายเป็นสีน้ำตาล และหลุดร่วง ลำต้นแกร็น ไม่ผลิดอกออกผล (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

โดยจลนพลศาสตร์ (kinetic) ของการชะละลายฟอสเฟต สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Shrinking core model (Mgaidi และ Mokni, 2018; Ren et al., 2022) เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปองค์ประกอบที่ทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของผลึกฟอสเฟตจะถูกใช้จนหมด ตัวทำละลายจะแพร่

ผ่านรูพรุนขนาดเล็กบนพื้นผิวของอนุภาคฟอสเฟต ซึ่งสามารถอธิบายสมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการชะละลายฟอสเฟตตามขั้นตอนการควบคุมต่าง ๆ ดังนี้

การควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของเหลว (Liquid film diffusion control)

$$x = kt \quad \text{Eq. (2-3)}$$

การควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง (Solid film diffusion control)

$$[1 - 3(1 - x)^{2/3} + 2(1 - x)] = kt \quad \text{Eq. (2-4)}$$

การควบคุมปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิว

$$[1 - (1 - x)^{1/3}] = kt \quad \text{Eq. (2-5)}$$

เมื่อ x คือ อัตราการละลายของฟอสฟอรัส

k คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยา (s^{-1})

t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (s)

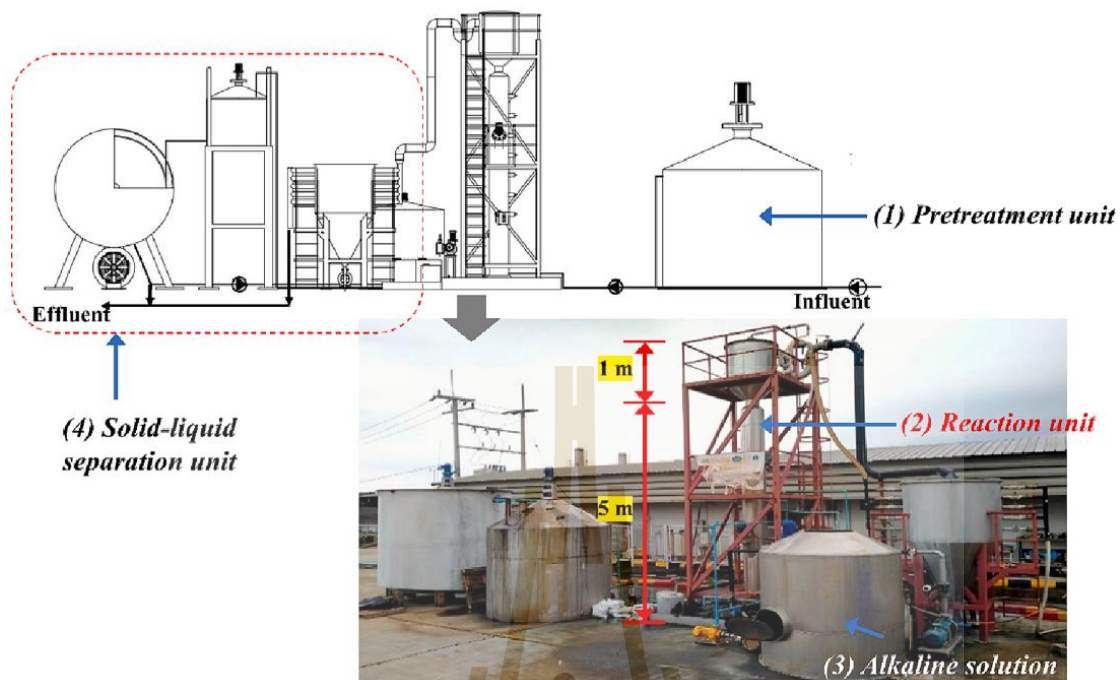
2.6 การประเมินเชิงเทคโน-เศรษฐศาสตร์ (Techno-economic assessment; TEA)

การประเมินเชิงเทคโน-เศรษฐศาสตร์ ดำเนินการโดยใช้แนวคิดตามวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment; LCA) แนวทางนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นจากมุมมองทางเศรษฐศาสตร์ โดยอ้างอิงจากงานของ Lugo et al. (2023) และ Shukla et al. (2022) การประเมินประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) เป้าหมายและขอบเขต (2) ขอบเขตและรายการระบบ (3) แนวทางการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ และ (4) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

โดยการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการประเมินเชิงเทคโน-เศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับกระบวนการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ คือ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับระบบก่อดักตะกอนทางเคมีเพื่อผลิตของแข็งฟอสเฟต (ในรูปของสตรูไวท์) ดังนั้นจึงต้องกำหนดขอบเขตและรายการของระบบการบำบัดน้ำเสียดังกล่าว จากการศึกษาของ Riewklang et al. (2024) พบว่า ระบบก่อดักตะกอนทางเคมีเพื่อนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized Bed Reactor; FBR) (รูปที่ 2-5) ประกอบด้วย 4 ส่วนย่อย ได้แก่ (1) ส่วนปรับสภาพ (pre-treatment unit) (2) ถังปฏิกิริยา (reaction unit) (3) ส่วนป้อนสารเคมี (chemical feeding unit) และ (4) ส่วนแยกของแข็งและของเหลว (solid-liquid separation unit) ซึ่งมีรายละเอียดการดำเนินการ ดังนี้

- ส่วนปรับสภาพ (pre-treatment unit) ใช้ในการควบคุมปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) โดยการกำจัดวัตถุที่ไม่พึงประสงค์ เช่น เศษตะกอนจากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น จากนั้นน้ำเสียจะเข้าสู่ถังกักเก็บน้ำเสีย (wastewater storage unit) ซึ่งมีอุปกรณ์ผสมเพื่อให้สารละลายมีความสม่ำเสมอ

- ถังปฏิกิริยา (reaction unit) ได้รับการออกแบบโดยใช้ท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 เซนติเมตร ตั้งอยู่ในส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์เบด ซึ่งมีปริมาตรใช้งานประมาณ 1800 ลิตร ภายในมีอุปกรณ์ผสมเชิงกล (ใบพัด) 2 ชิ้น



รูปที่ 2-5 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบด (Fluidized Bed Reactor; FBR)

(ที่มา: Riewklang et al., 2024)

- ส่วนป้อนสารเคมี (chemical feeding unit) ประกอบด้วยส่วนของถังผสมสารเคมี บั้มจ่ายสารเคมี และเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซึ่งวัสดุและสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กรดไนตริก (HNO_3) และขี้เถ้าจากเศษไม้ (wood ash)
- ส่วนแยกของแข็งและของเหลว (solid-liquid separation unit) ทำหน้าที่ตกตะกอนของแข็งที่เกิดขึ้น เพื่อแยกของแข็งฟอสเฟตกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดออกจากกัน

แนวทางการประเมินทางเศรษฐศาสตร์เน้น 4 ด้านหลักทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานต่อปี (annual operating costs) ค่าใช้จ่ายด้านการลงทุน (total capital investment) รายได้ต่อปี (annual income) และกำไรสุทธิต่อปี (annual profit) ตามแนวทางที่ระบุไว้ในคู่มือการใช้งานซอฟต์แวร์ SuperPro Designer (Intelligen, 2020) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานต่อปี (annual operating costs) หมายถึง ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับความต้องการทรัพยากร เช่น วัตถุดิบ วัสดุสิ้นเปลือง แรงงาน น้ำ และพลังงาน เป็นต้น

2) ค่าใช้จ่ายด้านการลงทุน (total capital investment) หมายถึง ค่าใช้จ่ายคงที่ (fixed costs) ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ระบุไว้ในขอบเขตและรายการของระบบก่อกำเนิดทางเคมี เช่น บั้มจ่ายสารเคมี บั้มสูบน้ำ ถังเก็บน้ำ ถังปฏิกิริยา และท่อต่าง ๆ เป็นต้น

3) รายได้ต่อปี (annual income) หมายถึง รายได้ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานของระบบ เช่น รายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์หลัก ผลิตภัณฑ์รอง และไฟฟ้าที่ผลิตได้ เป็นต้น

4) กำไรสุทธิต่อปี (annual profit) หมายถึง การวิเคราะห์กระแสเงินสดเพื่อกำหนดกำไรสุทธิและกระแสเงินสดสุทธิในแต่ละปีตลอดอายุของโครงการ ประกอบด้วย การกำหนดกำไรขั้นต้นประจำปี และกำไรสุทธิประจำปีของการลงทุน รวมถึงตัวบ่งชี้ทางเศรษฐกิจที่สำคัญ เช่น อัตรากำไรขั้นต้น (gross margin) ผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) และระยะเวลาคืนทุน เป็นต้น

สำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) เป็นขั้นตอนการประเมินความแปรผันของผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการประเมินว่าการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนสารเคมี ไฟฟ้า น้ำ อุปกรณ์ รายได้ และความเข้มข้นของธาตุอาหารในน้ำเสียมีอิทธิพลหรือส่งผลต่อต้นทุนสุทธิในสถานการณ์ต่าง ๆ อย่างไร โดยในการศึกษาของ Vinardell et al. (2023) ระบุการวิเคราะห์ความอ่อนไหวที่ระดับการแปรผัน $\pm$ ร้อยละ 30 ของพารามิเตอร์นำเข้า (input) ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความแปรผันของการใช้สารเคมี การใช้ไฟฟ้า การใช้น้ำ การผลิตแอมโมเนียมซัลเฟต และการผลิตสตาร์วาท์ เป็นต้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาทดลองในโครงการวิจัย “การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์เพื่อนำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟต” แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) การนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในรูปของแข็งฟอสเฟต (2) การปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากปุ๋ยฟอสเฟต และผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และ (3) การประเมินเชิงเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ของการนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการก่อกองทางเคมี โครงการวิจัยนี้มีวิธีการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 น้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์

แหล่งของฟอสฟอรัสที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ น้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ (1) น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ประกอบด้วย น้ำก่อนเข้าและหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (Covered Lagoon) (2) น้ำเสียจากฟาร์มโคนม ประกอบด้วย น้ำเสียจากบริเวณโรงเลี้ยงโคนม และโรงรีดนมโค และ (3) น้ำจากบ่อเลี้ยงปลา ประกอบด้วย น้ำจากการอนุบาลปลา (บ่อปูน) และน้ำเลี้ยงปลา (บ่อดิน) โดยตัวอย่างน้ำเสียทั้งหมดถูกเก็บรักษาไว้ในภาชนะปิดสนิทและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนการใช้งาน

3.1.2 ดินปลูกพืช

ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกพืช ได้แก่ ดินสำหรับเพาะปลูกพืชจากฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีลักษณะร่วน และมีสีดำ ซึ่งมีส่วนประกอบของดินร่วน มูลสัตว์ ขุยมะพร้าว กากหม้อกรองโรงงานน้ำตาล แกลบดิน และขี้เถ้าแกลบ

3.1.3 ต้นกล้าดาวเรือง

ต้นกล้าดาวเรือง (*Tagetes erecta* L.) อายุประมาณ 15 – 20 วัน เพาะจากฟาร์มปลูกดาวเรือง อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี ความสูงต้นกล้าดาวเรืองอยู่ในช่วง 8.0 – 10.5 เซนติเมตร โดยนำต้นกล้าดาวเรืองลงปลูกในดิน และเพาะในโรงเรือน เป็นเวลา 3 วัน เพื่อปรับสภาพ จากนั้นจึงเริ่มใส่ปุ๋ย (วันที่ 1 ของการทดลอง) และสังเกตการเจริญเติบโตของต้นดาวเรือง

3.2 วิธีการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental Research) ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการของฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีวิธีการทดลอง ดังนี้

3.2.1 การนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในรูปของแข็งฟอสเฟต

การศึกษาส่วนนี้เป็นการศึกษาเพื่อนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ให้อยู่ในรูปของแข็งฟอสเฟต ซึ่งจะทำให้การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการก่อตะกอนของแข็งฟอสเฟต ได้แก่ ความเป็นกรดและด่าง (pH) (7.5, 8.0, 8.5 และ 9.0) โดยศึกษาคุณสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ฟาร์มโคนม และบ่อเลี้ยงปลา เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการนำมาใช้เป็นแหล่งของฟอสฟอรัส จากนั้นจึงดำเนินการทดลองการก่อตะกอนของแข็งฟอสเฟตในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร โดยในแต่ละบีกเกอร์มีน้ำเสียจากฟาร์มสุกร 500 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลายถูกปรับตามค่าที่กำหนดไว้โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5 นอร์มัล จากนั้นจึงทำการกวนผสมสารละลายโดยใช้เครื่อง Jar Test Apparatus ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอน (settle) เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกกรอง โดยแยกของแข็งและสารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ การทดลองทั้งหมดดำเนินการ 3 ซ้ำ ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25 องศาเซลเซียส) ผลการวิเคราะห์จะถูกตัดออกจากผลการคำนวณหาความแตกต่างของสมมูลมวลฟอสฟอรัสก่อนและหลังการทดลองเกินร้อยละ 10 และทำการทดลองซ้ำ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ร้อยละ 10

3.2.2 การปลดปล่อยของธาตุอาหารจากปุ๋ยฟอสเฟต (phosphate leaching)

การศึกษากการปลดปล่อยของธาตุอาหาร (nutrient leaching) จากของแข็งฟอสเฟตในดินที่ใช้เพาะปลูกพืช ดัดแปลงจาก Khaing et al. (2022) ทำการศึกษาโดยขังดินสำหรับเพาะปลูกพืช น้ำหนัก 1.00 กิโลกรัม ใส่ในกระถางพลาสติก ขนาด 6" (6*6*4 นิ้ว) การทดลอง ประกอบด้วย

- (1) ชุดควบคุม (control) (ไม่ได้ใส่ปุ๋ย)
- (2) ชุดทดสอบผลึกฟอสเฟตที่นำกลับมาได้จากน้ำเสียฟาร์มสุกร (struvite)
- (3) ชุดทดสอบด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP)
- (4) ชุดทดสอบด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP)

ซึ่งแต่ละกระถางเติมปุ๋ยฟอสเฟตที่มีปริมาณฟอสเฟต 200 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส และรดน้ำทุกวันด้วยน้ำประปา ปริมาตร 200 มิลลิลิตร (pH ~6) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการชะละลายออกมาทุกวัน เป็นเวลา 30 วัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการละลายของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ได้จากการนำกลับจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์กับปุ๋ยเคมีฟอสเฟตที่มีขายตามท้องตลาด

3.2.3 การศึกษาผลของปุ๋ยฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของพืช

หลังจากทดสอบการปลดปล่อยธาตุอาหารจากของแข็งฟอสเฟตแล้ว จะนำของแข็งฟอสเฟตมาผสมกับดิน ทดสอบการปลูกพืชดอก ในกระถางในโรงเรือนขนาด 1.75 เมตร × 2.1 เมตร × 2.5 เมตร พืชที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ดาวเรือง (*Tagetes erecta L.*) ทั้งนี้ เนื่องจากฟอสฟอรัสมีหน้าที่ช่วยควบคุมการออกดอก ออกผล และการสร้างเมล็ด การศึกษานี้ประเมินผลกระทบของปุ๋ยชนิดต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโตของต้นดาวเรือง ได้แก่ ความสูงของต้นดาวเรือง (plant height) จำนวนใบ (number of leaves) จำนวนดอก (number of flowers) ความยาวราก (root length) และผลผลิตโดยรวม (yield) กลุ่มทดลอง ประกอบด้วยกลุ่มควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) ปุ๋ยฟอสเฟตที่ได้จากน้ำเสียฟาร์ม

สุกร (สตรูไวท์) ปุ๋ยทรีปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) โดยย้ายต้นกล้าดาวเรืองอายุ 15 – 20 วันลงในกระถาง และใส่ปุ๋ย (สตรูไวท์, TSP และ MAP) จำนวนสองครั้ง ในวันที่ 1 และ 20 ของการทดลอง ซึ่งจะใส่ปุ๋ยแต่ละชนิด ครั้งละ 100 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส จากนั้นรดน้ำต้นไม้ทุกวันด้วยน้ำประปา 200 มิลลิลิตร (pH ~6) ในแต่ละกระถาง บันทึกความสูง จำนวนใบ จำนวนดอกในทุกวัน และสภาพภูมิอากาศ เป็นเวลา 45 วัน และทำการเก็บเกี่ยวต้นดาวเรืองในวันที่ 45 วัน ของการทดลอง สำหรับปุ๋ยแต่ละชนิดทำการทดลอง 5 ซ้ำ รวมทั้งวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสเฟตในส่วนประกอบต่าง ๆ ของต้นดาวเรือง ได้แก่ ใบ ดอก ลำต้น และราก เพื่อประเมินการกระจายตัวของฟอสเฟตภายในระบบพืช

3.2.4 การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์

การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เพื่อนำมาผลิตเป็นปุ๋ยฟอสเฟต ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น ความเข้มข้นฟอสฟอรัส และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องจะถูกเก็บรวบรวม และวิเคราะห์ร่วมกับผลการทดลองข้างต้นของการศึกษาวิจัยโครงการนี้ เพื่อประเมินปริมาณฟอสเฟตที่นำกลับได้ ปริมาณปุ๋ยฟอสเฟตที่ผลิตได้ สำหรับเป็นแนวทางในการประเมินความเป็นไปได้ในทางเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ (techno-economics) ตามหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment; LCA) ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ (1) วัตถุประสงค์และขอบเขต (goal and scope) (2) ขอบเขตและรายการที่ใช้ในระบบ (system boundary and inventory) (3) แนวทางการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (economic evaluation approach) และ (4) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) ผลการศึกษาในขั้นตอนนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อการต่อยอดพัฒนาผลิตภัณฑ์และเทคโนโลยีต่อไป

3.2.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุตั้งต้นและผลิตภัณฑ์

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus) รวมถึงตรวจวิเคราะห์ไอออนต่าง ๆ ที่มีผลต่อการก่อตะกอนผลึกของแข็งฟอสเฟต ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) และเหล็ก (Fe) นอกจากนี้ ยังทำการวิเคราะห์ลักษณะผลึกของผลิตภัณฑ์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) และ X-ray diffraction (XRD) เพื่อยืนยันว่าของแข็งที่เกิดขึ้นเป็นผลึกของแข็งฟอสเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูงตามที่คาดการณ์ไว้หรือไม่

3.3 การคำนวณ

3.3.1 สมดุลมวลของฟอสฟอรัส (Phosphorus mass balance)

เนื่องจากฟอสฟอรัส (P) เป็นธาตุที่มีความคงทนต่อการสลายตัว (conservative element) ดังนั้น มวลของการสูญเสียฟอสฟอรัสจากของเหลวจึงเท่ากับมวลของฟอสฟอรัสที่ได้ในรูปของแข็ง แสดงดังสมการที่ 3-1

$$P \text{ lost from liquid} = P \text{ gained by solid}$$

$$(C_0 - C_e)V = (Q_e - Q_0)B \quad \text{Eq. (3-1)}$$

เมื่อ	C_0	คือ	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเริ่มต้นในสารละลาย ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
	C_e	คือ	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่สภาวะสมดุลในสารละลาย ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
	V	คือ	ปริมาตรของสารละลาย (L)
	Q_0	คือ	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเริ่มต้นในของแข็ง ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
	Q_e	คือ	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่สภาวะสมดุลในของแข็ง ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
	B	คือ	น้ำหนักของแข็ง (g)

3.3.2 ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัส (Phosphorus recovery efficiency)

ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3-2

$$\%P \text{ recovery} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100\% \quad \text{Eq. (3-2)}$$

เมื่อ	C_0	คือ	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเริ่มต้นในสารละลาย ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
	C_e	คือ	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่สภาวะสมดุลในสารละลาย ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

3.3.3 องค์ประกอบของผลึกของแข็งฟอสเฟต (Phosphate crystal content)

เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์อาจทำให้เกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตทั้งในรูปของผลึกสตรูไวท์ (MgNH_4PO_4 (s)) และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ (s)) ดังนั้น หากต้องการทราบองค์ประกอบของผลึกของแข็งฟอสเฟตจึงสามารถใช้ข้อมูลองค์ประกอบของธาตุที่เป็นตัวกำหนดปริมาณ (limiting ion) ในของแข็งมาใช้ในการคำนวณร้อยละของผลึกของแข็งฟอสเฟตรูปแบบต่างๆ ได้ดังสมการที่ 3-3 ตามวิธีการของ Pinatha et al. (2020)

$$\%P \text{ crystal content} = \left(\frac{m_1 \times MW}{M} \right) \times 100\% \quad \text{Eq. (3-3)}$$

เมื่อ	m_1	คือ	ปริมาณโมลาร์ของธาตุที่เป็นตัวกำหนดปริมาณ ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)
	M	คือ	น้ำหนักของแข็งที่เกิดขึ้นในการทดลองการตกตะกอน ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
	MW	คือ	น้ำหนักโมเลกุลของผลึกของแข็งฟอสเฟตที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)

3.3.4 จลนศาสตร์การชะละลายของฟอสเฟต (Kinetic of phosphate leaching)

จลนศาสตร์การชะละลายของฟอสเฟตอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Shrinking core model (Mgaidi และ Mokni, 2018; Ren et al., 2022) ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

การควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของเหลว (Liquid film diffusion control)

$$x = k_l t \quad \text{Eq. (3-4)}$$

การควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง (Solid film diffusion control)

$$[1 - 3(1 - x)^{2/3} + 2(1 - x)] = k_d t \quad \text{Eq. (3-5)}$$

การควบคุมปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิว (Surface chemical reaction control)

$$[1 - (1 - x)^{1/3}] = k_r t \quad \text{Eq. (3-6)}$$

เมื่อ x คือ อัตราการชะละลายของฟอสฟอรัส

k_l คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของเหลว (d^{-1})

k_d คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง (d^{-1})

k_r คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาการควบคุมปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิว (d^{-1})

t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (d)

3.3.5 ค่าใช้จ่ายการลงทุนอุปกรณ์ (Equipment investment cost)

ค่าใช้จ่ายการลงทุนอุปกรณ์ได้รับการประเมินโดยขึ้นอยู่กับต้นทุนอุปกรณ์พื้นฐาน (base cost) และกำลังการผลิตของอุปกรณ์พื้นฐาน (base capacity) ตามสมการที่ระบุในคู่มือผู้ใช้ SuperPro Designer (Intelligen, 2020) ดังแสดงในสมการที่ 3-7

$$\text{Equipment investment cost} = \text{Cost}_0 * (Q / Q_0)^a \quad \text{Eq. (3-7)}$$

เมื่อ Cost_0 คือ ค่าใช้จ่ายการลงทุนสำหรับอุปกรณ์หนึ่งชิ้น (ต้นทุนพื้นฐาน) (USD)

Q คือ กำลังการผลิตของอุปกรณ์ใหม่

Q_0 คือ กำลังการผลิตกระบวนการ (กำลังการผลิตพื้นฐาน)

a คือ เลขยกกำลังในกฎกำลัง (power law)

โดย $a = 0.6$ ตามกฎ "six-tenth rule" (Chilton, 1950)

3.3.6 การใช้พลังงาน (Power consumption)

การใช้พลังงานถูกคำนวณจากพลังงานที่ต้องใช้ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สำหรับการก่อกวนทางเคมีของผลึกสตรูไวท์ ได้แก่ ใบพัดผสมในถังปฏิกิริยาก่อกวนผลึกสตรูไวท์ การใช้พลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-8 (Metcalf & Eddy, 2014)

$$(P / V) = G^2 * \mu \quad \text{Eq. (3-8)}$$

เมื่อ P / V คือ พลังงานที่กระจายต่อหน่วยปริมาตร ($W \cdot m^{-3}$)

G คือ ค่าเฉลี่ยอัตราการเปลี่ยนความเร็ว (s^{-1})

โดยค่า G สำหรับการผสมอย่างรวดเร็ว = $500 s^{-1}$

(James M. Montgomery, 1985)

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)

โดย μ ของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร = $1.00 \times 10^{-3} N \cdot s \cdot m^{-2}$ at $20^\circ C$

3.3.7 ค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและพลังงาน (Materials and energy consumption cost)

ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานถูกประเมินจากการใช้วัสดุและพลังงานที่คูณด้วยต้นทุนต่อหน่วย ซึ่งสามารถคำนวณต้นทุนการใช้วัสดุและพลังงานได้โดยใช้สมการที่ 3-9

$$\text{Annual cost} = \text{unit cost} * \text{annual amount} \quad \text{Eq. (3-9)}$$

เมื่อ annual cost คือ ค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและพลังงานต่อปี (USD)
 unit cost คือ ค่าใช้จ่ายต่อหน่วย (USD ต่อหน่วย)
 annual amount คือ ปริมาณการใช้วัสดุ หรือพลังงาน (หน่วย)

3.3.8 รายได้ (Revenues)

รายได้จากการจำหน่ายสตรูไวท์ต่อปีคำนวณโดยการคูณปริมาณการจำหน่ายกับราคาขาย ตามสมการที่ 3-10 ดังนี้

$$\text{Revenues} = Q_P * \text{selling price} \quad \text{Eq. (3-10)}$$

เมื่อ Q_P คือ ปริมาณของแข็งฟอสเฟตหรือสตรูไวท์ (กิโลกรัมฟอสฟอรัส)
 selling price คือ ราคาขายปุ๋ยฟอสเฟต (USD ต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส)

3.3.9 กำไรสุทธิต่อปี (Annual profit)

กำไรขั้นต้น (gross profit) ของระบบก่อนหักค่าของผลึกสตรูไวท์ต่อปีคำนวณโดยหักค่าใช้จ่ายการดำเนินงานต่อปี (annual operating cost) จากรายได้ต่อปี ตามที่แสดงในสมการที่ 3-11 ดังนี้

$$\text{Gross profit} = \text{Revenues} - \text{AOC} \quad \text{Eq. (3-11)}$$

เมื่อ AOC คือ ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานต่อปี (USD ต่อปี)

อัตรากำไรขั้นต้น (gross margin) คำนวณโดยนำกำไรขั้นต้นหารด้วยรายได้ต่อปี แสดงในหน่วยดอลลาร์สหรัฐ (USD) ตามสมการที่ 3-12 ดังนี้

$$\text{Gross margin} = (\text{Gross profit} / \text{Revenues}) * 100 \quad \text{Eq. (3-12)}$$

3.3.10 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period)

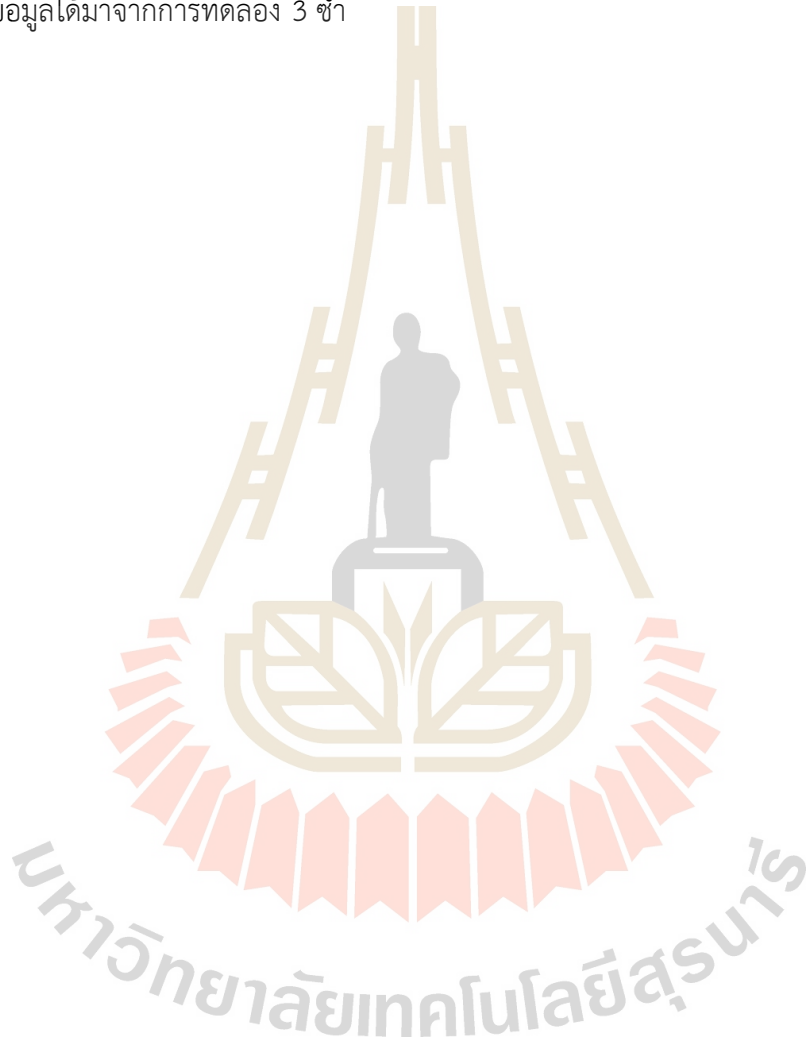
ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่ต้องใช้ให้กำไรสุทธิสะสมเท่ากับการลงทุนเริ่มต้น โดยระยะเวลาคืนทุนที่สั้นขึ้นแสดงถึงความน่าสนใจของการลงทุนโครงการมากขึ้น ระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3-13 ดังนี้

$$\text{Payback period} = \text{Total investment} / \text{Gross profit} \quad \text{Eq. (3-13)}$$

เมื่อ Total investment คือ ค่าใช้จ่ายการลงทุนทั้งหมด (USD)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ได้แก่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด และสถิติเชิงอนุมาน (inferential statistics) ด้วยโปรแกรม SPSS for windows 18.0 โดยใช้ independent-samples t-test และ one-way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัส ร้อยละของฟอสฟอรัสในของแข็งฟอสเฟต และประสิทธิภาพการชะละลายฟอสเฟต ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($p\text{-value} < 0.05$) ซึ่งค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้มาจากการทดลอง 3 ซ้ำ



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์เพื่อนำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟตนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำกลับธาตุอาหารที่สำคัญจากของเสียมาเพิ่มมูลค่าเพื่อใช้ประโยชน์ทางการเกษตร โดยการนำน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมาเข้าสู่กระบวนการก่ตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) ให้เกิดเป็นผลึกของแข็งฟอสเฟต และทดสอบผลิตภัณฑ์โดยการนำไปใช้เป็นปุ๋ยในการเพาะปลูกพืช ผลการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 6 ส่วน ได้แก่ (1) คุณลักษณะของน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ (2) คาดการณ์การเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ (3) การนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียด้วยกระบวนการก่ตะกอนทางเคมี (4) การปลดปล่อยธาตุอาหารจากของแข็งฟอสเฟต (Phosphate leaching) (5) การนำของแข็งฟอสเฟตไปใช้ในการปลูกพืช และ (6) การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ผลการศึกษาและการอภิปรายผลเป็นดังนี้

4.1 คุณลักษณะของน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์

น้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์จากฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่นำมาศึกษาคุณลักษณะเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำกลับฟอสฟอรัส ได้แก่ (1) น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ประกอบด้วย น้ำก่อนเข้าและหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (Covered Lagoon) (2) น้ำเสียจากฟาร์มโคนม ประกอบด้วย น้ำเสียจากบริเวณโรงเลี้ยงโคนม และโรงรีदनํ้านมโค และ (3) น้ำจากบ่อเลี้ยงปลา ประกอบด้วย น้ำจากการอนุบาลปลา (บ่อปูน) และน้ำเลี้ยงปลา (บ่อดิน) ซึ่งถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาคุณลักษณะ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) และเหล็ก (Fe) เนื่องจากเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟต ผลการศึกษาคุณลักษณะของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 คุณลักษณะของน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์

พารามิเตอร์	หน่วย	ชนิดของน้ำเสีย					
		ฟาร์มสุกร น้ำเข้า	ฟาร์มสุกร น้ำออก	โรงเลี้ยง โคนม	โรงรีด นํ้านมโค	บ่อปลา (บ่อปูน)	บ่อปลา (บ่อดิน)
ความเป็นกรด-ด่าง	-	7.31	7.01	8.68	8.41	7.97	8.73
แอมโมเนีย ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	261.81	324.87	782.15	8.99	5.71	n.d.
ฟอสเฟต (PO_4^{3-})	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	67.22	117.69	18.93	12.11	0.07	0.03
แมกนีเซียม (Mg)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	29.22	55.77	137.48	4.09	7.47	3.24
แคลเซียม (Ca)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	23.21	23.14	4.67	7.38	9.01	12.69
เหล็ก (Fe)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.74	n.d.	2.34	n.d.	0.14	0.01

หมายเหตุ: n.d. = not detectable

จากตารางที่ 4-1 พบว่าน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 7.01 – 8.73 เป็นกลางหรือเป็นเบสอ่อน ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการก่อกองทางเคมีของแข็งฟอสเฟต เนื่องจากฟอสเฟต (PO_4^{3-}) สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนบวกของโลหะ เช่น แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เป็นต้น โดยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมต่อการก่อกองผลึกสตรูไวท์ อยู่ในช่วง 8 – 12 (Le Corre et al., 2005; Mavinic et al., 2007) หากต้องการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้สามารถนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จะต้องเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้สูงขึ้นและอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารในน้ำเสีย พบว่า แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) พบมากที่สุดคือน้ำเสียจากโรงเลี้ยงโคนม เท่ากับ 782.15 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมา คือ ฟาร์มสุกร น้ำออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด และฟาร์มสุกร น้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด เท่ากับ 324.87 และ 261.81 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีความเข้มข้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากแหล่งที่มาอื่น ทั้งนี้ แอมโมเนีย-ไนโตรเจนในน้ำเสียจากโรงเลี้ยงโคนม และฟาร์มสุกร ทั้งน้ำก่อนเข้าและน้ำออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด มาจากการขับถ่ายมูลของสัตว์ในฟาร์ม ซึ่งในมูลสัตว์มีแอมโมเนีย-ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก (Numviyimana et al., 2022; You et al., 2021)

ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสฟอรัส (TP) พบว่า น้ำเสียที่มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสสูง ได้แก่ น้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยก่อนเข้าและน้ำออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิดมีความเข้มข้นฟอสฟอรัส เท่ากับ 67.22 และ 117.69 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกันกับไนโตรเจน ฟอสฟอรัสในน้ำเสียของฟาร์มเลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่มาจากการขับถ่ายมูลของสัตว์ในฟาร์ม อาหารสัตว์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย และน้ำล้างน้ำเสียของฟาร์มเลี้ยงสัตว์โรงเรือนเลี้ยงสัตว์ (กรมปศุสัตว์, 2565) ซึ่งฟอสฟอรัสในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมีความเข้มข้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากแหล่งที่มาอื่น ทำให้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรมีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นน้ำเสียเพื่อนำกลับฟอสฟอรัสในรูปผลึกของแข็งฟอสเฟตมากที่สุด

เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารรอง ได้แก่ แมกนีเซียม แคลเซียม และเหล็ก ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตเพื่อก่อกองของแข็งฟอสเฟตได้ พบว่า ความเข้มข้นของแมกนีเซียมในน้ำเสียจากโรงเลี้ยงโคนม เท่ากับ 137.48 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมา คือ ฟาร์มสุกร น้ำออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด และฟาร์มสุกร น้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด เท่ากับ 55.77 และ 29.22 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีความเข้มข้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากแหล่งที่มาอื่น ในขณะที่ความเข้มข้นของแคลเซียมและเหล็กพบในปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุอาหารอื่นๆ โดยพบสูงสุดไม่เกิน 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งทำให้สามารถประเมินเบื้องต้นได้ว่า ฟอสฟอรัสในน้ำเสียสามารถทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียม เป็นผลึกสตรูไวท์ (MgNH_4PO_4) และแคลเซียมเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) ได้ ซึ่งของแข็งฟอสเฟตทั้งสองรูปแบบข้างต้น สามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยละลายช้า (Slow-release Fertilizer) สำหรับการเพาะปลูกได้ (Latifian et al., 2012)

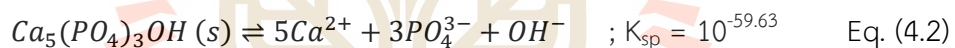
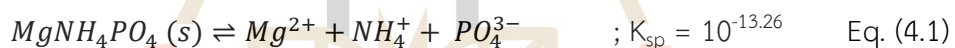
สำหรับน้ำจากบ่อเลี้ยงปลา พบว่า มีธาตุอาหารในปริมาณเพียงเล็กน้อย ขณะเก็บตัวอย่างพบว่ามีสาหร่ายซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กลอยอยู่บริเวณผิวน้ำจำนวนมาก แสดงว่า น้ำจากบ่อเลี้ยงปลาอาจมีความเหมาะสมสำหรับเป็นแหล่งของธาตุอาหารของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำ เช่น

สาหร่าย เป็นต้น และไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เพื่อก่อตะกอนทางเคมีสำหรับกักเก็บของแข็งฟอสเฟต เนื่องจากต้องใช้น้ำในปริมาณมาก และได้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณน้อย ซึ่งไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน

จะเห็นได้ว่า น้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โดยเฉพาะฟาร์มสุกร และฟาร์มโคนม มีปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็นต้น ในปริมาณมาก หากน้ำเสียเหล่านี้ถูกปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะก่อให้เกิดการสะสมของธาตุอาหารในแหล่งน้ำ ทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เมื่อพืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากได้รับธาตุอาหารในปริมาณมาก ส่งผลให้พืชน้ำปกคลุมผิวน้ำ แสงแดดไม่สามารถส่องลงไปยังแหล่งน้ำได้ ออกซิเจนไม่สามารถละลายน้ำได้ และท้ายที่สุดสิ่งมีชีวิตในน้ำไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ การนำกลับธาตุอาหารจากน้ำเสียเพื่อนำมาใช้ผลิตปุ๋ยฟอสเฟตจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้สำหรับลดปริมาณธาตุอาหารที่จะถูกปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ รวมถึงการเพิ่มมูลค่าของเสียให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นประโยชน์ต่อไป

4.2 คาคการณ์การเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์

เนื่องจากน้ำเสียฟาร์มสุกรมีองค์ประกอบของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งเป็นประจุบวกและสามารถรวมตัวกับประจุลบของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เกิดเป็นผลึกของแข็งฟอสเฟตได้ ดังนั้น การนำฟอสฟอรัสกลับจากน้ำเสียฟาร์มสุกรอาจจะทำให้เกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตหลัก 2 ชนิด ได้แก่ สตรูไวต์ ($MgNH_4PO_4$ (s); MAP) และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($Ca_5(PO_4)_3OH$ (s); HAP) ปฏิกิริยาสมดุลของสตรูไวต์และไฮดรอกซีอะพาไทต์แสดงไว้ในสมการ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ (Kumar et al., 2004; Le Corre et al., 2009)



จากคุณลักษณะของน้ำเสียฟาร์มสุกรที่มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการก่อตะกอนทางเคมีของแข็งฟอสเฟต ได้แก่ ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน แมกนีเซียม และแคลเซียม ในความเข้มข้นที่เกินค่าอิ่มตัว (supersaturation) และสามารถรวมตัวกันเป็นของแข็งฟอสเฟตได้ในสภาวะที่เหมาะสม จึงสามารถนำความเข้มข้นของธาตุอาหารดังกล่าวมาคำนวณหาอัตราส่วนโมลฟอสฟอรัส : ไนโตรเจน : แมกนีเซียม : แคลเซียม (P : N : Mg : Ca) ได้ดังนี้

$$\text{- น้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด} = 1 : 21.71 : 1.70 : 0.82$$

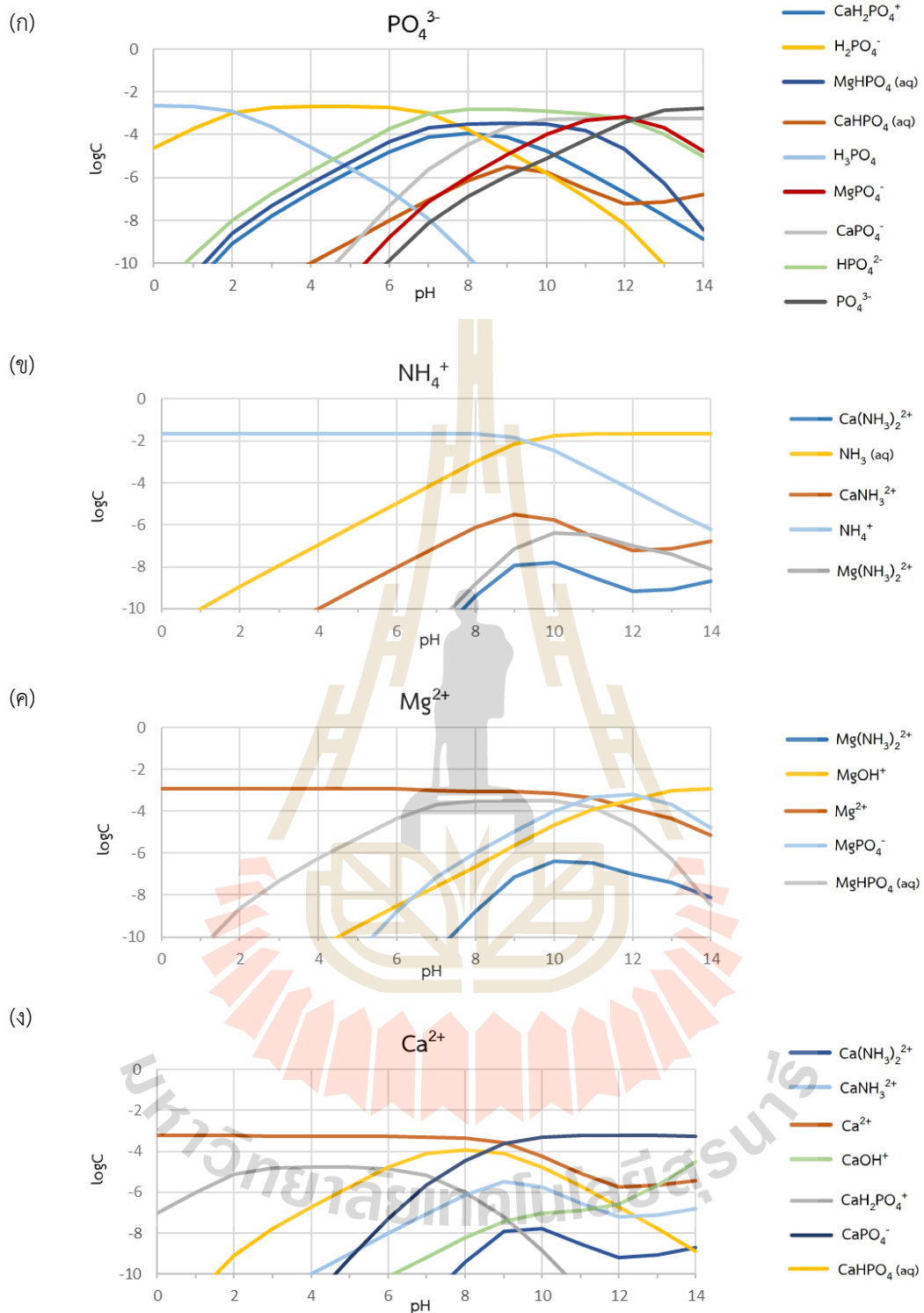
$$\text{- น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด} = 1 : 15.35 : 1.95 : 0.49$$

อัตราส่วนโมลของธาตุต่างๆ ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ในน้ำเสียมีความเข้มข้นธาตุอาหาร ได้แก่ แมกนีเซียมและแคลเซียม ที่จะสามารถจับตัวกับฟอสฟอรัสเกิดเป็นของแข็งฟอสเฟตในอัตราส่วนที่น้อยกว่าฟอสฟอรัส (ดังแสดงในสมการที่ 4.1 และ 4.2) ดังนั้น หากต้องการนำกลับฟอสฟอรัสในน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด สามารถที่จะเติมธาตุอาหาร ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg^{2+}) หรือแคลเซียม (Ca^{2+}) ลงไปในน้ำเสีย เพื่อทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตที่ยังเหลืออยู่ในน้ำเสียเกิดเป็นผลึกของแข็งฟอสเฟตได้

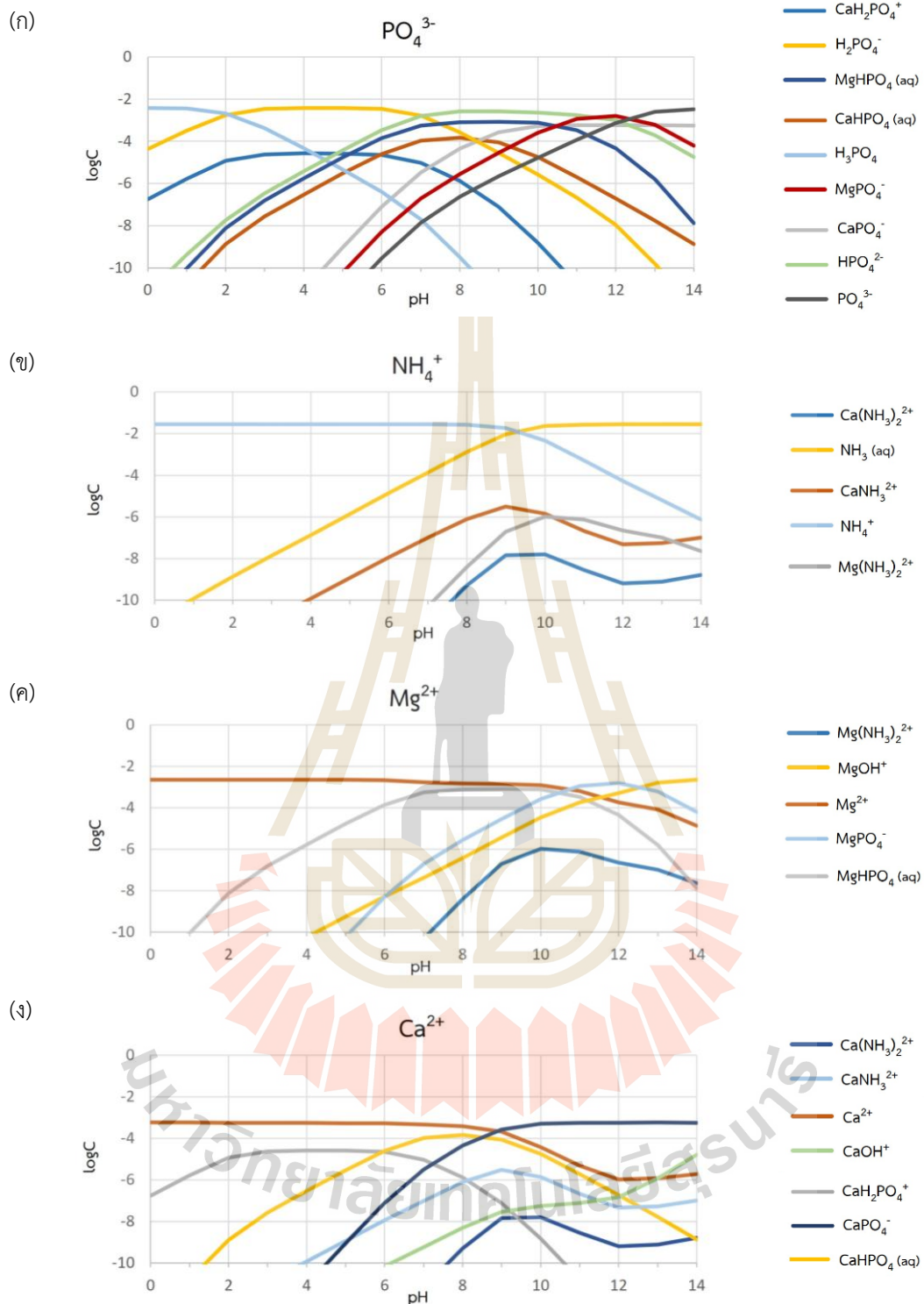
การคาดการณ์การเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตจากการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มสุกร ทำได้โดยนำค่าความเข้มข้นของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) แอมโมเนียม (NH_4^+) แมกนีเซียม และแคลเซียม ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับป้อนเข้าสู่ซอฟต์แวร์การสร้างแบบจำลองสมดุลเคมี (chemical equilibrium modeling software) Visual MINTEQ version 3.1 (Gustafsson et al., 2012) จากนั้นตั้งค่าให้โปรแกรมคำนวณค่าคงที่สมดุลจากฐานข้อมูลอุณหพลศาสตร์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และนำค่าคงที่ที่ได้มาพล็อตกราฟ $\log C - \text{pH}$ สำหรับ pH 0 – 14 โดยพิจารณาสปีชีส์ที่ละลายทั้งหมดของฟอสเฟต แอมโมเนียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ที่ความเข้มข้นมากกว่า 10^{-10} โมลต่อลิตร เท่านั้นที่จะนำมาพล็อตกราฟ ค่าคงที่สมดุลสารละลายในน้ำเสียฟาร์มสุกรจากน้ำก่อนเข้า และน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด จาก Visual MINTEQ แสดงดังรูปที่ 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ

จากผลลัพธ์ของ Visual MINTEQ สามารถนำค่าคงที่สมดุลสารละลายในน้ำเสียฟาร์มสุกรจากน้ำเข้าและน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ $\text{pC} - \text{pH}$ เพื่อคาดการณ์การเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ สตรูไวท์ ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 (\text{s})$) และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH} (\text{s})$) ผลคาดการณ์การเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟต แสดงดังรูปที่ 4-3

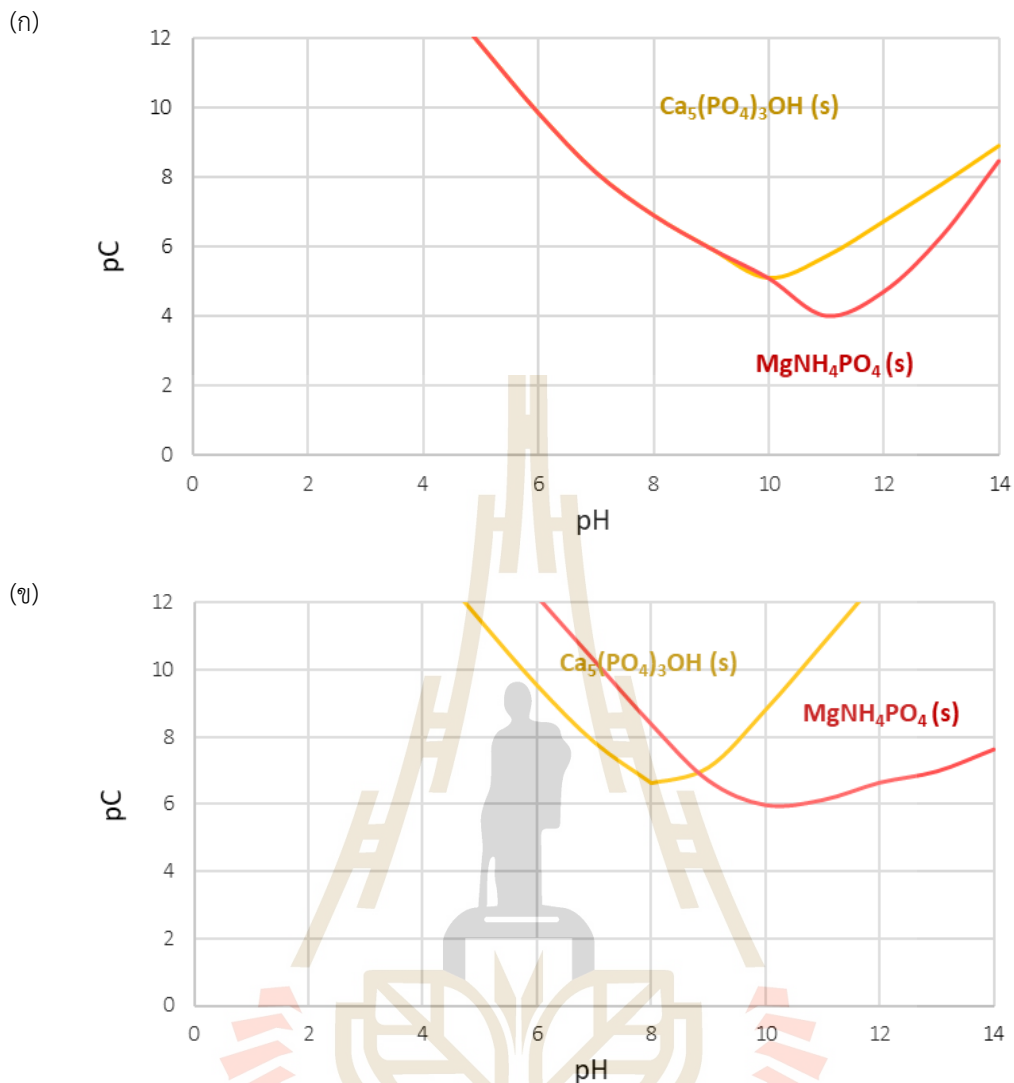
จากรูปที่ 4-3 (ก) พบว่า น้ำเสียฟาร์มสุกรก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด สามารถก่อตะกอนเพื่อก่อผลึกของแข็งฟอสเฟตสตรูไวท์ (MAP) และไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAP) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 5 – 14 โดยเฉพาะเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มากกว่า 8 เมื่อความเข้มข้นของไอออนในสารละลายลดลงก็ยังสามารถก่อตะกอนของแข็งฟอสเฟตทั้งสองชนิดได้ดี ในขณะที่น้ำเสียฟาร์มสุกรหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (รูปที่ 4.3 (ข)) พบว่า สามารถก่อตะกอนเพื่อก่อผลึกของแข็งฟอสเฟตสตรูไวท์ (MAP) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 6 – 14 และก่อผลึกของแข็งไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAP) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 4.8 – 11.6 และยังพบว่าน้ำเสียฟาร์มสุกรก่อนเข้าและหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิดมีพื้นที่ทับซ้อนกันระหว่างการเกิดผลึกทั้งสองชนิด (รูปที่ 4-3 (ก) และ (ข)) นั่นคือ ค่าความเป็นกรด-ด่างเดียวกันสามารถทำให้เกิดผลึกของแข็งทั้งสองชนิดได้ ทั้งนี้ ลำดับการเกิดตามหลักอุณหพลศาสตร์พบว่า ไฮดรอกซีอะพาไทต์จะเกิดเป็นผลึกก่อน เนื่องจากค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) น้อยกว่าสตรูไวท์ เมื่อแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในสารละลายทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) จนหมด จากนั้นจะเกิดก่อผลึกสตรูไวท์ อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ในสารละลายก็มีผลต่อการเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตเช่นกัน หากแมกนีเซียมไอออนมีความเข้มข้นสูงกว่าแคลเซียมไอออนมากจะทำให้ผลึกสตรูไวท์ (Acelas et al., 2014) ซึ่งจากผลการคำนวณอัตราส่วนโมลระหว่างแมกนีเซียมและแคลเซียมพบว่า อัตราส่วนโมลของแมกนีเซียมต่อแคลเซียมในน้ำเสียฟาร์มสุกรก่อนเข้าและหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด มีค่าประมาณประมาณ 2 เท่า และ 4 เท่า ตามลำดับ แสดงว่าผลึกของแข็งฟอสเฟตที่จะสามารถนำกลับได้จากน้ำเสียฟาร์มสุกรมีความเป็นไปได้สูงที่จะเป็นผลึกของสตรูไวท์



รูปที่ 4-1 ค่าคงที่สมดุลสารละลายในน้ำเสียฟาร์มสุกรก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิดที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 0 - 14 (ก) สมดุลสารละลายที่เกี่ยวข้องกับฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) (ข) สมดุลสารละลายที่เกี่ยวข้องกับแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) (ค) สมดุลสารละลายที่เกี่ยวข้องกับแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และ (ง) สมดุลสารละลายที่เกี่ยวข้องกับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+})



รูปที่ 4-2 ค่าคงที่สมดุลสารละลายในน้ำเสียฟาร์มสุกรหลังจากจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 0 - 14 (ก) สมดุลสารละลายที่เกี่ยวข้องกับฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) (ข) สมดุลสารละลายที่เกี่ยวข้องกับแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) (ค) สมดุลสารละลายที่เกี่ยวข้องกับแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และ (ง) สมดุลสารละลายที่เกี่ยวข้องกับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+})

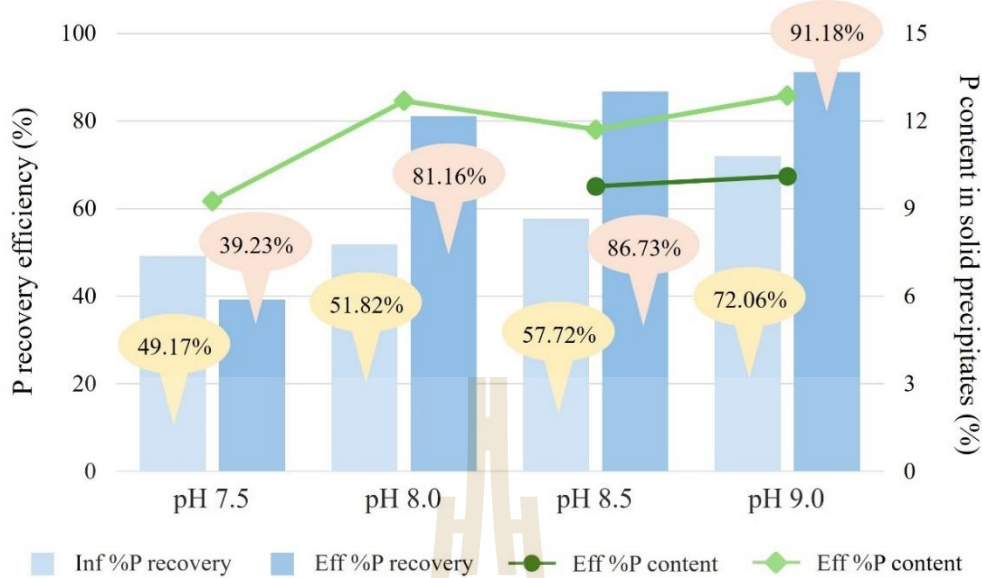


รูปที่ 4-3 กราฟ pC-pH การเกิดผลึกของแข็งฟอสเฟตที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่าง ๆ (ก) น้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด และ (ข) น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด

4.3 การนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียด้วยกระบวนการก่อดินทางเคมี

4.3.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

การศึกษาการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มสุกร ประกอบด้วย น้ำก่อนเข้าและหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (Covered Lagoon) โดยศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อการนำกลับฟอสฟอรัส ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 7.5 – 9.0 ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่อประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสและร้อยละฟอสฟอรัสในของแข็งฟอสเฟต

จากรูปที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิด ที่ pH 7.5, 8.0, 8.5 และ 9.0 เท่ากับร้อยละ 49.17, 51.82, 57.72 และ 72.06 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิด ที่ pH 7.5, 8.0, 8.5 และ 9.0 เท่ากับร้อยละ 39.23, 81.16, 86.73 และ 91.18 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการก่อก้อนทางเคมีสูงขึ้นเมื่อค่า pH สูงขึ้น โดยเมื่อค่า pH มากกว่า 8 สามารถนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มสุกรได้มากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งอาจเป็นเพราะความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปออร์โธฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH สูงขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความพร้อมในการทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg^{2+}) และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4^+) เพื่อสร้างตะกอนสตรูไวท์มากขึ้น (Aguilar-Pozo et al., 2024; Crutchik et al., 2016) ซึ่งร้อยละของฟอสฟอรัสในของแข็งฟอสเฟตจากน้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิด และน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิด มีค่าเฉลี่ยระหว่าง ร้อยละ 9.77 – 10.11 และ ร้อยละ 9.25 – 12.87 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ทั้งนี้ ของแข็งฟอสเฟตจากน้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิดที่ได้จากการนำกลับที่ค่า pH 7.5 และ 8.0 มีปริมาณน้อยมาก จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ร้อยละของฟอสฟอรัสได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบร้อยละของแข็งฟอสเฟตที่นำกลับจากค่า pH 8.5 และ 9.0 พบว่า ร้อยละของฟอสฟอรัสในของแข็งฟอสเฟตจากน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิดสูงกว่าร้อยละของฟอสฟอรัสในของแข็งฟอสเฟตจากน้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิดประมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักแห้ง

นอกจากนี้ ผลการศึกษา พบว่า การนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิดที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงกว่า 8.0 มีประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 81.16 – 91.18 ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสในน้ำเสียก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากฟอสฟอรัสในน้ำที่ผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบิดได้ผ่านการย่อยสลายสารอินทรีย์จากจุลินทรีย์ในระบบผลิต

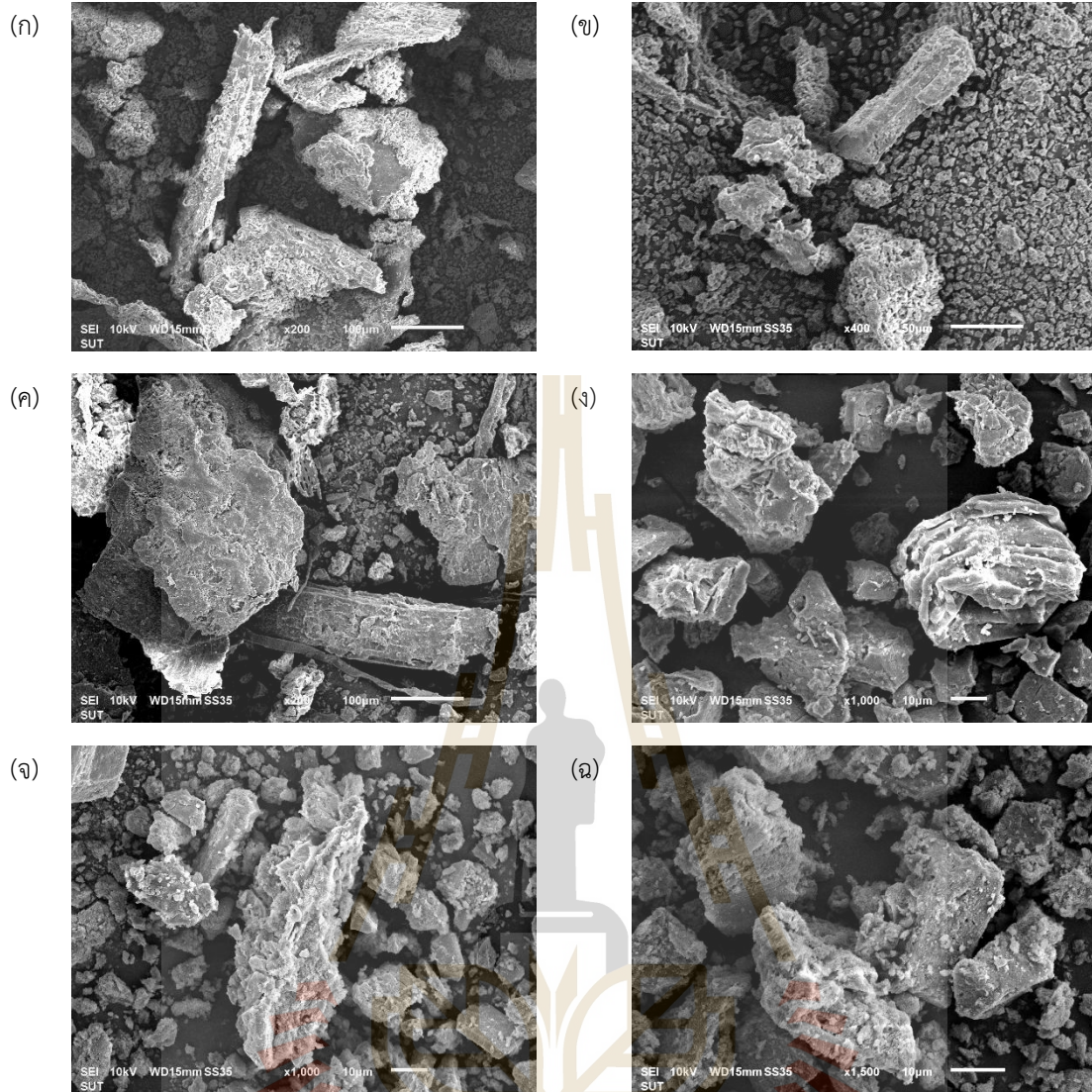
ก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ทำให้โมเลกุลของฟอสฟอรัสถูกปลดปล่อยออกมาในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ (Cydzik-Kwiatkowska and Nosek, 2020) นั่นคือฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่พร้อมทำปฏิกิริยาเคมีกับสารชนิดอื่น จึงสามารถนำกลับมาในรูปของแข็งฟอสเฟตได้ง่ายกว่าน้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด

จากข้อมูลข้างต้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม ต่อการนำกลับฟอสฟอรัส ด้วยกระบวนการก่อกองทางเคมี ได้แก่ pH 8.5 แม้ว่าประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 9.0 จะมากกว่าก็ตาม การปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จาก 8.5 เป็น 9.0 จะต้องเติมสารเคมี (NaOH) ในปริมาณเฉลี่ยมากกว่า 2.5 มิลลิกรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการนำกลับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นในกรณีที่จะต้องบำบัดน้ำเสียด้วยถังปฏิกิริยาขนาดใหญ่ ดังนั้น ในการทดลองขั้นต่อไป จึงเลือกศึกษาการก่อกองทางเคมีของแข็งฟอสเฟตจากน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 8.5

4.3.2 ลักษณะผลึกของแข็งฟอสเฟตที่ได้จากการก่อกองทางเคมี

ลักษณะของสตรูไวต์ (MgNH_4PO_4 (s)) จากรายงานสัณฐานวิทยาของสตรูไวต์ พบว่าผลึกของแข็งสตรูไวต์มีรูปร่างหลายอย่าง เช่น รูปร่างคล้ายโลง (coffin-like shape) รูปร่างคล้ายเข็ม (needle-like shape) รูปร่างคล้ายตัวอักษรเอ็กซ์ (x-shape) รูปร่างคล้ายเซลล์เดนไดรต์ที่มีส่วนยื่นยาวออกไปรอบตัวเซลล์ (dendritic shape) และรูปร่างไม่คงที่ (irregular shape) (Li et al., 2019; Stolzenburg et al., 2015) ทั้งนี้รูปร่างของผลึกสตรูไวต์ขึ้นอยู่กับสภาวะของการก่อกอง เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อัตราการผสม (mixing rate) อัตราส่วนโมลแมกนีเซียมต่อแคลเซียม (Mg/Ca molar ratio) และดัชนีความอิ่มตัวของสารละลาย (supersaturation index) ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในการก่อตัวผลึกของแข็งสตรูไวต์ (Ronteltap et al., 2010; Shaddel et al., 2019) ภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลึกของแข็งฟอสเฟตจากน้ำก่อนเข้าระบบและน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิดของฟาร์มสุกร แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4.5

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลึกของแข็งฟอสเฟตจากน้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 8.5 และ 9.0 แสดงลักษณะของผลึกคล้ายโลง (coffin-like shape) รูปร่างคล้ายเข็ม (needle-like shape) และรูปร่างไม่คงที่ (irregular shape) (รูปที่ 4.5 (ก) และ (ข)) เช่นเดียวกันกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลึกของแข็งฟอสเฟตจากน้ำออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7.5, 8.0, 8.5 และ 9.0 พบว่าผลึกของแข็งฟอสเฟตมีลักษณะคล้ายโลง (coffin-like shape) รูปร่างคล้ายเข็ม (needle-like shape) และรูปร่างไม่คงที่ (irregular shape) (รูปที่ 4.5 (ค) (ง) (จ) และ (ฉ)) ทั้งนี้การเกิดผลึกรูปร่างไม่คงที่ (irregular shape) อาจเกิดขึ้นจากการนำผลึกของแข็งฟอสเฟตมาบดด้วยโม่บดยาก่อนนำไปตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย Scanning Electron Microscope อีกด้วย จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าผลึกของแข็งที่เกิดขึ้นมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาคู่กับผลึกของแข็งสตรูไวต์ เนื่องจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมืองค์ประกอบของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) แอมโมเนียมไอออน (Ca^{2+})

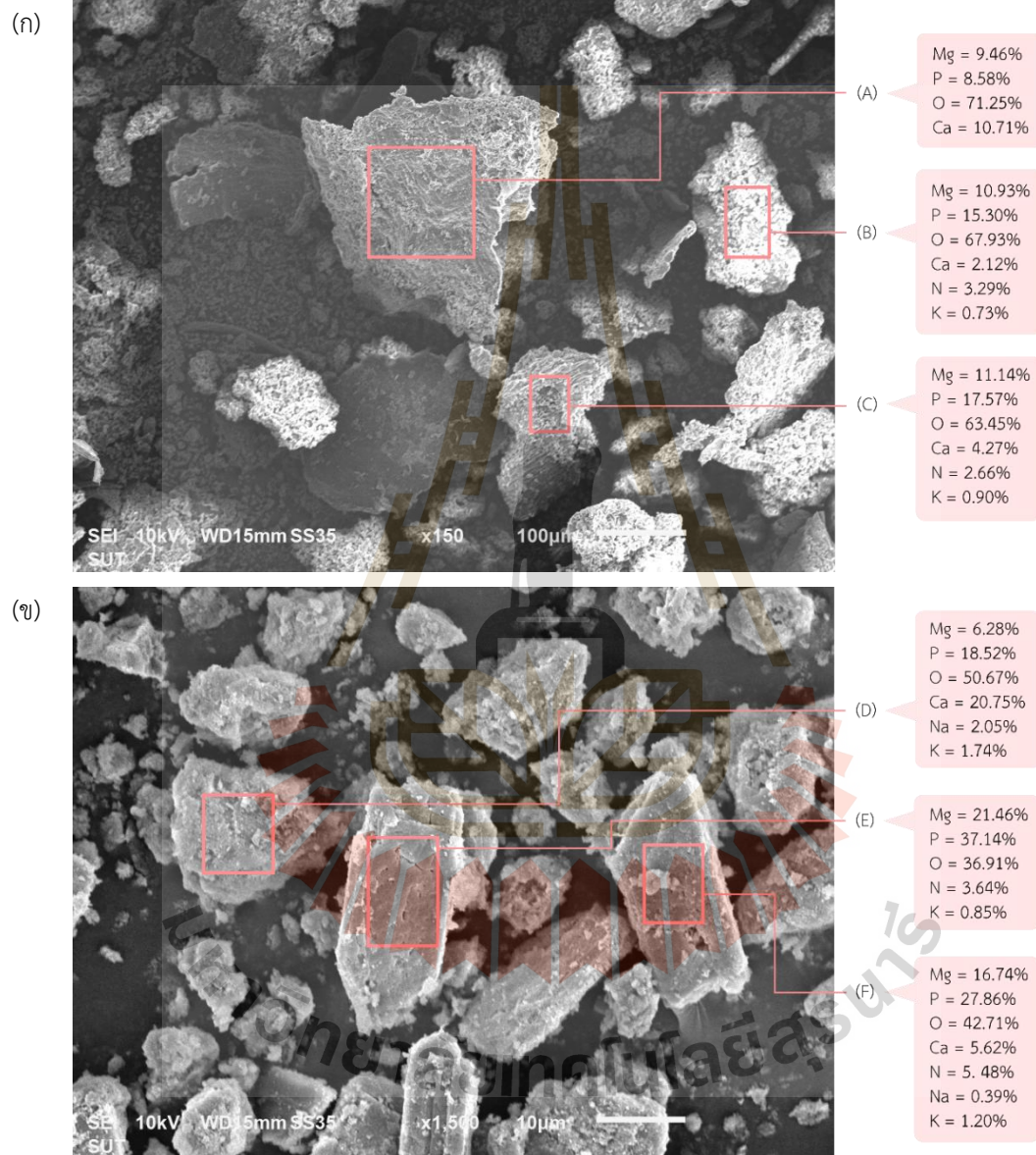


รูปที่ 4-5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผลึกของแข็งฟอสเฟตจาก Scanning Electron Microscope (ก) น้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ pH 8.5 (200x) (ข) น้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ pH 9.0 (400x) (ค) น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ pH 7.5 (200x) (ง) น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ pH 8.0 (1000x) (จ) น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ pH 8.5 (1000x) และ (ฉ) น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ที่ pH 9.0 (1500x)

และฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) (ดังแสดงในส่วนที่ 4.2) โดยมีความเข้มข้นของไอออนดังกล่าวในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการก่อตะกอนของแข็งฟอสเฟตได้

จากการตรวจวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของผลึกของแข็งจากน้ำเสียฟาร์มสุกร ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS) เพื่อยืนยันว่าผลึกของแข็งที่เกิดขึ้นมีผลึกของสตรูไวท์อยู่ในผลิตภัณฑ์ ผลการวิเคราะห์

พบว่า ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของผลึกของแข็ง ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg), ฟอสฟอรัส (P), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N) และแคลเซียม (Ca) เนื่องจากลักษณะพื้นฐานวิทยาที่เหมือนกันของผลึกของแข็งจากน้ำเสียฟาร์มสุกร (ดังแสดงในรูปที่ 4.5) จึงมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในผลึกของแข็งฟอสเฟตจากก่อนเข้าระบบและน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบปิด สำหรับการทดลองที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 8.5 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

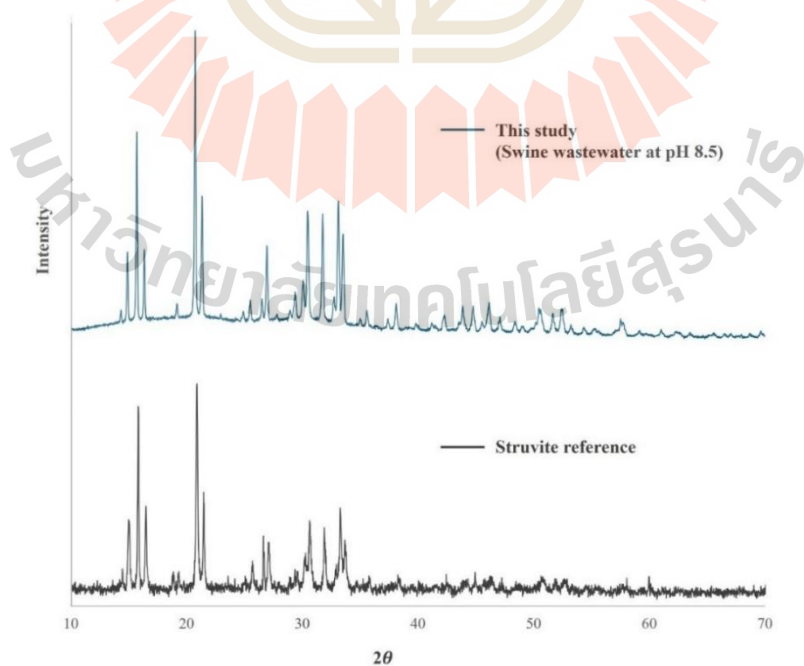


รูปที่ 4-6 องค์ประกอบธาตุของผลึกของแข็งฟอสเฟตจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS สำหรับของแข็งฟอสเฟตจากน้ำเสียฟาร์มสุกรที่การทดลองค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 8.5 – (ก) น้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบปิด 2 และ (ข) น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบปิด

จากรูปที่ 4-6 ปริมาณองค์ประกอบธาตุที่วิเคราะห์โดย SEM-EDS บนผลึกของแข็งฟอสเฟตเหล่านี้ พบว่า มีร้อยละของธาตุต่าง ๆ แตกต่างกันตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาสำหรับ

องค์ประกอบหลักเดียวกัน เช่น ผลึกของแข็งฟอสเฟตมีลักษณะคล้ายโลง (coffin-like shape) พบแมกนีเซียม (Mg) ในช่วงร้อยละ 16 – 21 ฟอสฟอรัส (P) ในช่วงร้อยละ 27 – 37 และไนโตรเจน (N) ในช่วงร้อยละ 3 – 5 การแปรผันของปริมาณฟอสฟอรัสในผลึกของแข็งฟอสเฟตอาจเกิดจากการมีอยู่ของไอออนบวก (cation) ต่าง ๆ ในน้ำเสียจากฟาร์มสุกร เช่น โพแทสเซียมไอออน (K^+) และโซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งสามารถก่อตะกอนกับไอออนที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสตรูไวท์ ดังนั้น ผลึกฟอสเฟตอาจมีส่วนประกอบของธาตุเหล่านี้เพิ่มเติม นอกจากนี้ ยังมีการระบุลักษณะทางสัญญาณวิทยาลักษณะหนึ่งของผลึกฟอสเฟต คือ ผลึกฟอสเฟตรูปปร่างไม่แน่นอน (irregular shape) ประกอบด้วยแมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และไนโตรเจนในความเข้มข้นร้อยละ 6, 18, และ 20 ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าผลึกฟอสเฟตที่มีลักษณะคล้ายโลงศพมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าพร้อมกับมีองค์ประกอบของแมกนีเซียมและไนโตรเจนแสดงถึงความน่าจะเป็นสูงที่จะเป็นผลึกสตรูไวท์ ($MgNH_4PO_4$ (s)) (Moragasapitiya et al., 2019) ขณะที่ผลึกฟอสเฟตรูปปร่างไม่แน่นอนมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำกว่าผลึกคล้ายโลงศพและพบแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($Ca_5(PO_4)_3OH$ (s)) ซึ่งปริมาณฟอสเฟตในผลึกของแข็งดังกล่าวมีความสอดคล้องกับปริมาณฟอสเฟตในไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ร้อยละ 18.50 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกรหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) ดังนั้น ผลึกฟอสเฟตที่ได้จากการศึกษาทดลองนี้จึงมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบด้วย (Li et al., 2019)

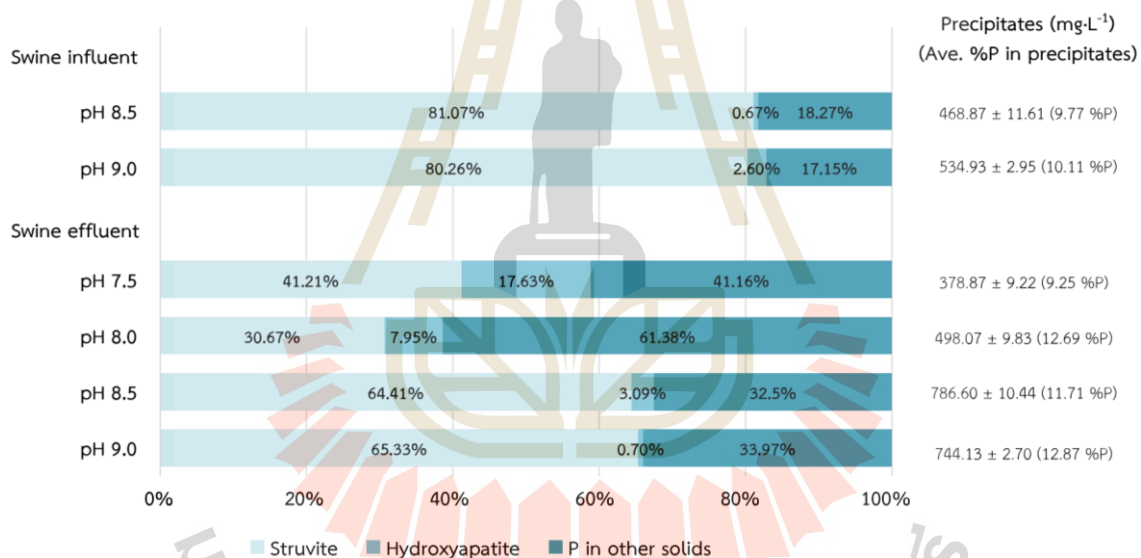
เมื่อนำผลึกของแข็งฟอสเฟตที่ได้จากการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิดของฟาร์มสุกร ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 8.5 ด้วยเทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึกและแนวโน้มการเรียงตัวของผลึก โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกของแข็งฟอสเฟต แสดงดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 XRD pattern ของผลิตภัณฑ์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

จากรูปที่ 4-7 โครงร่างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกของแข็งฟอสเฟต (เส้นสีดำ) มีความสอดคล้องกับโครงร่างผลึกมาตรฐานของสตรูไวท์ (Struvite) (เส้นสีน้ำเงิน) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ผลึกของแข็งฟอสเฟตที่ได้จากการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบปิดของฟาร์มสุกร ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 8.5 คือ ผลึกของสตรูไวท์ (Struvite) ซึ่งมีองค์ประกอบของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) และจัดเป็นผลึกของแข็งฟอสเฟตที่มีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยละลายช้า (slow-release fertilizer)

นอกจากนี้ ในการศึกษาแล้วยังได้วิเคราะห์องค์ประกอบของแมกนีเซียม แคลเซียม และฟอสฟอรัส ในผลึกของแข็งฟอสเฟต เพื่อประเมินความบริสุทธิ์ของสตรูไวท์ที่ได้รับภายใต้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน ปริมาณของแข็งที่ประกอบด้วยฟอสเฟตถูกคำนวณตามหลักอุณหพลศาสตร์ (Snoeyink และ Jenkins, 1980) โดยใช้สมการที่ 3.3 (ดังแสดงในบทที่ 3) ซึ่งฟอสเฟตจะก่อตะกอนเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAP) ก่อน ตามด้วยสตรูไวท์ (MAP) การเปรียบเทียบผลึกของแข็งฟอสเฟตในตะกอนที่เป็นของแข็งที่ได้มาจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกร แสดงดังรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-8 การกระจายขององค์ประกอบผลึกของแข็งฟอสเฟตที่ได้จากการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มสุกร

จากรูปที่ 4-8 พบว่า น้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบปิด (Swine influent) สามารถนำกลับฟอสเฟตในรูปของแข็งสตรูไวท์ (struvite) ในช่วงร้อยละ 80.26 – 81.07 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) ในช่วงร้อยละ 0.67 – 2.60 และเป็นของแข็งในรูปอื่นนอกเหนือจากสองชนิดข้างต้น ในช่วงร้อยละ 17.15 – 18.27 โดยน้ำเสีย 1 ลิตร สามารถนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของแข็งฟอสเฟตที่ pH 8.5 เฉลี่ย 467.87 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 9.77 และ pH 9.0 สามารถนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของแข็งฟอสเฟตเฉลี่ย 534.93 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 10.11

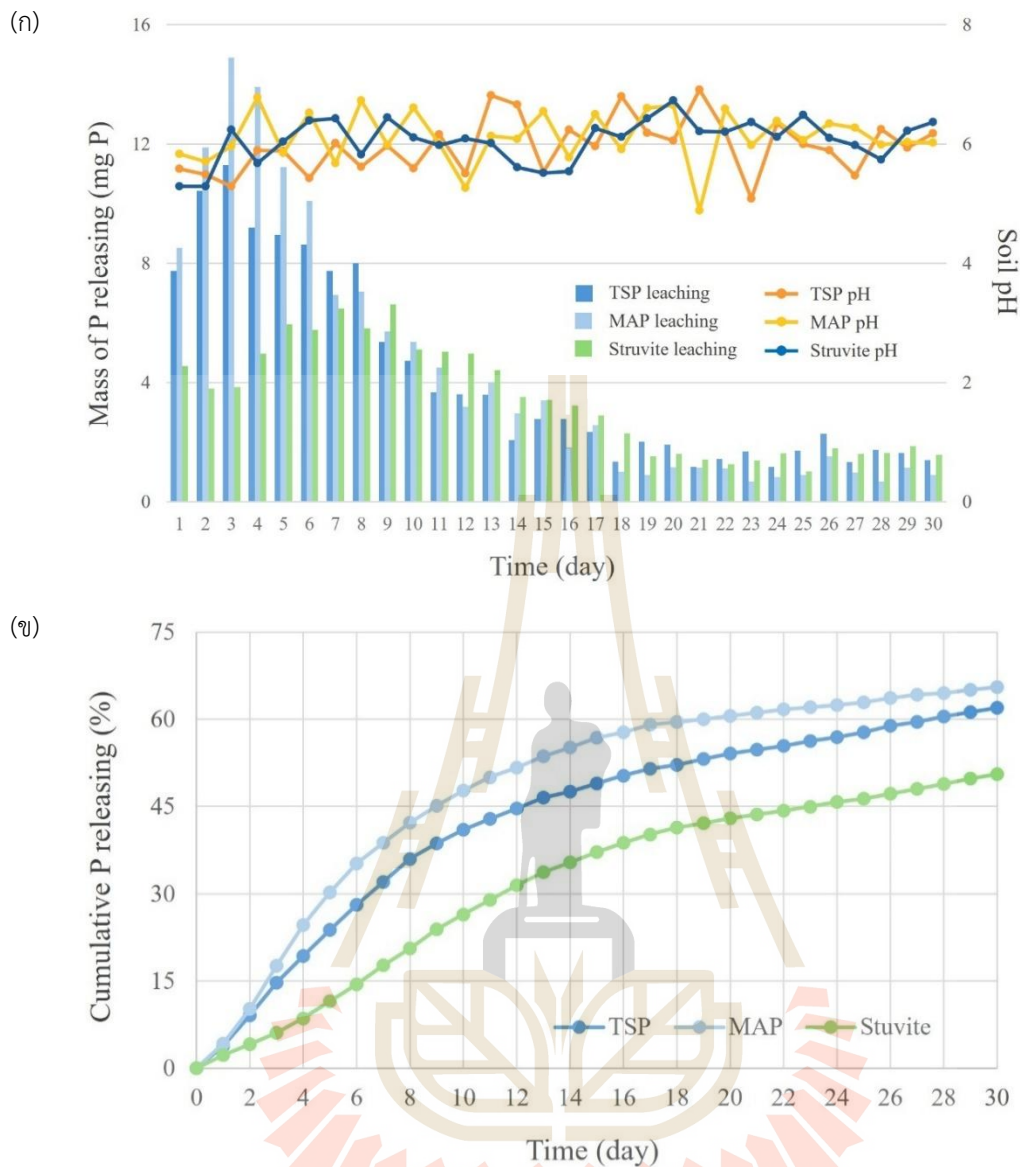
สำหรับน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (Swine effluent) สามารถนำกลับฟอสเฟตในรูปของแั่งงสตรูไวท์ (struvite) ในช่วงร้อยละ 30.67 – 65.33 ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) ในช่วงร้อยละ 0.70 – 17.63 และเป็นของแั่งงในรูปอื่นนอกเหนือจากสองชนิดข้างต้น ในช่วงร้อยละ 32.50 – 61.38 โดยน้ำเสีย 1 ลิตร สามารถนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของแั่งงฟอสเฟตที่ pH 8.5 เฉลี่ย 786.60 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณของแั่งงฟอสเฟตสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ pH อื่น ๆ และมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 11.71 ในขณะที่ pH 9.0 สามารถนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของแั่งงฟอสเฟตที่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสสูงสุด เฉลี่ยร้อยละ 12.87 อย่างไรก็ตาม น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (swine effluent) ที่ pH 8.5 และ 9.0 สามารถนำกลับของแั่งงฟอสเฟตได้มากกว่าน้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (swine influent) ทั้งนี้ ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน จุลินทรีย์ในน้ำเสียจะย่อยสลายฟอสเฟตให้อยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate; PO_4^{3-}) และปลดปล่อยออกมาในน้ำเสีย ซึ่งออร์โธฟอสเฟตเป็นรีแอคทีฟฟอสเฟต (reactive phosphate) หรือฟอสเฟตในรูปที่พร้อมทำปฏิกิริยากับสารอื่น (Cyzdik-Kwiatkowska and Nosek, 2020) ดังนั้น น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิดจึงสามารถนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของแั่งงฟอสเฟตได้มากกว่าน้ำก่อนผ่านกระบวนการบำบัด

การนำกลับฟอสเฟตด้วยกระบวนการก่อกองทางเคมีทำให้ผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสสูง โดยฟอสฟอรัสในของแั่งงฟอสเฟตที่นำกลับได้จากน้ำเสียฟาร์มสุกรอยู่ระหว่างร้อยละ 9.25 – 12.87 ซึ่งพบว่ามีปริมาณสูงกว่าฟอสฟอรัสในปุ๋ยซูเปอร์ซิงเกิลฟอสเฟต (Super Single Phosphate; SSP) (0-20-0) โดยคิดเป็นปริมาณฟอสฟอรัสร้อยละ 8.80 ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการศึกษานี้จึงบ่งชี้ว่าของแั่งงฟอสเฟตที่นำกลับจากน้ำเสียฟาร์มสุกรสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยทดแทนหรือสารปรับปรุงดินได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบของแร่ธาตุที่สำคัญของพืชเทียบเท่ากับปุ๋ยเคมีในท้องตลาด โดยเฉพาะฟอสฟอรัส

4.4 การปลดปล่อยธาตุอาหารจากของแั่งงฟอสเฟต (Phosphate leaching)

การปลดปล่อยธาตุอาหารของผลึกของแั่งงฟอสเฟตจากน้ำเสียฟาร์มสุกรถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งที่จะนำผลึกของแั่งงฟอสเฟตมาใช้เป็นปุ๋ย เพื่อประเมินคุณลักษณะการปลดปล่อยฟอสเฟตจากผลึกของแั่งงฟอสเฟต จึงต้องทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการปลดปล่อยฟอสเฟตหรือการละลายของฟอสเฟตในดิน โดยการนำของแั่งงฟอสเฟตไปผสมลงในดินที่ใช้สำหรับการปลูกพืชและรดน้ำวันละ 1 ครั้ง เป็นเวลา 30 วัน เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) และปุ๋ยฟอสเฟตที่มีขายตามท้องตลาด ได้แก่ ปุ๋ยทริเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (Triple superphosphate; TSP) (0-46-0) และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (Mono ammonium phosphate; MAP) (12-61-0) ผลของอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตในดิน แสดงดังรูปที่ 4.9

ผลการศึกษาการชะละลายฟอสเฟตจากปุ๋ยชนิดต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 30 วัน แสดงดังรูปที่ 4-9 (ก) ในการทดลองนี้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินอยู่ในช่วง 4.88 – 6.91 พบว่าปุ๋ยทริเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) สามารถปลดปล่อยฟอสเฟตในดินได้ดีในช่วง 1 – 3 วันแรกของการทดลอง และสูงที่สุดในวันที่ 3 ของการทดลอง ซึ่งปุ๋ยทริเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต มีอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตในดิน (ลบ



รูปที่ 4-9 อัตราการปลดปล่อยฟอสเฟต (phosphate leaching rate) ของแข็งฟอสเฟตจากฟาร์มสุกรเทียบกับปุ๋ยเคมี (ก) มวลของการปลดปล่อยฟอสเฟต และ (ข) ร้อยละสะสมของการปลดปล่อยฟอสเฟต

ปริมาณฟอสเฟตที่ชะละลายออกมาจากชุดควบคุม) เฉลี่ยเท่ากับ 11.30 และ 14.89 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ตามลำดับ จากนั้นอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตในดินค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตในดินค่อนข้างคงที่ในช่วงวันที่ 18 – 30 ของการทดลอง เฉลี่ย 1.61 และ 1.00 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส สำหรับปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตตามลำดับ ในขณะที่ปุ๋ยสตรูไวท์ที่ได้จากการนำกลับฟอสเฟตจากน้ำเสียฟาร์มสุกร (Struvite) สามารถปลดปล่อยฟอสเฟตในดินตั้งแต่วันแรกของการทดลอง อย่างไรก็ตามมีอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตในดินช้ากว่าปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ในช่วง 1 – 8 วันแรกของการทดลอง ซึ่งปุ๋ยสตรูไวท์สามารถปลดปล่อยฟอสเฟตในดินสูงที่สุดในวันที่ 9 ของการทดลอง เฉลี่ย 6.62

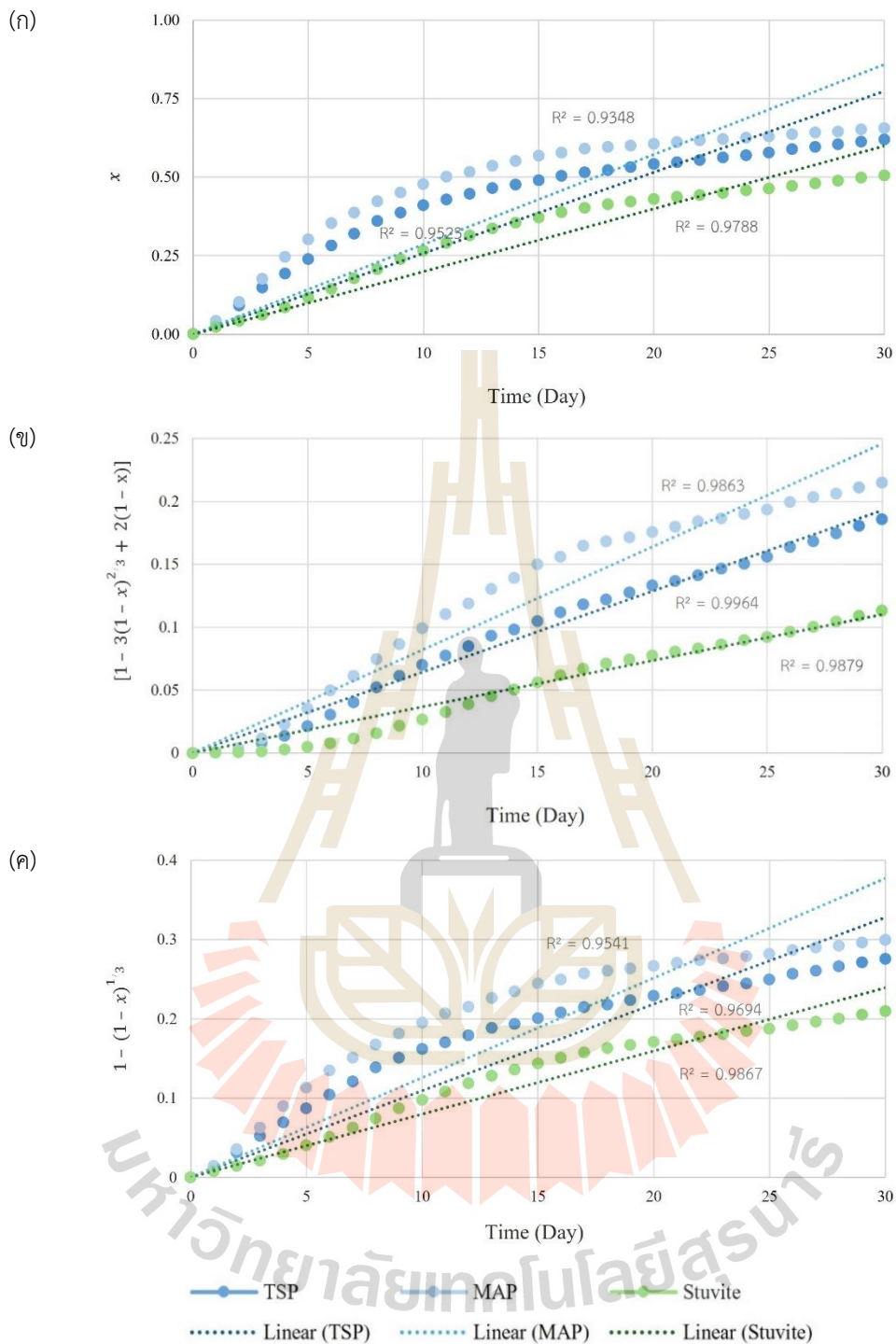
มิลลิกรัมฟอสฟอรัส และมีอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตสูงกว่าปุ๋ยทั้งสองชนิดเล็กน้อย ในช่วงวันที่ 9 – 14 ของการทดลอง จากนั้นอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตในดินค่อย ๆ ลดลง และมีอัตราการปลดปล่อยฟอสเฟตในดินค่อนข้างคงที่ในช่วงวันที่ 18 – 30 ของการทดลอง เฉลี่ย 1.59 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส

การชะละลายของฟอสเฟตในดินโดยใช้น้ำประปา (pH ~6) เป็นตัวทำละลาย เป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่า ลำดับของการปลดปล่อยฟอสเฟตในดิน เป็นดังนี้ ปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) > ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) > ปุ๋ยสตรูไวท์ (Struvite) โดยมีร้อยละของการปลดปล่อยฟอสเฟตเฉลี่ยร้อยละ 65.55, 61.96 และ 50.56 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) ซึ่งค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินชุดควบคุม (control) เท่ากับ 5.99 ± 0.42 และดินที่ชะละลายด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยสตรูไวท์ (Struvite) เท่ากับ 6.12 ± 0.43 , 5.97 ± 0.46 และ 6.06 ± 0.36 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินที่ผสมปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) มีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ (pH) กว่าปุ๋ยสตรูไวท์จึงสามารถชะละลายฟอสเฟตออกมาได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม ชุดการทดลองปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) มีประสิทธิภาพการชะละลายฟอสเฟตมากที่สุด และมีค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินสูงที่สุด (pH 6.12) การเพิ่มขึ้นของค่า pH นี้ อาจเป็นผลมาจากการปล่อยฟอสเฟตอออน (PO_4^{3-}) และไนโตรเจน (เช่น แอมโมเนียมอออน (NH_4^+) และแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (NH_4HCO_3)) โดยการละลายของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตทำให้ค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นและส่งผลให้มีอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันสุทธิเพิ่มขึ้น (Wang et al., 2020) เนื่องจากปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) มีปริมาณไนโตรเจนสูง (ร้อยละ 12) เมื่อเทียบกับปุ๋ยชนิดอื่นที่ใช้ในการศึกษานี้

ผลการศึกษาจลนศาสตร์การชะละลายของฟอสเฟตในดินของปุ๋ยสตรูไวท์ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นไปตามสมการการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง ของแบบจำลอง Shrinking core model แสดงดังรูปที่ 4-10 และตารางที่ 4-2

จากรูปที่ 4-10 และตารางที่ 4-2 พบว่า การควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของเหลวและการควบคุมปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิว แสดงว่าการชะละลายของฟอสเฟตในดินของปุ๋ยสตรูไวท์ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นไปตามการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง สอดคล้องกับการศึกษาของ Mgaidi and Mokni (2018) และ Ren et al. (2022) โดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง (k_d) ของปุ๋ยสตรูไวท์ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ที่ได้จากการศึกษานี้ มีค่าเท่ากับ 0.0037, 0.0064 และ 0.0082 ต่อวัน ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟอสฟอรัสในปุ๋ยทั้งสามชนิดยังคงเหลืออยู่ในช่วงร้อยละ 35 – 50 ซึ่งสามารถชะละลายออกมาในดินได้อย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นธาตุอาหารให้กับพืชหลังจากวันที่ 30 ของการทดลอง ทั้งนี้ การชะละลายของฟอสเฟตในดินขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในดิน เช่น องค์ประกอบของแร่ธาตุในดิน และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นต้น (Gustafsson et al., 2012; Johan et al., 2021) โดยฟอสเฟตจะมีความสามารถในการชะละลายสู่ดินมากขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินต่ำลง เนื่องจากความสามารถในการละลายที่สูงขึ้นของสารประกอบฟอสเฟต เช่น แมกนีเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (MgHPO_4) และแมกนีเซียมฟอสเฟต ($\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$) ในสภาวะกรด (Shin et al.,



รูปที่ 4-10 จลนศาสตร์การชะละลายของฟอสเฟตในดินตามแบบจำลอง Shrinking core model ของ ปุ๋ยสตรูไวท์ (Struvite), ปุ๋ยทริบปีลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) (ก) การควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของเหลว (ข) การควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง และ (ค) การควบคุมปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิว

ตารางที่ 4-2 พารามิเตอร์จลนศาสตร์ของการชะละลายฟอสเฟต

Kinetic parameters	Fertilizer		
	Struvite	TSP	MAP
การควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของเหลว			
k_l (d ⁻¹)	0.0200	0.0258	0.0286
R ²	0.9788	0.9523	0.9348
การควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง			
k_d (d ⁻¹)	0.0037	0.0064	0.0082
R ²	0.9879	0.9964	0.9863
การควบคุมปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิว			
k_r (d ⁻¹)	0.0080	0.0109	0.0126
R ²	0.9867	0.9694	0.9541

หมายเหตุ: k_l คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของเหลว (d⁻¹)

k_d คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง (d⁻¹)

k_r คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาการควบคุมปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิว (d⁻¹)

ปุ๋ยสูตรไวท์ (Struvite) = 12%P

ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) = 21.12%P

ปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) = 26.84%P

2020) ทั้งนี้ อัตราการดูดซึมฟอสเฟตของพืชขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและระยะเวลาในการเจริญเติบโต ดังนั้น การปลดปล่อยฟอสเฟตช้า อาจจำกัดการดูดซึมฟอสเฟตและการเจริญเติบโตของพืช ในทางตรงกันข้ามการปลดปล่อยฟอสเฟตเร็วเกินไป อาจสูญเสียฟอสเฟตจากการไหลบ่าจากดิน (runoff) ในพื้นที่เกษตรกรรม (Miyazato et al., 2020; Saliu and Oladoja, 2020)

4.5 การนำของแข็งฟอสเฟตไปใช้ในการปลูกพืช

การศึกษาในส่วนนี้เก็บรวบรวมข้อมูลการเจริญเติบโตของต้นดาวเรือง (*Tagetes erecta* L.) ตลอดระยะเวลา 45 วัน ในโรงเรือนขนาด 1.75 เมตร × 2.1 เมตร × 2.5 เมตร ด้วยชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) ปุ๋ยของแข็งฟอสเฟตที่ได้จากการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มสุกร หรือ ปุ๋ยสูตรไวท์ (struvite) ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) ทำการทดลอง 5 ซ้ำ และต้นดาวเรืองถูกเก็บเกี่ยวในวันที่ 45 ดินบนรากพืชถูกล้างด้วยน้ำกลั่น ลำต้น ใบ ราก และดอกดาวเรืองถูกทำให้แห้ง วัดน้ำหนักสดโดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง วัดความยาวของลำต้นและรากโดยใช้ไม้บรรทัด และวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในส่วนประกอบต่าง ๆ ของพืช ผลการศึกษาเป็นดังนี้

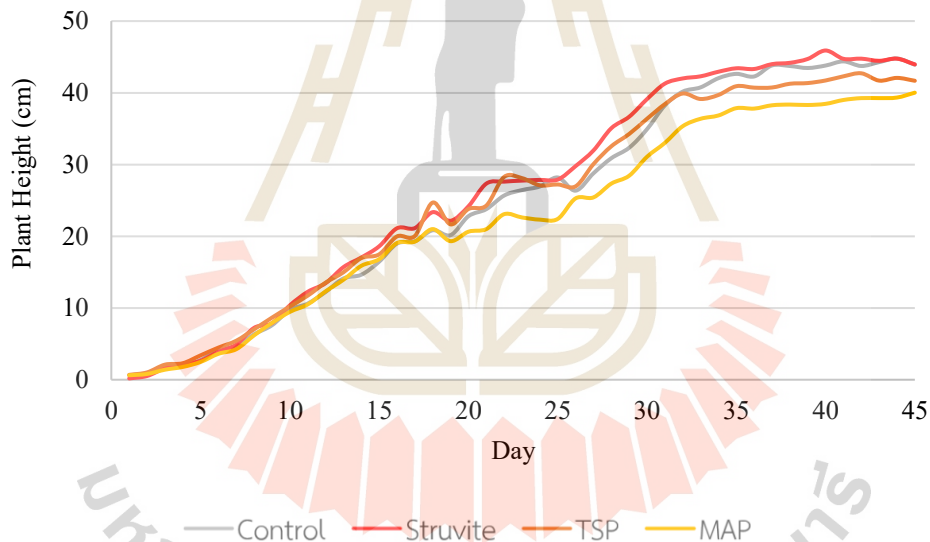
4.5.1 ผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

ในการศึกษานี้ ทดสอบการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยศึกษาผลต่อความสูงพืช (plant height) จำนวนใบ (number of leaves) จำนวนดอก (number of flowers)

และความยาวราก (root length) ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษาดังต่อไปนี้ ส่วนปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิในโรงเรือนเพาะปลูก ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน และความชื้นในดิน เป็นต้น แสดงในภาคผนวก ข

4.5.1.1 ความสูงพืช

ความสูงของต้นดาวเรืองตลอดระยะเวลา 45 วัน แสดงดังรูปที่ 4-11 โดยความสูงที่แสดงในรูปเป็นความสูงของพืชที่หักลบความสูงในวันแรกที่ย้ายต้นกล้าลงกระถาง เพื่อศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้น ในวันที่ 1 ของการย้ายต้นกล้าลงกระถางเพาะปลูก พืชทุกต้นจะมีความสูงที่แสดงในรูปเท่ากับ 0 เซนติเมตร โดยความสูงของต้นดาวเรืองจากชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) ปุ๋ยสูตรทั่วไป ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าเฉลี่ยความสูงของต้นดาวเรืองในวันที่ 45 เท่ากับ 43.92 ± 2.40 , 43.96 ± 2.20 , 41.68 ± 1.80 และ 40.02 ± 4.60 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความสูงเฉลี่ยใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง ความสูงของต้นดาวเรืองอาจแสดงถึงปริมาณฟอสฟอรัสที่เพียงพอต่อการเติบโตของต้นพืช โดยที่ฟอสฟอรัสมีบทบาทในการเสริมสร้างโครงสร้างและการแบ่งเซลล์ใหม่ ซึ่งส่งผลต่อความสูงและความแข็งแรงของต้นพืช



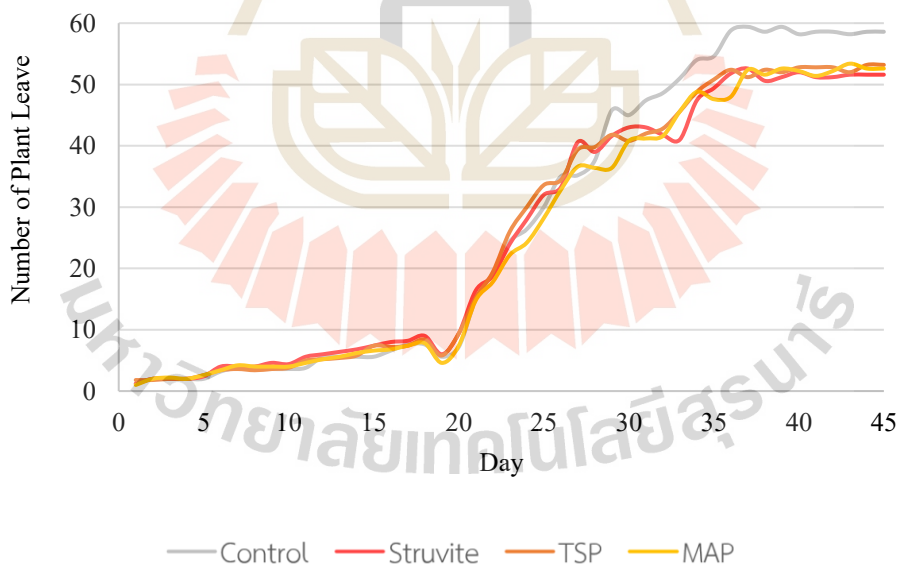
รูปที่ 4-11 ความสูงของต้นดาวเรืองจากการทดลองด้วยของแข็งฟอสเฟตจากฟาร์มสุกรเปรียบเทียบกับปุ๋ยฟอสเฟตเคมี

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาพบว่า ต้นดาวเรืองของชุดการทดลองปุ๋ยสูตรทั่วไป มีความสูงเฉลี่ยของน้อยกว่าต้นดาวเรืองของชุดการทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ระหว่าง 0.1 – 0.5 เซนติเมตร ในช่วง 4 วันแรกของการย้ายต้นกล้าลงกระถาง ในขณะเดียวกัน ต้นดาวเรืองของชุดการทดลองปุ๋ยสูตรทั่วไปมีความสูงเฉลี่ยของน้อยกว่าต้นดาวเรืองของชุดการทดลองปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ระหว่าง 0.1 – 0.8 เซนติเมตร ในช่วง 10 วันแรกของการย้ายต้นกล้าลงกระถาง แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยสูตรทั่วไปมีความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารสู่พืชช้ากว่าปุ๋ยเคมีในช่วงแรกของการทดลอง เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นปุ๋ยละลายช้า (slow-release fertilizer) สอดคล้องกับการชะละลายของธาตุ

อาหาร (ฟอสเฟต) จากการทดลองในส่วนที่ 4.4 และสอดคล้องกับการศึกษาของ Khaing et al. (2022) ส่งผลให้ต้นพืชเจริญเติบโตได้ช้ากว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ในระยะแรกของการทดลอง

4.5.1.2 จำนวนใบ

จำนวนใบของต้นดาวเรืองตลอดระยะเวลา 45 วัน แสดงดังรูปที่ 4-12 โดยวันที่ 1 ของการทดลอง มีจำนวนใบอยู่ระหว่าง 2 - 4 ใบ เนื่องจากเป็นต้นกล้าที่เพาะเมล็ดมาประมาณ 15 - 20 วัน เมื่อผ่านไป 5 วัน พบว่า จำนวนใบของต้นดาวเรืองเพิ่มจำนวนขึ้นเล็กน้อย ระหว่าง 6 - 8 ใบ และจำนวนยังคงเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเรื่อย ๆ ในวันที่ 20 ของการย้ายต้นกล้าลงกระถางเพาะปลูก มีการเด็ดยอด เพื่อให้ต้นดาวเรืองแตกยอดเพิ่มเติมและเจริญเติบโตได้ดี ทำให้จำนวนใบของต้นดาวเรืองอยู่ระหว่าง 8 - 10 ใบ เมื่อผ่านไป 3 วัน (วันที่ 23) จำนวนใบของต้นดาวเรืองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อยู่ระหว่าง 18 - 22 ใบ ของทุกชุดการทดลอง และมีจำนวนใบเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันจนกระทั่งวันที่ 30 ของการทดลอง หลังจากนั้น (วันที่ 31 เป็นต้นไป) ชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) มีจำนวนใบเฉลี่ยสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ โดยจำนวนใบของต้นดาวเรืองจากชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย), ปุ๋ยสูตรไวท์, ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ในวันที่ 31 เท่ากับ 49.40 ± 6.19 , 45.60 ± 4.04 , 45.80 ± 5.50 และ 40.20 ± 2.05 เซนติเมตร ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งวันที่ 35 จากนั้นจะค่อนข้างคงที่ และจำนวนใบของต้นดาวเรืองจากชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) ปุ๋ยสูตรไวท์ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าเฉลี่ยจำนวนใบของต้นดาวเรืองในวันที่ 45 เท่ากับ 58.60 ± 6.18 , 51.60 ± 2.19 , 53.20 ± 4.38 และ 52.60 ± 5.37 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4-12 จำนวนใบของต้นดาวเรืองจากการทดลองด้วยของแข็งฟอสเฟตจากฟาร์มสุกรเปรียบเทียบกับปุ๋ยฟอสเฟตเคมี

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากปุ๋ยชนิดต่าง ๆ ส่งผลต่อจำนวนใบของต้นดาวเรืองอย่างไม่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม จำนวนใบที่มากกว่าชุดการทดลองอื่นของชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการปรับตัวของพืชต่อการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่

ขาดธาตุอาหาร (เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น) โดยพืชอาจตอบสนองในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การกระตุ้นการสร้างใบเพื่อเพิ่มพื้นที่สังเคราะห์แสง การดึงฟอสฟอรัสจากแหล่งสำรองภายในซึ่งอาจสนับสนุนการสร้างใบใหม่ และการกระตุ้นการเติบโตของรากซึ่งอาจส่งผลทางอ้อมต่อการเพิ่มจำนวนใบในระยะยาว เนื่องจากรากที่มากขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำและธาตุอาหาร เป็นต้น (Vance et al., 2003; Poirier et al., 2022)

4.5.1.3 จำนวนดอกและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอก

จำนวนดอกดาวเรืองและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดอกดาวเรือง ในวันเก็บเกี่ยว (วันที่ 45) แสดงดังตารางที่ 4-3 ผลการศึกษา พบว่า ชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร มีค่าเฉลี่ยจำนวนดอกดาวเรืองสูงที่สุด เท่ากับ 9.60 ± 1.14 ดอก รองลงมา ได้แก่ ชุดทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และชุดควบคุม โดยมีค่าเฉลี่ยจำนวนดอกดาวเรือง เท่ากับ 9.20 ± 3.42 , 8.40 ± 1.34 , และ 5.80 ± 1.10 ดอก ตามลำดับ และชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร มีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกดาวเรืองสูงที่สุด เท่ากับ 5.56 ± 0.42 เซนติเมตร และมีขนาดใกล้เคียงกับชุดการทดลองด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.54 ± 0.63 เซนติเมตร ในขณะที่ชุดควบคุมและชุดการทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต มีค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกดาวเรือง เท่ากับ 4.76 ± 1.20 และ 4.66 ± 1.33 เซนติเมตร ตามลำดับ

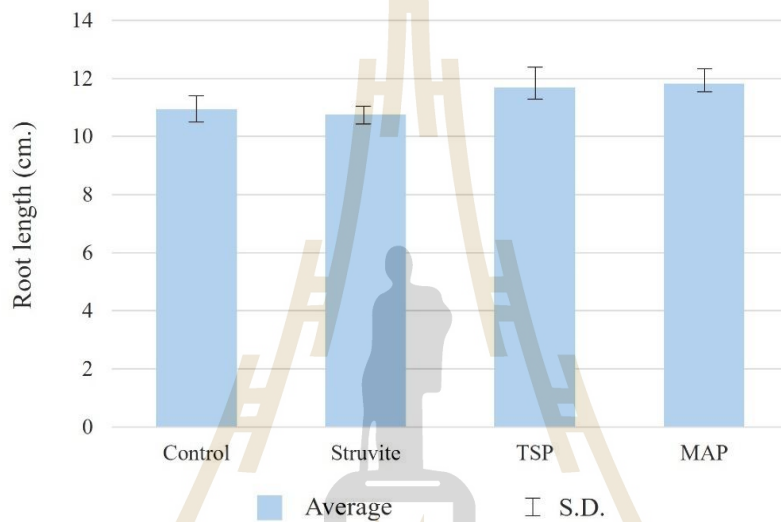
ตารางที่ 4-3 จำนวนดอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกดาวเรือง (วันที่ 45)

การทดลอง	จำนวนดอกดาวเรือง (ดอก)	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกดาวเรือง (เซนติเมตร)
Control	5.80 ± 1.10	4.76 ± 1.20
Struvite	9.60 ± 1.14	5.56 ± 0.42
TSP	8.40 ± 1.34	5.54 ± 0.63
MAP	9.20 ± 3.42	4.66 ± 1.33

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเติมปุ๋ยฟอสเฟตส่งผลให้จำนวนดอกของต้นดาวเรืองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ($p\text{-value} < 0.05$) ซึ่งปุ๋ยฟอสเฟตส่งผลอย่างมากต่อจำนวนดอกและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของต้นดาวเรือง โดยเฉพาะปุ๋ยสูตรไวท์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรซึ่งให้จำนวนดอกสูงที่สุดที่ 9.60 ± 1.14 ดอก และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกที่ 5.56 ± 0.42 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากปุ๋ยสูตรไวท์ช้า ๆ อย่างต่อเนื่อง ทำให้พืชได้รับธาตุอาหารอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้พืชมีดอกที่แข็งแรงและมีขนาดใหญ่ ในขณะที่ปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตซึ่งมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงที่สุดมีจำนวนดอกเฉลี่ยที่ 9.20 ± 3.42 ดอก ซึ่งมีจำนวนดอกสูงที่สุดถึง 12 ดอก นั่นคือฟอสฟอรัสมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อการเจริญเติบโตและความแข็งแรงของดอก

4.5.1.4 ความยาวราก

ความยาวรากของต้นดาวเรือง ในวันเก็บเกี่ยว (วันที่ 45) แสดงดังรูปที่ 4-13 ผลการศึกษา พบว่า ทุกชุดการทดลองมีความยาวรากของต้นดาวเรืองเฉลี่ยใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 10.76 – 11.82 เซนติเมตร โดยชุดการทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตมีความยาวรากเฉลี่ยสูงที่สุด เท่ากับ 11.82 ± 0.92 เซนติเมตร รองลงมาคือ ชุดทดลองด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) และชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรทั่วไป ตามลำดับ ฟอสฟอรัสมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของรากพืช ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการสร้างความแข็งแรงให้กับระบบราก เพิ่มประสิทธิภาพในการหาแหล่งน้ำและธาตุอาหารอื่น ๆ ในดิน



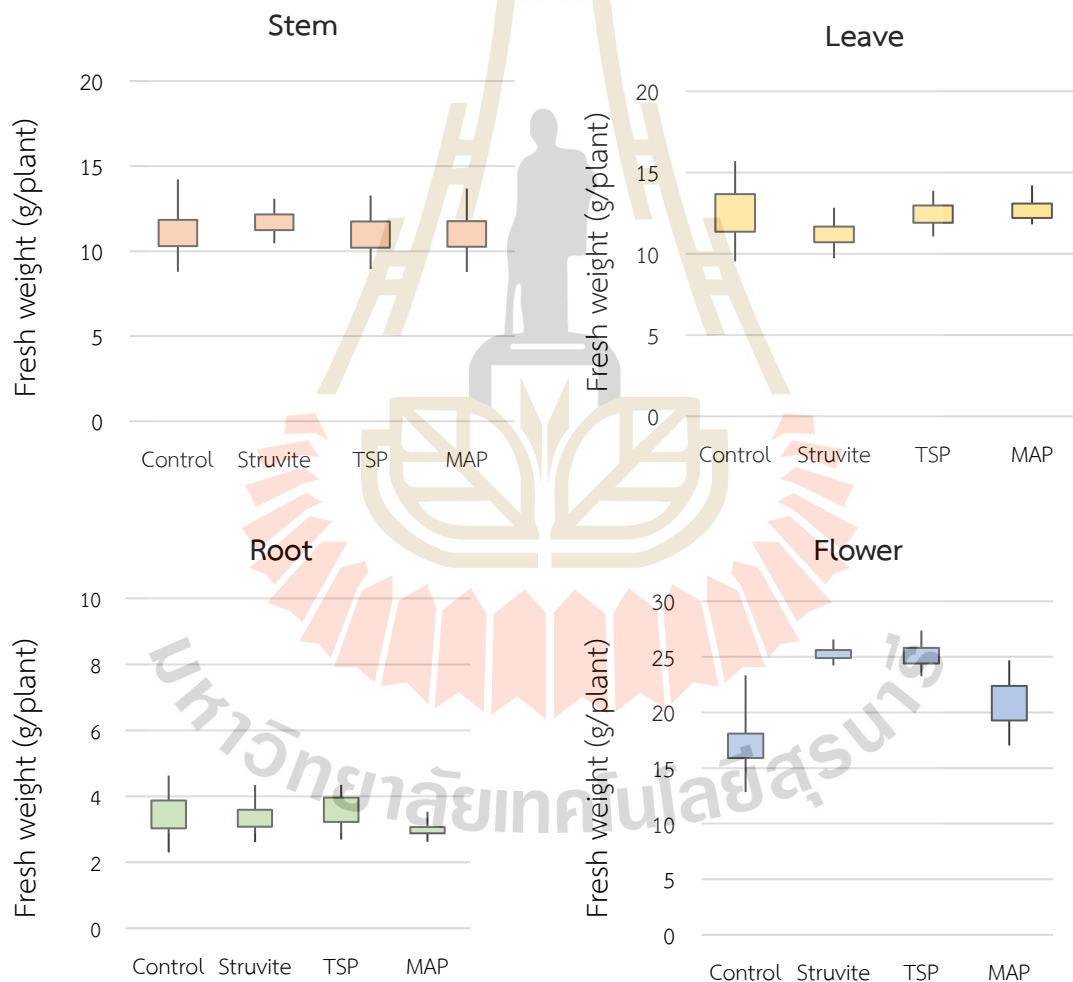
รูปที่ 4-13 ความยาวรากของต้นดาวเรืองจากการทดลองด้วยของแข็งฟอสเฟตจากฟาร์มสุกร เปรียบเทียบกับปุ๋ยฟอสเฟตเคมี

อย่างไรก็ตาม การเจริญเติบโตของรากต้นดาวเรืองในชุดควบคุมแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น และมีค่าเฉลี่ยความยาวรากสูงกว่าชุดทดลองด้วยปุ๋ยสูตรทั่วไปเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการปรับตัวของพืชต่อการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่ขาดธาตุอาหาร ทำให้มีการเพิ่มการเจริญเติบโตของรากและการแผ่ขยายของรากในดิน เพื่อให้พืชสามารถดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (Vance et al., 2003; Poirier et al., 2022) นอกจากนี้ ปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนรวมด้วยในปริมาณมากกว่าปุ๋ยชนิดอื่น ส่งผลให้มีความยาวของรากมากกว่าชุดการทดลองอื่น ซึ่งไนโตรเจนในปุ๋ยอาจกระตุ้นให้ระบบรากแข็งแรงมากขึ้น

การวิเคราะห์ผลของปุ๋ยฟอสเฟตชนิดต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโตของต้นดาวเรือง ในด้านความสูง จำนวนใบ จำนวนดอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดอก และความยาวของราก ชี้ให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของต้นดาวเรืองขึ้นอยู่กับการปลดปล่อยฟอสฟอรัส โดยปุ๋ยสูตรทั่วไปแสดงผลในการเพิ่มจำนวนดอกและเส้นผ่าศูนย์กลางดอกสูงที่สุด นอกจากนี้ การมีองค์ประกอบของไนโตรเจนในปุ๋ยเพิ่มขึ้นจะช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของลำต้นและรากได้ดีเช่นผลการทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (12 – 61 – 0) อีกด้วย

4.5.2 ผลผลิต (Yield)

ผลการเปรียบเทียบผลผลิตสะสมของต้นดาวเรืองเมื่อใช้ปุ๋ยต่างชนิดกัน แสดงดังรูปที่ 4-14 โดยเก็บเกี่ยวในวันที่ 45 พบว่า น้ำหนักสดของลำต้นดาวเรือง (stem) ของทั้ง 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม, ปุ๋ยสูตรไวท์, ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ใกล้เคียงกัน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 11.75 – 12.16 กรัมต่อต้น เช่นเดียวกับกับน้ำหนักสดของใบ (leave) และราก (root) ของทั้ง 4 ชุดการทดลองที่มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 11.67 – 13.67 และ 3.09 – 3.96 กรัมต่อต้น ของน้ำหนักสดใบและราก ตามลำดับ ในทางกลับกัน พบว่า ผลผลิตสะสมของดอกดาวเรือง (flower) ของชุดควบคุมมีน้ำหนักสดน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.11 ± 3.06 กรัมต่อต้น สำหรับน้ำหนักสดดอกดาวเรืองของชุดการทดลองปุ๋ยสูตรไวท์, ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.62 ± 0.67 , 25.81 ± 1.15 และ 22.40 ± 2.26 กรัมต่อต้น ตามลำดับ



รูปที่ 4-14 เปรียบเทียบผลผลิตสะสมของต้นดาวเรือง (กรัม/ต้น) ของการทดลองชุดควบคุม (control) ปุ๋ยสูตรไวท์ (struvite) ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) แบ่งตามส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่ ลำต้น (stem) ใบ (leave) ราก (root) และ ดอก (flower) (วันที่ 45)

ผลการศึกษาข้างนี้บ่งชี้ว่าปุ๋ยชนิดต่าง ๆ ให้ผลผลิตน้ำหนักรากของลำต้น ใบ และราก แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญกับชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) อย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจวัดน้ำหนักรากของดอก ดาวเรือง พบว่า ชุดควบคุมมีน้ำหนักรากของดอกดาวเรืองต่ำกว่าชุดทดลองที่ได้รับปุ๋ยฟอสเฟตอย่าง มีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เนื่องจากฟอสฟอรัสมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะ การส่งเสริมการพัฒนารากและการกระตุ้นกระบวนการออกดอก (Schachtman et al., 1998) การได้รับฟอสฟอรัสในปริมาณที่เพียงพอส่งผลให้ต้นดาวเรืองมีการพัฒนาดอกที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับ ชุดควบคุม ซึ่งดอกดาวเรืองเป็นส่วนสำคัญของผลผลิตในเชิงการค้า นอกจากนี้ ปุ๋ยสูตรไวท์ซึ่งผลิตจาก น้ำเสียฟาร์มสุกรแสดงศักยภาพในการเพิ่มผลผลิตดอกได้ใกล้เคียงหรือสูงกว่าปุ๋ยเคมี ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Sun et al. (2024) และ Talboys et al. (2016) ที่ชี้ให้เห็นว่าปุ๋ยสูตรไวท์สามารถใช้ทดแทนปุ๋ยฟอสเฟตเคมีในการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ

4.5.3 การกระจายของฟอสเฟตในส่วนต่าง ๆ ของพืช

ผลเปรียบเทียบการกระจายของฟอสเฟตในส่วนต่าง ๆ ของต้นดาวเรือง ประกอบด้วย ลำต้น ใบ ราก และดอก แสดงดังรูปที่ 4-15 ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสในต้นดาวเรือง เฉลี่ย ของชุดควบคุม ชุดทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียม ฟอสเฟต เท่ากับ 131.18, 161.19, 173.32 และ 156.32 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อต้น ตามลำดับ ต้น ดาวเรืองของชุดการทดลองด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตมีปริมาณการดูดซับฟอสฟอรัสสูงที่สุด รองลงมา คือ ปุ๋ยสูตรไวท์ ปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต และชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าการเติมปุ๋ย ฟอสเฟตสามารถให้ฟอสฟอรัสที่พร้อมใช้แก่พืช ซึ่งส่งผลให้เกิดการสะสมฟอสฟอรัสในพืชได้สูงขึ้น



รูปที่ 4-15 การกระจายของฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของพืช จากการทดลองด้วยของแข็ง ฟอสเฟตจากฟาร์มสุกรเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีและชุดทดลอง

การกระจายตัวของฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของต้นดาวเรือง มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ ชนิดของปุ๋ยที่ใช้ โดยส่วนของดอกสะสมฟอสฟอรัสในสัดส่วนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ ของ พืชในทุกชุดการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของฟอสฟอรัสต่อกระบวนการออกดอก โดย รายละเอียดการกระจายของฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของพืช เป็นดังนี้

ดอกดาวเรืองของชุดทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์และปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต มีค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสเท่ากับ 92.22 และ 90.09 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ตามลำดับ แสดงว่าปุ๋ยเหล่านี้สามารถปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรูปที่พืชนำไปใช้ได้ดีและส่งเสริมการเจริญเติบโตของดอก ในขณะที่ชุดทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตและชุดควบคุมมีการสะสมฟอสฟอรัสในดอกน้อยกว่า โดยมีค่าฟอสฟอรัสเท่ากับ 84.21 และ 77.95 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ตามลำดับ ทั้งนี้ สอดคล้องกับน้ำหนักที่น้อยกว่าของดอกดาวเรืองจากชุดการทดลองทั้ง 2 นี้ (แสดงในส่วนที่ 4.5.1.3 จำนวนดอกและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอก) ซึ่งบ่งชี้ถึงข้อจำกัดของการได้รับฟอสฟอรัสสำหรับการเติบโตของดอกในชุดทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตและชุดควบคุม

สำหรับใบของต้นดาวเรืองในชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์มีการสะสมฟอสฟอรัสในระดับต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนต่าง ๆ ของพืช ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละชุดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสสูงสุดในชุดการทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต เท่ากับ 11.51 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส รองลงมา คือ ชุดการทดลองด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ชุดควบคุม และชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์ เท่ากับ 9.86, 8.99 และ 8.75 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยแต่ละชนิดมีผลต่อการกระจายฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของพืชที่เจริญเติบโตน้อยกว่าส่วนดอก ฟอสฟอรัสในใบมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง การสะสมฟอสฟอรัสในใบในระดับที่เหมาะสมนี้ช่วยเสริมสร้างความสามารถในการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโตของพืชโดยรวม

ปริมาณการสะสมของฟอสฟอรัสในลำต้นของดาวเรืองอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยมีค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสสูงสุดในชุดการทดลองด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต เท่ากับ 36.77 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ในขณะที่ชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตมีค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสในลำต้นใกล้เคียงกัน เท่ากับ 31.48 และ 32.69 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ตามลำดับ ชุดการทดลองด้วยปุ๋ยทั้ง 3 ชนิด มีการสะสมของฟอสฟอรัสในลำต้นสูงกว่าชุดควบคุม ซึ่งชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัส เท่ากับ 28.29 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนอื่น ๆ พบว่า การสะสมของฟอสฟอรัสในลำต้นมีค่ามากเป็นอันดับที่ 2 รองลงมาจากดอก อาจเป็นผลมาจากลำต้นเป็นส่วนสำคัญในการลำเลียงฟอสฟอรัสไปสู่ส่วนดอกที่เป็นผลผลิตสำคัญของต้นดาวเรือง

รากเป็นส่วนสำคัญในการดูดซับฟอสฟอรัสจากดินสู่พืช ปริมาณการสะสมของฟอสฟอรัสในรากของชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองด้วยปุ๋ยฟอสเฟต โดยมีค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสในราก เท่ากับ 15.96 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส สำหรับชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตมีค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสในรากใกล้เคียงกัน เท่ากับ 28.74 และ 27.92 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ตามลำดับ และพบการสะสมของฟอสฟอรัสในรากสูงสุดด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต เท่ากับ 36.59 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ผลการศึกษาบ่งชี้ว่ารากพืชของชุดการทดลองด้วยปุ๋ยฟอสเฟตสามารถสะสมฟอสฟอรัสได้มากกว่าชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) อาจเป็นผลมาจากปริมาณฟอสฟอรัสจากปุ๋ยที่มากกว่าชุดควบคุม ทั้งนี้ การสะสมฟอสฟอรัสของรากพืชมีปริมาณรองลงมาจากส่วนของดอกและลำต้น แสดงให้เห็นว่าต้นดาวเรืองมีแนวโน้มในการขนส่งฟอสฟอรัสไปยังส่วนเหนือดิน โดยเฉพาะส่วนดอกที่เป็นผลผลิตสำคัญของต้นดาวเรืองซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยขยายพันธุ์ต่อไปได้

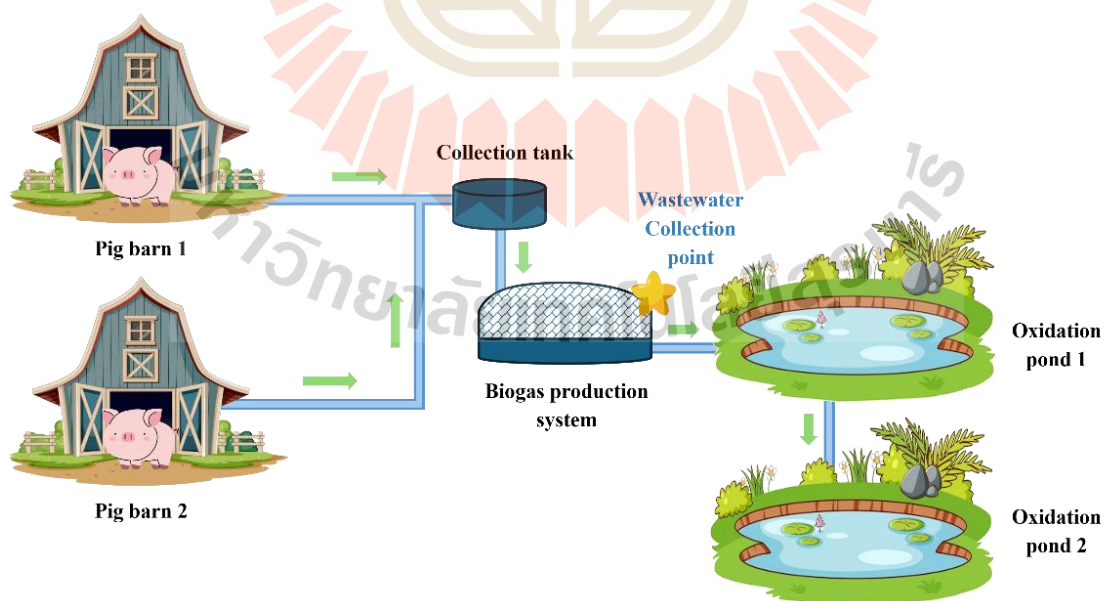
ชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์และปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของฟอสฟอรัสในลักษณะและระดับที่ใกล้เคียงกัน และปุ๋ยทั้ง 2 ชนิดนี้ ช่วยเพิ่มการสะสม

ฟอสฟอรัสในพืชได้สูงกว่าชุดการทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตและชุดควบคุม โดยเฉพาะในส่วนของดอก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Arcas-Pilz et al. (2021) ที่แสดงให้เห็นว่าฟอสฟอรัสจากปุ๋ยสูตรไวท์มีการสะสมสูงสุดในส่วนของฝักถั่ว ซึ่งเป็นผลผลิตสำคัญของพืชชนิดนั้น แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของปุ๋ยสูตรไวท์สำหรับการนำมาใช้เป็นปุ๋ยทางเลือกทดแทนปุ๋ยฟอสเฟตแบบดั้งเดิม เช่น ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต เป็นต้น เนื่องจากสามารถส่งเสริมการกระจายตัวของฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตมีประโยชน์ในการเพิ่มการสะสมฟอสฟอรัสในต้นดาวเรือง แม้จะมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวในส่วนต่าง ๆ ของพืชน้อยกว่าปุ๋ยสูตรไวท์และปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตในการส่งเสริมการสะสมของฟอสฟอรัสในดอก ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากอัตราการปลดปล่อยหรือความสามารถในการละลายน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสฟอรัสของพืชด้วย

4.6 การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์

4.6.1 คำนวณปริมาณของแข็งฟอสเฟตที่สามารถผลิตได้

ข้อมูลจากฟาร์มสุกรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่า เป็นฟาร์มสุกรขนาดเล็ก จำนวนสุกรอยู่ระหว่าง 100 – 200 ตัวต่อเดือน แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สุกรพ่อพันธุ์และแม่พันธุ์ จำนวน 20 – 30 ตัวต่อเดือน และลูกสุกร จำนวน 95 – 170 ตัวต่อเดือน ดังนั้น จึงมีโรงเรือนเลี้ยงสุกร 2 หลัง ซึ่งมีปริมาณการใช้น้ำในโรงเรือนเลี้ยงสุกรเฉลี่ยเท่ากับ 564 ± 28.92 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน และเกิดน้ำเสียจากโรงเรือนเลี้ยงสุกรเฉลี่ยเท่ากับ 464 ± 20.88 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน หรือ 15.47 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 82.42 ของปริมาณน้ำที่ใช้ในโรงเรือนเลี้ยงสุกร น้ำเสียทั้งหมดจะถูกรวบรวมเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (Covered Lagoon) และน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดเข้าสู่บ่อฝัง ดังแสดงในรูปที่ 4-16



รูปที่ 4-16 แผนผังโรงเรือนเลี้ยงสุกรและระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากคุณลักษณะน้ำเสียฟาร์มสุกร (ตารางที่ 4-1) และผลการศึกษาการนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการก่อดักตะกอนทางเคมี พบว่า น้ำหลั้ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบปิด (Covered Lagoon) มีไอออนของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ไอออนของแอมโมเนียม (NH_4^+) และไอออนของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ในระดับความเข้มข้นเหมาะสม สามารถก่อดักตะกอนฟอสเฟตเพื่อนำมาใช้เป็นปุ๋ยฟอสเฟตได้ โดยผลการศึกษา พบว่า การทดลองนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการก่อดักตะกอนทางเคมีที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 8.5 และอัตราส่วนโมลแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส (Mg/P molar ratio) เดิมของน้ำเสีย สามารถนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของแข็งฟอสเฟต ได้เท่ากับ 786.60 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 11.71 (รูปที่ 4-8) โดยผลคาดการณ์ปริมาณของแข็งฟอสเฟตที่สามารถผลิตได้จากฟาร์มสุกรคิดเป็นร้อยละ 90 ของการทดลองในห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) และคำนวณเวลาปฏิบัติงาน 330 วันต่อปี ตามจำนวนวันดำเนินงานของฟาร์ม ผลคาดการณ์ปริมาณของแข็งฟอสเฟตที่สามารถผลิตได้ตามสถานการณ์ข้างต้นแสดงดังตารางที่ 4-4 ซึ่งผลคาดการณ์ปริมาณของแข็งฟอสเฟตที่สามารถผลิตได้จากน้ำเสียฟาร์มสุกรพบว่า น้ำหลั้ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อบปิด (Covered Lagoon) เข้าสู่กระบวนการก่อดักตะกอนทางเคมี 15.47 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือ 4,641 ลูกบาศก์เมตรต่อปี สามารถผลิตของแข็งฟอสเฟตได้เท่ากับ 10.95 กิโลกรัมต่อวัน หรือ 3,613.5 กิโลกรัมต่อปี คิดเป็นปริมาณฟอสฟอรัสที่นำกลับได้ 1.28 กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อวัน หรือ 422.4 กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อปี การนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของแข็งฟอสเฟตสามารถนำไปใช้ทดแทนปุ๋ยเคมีได้ และลดผลกระทบของการปนเปื้อนของธาตุอาหารในแหล่งน้ำธรรมชาติได้อีกด้วย

ตารางที่ 4-4 คาดการณ์ปริมาณของแข็งฟอสเฟตที่สามารถผลิตได้จากน้ำเสียฟาร์มสุกร

รายการ	คาดการณ์ปริมาณของแข็งฟอสเฟต	
	ต่อวัน	ต่อปี*
ปริมาตรน้ำเสียที่นำมาสู่กระบวนการก่อดักตะกอนทางเคมี	15.47 m ³ ·d ⁻¹	4,641 m ³ ·y ⁻¹
ปริมาณของแข็งฟอสเฟตที่นำกลับได้	10.95 kg·d ⁻¹	3,613.5 kg·y ⁻¹
ปริมาณฟอสฟอรัสที่นำกลับได้	1.28 kg P·d ⁻¹	422.4 kg P·y ⁻¹

หมายเหตุ: * คำนวณการทำงานของระบบก่อดักตะกอนฟอสฟอรัสไว้ จำนวน 330 วันต่อปี

4.6.2 การประเมินทางเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ของการก่อดักตะกอนทางเคมีของผลึกสตรูไวท์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร

ในการศึกษานี้ การประเมินทางเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ของกระบวนการก่อดักตะกอนทางเคมีผลึกสตรูไวท์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) วัตถุประสงค์และขอบเขต (goal and scope) (2) ขอบเขตและรายการที่ใช้ในระบบ (system boundary and inventory) (3) แนวทางการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (economic evaluation approach) และ (4) การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

4.6.2.1 วัตถุประสงค์และขอบเขต (goal and scope)

วัตถุประสงค์ของการประเมินทางเทคโนโลยีเศรษฐศาสตร์ในการศึกษานี้ คือ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และศักยภาพในการนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของแข็งฟอสเฟตจากน้ำเสียฟาร์มสุกร (น้ำหลังออกจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ) ขอบเขตของการศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินรายได้ที่เกิดจากการนำกลับของแข็งฟอสเฟตและการลงทุนที่จำเป็นสำหรับระบบก่อดตะกอนทางเคมีของฟอสฟอรัสในฟาร์มสุกรขนาดเล็ก โดยการประเมินทางเศรษฐศาสตร์นี้จะแสดงในรูปของดอลลาร์สหรัฐต่อหน่วยปริมาตรน้ำเสียที่บำบัดได้ ($\text{USD}\cdot\text{m}^{-3}$)

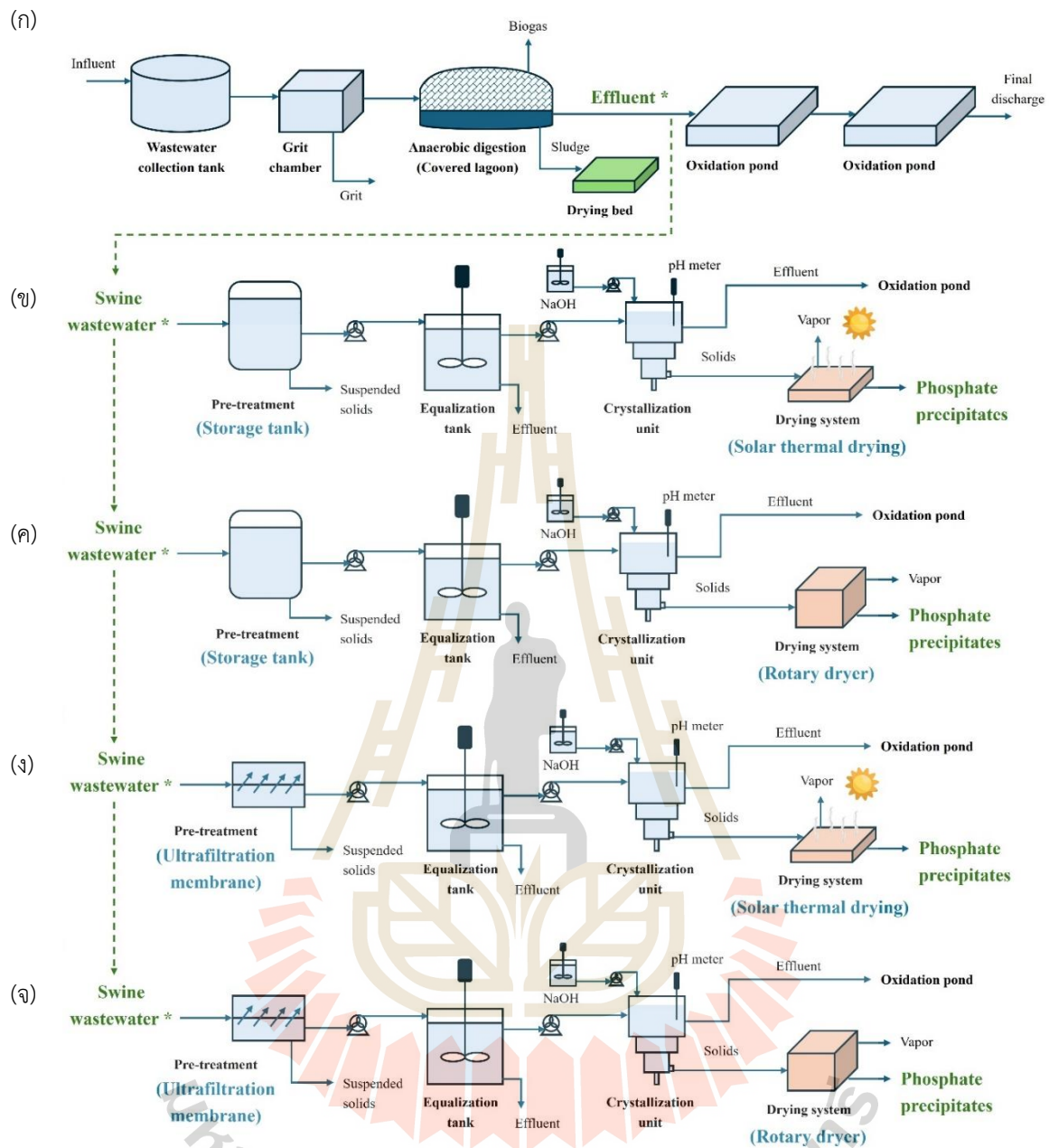
4.6.2.2 ขอบเขตและรายการที่ใช้ในระบบ (system boundary and inventory)

การกำหนดขอบเขตและรายการที่ใช้ในระบบมีความสำคัญในการกำหนดกระบวนการและการดำเนินการ การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินทางเทคโนโลยีเศรษฐศาสตร์โดยคำนึงถึงทั้งค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน (operating costs) และค่าใช้จ่ายการลงทุน (capital costs) ระบบก่อดตะกอนทางเคมีของฟอสฟอรัสประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) ส่วนปรับสภาพเบื้องต้น (pre-treatment unit) เพื่อลดสารแขวนลอย (2) ส่วนปรับเสถียร (equalization unit) (3) ส่วนจ่ายสารเคมี (chemical feeding unit) (4) ส่วนก่อดตะกอนทางเคมีของฟอสฟอรัส (struvite crystallization unit) และ (5) ส่วนทำแห้ง (dewatering system) (Riewklang et al., 2024; Vinardell et al., 2023) ในการศึกษาเปรียบเทียบการดำเนินการระหว่าง 4 ระบบก่อดตะกอนทางเคมีของฟอสฟอรัส ขอบเขตของระบบแสดงในรูปที่ 4-17 และมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

- Scenario I – ระบบที่ใช้ถังเก็บน้ำ (storage tank) เป็นหน่วยปรับสภาพเบื้องต้นและใช้วิธีการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (solar thermal drying method) ซึ่งกรณีนี้จัดเป็นกรณีพื้นฐาน (based case)
- Scenario II – ระบบที่ใช้ถังเก็บน้ำ (storage tank) เป็นหน่วยปรับสภาพเบื้องต้นและใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุน (rotary dryer) ซึ่งกรณีนี้จัดเป็นกรณีทั่วไป (conventional case)
- Scenario III – ระบบที่ใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration membrane) เป็นหน่วยปรับสภาพเบื้องต้นและใช้วิธีการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (solar thermal drying method)
- Scenario IV – ระบบที่ใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration membrane) เป็นหน่วยปรับสภาพเบื้องต้นและใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุน (rotary dryer)

4.6.2.3 แนวทางการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (economic evaluation approach)

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์นี้ใช้เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยีเศรษฐศาสตร์ของระบบก่อดตะกอนทางเคมีของฟอสฟอรัสในการบำบัดน้ำเสียภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบกะ (batch) ที่เหมาะสม โดยกระบวนการนี้ใช้น้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัส 0.121 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พร้อมกับเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในอัตรา 1.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อปรับค่า pH ให้



รูปที่ 4-17 แผนผังระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของฟลักซ์สตรูไวท์ (ก) ระบบบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรแบบทั่วไป (ไม่มีระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของฟลักซ์สตรูไวท์), (ข) ระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของฟลักซ์สตรูไวท์ - scenario I, (ค) ระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของฟลักซ์สตรูไวท์ - scenario II, (ง) ระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของฟลักซ์สตรูไวท์ - scenario III, และ (จ) ระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของฟลักซ์สตรูไวท์ - scenario IV

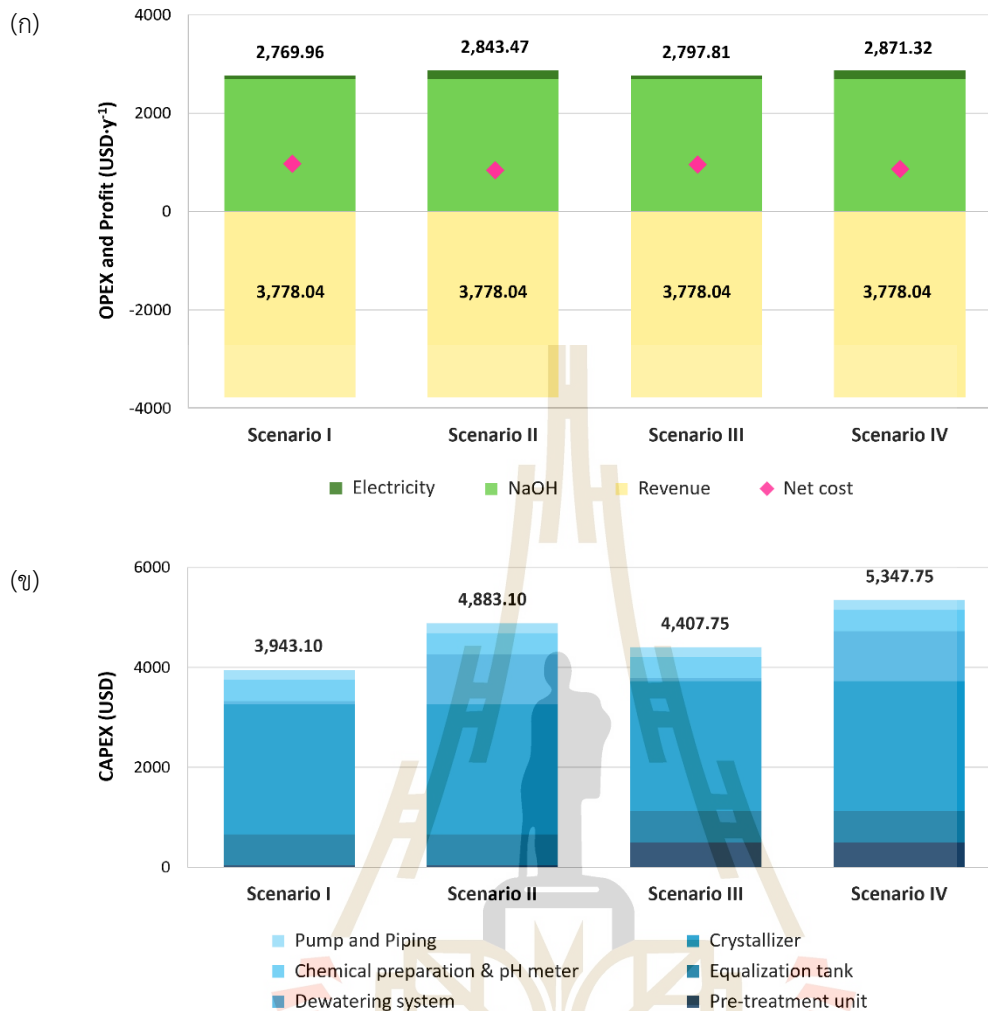
เป็น 8.50 (จากค่า pH เริ่มต้นที่ 7.01) การปรับค่า pH นี้ส่งผลให้สามารถก่อดักตะกอนทางเคมีของฟลักซ์สตรูไวท์ในอัตรา 0.787 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (เทียบกับ 0.092 กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อลูกบาศก์เมตร) การประเมินค่าใช้จ่ายของการนำกลับฟอสฟอรัสผ่านระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของฟลักซ์สตรูไวท์ครอบคลุมทั้งค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน (operating costs) (รวมถึงค่าใช้จ่ายด้านวัสดุและพลังงาน) และ

ค่าใช้จ่ายการลงทุน (capital costs) (ครอบคลุมค่าอุปกรณ์และเครื่องมือ) รายละเอียดเฉพาะของระบบก่อกองทางเคมีของฟลักสตรูไวท์ มีดังนี้

- ส่วนปรับสภาพเบื้องต้น (pre-treatment unit) ใช้เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยก่อนที่น้ำเสียจะเข้าสู่ถังก่อกองทางเคมี ซึ่งการก่อกองของอนุภาคแขวนลอยนี้มีสองรูปแบบ ได้แก่ (1) ถังเก็บน้ำ (storage tank) ซึ่งอาศัยแรงโน้มถ่วงโดยไม่ต้องใช้สารเคมี และ (2) เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration membrane)
- ส่วนปรับเสถียร (equalization unit) เป็นถังเก็บน้ำเสียหลังการกำจัดของแข็งแขวนลอยเบื้องต้น ภายในถังนี้มีอุปกรณ์ผสม (ใบพัดกวน) เพื่อให้ น้ำเสียผสมกันอย่างสม่ำเสมอ
- ส่วนจ่ายสารเคมี (chemical feeding unit) ประกอบด้วย ถังสารเคมีสำหรับปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) โดยมีอัตราการเติม NaOH ที่ 1.00 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ส่วนก่อกองทางเคมีของฟลักสตรูไวท์ (struvite crystallization unit) เป็นถังปฏิบัติการที่ติดตั้งใบพัดทำงานที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เพื่อกระตุ้นให้เกิดฟลักสตรูไวท์ รวมถึงการเติบโตของผลึกและการตกตะกอน
- ส่วนทำแห้ง (dewatering system) เป็นระบบกำจัดน้ำหรือการอบแห้ง ประเมินใน 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) การใช้ระบบอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (solar thermal drying method) และ (2) เครื่องอบแห้งแบบหมุน (rotary dryer)

ค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน (operating costs) ที่เกี่ยวข้องกับการก่อกองทางเคมีของฟลักสตรูไวท์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและพลังงาน และค่าใช้จ่ายการลงทุน (capital costs) สำหรับส่วนประกอบหลักทั้ง 5 ส่วนของระบบก่อกองทางเคมีของฟลักสตรูไวท์ แสดงดังรูปที่ 4-18

ปริมาณน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบก่อกองทางเคมีของฟลักสตรูไวท์ เท่ากับ 4,641 ลูกบาศก์เมตรต่อปี จากรูปที่ 4-18 (ก) พบว่า ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานต่อปี (annual operating costs) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 2,691.8 ดอลลาร์สหรัฐ ความต้องการพลังงานสำหรับระบบก่อกองทางเคมีของฟลักสตรูไวท์ ได้แก่ พลังงานที่ใช้สำหรับสูบน้ำเสีย เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) บั้มจ่ายสารเคมี ถังปฏิบัติการก่อกองผลึกของแข็งฟอสเฟต และการอบแห้งผลึกของแข็งฟอสเฟต โดยค่าไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้สำหรับถังปฏิบัติการก่อกองผลึกของแข็งฟอสเฟตในทุก scenario คิดเป็น 78.11 ดอลลาร์สหรัฐต่อปี นอกจากนี้ scenario II และ scenario IV เครื่องอบแห้งแบบหมุน (rotary dryer) ใช้พลังงานในการอบแห้งผลึกของแข็งฟอสเฟตในปริมาณสูงโดยรวมเท่ากับ 73.51 ดอลลาร์สหรัฐต่อปี สำหรับ scenario III และ scenario IV เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration membrane) ใช้พลังงานสำหรับการแยกของแข็ง-ของเหลวเป็นการปรับสภาพเบื้องต้น (pre-treatment) โดยมีค่าใช้จ่าย 27.85 ดอลลาร์สหรัฐต่อปี ส่งผลให้ scenario IV มีค่าใช้จ่ายการดำเนินงานต่อปีสูงสุดที่ 2,871.32 ดอลลาร์สหรัฐ รองลงมาคือ scenario II (conventional case) ที่ 2,843.47 ดอลลาร์สหรัฐ scenario III ที่ 2,797.81 ดอลลาร์สหรัฐ และ scenario I (based case) ที่ 2,769.96 ดอลลาร์สหรัฐ



รูปที่ 4-18 ค่าใช้จ่ายของระบบก่อดตะกอนทางเคมีผลิตสตรูไวท์สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก (ก) ค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน (OPEX) และรายได้ (revenues) และ (ข) ค่าใช้จ่ายการลงทุน (CAPEX)

ค่าใช้จ่ายการลงทุน (capital costs) ของระบบก่อดตะกอนทางเคมีของผลิตสตรูไวท์ (รูปที่ 4-18 (ข)) อยู่ที่ 3,943.10 และ 4,407.75 ดอลลาร์สหรัฐ สำหรับ scenario I และ scenario III (อบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์) ตามลำดับ ขณะที่ค่าใช้จ่ายการลงทุนของ scenario II และ scenario IV (เครื่องอบแห้งแบบหมุน) อยู่ที่ 4,883.10 และ 5,347.75 ดอลลาร์สหรัฐ ตามลำดับ รายละเอียดของค่าใช้จ่ายการลงทุนสำหรับอุปกรณ์แต่ละชิ้นสรุปไว้ในตารางที่ ง-3 และ ง-4 (ในภาคผนวก ง) โดยค่าใช้จ่ายการลงทุนได้รับอิทธิพลจากการเลือกส่วนปรับสภาพเบื้องต้น (pre-treatment unit) และส่วนของกระบวนการอบแห้ง (dewatering unit) ซึ่งวิธีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (scenario I และ scena III) มีค่าใช้จ่ายด้านการลงทุนและการดำเนินการต่ำ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่และใช้เวลาหลายวันเพื่อให้ผลึกของแข็งฟอสเฟตแห้ง ในฤดูฝนระยะเวลาอบแห้งอาจยาวนานขึ้นและเพิ่มความเสี่ยงในการเติบโตของจุลินทรีย์เนื่องจากความชื้นสูง ขณะเดียวกัน scenario II และ scenario IV ใช้พลังงานสูงกว่าและค่าใช้จ่ายการลงทุนสูงขึ้น เนื่องจากใช้เครื่องอบแห้งแบบหมุนซึ่งใช้พื้นที่น้อยกว่าและสามารถทำให้ผลึกของแข็งฟอสเฟตแห้งภายในไม่กี่

ชั่วโมง ลดเวลาในการผลิตของแข็งฟอสเฟตจากน้ำเสียและสามารถดำเนินการได้ตลอดทั้งปี ส่วนปรับสภาพเบื้องต้น (pre-treatment unit) ที่ใช้เมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration membrane) (scenario III และ scenario IV) อาจมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการทำมาสะอาดหรือเปลี่ยนเมมเบรนตามอายุการใช้งาน

รายได้จากการขายผลึกฟอสเฟตที่ผลิตโดยระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของผลึกสตรูโวท์สามารถคำนวณได้โดยการคูณปริมาณฟอสเฟตที่นำกลับได้ด้วยราคาตลาดของปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเทคนิคการตกผลึกและสภาวะการทำงานที่สอดคล้องกันในทุก scenario พบว่า ฟอสเฟตที่นำกลับจากน้ำเสียฟาร์มสุกรทั้งหมด เท่ากับ 3,613.50 กิโลกรัมต่อปี โดยมีปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 11.71 หรือ 422.40 กิโลกรัมฟอสฟอรัสต่อปี ราคาตลาดของปุ๋ยเคมีแต่ละสูตรมีความแตกต่างกัน โดยปุ๋ยที่มีราคาต่ำสุดคือสูตร 18-46-0 ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$) ที่ราคา 3.50 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมของฟอสฟอรัส และปุ๋ยที่มีราคาแพงสุดคือสูตร 13-13-13 ที่ราคา 11.58 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมของฟอสฟอรัส (OAE, 2024) โดยพิจารณาจากราคานี้ รายได้ต่อปีจากฟอสเฟตที่นำกลับได้อยู่ระหว่าง 1,496 ถึง 4,949 ดอลลาร์สหรัฐ รายได้เฉลี่ยของการก่อดักตะกอนทางเคมีของผลึกฟอสเฟตคำนวณที่ราคาตลาดเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ (8.93 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส) เท่ากับ 3,778.04 ดอลลาร์สหรัฐต่อปีสำหรับทุก scenario

ผลสรุปการวิเคราะห์เชิงเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ของระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของผลึกสตรูโวท์ แสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ของระบบก่อดักตะกอนทางเคมีของผลึกสตรูโวท์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร

รายการ	Scenario			
	I	II	III	IV
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ($\text{USD}\cdot\text{y}^{-1}$)	2,769.96	2,843.47	2,797.81	2,871.32
ค่าใช้จ่ายด้านการลงทุน (USD)	3,943.10	4,883.10	4,407.75	5,347.75
ค่าใช้จ่ายรวมในปีแรก (USD)	6,713.06	7,726.57	7,205.56	8,219.07
รายได้ ($\text{USD}\cdot\text{y}^{-1}$) *	3,778.04	3,778.04	3,778.04	3,778.04
ค่าใช้จ่ายการผลิตสตรูโวท์ต่อหน่วย ($\text{USD}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.543	0.557	0.548	0.562
ค่าใช้จ่ายการผลิตสตรูโวท์ต่อหน่วย ($\text{USD}\cdot\text{kg P}^{-1}$)	6.56	6.73	6.62	6.80
รายได้ต่อหน่วย ($\text{USD}\cdot\text{kg P}^{-1}$)	8.94	8.94	8.94	8.94
ผลตอบแทนขั้นต้น (Gross margin, %)	26.65	24.70	25.91	23.96
ระยะเวลาคืนทุน (y)	3.91	5.22	4.50	5.90

หมายเหตุ: * คำนวณรายได้จากราคาตลาดเฉลี่ยของปุ๋ย = 8.93 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส

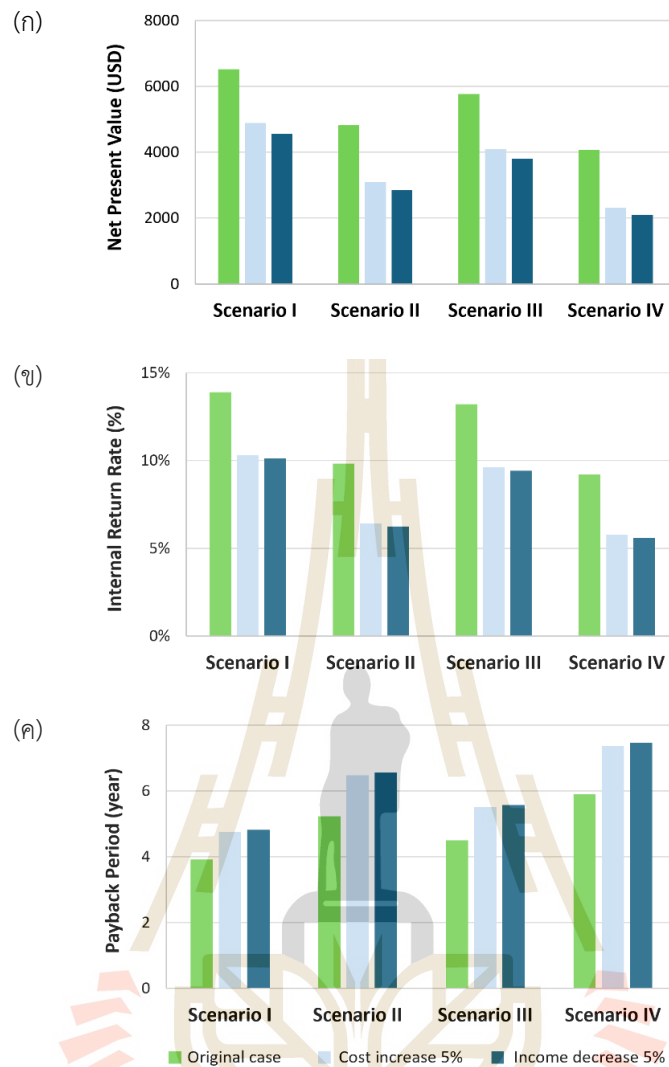
โดยค่าใช้จ่ายการผลิตอยู่ในช่วง 0.543 ถึง 0.562 ดอลลาร์สหรัฐต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 6.56 ถึง 6.80 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส รายได้สุทธิจากการผลิต (Unit production revenue) คิดเป็น 8.93 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส ซึ่งให้ผลตอบแทนขั้นต้น (gross margin) ประมาณร้อยละ 23.96 ถึง 26.65 นอกจากนี้ scenario I มีระยะเวลาคืนทุน

(payback period) สั้นที่สุดที่ 3.91 ปี ในขณะที่ scenario IV มีระยะเวลาคืนทุนนานที่สุดที่ 5.90 ปี ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวทางทางเลือกที่ยั่งยืนในการนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของผลิตภัณฑ์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร ทั้งในแง่ของการนำกลับทรัพยากร (ธาตุอาหาร) และผลประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการลดมลพิษในแหล่งน้ำ การก่อกองทางเคมีของผลิตภัณฑ์เป็นวิธีที่มีศักยภาพในการลดระดับสารอาหาร โดยเฉพาะไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำ นอกจากนี้ การตอบสนองความต้องการด้านสิ่งแวดล้อมนี้จะส่งเสริมการนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการก่อกองทางเคมีผลิตภัณฑ์และการนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเพาะปลูกพืช

4.6.2.4 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวประเมินการเปลี่ยนแปลงของค่าใช้จ่ายสารเคมี ค่าไฟฟ้า การลงทุนในอุปกรณ์ และรายได้ที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายสุทธิใน scenario ต่าง ๆ โดยมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของระบบก่อกองทางเคมีของผลิตภัณฑ์คำนวณโดยใช้ อัตราส่วนลด (discount rate) เท่ากับ ร้อยละ 5 ตลอดอายุการใช้งานระบบ 15 ปี งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความอ่อนไหว 2 กรณี ได้แก่ (1) การเพิ่มขึ้นของค่าใช้จ่าย ร้อยละ 5 ในขณะที่รายได้คงที่ และ (2) ค่าใช้จ่ายคงที่โดยรายได้ลดลง ร้อยละ 5 ตามวิธีการของ Sudyod and Chantuk (2017) ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของระบบก่อกองทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร แสดงดังรูปที่ 4-19

จากรูปที่ 4-19 scenario I มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงสุดในกรณีปกติ (original case) (6,520.43 ดอลลาร์สหรัฐ) ตามด้วย scenario III, scenario II และ scenario IV ตามลำดับ ในด้านอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) scenario I และ scenario III มีอัตราผลตอบแทนภายในสูงสุดในกรณีปกติ (ร้อยละ 13.89 และ 13.21 ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่า scenario I และ scenario III นี้มีความน่าสนใจมากกว่าสำหรับการลงทุน การเพิ่มขึ้นของค่าใช้จ่ายหรือการลดลงของรายได้ส่งผลให้ทั้งมูลค่าปัจจุบันสุทธิและอัตราผลตอบแทนภายในลดลงในทุก scenario เนื่องจากค่าใช้จ่ายและรายได้มีผลกระทบต่อกระแสเงินสดของระบบก่อกองทางเคมีของผลิตภัณฑ์ scenario IV มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิและอัตราผลตอบแทนภายในต่ำสุดอย่างต่อเนื่องในทุก scenario ซึ่งบ่งชี้ว่าเป็นทางเลือกที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์น้อยที่สุดและไม่ดึงดูดเท่ากับ scenario อื่น ๆ แม้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าใช้จ่ายหรือการลดลงของรายได้จะทำให้ระยะเวลาคืนทุนยาวขึ้นในทุก scenario (ประมาณร้อยละ 18) แต่ scenario I และ scenario III ยังคงมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดในกรณีปกติ (3.19 และ 4.50 ปี ตามลำดับ) ซึ่งแสดงถึงระยะเวลาการคืนทุนที่เร็วขึ้น scenario I และ scenario III จึงมีผลการดำเนินงานทางการเงินสูงสุดภายใต้สภาวะปกติ โดยเฉพาะ scenario I ที่มีความยืดหยุ่นมากที่สุดภายใต้สภาวะที่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นและรายได้ลดลง แม้ว่าจะมีการลดลงของมูลค่าปัจจุบันสุทธิและอัตราผลตอบแทนภายในอย่างชัดเจนในกรณีที่ต้นทุนเพิ่มขึ้นหรือรายได้ลดลง



รูปที่ 4-19 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของระบบก่อดักของเคมีของผลิตภัณฑ์จากน้ำเสียฟาร์มสุกร (ก) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (ข) อัตราผลตอบแทนภายใน และ (ค) ระยะเวลาคืนทุน

ในการพิจารณาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และเทคนิคในการเลือก scenario ที่เหมาะสมสำหรับการก่อดักของเคมีของผลิตภัณฑ์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรขนาดเล็ก scenario I (based case) เหมาะสมสำหรับการลงทุนเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายการลงทุนและการดำเนินการต่ำที่สุด นอกจากนี้ scenario II (conventional case) ให้ความเหมาะสมในการลงทุนในระดับปานกลาง แต่มีความเป็นเลิศทางเทคนิค เนื่องจากมีระบบการทำงานที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพที่สามารถทำงานได้ดีตลอดทั้งปี ส่วน scenario III และ scenario IV อาจต้องการบุคลากรเฉพาะทางในการปฏิบัติงาน เนื่องจากส่วนปรับสภาพเบื้องต้น (pre-treatment unit) ที่เกี่ยวข้องกับเมมเบรนต้องการการทำความสะอาดหรือเปลี่ยนแผ่นเมมเบรนตามระยะเวลาการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ทุก scenario ยังคงมีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้ได้จริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งด้านเศรษฐศาสตร์และเทคนิคสำหรับแต่ละฟาร์มสุกรอย่างถี่ถ้วนเมื่อต้องเลือกใช้ระบบก่อดักของเคมีของผลิตภัณฑ์จากน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

4.6.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานกระบวนการก่อดักทางเคมี ผลึกสตรูไวท์

ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานการผลิตสตรูไวท์จากแหล่งฟอสฟอรัส และวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่ที่หลากหลาย แสดงไว้ในตารางที่ 4-6 งานวิจัยนี้เน้นการผลิตสตรูไวท์จาก น้ำเสียฟาร์มสุกรโดยใช้กระบวนการก่อดักทางเคมี โดยค่าใช้จ่ายการบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร อยู่ ในช่วง 0.543 – 0.562 ดอลลาร์สหรัฐต่อลูกบาศก์เมตร และ 6.56 – 6.80 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัม ฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่อยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับวิธีการบำบัดอื่น ๆ อาจเนื่องมาจาก ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเริ่มต้น (117.69 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 4-6 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการผลิตสตรูไวท์โดยชนิดของน้ำเสียและวิธีการนำกลับแบบต่าง ๆ

การศึกษา	ชนิดของน้ำเสีย	วิธีการนำกลับฟอสฟอรัส	ความเข้มข้นฟอสฟอรัส (mg·L ⁻¹)	ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัส (%)	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน	
					(USD·m ⁻³)	(USD·kg P ⁻¹)
This study	น้ำเสียฟาร์มสุกร	ก่อดักทางเคมี	117.69	86.73	0.543 – 0.562	6.56 – 6.80
Riewklang et al. (2023)	น้ำเสียการผลิตแอมโมเนีย	ก่อดักทางเคมี	77	86.70	3.35	7.82
Pinatha et al. (2020)	น้ำปัสสาวะ	ก่อดักทางเคมี	917	85.60 – 93.50	0.874 – 1.625	2.91 – 4.07
Morrissey et al. (2022)	น้ำเสียชุมชน	กระบวนการเคมีไฟฟ้า	6.0	18 – 33	0.38	6.03
Fattah et al. (2008)	น้ำเสียชุมชน	CO ₂ stripping	77.7	90	0.53	n.d.

หมายเหตุ: n.d. = ไม่มีข้อมูลปริมาณการผลิตสตรูไวท์

ในกรณีน้ำเสียจากแอมโมเนียสำหรับใช้การก่อดักทางเคมี (Riewklang et al., 2023) ค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นของค่าไฟฟ้า (สำหรับถึงปฏิกิริยาก่อดักทางเคมี) และสารเคมีที่ใช้ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในกระบวนการก่อดักทางเคมี ทั้งนี้ ค่าใช้จ่ายการผลิตสตรูไวท์สูงสุดเท่ากับ 3.35 ดอลลาร์สหรัฐต่อลูกบาศก์เมตร และ 7.82 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส อันเป็นผลมาจากการใช้สารเคมีเพื่อปรับค่าพีเอชและแหล่งแอมโมเนียในกระบวนการตกผลึก โดยน้ำเสียจากแอมโมเนียสำหรับใช้การก่อดักทางเคมีมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่ำกว่าน้ำเสียประเภทอื่นที่ใช้กระบวนการเดียวกัน สำหรับค่าใช้จ่ายการผลิตผลึกสตรูไวท์ที่ต่ำที่สุดพบได้ในการศึกษาการก่อดักทางเคมีผลึกของแข็งฟอสเฟตจากน้ำปัสสาวะ อยู่ในช่วง 2.91 – 4.07 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส (Pinatha et al., 2020) ซึ่งมีความคุ้มค่ามากที่สุดในการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ต่อกิโลกรัม อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูง (917 มิลลิกรัมต่อลิตร) และมีการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่เป็นตะกอนของแข็งได้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับการศึกษาอื่น ๆ โดยส่วนใหญ่การศึกษาพบว่า การนำ

ฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่มีประสิทธิภาพสูง (มากกว่า ร้อยละ 85) ยกเว้นการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีที่สามารถนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ได้ไม่เกิน ร้อยละ 35 อย่างไรก็ตาม การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีมีความคุ้มค่ามากที่สุดต่อลูกบาศก์เมตรที่ 0.38 ดอลลาร์สหรัฐ (Morrissey et al., 2022) ซึ่งอาจเป็นเพราะกระบวนการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี มีเพียงการใช้พลังงานเพียงอย่างเดียวในการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานในการผลิตสตรูโวอ์จากการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีอยู่ที่ 6.03 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส แม้ว่าค่าใช้จ่ายต่อลูกบาศก์เมตรของกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะต่ำที่สุด แต่ค่าใช้จ่ายรวมสูงเนื่องจากอัตราการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ต่ำกว่าน้ำเสียประเภทอื่น ๆ (ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเริ่มต้น เท่ากับ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร) และวิธีการนำกลับฟอสฟอรัสวิธีอื่นๆ สำหรับวิธีการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ stripping) พบว่า ค่าใช้จ่ายการผลิตสตรูโวอ์อยู่ที่ 0.58 ดอลลาร์สหรัฐต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งต่ำกว่ากระบวนการก่อก่อนทางเคมี (Fattah et al., 2008) ค่าใช้จ่ายที่ลดลงนี้เป็นผลมาจากการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกจากน้ำเสียซึ่งช่วยให้ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นตามธรรมชาติและเอื้อต่อการก่อก่อนผลึกสตรูโวอ์โดยไม่ต้องใช้สารเคมี สรุปได้ว่าค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียมีความแตกต่างกันอย่างมากขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำเสียและวิธีการบำบัดที่ใช้ ผลการศึกษาบ่งชี้ถึงความเหมาะสมในการเลือกวิธีการบำบัดที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากข้อจำกัดทางเศรษฐกิจและการดำเนินงานเฉพาะเพื่อผลิตปุ๋ยสตรูโวอ์สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก

4.6.4 แนวทางการดำเนินการในอนาคต (Future perspectives)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรแบบดั้งเดิมยังคงมีการกักเก็บธาตุอาหารสูง โดยเฉพาะไนโตรเจนและฟอสฟอรัส จึงจำเป็นต้องประเมินระบบการผลิตสตรูโวอ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก ระบบก่อก่อนทางเคมีผลึกของแข็งฟอสเฟตถูกออกแบบเพื่อนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบสตรูโวอ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ยละลายช้า (slow-released fertilizer) เพิ่มมูลค่าของเสีย และเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับการบำบัดน้ำเสียและการจัดการทรัพยากร (ธาตุอาหาร) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่วิธีอื่น ๆ การนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่โดยการก่อก่อนทางเคมีผลึกสตรูโวอ์เป็นวิธีที่โดดเด่นในการนำทรัพยากรกลับมาใช้ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางการตลาด ทั้งนี้ scenario I (based case) หรือ scenario II (conventional case) (รูปที่ 4-17) ของระบบก่อก่อนทางเคมีผลึกสตรูโวอ์ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายการลงทุนและการดำเนินงานปานกลาง เป็นโมเดลที่มีประสิทธิภาพสำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กในการบำบัดและนำธาตุอาหารกลับมาใช้ใหม่จากน้ำเสีย ระบบก่อก่อนทางเคมีผลึกสตรูโวอ์นี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

กระบวนการก่อก่อนทางเคมีผลึกสตรูโวอ์จากน้ำเสียเป็นกระบวนการที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงและสร้างรายได้ จึงควรได้รับการส่งเสริมเพื่อกระตุ้นให้ฟาร์มสุกรนำกระบวนการนี้ไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีความสำคัญในเชิงนโยบาย ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายเกษตรกรรมยั่งยืน กลยุทธ์การจัดการธาตุอาหารและหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียน

ประเด็นนโยบายที่สำคัญหลายประการจำเป็นต้องได้รับการพิจารณาเพื่อให้เกิดการดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพ ประการแรก กฎระเบียบเกี่ยวกับการปล่อยธาตุอาหารเป็นสิ่งจำเป็นต่อ

การจำกัดการไหลของธาตุอาหารส่วนเกิน (excess nutrients) ลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งช่วยลดปัญหายูโทรฟิเคชันและรักษาคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น ในสหรัฐอเมริกา มีระบบการอนุญาตปล่อยมลพิษลงแหล่งน้ำแห่งชาติ (NPDES) เพื่อให้มั่นใจว่าการบำบัดน้ำเสียเป็นไปตามค่ามาตรฐานของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่กำหนดไว้ (USEPA, 2024) การนำกรอบกฎหมายที่คล้ายคลึงกันไปใช้ในภูมิภาคอื่น รวมถึงในประเทศไทย จะช่วยยกระดับการคุ้มครองคุณภาพน้ำและส่งเสริมการจัดการฟอสฟอรัสอย่างยั่งยืน

ประการที่สอง การบูรณาการการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียเข้ากับแผนการจัดการธาตุอาหารเป็นสิ่งสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการหมุนเวียนธาตุอาหาร แนวทางนี้สอดคล้องกับแผนปฏิบัติการจัดการธาตุอาหารแบบบูรณาการ (INMAP) ของสหภาพยุโรป ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของยุทธศาสตร์ Farm-to-Fork ที่มุ่งลดการสูญเสียธาตุอาหารและเพิ่มความยั่งยืนทางการเกษตร (European Commission, 2020) นอกจากนี้ แผนปฏิบัติการเศรษฐกิจหมุนเวียนยังเน้นการใช้ธาตุอาหารอย่างยั่งยืนและการพัฒนาตลาดสำหรับการนำกลับฟอสฟอรัส รวมถึงการแก้ไขข้อกำหนดด้านการบำบัดน้ำเสียและกากตะกอน การกำหนดกลยุทธ์ที่ชัดเจนในการบูรณาการการนำกลับสตรูโวท์เข้ากับแผนจัดการธาตุอาหารที่มีอยู่ จะช่วยสนับสนุนการใช้ฟอสฟอรัสหมุนเวียนในภาคเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ ภาวะเปราะบางเหล่านี้สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของสหประชาชาติ (SDGs) โดยเฉพาะ SDG 6 (น้ำสะอาดและการสุขาภิบาล) ผ่านการลดมลพิษทางน้ำ, SDG 12 (การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน) ผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร และ SDG 2 (ขจัดความหิวโหย) ผ่านการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินด้วยการหมุนเวียนธาตุอาหาร (UNDP, 2015)

ประการที่สาม สิ่งจูงใจทางการเงิน เช่น เงินสนับสนุน เงินอุดหนุน และเงินกู้ดอกเบี้ยต่ำ และการลดหย่อนภาษี อาจช่วยกระตุ้นให้ผู้ประกอบการฟาร์มสุกรยอมรับเทคโนโลยีการฟื้นฟูสตรูโวท์ สิ่งจูงใจเหล่านี้จะช่วยเพิ่มการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตที่มาจากฟาร์มสุกร และลดการปล่อยมลพิษจากธาตุอาหาร นอกจากนี้ จำเป็นต้องมีกฎหมายกำกับดูแลที่ชัดเจนสำหรับการใช้สตรูโวท์ เพื่อให้มั่นใจว่ามีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในการใช้เป็นปุ๋ย

ท้ายที่สุด มาตรฐานคุณภาพและแนวทางการใช้สตรูโวท์ที่นำกลับได้ควรจัดทำโดยหน่วยงานรัฐเพื่อสนับสนุนความเชื่อมั่นของตลาดและผู้บริโภค และเพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยอาหาร มาตรฐานเหล่านี้จะช่วยเสริมสร้างความเชื่อมั่นระหว่างผู้ผลิตและผู้บริโภค นอกจากนี้ ควรส่งเสริมความร่วมมือระหว่างภาครัฐและเอกชนเพื่อสนับสนุนการพาณิชย์ของปุ๋ยสตรูโวท์ เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับปุ๋ยเคมีทั่วไป และส่งเสริมการจัดการธาตุอาหารอย่างยั่งยืน

สำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับฟาร์มขนาดใหญ่ การคัดเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการกักตุนผลึกสตรูโวท์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ โดยดำเนินการตามลำดับกระบวนการที่ใกล้เคียงกัน การใช้งานในระดับใหญ่ของการกักตุนผลึกสตรูโวท์ในระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกรจำเป็นต้องพิจารณาการเพิ่มประสิทธิภาพด้านเทคโนโลยี ประสิทธิภาพของกระบวนการ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การขยายระบบการจัดการธาตุอาหารในน้ำเสียต้องอาศัยการพัฒนาทางด้านการออกแบบถึงปฏิกรณ์และระบบอัตโนมัติ เพื่อรองรับปริมาณน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การขยายขนาดระบบการกักตุนสตรูโวท์สำหรับฟาร์มขนาดใหญ่อาจต้องใช้เงินลงทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานจำนวนมาก ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้จริง หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่

ส่งผลต่อการนำกลับศัตรูไวกในระดัปลใหญ่คือความแปรปรวนของคุณลักษณะน้ำเสียฟาร์มสุกร ซึ่งแตกต่างกันตามขนาดฟาร์ม องค์ประกอบอาหารสัตว์ และวิธีการจัดการฟาร์ม อีออนที่แข่งขันกัน เช่น แคลเซียมอีออน (Ca^{2+}) เหล็กอีออน (Fe^{3+}) และสารอินทรีย์ตกค้าง เป็นต้น อาจรบกวนกระบวนการก่อกองผลึกศัตรูไวก ทำให้ความบริสุทธิ์และปริมาณผลผลิตลดลง ความแปรปรวนเหล่านี้สะท้อนความสำคัญของการคำนวณสารเคมีที่เหมาะสมและการควบคุมกระบวนการอย่างแม่นยำเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการนำกลับที่ดี ปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ยังมีบทบาทสำคัญในการกำหนดความเป็นไปได้ของการนำกลับศัตรูไวกในระดัปลใหญ่ ความผันผวนของราคาปุ๋ยในตลาด รวมถึงค่าใช้จ่ายโครงสร้างพื้นฐานเริ่มต้นจำนวนมาก อาจส่งผลต่ออัตราการนำเทคโนโลยีไปใช้ ในทางกลับกันการผลิตศัตรูไวกจำนวนมากขึ้นพร้อมรายได้ที่สูงขึ้นในระบบขนาดใหญ่ อาจนำไปสู่กำไรสุทธิที่เพิ่มขึ้น ทำให้เทคโนโลยีขั้นสูงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมกว่าพร้อมปรับปรุงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระดับปานกลางในแง่ของต้นทุนการนำกลับธาตุอาหาร (Martin-Hernández et al., 2023) การดำเนินการนี้จะช่วยรองรับปริมาณน้ำเสียจำนวนมากและปริมาณศัตรูไวกที่ผลิตได้ตามสัดส่วน



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์เพื่อนำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟตนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ให้อยู่ในรูปของแข็งฟอสเฟต ศึกษาการชะละลายฟอสเฟตและผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษา ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

น้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์จากฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่นำมาศึกษาคุณลักษณะเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำกลับฟอสฟอรัส ได้แก่ (1) น้ำเสียจากฟาร์มสุกร ประกอบด้วย น้ำก่อนเข้าและหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (Covered Lagoon) (2) น้ำเสียจากฟาร์มโคนม ประกอบด้วย น้ำเสียจากบริเวณโรงเลี้ยงโคนม และโรงรีदनํ้านมโค และ (3) น้ำจากบ่อเลี้ยงปลา ประกอบด้วย น้ำจากการอนุบาลปลา (บ่อปูน) และน้ำเลี้ยงปลา (บ่อดิน) พบว่า น้ำเสียจากฟาร์มสุกร มีปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาถ่วงน้ำหนักของแข็งฟอสเฟต

เมื่อนำน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมาศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสในรูปของแข็งฟอสเฟต พบว่า น้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิดมีประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 39.23 – 91.18 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7.5 – 9.0 ซึ่งมากกว่าประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสในน้ำเสียก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด ซึ่งมีประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 49.17 – 72.06 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7.5 – 9.0 ซึ่งร้อยละของฟอสฟอรัสในของแข็งฟอสเฟตจากน้ำก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด และน้ำหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด มีค่าเฉลี่ยระหว่าง ร้อยละ 9.77 – 10.11 และ ร้อยละ 9.25 – 12.87 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมต่อการนำกลับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการถ่วงน้ำหนักทางเคมี ได้แก่ pH 8.5 ผลการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผลึกของแข็งสตรูไวท์มีรูปร่างหลายอย่าง เช่น รูปร่างคล้ายโลง (coffin-like shape) รูปร่างคล้ายเข็ม (needle-like shape) และรูปร่างไม่คงที่ (irregular shape) เป็นต้น และโครงสร้างผลึกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของผลึกของแข็งฟอสเฟตมีความสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกมาตรฐานของ สตรูไวท์

การชะละลายของฟอสเฟตในดินโดยใช้น้ำประปา (pH ~6) เป็นตัวทำละลาย เป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่า ลำดับของการปลดปล่อยฟอสเฟตในดิน เป็นดังนี้ ปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) > ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) > ปุ๋ยสตรูไวท์ (Struvite) โดยมีร้อยละสะสมของการปลดปล่อยฟอสเฟตเฉลี่ยร้อยละ 65.55, 61.96 และ 50.56 ตามลำดับ ผลการศึกษาด้านศาสตร์การชะละลายของฟอสเฟตในดินของปุ๋ยสตรูไวท์ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นไปตามสมการการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง ของแบบจำลอง Shrinking core model ซึ่งค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาการควบคุมการแพร่ผ่านฟิล์มของของแข็ง (k_d) ของปุ๋ยสตรูไวท์

ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ที่ได้จากการศึกษานี้ มีค่าเท่ากับ 0.0037, 0.0064 และ 0.0082 ต่อวัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณฟอสฟอรัสในปุ๋ยทั้งสามชนิด ยังคงเหลืออยู่ในช่วงร้อยละ 35 – 50 ซึ่งสามารถชะละลายออกมาในดินได้อย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นธาตุอาหารให้กับพืชหลังจากวันที่ 30 ของการทดลอง

ผลของปุ๋ยฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของต้นดาวเรือง โดยชุดทดลอง (ไม่ใส่ปุ๋ย) ชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต พบว่า ต้นดาวเรืองมีความสูงเฉลี่ยและความยาวรากเฉลี่ยใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง ในขณะที่ชุดควบคุมมีจำนวนใบมากกว่าชุดการทดลองอื่น สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการปรับตัวของพืชต่อการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่ขาดธาตุอาหาร เช่น การกระตุ้นการสร้างใบเพื่อเพิ่มพื้นที่สังเคราะห์แสง การดึงฟอสฟอรัสจากแหล่งสำรองภายในซึ่งอาจสนับสนุนการสร้างใบใหม่ เป็นต้น สำหรับจำนวนดอกและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอก พบว่า ปุ๋ยสูตรไวท์และปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตส่งผลให้พืชมีดอกที่แข็งแรงและมีขนาดใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตและชุดควบคุมซึ่งเมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของต้นดาวเรือง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ส่วนของดอกสะสมฟอสฟอรัสในสัดส่วนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลผลิตสำคัญของต้นดาวเรือง โดยมีค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสเท่ากับ 77.95, 92.22, 90.09, และ 84.21 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ของชุดควบคุม ชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต และปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ตามลำดับ ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสสะสมเฉลี่ยในต้นดาวเรือง เท่ากับ 131.18, 161.19, 173.32 และ 156.32 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อต้น ตามลำดับ การกระจายตัวของฟอสฟอรัสในส่วนต่าง ๆ ของพืชของชุดการทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์และปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตมีลักษณะและระดับที่ใกล้เคียงกัน แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของปุ๋ยสูตรไวท์สำหรับการนำมาใช้เป็นปุ๋ยทางเลือกทดแทนปุ๋ยฟอสเฟตแบบดั้งเดิมได้

สำหรับการประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ พบว่า ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 8.5 และอัตราส่วนโมลแอมโมเนียมต่อฟอสฟอรัสเดิมของน้ำเสีย (= 1.95) การบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร 15.47 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เพื่อผลิตสูตรไวท์ ให้ผลผลิตผลึกสูตรไวท์ 10.95 กิโลกรัมต่อวัน หรือเทียบเท่ากับฟอสฟอรัส 1.28 กิโลกรัมต่อวัน การประเมินเชิงเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ (techno-economic assessment) สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก โดยการประเมินจากระบบก่อนทางเคมีผลึกสูตรไวท์ด้วย 5 ส่วนประกอบหลัก จาก 4 scenarios ผลการศึกษา พบว่า ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและค่าใช้จ่ายการลงทุนรวมต่ำสุด เท่ากับ 2,769.96 ดอลลาร์สหรัฐต่อปี และ 3,943.10 ดอลลาร์สหรัฐ ตามลำดับ รายได้จากสูตรไวท์ประมาณการ เท่ากับ 3,778.04 ดอลลาร์สหรัฐ โดยมีค่าใช้จ่ายการผลิตต่อหน่วย เท่ากับ 6.56 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส ระยะเวลาคืนทุนที่สั้นที่สุดของระบบการผลิตสูตรไวท์ ได้แก่ scenario I เท่ากับ 3.91 ปี ซึ่งการวิเคราะห์ความอ่อนไหวแสดงให้เห็นว่า หากค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นหรือลดรายได้ลง ระยะเวลาคืนทุนจะนานขึ้นประมาณร้อยละ 18 สำหรับทุก scenarios

5.2 ข้อเสนอแนะ (Recommendations)

จากผลการศึกษาี้แนะนำให้ทำการทดลองนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยระบบก่อดักตะกอนทางเคมีต้นแบบ (pilot-scale experiments) เพื่อสร้างข้อมูลเพิ่มเติมที่จะช่วยให้นักลงทุนและผู้กำหนดนโยบายมีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการตัดสินใจเกี่ยวกับการนำระบบ ก่อดักตะกอนทางเคมีของแข็งฟอสเฟตจากน้ำเสียฟาร์มสุกรไปใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับกรณีที่ต้องการเพิ่มอ็อกซิเจนบวกเพื่อให้อัตราส่วนโมลออกซิเจนเหมาะสมกับการก่อดักตะกอนฟอสฟอรัส อาจต้องทำการศึกษาผลของ ionic strength ต่อการก่อดักตะกอนทางเคมี (เช่น จากการเติมเกลือแมกนีเซียม และเกลือทะเล เป็นต้น) ทั้งนี้ การเลือกรูปแบบและอุปกรณ์สำหรับเป็นส่วนประกอบของระบบก่อดักตะกอนทางเคมีฟอสฟอรัส จะต้องมีการเลือกให้เหมาะสมกับฟาร์มสุกรแต่ละแห่งซึ่งต้องพิจารณาด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้ อาจต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมที่มุ่งเน้นไปที่การลดค่าใช้จ่ายโดยรวมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุและพลังงานเพื่อเพิ่มรายได้และปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียจากฟาร์มสุกร



บรรณานุกรม

- กรมปศุสัตว์. (2565). *คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชนิดได้ก๊าซชีวภาพในฟาร์มสุกร*. สืบค้นจาก <https://certify.dld.go.th/certify/index.php/th/2021-09-21-08-14-33/2021-09-21-08-15-52/2022-08-31-04-55-28/2022-08-31-05-31-33/1714-biogas>
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2541). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.
- วีณา นิลวงศ์. (2560). การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (Climate change). เกษตรกรรม: พฤษภาคม – มิถุนายน 2560, 27-28.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). *ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร: การใช้ที่ดิน*. สืบค้นจาก <https://www.oae.go.th/view/1/การใช้ที่ดิน/TH-TH>
- Acelas, N. Y., Flo' rez, E., Lo'pez, D. (2014). Phosphorus recovery through struvite precipitation from wastewater: Effect of the competitive ions. *Desalination and Water Treatment*. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.902337>
- Aguilar-Pozo, V. B., Chimenos, J.M. Pe'na-Picola, S., Olaciregui-Arizmendi, K., Elduayen-Echave, B., Ayesa, E., Astals, S. (2024). Process performance and precipitate quality of phosphorus recovery by struvite precipitation in a fluidized bed reactor using a MgO industrial by-product. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 112764. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112764>
- Amini, A., Aponte-Morales, V., Wang, M., Dilbeck, M., Lahav, O., Zhang, Q., Ergas, S. J. (2017). Cost-effective treatment of swine wastes through recovery of energy and nutrients. *Waste Management*, 69, 508-517. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.041>
- Arcas-Pilz, V., Rufi-Salís, M., Parada, F., Petit-Boixc, A., Gabarrell, X., Villalba, G. (2021). Recovered phosphorus for a more resilient urban agriculture: Assessment of the fertilizer potential of struvite in hydroponics. *Science of The Total Environment*, 799, 149424.
- Barker, A. V., Pilbeam, D.J. (2006). *Handbook of Plant Nutrition*: CRC Press.
- Canizales, L., Rojas, F., Pizarro, C. A., Caicedo-Ortega, N. H., Villegas-Torres, M. F. (2020). SuperPro Designer®, User-Oriented Software Used for Analyzing the Techno-Economic Feasibility of Electrical Energy Generation from Sugarcane Vinsasse in Colombia. *Processes*, 8, 1180. <https://doi.org/10.3390/pr8091180>
- Cao, X., Harris, W. (2008). Carbonate and Magnesium Interactive Effect on Calcium Phosphate Precipitation. *Environmental Science and Technology*, 42, 436-442.
- Chen, J. P., Chua, M.-L., & Zhang, B. (2002). Effects of competitive ions, humic acid, and pH on removal of ammonium and phosphorous from the synthetic industrial effluent by ion exchange resins. *Waste Management*, 2002, 711-719.

- Childers, D. L., Corman, J., Edwards, M., & Elser, J. J. (2011). Sustainability Challenges of Phosphorus and Food: Solutions from Closing the Human Phosphorus Cycle. *BioScience*, 60(2), 117-124.
- Chilton, C. H. (1950). Six-Tenths Factor Applies to Complete Plant Costs. *Chemical Engineering*, 57(4), 112-114.
- Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19, 292-305
- Crutchik, D., Garrido, J.M. (2016). Kinetics of the reversible reaction of struvite crystallisation. *Chemosphere*, 154, 567-572. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.134>
- Cydzik-Kwiatkowska A, Nosek D. (2020). Biological release of phosphorus is more efficient from activated than from aerobic granular sludge. *Scientific Reports*. 6; 10(1):11076. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67896-5>.
- European Commissions, E. (2020). Communication from the commission to the European parliament, the Council, the European Economic and Social committee and the committee of the region A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally friendly food system. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1590404602495&uri=CELEX%3A52020DC0381>
- Fattah, K. P., Sabrina, N., Mavinic, D. S., Koch, F. A. (2008). Reducing operating costs for struvite formation with a carbon dioxide stripper. *Water, Science and Technology*, 58(4), 957-962. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.722>
- Guan, Q., Zeng, G., Song, J., Liu, C., Wang, Z., & Wu, S. (2021). Ultrasonic power combined with seed materials for recovery of phosphorus from swine wastewater via struvite crystallization process, *Journal of Environmental Management*, 293: 112961.
- Gustafsson, J. P., Mwamila, L. B., Kergoat, K. (2012). The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils. *Geoderma*, 189-190, 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.014>
- Heffer, P., Prud'homme, M., 2007. Medium-Term Outlook for Global Fertilizer Demand, Supply and Trade 2007–2011 Summary Report. *International Fertilizer Industry Association, 75th IFA Annual Conference*, 21–23 May 2007, Istanbul, Turkey.
- Hirota, R., Kuroda, A., Kato, J., & Ohtake, H. (2010). Bacterial phosphate metabolism and its application to phosphorus recovery and industrial bioprocesses. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 109(5), 423–432.
- Intelligen, I. (2020). *SuperPro Designer User Guide*. Retrieved from https://www.intelligen.com/wp-content/uploads/2020/05/SuperPro_ManualForPrinting_v11.pdf

- James M. Montgomery, C. E. (1985). *Water treatment principles and design*: Wiley.
- Johan, P. D., Ahmed, O. H., Omar, L., Hasbullah, N. A. (2021). Phosphorus Transformation in Soils Following Co-Application of Charcoal and Wood Ash. *Agronomy*, 11, 2010. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102010>
- Karageorgiou, K., Paschalis, M., & Anastassakis, G. N. (2007). Removal of phosphate species from solution by adsorption onto calcite used as natural adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, A139, 447-452. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.038>
- Khaing, K. T., Polprasert, C., Mahasandana, S., Pimpeach, W., Patthanaissaranukool, W., Polprasert, S. (2022). Phosphorus Recovery and Bioavailability from Chemical Extraction of Municipal Wastewater Treatment's Waste Activated Sludge: A Case of Bangkok Metropolis, Thailand. *Environment and Natural Resources Journal*, 20(4): 369-378.
- Köse, T. E., & Kivanç, B. (2011). Adsorption of phosphate from aqueous solutions using calcined waste eggshell. *Chemical Engineering Journal*, 178, 34-39.
- Kumar, R., Prakash, K. H., Cheang, P., Khor, K. A. (2004). Temperature driven morphological changes of chemically precipitated hydroxyapatite nanoparticles. *Langmuir*, 20, 5196–5200. <https://doi.org/10.1021/la049304f>
- Lan, Y. Z., Zhang, S., Wang, J. K., & Smith, R. W. (2006). Phosphorus removal using steel slag. *Acta metallurgica*, 19, 449-454.
- Latif, E. F. (2022). Economic comparison between wastewater treatment systems using simulation software. *Desalination and Water Treatment*, 264, 91–101. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28583>
- Latifian, M., Liu, J. & Mattiasson, B. (2012). Struvite-based fertilizer and its physical and chemical properties, *Environmental Technology*, 33:24, 2691-2697
- Le Corre, K. S., Jones, E. V., Hobbs, P., & Parsons, S. A. (2005). Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity. *Journal of Crystal Growth*, 283, 514-522.
- Le Corre, K. S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., Parsons, S.A. (2009). Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39, 433–477.
- Li, B., Huang, H.M., Boiarkina, I., Yu, W., Huang, Y.F., Wang, G.Q., Young, B.R. (2019). Phosphorus recovery through struvite crystallisation: Recent developments in the understanding of operational factors. *Journal of Environmental Management*, 248, 109254. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.07.025>
- Lugo, A., Xu, X., Abey Siriwardana-Arachchige, I.S.A., Bandara, G.L.C.L., Nirmalakhandan, N., Xu, P. (2023). Techno-economic assessment of a novel algal-membrane system versus conventional wastewater treatment and advanced potable reuse

- processes: Part II. *Journal of Environmental Management*, 331, 117189. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117189>
- Mavinic, D. S., Koch, F. A., Huang, H., & Lo, K. V. (2007). Phosphorus recovery from anaerobic digester supernatants using a pilot-scale struvite crystallization process. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6, 561-571. <https://doi.org/10.1139/S07-007>
- Martín-Hernández, E., Montero-Rueda, C., Ruiz-Mercado, G.J., Vaneeckhaute, C., Martín, M. (2023). Multi-scale techno-economic assessment of nitrogen recovery systems for livestock operations. *Sustainable Production and Consumption*, 41, 49-63.
- Metcalf & Eddy, I. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. Boston: McGraw-Hill.
- Mezenner, N. Y., & Bensmaili, A. (2009). Kinetics and thermodynamic study of phosphate adsorption on iron hydroxide-eggshell waste. *Chemical Engineering Journal*, 147, 87-96.
- Mgaidi, A., Mokni, H. (2018). Mathematical modeling of the dissolution of phosphate rock into various acidic medium. *Hydrometallurgy*, 182, 27-31, <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.09.013>.
- Miyazato, T., Nuryono, N., Kobune, M., Rusdiarso, B., Otomo, R., Kamiya, Y. (2020). Phosphate recovery from an aqueous solution through adsorption desorption cycle over thermally treated activated carbon. *Journal of Water Process Engineering*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101302>
- MNRE. (2008). *Notification of Ministry of Natural Resources and Environment on Standards of Effluent Discharge from Freshwater Aquaculture Ponds*. Retrieved from <http://cac.pcd.go.th/index.php/ourservices/knowledgebased-law/cac-menu-law-fisheries/cac-menu-law-freshwater-fisheries/262-2535-39>
- MNRE. (2021). *Notification of Ministry of Natural Resources and Environment on Standards of Effluent Discharge from Swine Farming*. Retrieved from <https://www.pcd.go.th/laws/10905/>
- Monclús, H., Sipma, J., Ferrero, G., Roda, I. R., & Comas, J. (2010). Biological nutrient removal in an MBR treating municipal wastewater with special focus on biological phosphorus removal. *Bioresource Technology*, 101, 3984-3991.
- Moragaspiya, C., Rajapakse, J., Millar, G.J. (2019). Effect of Ca:Mg ratio and high ammoniacal nitrogen on characteristics of struvite precipitated from waste activated sludge digester effluent. *Journal of Environmental Sciences*, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.04.023>
- Morrissey, K. G., English, L., Thoma, G., Popp, J. (2022). Prospective Life Cycle Assessment and Cost Analysis of Novel Electrochemical Struvite Recovery in a U.S.

- Wastewater Treatment Plant. *Sustainability*, 14, 13657. <https://doi.org/10.3390/su142013657>
- Numviyimana, C., Warchot, J., Khalaf, N., Leahy, J.J., & Chojnacka, K., (2022). Phosphorus recovery as struvite from hydrothermal carbonization liquor of chemically produced dairy sludge by extraction and precipitation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1): 106947.
- OAE. (2024). Imported fertilizer quantities, monthly wholesale and retail prices of chemical fertilizers in Thailand. Retrieved from <https://www.oae.go.th/view/1/ปัจจัยการผลิต/TH-TH>
- Pedizzi, C., Noya, I., Sarli, J., González-García, S., Lema, J.M., Moreira, M.T., Carballa, M. (2018). Environmental assessment of alternative treatment schemes for energy and nutrient recovery from livestock manure. *Waste Management*, 77, 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.007>.
- Pengthamkeerati, P., Satapanajaru, T., & Chularuengsook, P. (2008). Chemical modification of coal fly ash for the removal of phosphate from aqueous solution. *Fuel*, 87, 2469-2476. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.03.013>.
- Pinatha, Y., Polprasert, C., Englande, A.J. (2020). Product and cost perspectives of phosphorus recovery from human urine using solid waste ash and sea salt addition – A case of Thailand. *Science of The Total Environment*, 713, 136514.
- Poirier, Y., Jaskolowski, A., Clúa, J. (2022). Phosphate acquisition and metabolism in plants, *Current Biology*, 32(12): R623-R629. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.03.073>.
- Prathumchai, N., Polprasert, C., & Englande, A. J. (2018). Phosphorus distribution and loss in the livestock sector – The case of Thailand. *Resources Conservation and Recycling*, 136, 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.027>.
- Rahaman, S. M., Mavinic, D.S., Meikleham, A., Ellis, N. (2014). Modeling phosphorus removal and recovery from anaerobic digester supernatant through struvite crystallization in a fluidized bed reactor. *Water Research*, 51, 1-10.
- Ren, B., Wang, H., Xu, D., Yang, X., Zhang, Z. (2022). Dissolution Behavior and Kinetics of the Phosphorus–Potassium Associated Ore during Phosphoric Acid Leaching. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(50): 18213–18600. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03121>
- Riewklang, K., Polprasert, C., Nakason, K., Polprasert, S., Kwonpongsagoon, S., Mahasandana, S., Panyapinyopol, B. (2023). Enhancing chemical phosphorus precipitation from tapioca starch anaerobic digestion effluent in a modified pilot-scale fluidized bed reactor. *Environmental Research*, 231, 116277. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116277>

- Riewklang, K. D., R. K., Nakason, K., Jin, G., Panyapinyopol, B. (2024). Assessing phosphorus recovery from anaerobic digestion effluent of tapioca starch processing in a pilot – scale fluidized – bed homogeneous crystallizer: Effects of operation modes. *Chemical Engineering Journal*, 488, 150825. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150825>
- Rittmann, B. E., Mayer, B., Westerhoff, P., & Edwards, M. (2011). Capturing the lost phosphorus. *Chemosphere*, 84, 846-853.
- Rodgers, M., & Wu, G. (2010). Production of polyhydroxybutyrate by activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal. *Bioresource Technology*, 101, 1049-1053.
- Ronteltap, M., Maurer, M., & Gujer, W. (2007). Struvite precipitation thermodynamics in source-separated urine. *Water Research*, 419, 68-75.
- Ronteltap, M., Maurer, M., Hausherr, R., & Gujer, W. (2010). Struvite precipitation from urine – Influencing factors on particle size. *Water Research*, 44, 2038-2046. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.015>.
- Rout, P. R., Bhunia, P., & Dash, R. R. (2014). Modeling isotherms, kinetics and understanding the mechanism of phosphate adsorption onto a solid waste: Ground burnt patties. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1331-1342.
- Saliu, T. D., Oladoja, N.A. (2020). Assessing the suitability of solid aggregates for nutrient recovery from aqua systems. *Journal of Water Process Engineering*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101000>
- Schachtman, D.P., Reid, R.J., Ayling, S.M. (1998). Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell, *Plant Physiology*, 116(2): 447–453, <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>
- Shaddel, S., Ucar, S., Andreassen, J.-P., & Østerhus, S. W. (2019). Engineering of struvite crystals by regulating supersaturation – Correlation with phosphorus recovery, crystal morphology and process efficiency. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 9. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102918>
- Shin, H., Tiwari, D., Kim, D.-J. (2020). Phosphate adsorption/desorption kinetics and P bioavailability of Mg-biochar from ground coffee waste. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101484. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101484>
- Shukla, A., Prakash, O., Biswas, R., Vijay, R., Pal, S. (2022). Design and preliminary techno-economic assessment of a pilot scale pharmaceutical wastewater treatment system for ammonia removal and recovery of fertilizer. *Journal of Environmental Management*, 321, 115898. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115898>
- Snoeyink, V. L., Jenkins, D. (1980). *Water Chemistry*: Wiley.

- Stolzenburg, P. C., A., Teychené, S., Biscans, B. (2015). Struvite precipitation with MgO as a precursor: Application to wastewater treatment. *Chemical Engineering Science*, 133, 9-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2015.03.008>
- Sudyod, P., Chantuk, T. (2017). Cost Analysis and Sensitivity of the Green Eco-Friendly Coffee Business Investment in Nakhon Pathom Province. *Veridian E-Journal, Silpakorn University*, 10(3). 887-903.
- Sun, L., Wei, B., Wu, D., Sun, K., Jiao, J., Zhang, W. (2024) The Effects of Struvite on Biomass and Soil Phosphorus Availability and Uptake in Chinese Cabbage, Cowpea, and Maize. *Agronomy*. 14(8):1852. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081852>
- Talboys, P. J., Heppell, J., Roose, T., Healey, J. R., Jones, D. L., & AWithers, P. J. (2016). Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? *Plant Soil*, 401, 109-123. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2747-3>
- Tervahauta, T., van der Weijden, R.D., Flemming, R.L., Leal, L.H., Zeeman, G., Buisman, C.J.N. (2014). Calcium phosphate granulation in anaerobic treatment of black water: A new approach to phosphorus recovery. *Water Research*, 48, 632-642. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.012>
- Thitanuwat, B., Polprasert, C., & Englande, A. J. (2016). Quantification of phosphorus flows throughout the consumption system of Bangkok Metropolis, Thailand. *Science of The Total Environment*, 543, 1106-1116.
- Tun, L. L., Jeong, D., Jeong, S., Cho, K., Lee, S., & Bae, H. (2016). Dewatering of source-separated human urine for nitrogen recovery by membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 512, 13-20.
- UNDP. (2015). What are the Sustainable Development Goals? Retrieved from <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>
- USEPA. (2024). Status of Nutrient Requirements for NPDES-Permitted Facilities. Retrieved from <https://www.epa.gov/npdes/status-nutrient-requirements-npdes-permitted-facilities>
- Vance, C.P., Uhde-Stone, C., Allan, D.L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*. 157(3):423-447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- Vinardell, S., Cortina, J.L., Valderrama, C. (2023). Environmental and economic evaluation of implementing membrane technologies and struvite crystallisation to recover nutrients from anaerobic digestion supernatant. *Bioresource Technology*, 384, 129326. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129326>
- Wang, F., Wei, J., Zou, X., Fu, R., Li, J., Wu, D., Lv, H., Zhu, G., Wu, X., Chen, H. (2019). Enhanced electrochemical phosphate recovery from livestock wastewater by

- adjusting pH with plant ash. *Journal of Environmental Management*, 250: 109473.
- Wang, J., Burken, J.G., Zhang, X.J., Surampalli, R. (2005). Engineered Struvite Precipitation: Impacts of Component-Ion Molar Ratios and pH. *J Environ Eng*, 131, 1433-1440. *Journal of Environmental Engineering*, 131(10), 1433-1440. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:10\(1433\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:10(1433))
- Wang, J., Tu, X., Zhang, H., Cui, J., Ni, K., Chen, J., Cheng, Y., Zhang, J., Chang, S.X. (2020). Effects of ammonium-based nitrogen addition on soil nitrification and nitrogen gas emissions depend on fertilizer-induced changes in pH in a tea plantation soil. *Science of the Total Environment*, 747, 141340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141340>
- Xu, H., He, P., Gu, W., Wang, G., & Shao, L. (2012). Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash. *Journal of Environmental Science*, 24(8), 1533-1538.
- Ye, Z., Shen, Y., Ye, X., Zhang, Z., Chen, S., & Shi, J. (2014). Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: Property of aggregates. *Journal of Environmental Science*, 26, 991-1000.
- Yetilmezsoy, K., Ilhan, F., Kiyan, E., Bahramian, M. (2022). A comprehensive techno-economic analysis of income-generating sources on the conversion of real sheep slaughterhouse waste stream into valorized by-products. *Journal of Environmental Management*, 306, 114464. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114464>
- You, K., Ge, F., Wu, X., Song, K., Yang, Z., Zhang, Q., Liu, Y., Ruan, R., & Zheng, H. (2021). Nutrients recovery from piggery wastewater and starch wastewater via microalgae-bacteria consortia. *Algal Research*, 60: 102551.
- Yuan, Z., Pratt, S., & Batstone, D. J. (2012). Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes. *Current Opinion in Biotechnology*, 23, 878-883.
- Zabaleta, I., Rodic, L. (2015). Recovery of essential nutrients from municipal solid waste – Impact of waste management infrastructure and governance aspects. *Waste Management*, 44, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.03>



ภาคผนวก ก
สภาวะของดินในการชะละลายฟอสฟอรัส

1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน

ตารางที่ ก-1 ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินในการทดสอบการชะละลายฟอสฟอรัส

Day	pH in soil			
	Control	Struvite	TSP	MAP
1	5.44	5.29	5.58	5.83
2	4.92	5.29	5.49	5.70
3	6.32	6.24	5.29	5.96
4	5.80	5.68	5.89	6.78
5	6.50	6.04	5.89	5.85
6	6.24	6.39	5.43	6.52
7	6.14	6.43	6.01	5.67
8	6.26	5.82	5.62	6.73
9	5.38	6.44	5.97	5.99
10	6.52	6.11	5.59	6.61
11	5.87	5.98	6.16	6.01
12	6.41	6.09	5.51	5.27
13	6.14	6.01	6.81	6.14
14	6.33	5.61	6.66	6.09
15	5.95	5.51	5.53	6.55
16	6.06	5.54	6.24	5.77
17	6.35	6.26	5.96	6.50
18	6.52	6.12	6.80	5.91
19	5.28	6.43	6.19	6.60
20	6.47	6.73	6.06	6.65
21	5.49	6.21	6.91	4.88
22	5.40	6.20	6.20	6.59
23	6.49	6.37	5.08	5.98
24	5.62	6.12	6.35	6.38
25	5.94	6.49	6.00	6.07
26	5.95	6.10	5.89	6.34
27	5.87	5.98	5.47	6.27
28	6.14	5.74	6.25	5.99
29	5.92	6.22	5.94	6.03
30	5.96	6.37	6.18	6.02

2. ค่าความชื้นของดิน (Soil moisture content)

ตารางที่ ก-2 ค่าเฉลี่ยความชื้นของดินในการทดสอบการชะละลายฟอสฟอรัส

Day	Moisture in soil (%)			
	Control	Struvite	TSP	MAP
1	53.5	41.4	45.5	43.1
2	50.7	39.7	44.2	39.7
3	54.2	34.5	45.8	51.7
4	50.9	35.4	53.2	46.0
5	52.8	44.4	53.7	56.0
6	57.2	52.4	49.6	54.5
7	57.9	47.7	63.8	56.4
8	57.5	43.6	61.1	60.7
9	49.9	46.4	70.1	72.6
10	65.6	44.7	72.3	69.6
11	74.8	50.4	70.0	70.4
12	71.1	46.9	67.4	71.7
13	77.4	52.0	69.5	63.6
14	77.3	55.5	75.7	79.3
15	77.2	78.8	75.0	76.0
16	81.1	71.4	76.4	77.0
17	76.6	67.6	70.0	77.3
18	78.3	62.0	76.6	77.4
19	79.9	68.9	73.0	77.9
20	73.8	61.1	74.1	78.7
21	73.5	72.7	77.5	76.6
22	75.6	65.2	69.4	77.6
23	72.2	69.1	77.0	78.5
24	70.4	64.4	72.4	77.3
25	74.0	58.7	75.1	75.4
26	72.3	62.5	73.5	72.4
27	74.5	64.8	73.8	73.9
28	73.4	66.7	72.6	77.6
29	72.9	69.2	75.1	75.3
30	71.0	66.3	74.3	76.5

3. อุณหภูมิของดิน (Soil temperature)

ตารางที่ ก-3 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของดินในการทดสอบการชะละลายฟอสฟอรัส

Day	Temperature in soil (°C)			
	Control	Struvite	TSP	MAP
1	25.2	24.8	24.8	24.4
2	25.8	24.9	24.4	24.3
3	24.9	25.5	26.2	25.3
4	25.2	25.1	25.1	25.1
5	24.9	24.9	25.2	24.8
6	23.7	23.7	23.6	23.7
7	24.0	24.0	24.0	24.0
8	22.6	22.7	22.6	22.8
9	24.9	24.7	24.6	24.5
10	24.1	24.0	24.0	23.9
11	24.6	24.6	24.5	24.7
12	26.3	26.1	25.9	26.2
13	24.5	24.5	24.5	24.5
14	28.0	28.0	27.9	28.1
15	27.8	27.7	27.6	27.7
16	27.8	27.7	27.6	27.7
17	27.7	27.7	27.8	27.7
18	27.7	27.7	27.6	27.6
19	27.3	27.5	27.7	27.5
20	27.9	27.8	27.7	27.7
21	26.2	26.3	26.5	26.3
22	24.8	25.0	25.1	24.9
23	23.6	23.4	23.2	23.5
24	23.2	23.2	23.3	23.2
25	23.6	23.6	23.6	23.6
26	24.2	24.2	24.2	24.2
27	25.3	25.3	25.3	25.3
28	27.6	27.5	27.6	27.3
29	26.4	26.4	26.5	26.4
30	26.9	26.9	26.9	26.8

ภาคผนวก ข
สภาวะแวดล้อมในการทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน

ตารางที่ ข-1 ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินในการทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

Day	pH in soil			
	Control	Struvite	TSP	MAP
1	4.97	5.13	5.46	4.98
2	4.99	4.80	5.53	5.63
3	5.20	5.96	5.60	4.75
4	5.66	5.66	5.20	5.21
5	5.71	5.74	5.97	6.18
6	5.44	6.49	5.39	5.73
7	5.81	5.86	5.46	6.34
8	6.19	6.14	6.24	6.43
9	5.75	5.47	5.51	5.73
10	5.11	5.79	5.72	5.73
11	6.32	5.94	5.80	5.52
12	6.11	6.25	6.29	5.83
13	5.94	5.61	5.47	5.75
14	6.56	6.02	5.96	5.01
15	5.70	5.90	5.74	5.27
16	5.95	5.88	5.95	5.43
17	6.24	5.73	6.37	6.46
18	5.88	5.56	6.68	4.70
19	5.70	6.51	6.38	6.15
20	5.86	6.33	6.20	6.08
21	5.70	6.40	6.10	5.85
22	5.36	5.76	6.19	5.72
23	5.29	6.18	6.02	5.95
24	5.64	6.82	5.39	5.01
25	5.86	6.30	5.66	5.94
26	6.11	6.83	6.28	6.18
27	5.94	6.43	5.98	6.08
28	5.55	6.66	6.64	6.17
29	5.84	6.28	6.36	5.69
30	5.64	6.74	5.84	6.11

ตารางที่ ข-1 ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินในการทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต (ต่อ)

Day	pH in soil			
	Control	Struvite	TSP	MAP
31	6.53	6.64	6.58	6.42
32	5.65	6.98	6.39	6.10
33	6.19	7.01	5.81	6.40
34	6.04	6.48	5.94	6.47
35	6.39	6.69	6.43	6.33
36	6.39	6.85	6.54	6.16
37	5.62	6.86	5.46	6.67
38	5.61	6.67	6.46	5.93
39	6.37	6.04	6.32	6.23
40	5.77	6.52	6.38	6.52
41	6.32	6.74	5.78	6.03
42	5.52	6.49	5.86	6.11
43	5.66	6.38	6.67	6.08
44	5.75	6.92	6.45	5.35
45	5.83	6.70	6.22	5.71

2. ค่าความชื้นของดิน (Soil moisture content)

ตารางที่ ข-2 ค่าเฉลี่ยความชื้นของดินในการทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

Day	Moisture in soil (%)			
	Control	Struvite	TSP	MAP
1	47.5	44.3	46.6	47.8
2	53.6	50.9	47.0	49.1
3	49.1	52.0	49.9	50.4
4	47.5	51.4	51.9	49.4
5	47.1	48.4	47.2	50.1
6	48.7	49.7	52.1	51.2
7	50.0	45.9	51.5	52.6
8	53.8	50.5	49.1	47.0
9	52.3	49.0	46.9	51.0
10	51.4	48.3	53.6	53.9
11	50.9	53.8	49.1	54.7

ตารางที่ ข-2 ค่าเฉลี่ยความชื้นของดินในการทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต (ต่อ)

Day	Moisture in soil (%)			
	Control	Struvite	TSP	MAP
12	54.1	49.1	51.4	46.2
13	50.1	47.9	44.7	49.1
14	47.9	49.1	46.6	51.3
15	53.0	43.3	48.2	50.1
16	51.9	47.7	49.1	49.4
17	53.3	47.5	49.0	51.2
18	52.7	47.7	47.6	55.8
19	49.6	48.7	47.7	50.5
20	52.5	50.3	47.5	47.7
21	53.5	50.1	52.1	49.5
22	54.6	50.5	45.0	48.8
23	50.6	48.7	50.6	49.1
24	53.3	48.5	49.9	51.0
25	53.1	46.0	49.7	48.7
26	54.5	50.2	47.7	50.3
27	57.0	52.6	45.9	45.2
28	50.4	54.8	49.1	44.5
29	55.2	54.4	50.3	45.4
30	54.9	42.7	48.7	46.9
31	57.8	48.6	50.2	50.3
32	58.7	51.0	49.4	47.7
33	53.0	49.1	53.4	48.1
34	51.8	53.1	50.0	47.4
35	50.0	49.0	52.9	46.9
36	60.6	51.8	55.9	43.6
37	56.1	50.2	53.8	51.2
38	56.1	50.6	56.3	50.8
39	53.5	53.2	60.5	52.9
40	55.1	53.8	54.8	52.0
41	50.6	56.7	54.7	44.1
42	48.1	50.8	54.5	46.9
43	53.0	53.7	58.7	52.4
44	57.2	59.3	56.1	45.9
45	54.3	59.2	58.4	50.9

3. อุณหภูมิของดิน (Soil temperature)

ตารางที่ ข-3 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของดินในการทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

Day	Temperature in soil (°C)			
	Control	Struvite	TSP	MAP
1	25.7	25.7	25.9	25.9
2	25.9	26.7	26.7	25.9
3	25.5	25.5	25.3	25.4
4	23.2	23.6	23.5	23.4
5	23.4	23.9	24.0	23.9
6	23.1	23.9	23.8	23.7
7	23.6	24.1	23.8	24.4
8	26.7	28.2	28.7	28.8
9	25.5	26.2	29.0	28.7
10	24.3	24.0	24.4	25.5
11	24.5	24.7	24.7	25.0
12	24.4	24.5	24.9	25.6
13	24.6	24.7	25.5	27.5
14	25.0	24.6	24.2	24.2
15	25.3	25.0	24.8	24.6
16	25.4	24.7	24.5	25.4
17	24.0	24.1	24.2	24.4
18	24.1	24.2	24.1	24.1
19	23.6	23.3	23.1	23.5
20	24.6	24.9	24.3	24.5
21	20.2	20.4	20.1	20.4
22	17.6	17.5	17.6	18.6
23	19.4	19.8	19.0	18.6
24	18.5	18.7	18.2	19.1
25	20.0	20.0	19.7	20.1
26	19.6	19.6	19.6	20.4
27	22.3	23.6	23.1	22.5
28	23.0	22.9	22.7	22.7
29	23.6	23.6	23.4	23.3
30	21.1	20.6	20.5	20.5
31	20.5	20.0	19.9	19.8
32	22.6	22.1	22.1	22.2

ตารางที่ ข-3 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของดินในการทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต (ต่อ)

Day	Temperature in soil (°C)			
	Control	Struvite	TSP	MAP
33	24.0	23.7	23.6	23.6
34	24.4	24.7	24.6	24.3
35	23.7	23.4	23.5	23.6
36	23.8	23.6	23.3	23.4
37	23.5	23.3	23.4	23.6
38	23.9	23.7	23.7	23.7
39	23.6	22.9	22.8	22.8
40	22.2	21.7	21.8	21.8
41	21.8	22.2	21.8	22.0
42	22.6	22.8	22.2	22.3
43	22.7	22.6	22.5	22.8
44	23.0	22.9	22.8	22.9
45	23.7	23.3	23.5	23.5

4. อุณหภูมิในโรงเรือนเพาะปลูก (Greenhouse Temperature)

ตารางที่ ข-4 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของโรงเรือนเพาะปลูกในการทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต

Day	Greenhouse Temperature (°C)				
	06:00 a.m.	09:00 a.m.	12:00 p.m.	03:00 p.m.	06:00 p.m.
1	24.2	32.5	37.2	36.3	27.3
2	23.8	27.7	44.5	44.3	23.8
3	23.8	33.3	44.7	33.3	27.0
4	23.7	39.8	38.8	36.3	28.8
5	23.8	27.8	38.2	33.2	27.0
6	24.3	26.3	36.2	24.3	26.5
7	22.3	29.8	32.8	33.8	27.0
8	23.3	30.5	31.3	31.8	28.8
9	21.3	29.5	36.8	32.5	28.0
10	22.3	35.0	40.8	34.5	28.0
11	25.7	34.0	35.3	32.2	24.0
12	24.3	32.7	40.8	32.3	26.5
13	22.8	34.0	41.3	35.5	27.8

ตารางที่ ข-4 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของโรงเรือนเพาะปลูกในการทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต (ต่อ)

Day	Greenhouse Temperature (°C)				
	06:00 a.m.	09:00 a.m.	12:00 p.m.	03:00 p.m.	06:00 p.m.
14	22.8	28.2	36.0	33.2	28.0
15	23.3	35.5	43.5	40.7	28.3
16	23.3	34.7	35.2	31.5	26.5
17	23.8	32.8	39.2	31.8	28.0
18	24.0	34.5	41.2	32.8	25.7
19	23.3	33.7	38.2	32.0	27.3
20	23.8	31.3	38.2	30.3	27.2
21	22.3	32.5	38.2	30.8	26.2
22	23.8	31.2	37.8	30.7	26.0
23	19.3	30.2	42.3	36.7	23.0
24	17.0	29.0	35.2	29.0	23.0
25	17.8	29.0	35.2	28.7	22.8
26	16.8	27.8	33.5	26.3	21.0
27	17.8	27.5	31.8	29.2	26.0
28	22.0	31.8	37.5	30.5	23.8
29	17.8	28.8	33.8	26.7	21.0
30	18.3	28.7	33.5	26.5	21.0
31	21.3	26.3	37.7	30.7	25.0
32	21.3	28.7	38.5	30.7	24.5
33	19.0	31.2	37.5	30.5	26.2
34	21.2	34.8	41.2	31.7	27.5
35	17.8	31.2	37.8	31.2	25.8
36	23.3	28.5	42.5	32.8	25.8
37	23.3	31.2	37.0	31.2	26.5
38	21.3	29.8	32.8	33.8	26.8
39	21.8	31.8	36.8	31.2	25.8
40	21.3	30.3	36.2	32.5	27.2
41	21.8	30.0	36.2	32.5	26.0
42	21.0	30.7	38.0	28.8	24.2
43	19.8	35.8	39.7	30.7	26.0
44	19.8	32.5	40.3	30.3	27.2
45	20.0	-	-	-	-

หมายเหตุ: วันที่ 45 เก็บเกี่ยวต้นดาวเรือง เวลา 08:30 น.

ภาคผนวก ค
การทดสอบปลูกพืชด้วยปุ๋ยฟอสเฟต



รูปที่ ค-1 โรงเรือนเพาะปลูกต้นดาวเรือง



รูปที่ ค-2 ตัวอย่างต้นดาวเรืองทุกชุดการทดลองในวันที่ 1 ของการทดลอง



รูปที่ ค-3 ตัวอย่างต้นดาวเรืองในวันที่ 25 ของการทดลอง



รูปที่ ค-4 ตัวอย่างต้นดาวเรืองทุกชุดการทดลองในวันที่ 35 ของการทดลอง



รูปที่ ค-5 ตัวอย่างต้นดาวเรืองทุกชุดการทดลองในวันที่ 40 ของการทดลอง



รูปที่ ค-6 ตัวอย่างต้นดาวเรืองทุกชุดการทดลองในวันที่ 45 ของการทดลอง



รูปที่ ค-7 ตัวอย่างต้นดาวเรือง ชุดควบคุม ในวันที่ 45 ของการทดลอง



รูปที่ ค-8 ตัวอย่างต้นดาวเรือง ชุดทดลองด้วยปุ๋ยสูตรไวท์ ในวันที่ 45 ของการทดลอง



รูปที่ ค-9 ตัวอย่างต้นดาวเรือง ชุดทดลองด้วยปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ในวันที่ 45 ของการทดลอง



รูปที่ ค-10 ตัวอย่างต้นดาวเรือง ชุดทดลองด้วยปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ในวันที่ 45
ของการทดลอง



รูปที่ ค-11 การวัดความยาวรากและเส้นผ่าศูนย์กลางดอกดาวเรือง (วันที่ 45)



รูปที่ ค-12 การชั่งน้ำหนักและวัดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกดาวเรือง (วันที่ 45)

ภาคผนวก ง

ข้อมูลสำหรับการประเมินเชิงเทคโนโลยี-เศรษฐศาสตร์ของระบบก่อกวนทางเคมีผลึกสตรูไวท์

ตารางที่ ง-1 Operational costs of struvite crystallization system.

Parameters	Quantity	Annual consumption*	Annual cost (USD·y ⁻¹)
Swine effluent	15.47 m ³ ·d ⁻¹	4,641 m ³ ·y ⁻¹	-
NaOH ^a	1.00 kg·m ⁻³	4,641 kg·y ⁻¹	2,691.8
Electricity ^b			
• Wastewater feeding pump	9.12E-05 kWh·m ³	0.317 kWh·y ⁻¹	0.038
• Ultrafiltration membrane	0.05 kWh·m ³	232.05 kWh·y ⁻¹	27.85
• pH meter	1.55E-05 kWh·m ³	0.054 kWh·y ⁻¹	0.006
• Chemical feeding pump	9.02E-06 kWh·m ³	0.031 kWh·y ⁻¹	0.004
• Struvite crystallizer	0.187 kWh·m ³	650.90 kWh·y ⁻¹	78.11
• Dewatering system			
○ Solar thermal	-	-	-
○ Rotary dryer	0.176 kWh·m ³	612.91 kWh·y ⁻¹	73.51

Remark: *calculate the operation of the struvite crystallization system for 300 d·y⁻¹ followed the university's workday.

^a NaOH cost from Kemcore.com (= 0.580 USD·kg⁻¹).

^b Thailand's electricity cost from Metropolitan Electricity Authority (www.mea.or.th) (= 0.12 USD·kWh⁻¹).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง-2 Total operation costs of struvite crystallization for each scenario.

Parameter	Operational costs (USD)			
	Scenario I	Scenario II	Scenario III	Scenario IV
Swine effluent	0	0	0	0
NaOH	2,691.8	2,691.8	2,691.8	2,691.8
Electricity				
• Wastewater feeding pump	0.038	0.038	0.038	0.038
• Ultrafiltration membrane	0	0	27.85	27.85
• pH meter	0.006	0.006	0.006	0.006
• Chemical feeding pump	0.004	0.004	0.004	0.004
• Struvite crystallizer	78.11	78.11	78.11	78.11
• Dewatering system	0	73.51	0	73.51
Total operational cost	2,769.96	2,843.47	2,797.81	2,871.32

ตารางที่ ง-3 Capital costs of struvite crystallization equipment.

Operating unit	Unit capacity (Q)	Base capacity (Q ₀)	Base cost (C ₀) (USD)	Cost (USD)	Reference
Pre-treatment unit					
• Storage tank	2 m ³	5 m ³	61.2	35.35	Canizales et al. (2020)
• Ultrafiltration membrane	2.5 m ²	20 m ²	200 USD·m ⁻²	500	Martín-Hernández et al. (2023)
Equalization unit	1 m ³	15,000 m ³	~200,000	624.30	Latif (2022)
Influent / Chemical feeding pump	1 m ³ ·h ⁻¹	1 m ³ ·h ⁻¹	15	45	Vinardell et al. (2023)
pH meter	-	-	-	300	Yetilmezsoy et al. (2022)
Chemical preparation unit	0.05 m ³	0.15 m ³	240	124.15	Yetilmezsoy et al. (2022)
Crystallizer unit	1 m ³	0.5 m ³	~2,000	3,031.50	Poirier et al. (2022); Shukla et al. (2022)
Dewatering system					
• Solar thermal unit (drying unit)	2 m ²	2 m ²	60	60	Local supply
• Rotary dryer (drying unit)	0.91 m ²	0.91 m ²	1,000	1,000	Shukla et al. (2022)
Piping system	10 m	10 m	15.5 USD·m ⁻¹	155	Yetilmezsoy et al. (2022)

ตารางที่ ง-4 Total capital costs of struvite crystallization system for each scenario.

Parameter	Capital costs (USD)			
	Scenario I	Scenario II	Scenario III	Scenario IV
Pre-treatment unit	35.35	500	35.35	500
Equalization unit	624.30	624.30	624.30	624.30
Pump and pH meter	345	345	345	345
Chemical preparation unit	124.15	124.15	124.15	124.15
Crystallizer unit	3,031.50	3,031.50	3,031.50	3,031.50
Dewatering system	60	60	1,000	1,000
Piping system	155	155	155	155
Total capital cost	3,943.10	4,883.10	4,407.75	5,347.75

ตารางที่ ง-5 Revenues of recovered phosphate precipitates from struvite crystallization system.

Parameters	Product produced	Annual produced
Precipitating solids	10.95 kg·m ⁻³	3,613.5 kg·y ⁻¹
Phosphorus content in solids	11.71%	11.71%
Phosphorus-containing solids	1.28 kg P·m ⁻³	422.4 kg P·y ⁻¹
Product's market price (USD·kg P ⁻¹)	3.50 – 11.58	3.50 – 11.58
Revenue margin	4.97 – 16.44 USD·m ⁻³	1,496 – 4,949 USD·y ⁻¹

Remark: Fertilizer price received from OAE.go.th in June 2024 (Lowest price for N-P-K formula 18-46-0 and highest price for formula 13-13-13; P as P₂O₅ and K as K₂O).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้วิจัย

อาจารย์ ดร.ญาดา ปินะตา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชานามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ.2535 ณ จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก (Ph.D.) ในสาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม (หลักสูตรนานาชาติ) จากมหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ. 2563 และปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) วิชาเอกอนามัยสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2557 มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน (area of expertise) ในการบำบัดน้ำและน้ำเสีย (water and wastewater treatment) การนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ (waste recovery and recycling) และเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy)

ประสบการณ์ด้านงานวิจัย ประกอบด้วย หัวหน้าโครงการวิจัย เช่น โครงการวิจัย "การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของยาและยาปฏิชีวนะที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำและน้ำประปาจากลำตะคองตอนล่าง จังหวัดนครราชสีมา" และโครงการวิจัย "การประเมินศักยภาพการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์เพื่อนำมาผลิตปุ๋ยฟอสเฟต" เป็นต้น และผู้ร่วมวิจัยหลายโครงการ เช่น โครงการวิจัย "การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพและการจัดการปนเปื้อนสารจากยาและยาปฏิชีวนะในแหล่งน้ำและน้ำประปา" ร่วมกับคณาจารย์สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โครงการวิจัย "การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียด้วยเม็ดบีดส์จากไคโตซานและเปลือกไข่" ร่วมกับคณาจารย์คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โครงการวิจัย "การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มอาการป่วยเหตุอาศรัยกับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอนในกลุ่มพนักงานออฟฟิศ" ร่วมกับคณาจารย์คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และโครงการวิจัย "การจัดการและการสื่อสารความเสี่ยงสุขภาพแบบมีส่วนร่วมจากการรับสัมผัสสารเคมีจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ของประชาชนในตำบลโคกสะอาด อำเภอหนองชัย จังหวัดกาฬสินธุ์" ร่วมกับคณาจารย์คณะสาธารณสุขศาสตร์และสหเวชศาสตร์ วิทยาลัยการสาธารณสุขสิรินธร จังหวัดขอนแก่น

ผลงานวิชาการที่สำคัญ ได้แก่ งานวิจัยด้านการนำฟอสฟอรัสกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทย ซึ่งตีพิมพ์ในวารสาร *Science of the Total Environment* (พ.ศ. 2563 และ 2568) วารสาร *Scientific Reports* (พ.ศ.2568) และวารสาร *GMSARN International Journal* (พ.ศ. 2560) และงานวิจัยด้านการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพและสมการคาดการณ์ฝุ่น PM2.5 ที่ตีพิมพ์ในวารสาร *Songklanakarin Journal of Science and Technology* (พ.ศ. 2564)

สถานที่ติดต่อ ได้แก่ สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ (อาคารเครื่องมือ 9) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตั้งอยู่เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000 โดยสามารถติดต่อได้ทางโทรศัพท์ 081-954-3195 หรือ 0-4422-3912 โทรสาร 0-4422-3920 และ e-mail yada@sut.ac.th