

Received: June 13, 2023; Revised: October 12, 2023; Accepted: October 17, 2023

การนำฟอสฟอรัสกลับคืน ด้วยกระบวนการตกผลึกสตรูไวท์ Phosphorus recovery using a struvite crystallization process

อรุณี เมืองซ้าย¹ อติตยา สังข์สว่าง¹ วาสนศักดิ์ ลิ้มควรรสุวรรณ¹ และเยาวเรศ ส่วนบุญ^{1*}
Arune MueangSai¹, Aditaya Sangsawang¹, Vassanasak Limkhuansuwan¹
and Yaowaret Sunboon^{1*}

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต กรุงเทพฯ

¹Faculty of Science and Technology, Suan Dusit University, Bangkok

*Corresponding Author E-mail Address : yaowaret_sua@dusit.ac.th

บทคัดย่อ

สตรูไวท์ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนหนึ่งของสาเหตุปัญหาอุดตันในเส้นท่อของระบบบำบัดน้ำเสีย ทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายและเสียเวลาในการแก้ปัญหา แต่องค์ประกอบสตรูไวท์ที่มีสารฟอสฟอรัสซึ่งใช้เป็นปุ๋ยและเป็นประโยชน์ทางการเกษตรได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ในน้ำเสียของโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง ด้วยการตกผลึกทางเคมี โดยทำการศึกษาสมบัติของน้ำเสีย และหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) และอัตราส่วนเชิงโมลแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส (Mg:P) ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียมีค่าพีเอชเฉลี่ยที่ 4.32 ± 0.058 มีค่าแมกนีเซียม (Mg) เฉลี่ยที่ $4,192.5 \pm 3,101.37$ มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าแอมโมเนีย (NH_3) เฉลี่ยที่ 347.2 ± 20.191 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าฟอสฟอรัส (P) เฉลี่ยที่ 267.33 ± 5.934 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดสอบน้ำเสียแบบกรองและแบบไม่กรองพบว่า ตะกอนน้ำเสียแบบกรองมีส่วนประกอบของสตรูไวท์ และตะกอนสารอินทรีย์อื่น ๆ เจือปนน้อยกว่า ดังนั้นจึงนำน้ำเสียแบบกรองมาศึกษาการตกผลึกสตรูไวท์ พบว่า ค่าพีเอชที่ 9.5 10 และ 11 เกิดตะกอนสตรูไวท์ค่อนข้างมาก โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมในน้ำเสียแบบกรองอยู่ที่พีเอช 10 นำกลับฟอสฟอรัสได้มากกว่า 98% อัตราส่วนแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส (Mg:P) พบว่าที่พีเอช 9.5 อัตราส่วนเพิ่มขึ้นการตกผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้นด้วย พบว่า อัตราส่วน 1:1 เพิ่มขึ้นเป็น 5:1 ผลึกสตรูไวท์เพิ่มขึ้นจาก 124.10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 213.80 มิลลิกรัมต่อลิตร สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วน 5:1 ที่พีเอช 9.5 มีการเพิ่มขึ้นของตะกอนสตรูไวท์และนำกลับฟอสฟอรัสได้มากกว่า 97% ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรอีกด้วย

คำสำคัญ: การเกษตร อุตสาหกรรมเอทานอล ฟอสฟอรัส สตรูไวท์

Abstract

Struvite in wastewater of industrial process is part of the cause of blocking in the pipes line of the wastewater treatment system, the cost increases and wastes more time to solve the problem. On the other hand, considering the composition of struvite, it contains phosphorus, which can be used as a fertilizer and valuable in agriculture. Therefore, this research was to study the optimum conditions of the chemical crystallization process of struvite in the wastewater from a cassava ethanol production plant. The properties of wastewater and optimum conditions for the crystallization of struvite, including the pH and the molar ratio of magnesium to phosphorus (Mg:P), were identified. The properties of wastewater showed that the average value of pH was 4.32. While Mg, NH₃, and P were 4,192.5, 347.2, and 267.33 milligrams per liter (mg/L), respectively. The filtered and unfiltered wastewater tests found that filtered wastewater sludge contained struvite and was less contaminated with other organic matter. Therefore, it was used to crystallize struvite. The result found that pH at 9.5, 10, and 11 performed quite a lot of crystallization of struvite. However, the optimum pH was at pH 10 since it can reclaim more than 98% phosphorus. Testing the ratio between magnesium and phosphorus (Mg:P) found that at pH 9.5, the proportion of struvite crystallization was also increased. At the proportion 1:1 to 5:1, struvite crystals grew from 124.10 mg/L to 213.80 mg/L. The optimum condition found in this study was the ratio of 5:1 at pH 9.5, which increased the crystallization of struvite, and the phosphorus reversal was more than 97%, helping to bring back phosphorus from wastewater to use in agriculture.

Keywords: Agriculture, Ethanol Industry, Phosphorus, Struvite

บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตสารประกอบฟอสเฟตประมาณร้อยละ 80 ของโลกถูกนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับภาคการเกษตร และร้อยละ 5 ถูกนำไปใช้เป็นองค์ประกอบในอาหารสัตว์ ซึ่งคิดเป็นประมาณ 140 ล้านตันต่อปี ในการสกัดฟอสฟอรัสจากหินฟอสเฟต (Phosphate rock) จึงเกิดการใช้ฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูงในแต่ละปี และมีแนวโน้มที่จะใช้เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากร และความต้องการทรัพยากรอาหารที่เพิ่มมากขึ้น (ธาดา, 2531) ทำให้แหล่งแร่ฟอสฟอรัสในธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดมีปริมาณน้อยลง และมีรายงานว่าหินฟอสเฟตกำลังจะหมดไปในอนาคต ทำให้มีนักวิจัยหลายท่านพยายามนำฟอสฟอรัสคืน เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนฟอสฟอรัสในอนาคต (Li et al., 2019)

การนำฟอสฟอรัสกลับคืนจากน้ำทิ้ง ทั้งภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการตกผลึกทางเคมี (Chemical precipitation) เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ตะกอนที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า สตรูไวท์ (Struvite) หรือ ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียฟอสเฟต (MAP) เกิดจากการตกตะกอนทางเคมีของสารละลายที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียและฟอสฟอรัสในปริมาณที่สูง มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีเหลืองอ่อน ๆ หรืออมน้ำตาล ซึ่งเกิดได้ดีในสภาวะที่เป็นด่าง โดยที่ผลึกสตรูไวท์ดังกล่าวสามารถนำมาทำเป็นปุ๋ยละลายช้าซึ่งไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อพืช (นิธิวัฒน์, 2531) ผลึกแมกนีเซียมแอมโมเนียฟอสเฟต

หรือ MAP สูตรเคมีคือ $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ในอัตราส่วนเชิงโมลที่เท่ากันโดยมีแมกนีเซียมเป็นตัวประสานให้เกิดของแข็ง ซึ่งผลิตภัณฑ์จะเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นด่าง สมการการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังนี้ (Katagi et al., 2016)



จากที่ได้กล่าวมานั้นมีนักวิจัยพยายามนำกลับสูตรไวท์มาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยในปี พ.ศ. 2559 พิษญาได้ทำการศึกษาการตกตะกอนสูตรไวท์จากน้ำเสียฟาร์มสุกรร่วมกับน้ำทะเลพบว่า พีเอชและค่าสัดส่วนของแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ (พิษญา, 2559) นอกจากนั้นยังพบว่า ในปี พ.ศ.2560 ครอบรู้ได้ศึกษาการผลิตสูตรไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มสุกรพบว่า การปรับอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัสที่อัตราส่วน 1:2 สามารถลดปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียได้สูงถึงร้อยละ 90 (ครอบรู้, 2560) แต่อย่างไรก็ตามพบว่า น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเอทานอลนั้นเกิดปัญหาตะกอนสูตรไวท์ในระบบบำบัดน้ำเสียเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาค้นคว้าน้อยในการดึงตะกอนสูตรไวท์ในน้ำเสียจากโรงงานดังกล่าวมาใช้ประโยชน์

ดังนั้นการศึกษานี้ ทีมผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลิตภัณฑ์ไวท์ เพื่อดึงธาตุอาหารฟอสฟอรัส (P) ในน้ำเสียโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังกลับมาใช้ประโยชน์ โดยทำการศึกษาผลของพีเอชต่อการตกตะกอนของสูตรไวท์ และอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัสต่อการเกิดตะกอนสูตรไวท์ มากไปกว่านั้นยังเป็นการลดปริมาณมลพิษในน้ำเสียที่จะปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม และทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลงอีกทางหนึ่งด้วย

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย

ทำการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียที่เก็บมาจากโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง ถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและทำการวิเคราะห์ภายใน 24 ชั่วโมง ก่อนทำการวิเคราะห์นำน้ำเสียตั้งทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง การวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียประกอบไปด้วยค่าต่าง ๆ ได้แก่ พีเอช (pH) ซีโอดี (COD) บีโอดี (BOD) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งแขวนลอย (SS) ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (TVS) ของแข็งละลายน้ำระเหยได้ทั้งหมด (TDVS) ฟอสฟอรัส (P) ไนโตรเจน (TKN) แอมโมเนีย (NH_3) แมกนีเซียม (Mg) โพแทสเซียม (K) โดยการวิเคราะห์และทดสอบคุณภาพน้ำใช้หลักตามมาตรฐาน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater ของ American Public Health Association (APHA, 2005)

การศึกษาพีเอชที่เหมาะสม

โดยนำน้ำตัวอย่าง 350 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์จำนวน 6 บีกเกอร์ และทำการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 7 8 9 9.5 10 และ 11 ตามลำดับ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทั้งนี้ทำการควบคุมสภาวะอื่น ๆ ในการทดลองให้คงที่ และนำน้ำตัวอย่างไปทดสอบสภาวะที่เกิดตะกอนสูตรไวท์โดยใช้เครื่องจาร์เทสต์ (Jartest รุ่น SW1) กวนผสม โดยกวนเร็วที่ 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 นาที และกวนช้าที่ 30 รอบต่อนาทีเป็นระยะเวลา 20 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งให้เกิดการตะกอนเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตะกอนมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C ด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ และนำกระดาษกรองที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และทำการชั่งน้ำหนักตะกอน จากนั้นเลือกน้ำเสียพีเอชที่ให้ตะกอนมากมาทดสอบซ้ำอีกครั้งโดยนำตัวอย่างน้ำเสียที่ปรับพีเอชที่ 9 10 11 และได้เพิ่มการปรับที่พีเอช 9.5 เพื่อหาแนวทางให้ได้ค่าที่เหมาะสมและลดการใช้สารเคมีและความเป็นด่างน้อยลง วิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียหลังการศึกษาสภาวะที่

เหมาะสมต่อการเกิดตะกอนสตรูไวท์ โดยนำตัวอย่างน้ำที่ปรับพีเอชเป็น 9.5 10 11 มาทำการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียหลังตกตะกอน โดยหาปริมาณบีโอดีและฟอสฟอรัสที่เหลือในน้ำต่อไป

การศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง Mg:P

ศึกษาอัตราส่วนเชิงโมล Mg:P ที่เหมาะสมต่อการเกิดตะกอนสตรูไวท์ โดยนำน้ำตัวอย่าง 350 มิลลิลิตร แบ่งใส่บีกเกอร์จำนวน 6 บีกเกอร์ จากนั้นปรับอัตราส่วนเชิงโมล Mg:P เท่ากับ 1:1 3:1 5:1 และ 7:1 ด้วยการคำนวณโมลของฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำเสียด้วยสูตร

$$mol = \frac{g}{MW} = \frac{N}{6.02 \times 10^{23}} = \frac{V}{22.4} \quad (2)$$

mol = จำนวนโมล

g = มวลของสาร (กรัม)

MW = มวลโมเลกุล หรือมวลอะตอม

N = จำนวนอนุภาคของสาร

V = ปริมาณแก๊ส (dm³) ที่ STP

หลังจากนั้นเติมแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ Mg(OH)₂ ในสัดส่วนที่เท่ากับโมลของฟอสฟอรัสในน้ำเสียซึ่งเท่ากับอัตราส่วน 1:1 และเติมเพิ่มเป็น 3 5 และ 7 เท่าเพื่อให้ได้อัตราส่วนเท่ากับ 3:1 5:1 7:1 ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชที่ทำให้เกิดตะกอนที่ดีที่สุด โดยเลือกพีเอชที่ 9.5 และ 10 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับ ทั้งนี้ทำการควบคุมสภาวะอื่น ๆ ในการทดลองให้คงที่ และนำน้ำที่ปรับอัตราส่วนแล้วไปทดสอบสภาวะที่เกิดตะกอนสตรูไวท์ โดยใช้เครื่องจาร์เทสต์กวนผสม โดยกวนเร็วที่ 120 รอบต่อนาทีเป็นระยะเวลา 1 นาที และกวนช้าที่ 30 รอบต่อนาทีเป็นระยะเวลา 20 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งให้เกิดการตกตะกอนเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C ขนาด 110 มิลลิเมตร นำตะกอนที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักตะกอน และวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียหลังการศึกษ้อัตราส่วน Mg:P ที่เหมาะสมต่อการเกิดตะกอนสตรูไวท์ โดยนำตัวอย่างน้ำที่ปรับอัตราส่วน Mg:P เท่ากับ 1:1 3:1 5:1 และ 7:1 ที่พีเอช 9.5 และ 10 มาทำการวิเคราะห์สมบัติน้ำหลังตกตะกอน โดยหาปริมาณของฟอสฟอรัสที่เหลือในน้ำ เพื่อดูประสิทธิภาพในการนำกลับคืนของฟอสฟอรัส โดยการคำนวณ

$$\text{Phosphorus recovery (\%)} = \frac{(P_{\text{น้ำตั้งต้น}} - P_{\text{น้ำหลังตกตะกอน}})}{P_{\text{น้ำตั้งต้น}}} \times 100 \quad (3)$$

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอล

ผลการศึกษาสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอลที่ใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าน้ำเสียดังกล่าวมีค่าความสกปรกค่อนข้างสูง ค่าของของแข็งแขวนลอยละลายน้ำค่อนข้างสูง และค่าความเป็นกรดสูง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณขององค์ประกอบแมกนีเซียม แอมโมเนีย และฟอสฟอรัสในน้ำเสียที่มีอัตราส่วนของ Mg:NH₃:P เป็น 15:1.5:1 ซึ่งค่าดังกล่าวอาจทำให้เกิดตะกอนสตรูไวท์ในระบบบำบัดน้ำเสียได้หากน้ำเสียมีค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้น (Hallas et al., 2019) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียมีศักยภาพในการตกผลึกของสตรูไวท์ในขั้นตอนต่อไป (ฝ่ายสุขภาพโรงงาน, 2560)

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์น้ำเสียของโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง

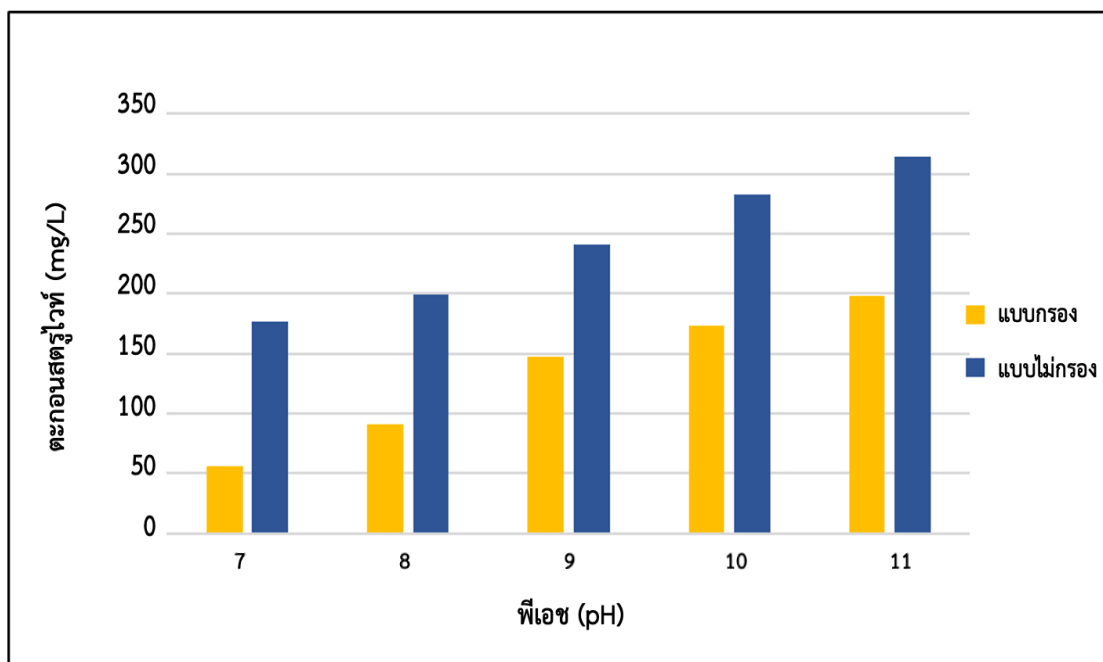
Parameters	Min – Max (mg/L)	Average±SD (mg/L)	Standard Value (mg/L)
บีโอดี	13,800 – 15,900	14,800±1,053.565	20
ซีโอดี	28,160 – 29,440	28,587±739.008	120
ของแข็งทั้งหมด (TS)	14,285 – 14,940	14,520±364.588	-
ของแข็งแขวนลอย (SS)	945 – 964	952.33±10.214	50
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	11,255 – 11,792	11,485±276.656	3,000
ของแข็งทั้งหมดระเหยได้ (TVS)	6,488 – 8,290	7,306±912.396	-
ของแข็งละลายน้ำระเหยได้ทั้งหมด (TDVS)	5,835 – 7,236	6,342±776.299	-
ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)	652.4 – 691.6	678.53±22.632	100
แมกนีเซียม (Mg)	1,999.5 – 6,385.5	4,192.5±3,101.37	-
แอมโมเนีย (NH ₃)	330.4 – 369.6	347.2±20.191	-
ฟอสฟอรัส (P)	261.8 – 273.6	267.33±5.934	2
โพแทสเซียม (K)	1,710.30 – 1,830	1,764.10±64.049	-

หมายเหตุ: ค่าพีเอช มีค่าอยู่ระหว่าง 4.32 – 4.33 และมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.32±0.058

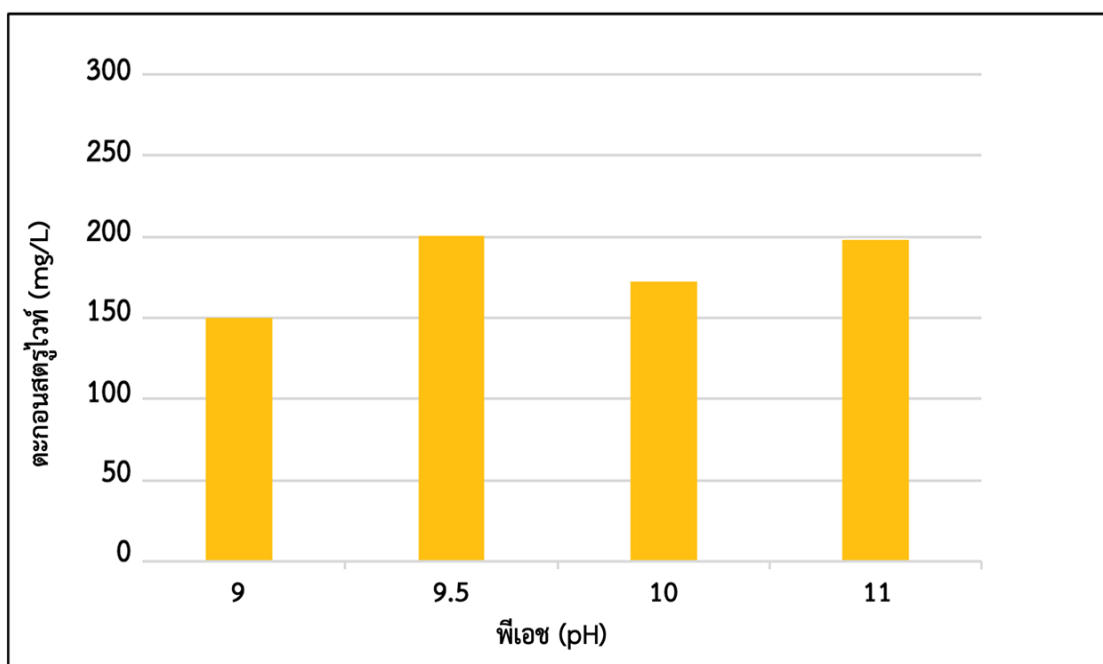
มีค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอยู่ระหว่าง 5.5 – 9

ผลของพีเอช

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น การตกผลึกสตรูไวท์ก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยการปรับพีเอชที่ 7 8 9 10 และ 11 ในน้ำเสียแบบกรองมีปริมาณตะกอนเกิดขึ้นค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 55.61 91.49 147.36 172.77 และ 198.17 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และแบบไม่กรองมีปริมาณตะกอนเกิดขึ้นค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 176.69 198.79 240.70 283.00 และ 314.46 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ เนื่องจากการตกผลึกสตรูไวท์เกิดจากการที่องค์ประกอบของสตรูไวท์ ได้แก่ ไอออนของแมกนีเซียม แอมโมเนีย และฟอสฟอรัส เกิดการรวมตัวกัน โดยประจุของแมกนีเซียมไปจับตัวกับแอมโมเนียและฟอสฟอรัสให้ตกผลึกลงมา ส่วนมากจะอยู่ในรูปของตะกอนสตรูไวท์ ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) และสามารถเกิดได้ดีในสภาวะที่ค่าพีเอชเป็นด่าง จะเห็นได้ว่าน้ำเสียแบบไม่กรองนั้นมีการตกตะกอนมากกว่าน้ำเสียแบบกรอง เนื่องจากตะกอนของน้ำเสียแบบไม่กรองนั้นมีตะกอนปะปนมาด้วย จึงทำให้ตะกอนมีค่ามากกว่าน้ำเสียแบบกรอง ซึ่งตะกอนที่ได้อาจจะไม่ใช่ตะกอนสตรูไวท์โดยตรง ส่วนน้ำเสียแบบกรองที่ได้ทำการกรองตะกอนออกก่อนพบว่า ในน้ำเสียแบบกรองนั้นมีองค์ประกอบของสตรูไวท์ที่ละลายน้ำอยู่ จึงทำให้น้ำเสียแบบกรองมีผลึกสตรูไวท์ที่ไม่ปนตะกอนน้ำเสียทำให้มีค่าน้อยกว่า แสดงดังรูปที่ 1 ดังนั้นในความเข้มข้นของตะกอนที่เกิดขึ้นที่พีเอช 9 10 และ 11 ของน้ำเสียที่ผ่านการกรองมาศึกษาในขั้นตอนต่อไปด้วยการทดสอบแปรผันค่าพีเอช 9 9.5 10 และ 11



รูปที่ 1 ผลของพีเอชต่อปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียแบบกรองและไม่แบบกรอง



รูปที่ 2 ตะกอนของน้ำเสียแบบกรอง ที่พีเอช 9 9.5 10 และ 11

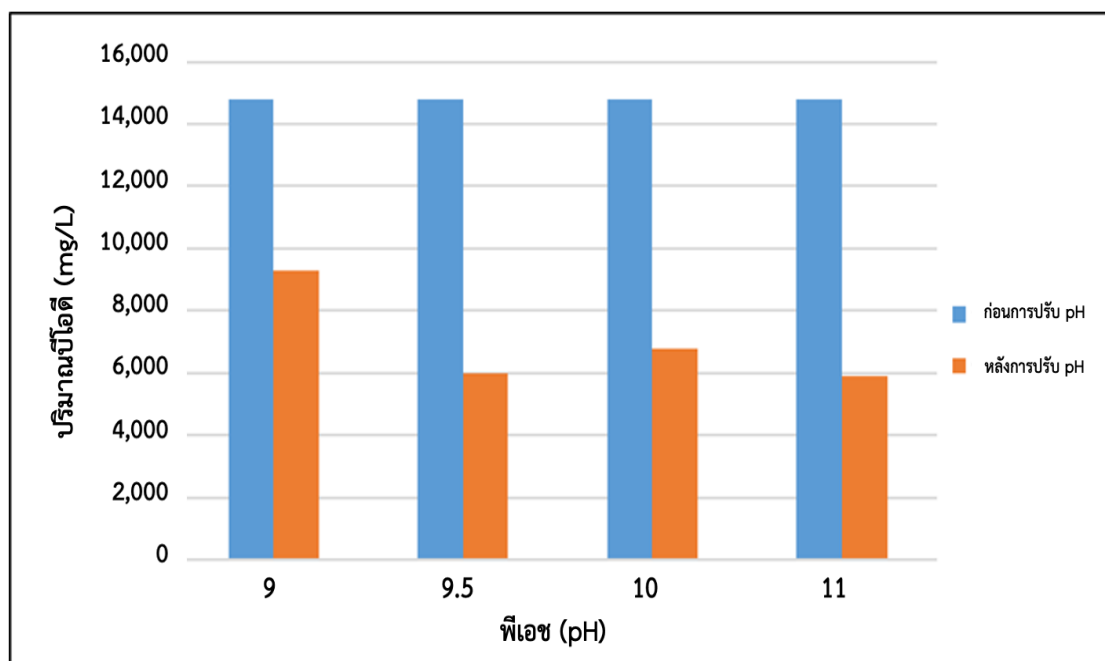
จากรูปที่ 2 พีเอช 9 9.5 10 และ 11 มีปริมาณตะกอนค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 150.26 200.36 172.77 และ 198.17 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้นที่พีเอช 11 ที่มีการใช้ต่างมากจึงไม่มีความจำเป็นต่อการตกตะกอนแขวนลอย ประกอบงานวิจัยของ Taddeo และคณะได้ศึกษาการตกตะกอนแขวนลอยจากมูลสุกรพบว่า ที่พีเอชระหว่าง 7 - 9.5 ทำให้ตกตะกอนแขวนลอยได้ถึงร้อยละ 95 (Taddeo et al., 2016) ดังนั้นจึงทำการเลือกพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการทดสอบขั้นต่อไปอยู่ที่พีเอช 9.5 และ 10

ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัส (P)

ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสที่พีเอช 9 9.5 10 และ 11 มีเปอร์เซ็นต์การนำกลับอยู่ที่ 93.30% 94.95% 98.28% และ 98.90% ตามลำดับ ที่พีเอช 10 กับ 11 มีประสิทธิภาพการนำกลับใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่าพีเอช 10 เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ และเป็นการลดการใช้สารเคมีอีกด้วย ซึ่งที่พีเอช 9.5 ก็มีประสิทธิภาพการนำกลับที่เหมาะสมเช่นเดียวกัน อาจจะสามารถนำกลับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นได้อีก การที่ฟอสฟอรัสมีปริมาณลดลงเกิดจากการที่ฟอสฟอรัสไปรวมตัวกับแมกนีเซียม แอมโมเนีย เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของผลึกสตรูไวท์ (Desmidt et al., 2013; Li et al., 2019) เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาการนำกลับของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย เพื่อนำไปทำเป็นปุ๋ยละลายช้า ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสตั้งต้นมีถึง 267.33 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากการปรับพีเอชพบว่าพีเอช 9.5 และ 10 มีค่าการนำกลับฟอสฟอรัส (P) ที่เหมาะสมที่สุด

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ BOD

ปริมาณบีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำหลังการปรับพีเอช จากการทดลองพบว่า ค่าบีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียมีค่าลดลง ดังรูปที่ 3

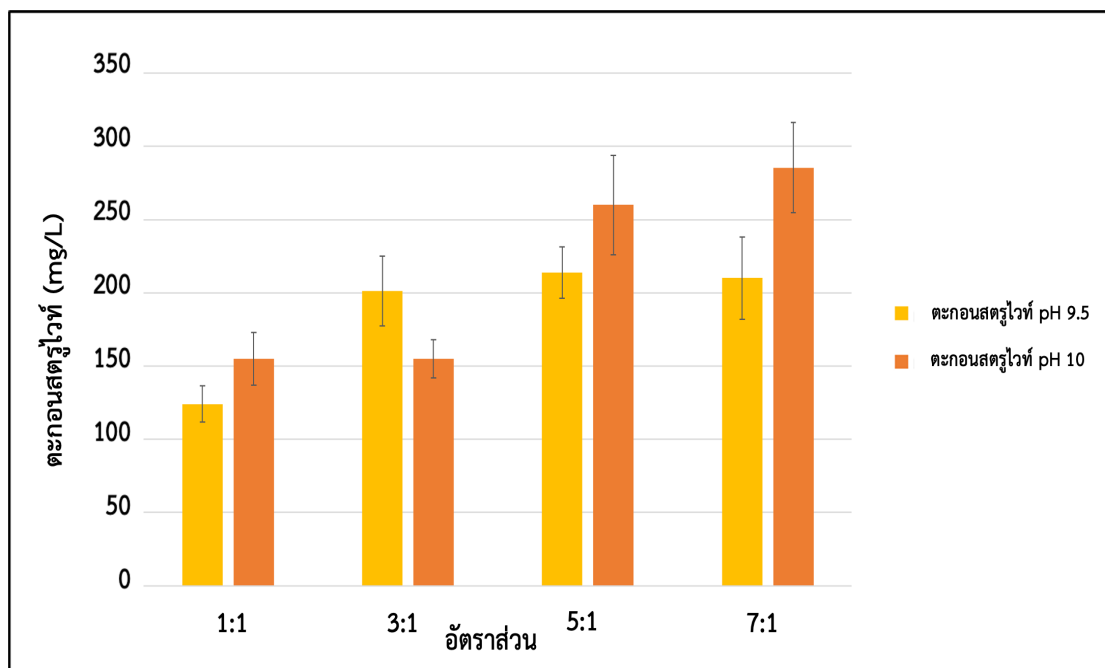


รูปที่ 3 ปริมาณบีโอดีก่อนและหลังการปรับพีเอช

ปริมาณบีโอดี หลังการปรับพีเอชที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ โดยปริมาณบีโอดีตั้งต้นมีค่าเฉลี่ย $14,800 \pm 1,053.565$ มิลลิกรัมต่อลิตรที่ค่าพีเอชที่ 9 9.5 10 และ 11 มีปริมาณบีโอดีลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 9,300 6,000 6,800 และ 5,900 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 37.16% 59.46% 54.05% และ 60.14% ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มการลดลงใกล้เคียงกัน เนื่องจากการตกผลึกสตรูไวท์ มีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีผลทำให้น้ำเสียมีสภาพพีเอชเป็นด่าง นอกจากมีความเหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์แล้ว ยังมีผลทำให้สารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเกิดการตกตะกอนร่วมกันกับผลึกสตรูไวท์โดยอาศัยกลไกการตกตะกอนผลึกทางเคมี และกรองตะกอนผลึกที่ได้ถูกแยกออกจากน้ำจึงทำให้ปริมาณบีโอดีในน้ำลดลง

การศึกษาอัตราส่วนเชิงโมล Mg:P ที่เหมาะสม

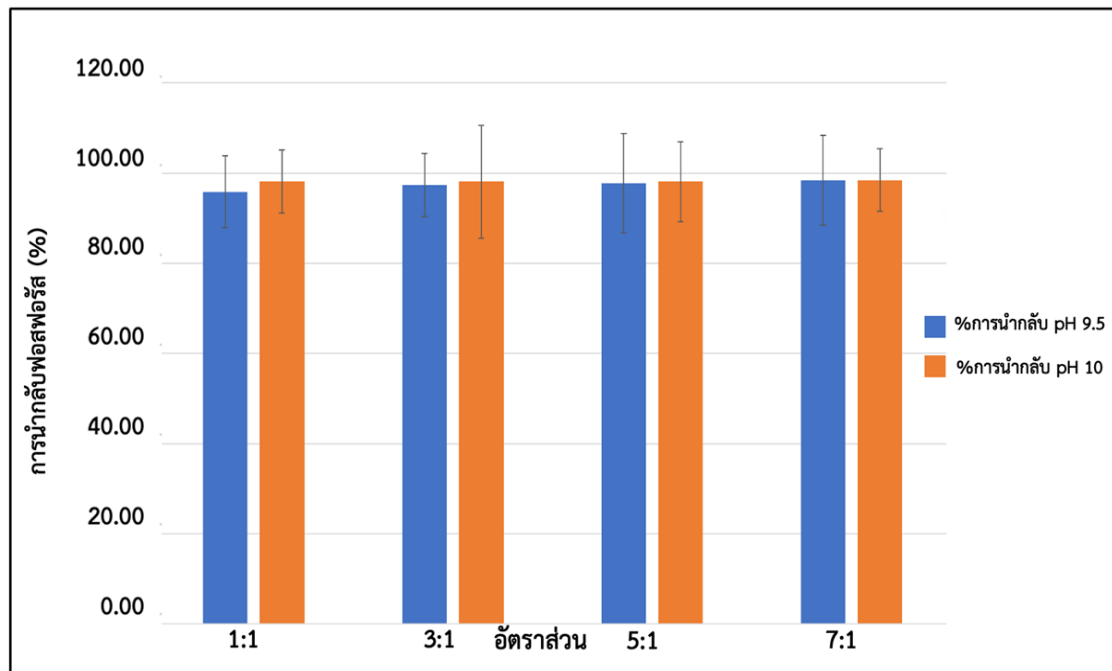
จากการทดลองพบว่า ผลของอัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง Mg:P ต่อการตกผลึกสตรูไวต์ในการนำกลับฟอสฟอรัสจากน้ำเสียที่พีเอช 9.5 และ 10 มีการตกตะกอนเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4 ตะกอนสตรูไวต์ของอัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง Mg:P ที่อัตราส่วน 1:1 3:1 5:1 และ 7:1 ที่พีเอช 9.5 และ 10 เห็นได้ว่าสตรูไวต์มีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชและอัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง Mg:P เพิ่มขึ้น พบว่าที่พีเอช 9.5 อัตราส่วนที่ 3:1 5:1 และ 7:1 มีปริมาณตะกอนสตรูไวต์ใกล้เคียงกัน และพีเอช 10 อัตราส่วนที่ 5:1 และ 7:1 มีปริมาณการเกิดตะกอนสตรูไวต์มากขึ้นใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน ดังนั้นอัตราส่วน 5:1 และ 7:1 มีค่าตะกอนที่สูงทั้งสองพีเอช ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Li et al., 2019)



รูปที่ 4 ตะกอนสตรูไวต์ของอัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง Mg:P ที่อัตราส่วน 1:1 3:1 5:1 และ 7:1 ที่พีเอช 9.5 และ 10

ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัส (P)

ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัส หลังจากการปรับอัตราส่วนเชิงโมล จากการทดลองพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ในน้ำเสียนี้น้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำกลับฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้นตามการปรับอัตราส่วน แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เปอร์เซนต์การนำกลับฟอสฟอรัสหลังการปรับอัตราส่วนเชิงโมลที่พีเอช 9.5 และ 10

เห็นได้ว่าประสิทธิภาพการนำกลับของฟอสฟอรัสหลังจากการปรับอัตราส่วนเชิงโมล โดยที่อัตราส่วนตั้งแต่ 1:1 ก็สามารถนำกลับฟอสฟอรัสได้มากกว่า 95% เนื่องจากแมกนีเซียมที่เพิ่มเข้าไปจะทำให้แมกนีเซียมไปจับตัวกับฟอสฟอรัสและแอมโมเนีย จึงเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นผลึกสตรูไวท์ โดยที่พีเอช 9.5 ที่อัตราส่วน 1:1 3:1 5:1 และ 7:1 มีค่าการนำกลับฟอสฟอรัสอยู่ที่ 95.89% 97.38% 97.76% และ 98.43% ตามลำดับ และมีปริมาณการนำกลับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นที่พีเอช 10 ที่อัตราส่วน 1:1 3:1 5:1 และ 7:1 มีค่าการนำกลับฟอสฟอรัสอยู่ที่ 98.13% 98.13% 98.13% และ 98.48% ตามลำดับ ปริมาณการนำกลับฟอสฟอรัสมีประสิทธิภาพในการนำกลับไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการนำกลับฟอสฟอรัสที่เหมาะสมอยู่ที่อัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง Mg:P ที่อัตราส่วน 5:1 ที่พีเอช 9.5 จะเกิดการตกผลึกสตรูไวท์ที่เพียงพอต่อการนำกลับฟอสฟอรัสที่พีเอช 10 นั้นไม่จำเป็นต้องเพิ่มอัตราส่วนก็สามารถนำกลับฟอสฟอรัสได้ จากการทราบการนำกลับของฟอสฟอรัสหลังการปรับอัตราส่วนเชิงโมลระหว่าง Mg:P ที่เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์นั้น เห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนของแมกนีเซียมเพื่อลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความเป็นด่างสูงทำให้การนำกลับฟอสฟอรัสมีมากขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 5:1 ที่พีเอช 9.5 เนื่องจากการนำกลับฟอสฟอรัสได้ดี

บทสรุป

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกผลึกสตรูไวท์เพื่อบำบัดน้ำเสียจากอาหารฟอสฟอรัสในน้ำเสียโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังกลับมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ ค่าพีเอช และอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส (Mg:P) เพื่อใช้เป็นแนวทางนำไปใช้เป็นปุ๋ยละลายช้าสามารถลดธาตุอาหารในน้ำเสียได้และยังเป็นการลดสาเหตุการเกิดปัญหาทุพโภชนาการในแหล่งน้ำตามธรรมชาติได้อีกด้วย และลดการก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันในท่อของระบบบำบัดน้ำเสียที่ต้องเสียงบประมาณจำนวนมากในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว การศึกษาครั้งนี้พบว่า การตกผลึกสตรูไวท์น้ำเสียแบบกรองพีเอช 10 มีการตกผลึกของสตรูไวท์ที่เหมาะสมและสามารถนำกลับฟอสฟอรัสได้มากกว่า 98% จึงเป็นพีเอชที่เหมาะสมที่สุด สำหรับอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส (Mg:P) พบว่า อัตราส่วน 5:1 ที่พีเอช 9.5 เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการตกผลึกสตรูไวท์ที่เหมาะสม และสามารถนำกลับฟอสฟอรัสได้มากกว่า 97% จากข้อมูลดังกล่าวงานวิจัยนี้สามารถสรุปงานวิจัยได้ 2 แบบ ในการหาสภาวะที่เหมาะสม

ในการตกผลึกสตรูไวท์ โดยแบบที่ 1 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 10 ทำการตกผลึกสตรูไวท์ และไม่จำเป็นต้องทำการเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส (Mg:P) ก็เหมาะสมในการตกผลึกสตรูไวท์ ส่วนแบบที่ 2 เพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อฟอสฟอรัส (Mg:P) เท่ากับ 5:1 ที่พีเอช 9.5 ทำการปรับอัตราส่วนเชิงโมลโดยใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ใช้อัตราส่วนเท่านี้ก็สามารถนำกลับฟอสฟอรัสได้มากกว่า 97% ยังช่วยลดการใช้สารเคมีและไม่ทำให้น้ำเสียมีค่าความเป็นด่างมากเกินไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึก สตรูไวท์ในครั้งนี้เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังเท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง จังหวัดราชบุรี ที่อนุเคราะห์น้ำเสียที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้และห้องปฏิบัติการศูนย์สิ่งแวดล้อม ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต ในการอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการทดลองให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- ธาดา ฉัตรธานี. (2531). การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังโดยกระบวนการไร้ออกซิเจนอิสระแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์. (2531). การกำจัดแอมโมเนียและฟอสฟอรัสพร้อมกันโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฝ่ายสุขาภิบาลโรงงาน กองอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักอนามัยกรุงเทพมหานคร. (2560). น้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย. ค้นเมื่อ 18 กรกฎาคม 2563. <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet6/envi3/water/solu.htm>.
- พิชญา วงศ์ผุดผาด. (2559). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของผลึกสตรูไวท์ซึ่งนำกลับจากน้ำเสียฟาร์มสุกรร่วมกับน้ำทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- รอบรู้ รังสิเวศ. (2560). การผลิตปุ๋ยสตรูไวท์จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงงานเกษตรอุตสาหกรรมและฟาร์มสุกร. รายงานการวิจัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. ชลบุรี.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), and WEF (Water Environment Federation). (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th ed. Method.
- Desmidt E., Ghyselbrecht K., Monballiu A., Rabaey K., Verstraete W. and Meesschaert B.D. (2013). Factors influencing urease driven struvite precipitation. Separation and Purification Technology. 110. 150-157.
- Hallas J., Mackowiak C., Wilkie A. and Harris W. (2019). Struvite phosphorus recovery from aerobically digested municipal wastewater. Sustainability. 376. 1-12.

- Kataki S., West H., Clarke M. and Baruah, D.C. (2016). Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: Feedstock suitability, methods and pre-treatments. *Waste Management*. 49. 437-454.
- Li B., Huang H.M., Boiarkina I., Yu W., Huang Y.F., Wang G.Q. and Young B.R. (2019). Phosphorus recovery through struvite crystallization: Recent developments in the understanding of operational factors. *Journal of environmental management*. 248. 1-10.
- Taddeo R., Kolppo K. and Lepistö R. (2016). Sustainable nutrients recovery and recycling by optimizing the chemical addition sequence for struvite precipitation from raw swine slurries. *Journal of Environmental Management*. 180. 52-58.