

การตกตะกอนแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต  
จากน้ำเสียยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว  
Precipitation Magnesium Ammonium Phosphate  
from Anaerobic Rubber Wastewater

พัทธนันท์ นาทพิณิจ\*, ฐิติรัตน์ ดิษฐ์แก้ว และทวี สัปปีนันท

ฝ่ายเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

เทคโนโลยี ตำบลคลองห้า อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

ปวิตร สุธาวิยางกูร และชุมพร จันทมาศ

บริษัท อควา นิชิฮาระ คาร์ปอเรชั่น จำกัด

ถนนเทศบาลสงเคราะห์ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

สุภาวดี บัวบาน

กองการตลาด สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

เทคโนโลยี ตำบลคลองห้า อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Patthanant Natpinit\*, Thitirat Ditkaew and Tawee Sappinunt

Environment Technology and Resources Department, Thailand Institute of Scientific and

Technological Research, Technopolis, Khlong Ha, Khlong Luang, Pathum Thani. 12120

Pawit Sudhawiyangkul and Choomporn Jantamas

Aqua Nishihara Corporation Ltd.,

Thesabal Songkroh Road, Ladyao, Chattuchak, Bangkok 10900

Suphawadee Buaban

Marketing Division, Thailand Institute of Scientific and Technological Research,

Technopolis, Khlong Ha, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการตกตะกอนเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจากน้ำเสียยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว โดยในน้ำเสียมีปริมาณเฉลี่ยของแมกนีเซียมไอออน แอมโมเนียมไอออน ฟอสเฟตไอออน ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และระดับพีเอชที่ 100, 125, 217, 2,398 มก./ล. และ 7.25 ตามลำดับ โดยระดับพีเอชที่ใช้ในการตกตะกอนอยู่ในช่วง 8.5-9.5 จากการทดลองพบว่าน้ำเสียยางพารา

ที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้วสามารถนำมาตกตะกอนแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตได้ โดยไม่จำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นต้นด้วยการปรับสภาพให้เป็นกรด โดยอัตราส่วนโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตในการตกตะกอนอยู่ที่ 1.3:1:1.3 และสามารถกำจัดแมกนีเซียมไอออน แอมโมเนียมไอออน และฟอสเฟตไอออนได้ที่ 47, 22 และ 86 % ตามลำดับ ซึ่งได้ตะกอนเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตที่มีสีขาวนวล ประมาณ 322 กรัมต่อลบ.ม. และเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ได้มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N) และ ฟอสฟอรัส ( $P_2O_5$ ) เป็น 5.1 และ 32.5 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีอัตราส่วน TN: $P_2O_5$  เป็น 1:6.4 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืชดอกได้ และเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตมีความสามารถในการละลายเป็น 39.3 มก./ล.

**คำสำคัญ :** แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต; น้ำเสียยางพารา; ปุ๋ยละลายช้า

## Abstract

The objective of this investigation aims to possibility study of magnesium ammonium phosphate precipitation (MAP) from rubber wastewater after biogas production. The properties of rubber wastewater were  $Mg^{2+}$  100 mg/L,  $NH_4^+$  125 mg/L,  $PO_4^{3-}$  217 mg/L, TDS 2,398 mg/L and pH 7.25 respectively. The studied conditions of MAP precipitation were pH at 8.5-9.5. The result showed that anaerobic rubber wastewater could precipitate MAP without a preliminary treatment with acid adjusting. The molar ratio of  $Mg:NH_4:PO_4$  for precipitation was at 1.3:1:1.3 and the removal efficiency of  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$  and  $PO_4^{3-}$  were 47, 22 and 86 % respectively. In addition, the MAP could be produced which had yellowish white as 332 g/m<sup>3</sup>. The compositions of MAP were total N and  $P_2O_5$  were 5.1 and 32.5 % by weight, respectively. The ratio of TN: $P_2O_5$  was as 1:6.4 which can be applied for flowering plants. The solubilization capacity of MAP was 39.3 mg/L.

**Keywords:**  $MgNH_4PO_4$ ; rubber wastewater; slow released fertilizer

## 1. บทนำ

การตกตะกอนเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (magnesium ammonium phosphate, MAP) เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำแร่ธาตุที่มีประโยชน์ในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงมีแร่ธาตุของแอมโมเนียมและฟอสฟอรัสเหลืออยู่ ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่มีประโยชน์ต่อพืชจึงนำมาใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตรได้ สมบัติของเกลือ MAP เป็นเกลือละลายน้ำได้ช้า โดยมีค่าคงที่ของ

การละลายอยู่ที่  $2.47 \times 10^{-13}$  เมื่อนำไปใช้เป็นปุ๋ยจะมีอัตราการละลายที่ต่ำ (slow-released fertilizer, SRF) พืชสามารถนำแร่ธาตุไปใช้ได้ยาวนาน [1]

นอกจากนี้ยังพบว่าเกลือ MAP ละลายได้ดีในช่วงพีเอชที่น้อยกว่า 8.5 และมากกว่า 10.5 [2] ซึ่งสภาพของดินมีระดับพีเอชที่เกลือ MAP สามารถละลายได้ดี สำหรับการตกตะกอนเกลือ MAP สามารถเกิดได้ในอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต ( $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ ) เท่ากับ 1:1:1 [3] เมื่อถึงสภาวะอิ่มตัวของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และ

ฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย จะเกิดการรวมตัวเป็นผลึก MAP ขึ้น โดยระดับพีเอชที่ตกตะกอนเกลือ MAP ได้ดีอยู่ในช่วง 8.5-9 [4] ถ้าพีเอชสูงถึง 10.5 จะเกิดการแข่งขันตกตะกอนในรูป  $Mg_3(PO_4)_2$  มากกว่า ซึ่งจะ ทำให้ไม่สามารถกำจัดแอมโมเนียมร่วมกับ และเกลือที่ได้จะละลายน้ำได้ยากขึ้น [5] รวมทั้งแอมโมเนียมจะเปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซแอมโมเนียได้ง่ายกว่าตกตะกอนเป็นเกลือ MAP [6]

นอกจากนี้การตกตะกอนเกลือ MAP จากแหล่งน้ำเสียต่าง ๆ [7] เพื่อลดปริมาณแร่ธาตุที่มีประโยชน์ในน้ำเสีย และป้องกันการเกิดปัญหาการบูมของสาหร่าย ซึ่งเกลือ MAP หรือชื่อทางการค้าเรียกว่า struvite จัดว่าเป็นปุ๋ยละลายช้า (SRF, slow-release fertilizer) [8] โดยพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นาน ในต่างประเทศนิยมใช้ปุ๋ย MAP ในการเพาะปลูก โดยมีอัตราการใช้ที่แตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดพืชและลักษณะภูมิศาสตร์ ได้แก่ 85 กก./เฮกแตร์ ในตุรกี 321 กก./เฮกแตร์ ในญี่ปุ่น 240 กก./เฮกแตร์ ในฝรั่งเศส 283 กก./เฮกแตร์ ในอังกฤษ 115 กก./เฮกแตร์ ในกรีซ และ 155 กก./เฮกแตร์ ในสเปน เป็นต้น โดยเฉลี่ยอัตราการใช้ปุ๋ย MAP ของแต่ละประเทศทั่วโลก อยู่ที่ 116 กก./เฮกแตร์ ซึ่งมีร้อยละการนำเข้าเพิ่มขึ้นทุกปี เช่น ในตุรกี ปี ค.ศ. 1990 มีอัตราการใช้ปุ๋ย MAP อยู่ที่ 5 ล้านตัน โดย 28 % ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และในปี ค.ศ. 2000 มีปริมาณการใช้ปุ๋ย MAP เพิ่มขึ้นเป็น 46 % [9] สำหรับประเทศไทยในปี พ.ศ. 2552 มีการนำปุ๋ยเคมีเข้าจากต่างประเทศ 3.9 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 42,000 ล้านบาท [10] โดยมีราคาซื้อขายปุ๋ยเคมีในประเทศประมาณ 10,500-10,700 บาท/50 กก. ขึ้นกับเกรดและอัตราส่วนของปุ๋ย [11] โดยปุ๋ยเคมีที่ประเทศไทยนำเข้าส่วนใหญ่จัดว่าเป็นปุ๋ยละลายเร็ว ได้แก่ ยูเรีย หินฟอสเฟต เกลือโพแทส เป็นต้น ซึ่งเป็นแม่ปุ๋ย นำมาผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ เพื่อเพิ่มธาตุอาหารให้

มากขึ้น การนำเข้าจึงมีปริมาณมากขึ้นทุกปี หากประเทศไทยสามารถผลิตปุ๋ยละลายช้าได้เองจะเป็นการช่วยลดการนำเข้าปุ๋ยเคมีจากต่างประเทศได้มากขึ้น

การตกตะกอนเกลือ MAP จากน้ำเสีย เป็นวิธีการที่ใช้ได้จริงที่สามารถลดและนำไนโตรเจน ฟอสฟอรัสในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ในรูปของแร่ธาตุอาหารที่มีประโยชน์ต่อพืช ซึ่งเทคโนโลยีนี้ได้มีการนำไปใช้สำหรับกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจากน้ำเสียอุตสาหกรรม [12] น้ำเสียชุมชน [13] และจากมูลวัว [14] เป็นต้น ตัวอย่าง เช่น ประเทศญี่ปุ่นได้ติดตั้งที่โรงบำบัดน้ำเสียชุมชน Unitika, Hiagari Sewage Treatment Plant ประเทศออสเตรเลียติดตั้งที่ Oxley Creek WWTP Brisbane ประเทศสหรัฐอเมริกาติดตั้งที่ Sacramento Regional WWTP และประเทศอิตาลีติดตั้งที่ Treviso WWTP [15-19] นอกจากเกลือ MAP ที่ได้จะนำไปใช้ในรูปของปุ๋ยเพื่อประโยชน์ในการเกษตรแล้ว ยังสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตกรดฟอสฟอริกได้ [20]

ลักษณะน้ำเสียในโรงงานน้ำตาลพาราพบว่ามีความสกปรกค่อนข้างสูง โดยเฉพาะค่าบีโอดีและซีโอดีมีค่าเท่ากับ 4,430-5,109 มก./ล. และ 7,090-7,996 มก./ล. ตามลำดับ นิยมใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อหมักและบ่อเติมอากาศ ซึ่งเป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ หรือระบบยูเอเอสบี เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น โดยมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 92.77 (ลดจาก 6,740 มก./ล. เป็น 480 มก./ล.) และประสิทธิภาพในการลดค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยร้อยละ 86.01 (ลดจาก 277 มก./ล. เป็น 32 มก./ล.) [21-22] นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำเสียจากพาราที่ผ่านการบำบัดแล้ว ยังคงมีแอมโมเนียม ฟอสเฟต และแมกนีเซียมอยู่ โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 100 มก./ล. 230

มก./ล. และ 100 มก./ล. ตามลำดับ จึงมีความเป็นไปได้ที่สามารถตกตะกอนเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตออกจากน้ำเสีย เพื่อมูลค่าให้กับน้ำเสียได้

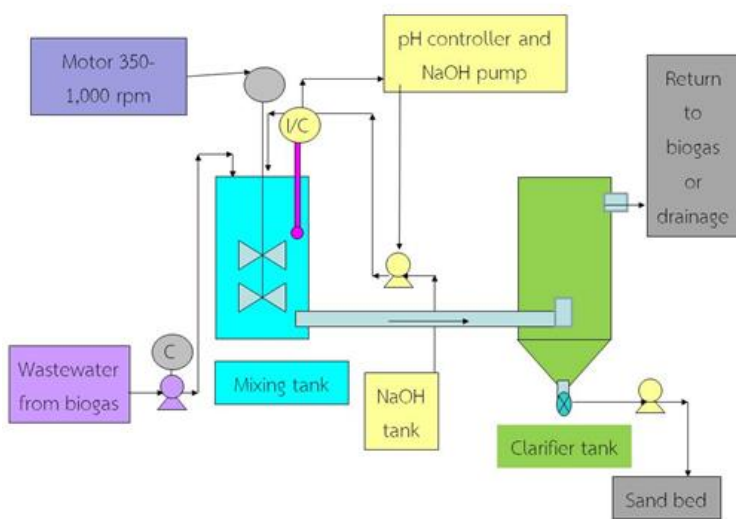
ดังนั้นงานโครงการนี้จึงมุ่งเน้นการตกตะกอนเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตจากน้ำเสียอุตสาหกรรมยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว เพื่อนำมาใช้เป็นปุ๋ย ซึ่งสามารถนำแร่ธาตุที่มีประโยชน์กลับมาใช้ใหม่ได้ และช่วยลดปัญหาการเกิดตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียอีกด้วย

## 2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการ

### 2.1 ชุดทดลองและหลักการทำงาน

จัดเตรียมอุปกรณ์ในการตกตะกอนแบบต่อเนื่อง ซึ่งประกอบด้วยถังพักน้ำเสีย ถังกวนผสม ถังตกตะกอน เครื่องควบคุมระดับพีเอช ปั๊มสูบน้ำเสีย

และสารละลายต่าง แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีหลักการทำงานดังนี้ ถังพักน้ำเสียบรรจุน้ำเสียยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว ซึ่งจะถูกปั๊มเข้าสู่ถังกวนผสมด้วยปั๊มน้ำเสียที่อัตราการป้อน 18.72 ลิตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาเก็บกัก 20 นาที โดยภายในถังกวนผสมจะมีเครื่องกวนที่ควบคุมความเร็วรอบในช่วง 350-500 รอบต่อนาที และมีหัววัดพีเอชเพื่อใช้ควบคุมปั๊มสารละลายต่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ในการควบคุมระดับพีเอชในถังกวนผสมที่ 8.5-9.5 น้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชแล้วจะไหลลงสู่ถังตกตะกอนทางด้านล่าง เพื่อให้ น้ำใสไหลขึ้น และตะกอนตกลงสู่ด้านล่าง ส่วนน้ำใสจะไหลออกนอกถังตกตะกอน โดยมีความเร็วในการไหลขึ้น 0.6 เมตรต่อชั่วโมง น้ำเสียที่ออกจากถังตกตะกอนสามารถนำกลับไปเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้โดยไม่มีผลต่อสมดุลย์ของระบบ



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของชุดทดลองในการตกตะกอนเกลือแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต

### 2.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียและตะกอน

ศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว ได้แก่ ระดับพีเอช (pH), ของแข็งทั้งหมด (TS), ของแข็งแขวนลอย (SS), ของแข็งละลายทั้งหมด (TDS), แมกนีเซียมไอออน

( $Mg^{2+}$ ), แอมโมเนียมไอออน ( $NH_4^+$ ), ฟอสเฟตไอออน ( $PO_4^{3-}$ ) เป็นต้น [23] และวิเคราะห์องค์ประกอบในตะกอนที่ผลิตได้ เช่น  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$  [23] และประเมินในรูปของไนโตรเจนทั้งหมด (TN) และฟอสฟอรัส ( $P_2O_5$ )

### 2.3 ทดสอบความสามารถในการละลายน้ำ

ชั่งตะกอนที่ได้ประมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดชมพู เติมน้ำกลั่นคราวละ 50 มล. และตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมากรองน้ำใสที่ได้ไปวิเคราะห์ของแข็งละลายทั้งหมด (TDS) ส่วนตะกอนที่ได้นำไปเติมน้ำกลั่นอีกครั้ง ทำซ้ำจนกระทั่งปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดเริ่มคงที่ หรือไม่สามารถวิเคราะห์ได้ แล้วจึงอบตะกอนที่เหลือที่อุณหภูมิ 105 °ซ 2 ชั่วโมง เพื่อนำไปประเมินร้อยละการละลายของเกลือ MAP ที่ได้

## 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

### 3.1 สมบัติของน้ำเสียอุตสาหกรรมยางพารา

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองสำหรับการตกตะกอนเกลือ MAP เป็นน้ำเสียจากอุตสาหกรรมยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว โดยมีสมบัติของน้ำเสีย แสดงได้ดังตารางที่ 1

สมบัติของน้ำเสียจะเห็นได้ว่าน้ำเสียมีปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด (TDS) ค่อนข้างสูง

ประมาณ 2,398 มก./ล. เมื่อเทียบกับปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย คือ 100, 125 และ 217 มก./ล. ตามลำดับ แสดงว่ามีไอออนอื่น ๆ ปนอยู่ในน้ำเสียค่อนข้างมาก เช่น โซลไฟด์ไอออน ซัลเฟตไอออน แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ไบคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และอื่น ๆ ซึ่งจะมีผลต่อการตกตะกอนเกลือ MAP นอกจากนี้ น้ำเสียมีค่าความเป็นด่างและไบคาร์บอเนตสูง ซึ่งง่ายต่อการเกิดตะกอนเมื่อระดับพีเอชสูงขึ้น แต่เนื่องจากระดับพีเอช ที่ใช้ในการตกตะกอนเกลือ MAP สามารถตกตะกอนเกลืออื่น ๆ ได้ด้วย ได้แก่ แมกนีเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไบคาร์บอเนต แมกนีเซียมฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟต แคลเซียมซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้ยาก [7] ทำให้เกลือ MAP ที่ได้ไม่บริสุทธิ์

จากสมบัติของน้ำเสีย ดังตารางที่ 2 สามารถคำนวณอัตราส่วนโมลแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตในน้ำเสียเริ่มต้นได้ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 สมบัติของน้ำเสียยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว

| พารามิเตอร์          | หน่วย    | ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด | ค่าเฉลี่ย |
|----------------------|----------|---------------------|-----------|
| พีเอช                |          | 7.09-7.72           | 7.25      |
| ของแข็งทั้งหมด       | มก./ล.   | 2,460-2,490         | 2,478     |
| ของแข็งแขวนลอย       | มก./ล.   | 70-96               | 80        |
| ของแข็งที่ละลายได้   | มก./ล.   | 2,360-2,420         | 2,398     |
| แมกนีเซียม           | มก./ล.   | 105-120             | 100       |
| แอมโมเนียม           | มก./ล.   | 100-129             | 125       |
| ฟอสเฟต               | มก./ล.   | 212-230             | 217       |
| กรดอินทรีย์ระเหยง่าย | มก./ล.*  | 150-200             | 175       |
| ค่าความเป็นด่าง      | มก./ล.** | 1,375-1,550         | 1,488     |
| ไบคาร์บอเนต          | มก./ล.** | 1,320-1,475         | 1,365     |

\*มก./ล. ในรูปกรดแอสติค; \*\*มก./ล. ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 2 อัตราส่วนโมลแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตในน้ำเสีย

| พารามิเตอร์   | หน่วย  | แมกนีเซียม | แอมโมเนียม | ฟอสเฟต |
|---------------|--------|------------|------------|--------|
| ความเข้มข้น   | มก./ล. | 100        | 125        | 217    |
| ปริมาณน้ำเสีย | ลิตร   | 240        | 240        | 240    |
| มวล           | กรัม   | 24         | 30         | 52.08  |
| จำนวนโมล      | โมล    | 1          | 1.67       | 0.55   |

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าโมลฟอสเฟตในน้ำเสียมีปริมาณน้อยที่สุด คือ 0.55 โมล ทำให้เป็นตัวกำหนดการเกิดเกลือ MAP โดยสามารถกำจัดแมกนีเซียมและแอมโมเนียมได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากโมลฟอสเฟตมีค่าน้อยกว่าแมกนีเซียมและแอมโมเนียมอยู่มาก โดยเฉพาะแอมโมเนียมจะเหลืออยู่ในน้ำเสียมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณในน้ำเสียมากที่สุดที่ 1.67 โมล และแมกนีเซียมที่ 1 โมล ดังนั้นในการตกตะกอนจึงควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วง 8.5-9.5 เพื่อให้เกิดเกลือ MAP มากที่สุด แต่ที่ระดับพีเอชนี้ ตะกอนอื่น ๆ เช่น แมกนีเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต หรือเกลืออื่น ๆ สามารถเกิดร่วมด้วยได้ ทั้งนี้ขึ้นกับภาวะสมดุลไอออนในน้ำเสีย พีเอช และค่าคงที่ในการละลายของเกลือชนิดต่าง ๆ [7]

หลังการตกตะกอน น้ำเสียส่วนใสที่ได้มีสมบัติ

แสดงได้ตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับพีเอชให้สูงขึ้นถึง 9 สามารถกำจัดแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตได้ 47, 22 และ 86 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณฟอสเฟตมีปริมาณน้อยที่สุด จึงกำจัดได้มากที่สุด รองลงมา คือ แมกนีเซียม และแอมโมเนียมตามลำดับ และตะกอนที่ผลิตได้ออยู่ที่ 332 กรัมต่อ ลบ.ม. นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช ดังนั้นปริมาณโซเดียมที่เติมเข้าไปจึงมีผลให้ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น แต่ปริมาณโซเดียมที่มีอยู่ในน้ำเสียนั้น ไม่มีผลต่อจุลินทรีย์ในระบบผลิตไบโอแก๊สหากต้องการนำน้ำเสียส่วนนี้กลับไปเพื่อใช้ในการปรับพีเอช เนื่องจากปริมาณโซเดียมสูงสุดที่ยอมรับได้ในระบบผลิตไบโอแก๊สอยู่ที่ 3,500-5,500 มก./ล. [24] ซึ่งค่าของแข็งละลาย

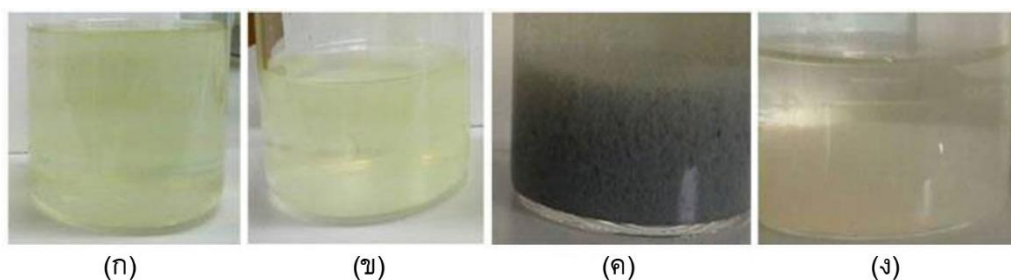
ตารางที่ 3 สมบัติน้ำเสียก่อนและหลังการผลิตเกลือ MAP และประสิทธิภาพการกำจัด

| พารามิเตอร์        | หน่วย      | ก่อน  | หลัง  | ประสิทธิภาพการกำจัด |
|--------------------|------------|-------|-------|---------------------|
| พีเอช              |            | 7.2   | 9.18  |                     |
| ของแข็งที่ละลายได้ | มก./ล.     | 2,398 | 2,997 |                     |
| แมกนีเซียม         | มก./ล.     | 100   | 53    | 47 %                |
| แอมโมเนียม         | มก./ล.     | 125   | 97    | 22 %                |
| ฟอสเฟต             | มก./ล.     | 217   | 31    | 86 %                |
| ตะกอนที่ได้        | กรัม/ลบ.ม. | 332   |       |                     |

\*มก./ล. ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต

ทั้งหมดหลังการตกตะกอนอยู่ที่ 2,997 มก./ล. แสดงว่าปริมาณโซเดียมในน้ำเสียยังอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่มีผลต่อ

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ลักษณะน้ำเสียก่อนและหลังตกตะกอนแสดงได้ดังรูปที่ 2ก และ 2ข



รูปที่ 2 (ก) น้ำเสียก่อนตกตะกอน (ข) น้ำเสียหลังตกตะกอน (ค) ตะกอน MAP รอบที่ 1 และ (ง) ตะกอน MAP รอบที่ 2

จากตารางที่ 4 ซึ่งแสดงอัตราส่วนแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตในการตกตะกอน จะเห็นได้ว่าโมลฟอสเฟตน่าจะเป็นตัวกำหนดในการเกิดตะกอน แต่เมื่อพิจารณาอัตราส่วนแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตในส่วนที่เกิดปฏิกิริยาแล้ว พบว่า แอมโมเนียมเป็นตัวกำหนดในการเกิดตะกอนมากกว่า ฟอสเฟต โดยมีอัตราส่วนโมลของแมกนีเซียม

แอมโมเนียม และฟอสเฟตที่ถูกใช้ในกระบวนการตกตะกอนเป็น 1.3:1:1.3 ซึ่งในกระบวนการเกิดเกลือ MAP นั้นมีอัตราส่วนโมลเป็น 1:1:1 [3] แสดงให้เห็นว่าทั้งแมกนีเซียมและฟอสเฟตสามารถเกิดเป็นตะกอนอื่นร่วมด้วย เช่น แมกนีเซียมฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟต [7] แต่เนื่องจากฟอสเฟตมีจำนวนโมลน้อยที่สุด จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตมากที่สุด

ตารางที่ 4 สมบัติน้ำเสียก่อนและหลังการผลิตเกลือ MAP และประสิทธิภาพการกำจัด

| พารามิเตอร์          | แมกนีเซียม | แอมโมเนียม | ฟอสเฟต |
|----------------------|------------|------------|--------|
| เริ่มต้น             | 1.00       | 1.67       | 0.55   |
| ส่วนที่เกิดปฏิกิริยา | 0.47       | 0.37       | 0.47   |
| อัตราส่วน            | 1.3        | 1          | 1.3    |

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของโมลแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตในกระบวนการตกตะกอนที่ 1:1:1 พบว่าโมลของแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตในน้ำเสียที่สามารถเกิดเป็นเกลือ MAP ได้อยู่ที่ 0.37 โมล และมีการเกิดเกลือชนิดอื่นร่วมด้วย เนื่องจากโมลแมกนีเซียมและฟอสเฟตมีโมลมากกว่าส่วนที่ใช้ในการเกิดเกลือ MAP อยู่ที่ 0.1

โมล ซึ่งเป็นไปได้ว่าแมกนีเซียมและฟอสเฟตสามารถเกิดเป็นสารประกอบอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น แมกนีเซียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียมไบคาร์บอเนต หรือแมกนีเซียมฟอสเฟต [7] และจากจำนวนโมลที่คาดว่าจะเกิดเกลือ MAP ที่ 0.37 โมล เมื่อคำนวณเป็นน้ำหนักแล้วพบว่า จะได้ตะกอนเกลือ MAP ประมาณ 90.65 กรัม (จากการใช้น้ำเสีย 240 ลิตร) แต่เนื่องจากน้ำเสียมีสาร

แขวนลอย เช่น ตะไคร่น้ำปะปนร่วมด้วย จึงทำให้จำเป็นต้องตกตะกอนอีกรอบหนึ่ง (reprecipitation) เพื่อกำจัดตะกอนบางส่วนทิ้งไป แสดงได้ดังรูปที่ 2ค และ 2ง จึงทำให้ตะกอนที่ได้สุดท้ายเหลือเพียง 79.87 กรัม และในน้ำที่เหลือจากการตกตะกอนรอบที่ 2 ยังคงมีแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตเหลืออยู่ใน

ปริมาณหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถตกตะกอนได้หมด เนื่องจากสภาวะสมดุลในการละลายของตะกอน [6] และตะกอนที่ได้มีสีขาวนวล ดังรูปที่ 3 ซึ่งเกลือ MAP ที่ได้จากน้ำเสียส่วนใหญ่จะมีสีขาว สีขาวนวล สีเหลือง สีน้ำตาล หรือสีเทาอ่อน ขึ้นกับสิ่งปะปนที่อยู่ในน้ำเสีย [25]

ตารางที่ 5 อัตราส่วนแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต ในตะกอนที่ได้

| สาร                                          | ยางพารา   |           | มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ |            |
|----------------------------------------------|-----------|-----------|---------------------|------------|
|                                              | %         | อัตราส่วน | ปุ๋ยไม้ใบ           | ปุ๋ยไม้ดอก |
| แมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ )                     | 11.0      | 2.2       |                     |            |
| แอมโมเนียม ( $NH_4^+$ )/ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) | 6.5/5.1   | 1         | 2                   | 1          |
| ฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ )/ฟอสฟอรัส ( $P_2O_5$ ) | 43.5/32.5 | 6.4       | 1                   | 2          |



(ก)

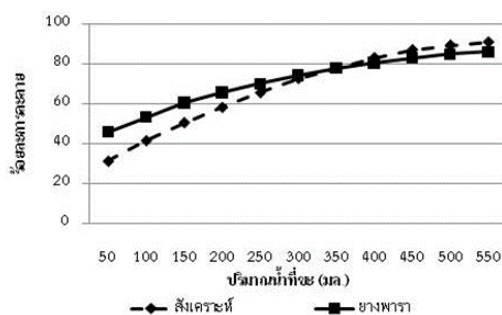


(ข)

รูปที่ 3 (ก) ตกตะกอนรอบที่ 2 และ (ข) เกลือ MAP ที่ได้

จากตารางที่ 5 แสดงอัตราส่วนแมกนีเซียม แอมโมเนียม และฟอสเฟตในตะกอนที่ได้ จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของแอมโมเนียมที่ได้มีค่าน้อยกว่าแมกนีเซียม และฟอสเฟตตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ดังกล่าวนี้ขึ้นกับน้ำหนักมวลของแร่ธาตุแต่ละชนิด ซึ่งมวลของแอมโมเนียมมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับมวลของแมกนีเซียม และฟอสเฟต โดยในตะกอนที่ได้

เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสในรูปของ  $P_2O_5$  เป็น 5.1 และ 32.5 % ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อคำนวณเป็นอัตราส่วนแล้ว พบว่าตะกอนที่ได้มีอัตราส่วนของไนโตรเจนทั้งหมดและฟอสฟอรัสที่ 1:6.4 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการเป็นปุ๋ยสำหรับไม้ดอก เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยที่ใช้กับพืชแต่ละชนิด [23] ซึ่งมีสมบัติเดียวกับเกลือ MAP ทางการค้าที่เหมาะสมกับพืชดอก



รูปที่ 4 กราฟแสดงร้อยละการละลายของเกลือ MAP ที่สังเคราะห์และจากน้ำเสียยางพารา



ตารางที่ 6 ร้อยละการละลายของตะกอน MAP ที่สังเคราะห์ได้ และจากน้ำเสียยางพารา

| ปริมาณน้ำที่ชะ<br>(มล.)          | ร้อยละการละลายตะกอน MAP |             |
|----------------------------------|-------------------------|-------------|
|                                  | สังเคราะห์              | น้ำเสียจริง |
| 50                               | 31.01                   | 45.65       |
| 100                              | 41.29                   | 53.21       |
| 150                              | 50.31                   | 60.36       |
| 200                              | 57.92                   | 65.57       |
| 250                              | 65.27                   | 69.85       |
| 300                              | 72.37                   | 74.08       |
| 350                              | 77.60                   | 77.67       |
| 400                              | 82.74                   | 80.37       |
| 450                              | 86.75                   | 82.81       |
| 500                              | 89.05                   | 84.78       |
| 550                              | 90.59                   | 85.96       |
| ตะกอน (มก.)                      | 0.00941                 | 0.01404     |
| ความสามารถในการละลายน้ำ (มก./ล.) | 60.0                    | 39.3        |

จากตารางที่ 6 และรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเกล็ด MAP ที่ได้จากการสังเคราะห์และจากน้ำเสียยางพารามีสมบัติในการละลายช้า โดยมีแนวโน้มการละลายในลักษณะเดียวกัน คือ ร้อยละการละลายของเกล็ด MAP จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณน้ำที่ชะมากขึ้น แต่ความสามารถในการละลายจะแตกต่างกัน โดยที่เกล็ด MAP สังเคราะห์มีความสามารถในการละลายสูงกว่าเกล็ด MAP จากน้ำเสียยางพารา เนื่องจากเกล็ด MAP สังเคราะห์ไม่มีเกล็ดอื่นปนร่วมด้วย โดยที่เกล็ด MAP สังเคราะห์และน้ำเสียยางพารามีความสามารถในการละลายอยู่ที่ 60.0 และ 39.3 มก./ล. ตามลำดับ จากตารางที่ 4 เห็นได้ว่าเกล็ด MAP จากน้ำเสียยางพารามีการปะปนของเกล็ดอื่นร่วมด้วยประมาณ 0.1 ไมลได้แก่ แมกนีเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซิลเฟต

แมกนีเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น ซึ่งถือว่าเป็นเกล็ดที่ละลายได้ยาก [7] หรือมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่าเกล็ด MAP มาก จึงส่งผลให้ความสามารถในการละลายของเกล็ด MAP ที่ได้จากน้ำเสียยางพารามีค่าน้อยกว่าจากที่สังเคราะห์ [27] และตะกอนที่เหลือจากการละลายของเกล็ด MAP จากน้ำเสียมีมากกว่าเกล็ด MAP สังเคราะห์ โดยมีปริมาณเหลืออยู่ที่ 0.01404 และ 0.0094 มก. ตามลำดับ

#### 4. สรุป

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมยางพาราที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพแล้วที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้ มีความเป็นไปได้ในการตกตะกอนเกล็ดแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตออกจากน้ำเสีย โดยกระบวนการปรับพีเอชที่ 8.5-9.5 โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟตในการตกตะกอนอยู่ที่ 1.3:1:1.3 โดยในน้ำเสียมีปริมาณเฉลี่ยเริ่มต้นของแมกนีเซียม แอมโมเนียม ฟอสเฟต ของแข็งที่ละลายได้ และระดับพีเอชที่ 100, 125, 217, 2,398 มก./ล. และ 7.25 ตามลำดับ ซึ่งสามารถผลิตเกล็ดแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตที่มีสีขาวนวลได้ที่อัตรา 332 กรัมต่อ ลบ.ม. และมีประสิทธิภาพในการกำจัดแมกนีเซียมแอมโมเนียม และฟอสเฟตได้ 47, 22 และ 86 % ตามลำดับ โดยเกล็ดแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตที่ได้มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N) และฟอสฟอรัส ( $P_2O_5$ ) เป็น 5.1 และ 32.5 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งมีอัตราส่วน  $TN:P_2O_5$  เป็น 1:6.4 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืชดอกได้ และเกล็ดแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟตมีความสามารถในการละลายเป็น 39.3 มก./ล.

#### 5. รายการอ้างอิง

- [1] Bridger, G.L., Salutsky, M.L. and Starosta, R.W., 1962, Metal ammonium phos-

- phates as fertilizers, J. Agric. Food. Chem. 10: 181-188.
- [2] Ali, M.L., Schneider, P.A. and Hudson, N., 2005, Thermodynamics and solution chemistry of struvite, J. Ind. Instit. 85: 141-149.
- [3] Saidou, H., Korchef, A., Moussa, B.S. and Amor, B.M., 2008, Struvite precipitation by the dissolved CO<sub>2</sub> degasification technique: Impact of the air flow rate and pH, Chemosphere 74: 338-343.
- [4] Buchanan, J.R., Mote, C.R. and Robinson, R.B., 1994, Thermodynamics of struvite formation, Trans. ASAE. 37: 617-621.
- [5] Shin, H.S. and Lee, S.M., 1997, Removal of nutrient in wastewater by using magnesium salts, Environ. Technol. 19: 283-290.
- [6] Westerman, P.W., Safley, L.M. and Barker, J.C., 1985, Crystalline build-up in swine and poultry recycle flush systems, Agricultural Waste Utilization and Management, pp. 185-190, In Proceedings of the 5th International Symposium on Agricultural Wastes.
- [7] Nelson, N.O., Mikkelsen, R.L. and Hesterberg, D.L., 2003, Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: Effect of pH and Mg:P ratio and determination of rate constant, J. Biores. Technol. 89: 229-236.
- [8] Battistoni, P., Fava, G. and Pavan, P., 1997, Phosphate removal in anaerobic liquors by struvite crystallization without addition of chemicals: Preliminary results, J. Water Res. 31: 2925-2929.
- [9] Ozden, C., Ulku, I. and Demirel, S.U., 2007, Sustainable Production of struvite using wastewater for sustainable agricultural activities, Available Source: <http://www.lcm2007.org/paper/139.pdf>, May 17, 2011.
- [10] กรมวิชาการเกษตร, 2553, ตารางปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปุ๋ยเคมีสูตรที่สำคัญ ปี 2547-2552, แหล่งที่มา : [http://122.154.14.16/ewtadmin/ewt/oe\\_web/more\\_news.php?cid=276&filename=index](http://122.154.14.16/ewtadmin/ewt/oe_web/more_news.php?cid=276&filename=index), 18 มิถุนายน 2553.
- [11] สมาคมการค้าผู้ผลิตปุ๋ยไทย, 2553, ราคาปุ๋ยวันนี้, แหล่งที่มา : <http://www.thaifertilizer.org/aboutus.asp>, 18 มิถุนายน 2553.
- [12] Unitika, Ltd., 1994, Fertilizer produced from wastewater, Jpn. Chem. Wkly. 35: 2.
- [13] Liberti, L., Limoni, N., Lopez, A., Passini, R. And Boari, G., 1986, The 10 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> RIM-NUT demonstration plant at West Bari for removing and recovering N and P from wastewater, J. Water Res. 20: 735-739.
- [14] Schuiling, R.D. and Andrade, A., 1999, Recovery of struvite from calf manure, J. Environ. Technol. 20: 765-768.
- [15] Battistoni, P., Boccadoro, R., Pavan, P. and Cecchi, C., 2001, Struvite crystallization in sludge dewatering supernatant using air stripping: The new-full scale plant at Treviso (Italy) sewage works,

- Proceedings of the 2nd International Conference on Phosphorus Recovery for Recycling from Sewage and Animal Wastes, Noordwijkerhout, Holland.
- [16] Gaterell, M.R., Gay, R., Wilson, R., Gochin, R.J. and Lester, J.N., 2000, An economic and environmental evaluation of the opportunities for substituting phosphorus recovered from wastewater treatment works in existing UK fertilizer markets, J. Environ. Technol. 21: 1067-1084.
- [17] Liberti, L., Petruzzelli, D. and de Florio, L., 2001, REM NUT ion exchange plus struvite precipitation process, Proceedings of the 2nd International Conference on Phosphorus Recovery for Recycling from Sewage and Animal Wastes, Noordwijkerhout, Holland.
- [18] Piekema, P. and Giesen, A., 2001, Phosphate recovery by the crystallization process: Experience and development, J. Environ. Technol. 21: 1067-1084.
- [19] Ueno, Y. and Fujii, M., 2001, Three years operating experience selling recovered struvite from full-scale plant, Proceedings of the 2nd International Conference on Phosphorus Recovery for Recycling from Sewage and Animal Wastes, Noordwijkerhout, Holland.
- [20] Giesen, A., 2010, Crystallization process enables environmental friendly phosphate removal at low costs, Phosphate recovery at the Natural History Museum, The Netherland.
- [21] กรมควบคุมมลพิษ, 2548, แนวปฏิบัติที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษอุตสาหกรรมน้ำยางข้น, ส่วนน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่มที่ 6/8, สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, กรุงเทพฯ, 83 น.
- [22] สิริวัลภ์ เรื่องช่วย ตู้ประกาย และเสรีย์ ตู้ประกาย, 2558, การบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปยางพาราด้วยระบบกลั่นพลังงานแสงอาทิตย์, ว.วิจัย มสศ. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 8(2): 35-52.
- [23] APHA, 1995, Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th American Public Health Association/ American Water Works Association/ Water Environment Federation, Washiton D.C.
- [24] McCarty, P.Z., 1964, Anaerobic Waste Treatment Fundamentals part 1, Chemistry and Biology, Public Work 95: 107-110.
- [25] Wikipedia, 2011, Struvite, Available Source: <https://en.wikipedia.org/wiki/Struvite>, May 17, 2011.
- [26] สุริยา สาสนรักกิจ, 2551, คู่มือเทคโนโลยีการผลิตและโรงงานต้นแบบผลิตปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง, ศูนย์เทคโนโลยีปุ๋ย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ, 70 น.
- [27] Le Corre, K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P. and Parson, S.A., 2005, Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity, J. Cryst. Growth 283: 514-522.