

การบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโดยการตกตะกอนทางเคมีของน้ำด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต

ชดาภรณ์ บุญแสนยศ¹ สิทธิชัย ใจขาน^{2*} ศิริประภา สุวรรณไตร¹ สุภาวดี พวงสันเทียะ¹ และ
นุกุล มงคล³

¹ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

² กลุ่มวิชาสาธารณสุขศาสตร์, วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

³ สำนักงานบริหารกายภาพและสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sitthichai.c@ubu.ac.th

วันที่รับบทความ: 13 มกราคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 29 มีนาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 16 มิถุนายน 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 สิงหาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีโดยตกตะกอนทางเคมีของน้ำด้วยวิธีการจาร์เทสต์ (Jar Test) บรรจุน้ำจากบ่อบำบัดสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบเติมอากาศที่มีค่าฟอสฟอรัสเริ่มต้น 0.8 ± 0.0 mg/L สารสร้างตะกอน คือ อลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) ความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L ในถังปฏิกรณ์ปริมาตรใบละ 1 ลิตรต่อชุดการทดลอง กวนผสมสารเคมีด้วยเครื่องทดสอบการตกตะกอนแบบ 6 ใบกวน (ความเร็ว 100 rpm 1 นาที และ 30 rpm 15 นาที ตามลำดับ) ทดสอบหาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสด้วยวิธี Aseorbic Acid Method ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 80 mg/L สามารถทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเฉลี่ยหลังบำบัดเหลือ 0.002 ± 0.0 mg/L ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสเฉลี่ย 99.74 ± 0.0 % อาจพิจารณาใช้สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 80 – 100 mg/L เพื่อนำไปบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีแนวโน้มที่ทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำต่ำกว่าค่าวิกฤตและมีคุณภาพน้ำด้านการปนเปื้อนธาตุอาหารฟอสฟอรัสในระดับปกติ

คำสำคัญ: การบำบัดน้ำ; การตกตะกอนทางเคมี; ฟอสฟอรัส; ยูโทรฟิเคชัน

Treatment of Phosphorus in Wastewater by Coagulation with Aluminum Sulfate

Chadaphorn Boonsaenyot¹, Sitthichai Chaikhan^{2*}, Siraprapa Suwannatrai¹,
Supawadee Phuangsanthia¹ and Nukul Mongkol³

¹ College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University

² Public Health Sub Division, College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University

³ Office of Physical and Environmental Administration, Ubon Ratchathani University

* Corresponding author, E-mail: sitthichai.c@ubu.ac.th

Received: 16 January 2023; Revised: 29 March 2023; Accepted: 16 June 2023

Online Published: 26 August 2023

Abstract: This experimental research aimed to evaluate the effectiveness of chemical coagulation using aluminum sulfate (alum) in reducing phosphorus levels in wastewater from final pond of the aeration lagoon at Ubon Ratchathani University's treatment system. The initial phosphorus concentration was 0.8 ± 0.0 mg/L. The jar test method was utilized, with a 1 liter reactor containing 20, 40, 60, 80, and 100 mg/L of alum in each set of experiments. The chemicals were mixed using a 6-bladed jar test apparatus at speeds of 100 rpm for 1 minute and 30 rpm for 15 minutes. The phosphorus concentration was measured using the ascorbic acid method. Statistical analysis of the data included frequency, percentage, mean, and standard deviation. The results showed that an alum concentration of 80 mg/L resulted in an average phosphorus concentration of 0.002 ± 0.0 mg/L after treatment, with an average phosphorus treatment efficiency of $99.74 \pm 0.0\%$. Using an 80-100 mg/L solution of aluminum sulfate for wastewater treatment can reduce the phosphorus concentration to below critical levels, improving water quality by decreasing phosphorus nutrient contamination to normal levels.

Keywords: Wastewater treatment; Coagulation; Phosphorus; Eutrophication



1. บทนำ

แหล่งน้ำผิวดินเป็นแหล่งน้ำที่สามารถพบการเจือปนของฟอสฟอรัสตามธรรมชาติ ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางชีวภาพ รวมถึงการสังเคราะห์ดีเอ็นเอและการผลิตพลังงานในเซลล์ [1, 2] เป็นสารอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชและสัตว์ และเป็นส่วนประกอบสำคัญของปุ๋ยที่ใช้ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช [3] ปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายและพืชน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นฐานของห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศทางน้ำ กิจกรรมของมนุษย์ทำให้ฟอสฟอรัสปนเปื้อนในแหล่งน้ำได้ เช่น การใช้ปุ๋ยทางการเกษตร การใช้สารซักล้างที่มีสารโพลีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง

หากระดับฟอสฟอรัสที่มากเกินไปในน้ำเสียอาจทำให้เกิดการบานของสาหร่ายที่เป็นอันตราย ซึ่งอาจนำไปสู่การสูญเสียออกซิเจนและการตายของปลาและสิ่งมีชีวิตในน้ำอื่นๆ [4] ฟอสฟอรัสยังสามารถจะไปกระตุ้นให้พืชสีเขียวในลำน้ำมีการสังเคราะห์แสงได้มากขึ้น และเจริญเติบโตแพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว นำไปสู่กระบวนการยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) คือปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำมีธาตุอาหารอุดมสมบูรณ์ ทำให้สาหร่ายและพืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว [5] หรือการสะสมของแพลงตอนพืชและสาหร่ายในแหล่งน้ำ (Algae Bloom) [6] การสังเกตในกรณีสาหร่ายเกิดการสะสมในแหล่งน้ำ จะพบสีของแหล่งน้ำเปลี่ยนไปจากปกติโดยอาจพบได้หลายสีขึ้นกับชนิดของสาหร่าย เช่น เขียว น้ำตาล เหลืองหรือแดง เป็นต้น ผลกระทบจากแหล่งน้ำอุดมด้วยสารอาหารมากเกินไป ส่งผลให้พืชและสาหร่ายเติบโตมากเกินไปสามารถนำไปสู่ปัญหา

สิ่งแวดล้อมหลายอย่าง เช่น คุณภาพน้ำที่ลดลง การสูญเสียความหลากหลายทางชีวภาพ และเพิ่มความไวต่อการเติบโตของสาหร่ายที่เป็นอันตราย (Harmful Algal Blooms; HABs) เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanobacteria) ที่สร้างสารพิษ ได้แก่ *Microcystis Aeruginosa* *Cylindrospermopsis Raciborskii* *Anabaena* spp. และ *Oscillatoria* spp. เป็นต้น [7, 8]

ประเทศไทยพบการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในหลายพื้นที่ กรณีตัวอย่างการเกิดยูโทรฟิเคชันในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น อ่างเก็บน้ำเขื่อนลำตะคอง จังหวัดนครราชสีมา ที่พบสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วจนส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำและน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา หรือ กรณีในจังหวัดขอนแก่นที่มีแหล่งน้ำหลายแห่งที่เกิดปัญหา ยูโทรฟิเคชัน โดยเฉพาะที่หนองซอแง ตำบลศิลาอำเภอมือ จังหวัดขอนแก่น เคยเกิดการสะสมของแพลงก์ตอนพืช (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) อย่างมาก โดยมีสาเหตุมาจากน้ำทิ้งชุมชน เนื่องจากการไม่มีระบบบำบัดน้ำเสีย หรือบริเวณแหล่งท่องเที่ยวที่ตกค้างโดนจังหวัดชัยภูมิ มีการพบปัญหาการสะสมของแพลงก์ตอนพืชด้วยเช่นกัน [9] เนื่องจากฟอสฟอรัสมักเป็นปัจจัยจำกัดสำหรับการเกิดยูโทรฟิเคชันในระบบน้ำจืดและไนโตรเจนเป็นปัจจัยจำกัดสำหรับน้ำทะเล [10] การศึกษาแนวโน้มของปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันที่มีปัจจัยจากฟอสฟอรัสสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ หากค่าวิกฤตของการปนเปื้อนฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำมีค่า 0.007-0.03 mg/L และแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีปริมาณฟอสเฟตสูงกว่า 0.01 mg/L จัดว่าแหล่งน้ำนั้นมีธาตุอาหารมากเกินไป ถ้ามีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่า 0.6 mg/L แหล่งน้ำนั้นจะ



เป็นแหล่งน้ำที่มีมลภาวะสกปรกจากพื้นที่เกษตร [11, 12] หรือ การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ซึ่งเป็นรงควัตถุสังเคราะห์แสงที่พบได้ในแพลงก์ตอนพืชที่ยังมีชีวิตทุกชนิดในแหล่งน้ำ จัดเป็นตัวชี้ถึงมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนพืช หากแหล่งน้ำใดมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอมากกว่า 10 ug/L จึงถือว่าเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ [13] อีกทั้งปริมาณคลอโรฟิลล์เอยังมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณฟอสฟอรัสรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [6]

ระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มีลักษณะเป็นระบบบำบัดแบบสระเติมอากาศ จำนวน 2 บ่อ ร่วมกับบ่อปรับเสถียร จำนวน 2 บ่อ ปัจจุบันมักพบปัญหาการเจริญเติบโตของสาหร่ายทำให้น้ำมีสีเขียวในช่วงฤดูร้อน ซึ่งอาจเกิดการการมีธาตุอาหารฟอสฟอรัสปนเปื้อนในน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดหรือสะสมในระบบบำบัดน้ำเสียแห่งนี้เป็นระยะเวลานาน ผู้วิจัยได้มีการดำเนินการศึกษาสภาพปัญหาเบื้องต้นพบว่า น้ำทิ้งมีสีเขียว ค่าสีของน้ำสูงมากกว่า 1,500 ADMI ความขุ่นสูงถึง 528 NTU และมีตะกอนสีเขียวลอยอยู่เหนือผิวน้ำ แต่ยังไม่ข้อมูลรายงานผลการตรวจวัดค่าปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำเสียและน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดของระบบบำบัดน้ำเสียแห่งนี้ หากไม่มีการศึกษาแนวโน้มของการเกิดยูโทรฟิเคชันอาจนำไปสู่การขาดแผนรับมือกับผลกระทบจากน้ำทิ้งที่ระบายออกสู่ภายนอกได้ และการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนฟอสฟอรัสด้วยระบบปรับเสถียรแบบใช้อากาศ ซึ่งหลักการทางชีวภาพเพียงอย่างเดียว อาจไม่เพียงพอต่อการช่วยป้องกันผลกระทบของการปนเปื้อนฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำที่อาจเกิดขึ้นได้ [14]

การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียได้ สารเคมีตกตะกอนหลายประเภทที่สามารถใช้ในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium Sulphate) หรือ สารส้ม เฟอริกคลอไรด์ (Ferric Chloride) และ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Poly Aluminum Chloride; PAC) สารตกตะกอนเหล่านี้ทำงานโดยการทำให้ประจุบนอนุภาคในน้ำเสียเป็นกลาง ซึ่งทำให้อนุภาคจับตัวกันเป็นก้อนและเกิดการที่สารแขวนลอยรวมตัวกันเป็นลุ่มก้อนมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายในน้ำลดลง [15-16]

ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาฟอสฟอรัสทั้งหมดที่อาจปนเปื้อนในน้ำทิ้งและผลการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งจากระบบระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยการตกตะกอนทางเคมีของน้ำด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการบำบัดธาตุอาหารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียของมหาวิทยาลัยต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 การเก็บตัวอย่าง

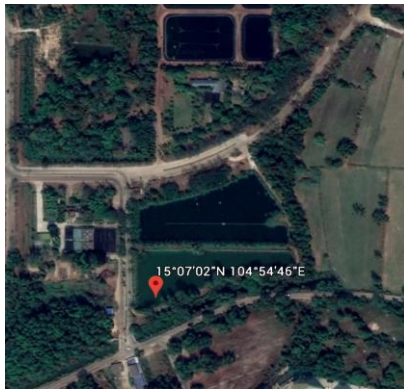
ผู้วิจัยเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายที่มีความกว้าง 135 m ยาว 50 m ลึก 1.80 m และมีปริมาตรความจุ 5,558 m³ ของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วง (Grab Sampling) ซึ่งเป็นวิธีตามประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่อง วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง ความถี่และระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พ.ศ. 2539 โดยจะ



เก็บตัวอย่างน้ำจากปากท่อระบายน้ำของบ่อบำบัดน้ำ
สุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้งสู่คลองสาธารณะ จำนวน 1 จุด
เก็บตัวอย่างน้ำในช่วงเวลา 8.00-9.00 น. โดยใช้อุปกรณ์
เก็บตัวอย่างน้ำ (Water sampler) ขนาด 1 ลิตร จนได้
ปริมาตรรวม 20 ลิตร เพื่อให้เพียงพอกับการทดลองใน
ขั้นตอนต่อไป ดังรูปที่ 1

2.2 วิธีการทดสอบ

2.2.1 การทดสอบปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (สมการที่ 1)
ในน้ำที่มีชั้นตอนตามคู่มือ Standard Methods for
the Examination of Water and Wastewater Method
10200H Chlorophyll [17]



รูปที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำของการวิจัย

$$\text{Chlorophyll a, (ug/L)} = \frac{26.7 \times (A664b - A665a) \times V_{\text{extract}}}{V_{\text{filtered}} \times L} \quad (1)$$

เมื่อ V_{extract} คือ ปริมาณของสารสกัด (mL) ,
 V_{filtered} คือ ปริมาณตัวอย่างที่กรองได้ (L) , L คือ ความ
ยาวทางเดินแสงหรือความกว้างของคิวเวต (cm) , 664b
คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดก่อนการทำให้เป็น
กรด และ 665a คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดหลัง
การทำให้เป็นกรด และการทดสอบคุณภาพน้ำทิ้งใน
พารามิเตอร์อื่น ๆ ด้วยวิธีการดังตารางที่ 1

การควบคุมคุณภาพของการทดสอบด้วยการ
ทดสอบอย่างน้อย 3 ซ้ำ โดยมีค่า Relative Difference
(RPD) ไม่เกินร้อยละ 10 ของทุกตัวอย่างในทุก
พารามิเตอร์ที่มีการทดสอบ

2.2.2 การทดสอบหาปริมาณสารอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์
(สารส้ม) ที่เหมาะสมในการทดลองโดยใช้วิธีการจาร์
เทสต์ (Jar Test) โดยทำการตวงตัวอย่างน้ำลงใน
บีกเกอร์ขนาด 1000 mL (จำนวน 6 ใบ) โดยแบ่งเป็น 2
ชุดการทดลอง (ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ) ได้แก่ ชุด
ควบคุม (ไม่มีการเติมสารเคมี) จำนวน 1 ใบ และชุด
ทดลองที่มีการเติมสารละลายอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์
(สารส้ม) ลงในบีกเกอร์ให้มีความเข้มข้น 20, 40, 60, 80
และ 100 mg/L ตามลำดับ (รวม 5 ใบ) แล้วจึงทำการ
ทดลองด้วยเครื่องทดสอบการตกตะกอน (Jar Test)
ยี่ห้อ WiZard รุ่น PLUS 6S แบบ 6 ใบกวน ด้วยอัตรา



การกวนผสมสารเคมีแบบเร็วที่ความเร็วรอบ 100 rpm 1 นาที และกวนกวนผสมสารเคมีแบบช้าที่ความเร็วรอบ 30 rpm 15 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 20 นาที

จากนั้นนำน้ำใสที่ได้จากการตกตะกอนไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการตรวจวัด รูปที่ 2

ตารางที่ 1 วิธีการทดสอบคุณภาพน้ำทิ้งจำแนกรายพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน
1. ความเป็นกรดและด่าง (pH)	Electrometric Method**	5.5 – 9.0
2. ค่าบีโอดี (BOD)	Azide Modification *	ไม่เกิน 20 mg/L
3. ค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS)	Dried at 103-105 °C*	ไม่เกิน 500 mg/L
4. ของแข็งแขวนลอย (SS)	Dried at 103-105 °C*	ไม่เกิน 30 mg/L
5. น้ำมันและไขมัน (FOG)	Soxhlet Extraction *	ไม่เกิน 5 mg/L
6. ไนโตรเจน (TKN)	Kjeldahl Method	-
7. ฟอสฟอรัส (TP)	Ascorbic Acid Method*	ไม่เกิน 2 mg/L

* คือ ประยุกต์จากคู่มือ The Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [17]

** คือ ประยุกต์จากคู่มือมาตรฐานวิธีวิเคราะห์ทดสอบมลพิษน้ำ [19]

ค่ามาตรฐาน คือ ค่ามาตรฐานควบคุมระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสียชุมชน [20]



รูปที่ 2 การทดลองด้วยเครื่องทดสอบการตกตะกอนแบบ 6 ใบกวน

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.3.1 ค่าวิกฤตของธาตุอาหารอาหารฟอสฟอรัสต่อ การเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำผิวดิน กำหนดที่ช่วง 0.007-0.03 mg/L [11] และการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ เทียบได้จากค่าคลอโรฟิลล์เอ > 20 ug/L [13]

2.3.2 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสก่อนและหลังการ บำบัดโดยเก็บตัวอย่างน้ำจากชุดควบคุมและชุดทดลอง ปริมาตร 50 mL เพื่อนำไปทดสอบด้วยวิธี Ascorbic Acid Method (Part 4500-part B,E) ตาม มาตรฐาน วิธี ท ส อ บ ข อ ง คู มื อ Standard Methods for the



Examination of Water and Wastewater 23rd edition [17] ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$P = \frac{w}{V} \quad (2)$$

เมื่อ P คือ ค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (mg/L) w คือ ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำตัวอย่าง (ug) และ V คือ ปริมาตรตัวอย่างทดสอบ (mL)

2.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสคำนวณจากความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นฟอสฟอรัสในตัวอย่างทดสอบ ดังสมการที่ 3

$$Eff = \left(\frac{P_i - P_e}{P_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ Eff คือ ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส (ร้อยละ) P_i คือ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสก่อนบำบัด (mg/L) และ P_e คือ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสหลังบำบัด (mg/L)

2.3.4 Trophic State Index ที่ ย บ จ า ก Total Phosphorus หรือ TSI (TP) คือ ตัวแปรที่บ่งชี้ถึงสภาวะยูโทรฟิเคชันตามแนวคิดโรเบิร์ต คาร์ลสัน [18] ดังสมการที่ 4

$$TSI(TP) = 14.42 \ln(TP) + 4.15 \quad (4)$$

เมื่อ TP คือ ค่าเฉลี่ยของฟอสฟอรัสทั้งหมดในตัวอย่างน้ำ (ug/L)

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำทิ้ง

ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมื่อเทียบกับมาตรฐานควบคุมระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสีรวมชุมชนตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 [20] พบว่า pH, BOD, TDS, SS, FOG และ TKN ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งน้ำทิ้ง แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะทั่วไปของน้ำทิ้งในบ่อสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสีย

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	คุณภาพน้ำ
pH	-	7.85 ± 0.15*	5.5 – 9.0	ผ่าน
BOD	mg/L	3.04 ± 0.75*	ไม่เกิน 20 mg/L	ผ่าน
TDS	mg/L	95.00 ± 7.07*	ไม่เกิน 500 mg/L	ผ่าน
SS	mg/L	52.50 ± 3.54*	ไม่เกิน 30 mg/L	ผ่าน
FOG	mg/L	3.30 ± 0.00*	ไม่เกิน 5 mg/L	ผ่าน
TKN	mg/L	0.64 ± 0.04	-	-
TP	mg/L	0.80 ± 0.00*	ไม่เกิน 2 mg/L	ผ่าน
Chlorophyll a	ug/L	366.67 ± 14.36**	ไม่เกิน 20 ug/L	เกิดยูโทรฟิเคชัน

* คือ ค่ามาตรฐานควบคุมระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสีรวมชุมชน [20]

** คือ การเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำเทียบได้จากค่าคลอโรฟิลล์เอ [13]



แนวโน้มการเกิดยูโทรฟิเคชันในน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีเมื่อพิจารณาจากคลอโรฟิลล์เอ พบว่าแหล่งน้ำอาจมีการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันเนื่องจากมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ 366.67 ± 14.36 ug/L ซึ่งมากกว่าค่าวิกฤตของการปนเปื้อนคลอโรฟิลล์เอที่ 20 ug/L (ตารางที่ 2) จากทบทวนผลการศึกษารายงานของ พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และ รัชชา ชัยชนะ ที่ได้ประเมินว่าแหล่งน้ำที่มีคลอโรฟิลล์เอสูงกว่า 10 ug/L จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้ [9] และสอดคล้องกับปัจจัยกำหนดต่อการสะสมของสาหร่ายเซลล์เดียว (ตารางที่ 3) โดยธรรมชาติแล้วแหล่งน้ำต่าง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวภาพตามระยะเวลา ผลจากกิจกรรมของมนุษย์ส่งผลให้ปัญหายูโทรฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว บ่อยครั้ง รุนแรง และใช้ระยะเวลาในการบำบัดที่มากขึ้น แหล่งน้ำที่เกิดการสะสมของแพลงก์ตอนพืชจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์มากกว่า 40 ug/L หากปริมาณคลอโรฟิลล์สูงกว่า 100 ug/L มีโอกาสสูงที่ปลาในแหล่งน้ำจะตายจากการขาดแคลนออกซิเจน [21] น้ำทิ้งของที่เก็บตัวอย่างจากบ่อบำบัดแห่งนี้มีคลอโรฟิลล์เอ 366.67 ± 14.36 ug/L อยู่ในระดับการเกิดยูโทรฟิเคชันที่มีสถานะเป็น Hypertrophic จึงอาจมีผลให้ลักษณะของน้ำเป็นสีเขียวดังที่ปรากฏในบ่อบำบัดสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสีย (รูปที่ 1)

การปนเปื้อนฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งมีค่า 0.802 ± 0.000 mg/L (ตารางที่ 3) ซึ่งอยู่ระดับไม่เกินมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน ที่กำหนดค่าปริมาณฟอสฟอรัสไว้ไม่เกิน 2.0 mg/L [20] แต่หลายประเทศในทวีปยุโรป

และออสเตรเลียกำหนดค่ามาตรฐานไว้ต่ำกว่า 0.2 mg/L สำหรับสหรัฐอเมริกาได้กำหนดปริมาณขั้นต่ำของธาตุอาหารฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในแหล่งน้ำไว้ที่ 0.1 mg/L และ 1.0 mg/L ตามลำดับ [22] ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าช่วงของค่าวิกฤตของธาตุอาหารต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันที่พิจารณาจากปริมาณฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ (เกินค่าวิกฤตที่ 0.007-0.030 mg/L) แหล่งน้ำนี้มีโอกาสที่จะจัดเป็นแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนมีธาตุอาหารมากเกินไป เนื่องจากมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสสูงกว่า 0.6 mg/L และมีค่า TSI(TP) มากกว่า 70 จัดว่าคุณภาพน้ำด้านการปนเปื้อนของธาตุอาหารฟอสฟอรัสอยู่ในระดับ Hypereutrophic [10-11] จึงอาจทำให้แหล่งน้ำนี้อยู่ในภาวะของการเกิดยูโทรฟิเคชันดังที่น้ำมีลักษณะสีเขียวปรากฏและมีสาหร่ายขนาดเล็กแขวนลอยอยู่ในน้ำทิ้ง ระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีกระบวนการบำบัดหลักที่สำคัญ คือ การบำบัดแบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) จึงอาจไม่เพียงพอที่จะกำจัดฟอสฟอรัสที่เป็นธาตุอาหารของสาหร่ายเซลล์เดียวที่มีในน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายได้ ทั้งนี้การสะสมของธาตุอาหารในแหล่งน้ำเป็นระยะเวลาอันอาจนำไปสู่การสูญเสียออกซิเจนและการตายของสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ [4]

การควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจึงควรควบคุมสารปนเปื้อนและธาตุอาหารในน้ำให้อยู่ระดับต่ำ โดยจำกัดสัดส่วนธาตุอาหารไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ เช่น การกำจัดไนโตรเจนโดยใช้กระบวนการทางกายภาพ/เคมี ได้แก่ การเติมคลอรีน (Chlorination) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) และการเป่าอากาศ (Air Stripping) ส่วนการกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการบำบัดทางเคมีนั้นมีประสิทธิภาพสูงแต่มี



ค่าใช้จ่ายสูงเช่นเดียวกัน สารเคมีที่มีนิยมใช้โดยทั่วไป ได้แก่ ปูนขาว (CaO) สารประกอบเหล็กคลอไรด์ (FeCl₃) และอลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminum Sulfate)

3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส

การทดลองเพื่อลดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งโดยการตกตะกอนทางเคมีของน้ำด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) โดยใช้เครื่องทดสอบการตกตะกอนแบบ 6 ใบกวน พบว่า ชุดควบคุม (น้ำทิ้งที่ไม่มีการเติมสารเคมี) มีค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.802 ± 0.000 mg/L ชุดทดลองที่เติมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต เติมลงในถังให้มีความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L มีค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสระหว่าง 0.013 - 0.360 mg/L ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ความเข้มข้นสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 80 mg/L สามารถทำให้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฟอสฟอรัสหลังบำบัดมีค่าต่ำที่สุด คือ 0.002 ± 0.00 mg/L (ตารางที่ 3)

การทดลองบำบัดฟอสฟอรัสของน้ำจากบ่อบำบัดน้ำสุดท้ายของมหาวิทยาลัย พบว่า ชุดควบคุมนั้นค่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสไม่ลดลง (ไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัด) ในขณะที่ชุดทดลองที่บำบัดน้ำโดยเติมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 55.12 - 99.74 % ความเข้มข้นของสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 80 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสสูงที่สุด (รูปที่ 3) สอดคล้องกับงานวิจัยของเอกณัฐ ขวนชวยทรัพย์ ที่ได้ทำการศึกษากำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากเติมอากาศของน้ำทิ้งอาคารที่ทำงานกองทัพอากาศดอนเมือง โดยการตกตะกอนทางเคมีโดยเติมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต พบว่า

มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่า 90% (ใช้สารเคมีเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร) และยังมีงานวิจัยของกมลชนก กองกุลที่ได้ศึกษาความสามารถของเถ้าลอยลิกไนต์เปรียบเทียบกับสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตต่อการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยกระบวนการสร้างตะกอนพบว่า สารอลูมิเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 1.0 - 12.0 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสได้มากกว่า 80% [23-24] จะเห็นได้ว่าสารอลูมิเนียมซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัสสูง เมื่อเติมอลูมิเนียมซัลเฟตลงไปในน้ำแล้วเกิดกระบวนการกวนเพื่อผสมสารเคมี ไอออนประจุบวกของสารจะเกิดการแตกตัวเพื่อไปลดค่าศักยภาพซีต้าที่เป็นลบ ทำให้อนุภาคเกิดการจับตัวกันเป็นตะกอน อาศัยการกวนอย่างแรงและเร็วเพื่อให้สารเคมีกระจายอย่างทั่วถึง และอนุภาคมีโอกาสชนกันมากขึ้น [25] และสามารถจับตัวกับฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต จากนั้นจะทำให้เกิดตะกอนของอลูมิเนียมฟอสเฟตซึ่งเป็นของแข็ง ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำลดลง แต่ตะกอนที่รวมตัวกันต้องนำไปบำบัดหรือกำจัดต่อไป [11-12] เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่า TSI(TP) พบว่า การใช้สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L สามารถลดระดับคุณภาพน้ำด้านการปนเปื้อนจากธาตุอาหารฟอสฟอรัสในน้ำให้อยู่ในระดับปกติ (Mesotrophic) และความเข้มข้น 80 mg/L คือ ปริมาณที่เหมาะสม (Optimum Dose) ที่สามารถทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในระดับต่ำ (Oligotrophic) สอดคล้องกับหลักการบำบัดน้ำด้วยการตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Coagulation) ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการสะสมของแพลงตอนพืชและสาหร่ายในแหล่งน้ำได้ [21]

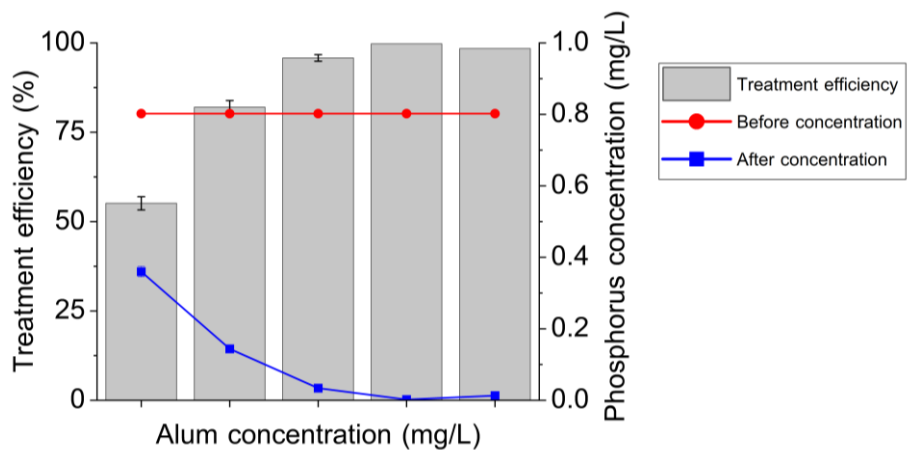


ตารางที่ 3 ปริมาณฟอสฟอรัสของน้ำหลังบำบัดด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต

Aluminum sulfate (mg/L)	Phosphorus concentration (mg/L)	Removal efficiency (%)	TSI (TP)	Classification
0	0.802 ± 0.000*	-	100.54	Hypereutrophic
20	0.360 ± 0.015*	55.12 ± 1.86	89.03	Hypereutrophic
40	0.144 ± 0.007*	82.02 ± 1.85	75.81	Hypereutrophic
60	0.034 ± 0.000*	95.80 ± 0.93	55.00	Eutrophic
80	0.002 ± 0.000*	99.74 ± 0.00	14.15	Origotrophic
100	0.013 ± 0.000*	98.42 ± 0.00	41.14	Mesotrophic

* คือ ผ่านมาตรฐานควบคุมระบายนํ้าทิ้งจากระบบนํ้าเสียรวมชุมชนที่ 2 mg/L [20]

TSI(TP) คือ Trophic State Index เทียบจาก Total phosphorus [18]



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัสด้วยสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต

ผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับหลายจากงานวิจัยข้างต้นที่พบว่าควรใช้ความเข้มข้นของอลูมิเนียมซัลเฟตที่มากขึ้นเมื่อการปนเปื้อนของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารที่มากเกินไปอาจทำให้ความเข้มข้นของอลูมิเนียมในน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องควบคุมปริมาณสารเคมีที่ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของแหล่งน้ำ รวมถึงพิจารณา

การปรับค่าความเป็นกรด-ด่างตามความเข้มข้นของสารเคมี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้สูงขึ้น [26]

ข้อจำกัดของการศึกษาในครั้งนี้ คือ การทดสอบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและคลอโรฟิลล์ เอ ในแหล่งน้ำทั้งก่อนและหลังการบำบัด ผู้วิจัยจึงคาดการณ์สถานการณ์ปนเปื้อนธาตุอาหารและคุณภาพทางโภชนาการของแหล่งน้ำจากค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด



4. บทสรุป

น้ำทิ้งจากพื้นที่วิจัยในครั้งนี้มีโอกาสเกิดยูโทรฟิเคชันเนื่องจากปริมาณคลอโรฟิลล์และธาตุอาหารฟอสฟอรัสที่สูงเกินค่าวิกฤต เมื่อทำการบำบัดน้ำทิ้งด้วยการตกตะกอนทางเคมีด้วยการเติมสารอลูมิเนียมซัลเฟตโดยเครื่องทดสอบจาร์เทสต์ พบว่า วิธีการบำบัดนี้สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียได้ โดยปริมาณสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตเข้มข้น 80 mg/L ทำให้น้ำทิ้งหลังการบำบัดมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสลดลงจาก 0.802 ± 0.000 mg/L เหลือ 0.002 ± 0.000 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสฟอรัส 99.74 ± 0.00 % และทำให้คุณภาพน้ำอยู่ในระดับ Oligotrophic มีสารอาหารของพีชน้อย ช่วยควบคุมการเพิ่มจำนวนหรือการเจริญเติบโตสาหร่ายในแหล่งน้ำได้ แหล่งน้ำที่ทำการศึกษานี้มีค่าปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงของค่าวิกฤตและมีโอกาสที่จะจัดเป็นแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนมีธาตุอาหารมากเกินไป จึงควรมีการวางแผนเพื่อบำบัดธาตุอาหารฟอสฟอรัส อาจพิจารณาเลือกใช้สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 80 – 100 mg/L เพื่อนำไปบำบัดน้ำเสียเนื่องจากมีแนวโน้มที่ทำให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำให้มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤตและมีคุณภาพน้ำด้านสารอาหารของพีชอยู่ในระดับปกติได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานบริหารกายภาพและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างน้ำ และขอขอบคุณวิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือทดสอบทางห้องปฏิบัติการ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.epa.gov/nps/agriculture>. (Accessed on 7 January 2023)
- [2] P.J. White and P.H. Brown, Plant nutrition for sustainable development and global health, *Annals of Botany*, 2010, 105, 1073-1080.
- [3] <https://www.epa.gov/agriculture/agriculture-nutrient-management-and-fertilizer#Biosolids>. (Accessed on 9 January 2023)
- [4] <https://www.epa.gov/nutrientpollution/effects-dead-zones-and-harmful-algal-blooms>. (Accessed on 9 January 2023)
- [5] M. Zamparas and I. Zacharias, Restoration of eutrophic freshwater by managing internal nutrient loads A review, *Science of the Total Environment*, 2014, 496, 551-562.
- [6] W. Katasaenee, A. Limsakul, A. Kammuang and W. Paengkaew, Test kit development for freshwater eutrophication monitoring, *Thai Environmental Engineering Journal*, 2014, 28(2-3), 41-51. (in Thai)
- [7] <https://www.oceanservice.noaa.gov/facts/eutrophication.html>. (Accessed on 9 January 2023)
- [8] M. Scheffer, S. Rinaldi, A. Gragnani, L.R. Mur and E.H. Nes, On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes, *Ecology*, 1997, 78, 272-282.



- [9] P. Noophan and R. Chaichana, Effects of nitrogen and phosphorus on eutrophication in water bodies and nitrogen and phosphorus removal, *Kasetsart Engineering Journal*, 2014, 27(88), 57-67. (in Thai)
- [10] R.W. Howarth, R. Marino, J. Lane and J.J. Cole, Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystems. 1. Rates and importance, *Limnology*, 1988, 27(88), 669-687.
- [11] N. Sananawin and J. Toritthi, Eutrophication. *Journal of Faculty of Physical Education*, 2012, 15, 154-159. (in Thai)
- [12] https://www4.fisheries.go.th/local/index.php/main/view_announce/9/8055. (Accessed on 23 March 2023)
- [13] <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/draft-ambient-wqc-recommendations-lakes-2020.pdf>. (Accessed on 23 March 2023)
- [14] N. Suna and K. Tungkananuruk, Removal of various phosphorus forms by treatment ponds of stabilization system, The 11th KU-KPS National Conference, Proceeding, 2014, 222-230. (in Thai)
- [15] A.Y.A. Mohamed, A. Siggins, M.G. Healy, D. ÓhUallacháin, O. Fenton and P. Tuohy, Appraisal and ranking of poly-aluminium chloride, ferric chloride and alum for the treatment of dairy soiled water, *Journal of Environmental Management*, 2020, 267, 110567.
- [16] J.-Q. Jiang and N.J.D. Graham, Pre-polymerised inorganic coagulants and phosphorus removal by coagulation - A review. *Water SA*, 1998, 24(3), 237-244.
- [17] APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd Ed., American Public Health Association, Washington DC, USA, 2017.
- [18] G. Gibson, R. Carlson, J. Simpson, E. Smeltzer, J. Gerritson, S. Chapra, S. Heiskary, J. Jones and R. Kennedy, *Nutrient criteria technical guidance manual lakes and reservoirs*, United States Environmental Protection Agency, DC, USA, 2000.
- [19] Department of Industrial Works Ministry of Industry, *Standards for testing analytical methods for water pollution*, 3rd Ed., Department of Industrial Works Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 2017. (in Thai)



- [20] http://cac.pcd.go.th/images/ptechResource/Knowledge/EnvironmentLaw/CommunityTreatmentSystem/3_79_water_std.pdf. (Accessed on 10 January 2023). (in Thai)
- [21] Florida Lake Watch, A beginner's guide to water management - nutrients, University of Florida, Florida, USA, 2000.
- [22] <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/criteria-nutrient-ecoregions-sumtable.pdf>. (Accessed on 9 January 2023)
- [23] E. Khonkhaysap, Nitrogen and phosphorus removal from aerated lagoon effluent by chemical precipitation, Thesis, Kasetsart University, Thailand, 1998. (in Thai)
- [24] R. Satetaboon, P. Tantriratna and R. Junggoth, Factors and efficiency of removal phosphorus from washing wastewater by coagulation using alum, *KKU Journal for Public Health Research*, 2020, 13(4), 23-30. (in Thai)
- [25] D. Arrisujaya, N. Ariesta and M. Maslahat, Removal of chromium (VI) from aqueous solutions using *Diospyros discolor* seed activated with nitric acid: Isotherm and kinetic studies, *Water Science and Technology*, 2019, 79(6), 1214–1221.