วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย ปีที่ 31 ฉบับที่ 1 : หน้า 59-68 (2560)
www.eeat.or.th

การประยุกต์ใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอส

Ballasting Agent for Immediate Solving of Sludge Bulking in Activated Sludge Process

Teeratat Kongthong and Chaiyaporn Puprasert*
ธีรทัต กงทอง และ ชัยพร ภู่ประเสริฐ*
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
*E-mail : chaiyaporn.p@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอส ด้วยวัสดุช่วยตกตะกอนที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน คือ ทัลก์ขนาด 8, 19, 41, 65 ไมโครเมตร ถ่านกัมมันต์ขนาด 103, 213, 365, 802 ไมโครเมตร และยางบดละเอียดขนาด 223, 408, 450, 644 ไมโครเมตร ด้วยปริมาณที่ต่างกัน คือ 20%, 50%, 80% และ 100% ของน้ำหนักวัสดุช่วยตกตะกอนต่อน้ำหนักจุลินทรีย์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีผลต่อความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนในขณะที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว ทั้งนี้การประเมินประสิทธิภาพการตกตะกอนใช้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity) และค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (Sludge Volume Index) จากผลการทดลองพบว่าการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดสามารถช่วยเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนให้สูงขึ้น และทำให้ค่าดัชนีปริมาตรตะกอนลดลง โดยวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กและปริมาณมากทำให้ความเร็วในการตกตะกอนเพิ่มสูงขึ้น โดยทัลก์ทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนมีค่าสูงที่สุด คือ 393% เมื่อเทียบกับความเร็วในการตกตะกอนของชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน สูงกว่าถ่านกัมมันต์ คือ 77% และยางบดละเอียด คือ 23% จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า วัสดุช่วยตกตะกอนและจุลินทรีย์สามารถเข้ากันได้ดี วัสดุช่วยตกตะกอนกระจายตัวเข้าทุกพื้นที่ของตะกอนจุลินทรีย์ เกิดการอัดตัวกันแน่นและตกตะกอนดีขึ้น ดังนั้นผลการวิจัยสรุปได้ว่าวัสดุช่วยตกตะกอนสามารถช่วยแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบสามารถผลิตน้ำใสให้กับระบบได้

คำสำคัญ : กระบวนการเอเอส; วัสดุช่วยตกตะกอน; ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว; การตกตะกอน; ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน

Abstract

This research studied the effects of ballasting agent for immediate solving of sludge bulking problem in activated sludge process. Three types of ballasting agent with 4 average sizes, talc (8, 19, 41, 65 μm) powder activated carbon (PAC) (133, 213, 365, 802 μm) and crumb rubber (223, 408, 450, 644 μm) were tested. Concentrations of ballasting agent were also varied, i.e. 0%, 20%, 50% and 100% of sludge concentration were also tested. The initial settling velocity (ISV) and sludge volume index (SVI) were used to demonstrate the sludge settling efficiency. The results showed that all three ballasting agents could immediately increase an initial settling velocity and showed a low SVI. Small size and high concentration of all of ballasting agent could improve settling efficiency, which indicated from higher the ISV, 393%, 77% and 23% for talc, PAC and crumb rubber respectively than the control without ballasting agent in every condition. So results showed that all of ballasting agent could solve the immediate problem of sludge bulking while the talc addition made the highest ISV.

Keywords : Activated sludge; Ballasting agent; Bulking sludge; Sedimentation; Initial settling velocity

บทนำ

นับตั้งแต่มีการค้นพบระบบเอเอสมาใช้ ระบบนี้ได้รับความนิยมตลอดเวลาและถูกใช้อย่างกว้างขวางมากกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆ เพราะเป็นระบบที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นในการบำบัดสูง แต่การควบคุมการทำงานของระบบเอเอสมักประสบปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว (Sludge Bulking) กล่าวคือ ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเกิดจากจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยเจริญเติบโต แทรกแซงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อก ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถรวมตัวเป็นกลุ่มฟล็อกได้แน่น ตะกอนจึงไม่สามารถแยกตัวออกจากน้ำใส และอัดแน่นที่ก้นถังตกตะกอนได้ ดังนั้นความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในท่อหมุนเวียนน้อยกว่าปกติ ปริมาณตะกอนจะเกิดสะสมในถังตกตะกอนและระดับของชั้นตะกอน (Sludge blanket) จึงสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งตะกอนหลุดออกนอกถังตกตะกอน ทำให้น้ำทิ้งขุ่นไม่ได้มาตรฐาน และระดับความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยาจะต่ำลง ไม่สามารถเก็บกักสลัดจ์ไว้ในระบบได้

จากเหตุดังกล่าวข้างต้น ในสภาวะปัจจุบันการแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเป็นสิ่งต้องกระทำโดยทันที โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า ที่จำเป็นต้องแก้ปัญหาควบคู่พร้อมกับการใช้ระบบเอเอสที่มีอยู่เดิม เพื่อให้ไม่ส่งผลกระทบต่อน้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่สาธารณะ นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมา [1-4] พบว่าการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน (Ballasting Agent) 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด ลงไปเลี้ยงพร้อมกับเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยา สามารถช่วยเพิ่มค่าความเร็วของการตกตะกอนของสลัดจ์ (Initial Settling Velocity, ISV) ในระบบเอเอสให้สูงขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเอเอสที่ไม่ได้เติมวัสดุช่วยตกตะกอน แต่ยังมิได้มีการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนดังกล่าว เติมลงไปในถังปฏิกิริยาทันทีทันใด เพื่อช่วยในการตกตะกอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดประยุกต์ใช้วัสดุช่วยตกตะกอนมาแก้ปัญหาเฉพาะหน้าให้กับสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอสที่มีอยู่เดิม โดยใช้วัสดุช่วยตกตะกอน เติมลงในถังปฏิกิริยาด้วยวิธีการทดลองแบบทีละเท (Batch) พร้อมทั้งพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้น

สำหรับแนวทางแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวปัจจุบัน ในเชิงปฏิบัติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทาง คือ (1) ในการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าหรือสภาวะเร่งด่วน สามารถกระทำได้โดยการเติมคลอรีน หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไป ซึ่งจะไปทำลายโครงสร้างของจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยไม่ให้เกาะกันเป็นลูกโซ่ โดยถือว่าเป็นแนวทางแก้ปัญหาได้โดยฉับพลัน และสามารถใช้กับระบบเอเอสที่มีอยู่เดิมได้ แต่มีข้อเสียคือ เป็นการทำลายจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อกลงไปด้วย ทำให้ต้องเสียเวลาเดินระบบใหม่อีกทั้งเมื่อหมดฤทธิ์ยาปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวก็ยังจะกลับมาคืนใหม่ได้อีก อีกแนวทางหนึ่งคือ (2) การแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว เป็นการแก้ปัญหาโดยการใช้ถังคัดพันธุ์

(Selector) [7] ถือว่าเป็นแนวทางแก้ปัญหาอย่างยั่งยืน เพราะจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยไม่สามารถเจริญเติบโตแข่งขันแบบชนิดสร้างฟล็อกได้ แต่ข้อเสียคือ หากในระบบเอเอสเดิมที่ใช้อยู่ในระบบไม่มีถังคัดพันธุ์ ผู้ควบคุมจะต้องทำการออกแบบระบบเอเอสเดิมที่มีอยู่ให้สามารถติดตั้งถังคัดพันธุ์ใหม่ เพื่อใช้แก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวโดยเฉพาะ ทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นในขณะนั้น ไม่สามารถถูกบำบัดออกไปได้

การควบคุมปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเฉพาะหน้า ที่ใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนในระบบเอเอสในขณะที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้เช่นเดียวกัน หากแนวทางนี้ดำเนินการได้จริง ก็สามารถทดแทนวิธีการเติมคลอรีนหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ อีกทั้งเป็นวิธีที่ไม่ทำลายจุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อก ไม่ต้องเสียเวลาเริ่มเดินระบบใหม่ และเป็นแนวทางเลือกใหม่เพื่อควบคุมปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวให้กับผู้ควบคุมระบบในอนาคต เป็นประโยชน์ในการพัฒนาวิธีควบคุมปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวอย่างเร่งด่วน ก่อนพิจารณาเลือกใช้การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนชนิดเลี้ยงไปพร้อมๆ กับเชื้อจุลินทรีย์ หรือการใช้ถังคัดพันธุ์เพื่อป้องกันปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวอย่างยั่งยืนต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้ในงานวิจัย

การทดลองนี้วัดการเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนด้วยความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน หรือ Initial Settling Velocity (ISV) วัสดุช่วยตะกอน (Ballasting agent) ที่ใช้ต้องเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ กับทั้งจุลินทรีย์และน้ำเสีย มีขนาดอนุภาคเล็กแต่มีน้ำหนักสามารถตกตะกอนได้ง่ายและสามารถที่จะเป็นเป้าสัมผัสให้จุลินทรีย์เกาะตัวได้ สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้สารดังต่อไปนี้

1. ทัลก์ (Talc) ชนิด Purified Talc B.P. บริษัท หล่อวัฒนา จำกัด ที่ขนาด 8, 19, 41 และ 65 µm
2. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด ที่ขนาด 133, 213, 365 และ 802 µm
3. ยางบดละเอียด (Crumb rubber) บริษัท คิวทูไทยแลนด์ ที่ขนาด 223, 408, 450 และ 644 µm

ค่าความหนาแน่นของทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด คือ 2.80, 2.20 และ 1.20 g/m^3 ตามลำดับ

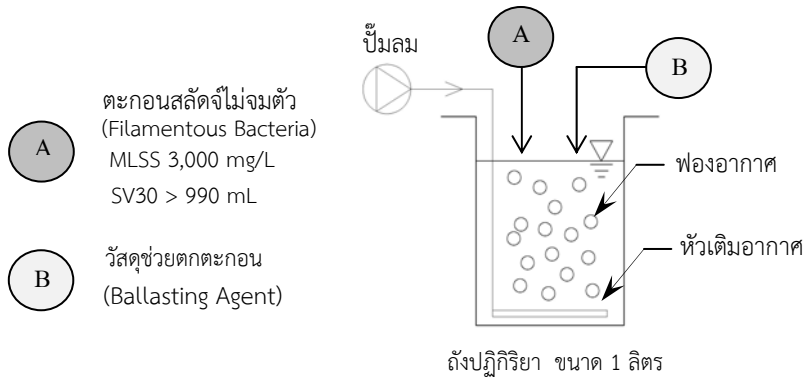
อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ขนาดวัสดุช่วยตกตะกอน

ใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer Hydro 2000 MU

วิธีการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch)

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวด้วยการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด ที่มีขนาดและปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจำลองระบบเอเอสให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว เลี้ยงให้ระบบเกิดจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยในถังปฏิกิริยาที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง จากนั้นนำน้ำเสียมาเจือจางให้มีค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (MLSS) ประมาณ 3,000 mg/L ใส่ลงในถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch) ขนาด 1 ลิตร เติมวัสดุช่วยตกตะกอนปริมาณที่ต่างกันดังนี้ คือ 0%, 20%, 50%, 80% และ 100% W/W แล้วกวนผสมให้ทั่วถึงกัน โดยการเติมอากาศเป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอนแล้ว วัดความสูงของสลัดจ์ที่ตกตะกอนที่เวลาต่างๆ เพื่อหาค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) ด้วยวิธี Settling Test [3, 4]

การนำน้ำเสียมาเจือจางดังกล่าว ในงานวิจัยได้พิจารณาจากระบบเอเอสแบบธรรมดา มีค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศสูงประมาณ 1,500-3,000 mg/L โดยใช้ค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่ 3,000 mg/L เพื่อให้สามารถมองเห็นตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอนได้ชัดเจน และวัดค่า ISV ได้ง่าย สำหรับน้ำเสียจากการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ (Synthetic Wastewater) ใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic Carbon) ใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนและมีธาตุอาหารต่างๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ สำหรับตะกอนจุลินทรีย์มาจากโรงบำบัดน้ำเสียดินแดง เป็นจุลินทรีย์ที่สมบูรณ์แข็งแรงและตกตะกอนได้ดี



รูปที่ 1 แสดงถังปฏิกิริยาแบบทีละเท (Batch) สำหรับแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว (Sludge Bulking)

ในขั้นตอนการทดลอง ได้ออกแบบโดยพิจารณาถึงความเป็นไปได้ให้สามารถใช้งานได้จริง และสามารถใช้ร่วมกับระบบเอเอสที่มีอยู่เดิมได้ โดยผลการวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลทางเลือกให้กับผู้ควบคุมระบบในการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว ก่อนหาสาเหตุอันก่อให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในขั้นตอนต่อมา สำหรับงานวิจัยนี้เน้นถึงการวัดค่า ISV เป็นสำคัญ อีกทั้งค่า ISV ที่วัดได้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบถังตกตะกอนของระบบเอเอสได้อีกด้วย

การวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. ชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอน วัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้ มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1-4] พบว่าการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนผสมลงไปเลี้ยงในระบบเอเอสพร้อมกับสลัดจ์ สามารถช่วยเพิ่มค่า ISV ในระบบให้สูงขึ้นได้จริง ในการนี้วัสดุช่วยตกตะกอนที่มีค่าความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity, ψ) ที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลต่อแรงเสียดทานการตกตะกอนของวัสดุช่วยตกตะกอนกับจุลินทรีย์ไม่เท่ากัน อีกทั้งทำให้ความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นมีเปลี่ยนแปลงไปตามลำดับ ดังแสดงในสมการ (1)

$$V = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho) g D_p}{3 C_D \rho}} \qquad (1)$$

$$C_D = \frac{a}{\mathrm{Re}} + \frac{b}{\sqrt{\mathrm{Re}}} + c \qquad (2)$$

จากสมการ (2) ค่า *a, b* และ *c* เป็นค่าคงที่มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity) [5] หากค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรงมีค่าน้อยลง (ความกลมน้อยลง) จะส่งผลทำให้ความเร็วในการตกตะกอนมีค่าน้อยลงไปด้วย เพราะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้น

2. ขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอน การเปลี่ยนความหนาแน่นและขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอนของสลัดจ์ให้สูงขึ้นได้ โดยความหนาแน่นที่มีค่าน้อยทำให้ค่าความเร็วในการตกตะกอนลดลงไปด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการของสโตค ดังแสดงในสมการ (3)

$$V = \frac{(\rho_s - \rho) D_p^2 g}{18 \mu} \qquad (3)$$

จากการทดลองน้ำเสียในถังปฏิกิริยา มีลักษณะการตกตะกอนเป็นแบบแบ่งชั้น (Hindered Settling) โดยตะกอนจะอยู่ติดกัน และเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราเดียวกัน ทำให้เห็นเป็นชั้นแยกกันระหว่างน้ำใสกับชั้นสลัดจ์ ดังนั้นอัตราเร็วของการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น เกิดขึ้นเมื่อน้ำมีความเข้มข้นสูง จึงเป็นการตกตะกอนแบบมีอุปสรรค มีอัตราเร็วช้ากว่าและแปรผันตามตามอัตราเร็วของการตกตะกอนแบบโดด การวิเคราะห์การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนร่วมกับสลัดจ์เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว จะเป็นสภาวะการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น อธิบายได้ดังแสดงในสมการ (1) และ (3)

3. ปริมาณของวัสดุช่วยตกตะกอน การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้ค่าของแข็งแขวนลอย (MLSS) ต่างกัน และส่งผลให้ค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI) ต่างกันอีกด้วย ทั้งนี้ค่า SVI เป็นดัชนีชี้วัดถึงอัตราการปรากฏของจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย อันเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอสที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ค่า SVI เป็นค่าที่แพร่หลายในการบอกถึงความสามารถในการจมตัวของระบบเอเอส โดยทั่วไปสลัดจ์ที่เป็นปกติควรมีค่า SVI น้อยกว่า 120 mL/g แต่ถ้าสลัดจ์มีค่า SVI มากกว่า 150 mL/g มีแนวโน้มจะเกิดปัญหาจมตัวไม่ลง [6,7] ดังแสดงในสมการ (4)

$$SVI = \frac{SV30 \times 1,000}{MLSS} \quad (4)$$

ในสลัดจ์ปกติ ความเร็วของการตกตะกอนย่อมมีผลต่อค่าความเข้มข้นของ MLSS เพราะยิ่งค่าความเข้มข้นของ MLSS สูงการตกตะกอนย่อมช้าตามไปด้วย การตกตะกอนมีลักษณะเป็นแบบแบ่งชั้นหรือแบบมีอุปสรรคเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคต่างๆ จับตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่จนเสมือนเป็นวัตถุก้อนเดียวที่ตกตะกอนด้วยอัตราเดียวกัน เมื่อมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นจะเห็นการแยกตัวระหว่างชั้นสลัดจ์และน้ำอย่างเด่นชัด การตกตะกอนเช่นนี้ เกิดขึ้นได้เฉพาะกับน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยเข้มข้นสูงมาก การวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นหรือแบบมีอุปสรรคอธิบายได้โดยทฤษฎีฟลักซ์ของแข็ง (Solid Flux Theory)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอส

ในช่วงแรกทำการทดลองเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียดินแดงในระบบเอเอส โดยควบคุมค่า MLSS ประมาณ 3,000 mg/L ค่าอายุสลัดจ์ (SRT) เท่ากับ 10 d อัตราป้อนน้ำเสีย 20 L/d ค่า COD 3,600 mg/L และค่าปริมาณอาหารต่อปริมาณจุลชีพ (F/M) เท่ากับ 0.3 d^{-1} เดินระบบแบบต่อเนื่องประมาณ 30 d พบว่าในช่วงแรกค่า SV30 มีค่าประมาณ 200 mL/L และค่า SVI มีค่าประมาณ 50-60 mL/g สลัดจ์มีความสามารถการจมตัวดี หลังจากนั้นได้ปรับปริมาณหัวเติมอากาศให้ลดลง เพื่อให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ในถังปฏิกิริยาลดลงตามไปด้วย มุ่งหวังให้จุลินทรีย์ประเภทเส้นใย (Filamentous) เจริญเติบโตเป็นกลุ่มหลักและมากกว่าการเจริญเติบโตจุลินทรีย์ประเภทสร้างฟล็อก ภายหลังจากทดลองเดินระบบอีกประมาณ 90 d พบว่าสลัดจ์เริ่มมีปัญหาในการจมตัวมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสามารถทำให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ตามแผนการทดลองเอาไว้ โดยสลัดจ์มีค่า SV30 มากกว่า 990 mL/L ค่า MLSS ประมาณ 4,000 mL/L ค่า COD ในถังปฏิกิริยาประมาณ 15-30 mg/L และเมื่อนำสลัดจ์ไปส่องกล้องจุลทรรศน์จะพบจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยเจริญเติบโตเป็นกลุ่มหลัก และติดสีแกรมลบ

ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเกิดจากจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยซึ่งยังมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้เหมือนหรือดีกว่าปกติ พบได้จากค่า COD ที่ต่ำ เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยมักเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ และการประสานตัวกันเองของเส้นใยจุลินทรีย์ช่วยทำให้ได้น้ำใสมากในระหว่างการตกตะกอน ดังนั้น การใช้วัสดุช่วยตกตะกอนในขณะที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว จะช่วยเพิ่มความเร็วการตกตะกอนได้ ส่งผลให้ถังตกตะกอนสามารถผลิตน้ำใสให้กับระบบได้ การได้น้ำใสที่มีคุณภาพดี ถือเป็นข้อดีอีกประการหนึ่ง สำหรับผู้ควบคุมพิจารณาเลือกใช้วัสดุช่วยตกตะกอนมาเพื่อแก้ปัญหา

ผลการศึกษาชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอนมีผลต่อค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน

จากการทดลองแบบทีละเท (Batch) เพื่อศึกษาวัสดุช่วยตกตะกอน คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ (PAC) และยางบดละเอียด ในปริมาณ 100% (W/W) เติมลงในตะกอนที่มีปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว โดยควบคุมค่าของแข็งแขวนลอย (MLSS) 3,000 mg/L ปริมาณสลัดจ์ที่ 30 นาที (SV30) ไม่น้อยกว่า 990 mL/L และค่าดัชนีปริมาณตะกอน (SVI) 330 mL/g

จากผลการทดลอง พบว่า วัสดุช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนได้ไม่เท่ากัน โดยทัลก์จะทำให้ค่าความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นสูงสุดที่ 0.0498 m/hr (193% เทียบกับชุดควบคุม) ถ่านกัมมันต์ 0.0278 m/hr (63%) และยางบดละเอียด 0.0199 m/hr (17%) เทียบกับค่าควบคุม 0.0170 m/hr ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าดัชนีปริมาตรตะกอน พบว่า วัสดุช่วยตกตะกอนสามารถแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ วัสดุช่วยตกตะกอนจะทำให้ค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI) ลดลงเมื่อเทียบกับค่าควบคุม โดยทัลก์ทำให้ค่าดัชนีปริมาตรตะกอนต่ำสุด ที่ 140 mL/g ถ่านกัมมันต์ 169 mL/g และยางบดละเอียด 216 mL/g เมื่อเทียบกับค่าควบคุมคือ 330 mL/g ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้เป็นเพราะความหนาแน่นของทัลก์สูงกว่าถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียดที่ 2.8, 2.2 และ 1.2 g/cm^3 ตามลำดับ

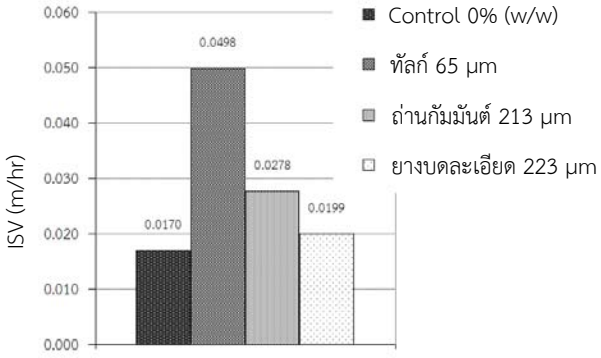
ผลการศึกษาปริมาณของวัสดุช่วยตกตะกอนมีผลต่อค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน

ศึกษาการการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนของระบบเอเอส ในขณะเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว โดยการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีปริมาณที่ต่างกัน ดังนี้ คือ 100%, 80%, 50% และ 20% W/W ด้วยการวัดค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity, ISV) ตามวิธีของการวิเคราะห์ Settling Test

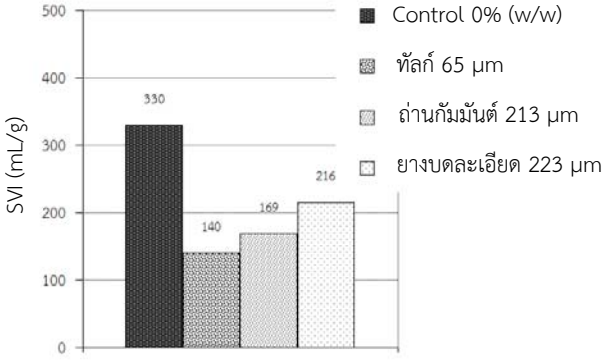
จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณของทัลก์ที่ปริมาณ 100% ทำให้ค่า ISV สูงกว่าที่ปริมาณ 80%, 50%, 20% และ 0% W/W ตามลำดับ จากรูปที่ 5 ทัลก์ที่ปริมาณสูงคือ 100% W/W (จากซ้ายมือ) ทำให้การตกตะกอนดีกว่าทัลก์ในที่ปริมาณน้อยกว่า คือ 80%, 50% และ 20% W/W เนื่องจากการเติมทัลก์ที่ปริมาณสูงส่งผลให้ระบบมีค่า MLSS สูงตามไปด้วย และทำให้ค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (Sludge Volume Index, SVI) ในระบบน้อยลงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ยังพบอีกว่าน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่ใสมาก

ผลการศึกษาขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนมีผลต่อค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน

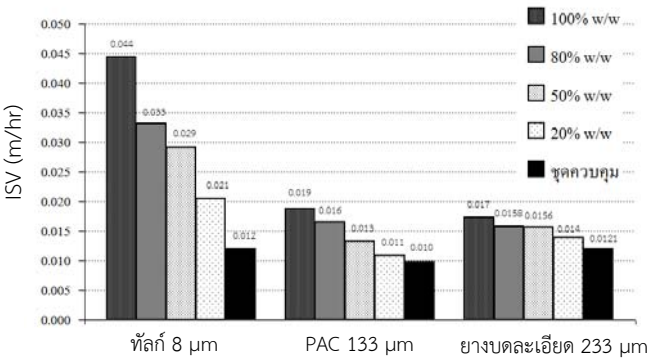
จากการศึกษาของวัสดุช่วยตกตะกอน คือ ทัลก์ขนาด 8, 19, 41 และ 65 µm ถ่านกัมมันต์ (PAC) ขนาด 133, 213, 365 และ 802 µm และยางบดละเอียด ขนาด 223, 408, 450 และ 644 µm ในปริมาณ 100% (W/W) เติมลงในตะกอนที่มีปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว โดยพิจารณาค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) และค่าดัชนีปริมาณตะกอน (SVI)



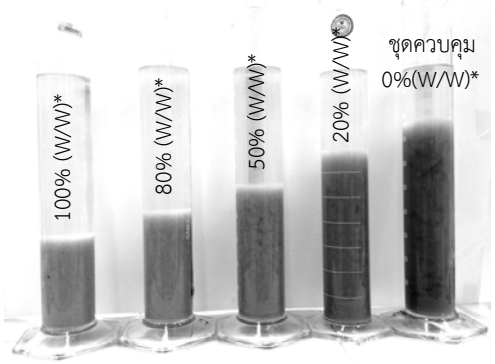
รูปที่ 2 เปรียบเทียบชนิดวัสดุช่วยตกตะกอนต่อความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV)



รูปที่ 3 เปรียบเทียบชนิดวัสดุช่วยตกตะกอนต่อค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI)



รูปที่ 4 กราฟแสดงปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนกับความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV)



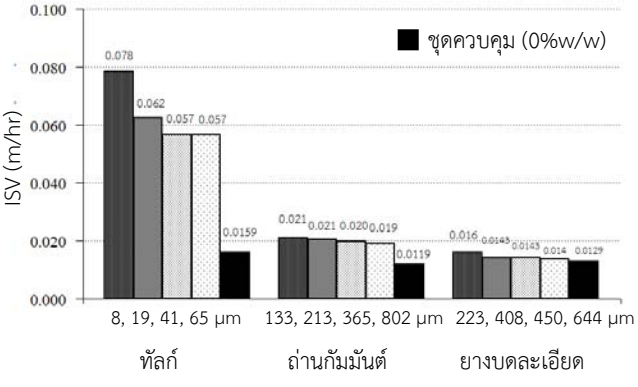
รูปที่ 5 แสดงลักษณะการตกตะกอนของสลัดจ์ด้วยปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนที่ต่างกัน

จากผลการทดลองเรื่องขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอน พบว่าวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กจะทำให้ความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอน (ISV) สูงกว่าขนาดใหญ่ในทุกชนิด โดยทัลก์ขนาด 8 μm จะทำให้ความเร็วเริ่มในการตกตะกอนสูงที่สุด 0.078 m/hr (เพิ่ม 393% เทียบกับชุดควบคุม) ส่วนยางบดละเอียดจะทำให้ความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอนต่ำสุด คือ 0.00140 m/hr (เพิ่ม 6%) เปรียบเทียบกับค่าควบคุมที่สลัดจ์เกิดปัญหาไม่จมตัว คือ 0.0159 m/hr และ 0.0129 m/hr ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI) พบว่าวัสดุช่วยตกตะกอนทุกชนิดสามารถทำให้ดัชนีปริมาตรตะกอนลดลง โดยทัลก์ขนาด 8 μm ทำให้ค่า SVI คือ 138 mL/g ลดลงมากกว่าขนาด 65 μm คือ 142 mL/g ทั้งนี้เป็นเพราะทัลก์ขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าที่ปริมาณเท่ากัน ทำให้สามารถเกาะยึดกับสลัดจ์ได้สูงกว่าทัลก์ที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งกล่าวได้ว่าการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนลงไปสามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้

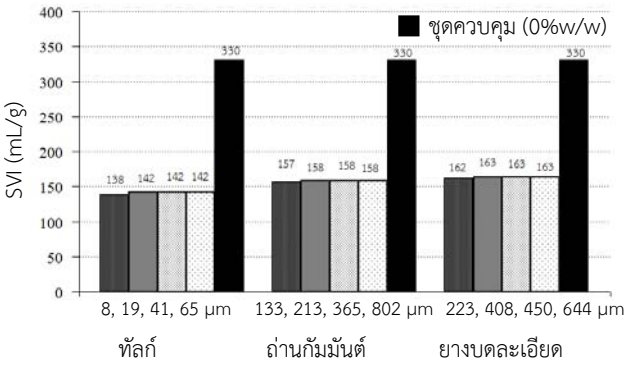
ผลการศึกษาการคำนวณเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดถังตกตะกอนด้วยอัตราน้ำล้นผิว (Surface loading rate)

ค่าที่ใช้ในการออกแบบ ถังตกตะกอนในระบบเอเอสทั่วไป ใช้ค่าอัตราน้ำล้นผิว โดยค่าดังกล่าวประมาณมาจากการตกตะกอนแบบโดด [7] ในทางปฏิบัติและในงานวิจัยนี้การตกตะกอนเป็นการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น จะทำการวิเคราะห์โดยวิธีการเปรียบเทียบระยะทางต่อเวลาโดยใช้กระบอกตวงหรือค่า ISV นั่นเอง [7] และถือว่าเป็นค่าโดยประมาณใกล้เคียงกับอัตราน้ำล้นผิว (Surface loading rate) จากงานวิจัยจะทำการพิจารณาจากวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กที่สุด คือ ทัลก์ขนาด 8 μm ถ่านกัมมันต์ชนิดผงขนาด 133 μm และยางบดละเอียดขนาด 223 μm ที่ปริมาณแตกต่างกัน

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า ค่า ISV (หรือค่าอัตราน้ำล้นผิว) จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตรงตามปริมาณของวัสดุตกตะกอนที่เติมลงไป ในทางทฤษฎีปัจจุบันกำหนดว่าการที่ระบบจะสามารถเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้เมื่อมีค่า SVI > 150 mL/g และค่า SV30 > 980 mL/L [7] ดังนั้นการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด สามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยดังกล่าว แต่การตกตะกอนของสลัดจ์ยังไม่ดีพอเทียบเท่าการตกตะกอนของสลัดจ์ในสภาวะปกติ เมื่อพิจารณาจากค่า SVI และค่า SV 30 เห็นได้ว่า การแสดงผลของการจมตัวของสลัดจ์ถึงแม้ว่าจะตกตะกอน (ค่า SVI และค่า SV30 ต่ำสุด 142 mL/g และ 850 mL/L ตามลำดับ) ได้ดีกว่าชุดควบคุม แต่ยังมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุดทางทฤษฎีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ค่า SVI > 150 mL/g และค่า SV30 > 980 mL/L) ดังนั้น การใช้วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด ยังไม่สามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวอย่างถาวรหรือในระยะยาวได้ เพราะว่าการตกตะกอนยังดีไม่พอเทียบเท่าการตกตะกอนของสลัดจ์ตะกอนในสภาวะปกติ [6] แต่ยังดีมากพอสำหรับการแก้ปัญหาอย่างเร่งด่วนหรือทันทีทันใดได้เท่านั้น สำหรับการแก้ไขปัญหาให้หายอย่างถาวรยังจำเป็นต้องใช้ถังคัดพันธุ์ (Selector) [7] หรือการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนก่อนเริ่มเดินระบบเอเอสเลี้ยงพร้อมกับเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกิริยาสามารถช่วยแก้ปัญหาให้หายขาดได้ [3, 4]



รูปที่ 6 กราฟแสดงขนาดวัสดุช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดที่ต่างกันกับความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV)



รูปที่ 7 กราฟแสดงขนาดวัสดุช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดที่ต่างกันกับค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI)

ตารางที่ 1 แสดงขนาดค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนกับอัตราน้ำล้นผิวของถังตกตะกอนที่ใช้ในปัจจุบัน [7]

ชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอน	ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน (เปอร์เซ็นต์)	ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน		ค่าอัตราน้ำล้นผิวที่ใช้ออกแบบ [7] (เมตร/วัน)	ปริมาณสลัดจ์ที่ 30 นาที (SV30) (มล./ล.)	ดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI) (มล./ก.)
		เมตร/วัน	ร้อยละที่เพิ่มเทียบกับชุดควบคุม			
ทัลก์	**ชุดควบคุม 0%**	**0.288**	**0%**	16-28	**990**	**330**
	20%	0.492	71%		940	261
	50%	0.699	142%		910	202
	80%	0.797	177%		900	167
	100%	1.066	270%		850	142
ถ่านกัมมันต์ชนิดผง	**ชุดควบคุม 0%**	**0.235**	**0%**		**1,000**	**333**
	20%	0.262	12%		990	275
	50%	0.319	36%		980	218
	80%	0.396	69%		950	176
	100%	0.449	91%		940	157
ยางบดละเอียด	**ชุดควบคุม 0%**	**0.290**	**0%**		**990**	**330**
	20%	0.331	14%		970	269
	50%	0.374	29%		960	213
	80%	0.379	31%		960	178
	100%	0.413	42%		950	158

การประยุกต์ใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว

การพิจารณาแนวทางการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว ได้ดังนี้

1. ปิดระบบน้ำเสียไหลเข้า (Influent) น้ำเสียไหลออก (Effluent) ลดการนำตะกอนไปทิ้งก่อน จะทำให้ความเข้มข้นของสลัดจ์สูงขึ้นจนกว่ากระบวนการจะทำงานได้ตามปกติ แต่ต้องระวังชั้นของสลัดจ์มิให้อยู่สูงเกินไป หากพบว่าชั้นของสลัดจ์สูงขึ้น ให้เพิ่มปริมาณการสูบตะกอนกลับเข้าถังเติมอากาศ

2. ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ หากพบจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย ควรต้องกำจัดสาเหตุต้นตอที่ทำให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเสียก่อน หรือปรับสภาพสิ่งแวดล้อมในถังเติมอากาศให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อก จนแข่งขันกับจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยได้ เช่น ปรับค่าพีเอช ให้มีค่าใกล้เคียงกับ 7 การควบคุมปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ให้มีค่ามากกว่า 2 mg/L เป็นต้น

3. หากยังไม่สามารถแก้ปัญหาได้ สามารถใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเป็นแนวทางเลือกเพื่อใช้แก้ปัญหาเฉพาะหน้าโดยการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนในตำแหน่งที่เกิดการผสมวัสดุช่วยตกตะกอนกับสลัดจ์ได้เร็วที่สุด เช่น ตำแหน่งในถังเติมอากาศ หรือตำแหน่งสูบสลัดจ์กลับเข้าถังเติมอากาศ (Return sludge)

4. ตรวจวัดค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) ในระบบเพื่อคำนวณหาปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนที่ต้องเติมลงไป ซึ่งแนะนำให้ใช้ทัลก์เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน

5. เมื่อเติมวัสดุช่วยตกตะกอนจนหมด รอจนวัสดุช่วยตกตะกอนเข้าไปผสมกับสลัดจ์ในถังเติมอากาศโดยต้องมากกว่าค่าระยะเวลากักเก็บน้ำ (Detention Time) เพื่อให้วัสดุช่วยตกตะกอนผสมกับสลัดจ์จนหมด

พร้อมกันนี้ให้เปิดใบกวนผสมหรือหัวเติมลมในถังเติมอากาศ เพื่อให้วัสดุช่วยตกตะกอนผสมกับสลัดจ์ (Mixing) ได้มากที่สุด

6. ในระหว่างการเดินระบบให้ทำการควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในเติมอากาศให้มีค่า 0.5-1.0 mg/L เพื่อป้องกันมิให้เกิดสภาวะดีไนตริฟิเคชั่น (Denitrification) ในกรณีใช้ยางบดละเอียดเป็นวัสดุช่วยตกตะกอน

ผลจากการใส่วัสดุช่วยตกตะกอนลงไป คาดว่าสลัดจ์ในถังตกตะกอนจะตกตะกอนได้เร็วขึ้น และทำให้น้ำส่วนบนใส จากนั้นจึงสามารถค่อยๆ ปรับปริมาณน้ำเสียไหลเข้า (Influent) และน้ำออก (Effluent) ให้เหมาะสมได้ พร้อมตรวจสอบความลึกของชั้นสลัดจ์และปรับให้ชั้นสลัดจ์อยู่สูงจากพื้นของถังในระยะปลอดภัยอยู่เป็นระยะๆ เพื่อป้องกันมิให้สลัดจ์หลุดออกนอกถังตกตะกอนเป็นอันขาด ในระหว่างการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวนั้น ผู้ควบคุมต้องพยายามเร่งรีบหาต้นตอสาเหตุอันก่อให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวให้พบเสียก่อน พร้อมแก้ไขต้นตอของสาเหตุโดยเร็ว หากการแก้ปัญหายังได้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ ผู้ควบคุมจำเป็นต้องพิจารณาหาแนวทางเลือกใหม่ อาทิเช่น การใช้ถังคัดพันธุ์ (Selector) มาเพื่อแก้ปัญหาต่อไป

แนวทางการนำวัสดุช่วยตกตะกอนออกจากระบบเอเอส สามารถทำได้โดย

1. ทิ้งผ่านตะกอนส่วนเกิน (Excess Sludge) ตามปกติ ขั้นตอนการกำจัดสลัดจ์หรือตะกอนจุลินทรีย์สามารถใช้ถังหมักแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนตามขั้นตอนปกติได้ เพราะวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด ไม่ก่อให้เกิดการเน่าเหม็นขึ้นภายหลัง สำหรับการใช้ทัลก์และถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนร่วมกับสลัดจ์ที่ย่อยแล้วสามารถนำไปใช้ถมที่หรือทำเป็นปุ๋ยสำหรับต้นไม้ได้ เพราะทัลก์และถ่านกัมมันต์ เป็นสารธรรมชาติ ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากยังมีน้ำปนอยู่มากจึงควรบีบน้ำออกจากสลัดจ์ก่อนด้วยวิธีต่างๆ อาทิเช่น ตากบนลานทราย กรอง เหวี่ยงน้ำออกด้วยเครื่อง เป็นต้น ในส่วนยางบดละเอียด อาจต้องใช้วิธีอื่น อาทิเช่น การฝังกลบ (Landfill) หรือการเผา เพราะยางบดละเอียดต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยตามธรรมชาติเป็นเวลานาน อาจเกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อมขึ้น

2. แยกวัสดุช่วยตกตะกอนกับสลัดจ์ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่มีแรงเฉือน (Shear Force) สูงๆ เช่น ไฮโดรไซโคลน แต่การใช้อุปกรณ์ดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ในส่วนวัสดุช่วยตกตะกอนที่แยกออกมาสามารถนำนำไปผ่านกระบวนการใช้ซ้ำ (Recycle) ได้อีกครั้ง

สรุป

จากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การใช้วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด สามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในกรณีเร่งด่วนได้จริง โดยทัลก์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด อีกทั้งยังทำให้เกิดน้ำใสขึ้นมากอีกด้วย นอกจากนี้การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กและมีปริมาณสูง จะส่งผลให้สลัดจ์ตกตะกอนได้ดีกว่าวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และปริมาณที่น้อยกว่า

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ยังคงเป็นเพียงการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น และถึงแม้ว่าแนวคิดในการนำวัสดุช่วยตกตะกอนมาใช้ในระบบเอเอสเพื่อสำหรับการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในกรณีเร่งด่วนจะให้ผลการศึกษาออกมาเป็นที่น่าพอใจ แต่ยังคงต้องมีการดำเนินการวิจัยต่อไปเพื่อปรับปรุงนำไปใช้กับน้ำเสียจริงและใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจริง ซึ่งอาจต้องมีการศึกษาในด้านการดูแลระบบ ลักษณะของการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนเข้าไปในระบบ รวมถึงการกำจัดวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใส่เข้าไปในระบบหรือแม้กระทั่งการนำเอาวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใส่เข้าไปในระบบกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งยังคงเป็นเรื่องที่ต้องทำการศึกษาวิจัยต่อเนื่องต่อไป

สารบัญสัญลักษณ์

V	คือ ความเร็วในการตกตะกอน (m/s)	Re	คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์
ρ_s, ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำและอนุภาค (kg/m^3)	% W/W	คือ ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนของน้ำหนักวัสดุช่วยตกตะกอนต่อน้ำหนักจุลินทรีย์ในระบบ (เปอร์เซ็นต์)
g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m^2/s)		
D_p	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)	ISV	คือ ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (m/hr)
C_D	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	SVI	คือ ดัชนีปริมาตรตะกอน (mL/g)
SV30	คือ ปริมาตรตะกอน 30 นาที (mL/L)	MLSS	คือ น้ำหนักของตะกอนจุลินทรีย์ (mg/L)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่ประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้แนวทางให้คำแนะนำวิธีการและแนวคิดอย่างดียิ่ง ตลอดจนการสนับสนุนปัจจัยในการดำเนินการ การวิเคราะห์ผล ติดตามการทำงาน รวมทั้งประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรม ดูแลสั่งสอนทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินชีวิตตลอดมา

ขอขอบคุณ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร และบริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด ที่เอื้อเฟื้อหัวเชื้อสลัดจ์จนกระทั้งงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณภวัต หล่อวัฒนา (บริษัท หล่อวัฒนา จำกัด) และคุณธนัญชัย กาญจนบัตร (บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด) ที่เอื้อเฟื้อ ทัลก์ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง สำหรับใช้ในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Bidault, A., F. Clauss, D. Helaine and B. C. 1997. Floc agglomeration and structuration by a specific talc mineral composition. Water Sci. Technol. 36: 57-68.

[2] Cantet, J., E. Paul and F. Clauss. 1996. Upgrading performance of an activated sludge through addition of talqueous powder. Water Sci. Technol. 34: 75-83.

[3] Sathitrat Rodarree. 2009. Effects of ballasting agent types and sizes on settling efficiency in activated sludge process. Master's Thesis, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. (in Thai)

[4] Akeluk Chaipun. 2008. Enhancement of sludge sedimentation efficiency in activated sludge process by ballasting agent, Master's Thesis, Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. (in Thai)

[5] Yow, H. N., M. J. Pitt and A. D. Salman 2005. Drag correlations for particles of regular shape. Advanced Powder Technology. 16(4): 363-372.

[6] ATV working report 2.6.1. 1989. Prevention and Control of Bulking Sludge and Scum. ATV technical committee 2.6.1 (Aerobic Biological Wastewater Treatment Processes). Germany.

[7] Metcalf and Eddy. 2014. Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery. Singapore, McGraw-Hill.