

วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR) เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Ballasting Agent for Immediate Solution for Sludge Bulking in

Activated Sludge Process

Lieutenant Teeratat Kongthong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จม ตัวในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์
โดย	เรือเอกธีรทัต กงทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชอาณาจักรกิจ)  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนบุรี)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ศรายุทธ ราชู)

ธีรทัต กงทอง : วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบแอกทีเวเต็ด สลัดจ์ (Ballasting Agent for Immediate Solution for Sludge Bulking in Activated Sludge Process) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ, 141 หน้า.

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 ด้วยปริมาณที่ต่างกันคือ 20%, 50%, 80% และ 100% ของน้ำหนักรวมวัสดุช่วยตกตะกอนต่อน้ำหนักจุลินทรีย์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีผลต่อความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนในขณะที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว ทั้งนี้การประเมินประสิทธิภาพการตกตะกอนใช้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity) และค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (Sludge Volume Index) จากผลการทดลองพบว่าการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดสามารถช่วยเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนให้สูงขึ้น และทำให้ค่าดัชนีปริมาตรตะกอนลดลง โดยวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กและปริมาณมากทำให้ความเร็วในการตกตะกอนเพิ่มสูงขึ้น โดยทัลก์ทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนมีค่าสูงสุด คือ 393% เมื่อเทียบกับความเร็วในการตกตะกอนของชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน สูงกว่าถ่านกัมมันต์ คือ 77% และยางบดละเอียด คือ 23% จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า วัสดุช่วยตกตะกอนและจุลินทรีย์สามารถเข้ากันได้ดี วัสดุช่วยตกตะกอนกระจายตัวเข้าทุกพื้นที่ของตะกอนจุลินทรีย์ เกิดการอัดตัวกันแน่นและตกตะกอนดีขึ้น ดังนั้นผลการวิจัยสรุปได้ว่าวัสดุช่วยตกตะกอนสามารถช่วยแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบสามารถผลิตน้ำใสให้กับระบบได้

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5670229921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ACTIVATED SLUDGE / BALLASTING AGENT / BULKING SLUDGE /  
SEDIMENTATION / INITIAL SETTLING VELOCITY

TEERATAT KONGTHONG: Ballasting Agent for Immediate Solution for Sludge Bulking in Activated Sludge Process. ADVISOR: ASST. PROF. CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., 141 pp.

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  $\mu\text{m}$ ) powder activated carbon (PAC) (103, 213, 365, 802  $\mu\text{m}$ ) and crumb rubber (223, 408, 450, 644  $\mu\text{m}$ ) 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% than the control without ballasting agent in every condition and than 77% and 23% for talc, PAC and crumb rubber respectively. The study of floc formation between ballasting agent and sludge by microscope showed that, the ballasting agent can attach on floc surface and filamentous bacteria. The ballasting agents were widely spread into the floc structure and increased the settling velocity. So results showed that all type of ballasting agents could solve the immediate problem of sludge bulking.

Department: Environmental  
Engineering

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Field of Study: Environmental  
Engineering

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวทาง ให้คำแนะนำวิธีการและแนวคิดอย่างดียิ่ง ตลอดจนการสนับสนุนปัจจัยในการดำเนินการ การวิเคราะห์ผล ติดตามการดำเนินงาน การตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการประสิทธิ์ประสาทวิชา อบรมดูแลสั่งสอนทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินชีวิตตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชกรกิจ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธุ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ และ ดร.ศรายุทธ ราชู ที่เสียสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ ทั้งให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร และ บริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด ที่เอื้อเฟื้อห้วเชื้อสล็อตซ์ จนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณภวัต หล่อวัฒนา (บริษัท หล่อวัฒนา จำกัด) และคุณธนัญชัย กาญจนบัตร (บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด) ที่เอื้อเฟื้อ ทอล์ก และถ่านกัมมันต์ชนิดผง สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ บุคลากรทุกท่านและครูปฏิบัติการณ์ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำในเรื่องต่างๆ รวมทั้งอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง นิสิตปริญญาโทและเอก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ช่วยส่งเสริมสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจไว้

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 คำสำคัญ (Key Word).....	1
1.3 บทนำ.....	1
1.4 วัตถุประสงค์ .....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส.....	5
2.1.1 บทนำ.....	5
2.1.2 กลไกการทำงาน .....	5
2.1.3 การเกิดกระบวนการเอเอส.....	6
2.1.4 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ .....	6
2.1.5 การแบ่งประเภทของจุลินทรีย์.....	8
2.1.6 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบ.....	10
2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ.....	11

2.1.8	หลักการออกแบบระบบเอเอส .....	13
2.1.9	การแบ่งประเภทของกระบวนการเอเอส .....	15
2.1.10	การควบคุมการทำงานระบบบำบัดแบบเอเอส.....	23
2.2	กระบวนการตกตะกอน.....	26
2.2.1	ทฤษฎีในการตกตะกอน .....	27
2.2.2	การหาอัตราเร็วของการตกตะกอนในระบบเอเอส .....	31
2.2.3	ทฤษฎีเกี่ยวกับขนาดในการตกตะกอน .....	34
2.2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตกตะกอนกับค่าสัมประสิทธิ์ความกลม.....	36
2.2.5	ประสิทธิภาพของการตกตะกอนในระบบเอเอส .....	39
2.2.6	หลักการออกแบบถังตกตะกอนในระบบเอเอส.....	39
2.3	ปัญหาการไม่จมตัวของสลัดจ์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส .....	46
2.3.1	สาเหตุของการเกิดสลัดจ์ไม่จมตัว .....	47
2.3.2	ชนิดของจุลินทรีย์เส้นใยที่พบอยู่ในระบบเอเอส .....	52
2.3.3	การวัดความสามารถในการจมตัวของสลัดจ์.....	61
2.3.4	การแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอสในปัจจุบัน.....	62
2.4	งานวิจัยที่ผ่านมา.....	63
2.4.1	ทัลก์ (Talc).....	63
2.4.2	ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon, PAC).....	65
2.4.3	ยางบดละเอียด (Crumb rubber) .....	66
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย .....	69
3.1	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	69
3.1.1	อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ .....	69
3.1.2	อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสีย.....	70



3.1.3 วัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้ในงานวิจัย .....	70
3.1.4 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ขนาดวัสดุช่วยตกตะกอน.....	72
3.2 แผนการทดลอง .....	72
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	74
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมน้ำเสีย .....	74
3.3.2 การทดลองที่ 1.....	75
3.3.3 การทดลองที่ 2.....	76
3.3.4 การทดลองที่ 3.....	77
3.4 สรุปตัวแปรที่จะศึกษาในงานวิจัย.....	78
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	79
4.1 ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอส .....	79
4.2 ผลการศึกษาการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว .....	81
4.2.1 ผลของชนิดวัสดุช่วยตกตะกอน .....	81
4.2.2 ผลของขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอน.....	84
4.2.3 ผลของปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน .....	89
4.3 ผลการศึกษาการคำนวณเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดถังตกตะกอนด้วยอัตราน้ำล้นผิว.....	97
4.4 ผลการศึกษาลักษณะการเกาะตัวระหว่างวัสดุช่วยตกตะกอนกับฟล็อกของจุลชีพ.....	100
4.5 การประยุกต์ใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว.....	109
บทที่ 5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	116
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	116
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	117
รายการอ้างอิง .....	118
ภาคผนวก.....	122

ภาคผนวก ก การคำนวณค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนจากการทดลอง .....	123
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการหาค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) .....	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	141



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าคงที่ $a, b$ และ $c$ ที่แปรเปลี่ยนตามค่าสัมประสิทธิ์ ความกลมของรูปทรง (Sphericity) .....	37
ตารางที่ 2.2 อัตราน้ำล้นผิว, ภาวะบรรทุกของแข็ง และความลึกสำหรับใช้ในการออกแบบ ถังตกตะกอนชั้นที่สอง.....	45
ตารางที่ 2.3 ค่ามาตรฐานที่ใช้ในการเลือกขนาดถังตกตะกอนชั้นที่สอง .....	45
ตารางที่ 2.4 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยที่ก่อให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว และสาเหตุของการเกิด ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว.....	52
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	69
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง .....	78
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนในแต่ละขนาดวัสดุช่วยตกตะกอนที่ ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w .....	85
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนต่างกัน เทียบกับชุดควบคุม (0% w/w) .....	90
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนต่างกัน เทียบกับชุดควบคุม (0% w/w) .....	98
ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายวัสดุช่วยตกตะกอนเทียบกับปริมาณต่างๆ ของวัสดุช่วยตกตะกอน .....	110
ตารางที่ 4.5 ค่าความเร็วการตกตะกอนแบบโตนเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการ ตกตะกอน.....	112
ตารางที่ 4.6 ข้อเสนอแนะเบื้องต้นให้กับผู้ควบคุมเลือกใช้วัสดุช่วยตกตะกอนชนิดอื่นๆ โดย พิจารณาจากค่าความเร็วการตกตะกอนแบบโตน .....	113

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เทียบกับเวลา .....	7
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของระบบเอเอส .....	10
รูปที่ 2.3 ชนิดของระบบเอเอสแบบกวนสมบูรณ์ .....	18
รูปที่ 2.4 ชนิดของระบบเอเอสแบบลดการเติมอากาศตามความยาวของถัง .....	19
รูปที่ 2.5 ชนิดของระบบเอเอสแบบคลองวนเวียน .....	20
รูปที่ 2.6 ชนิดของระบบเอเอสแบบสัมผัสและย่อยสลาย .....	21
รูปที่ 2.7 ชนิดของระบบเอเอสแบบเติมน้ำเสียเป็นชั้น .....	21
รูปที่ 2.8 ชนิดของระบบเอเอสแบบการเติมเข้า-ถ่ายออก .....	22
รูปที่ 2.9 การวิเคราะห์ถังตกตะกอนแบบอุดมคติ .....	27
รูปที่ 2.10 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม .....	28
รูปที่ 2.11 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น .....	29
รูปที่ 2.12 วิถีการกราฟของการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น .....	30
รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของตะกอนสลัดจ์ในถังตกตะกอน .....	31
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสลัดจ์และความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอน ของชั้นสลัดจ์ .....	32
รูปที่ 2.15 โคลิฟลักซ์ $G_b$ และ $G_g$ ของถังตกตะกอนที่ระดับความเข้มข้นของตะกอน แขวนลอย .....	33
รูปที่ 2.16 เส้นโค้ง Total flux และการหาค่า $G_L$ แบบธรรมดา .....	34
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ที่ค่า สัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง ( $\psi$ ) ต่างๆ .....	38
รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ของตะกอนสลัดจ์ในถังตกตะกอน .....	40
รูปที่ 2.19 การหา Settling Flux .....	41

รูปที่ 2.20 การหาค่า $G_L$ โดยวิธี Solid Flux.....	43
รูปที่ 2.21 การหาค่า $G_L$ โดยวิธีของโยชิโอะกะ.....	44
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำกับค่า F/M ที่มีผลต่อการเกิด สลัดจ์ไม่จมตัว .....	49
รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตโดยทั่วไปของจุลินทรีย์แบบเส้นใย และจุลินทรีย์แบบไม่ใช้เส้นใยกับความเข้มข้นของสารอาหาร .....	51
รูปที่ 2.24 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 1 .....	54
รูปที่ 2.25 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 2 .....	55
รูปที่ 2.26 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 3 .....	56
รูปที่ 2.27 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 4 .....	57
รูปที่ 2.28 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 5 .....	58
รูปที่ 2.29 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 6 .....	59
รูปที่ 2.30 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 7 .....	60
รูปที่ 3.1 ถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (Batch) สำหรับแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว .....	72
รูปที่ 4.1 ฟล็อกจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยที่เกิดขึ้นในงานวิจัยถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ .....	80
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการตกตะกอนของสลัดจ์ด้วยวัสดุช่วยตกตะกอนด้วยปริมาณ วัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w .....	81
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอนกับค่าความเร็วเริ่มต้นของ การตกตะกอน (ISV) .....	82
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอนกับค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI).....	83
รูปที่ 4.5 การตกตะกอนของสลัดจ์ด้วยทอล์กขนาดแตกต่างกัน 4 ขนาด เทียบกับชุดควบคุม ด้วยปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w .....	84
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบชนิดวัสดุช่วยตกตะกอนในแต่ละขนาดเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้น ของการตกตะกอน (ISV) ที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w .....	86
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบชนิดวัสดุช่วยตกตะกอนในแต่ละขนาดเทียบกับค่าดัชนีปริมาตร ตะกอนที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w .....	87

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนกับค่าความเร็วเริ่มต้นของ การตกตะกอนที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w .....	88
รูปที่ 4.9 การตกตะกอนของสลัดจ์ด้วยทัลก์ปริมาณแตกต่างกัน 4 ขนาด เทียบกับชุดควบคุม . 89	
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบปริมาณทัลก์ที่ต่างกันเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน ในทุกขนาดของทัลก์.....	91
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต่างกันเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้นของ การตกตะกอน ในทุกขนาดของถ่านกัมมันต์.....	92
รูปที่ 4.12 การตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ ขนาด 802 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน.....	93
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบปริมาณยางบดละเอียดที่ต่างกันเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้นของ การตกตะกอน ในทุกขนาดของยางบดละเอียด.....	94
รูปที่ 4.14 ปัญหาการตกตะกอนของยางบดละเอียดที่เกิดในสภาวะดีไนทริฟิเคชั่น.....	95
รูปที่ 4.15 การลอยตัวของยางบดละเอียดกับตะกอนสลัดจ์ที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเปรียบเทียบ กับชุดควบคุม .....	96
รูปที่ 4.16 การลอยตัวของสลัดจ์กับยางบดละเอียดที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเปรียบเทียบ กับทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และชุดควบคุม .....	96
รูปที่ 4.17 ลักษณะน้ำใสที่เกิดขึ้น.....	100
รูปที่ 4.18 ขยายฟล็อกจูลซีฟกับวัสดุช่วยตกตะกอนทัลก์ขนาด 8 ไมโครเมตร.....	101
รูปที่ 4.19 ขยายฟล็อกจูลซีฟกับวัสดุช่วยตกตะกอนทัลก์ขนาด 19 ไมโครเมตร .....	102
รูปที่ 4.20 ขยายฟล็อกจูลซีฟกับวัสดุช่วยตกตะกอนทัลก์ขนาด 41 ไมโครเมตร .....	103
รูปที่ 4.21 ขยายฟล็อกจูลซีฟกับวัสดุช่วยตกตะกอนทัลก์ขนาด 65 ไมโครเมตร .....	104
รูปที่ 4.22 ขยายฟล็อกจูลซีฟที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว (ชุดควบคุม) .....	105
รูปที่ 4.23 ขยายฟล็อกจูลซีฟของทัลก์ที่เลี้ยงพร้อมกับเดินระบบเอเอส .....	107
รูปที่ 4.24 ขยายฟล็อกจูลซีฟของทัลก์ที่เลี้ยงพร้อมกับเดินระบบเอเอส (ต่อ).....	108

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ชื่อวิทยานิพนธ์

ภาษาไทย : วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบ  
แอกทิเวเต็ดสลัดจ์

ภาษาอังกฤษ : Ballasting Agent for Immediate Solution for Sludge Bulking  
in Activated Sludge Process

### 1.2 คำสำคัญ (Key Word)

กระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge)

วัสดุช่วยตกตะกอน (Ballasting Agent)

ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว (Bulking Sludge)

การตกตะกอน (Sedimentation)

ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity)

### 1.3 บทนำ

นับตั้งแต่มีการค้นพบระบบเอเอสหรือระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์มาใช้ ระบบนี้ได้รับความนิยมตลอดเวลาและถูกใช้อย่างกว้างขวางมากกว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆ เพราะเป็นระบบที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นในการบำบัดสูง (ยงยุทธ วงศ์ประภาธิวัฒน์, 2539) แต่การควบคุมการทำงานของระบบเอเอสมักประสบปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว (Sludge Bulking) กล่าวคือ ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเกิดจากจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยเจริญเติบโต แทรกแซงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อก ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถรวมตัวเป็นกลุ่มฟล็อกได้แน่น

ตะกอนจึงไม่สามารถแยกตัวออกจากน้ำใสและอัดแน่นที่ก้นถังตกตะกอนได้ ดังนั้นความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในท่อหมุนเวียนน้อยกว่าปกติ ปริมาณตะกอนจะเกิดสะสมในถังตกตะกอนและระดับของชั้นตะกอน (Sludge blanket) จึงสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งตะกอนหลุดออกนอกถังตกตะกอน ทำให้น้ำที่ขุ่นไม่ได้ตามมาตรฐาน และระดับความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาจะต่ำลง ไม่สามารถเก็บกักสลัดจ์ไว้ในระบบได้

ด้วยเหตุนี้ จึงมีการวิจัยถึงสาเหตุและวิธีการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวมาโดยตลอด จนกระทั่งปัจจุบัน ได้มีการป้องกันปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้โดยใช้ถังคัดเลือก (Selector) (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542) ซึ่งหมายถึง ถังที่สามารถสร้างสภาพให้จุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อกเจริญเติบโตได้ดีภายใต้สภาวะที่มีระดับอาหารสูง (ความเข้มข้นบีโอดีมีค่าสูง) และสามารถป้องกันปัญหาอย่างถาวรได้เป็นอย่างดี (Jenkins และคณะ, 1993) แต่ถึงอย่างไร หากระบบเอเอสที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวขึ้นแล้ว แนวทางแก้ไขโดยใช้ถังคัดเลือกนั้น จำเป็นต้องออกแบบถังคัดเลือกเพื่อใช้ร่วมกับระบบเอเอสที่มีอยู่เดิม เพื่อจัดการกับปัญหา อีกทั้งต้องเสียเวลาปรับปรุงระบบ และใช้เวลาเริ่มต้นเดินระบบนาน ดังนั้นแนวทางนี้ไม่สามารถจัดการปัญหาอย่างเร่งด่วนให้กับระบบเอเอสที่มีอยู่เดิมได้

แนวทางการแก้ไขอีกวิธีหนึ่งคือ การใช้คลอรีน ( $Cl_2$ ) หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) เติมลงในระบบเอเอสที่มีอยู่เดิม (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538) ซึ่งถือว่าเป็นวิธีแก้ปัญหาชั่วคราว และสามารถใช้กับระบบเอเอสที่มีอยู่เดิมได้ แต่ข้อเสียคือ ถ้าใช้สารดังกล่าวนานเกินไป อาจส่งผลให้จุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อกถูกทำลายลงไปด้วย เกิดน้ำขุ่นมาก และส่งผลให้การบำบัดน้ำเสียไม่ได้ผล (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

จากเหตุดังกล่าวข้างต้น ในสภาวะปัจจุบันการแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเป็นสิ่งต้องกระทำโดยทันที โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการแก้ไขเฉพาะหน้า ที่จำเป็นต้องแก้ไขหาคำควบคู่พร้อมกับการใช้ระบบเอเอสที่มีอยู่เดิม เพื่อให้ไม่ส่งผลกระทบต่อหน้าที่ที่ปล่อยลงสู่สาธารณะ นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Bidault และคณะ (1997) เอกลักษณ์ ไชยพันธ์ (2551) และสถิตรัตน์ รอดอารี (2552) พบว่าการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน (Ballasting Agent) 3 ชนิดคือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียดลงไปเลี้ยงพร้อมๆกับเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยา สามารถช่วยเพิ่มค่าความเร็วของการตกตะกอนของสลัดจ์ (Initial Settling Velocity, ISV) ในระบบเอเอสให้สูงขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเอเอสที่ไม่ได้เติมวัสดุช่วยตกตะกอน แต่ยังมีได้มีการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนดังกล่าว เติมลงไปจนถึงปฏิกริยาทันทีทันใด เพื่อช่วยในการตกตะกอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดประยุกต์ใช้วัสดุช่วยตกตะกอนมาแก้ปัญหาเฉพาะหน้าให้กับสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอสที่มีอยู่เดิม โดยใช้วัสดุช่วย



ตกตะกอน เติมนลงในถังปฏิกิริยาด้วยวิธีการทดลองแบบทีละเท (Batch) พร้อมทั้งพิจารณา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป

การควบคุมปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเฉพาะหน้า ที่จะใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนในระบบเอเอสในขณะที่เกิดปัญหาสลัดจ์ ไม่จมตัวได้เช่นเดียวกัน หากแนวทางนี้ดำเนินการได้จริง ก็สามารถทดแทนวิธีการเติมคลอรีนหรือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ไม่ทำลายจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อก ไม่ต้องเสียเวลาเริ่ม เติกระบบใหม่ เป็นแนวทางเลือกใหม่เพื่อควบคุมปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวให้กับผู้ควบคุมระบบในอนาคต และน่าจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาวิธีการควบคุมปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวอย่างเร่งด่วน ก่อนพิจารณา เลือกใช้การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนชนิดเลี้ยงไปพร้อมกับเชื้อจุลินทรีย์ หรือการใช้ถังคั้ดพันธุ์เพื่อ ป้องกันปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวอย่างยั่งยืนต่อไป

#### 1.4 วัตถุประสงค์

1.4.1 เพื่อศึกษาการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าในการจัดการปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบ เอเอส โดยใช้ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางรถยนต์เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน

1.4.2 เพื่อศึกษาลักษณะการตกตะกอนของวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด ที่มีขนาด และ ความเข้มข้นที่แตกต่างกันกับจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย สำหรับจัดการปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว

#### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1.5.1 ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบทีละเท (Batch) เพื่อศึกษาการตกตะกอนของวัสดุ ช่วยตกตะกอน กับจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยที่เกิดขึ้นในระบบเอเอสจำลอง

1.5.2 น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ (Synthetic Waste) ใช้น้ำตาลทรายเป็น แหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic Carbon Source) โดยเลี้ยงเชื้อให้เกิดจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย เพื่อ จำลองปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอสแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge) ซึ่ง ควบคุมระบบให้มีค่าเอสวี 30 ไม่น้อยกว่า 990 มิลลิลิตรต่อลิตร และค่าเอ็มแอลเอสเอส 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้การเลี้ยงเชื้อจะดำเนินการในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5.3 วัสดุช่วยตกตะกอนที่นำมาใช้ในงานวิจัยมี 3 ชนิด และขนาดแตกต่างกัน 4 ขนาด ซึ่งมีจำหน่ายตามท้องตลาด ประกอบด้วย

- ทัลก์ (Talc) บริษัท หล่อวัฒนา จำกัด, บริษัท วิทยากรรม จำกัด และบริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด ขนาดเฉลี่ย 8 19 41 และ 65 ไมโครเมตร

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Power Activated Carbon) บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด ขนาดเฉลี่ย 133 213 365 และ 802 ไมโครเมตร

- ยางบดละเอียด (Crumb rubber) บริษัท คิวทูไทยแลนด์ จำกัด ขนาดเฉลี่ย 223 408 450 และ 644 ไมโครเมตร

1.5.4 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนของระบบเอเอส ในขณะที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว โดยการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนที่มี ชนิด ขนาด และปริมาณที่ต่างกัน ด้วยการวัดค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity, ISV) ตามวิธีของการวิเคราะห์ Settling Test

1.5.5 ศึกษาการเกาะตัวระหว่างฟล็อกชีวภาพกับวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด ที่มีขนาด และปริมาณต่างกัน โดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวด้วยการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนกับระบบเอเอสที่มีอยู่เดิม เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ให้ผู้ควบคุมระบบเอเอส สำหรับการแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวอย่างเร่งด่วน

1.6.2 ความเร็วในการตกตะกอนของวัสดุช่วยตกตะกอนกับฟล็อกชีวภาพชนิดเส้นใย ในขณะที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว โดยจะมีชนิด ขนาด และปริมาณของวัสดุช่วยตกตะกอนที่ต่างกัน ให้กับผู้ควบคุมระบบเอเอสเพื่อใช้แก้ปัญหาเฉพาะหน้าในระบบเอเอสที่มีอยู่เดิม

1.6.3 ลักษณะการจับตัวระหว่างฟล็อกชีวภาพชนิดเส้นใยกับวัสดุช่วยตกตะกอนที่มี ชนิด ขนาด และปริมาณแตกต่างกัน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

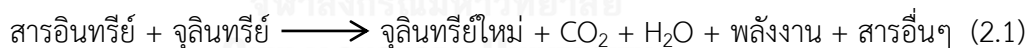
#### 2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส

##### 2.1.1 บทนำ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส (Activated Sludge Process) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีชีวภาพ ที่อาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย มีองค์ประกอบหลัก คือ ถังเติมอากาศและถังตกตะกอน จุลินทรีย์ในถังเติมอากาศจะอาศัยสารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหาร และออกซิเจนจากการเติมอากาศในถังเติมอากาศ เพื่อการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณกลายเป็นสลัดจ์ จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกน้ำใสให้ไหลล้นออกมาไปสู่ระบบบำบัดขั้นสุดท้ายและตะกอนบางส่วนก็จะถูกสูบย้อนกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศเพื่อควบคุมตะกอนจุลินทรีย์ แล้วถูกส่งเข้าสู่ถังตกตะกอนอีกครั้ง (สตีเฟิร์ตน์ รอดอารี, 2552)

##### 2.1.2 กลไกการทำงาน

ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส น้ำเสียจะประกอบไปด้วยจุลินทรีย์หลากหลายชนิด จุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียจัดเป็นส่วนสำคัญในปฏิกิริยาของการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการนี้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเขียนได้เป็น



สมการดังกล่าวสรุปได้ว่า จุลินทรีย์จะนำสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมาใช้เป็นอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ ในทางปฏิกิริยาจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานและน้ำ โดยส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะลอยขึ้นไปในอากาศ ส่วนของพลังงานจะถูกใช้ไปในการดำเนินชีวิตของจุลินทรีย์ และในส่วนของน้ำจะกลายเป็นน้ำใสแล้วผสมออกไปกับน้ำที่ผ่านการบำบัด จากนั้นจึงจะถูกปล่อยออกไปจากระบบได้ ในแง่ของมวลที่ได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็คือสารอินทรีย์จะถูกให้กลายเป็นมวลจุลินทรีย์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งจุลินทรีย์นั้นจะรวมกันเป็นก้อนเรียกว่าฟล็อกและมีน้ำหนักมากกว่าน้ำ ดังนั้นจึงสามารถแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำได้ง่ายด้วยวิธีการตกตะกอนภายในถังตกตะกอนต่อไป

### 2.1.3 การเกิดกระบวนการเอเอส

กลไกของกระบวนการเอเอส (Activated Sludge) เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน 3 ขั้นตอนในถังปฏิกรณ์ ดังนี้

- (1) ขั้นส่งถ่าย (Transfer Step)
- (2) ขั้นเปลี่ยนรูป (Conversion Step)
- (3) ขั้นรวมตะกอน (Flocculation Step)

ในขั้นตอนแรก (ขั้นส่งถ่าย) สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ดูดมาติดที่ผนังเซลล์และส่งน้ำย่อยออกมาย่อยสลายจนสารอินทรีย์เปลี่ยนไปเป็นรูปของโมเลกุลให้มีขนาดเล็กพอ ที่จะซึมผ่านเข้าไปยังในเซลล์ของจุลินทรีย์เพื่อใช้เป็นสารอาหารได้ ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 15 ถึง 20 นาที น้ำย่อยหรือเอนไซม์ (Enzymes) นี้ จุลินทรีย์จะผลิตขึ้นมาไว้ภายในเซลล์และในน้ำที่อยู่รอบตัวของมัน โดยสารอินทรีย์แต่ละชนิดต้องใช้เอนไซม์เฉพาะอย่างในการย่อย ดังนั้นต้องใช้เวลา แก่จุลินทรีย์ในการปรับตัว (Acclimatize) ที่เหมาะสมเพื่อที่ผลิตเอนไซม์ออกมาให้เหมาะสมกับน้ำเสียชนิดต่างๆ โดยเฉพาะในช่วงเริ่มการทำงาน (Start-Up) ของระบบบำบัดน้ำเสีย

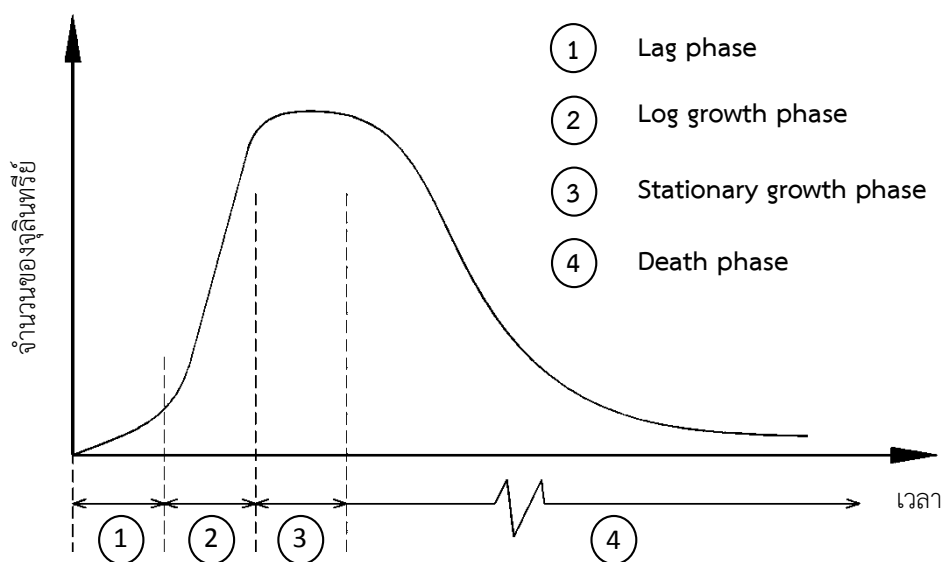
ในขั้นตอนที่สอง (ขั้นเปลี่ยนรูป) เมื่อสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายให้มีโมเลกุลขนาดเล็กและสามารถละลายน้ำผ่านเข้าไปในเซลล์ได้แล้วจะถูกจุลินทรีย์ทำการเปลี่ยนรูปโดยกระบวนการสังเคราะห์ (Synthesis) ซึ่งหมายถึงการสร้างเซลล์ใหม่ และกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่มีการเติมออกซิเจนแล้วได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ทั้งสองกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการชีวเคมีที่เกิดขึ้นในจุลินทรีย์ (Metabolic Process)

ในขั้นตอนที่สาม (ขั้นรวมตะกอน) เป็นการรวมตัวของสลัดจ์ โดยจุลินทรีย์จะถูกกวนผสมกันอยู่ในถังเติมอากาศ เมื่อชนกันก็จะจับรวมตัวเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้นเรียกว่า ฟล็อกหรือสลัดจ์ซึ่งตกตะกอนได้ดีและสามารถแยกออกจากน้ำที่บำบัดได้แล้วได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อฟล็อกไปสัมผัสกับมลสารในน้ำเสียจะจับมลสารเหล่านี้ไว้ภายใน แล้วทำการย่อยสลายเป็นอาหารต่อไป

### 2.1.4 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การเจริญเติบโต (Growth) ในทางจุลชีววิทยาหมายถึงการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ซึ่งมีความหมายตรงกับการสืบพันธุ์ของจุลินทรีย์มากกว่าที่จะหมายถึงการเพิ่มขนาดหรือมวลของแต่ละเซลล์ ทั้งนี้เพราะเป็นการยากที่จะวิเคราะห์มวลแต่ละเซลล์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากขนาดเล็กมากของจุลินทรีย์นั่นเอง (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

จากการนำจุลินทรีย์มาเลี้ยงในอาหารเหลวในที่จำกัด (Batch Culture) และนับจำนวนจุลินทรีย์ที่มีอยู่เป็นระยะตามเวลาที่ผ่านไป แล้วนำจำนวนของจุลินทรีย์มาเขียนกราฟในกราฟ Log จะได้เส้นโค้งที่เรียกว่า Population Growth Curve จะใช้สำหรับแบ่งช่วงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ระยะ (Phase) ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เทียบกับเวลา  
(Qasim Syed R., 1999)

### ช่วงที่ 1 Lag Phase

เป็นช่วงที่มีอัตราการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ต่ำ เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องใช้เวลาปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อม และเริ่มสร้างเอนไซม์ที่จำเป็นในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียช่วงเวลา Lag phase จะสั้นยาวแตกต่างกันไปตามชนิดของจุลินทรีย์ อาหาร และสภาพแวดล้อม ตลอดจนระยะเวลาการเจริญของจุลินทรีย์ที่นำมาเพาะเลี้ยง เช่น ถ้านำเอาจุลินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงในอาหารชนิดหนึ่งไปเพาะเลี้ยงใหม่ในอาหารชนิดเดิม ช่วงระยะเวลา Lag Phase จะสั้นลง เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่จำเป็นต้องสร้างเอนไซม์อีกครั้ง เช่นเดียวกับในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแอสที่นำเอาจุลินทรีย์ที่ผ่านพ้นระยะ Lag Phase ไปแล้วกลับในถังปฏิกรณ์ใหม่ ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารประกอบต่างๆ ในน้ำทิ้งได้ทันที จุลินทรีย์ในช่วงนี้จะมีอัตราการเกิดและการตายต่ำ

### ช่วงที่ 2 Lag Growth Phase

เป็นช่วงที่มีการเจริญเติบโตสูงสุด จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วในอัตราที่สม่ำเสมอ เนื่องจากมีอาหารเหลือเฟือ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตแบบเซลล์เดี่ยวไม่รวมเป็นฟล็อก ถ้าระบบเอเอสทำงานอยู่ในช่วงนี้จะเป็นผลให้น้ำทิ้งที่ออกมาขุ่น เนื่องจากมีตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกมา

### ช่วงที่ 3 Stationary Phase

ระยะนี้อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะช้าลง เนื่องจากสารอาหารถูกใช้จนเกือบหมด และสารพิษที่ขับออกมาจากจุลินทรีย์มีมากขึ้น ซึ่งช่วงนี้จะมีจำนวนประชากรค่อนข้างสมดุลกันคือการเกิดใกล้เคียงกับการตาย จุลินทรีย์จะรวมกันเป็นฟล็อกได้ดี ตกตะกอนง่ายทำให้น้ำทิ้งออกมามีคุณภาพดี ช่วงนี้จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้บำบัดน้ำเสีย

### ช่วงที่ 4 Endogenous Growth Phase หรือ Death Phase

ในช่วงนี้จุลินทรีย์จะขาดอาหารและตายเพราะมีอาหารเหลืออยู่น้อยหรือไม่มีอาหารเหลืออยู่เลย ดังนั้นเมื่อจุลินทรีย์ได้ใช้อาหารที่เก็บสะสมไว้ภายในตัวจนหมดแล้วก็จะตาย และเซลล์ตายกลายเป็นอาหารของจุลินทรีย์ตัวอื่นซึ่งยังมีชีวิตอยู่ จุลินทรีย์ที่อยู่ในช่วงนี้มีสารเฉื่อย (Inert Material) ผสมอยู่สูง มีความเข้มข้นสูงและตกตะกอนเร็ว แต่การที่ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอนเร็วทำให้ไม่สามารถจับหรือกรองเอาอนุภาคขนาดเล็กให้ลงมากับตะกอนส่วนใหญ่ได้ เป็นผลทำให้น้ำออกมีความขุ่น และมีสลัดจ์แขวนลอยปนออกมาในปริมาณมาก

#### **2.1.5 การแบ่งประเภทของจุลินทรีย์**

ประเภทของจุลินทรีย์ในการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้ 4 แบบ ดังนี้ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

1. แบ่งตามชนิด จุลินทรีย์ที่สำคัญในระบบเอเอสมีอยู่ 2 ชนิด คือ ฟีซและสัตว์

1.1) ฟีซ ได้แก่ แบคทีเรีย สาหร่ายเซลล์เดี่ยว และรา ซึ่งแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญมากที่สุด โดยจะเป็นตัวกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย

1.2) สัตว์ ได้แก่ โปรโตซัว ครัสตาเซียน และโรติเฟอร์ ซึ่งจะช่วยกินแบคทีเรียที่ลอยกระจายอยู่ในน้ำทำให้น้ำออกให้มีความใส และยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สภาพการทำงานของระบบโดยส่วนรวมได้อีกด้วย

## 2. แบ่งตามการใช้ ออกซิเจน

1.1) แอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic bacteria) เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีออกซิเจนในการบำบัดน้ำเสียที่ใช้แบคทีเรียประเภทนี้ต้องทำให้มีออกซิเจนในระบบ ซึ่งอาจจะมีการเติมออกซิเจนได้ โดยการกวน การเป่าอากาศ เป็นต้น

1.2) แอนแอโรบิกแบคทีเรีย (Anaerobic bacteria) เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน

1.3) แฟคัลเททีฟแบคทีเรีย (Facultative bacteria) สามารถเจริญได้ทั้งในที่ที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน

## 3. แบ่งตามอายุ

หมายถึงระยะเวลาที่จุลินทรีย์ทำงานอยู่ในระบบ จุลินทรีย์ที่มีอายุน้อยจะมีอัตราการเติบโตสูง ไม่จับตัวเป็นฟล็อก ตกตะกอนไม่ดี และทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดยังคงมีค่าซีโอดีสูง ส่วนจุลินทรีย์ในระบบที่มีอายุสูงก็จะมีตะกอนที่หนัก สามารถกำจัดซีโอดีในน้ำได้มากและสามารถตกตะกอนได้เร็ว หากมีอายุสูงเกินไปจะตกตะกอนเร็วแต่ไม่สามารถจับตะกอนเล็กๆ ได้หมด ทำให้น้ำทิ้งที่ออกมาจะมีตะกอนแขวนลอยอยู่มาก

## 4 แบ่งตามการทำงานในระบบเอเอส สามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท

4.1) จุลินทรีย์สร้างฟล็อก (Floc Forming Microorganisms) เป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญมากในระบบเอเอส เพราะเป็นจุลินทรีย์ที่จับตัวรวมกันเป็นฟล็อกได้ดี ทำให้สามารถแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำได้ดีด้วยวิธีตกตะกอน แบคทีเรียที่สร้างฟล็อก ได้แก่ *Zooglea ramiera* นอกจากนี้ จุลินทรีย์ เช่น Protozoa และ Fungi ก็ทำให้เกิดฟล็อกได้เช่นกัน การสร้างฟล็อกของแอ็คทีเวตเต็ดจ์สลัดจ์ (Activated Sludge) เรียกว่า Bioflocculation

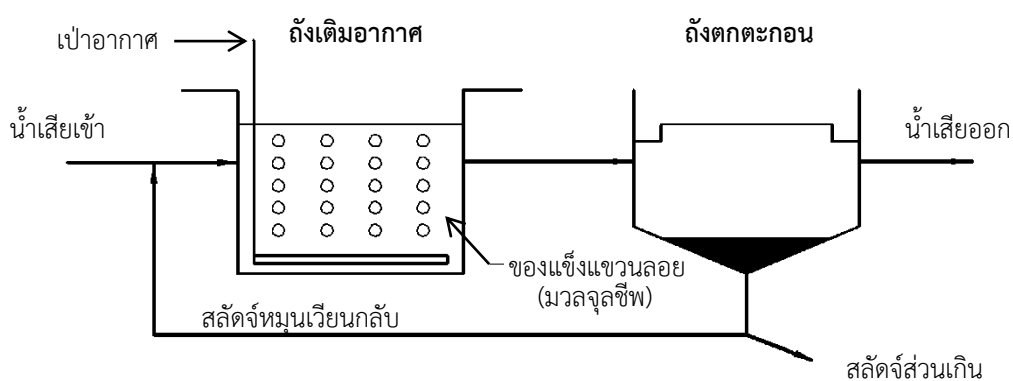
4.2) แซฟโพรไฟท์ (Saprophytes) เป็นจุลินทรีย์พวกหลักที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียซึ่งอาจมีทั้งพวกสร้างและไม่สร้างฟล็อกก็ได้ แซฟโพรไฟท์แบ่ง 2 ชนิด คือ แบบที่รับผิดชอบในการย่อยสลายอาหารหรือซัสเตรทให้เป็นซัสเตรทที่มีโมเลกุลเล็กลง และแบบสลายของซัสเตรทโมเลกุลเล็กจนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

4.3) จุลินทรีย์ทำลาย (Predator) คือพวกโปรโตซัวซึ่งจับแบคทีเรียกินเป็นอาหาร กลุ่มที่สำคัญ คือ พวกซิลิเอต (Ciliates) หากระบบที่มีจุลินทรีย์พวกนี้มากมักจะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งโปรโตซัวชนิดนี้มีบทบาทสำคัญในการตกตะกอนจุลินทรีย์ให้น้ำใส

4.4) จุลินทรีย์ก่อความ (Nuisance Microorganisms) เป็นจุลินทรีย์ที่ก่อความการทำงานของระบบเอเอส ได้แก่ แบคทีเรียที่เป็นเส้นใยและราบางพวกซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการจมไม่ลงของสลัดจ์ หรือเรียกว่า Bulking มาจาก แบคทีเรียพวก *Spaerotilus* และ *Filamentous bacteria* (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2525)

### 2.1.6 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบ

ระบบการบำบัดน้ำเสียเอเอสมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ ถังปฏิกริยา ถังตกตะกอน และส่วนหมุนเวียนตะกอน ส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของระบบเอเอส  
(มันสิน ตันจุลเวศม์, 2525)

ส่วนที่หนึ่ง ถังปฏิกริยาหรือโดยทั่วไปเรียกว่าถังเติมอากาศ มีด้วยกันหลายลักษณะตามแต่ละชนิดของระบบเอเอส หน้าที่สำคัญของถังปฏิกริยาคือการเติมอากาศ หรือก๊าซออกซิเจนให้กับระบบ เพื่อให้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนนำไปใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และทำหน้าที่กวนผสมให้จุลินทรีย์ในน้ำเสียได้มีโอกาสสัมผัสสารอินทรีย์ เพื่อให้เกิดปฏิกริยาได้ทั่วถึงแล้วทำให้เกิดฟล็อกของจุลินทรีย์ขึ้นมาซึ่งมีน้ำหนักและตกตะกอนได้ง่าย

ส่วนที่สอง ถังตกตะกอนมีหน้าที่คือทำการแยกของแข็ง ซึ่งในที่นี้คือตะกอนจุลินทรีย์ออกจากของเหลวหรือน้ำด้วยแรงโน้มถ่วง โดยจุลินทรีย์ที่กินสารอินทรีย์เข้าไปก็จะเกิดการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนของเซลล์จุลินทรีย์และจับตัวกันเป็นฟล็อก ซึ่งฟล็อกนี้จะตกตะกอนได้ดีในถังตกตะกอนและน้ำที่แยกออกมาจะเป็นน้ำใสสามารถปล่อยออกทิ้งได้ ส่วนตะกอนจุลินทรีย์หรือที่เรียกว่าสลัดจ์จะถูกปล่อยทิ้งออกจากกันถึงเพื่อนำไปบำบัดหรือเข้าสู่ระบบหมุนเวียนสลัดจ์กลับไปยังส่วนแรกต่อไป



ส่วนที่สาม ส่วนหมุนเวียนสลัดจ์เป็นส่วนที่สำคัญ และเป็นส่วนที่บ่งบอกความเป็นระบบเอเอส การหมุนเวียนสลัดจ์เป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการควบคุมระบบ กล่าวคือ ในการควบคุมระบบให้ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบเกิดความสมดุลกับสารอินทรีย์เป็นสิ่งที่สำคัญมาก เช่น ถ้าในระบบมีจุลินทรีย์ในระบบน้อยแต่มีสารอินทรีย์มาก จะเกิดความไม่สมดุล ก็ต้องทำการเพิ่มตะกอนจุลินทรีย์ให้มากขึ้นเพื่อให้ระบบสมดุล เป็นต้น ดังนั้นถ้าไม่มีส่วนหมุนเวียนสลัดจ์การควบคุมระบบก็ต้องเปลี่ยนไปปรับส่วนอื่นๆ แทน ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากกว่ามาก

### 2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบ

การทำงานของระบบเอเอส ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายชนิด เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อระบบ ดังนี้

1) ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ในระบบเอเอสจุลินทรีย์จะใช้น้ำเสียเป็นอาหาร ดังนั้นหากความเข้มข้นของสารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงมากจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ โดยอาจจะทำให้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์สูง (มีอาหารมาก) ทำให้จุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกระจัดกระจายไม่รวมกันเป็นฟล็อก เป็นผลให้ตกตะกอนไม่ดี น้ำออกมีความขุ่นสูงและมีค่าบีโอดีสูง หรือในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ต่ำ (มีอาหารน้อย) จะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตน้อย ตกตะกอนได้เร็ว แต่ก็ไม่สามารถจับตะกอนที่มีขนาดเล็กๆ ตกลงมาได้หมด ทำให้น้ำทิ้งที่ออกมาจากถังตกตะกอนมีความขุ่น

2) ธาตุอาหาร จุลินทรีย์ต้องการธาตุอาหาร (Nutrient) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก โดยปกติแร่ธาตุเหล่านี้มีครบในน้ำเสียชุมชนแต่อาจมีไม่พอในน้ำเสียอุตสาหกรรม การขาดธาตุอาหารทำให้จุลินทรีย์สร้างฟล็อก (Floc forming organisms) เติบโตได้ไม่ดีทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานในระบบต่ำลงไป โดยปกติจะควบคุมอัตราส่วนบีโอดีต่อธาตุอาหารคือ BOD : N : P : Fe เท่ากับ 100 : 5 : 1 : 0.5 การเติมไนโตรเจนมักใส่ในรูปแอมโมเนียหรือยูเรีย

3) ออกซิเจนละลาย ในถังเติมอากาศต้องมีค่าออกซิเจนละลาย (DO) อยู่ในน้ำระหว่าง 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณของออกซิเจนที่ใช้เพื่อรักษาความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำจะแปรผันกับอุณหภูมิ หากอุณหภูมิสูงจุลินทรีย์จะทำงานได้มากก็ต้องการออกซิเจนมาก นอกจากนั้นที่อุณหภูมิสูงออกซิเจนจะมีค่าการละลายน้ำอิมตัวต่ำ จึงต้องให้ออกซิเจนมากเมื่ออุณหภูมิในถังเติมอากาศสูง ในทำนองเดียวกันหากอุณหภูมิน้ำต่ำก็จะทำให้มีความต้องการออกซิเจนน้อย โดยจะน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงในระดับความเข้มข้นของออกซิเจนที่ค่าเท่ากัน

4) ระยะเวลาในการบำบัด ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในถังเติมอากาศจะต้องมีมากพอเพียงที่จุลินทรีย์จะใช้ในการย่อยสลายมลสารต่างๆ หากมีระยะเวลาต่ำเกินไปสารที่ย่อยยากๆ จะถูกย่อยไม่ถึงขั้นสุดท้าย ทำให้มีค่าบีโอดีเหลืออยู่ในน้ำเสียนมาก ในส่วนของถังตกตะกอนเช่นเดียวกัน ถ้าเวลาการตกตะกอนมีน้อยเกินไป ก็จะทำให้สลัดจ์ตกตะกอนได้ไม่ดี แต่ถ้านานเกินไปก็จะทำให้สลัดจ์ขาดออกซิเจนและเน่าได้

5) ค่าพีเอช จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ดีที่ค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 6.5-8.5 ดังนั้น จึงควรควบคุมระบบให้มีพีเอชอยู่ในช่วงดังกล่าว ถ้าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.5 รางจะเจริญเติบโตได้ดีกว่า ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงและการตกตะกอนไม่ดี ถ้าพีเอชสูงกว่า 8.5 ฟอสฟอรัสจะแยกตัวออกมาจากน้ำและจุลินทรีย์ก็ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ แต่ถ้าพีเอชในระบบมีค่าต่ำมากๆ หรือสูงมากๆ จุลินทรีย์ก็จะตายหมดไม่สามารถดำรงชีวิตได้

6) สารพิษ สารเป็นพิษแบ่งออกได้เป็น 2 จำพวก คือ แบบพิษเฉียบพลันและแบบพิษออกฤทธิ์ช้า แบบสารพิษเฉียบพลันจุลินทรีย์จะตายหมดภายในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมง ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ง่ายเนื่องจากมีผลเกิดขึ้นรวดเร็ว สารพิษจำพวกนี้ ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และคลอรีน เป็นต้น ส่วนแบบพิษออกฤทธิ์ช้า จะใช้เวลานานกว่าและค่อยๆ ตาย เช่น ทองแดง และโลหะหนักต่างๆ โดยจุลินทรีย์จะสะสมสารพิษเอาไว้ในเซลล์จนเกิดเป็นพิษและตายในที่สุด

7) อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิทุกๆ 10 องศาเซลเซียส จะทำให้จุลินทรีย์เติบโตเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัว จนถึงอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นการเจริญเติบโตก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินไป แต่ในประเทศไทยอุณหภูมิในฤดูร้อนและฤดูหนาวไม่มีความแตกต่างกันมากนักทำให้อุณหภูมิไม่มีผลกับระบบมาก ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ น้ำเสียจะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจะมีผลต่อการตกตะกอนของระบบเอเอส การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมียังมีผลต่อการทำงานในถังตกตะกอนขั้นที่สอง โดยพบว่าหากอุณหภูมิต่ำการตกตะกอนจะตกได้ดีกว่าอุณหภูมิสูง แต่ถ้ามีความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแตกต่างกันเกิน 2 องศาเซลเซียส ยังจะส่งผลทำให้เกิดการไหลวนของน้ำเนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันได้ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

8) การกวน ภายในถังเติมอากาศจะต้องมีการกวนอย่างทั่วถึง เพื่อป้องกันมิให้ตะกอนจุลินทรีย์เกิดการตกตะกอน และเพื่อให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับน้ำเสียที่ส่งเข้าบำบัด การกวนที่ถูกต้องจะป้องกันมิให้น้ำเสียไหลลัดวงจร และทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารสูง การกวนที่

สมบูรณ์ในถังเติมอากาศแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed) จะต้องมีค่า MLSS และค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำสม่ำเสมอกันทั่วถึง ลักษณะการกวนนั้นต้องมีความพอดีไม่แรงไปหรือเบาไป หากกวนเบาเกินไปจุลินทรีย์จะไม่จับตัวกัน และถ้ากวนแรงเกินไป อาจจะทำให้ฟล็อกจุลินทรีย์แตกเสียหายได้

9) อัตราการไหลของน้ำเสีย การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียที่ส่งเข้ามาในระบบ มีผลโดยตรงต่อการทำงานของกระบวนการทางชีววิทยาและกระบวนการตกตะกอน เช่น หากน้ำเสียมีอัตราการไหลมากขึ้นจนทำให้เวลาในการบำบัดน้อยลง จุลินทรีย์จะไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ทัน ย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้อัตราการไหลน้ำเสียที่บำบัดมีความสม่ำเสมอ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้

### 2.1.8 หลักการออกแบบระบบเอเอส

หลักในการออกแบบและควบคุมระบบเอเอส แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีคำนวณอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M) และวิธีทางจลนพลศาสตร์

#### 1) การออกแบบระบบเอเอสโดยอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M)

ตะกอนจุลินทรีย์ที่มีสมรรถภาพในการทำงานจะต้องมีปริมาณอาหารที่พอเหมาะซึ่งควบคุมได้โดยการรักษาค่าอัตราส่วนของน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ส่งเข้ามาบำบัดต่อน้ำหนักตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งวัดอยู่ในรูปของสลัดจ์แขวนลอย (MLSS) หรือสลัดจ์แขวนลอยระเหย (MLVSS) ให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการ และเรียกค่าที่ใช้ควบคุมนี้ว่า ค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (Food to Microorganism ratio, F/M) โดยมี ค่าอาหาร (F) หมายถึงปริมาณ(หรือมวล) ของสารอินทรีย์ที่วัดได้ในรูปบีโอดีมีน้ำหนักเป็นกิโลกรัมต่อวันที่เข้าสู่ระบบ โดยคำนวณจาก

$$\begin{aligned} \text{ค่าอาหาร (F)} &= \text{น้ำหนักของสารอินทรีย์ (กิโลกรัม/วัน)} \\ &= \text{ค่าบีโอดีที่เข้าระบบ (กิโลกรัม/วัน)} \\ &= \text{บีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)} \times \text{อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตร/วัน)} \end{aligned}$$

ค่าน้ำหนักของจุลินทรีย์ (M) คือปริมาณ (มวล) ของจุลินทรีย์ที่วัดอยู่ในรูปของแข็งแขวนลอยระเหยได้ในสลัดจ์ (MLVSS) หรือของแข็งแขวนลอย (MLSS) ซึ่งเป็นตัวแทนของมวลของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในถังเติมอากาศ (V) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม โดยคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{ค่าน้ำหนักจุลินทรีย์ M} &= \text{น้ำหนักของ MLVSS ในถังเติมอากาศ} \\ &= \text{MLVSS (มิลลิกรัม/ลิตร)} \times V (\text{ลูกบาศก์เมตร/วัน}) / 1,000 \end{aligned}$$

ค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์คืออัตราส่วนของสารอินทรีย์หรือบีโอดี (F) ต่อน้ำหนักของจุลินทรีย์ (M) ในถังเติมอากาศ โดยปกติค่า F/M ของระบบเอเอสแบบธรรมดา ควรควบคุมเป็น 0.2-0.4 กิโลกรัม.บีโอดี/กิโลกรัม.เอ็มแอลวีเอสเอส-วัน ค่า F/M สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{F}{M} = \frac{BOD \times Q}{MLVSS \times V} \quad (2.2)$$

โดยที่ BOD = ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์วัดอยู่ในรูปบีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)  
 Q = อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าระบบ (ลูกบาศก์เมตร/วัน)  
 MLVSS = ของแข็งแขวนลอยระเหยได้ (มิลลิกรัม/ลิตร)  
 V = ปริมาตรถังเติมอากาศ (ลูกบาศก์เมตร)

ในการออกแบบด้วยวิธีนี้ ค่า F/M จะถูกกำหนดจากการเลือกประเภทของระบบเอเอส เช่นระบบเอเอสแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge, CAS) จะมีค่า F/M เท่ากับ 0.2-0.4 กิโลกรัม.บีโอดี/กิโลกรัม.เอ็มแอลวีเอสเอส-วัน ในการเลือกประเภทของเอเอส ควรเลือกให้เหมาะกับน้ำเสียที่ต้องการบำบัดตลอดจนปัจจัยอื่นๆ อาทิเช่น ความยากง่ายในการควบคุมระบบ พื้นที่ในการก่อสร้าง เป็นต้น จากนั้นนำข้อมูลจากค่าบีโอดี อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียและค่าเอ็มแอลวีเอสเอสจากถังปฏิบัติการที่ทำการตรวจวัด หรือจากการประมาณการโดยขึ้นอยู่กับชนิดของระบบเอเอสมาคำนวณในสมการก็จะสามารถประมาณขนาดของถังปฏิบัติการได้

จากการศึกษาพบว่า การออกแบบโดยใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M) สามารถคำนวณออกแบบได้ง่าย ใช้เวลาไม่นานและมีความถูกต้องแม่นยำพอประมาณที่จะนำมาใช้คำนวณออกแบบถังปฏิบัติการ

## 2) การออกแบบระบบเอเอสโดยใช้วิธีทางจลนพลศาสตร์

หลังจากทำการศึกษาทฤษฎีจลนพลศาสตร์แล้ว จะสามารถคำนวณออกแบบถังปฏิบัติการเอเอสได้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญสามารถเปิดหาได้จากตารางโดยเป็นค่ามาตรฐานที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย โดยวิธีการดังต่อไปนี้

จากสมการ

$$X = \frac{\theta_c Y (S_0 - S)}{\theta (1 + k_d \theta_c)} \quad (2.3)$$

2.1) ทำการกำหนดเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากตาราง เช่น  $x$  จะอยู่ในช่วง 0.4–0.8 และ  $k_d$  จะอยู่ในช่วง 0.06–0.15 เป็นต้น

2.2) คำนวณค่า  $\theta$  หรือเวลาเก็บกักน้ำ โดย  $\theta = \frac{V}{Q}$  ซึ่งจะประมาณขนาดของถังปฏิกริยา (V) ได้

2.3) คำนวณอัตราการใช้สารอาหารจำเพาะสุทธิ  $U$  ซึ่ง

$$U = E \left( \frac{F}{M} \right) = \left( \frac{S_0 - S}{\theta X} \right) \quad (2.4)$$

โดยสมมติให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบเป็น 100% ( $E=1$ )

2.4) คำนวณค่า  $\theta_c$  จริงในระบบ จากสมการ  $\frac{1}{\theta_c} = YU - k_d$  เพื่อใช้ควบคุมระบบต่อไป

จากการศึกษาพบว่า การออกแบบโดยใช้วิธีทางจลนพลศาสตร์ คำนวณออกแบบได้ยากกว่าวิธีใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ โดยความถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับ การกำหนดค่าทางจลนพลศาสตร์ซึ่งกำหนดอยู่ในช่วงกว้างและค่าที่ใช้เป็นค่าที่ได้จากการทดลองที่ต่างประเทศ ไม่ใช่ค่าจริงที่ใช้ในน้ำเสียของประเทศไทย ทั้งนี้การเลือกค่าดังกล่าวอาจจะต้องใช้ประสบการณ์จากผู้ออกแบบโดยตรงในการเลือกค่าพารามิเตอร์ ดังนั้นการออกแบบด้วยวิธีนี้จึงควรคำนวณควบคู่กับวิธีการออกแบบโดยใช้อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ จึงจะได้ผลออกมาถูกต้องที่สุด

### 2.1.9 การแบ่งประเภทของกระบวนการเอเอส

ระบบเอเอส สามารถแบ่งตามลักษณะใหญ่ๆ ได้ 2 ลักษณะ ดังนี้ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

1. แบ่งตามลักษณะภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของกระบวนการ (Process Organic Loading Range) การแบ่งกระบวนการโดยใช้ภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็นตัวกำหนด หมายถึงการแบ่งช่วงการทำงานตามอัตราส่วนของน้ำหนักสารอินทรีย์ต่อน้ำหนักจุลินทรีย์ (F/M Ratio) หรือ ค่าอายุสลัดจ์ (Sludge Age, MCRT) ซึ่งจะได้กล่าวละเอียดต่อไปในหัวข้อทฤษฎีของการทำงาน

การทำงานสำหรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม สามารถแบ่งออกได้ 3 ช่วง

- 1.1 อัตราการบำบัดสูง (High Rate)
- 1.2 อัตราการบำบัดธรรมดา (Conventional Rate)
- 1.3 อัตราการบำบัดต่ำ (Low Rate or Extended Aeration Rate)

การควบคุมการทำงานของระบบควรจะควบคุมระบบให้ทำงานในช่วงที่ได้กำหนดเอาไว้ โดยปกติระบบบำบัดน้ำเสียขนาดตั้งแต่ 4,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันขึ้นไป มักออกแบบให้ทำงานในช่วง อัตราการบำบัดธรรมดา สำหรับระบบที่มีขนาดเล็กมักใช้ช่วงอัตราการบำบัดต่ำ ส่วนอัตราการบำบัดสูงมักใช้เป็นเพียงการบำบัดขั้นแรก สำหรับน้ำเสียที่มีค่ามลสารไม่สูง และไม่ต้องการคุณภาพของน้ำ ที่สูงมากนัก

รายละเอียดของอัตราการบำบัดทั้ง 3 ชนิด มีดังต่อไปนี้

### 1.1) อัตราการบำบัดสูง (High Rate)

กระบวนการเอสแบบการใช้อัตราการบำบัดสูงจะมีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading) ประมาณ 0.5–1.5 กิโลกรัม.บีโอดี/กิโลกรัม.เอ็มแอลวีเอสเอส-วัน โดยจะมีระยะเวลาบำบัด ในถังเติมอากาศประมาณ 1–3 ชั่วโมง (ความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียปานกลาง) ค่าอายุสลัดจ์ (น้ำหนักตะกอนจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบต่อน้ำหนักตะกอนที่ออกจากระบบต่อวัน) ต่ำกว่า 3 วัน และควบคุมให้มีค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศสูงประมาณ 4,000–5,000 มิลลิกรัมเอ็มแอลเอสเอส/ลิตร มีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดีประมาณร้อยละ 60–70 ลักษณะของ ตะกอนจุลินทรีย์จมตัวแยกชั้นไม่ดี และควบคุมการทำงานยาก ดังนั้นหากต้องการคุณภาพน้ำที่สูงจึง ไม่ควรใช้กระบวนการนี้

ในช่วงอัตราการบำบัดสูง (High Rate) อาจมีประสิทธิภาพในการกำจัด บีโอดีต่ำแต่สามารถ กำจัดได้เร็ว เนื่องจากอายุสลัดจ์ในระบบต่ำและเวลากักน้ำในถังเติมอากาศน้อย เป็นผลให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบไม่สามารถย่อยมลสารในน้ำเสียได้หมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เป็นมลสารที่ย่อยยาก นอกจากนี้ลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์จะจมตัว และแยกชั้นไม่ดี ดังนั้นหากการบำบัดต้องการ คุณภาพน้ำที่สูงจึงไม่ควรใช้อัตราการบำบัดในช่วงนี้ แต่เหมาะที่จะเป็นระบบบำบัดขั้นต้น (Pretreatment)

### 1.2) อัตราการบำบัดธรรมดา (Conventional Rate)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่มักออกแบบให้ใช้อัตราการบำบัดแบบธรรมดา (Conventional Rate) โดยมีภาระบรรทุกสารอินทรีย์ประมาณ 0.2–0.5 กิโลกรัม.บีโอดี/กิโลกรัม.เอ็มแอลวีเอสเอส-วัน มีค่าอายุสลัดจ์ 5–15 วัน ระยะเวลาบำบัดในถังเติมอากาศ 4–8 ชั่วโมง และมี ค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศสูงประมาณ 1,500–3,000 มิลลิกรัมเอ็มแอลเอสเอส/ลิตร มีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดีประมาณร้อยละ 85–95 ในการควบคุมการทำงานควรให้ มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์หรือค่าอายุสลัดจ์ที่กลางช่วง เพราะหากระบบทำงานที่ค่าต่ำสุดหรือ

สูงสุดของช่วงก็จะเข้าไปใกล้เขตการทำงานของอัตราการบำบัดแบบอื่นไป ในช่วงอัตราการบำบัดแบบนี้ จะทำให้น้ำทิ้งจากระบบที่ดี ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ มักออกแบบให้ใช้อัตราการบำบัด ในช่วงนี้

### 1.3) อัตราการบำบัดต่ำ (Low Rate)

การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบอัตราการบำบัดต่ำ (Low Rate) มักจะใช้สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก ซึ่งไม่มีการควบคุมดูแลมากนัก โดยมีค่าภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์ประมาณ 0.05–0.15 กิโลกรัม.ปิโอดี/กิโลกรัม.เอ็มแอลวีเอสเอส-วัน มีค่าอายุสลัดจ์ 20–40 วัน ระยะเวลาบำบัดในถังเติมอากาศ 24 ชั่วโมง และมีค่าความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศสูง ประมาณ 3,500–6,000 มิลลิกรัมเอ็มแอลเอสเอส/ลิตร มีประสิทธิภาพในการลดค่าปิโอดีประมาณ ร้อยละ 85–98

ในช่วงอัตราการบำบัดต่ำ จะมีอายุสลัดจ์สูงๆ สามารถเรียกได้อีกชื่อว่าแบบเติมอากาศ ยาวนาน (Extended Aeration) หรือแบบทำลายทั้งหมด (Total Oxidation) ในอัตราการบำบัดต่ำนี้ จะเกิดสลัดจ์ส่วนเกินน้อย แต่อาจเกิดปัญหาสลัดจ์ลอยตัวจากการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) และเกิดสลัดจ์เป็นเม็ดเล็กๆ (Pin Point Floc) หลุดออกมากับน้ำทิ้งได้

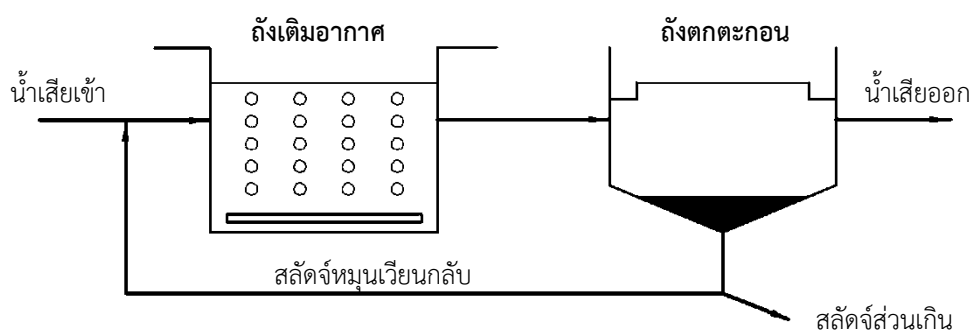
2. แบ่งตามลักษณะทางกายภาพของการจัดรูปถังเติมอากาศ (Physical Arrangement of Aeration Tank) การจัดรูปแบบทางกายภาพของถังเติมอากาศของระบบเอเอส เพื่อความคล่องตัวในการควบคุมการทำงานของระบบและแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งได้ เป็น 5 แบบ

#### 2.1) ระบบเอเอสแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mix Activated Sludge, CMAS)

ลักษณะสำคัญของระบบเอเอสแบบกวนสมบูรณ์จะต้องมีถังเติมอากาศ (Aeration Tank) ที่สามารถกวนให้น้ำและตะกอนที่อยู่ในถังผสมเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั่วทั้งถัง

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบนี้มีเสถียรภาพในการทำงานมาก สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Shock Load) ได้ดี เนื่องจากน้ำเสียจะกระจายไปทั่วถึงและสภาพแวดล้อมต่างๆ ในถังเติมอากาศก็มีค่าสม่ำเสมอทำให้จุลินทรีย์ต่างๆ ที่มีอยู่มีลักษณะเดียวกันตลอด (Uniform Population) นอกจากนี้ยังพบว่าความต้องการออกซิเจนในถังเติมอากาศแบบกวนสมบูรณ์ที่มีค่าสม่ำเสมอ ทำให้การให้ออกซิเจน (Aeration) เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

ในการศึกษาเรื่องการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์ ในระยะหลังพบว่าการใช้กระบวนการตะกอนเร่งแบบกวนสมบูรณ์ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ ตกตะกอนได้ไม่ดี เป็นผลให้มีค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (Sludge Volume Index) สูงกว่าแบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของมลสารในถังเติมอากาศมีค่าต่ำตลอดทั้งถัง ซึ่งเป็นสภาวะที่แบคทีเรียชนิดเส้นใย (*Filamentous Bacteria*) สามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรียชนิดรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (*Floc Former Bacteria*) ทำให้จุลินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียชนิดเส้นใยซึ่งจะสานตัวกันเป็นแผ่นไม่รวมตัวกันแน่น และแยกชั้นออกจากน้ำใสได้น้อย ทำให้เกิดปัญหาในถังตกตะกอนขั้นที่สอง (Secondary Clarifier) เรียกว่าเกิดปัญหาสลัดจ์จมไม่ลง (Sludge Bulking) ระบบเอเอสแบบกวนสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ชนิดของระบบเอเอสแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Mix Activated Sludge, CMAS)

(Qasim Syed R., 1999)

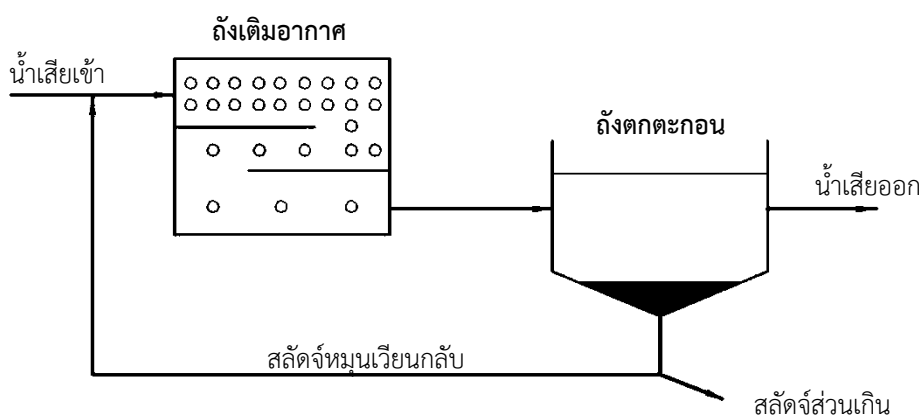
## 2.2) ระบบเอเอสแบบไหลตามแนวยาว (Plug Flow Activated Sludge Process)

ออกแบบถังเติมอากาศให้ไหลตามแนวยาวซึ่งประกอบด้วยถังเติมอากาศลักษณะแคบและยาว โดยน้ำเสียและสลัดจ์ไหลกลับจะถูกส่งเข้าถังด้านหนึ่งและน้ำสลัดจ์ไหลออกที่ปลายถังอีกด้านหนึ่ง การไหลของน้ำแบบนี้ในอุดมคติจะถือว่าการไหลแบบการแทนที่ตามความยาวของถังโดยไม่มีการผสมกันในแนวยาวตามทิศทางการไหลแต่เนื่องจากจะต้องทำการเติมอากาศจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการผสมกันในแนวยาวได้อย่างสมบูรณ์ โดยทั่วไปมักใช้การเติมอากาศโดยการเป่าอากาศให้น้ำไหลเป็นรูปเกลียวสว่าน หรือถ้าใช้เครื่องกลเติมอากาศก็จะต้องแบ่งถังเติมอากาศเป็นถังเล็กๆ ไม่ต่ำกว่า 3 ถัง แล้วให้น้ำผ่านแบบอนุกรม ยิ่งถ้าแบ่งถังออกมากเพียงใดก็จะมีลักษณะใกล้เคียงกันกับการไหลในแนวยาวมากขึ้น

จุดอ่อนของกระบวนการนี้อยู่ที่การไม่สามารถรับภาระบรรทุกลมลสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Shock Load) เนื่องจากน้ำเสียจะไหลลงเพียงจุดเดียวที่หัวถังซึ่งมีปริมาณจุลินทรีย์น้อย ปัญหาที่พบอีกประการหนึ่งก็คือ ที่หัวถังด้านน้ำเสียเข้าจะมีความต้องการออกซิเจนสูง หากระบบถูก



ออกแบบโดยมีการให้ออกซิเจนเฉลี่ยสม่ำเสมอทั้งถังจะทำให้ขาดออกซิเจนที่หัวถังและจะมีค่าออกซิเจนมากที่ปลายถัง ดังนั้นในระยะหลังการออกแบบถังเติมอากาศแบบไหลตามแนวยาวจึงกำหนดให้มีเครื่องเติมอากาศที่หัวถังมากแล้วจึงค่อยๆ ลดปริมาณลงตามความยาวของถังและเรียกกระบวนการแบบนี้ว่า แบบลดการเติมอากาศตามความยาวของถัง (Tapered Aeration) ซึ่งเป็นเพียงวางตำแหน่งของเครื่องเติมอากาศให้ตรงกับความต้องการจริงในกระบวนการแบบไหลตามแนวยาวเท่านั้น ระบบเอสแบบลดการเติมอากาศตามความยาวของถัง ดังแสดงในรูปที่ 2.4

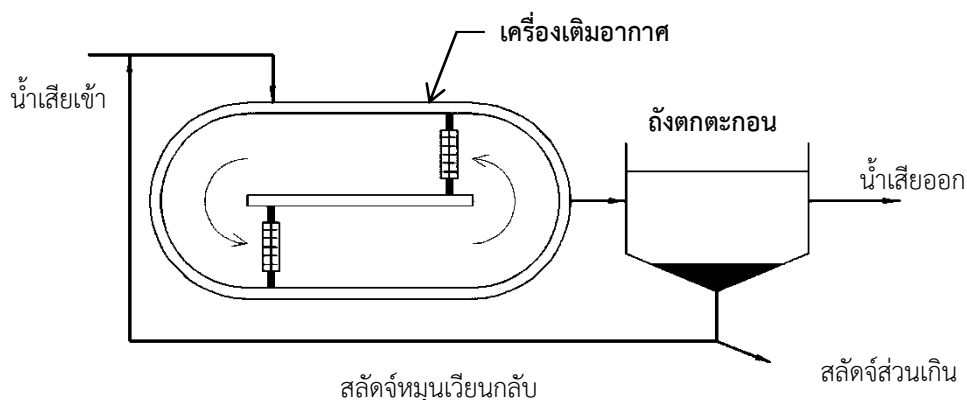


รูปที่ 2.4 ชนิดของระบบเอสแบบลดการเติมอากาศตามความยาวของถัง (Tapered Aeration)  
(Qasim Syed R., 1999)

### 2.3) แบบไหลเป็นวงจร (Circuit Flow Activated Sludge Process)

ระบบแบบไหลเป็นวงจรประกอบด้วยถังเติมอากาศแบบวงกลมหรือวงรีซึ่งทำให้น้ำไหลเวียนตามแนวยาวของถัง การเติมอากาศและการกวนจะใช้เครื่องเติมอากาศซึ่งตีน้ำในแนวนอน (Horizontal Surface Aerator) การไหลของน้ำในถังแบบนี้มีลักษณะเฉพาะคือ เป็นได้ทั้งแบบไหลตามแนวยาว (Plug Flow) และแบบกวนสมบูรณ์ (Complete-mix) และระบบนี้ยังสามารถควบคุมให้เกิดสภาพต่างๆ เช่น แอนน็อกซิก (Anoxic) และแอนแอโรบิก (Anaerobic) ได้ง่าย ทำให้สามารถบำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้

ระบบแบบไหลเป็นวงจรจะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์สามารถตกตะกอนได้ดี อีกทั้งระบบมีประสิทธิภาพการทำงานสูง มีชื่อเรียกเฉพาะ อาทิเช่น แบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ชนิดของระบบเอเอสแบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch)

(Qasim Syed R., 1999)

#### 2.4) ระบบเอเอสแบบนำสลัดจ์กลับมาเติมอากาศใหม่ (Activated Sludge with Sludge Reaeration)

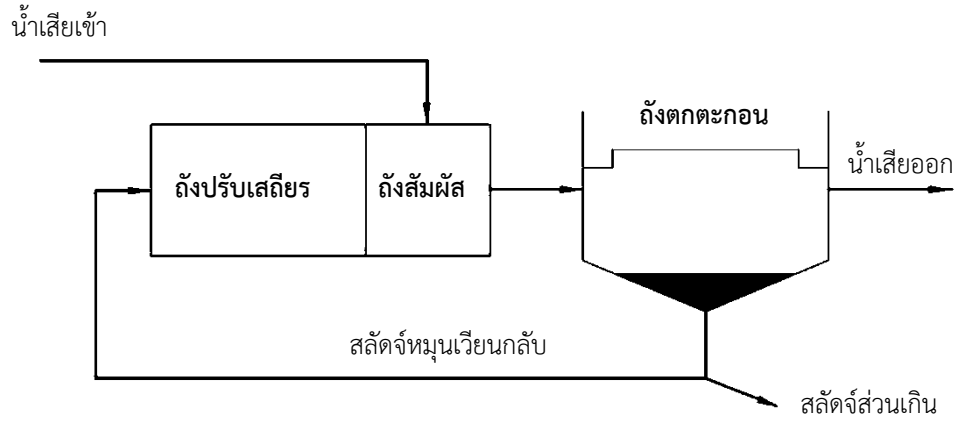
กระบวนการนี้จะเป็นการจัดรูปแบบเกี่ยวกับกรรมวิธีในการไหลน้ำเสียและสลัดจ์ไหลกลับ (Return Sludge) โดยจะนำสลัดจ์ไหลกลับมาเติมอากาศใหม่เพื่อให้เกิดเป็นช่วงย่อยสลาย (Stabilization) สารอินทรีย์ให้หมดก่อน จากนั้นจึงจะส่งตะกอนจุลินทรีย์ส่วนนี้ไปสัมผัสกับน้ำเสียที่ส่งเข้ามาใหม่เพื่อลดมลสารต่อไป ตัวอย่างระบบเอเอสแบบนี้ ได้แก่

##### a) แบบสัมผัสและย่อยสลาย (Contact Stabilization)

ระบบเอเอสแบบสัมผัสและย่อยสลาย จะแบ่งถังเติมอากาศออกเป็น 2 ถัง โดยสลัดจ์ที่สูบจากถังตกตะกอนชั้นที่สองจะนำมาเติมอากาศในถังย่อยสลาย (Stabilization Tank) ประมาณ 4–8 ชั่วโมง จากนั้นจะนำมาสัมผัสกับน้ำเสียในถังสัมผัส (Contact Tank) ประมาณ 0.5–1 ชั่วโมง เพื่อลดค่าสารอินทรีย์ น้ำที่บำบัดจะไปสู่ถังตกตะกอนชั้นที่สอง สลัดจ์ส่วนหนึ่งจะกลับเข้าสู่ถังย่อยสลายอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

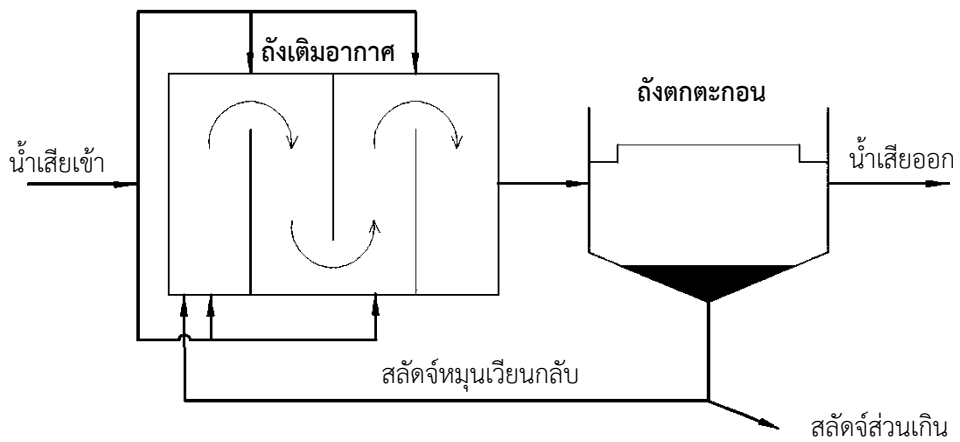
ระบบเอเอสแบบเติมน้ำเสียเป็นขั้น (Step feed) มีถังเติมอากาศเพียงถังเดียว สลัดจ์ที่สูบมาจากถังตกตะกอนจะเข้าสู่หัวถังเติมอากาศ ซึ่งจะมีความเข้มข้นของสลัดจ์ (MLSS) สูง เมื่อไหลไปตามแนวยาวของถังจะถูกน้ำเสียเข้ามาผสม ทำให้ความเข้มข้นลดลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

a) แบบสัมผัสผิสและย่อยสลาย



รูปที่ 2.6 ชนิดของระบบเอเอสแบบสัมผัสผิสและย่อยสลาย (Contact Stabilization)  
(Qasim Syed R., 1999)

b) แบบเติมน้ำเสียเป็นขั้น (Step Feed)

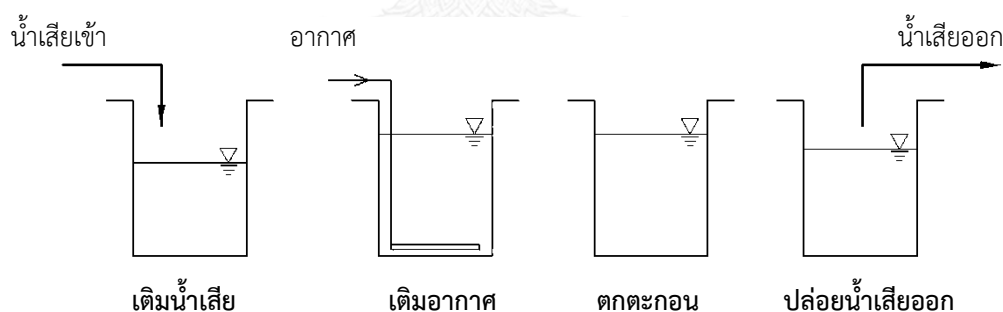


รูปที่ 2.7 ชนิดของระบบเอเอสแบบเติมน้ำเสียเป็นขั้น  
(Step-feed Aeration Activated Sludge, SAAS)  
(Qasim Syed R., 1999)

ระบบเอเอสแบบนำสลัดจ์กลับมาเติมอากาศใหม่นี้จะสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูง สามารถใช้กระบวนการแบบนี้แก้ไขระบบแบบกวนสมบูรณ์หรือแบบไหลตามแนวยาวที่มีปัญหาไม่สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นได้ โดยตัดแปลงท่อผนังกั้นน้ำหรือเปลี่ยนอุปกรณ์เติมอากาศเท่านั้น

## 2.5) แบบการเติมเข้า-ถ่ายออก (Fill and Draw Activated Sludge Process)

ระบบเอเอสแบบนี้จะใช้ถังเติมอากาศเพียงถังเดียว โดยเป็นทั้งปฏิกรณ์และถังตกตะกอน ปกติจะมีปริมาตรของน้ำตะกอนเข้มข้นนี้ประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงของถังเติมอากาศ จากนั้นจึงเติมน้ำเสียเข้ามาในถังโดยคำนวณปริมาตรที่เหลือให้สามารถรับน้ำเสียได้ทั้งหมดตลอดช่วงระยะเวลาที่น้ำเสียไหล เครื่องเติมอากาศจะให้ออกซิเจนแก่ระบบอย่างเพียงพอ ตั้งแต่เริ่มสูบน้ำเสียเข้าถังจนถึงประมาณ 3 ชั่วโมง ก่อนที่จะเริ่มมีน้ำเสียเข้าระบบในวันต่อไป จึงปิดเครื่องเติมอากาศเพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์จมลงกันถึงเป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง จากนั้นจึงถ่ายน้ำเสียในส่วนบนซึ่งได้รับการบำบัดแล้วทิ้งออก ถ้าเป็นระบบที่มีการใช้ถังหลายใบทำงานสลับหรือต่อเนื่องกัน ทำให้สามารถรับน้ำเสียได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องใช้ถังตกตะกอน จะเรียกระบบเอเอสแบบนี้ว่า เอสบีอาร์ (Sequencing Batch Reactor Activated Sludge, SBR AS) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



**รูปที่ 2.8** ชนิดของระบบเอเอสแบบการเติมเข้า-ถ่ายออก  
(Sequencing Batch Reactor Activated Sludge, SBR AS)

(Qasim Syed R., 1999)

### 2.1.10 การควบคุมการทำงานระบบบำบัดแบบเอเอส

การควบคุมการทำงานของระบบบำบัดแบบเอเอส ก็เพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียสามารถบำบัดได้อย่างต่อเนื่อง และคุณภาพของน้ำที่บำบัดแล้วมีค่าไม่เกินมาตรฐานน้ำเสียตามกฎหมาย ซึ่งการควบคุมสามารถทำได้ ดังนี้

#### 1) การควบคุมค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M)

ค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (Food to Microorganism Ratio, F/M) เป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้ค่า F/M คงที่ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้เพื่อให้ระบบทำงานได้ดี จากสมการที่ (2.2) ที่ผ่านมา พบว่าค่าอาหาร (F) หรือค่าบีโอดีในน้ำเข้านั้นเป็นค่าที่ปรับได้ยาก เนื่องจากค่าดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะสมบัติของน้ำเสีย ดังนั้นในการควบคุมระบบจึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของจุลินทรีย์ (M) ซึ่งวัดในรูปของเอ็มแอลเอสเอสหรือเอ็มแอลวีเอสเอส โดยการทิ้งสลัดจ์ออกจากระบบ ถ้าทิ้งสลัดจ์มาก เอ็มแอลเอสเอสจะต่ำทำให้ค่า F/M สูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าทิ้งสลัดจ์น้อยเอ็มแอลเอสเอสจะสูงทำให้ค่า F/M ต่ำลง

ในทางปฏิบัติไม่นิยมควบคุมระบบเอเอสด้วยวิธีนี้ เนื่องจากหากต้องการทราบค่า F/M จะต้องทำการวัดค่าบีโอดี ซึ่งจะใช้เวลาอย่างน้อย 5 วัน

#### 2) การควบคุมอายุสลัดจ์

อายุสลัดจ์ (Sludge Age) คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่ตะกอนจุลินทรีย์หมุนเวียนอยู่ในระบบ (Mean Cell Residence Time, MCRT) เป็นค่าที่สำคัญในการออกแบบและควบคุมการทำงานของระบบเอเอส และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า F/M การควบคุมค่าอายุสลัดจ์ให้มีค่าคงที่ จะทำให้ค่า F/M หรือค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีค่าคงที่ตามไปด้วย ซึ่งค่าที่ควบคุมเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพน้ำทิ้ง การหาค่าอายุสลัดจ์ที่เหมาะสมจะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอายุสลัดจ์กับคุณภาพน้ำทิ้ง เช่น บีโอดี ซีโอดี สลัดจ์แขวนลอย แล้วเลือกค่าที่เห็นว่าดีที่สุด

$$\text{อายุสลัดจ์} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ}}{\text{น้ำหนักตะกอนจุลินทรีย์ที่ทิ้งออกจากระบบต่อวัน}} \quad (2.5)$$

วิธีการควบคุมระบบเอเอสด้วยการควบคุมอายุสลัดจ์ ถือเป็นารควบคุมค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ไปในตัวและสามารถคำนวณปริมาณสลัดจ์ที่นำไปทิ้งได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้วิธีการควบคุมก็ง่ายไม่ต้องใช้การวิเคราะห์ที่ยุ่งยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธีควบคุมระบบด้วยการควบคุมอายุสลัดจ์นี้

จากสมการที่ (2.5) จะเห็นได้ว่า หากนำตะกอนจุลินทรีย์ไปทิ้งมากค่าอายุสลัดจ์ก็จะลดลง และหากนำตะกอนจุลินทรีย์ไปทิ้งน้อยค่าอายุสลัดจ์ก็จะเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อาจกล่าวได้ว่าถ้าลดค่าอายุสลัดจ์จะทำให้มีน้ำหนักรวมของตะกอนจุลินทรีย์ที่ต้องทิ้งออกจากระบบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์มีอัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้นและจะให้ผลตรงข้ามหากทำการเพิ่มค่าอายุสลัดจ์

ในการปรับค่าอายุสลัดจ์ของระบบเอเอสในแต่ละครั้งนั้น จะต้องใช้เวลาประมาณ 1-3 เท่าของค่าอายุสลัดจ์ เพื่อให้ระบบปรับตัวให้อยู่ในสภาวะคงที่ และจะต้องติดตามค่าน้ำหนักของเอ็มแอลเอสเอสที่ใช้บำบัดน้ำเสีย และปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ต้องนำไปทิ้งทุกวันจนกว่าค่าที่ได้จากการตรวจสอบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

ในทางปฏิบัติสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป มักจะทำการควบคุมอายุสลัดจ์โดยการปรับอัตราการทิ้งสลัดจ์ออกจากระบบทางกันถังตกตะกอน ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยการระบายสลัดจ์ทิ้งทางกันถังตกตะกอน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\theta_c = \frac{VX}{\{Q_w X_r + (Q - Q_w) X_e\}} \quad (2.6)$$

เมื่อ	$\theta_c$	=	ค่าอายุสลัดจ์ (วัน)
	$Q_w$	=	อัตราการระบายสลัดจ์ทิ้ง (ลบ.ม./วัน)
	$X_r$	=	ความเข้มข้นของสลัดจ์ที่ถูกหมุนเวียนกลับมาที่ถังเติมอากาศ (มก./ล.)
	$X_e$	=	ความเข้มข้นของสลัดจ์แขวนลอยในน้ำทิ้งที่ล้นออกจากถังตกตะกอน (มก./ล.)
	$V$	=	ปริมาตรถังเติมอากาศ (ลบ.ม.)
	$Q$	=	อัตราการไหลของน้ำเสียที่เข้าถังเติมอากาศ (ลบ.ม./วัน)
	$X$	=	ความเข้มข้นของสลัดจ์ในถังเติมอากาศหรือเอ็มแอลเอสเอส (มก./ล.)

ในกรณีระบบเอเอสทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าจะต่ำมากดังนั้นสมการที่ (2.6) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\theta_c = \frac{VX}{Q_w X_r} \quad (2.7)$$

การควบคุมค่าอายุสลัดจ์อีกวิธีสามารถทำได้โดยการปรับอัตราการทิ้งสลัดจ์ออกจากระบบ โดยการทิ้งตะกอนจุลินทรีย์โดยตรงจากถังเติมอากาศ ดังสมการ (2.8)

$$\theta_c = \frac{VX}{\{Q_w X + (Q - Q_w)X_e\}} \quad (2.8)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อ  $X_e$  มีค่าน้อยมาก จะได้เป็น

$$Q_w = \frac{V}{\theta_c} \quad (2.9)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.7) กับ (2.9) เห็นได้ว่าการควบคุมระบบด้วยสมการที่ (2.9) นั้น สามารถทำได้ง่ายกว่าสมการที่ (2.7) เนื่องจาก  $V$  มีค่าคงที่ ดังนั้นการควบคุม  $\theta_c$  จะขึ้นกับ  $Q_w$  เพียงค่าเดียวเท่านั้น

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสระบบขนาดใหญ่ มักจะไม่ทิ้งสลัดจ์โดยตรงจากถังเติมอากาศ เพราะมีค่าความเข้มข้นของสลัดจ์ต่ำ ทำให้น้ำสลัดจ์ที่นำมาทิ้งมีปริมาตรสูง ดังนั้นในระบบเอเอสดังกล่าวจึงทำการทิ้งสลัดจ์จากถังตกตะกอน

จะเห็นได้ว่าการควบคุมค่าอายุสลัดจ์นั้นสิ่งที่ต้องวัดมีเพียงเอ็มแอลเอสเอส ซึ่งเป็นค่าที่สามารถวัดได้โดยง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการควบคุมอายุสลัดจ์โดยการทิ้งสลัดจ์โดยตรงจากถังเติมอากาศ เนื่องจากสามารถทำการควบคุมระบบได้ง่ายกว่าการทิ้งสลัดจ์จากถังตกตะกอน

### 3) การควบคุมการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกิน

การนำสลัดจ์ส่วนเกินไปทิ้ง เพื่อเป็นการรักษาค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์หรือค่าอายุสลัดจ์ให้มีค่าคงที่และระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา ซึ่งก็คือการควบคุมค่าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์หรือการควบคุมค่าอายุสลัดจ์ ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.1.9.1 และ 2.1.9.2

### 4) การควบคุมการสูบสลัดจ์กลับ

การสูบสลัดจ์ที่อยู่ส่วนล่างของถังตกตะกอนกลับมาเข้าถังเติมอากาศ เพื่อนำมาใช้บำบัดน้ำเสียใหม่ อีกทั้งเพื่อรักษาระดับความสูงของชั้นสลัดจ์ในถังตกตะกอนไม่ให้สูงเกินไป โดยอัตราการสูบสลัดจ์กลับจะมีค่าประมาณร้อยละ 20-200 เมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ

อัตราการสูบสลัดจ์กลับขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ ความเข้มข้นของบีโอดี อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อุณหภูมิ ค่าความเข้มข้นของเอ็มแอลเอสเอส และความเข้มข้นของน้ำสลัดจ์ที่สูบกลับ

การคำนวณอัตราการสูบล้างใช้หลักการสมดุลมวลจุลินทรีย์โดยคำนวณจากการวัดค่าเอ็มแอลเอสเอส ในถังเติมอากาศและในท่อสูบล้าง แต่เนื่องจากระบบเอเอสในงานวิจัยนี้เป็นเพียงระบบปฏิบัติการซึ่งมีขนาดเล็ก จึงไม่จำเป็นต้องทำการควบคุมระบบเอเอสด้วยวิธีการนี้

## 2.2 กระบวนการตกตะกอน

การตกตะกอนเป็นวิธีแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวด้วยแรงดึงดูดของโลก ผลจากการตกตะกอน ทำให้ได้ส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ น้ำใสและสลัดจ์ (Sludge) ถ้าจุดมุ่งหมายของการตกตะกอนเป็นไปเพื่อให้ได้น้ำใสการตกตะกอนจะเป็นแบบที่เรียกว่าการทำใส (Clarification) แต่ถ้าจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้สลัดจ์ที่มีความเข้มข้นมากที่สุด การตกตะกอนจะเป็นแบบที่เรียกว่า การทำข้น (Thickening) โดยทั่วไปแล้ว ในการบำบัดน้ำเสีย ถังตกตะกอนมักจะมี ความมุ่งหมายเพื่อให้ได้น้ำใสมากกว่าเพื่อให้สลัดจ์เข้มข้น (มันสิน ตัญกุลเวศม์, 2537)

การตกตะกอนอาจจำแนกได้เป็น 4 ประเภท ตามแต่ระดับความเข้มข้น และลักษณะของสมบัติของแข็งที่อยู่ในน้ำ ดังนี้

1. การตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling)
2. การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling)
3. การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone Settling)
4. การตกตะกอนแบบอัดตัว (Compression Settling)

น้ำที่มีความเข้มข้นของสลัดจ์แขวนลอยต่ำอาจตกตะกอนเป็นแบบโดด หรือรวมกลุ่มก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของสลัดจ์หรืออนุภาค ถ้าสลัดจ์แขวนลอยไม่สามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มตัวอย่างของการตกตะกอนแบบโดด ได้แก่ การตกตะกอนของเม็ดกรวดหรือทรายขนาดต่างๆ ถ้าสลัดจ์แขวนลอยมีแนวโน้มในการจับกันเป็นกลุ่มหรือเป็นก้อน ตัวอย่างการตกตะกอนจะเป็นแบบรวมกลุ่ม ได้แก่ การตกตะกอนของน้ำเสีย ฟล็อกสารส้มหรือฟล็อกที่เกิดจากสารโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ชนิดอื่นๆ เป็นต้น น้ำที่มีสลัดจ์แขวนลอยอยู่ในระดับปานกลางหรือสูง (เช่น มีความเข้มข้นสูงกว่า 1,000-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) มักมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคแต่ละอนุภาคอยู่ติดกันและเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราเร็วเดียวกัน ทำให้เห็นเป็นชั้นแยกกันระหว่างน้ำใสและอนุภาค ซึ่งการตกตะกอนของระบบเอเอส (Activated sludge) เป็นตัวอย่างของการตกตะกอนที่เป็นชั้นที่เห็นได้ชัดกว่าตัวอย่างอื่น สำหรับการตกตะกอนแบบอัดตัว เกิดขึ้นเมื่อน้ำมีปริมาณสลัดจ์แขวนลอยอยู่ในระดับสูงมากและมักเกิดขึ้นที่ก้นถังตกตะกอน การตกตะกอนแบบอัดตัวอาจถือได้ว่าเกิดขึ้นหลังจากที่การตกตะกอนแบบอื่น ๆ ได้เกิดขึ้นแล้ว การอัดตัวเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคต่างๆ วางซ้อนกันในขณะที่มีการถ่ายเทน้ำหนักให้กับอนุภาคที่อยู่ข้างล่าง

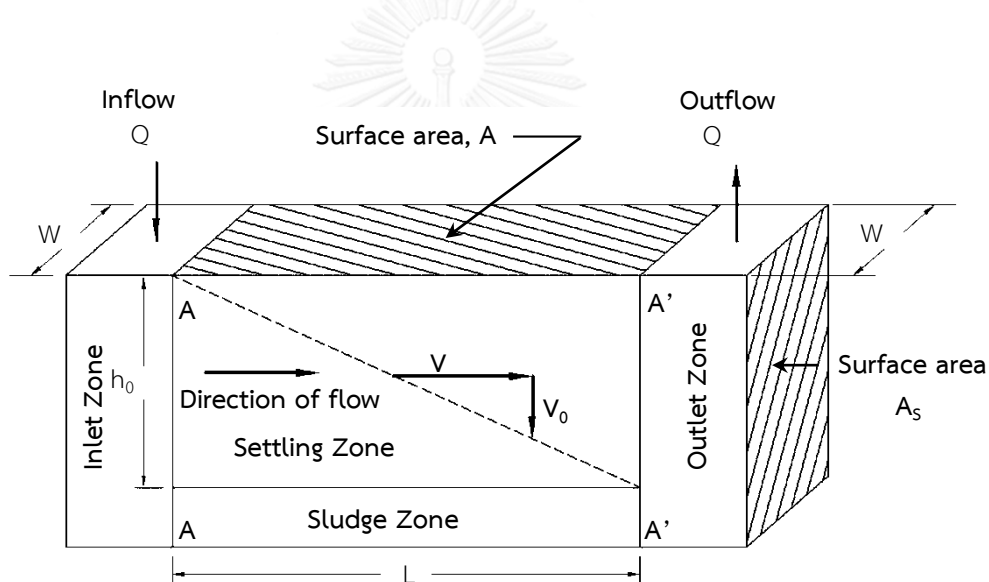


### 2.2.1 ทฤษฎีในการตกตะกอน

ทฤษฎีสำหรับอธิบายกลไกในการตกตะกอนทั้ง 4 แบบ สามารถแสดงได้ ดังนี้

#### 1. ทฤษฎีสำหรับการตกตะกอนแบบโคต

รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงการตกตะกอนแบบอุดมคติ กรณีถึงอุดมคตินี้ ถือว่าแต่ละอนุภาคน้ำเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณตกตะกอนในลักษณะที่เป็นระนาบแนวตั้ง (ระนาบ A-A) โดยมีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยขนาดต่างๆ คงที่ตลอดทั้งระนาบอนุภาคน้ำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และสม่ำเสมอด้วยอัตราความเร็วเท่ากับ  $V$  และไปถึงระนาบ A'-A' โดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง ซึ่งเท่ากับอัตราการไหลของน้ำ ( $Q$ ) หารด้วยพื้นที่หน้าตัด ( $A_s$ ) ในแนวตั้งของถัง (มีค่าเท่ากับ  $h_0 \times W$  เมื่อ  $h_0$  และ  $W$  เป็นความลึกและความกว้างของถังตามลำดับ)



รูปที่ 2.9 การวิเคราะห์ถังตกตะกอนแบบอุดมคติ

(มันสิน ตันกุลเวศม์, 2537)

จากรูป 
$$V = \frac{Q}{A_s} = \frac{Q}{h_0 W} \quad (2.10)$$

เมื่อพิจารณาการตกตะกอนบนเส้นประ ซึ่งอนุภาคน้ำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่สม่ำเสมอ กำหนดให้  $t$  เป็นเวลาที่ในการตกตะกอน และเมื่อเวลาเท่ากับระยะทางในการตกตะกอน หารด้วยความเร็วในการตกตะกอน

$$\text{ดังนั้น} \quad t = \frac{L}{V} = \frac{h_0}{V_0} \quad (2.11)$$

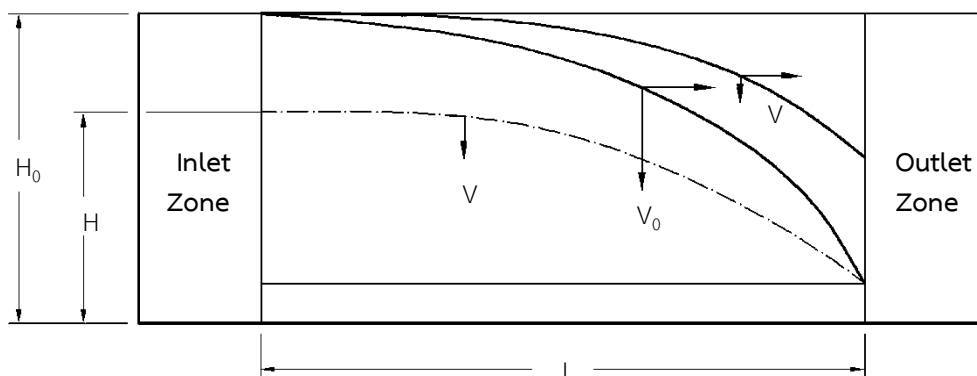
$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad V_0 = \frac{h_0}{t} = \frac{h_0 V}{L} \quad (2.12)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_0 = \frac{Q}{WL} = \frac{Q}{A} \quad (2.13)$$

โดยเทอม  $Q/A$  มีบทบาทสำคัญมากในการออกแบบ และควบคุมถังตกตะกอนสำหรับถังตกตะกอนแบบอุดมคติที่มีขนาดพื้นที่ผิวน้ำเท่ากับ  $A$  และอัตราการไหลเข้าถึงเท่ากับ  $Q$  จะสามารถกำจัดอนุภาค (ด้วยวิธีตกตะกอน) ใดๆ ก็ตาม ที่ตกตะกอนด้วยความเร็วสูงกว่าหรือเท่ากับ  $Q/A$  ได้ทั้งหมด ซึ่งเทอม  $Q/A$  มีชื่อเรียกได้หลายอย่าง เช่น Surface Loading Rate, Surface Overflow Rate หรือเรียกเป็นภาษาไทยว่า “อัตราการน้ำล้นผิว”

## 2. ทฤษฎีสำหรับการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม

ในกรณีที่มีการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆ มีโอกาสสามารถรวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากขึ้น ความเร็วในการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้น ทำให้วิถีของการตกตะกอนเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตัวอย่างการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม อาทิเช่น การตกตะกอนของสารส้ม หรือตะกอนที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน อนึ่งแม้ว่าประสิทธิภาพในการตะกอนแบบโดดจะขึ้นอยู่กับอัตราการน้ำล้นผิวเพียงอย่างเดียว แต่ประสิทธิภาพในการแบบรวมกลุ่มจะขึ้นอยู่กับอัตราการน้ำล้นผิวและเวลากักน้ำ



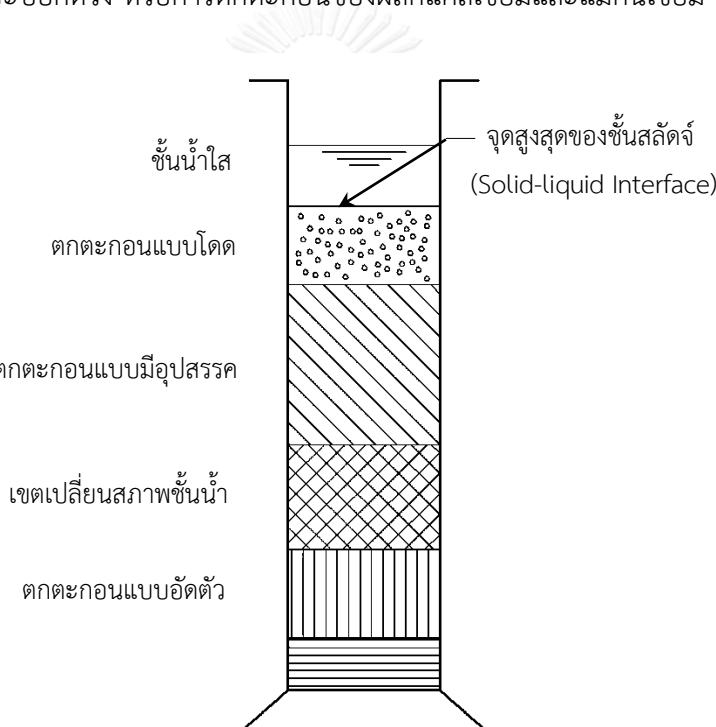
รูปที่ 2.10 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม

(มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2537)

เนื่องจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ไม่อาจกระทำได้ในกรณีของการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม การหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่างๆ จึงต้องกระทำโดยการวิเคราะห์ด้วยผลการทดลองตกตะกอนในถังทรงกระบอก

### 3. ทฤษฎีสำหรับการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นหรือแบบมีอุปสรรค

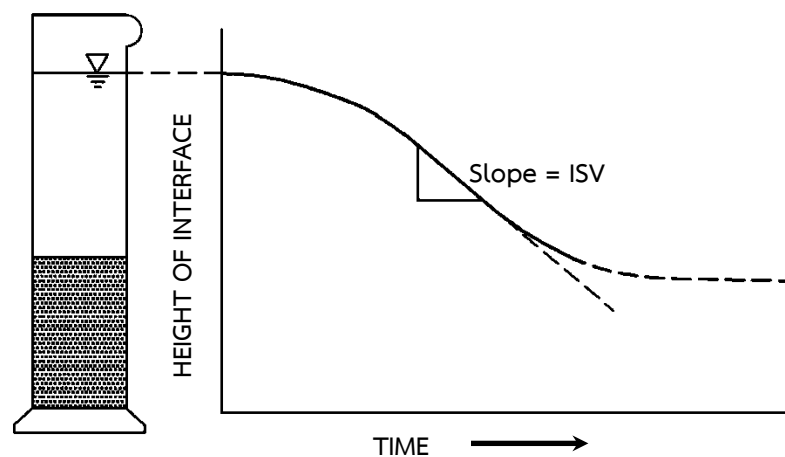
การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคต่างๆ จับตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่จนเสมือนเป็นวัตถุก้อนเดียวที่ตกตะกอนด้วยอัตราเดียวกัน เมื่อมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นจะเห็นการแยกตัวระหว่างชั้นสลัดจ์และน้ำอย่างเด่นชัด (ดังแสดงในรูปที่ 2.11) การตกตะกอนเช่นนี้ เกิดขึ้นได้เฉพาะกับน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยเข้มข้นสูงมาก ตัวอย่างการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น ได้แก่ การตกตะกอนของระบบเอเอสในกระบอกตวง หรือการตกตะกอนของผลึกแคลเซียมและแมกนีเซียม



รูปที่ 2.11 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น  
(มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2537)

เมื่อปล่อยให้มีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นในกระบอกตวงหรือกระบอกใสและวัดระดับของจุดสูงสุดของชั้นสลัดจ์ (Solid-Liquid Interface) ที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อนำความสูงของชั้นสลัดจ์มาเขียนความสัมพันธ์เทียบกับเวลา จะได้กราฟที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.12 ชั้นสลัดจ์จะตกตะกอนด้วยอัตราคงที่และสูงสุดในระยะแรก จากนั้นจะตกตะกอนช้าลงเรื่อยๆ จนในที่สุดเกือบไม่

มีการตกตะกอนเกิดขึ้นเลย การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วในการตกตะกอนจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นสลัดจ์เกิดขึ้น ระยะแรกอนุภาคต่างๆ แขนงลอยอยู่ในน้ำอย่างหลวม เมื่อมีการตกตะกอนมาช่วงกลางของกระบอกตวง การตกตะกอนจะเป็นแบบมีอุปสรรค (Hindered Settling) แต่ก็ยังมีช่องว่างในการตกตะกอนได้อีกบ้างและสุดท้ายการตกตะกอนจะเป็นแบบอัดตัว การตกตะกอนจะช้าจนไม่สามารถตกตะกอนได้อีก



รูปที่ 2.12 วิธีการกราฟของการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น  
(มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2537)

#### 4. ทฤษฎีสำหรับการตกตะกอนแบบอัดตัว

การตกตะกอนแบบอัดตัวเป็นลักษณะการตกตะกอนที่เกิดขึ้นจากการทับถมอัดตัวของชั้นสลัดจ์ ณ ก้นถังตกตะกอน หลังจากที่เกิดการตกตะกอนในรูปแบบอื่นๆ แล้วเป็นระยะเวลานาน โดยสามารถอธิบายความสูงของชั้นสลัดจ์ภายหลังการทับถมอัดตัว (Metcalf and Eddy, 2014) ด้วยสมการ

$$H_1 - H_\infty = (H_2 - H_\infty)e^{-i(t-t_2)} \quad (2.14)$$

- เมื่อ
- $H_1$  คือ ความสูงของสลัดจ์ที่เวลา  $t$
  - $H_\infty$  คือ ความสูงของสลัดจ์หลังเกิดการตกตะกอนในช่วงเวลาหนึ่งโดยกำหนดให้เป็น 24 ชั่วโมง
  - $H_2$  คือ ความสูงของสลัดจ์ที่เวลา  $t_2$
  - $i$  คือ ค่าคงที่ที่ใช้ในสมการการวิเคราะห์การตะกอนแบบอัดตัว

## 2.2.2 การหาอัตราเร็วของการตกตะกอนในระบบเอเอส

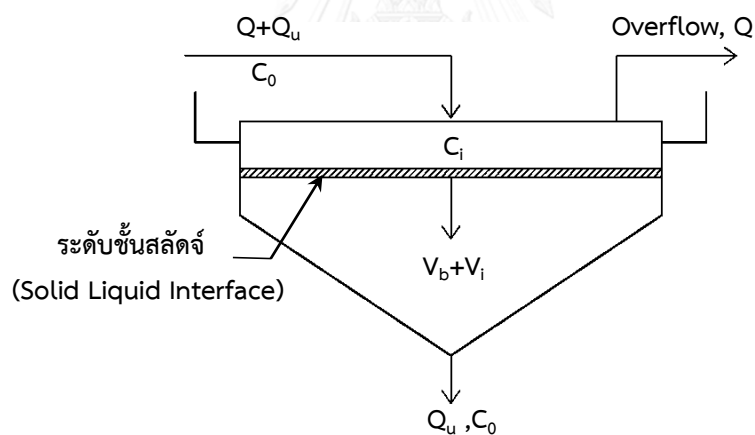
การตกตะกอนในระบบเอเอส เป็นการตกตะกอนแบบที่ 3 หรือการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น การวิเคราะห์ผลการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นหรือแบบมีอุปสรรคทำได้โดยใช้ทฤษฎีฟลักซ์ของแข็ง (Solid Flux Theory) ทฤษฎีดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1) ทฤษฎีฟลักซ์ของแข็ง (Solid Flux Theory)

เมื่อพิจารณาจากถังตกตะกอนซึ่งได้รับน้ำที่มีสลัดจ์แขวนลอยเข้มข้นจนมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นเกิดขึ้น ในกรณีเช่นนี้จำเป็นต้องมีการระบายสลัดจ์ออกจากถังถึงตกตะกอน (รูปที่ 2.13) การเคลื่อนที่ของชั้นสลัดจ์ในถังจึงเกิดขึ้นเนื่องจากแรง 2 ชนิด คือ แรงดึงดูดของโลก และแรงที่เกิดจากการระบายสลัดจ์ออกจากถังตกตะกอน (จากการดูดสลัดจ์ออก)

ให้  $v_i$  คือ ความเร็วในการตกตะกอนของสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ  $C_i$

$v_b$  คือ ความเร็วของสลัดจ์ที่เคลื่อนที่ลงเนื่องจากการระบายสลัดจ์ออกจากถังถึงตกตะกอน

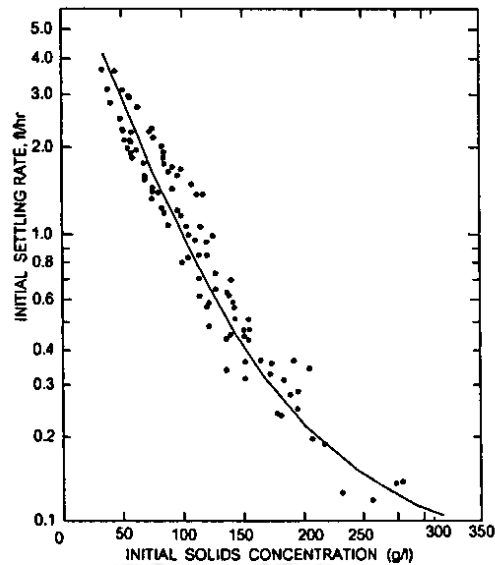


รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของตะกอนสลัดจ์ในถังตกตะกอน

(Water Pollution Control Federation, 1985)

การเคลื่อนที่ของชั้นสลัดจ์ผ่านถังตกตะกอนวัดในเทอมของมวลน้ำหนักรวมที่ตกตะกอนต่อเวลาพื้นที่ของถัง เรียกว่า โซลิดฟลักซ์ (Solid Flux) หรือ  $G$  มีหน่วยกิโลกรัม/ตารางเมตร-ชั่วโมง หรือปอนด์/ตารางฟุต-ชั่วโมง สลัดจ์ที่มีความเข้มข้น  $C$  และมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_i$  จะมีโซลิดฟลักซ์ หรือ  $G$  ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$G_i = C_i v_i \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสลัดจ์และความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอน  
ของชั้นสลัดจ์  
(มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2537)

เนื่องจากความเร็วการเคลื่อนที่ของชั้นสลัดจ์ในถังตกตะกอน เกิดขึ้นด้วยสาเหตุ 2 อย่าง คือ ความเร็วของแรงโน้มถ่วงของโลก  $v_i$  และความเร็วของการดูดสลัดจ์ออก  $v_b$  โชลิตฟลักซ์ทั้งหมดของถังตกตะกอน ( $G_T$ ) จึงมีค่าดังนี้

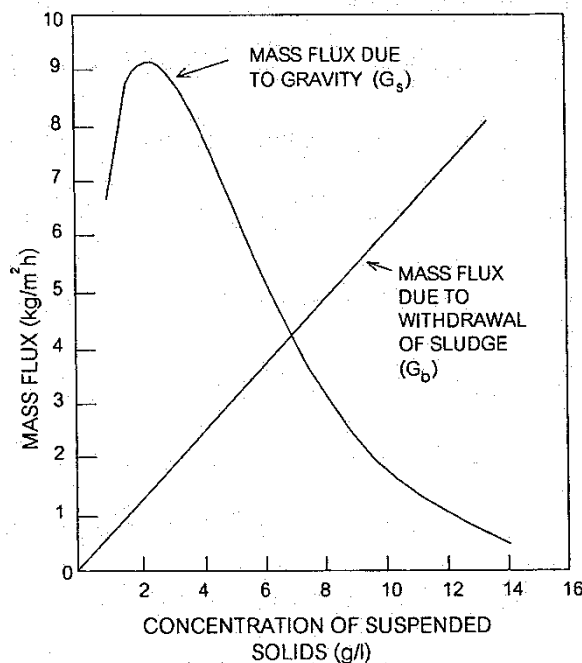
$$G_T = G_b + G_g \quad (2.16)$$

$$G_T = C_i v_b + C_i v_i \quad (2.17)$$

$G_b$  และ  $G_g$  เรียกว่า Bulk Flux และ Settling Flux ตามลำดับ  $G_b$  เป็น ฟลักซ์ที่เกิดจากการระบายสลัดจ์ออกจากถังถึงตกตะกอน  $G_g$  เป็นฟลักซ์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยน้ำหนักตัวของชั้นสลัดจ์ (เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก)

Settling Flux หรือ  $G_g$  สามารถหาได้ โดยการทดลองตกตะกอนสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ในกระบอกใส วัดความสูงของชั้นสลัดจ์ที่เวลาต่างๆ และนำมาเขียนกราฟระหว่างความสูงและเวลา (แสดงในรูปที่ 2.13) ความชันของกราฟส่วนที่เป็นเส้นตรงจะเท่ากับความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity, ISV) ของสลัดจ์ที่มีความเข้มข้นค่าใดค่าหนึ่ง สลัดจ์จากแหล่งเดียวกันแต่มีความเข้มข้นแตกต่างกันจะมีความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอนไม่เท่ากัน

สลัดจ์ที่มีความเข้มข้นสูงจะตกตะกอนช้า ทั้งนี้เพราะความเข้มข้นของสลัดจ์แขวนลอยเป็นอุปสรรคต่อการตกตะกอน รูปที่ 2.14 เป็นตัวอย่างแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสลัดจ์และอัตราเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอน แต่ละจุดของกราฟที่ได้เป็นผลซึ่งได้จากการทดลองตกตะกอนสลัดจ์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันในกระบอกไซ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ  $G_g$  ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ สามารถดูได้จากกราฟที่แสดงดังรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นในระยะแรกทำให้สลัดจ์เคลื่อนที่ผ่านถึงตกตะกอนได้รวดเร็วขึ้น แต่เมื่อถึงความเข้มข้นระดับหนึ่งแล้วการเพิ่มความเข้มข้นทำให้สลัดจ์เคลื่อนที่ช้าลง

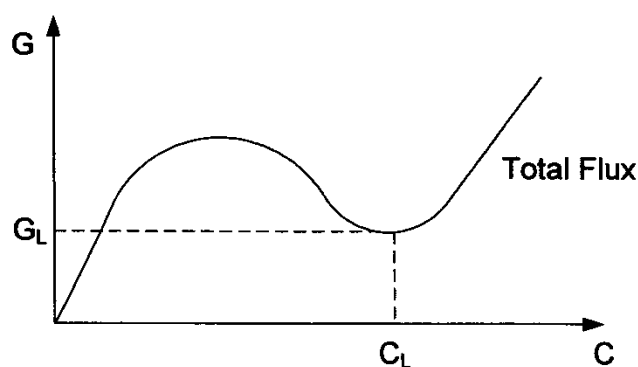


รูปที่ 2.15 โวลิตฟลักซ์  $G_b$  และ  $G_g$  ของถังตกตะกอนที่ระดับความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2537)

Bulk Flux ( $G_b$ ) สามารถหาได้ง่ายกว่า  $G_g$  เพราะไม่ต้องทำการทดลองใดๆ เลย  $G_b$  ที่ระดับความเข้มข้นใดๆ คำนวณได้โดยตรง จากผลคูณระหว่างความเข้มข้นนั้นๆ กับความเร็วของการไหลในการระบายสลัดจ์ (รูปที่ 2.15) การเปลี่ยนอัตราเร็วในการระบายสลัดจ์ออกจากถังตกตะกอน ( $v_b$ ) ทำให้กราฟ  $G_b$  มีความแตกต่างกัน

กราฟของ Total Flux ( $G_T$ ) ได้มาจากผลบวกระหว่าง  $G_g$  และ  $G_b$  และสามารถเขียนกราฟได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 กล่าวได้ว่า สลัดจ์ที่มีความเข้มข้น  $C_L$  จะมีค่าฟลักซ์น้อยที่สุด

(Limiting Flux หรือ  $G_L$ ) หมายความว่าถึงตกตะกอนแต่ละใบซึ่งมีอัตราการระบายสลัดจ์ออกจากถังตกตะกอนคงที่ ( $v_b$ ) จะมีความสามารถจำกัดในการรับสลัดจ์แขวนลอย นั่นคือสลัดจ์จะเคลื่อนที่ผ่านถังตกตะกอนได้ไม่เกินค่า  $G_L$  ถ้าน้ำพาสลัดจ์แขวนลอยเข้าถังตกตะกอนในอัตราที่สูงกว่าค่า  $G_L$  และระบายสลัดจ์ออกจากถังตกตะกอนด้วยอัตราเร็ว  $v_b$  ซึ่งจะใช้ค่า  $G_L$  มีอัตราเร็วไม่เพียงพอที่จะส่งผลให้เกิดสลัดจ์สะสมในถังตกตะกอน ถ้ามีการเพิ่มอัตราเร็ว  $v_b$  ก็จะเป็นผลทำให้ค่า  $G_L$  เพิ่มขึ้นด้วย แต่มีข้อเสียคือทำให้สลัดจ์ที่ระบายออกมีความเข้มข้นต่ำและจะต้องเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการสูบสลัดจ์เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการเพิ่ม  $v_b$  จึงมีขีดจำกัดเพื่อจะส่งผลให้ได้ค่า  $G_L$  ที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 2.16 เส้นโค้ง Total flux และการหาค่า  $G_L$  แบบธรรมดา

(มันสิน ตันกุลเวศม์, 2537)

### 2.2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับขนาดในการตกตะกอน

กฎของสโตคเป็นกฎพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วในการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการและอุปกรณ์ในการแยกต่างๆ เช่น ถังตกตะกอน ด้วยสมมติฐานว่าอนุภาคนั้นมีขนาดรูปร่างเป็นทรงกลมและเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในระบบที่พิจารณา เช่น ถังตกตะกอน อนุภาคจะตกตะกอนลงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก การเคลื่อนที่ลงของอนุภาคจะเกิดแรงต้านที่เรียกว่าแรงลาก (Drag force) โดยเกิดจากความหนืดของของเหลว (Viscosity) ในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่

ในการหาความเร็วในการแยกอนุภาคออกนั้น เพื่อบ่งบอกถึงความสามารถในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำ แสดงได้จากสมการกฎของสโตค (Stoke's law equation) (Metcalf and Eddy, 2014) ดังแสดงในสมการที่ (2.18)



$$V_p = \frac{\Delta\rho \cdot d_p^2 g}{18\mu} \quad (2.18)$$

โดยที่	$V_p$	คือ	ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคแบบโตน
	$\Delta\rho$	คือ	ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว
	$d_p$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
	$g$	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity)
	$\mu$	คือ	ความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (Dynamic viscosity)

จากสมการของสโตคจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาคต่างๆ ได้ดังนี้

### 1) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, $g$

โดยทั่วไปในกระบวนการบำบัดน้ำ นิยมใช้การแยกอนุภาคด้วยการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เช่น ถังตกกรวดทราย ถังตกตะกอนเป็นต้น สำหรับเครื่องการแยกอื่น ตัวอย่างเช่น ไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclones) ก็สามารถเพิ่มความเร่งเพื่อให้ความเร็วในการตกตะกอน ( $V_p$ ) เพิ่มขึ้นได้

### 2) ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคทั้งสองเฟส, $\Delta\rho$

การแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว เมื่อของผสมนั้นต้องมีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคสองเฟส ( $\Delta\rho$ ) นั้นหมายถึงค่าความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งและของน้ำ ( $\Delta\rho = \rho_p - \rho_w$ ) นั้นเอง ในการแยกของแข็งออกจากน้ำในถังตกตะกอนจะไม่เกิดขึ้น หากความหนาแน่นของทั้งสองเฟสไม่มีความแตกต่างกัน ( $\Delta\rho = 0$ ) ซึ่งจะทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาค ( $V_p$ ) มีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลทำให้ถังตกตะกอนทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และไม่สามารถแยกอนุภาคทั้งสองเฟสออกจากกันได้

### 3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง, $d_p$

จากสมการของสโตค พบว่า ถ้าอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่ จะทำให้ความเร็วในการตกตะกอน ( $V_p$ ) มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งขนาดอนุภาค ( $d_p$ ) จะอยู่ในรูปของกำลังสอง ( $d_p^2$ ) กล่าวได้ว่า หากทำการเพิ่มขนาดอนุภาคของแข็ง ก็จะสามารถทำให้การแยกของแข็งออกจากน้ำเกิดขึ้นได้ดีมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ จะใช้วัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดแตกต่างกัน จึงน่าจะเพิ่มความเร็วในการแยกอนุภาคในถังตกตะกอนให้ตกตะกอนเร็วขึ้นด้วยและการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนที่แตกต่างกันสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการตกตะกอนได้อีกว่า วัสดุช่วยตกตะกอนชนิดใดจะมีความสามารถตกตะกอนได้ดีที่สุด

#### 4) ความหนืดของของไหล, $\mu$

ความหนืดของของไหลส่งผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาค เมื่อค่าความหนืดของของไหลสูงจะส่งผลทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคต่ำในทางตรงกันข้าม ถ้าความหนืดของของไหลมีค่าต่ำจะมีผลทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคสูง และความหนืดยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิของของไหล

ความเร็วในการตกตะกอนแปรผกผันกับความหนืดของน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิของน้ำ ดังนั้น อุณหภูมิของน้ำจึงมีอิทธิพล ต่อการตกตะกอนของอนุภาค การเพิ่มอุณหภูมิจาก 10 องศาเซลเซียส ไปเป็น 30 องศาเซลเซียส ทำให้อนุภาคตกตะกอนได้เร็วขึ้น 1.63 เท่า (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2537)

### 2.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตกตะกอนกับค่าสัมประสิทธิ์ความกลม

หากจะพิจารณาถึงอัตราเร็วของการตกตะกอนแบบโดด ทฤษฎีของการตกตะกอนก็คือ ทฤษฎีที่กล่าวถึงผลของแรงดึงดูดของโลกที่มีต่ออนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในของเหลว ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่านั่นเอง ภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดของโลกอนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1.0 จะตกตะกอนในน้ำด้วยความเร่ง จนกระทั่งเมื่อแรงต้านทานของน้ำเท่ากับน้ำหนักสัมฤทธิ์ของอนุภาคนั้น ความเร็วในการตกตะกอนจึงจะคงที่ และจะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของอนุภาค ตลอดจนความหนาแน่น และความหนืดของน้ำ ในการพิจารณาทั่วไป เรามักถือว่าอนุภาคเป็นแบบทรงกลม แต่ถ้าอนุภาคมีรูปร่างอย่างอื่น ความเร็วของการตกตะกอนก็สามารถเปรียบเทียบในเทอมของความเร็วของอนุภาคทรงกลมได้เช่นกัน (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2537) ดังแสดงในสมการที่ (2.18)

$$V_0 = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho)gD_p}{3C_D\rho}} \quad (2.19)$$

โดยที่	$V_0$	คือ	ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคแบบโดด
	$\rho_s$ และ $\rho$	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาคและของน้ำ ตามลำดับ
	$D_p$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
	$g$	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity)
	$C_D$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Drag coefficient)

$C_D$  มีค่าไม่คงที่ แต่จะขึ้นอยู่กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ดังแสดงสมการที่ (2.20)

$$C_D = \frac{a}{\text{Re}} + \frac{b}{\sqrt{\text{Re}}} + c \quad (2.20)$$

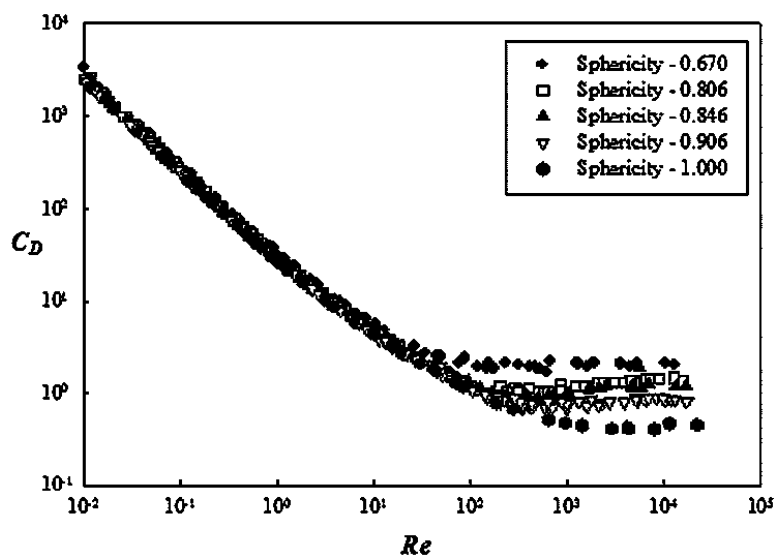
โดยที่  $a, b$  และ  $c$  เป็นค่าคงที่ และมีความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity,  $\psi$ ) อาจกล่าวได้ว่า ความเร็วของการตกตะกอนมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Drag coefficient,  $C_D$ ) กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number,  $\text{Re}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity,  $\psi$ ) ดังแสดงได้ ตามตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าคงที่  $a, b$  และ  $c$  ที่แปรเปลี่ยนตามค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity)

Sphericity degree	a	b	c
0.034	217.8	-341.5	357.9
0.069	135.9	-183.3	139.9
0.140	99.1	-14.4	25.3
0.360	50.3	-17.7	7.3
0.670	28.8	3.1	1.6
0.820	26.1	2.4	1.0
0.910	25.2	1.0	1.2
1.000	23.5	4.6	0.3

(Yow และคณะ, 2005)

หากอนุภาคที่ต้องการแยกนั้นไม่มีลักษณะเป็นทรงกลม (Non-Spherical shape) กล่าวได้ว่า เทอมสำหรับระบุรูปทรงสำหรับวัตถุที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity,  $\psi$ ) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างพื้นที่ของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของวัตถุต่อพื้นที่ของวัตถุนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงการคำนวณค่าความเร็วสุดท้ายด้วย เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการไหลของของไหลผ่านอนุภาคดังกล่าว ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ( $C_D$ ) และส่งผลทำให้ความเร็วที่ได้นั้นมีค่าลดลง ตามสมการ 2.19 โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ( $C_D$ ) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number,  $\text{Re}$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง ( $\psi$ ) ต่างๆ สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ( $C_D$ ) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number,  $Re$ ) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง ( $\Psi$ ) ต่างๆ (Yow และคณะ, 2005)

หากค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity,  $\Psi$ ) มีค่าน้อยลง (ความกลมน้อยลง) จะส่งผลทำให้ความเร็วในการตกตะกอนมีค่าน้อยลงไปด้วย เพราะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Drag coefficient,  $C_D$ ) สูงขึ้น ตามสมการที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้ชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอน 3 ชนิด คือ ทล็ก ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity,  $\Psi$ ) มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน โดยสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรงที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานในการตกตะกอนของวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดกับจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย และอาจส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนเริ่มต้นมีค่าน้อยลงก็เป็นได้

ค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity,  $\Psi$ ) จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของวัตถุหรืออนุภาคนั้นๆ ( $S$ ) ต่อพื้นที่ผิวของวัตถุหรืออนุภาคนั้นๆ ( $s$ ) (Wadell, 1935) ตามสมการที่ 2.21

$$\Psi = \frac{S}{s} \quad (2.21)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความกลมของรูปทรง (Sphericity,  $\Psi$ ) จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ

### 2.2.5 ประสิทธิภาพของการตกตะกอนในระบบเอเอส

การตกตะกอนในระบบเอเอสจัดเป็นการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone Settling) การวัดประสิทธิภาพของการตกตะกอนในระบบเอเอสจึงสามารถวัดได้จากค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity หรือ ISV) โดยที่ค่าดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการตกตะกอนของสลัดจ์ ดังนั้นถ้าสลัดจ์มีการตกตะกอนได้ดีย่อมมีค่า ISV สูง ส่วนสลัดจ์ที่ตกตะกอนได้ไม่ดีจะมีค่า ISV ต่ำ

การหาค่า ISV สามารถทำได้โดยทดลองการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นในกระบอกตวงใสและวัดระดับของจุดสูงสุดของชั้นสลัดจ์ (Solid-Liquid Interface) ที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งจะนำความสูงของชั้นสลัดจ์มาเขียนความสัมพันธ์เทียบกับเวลา เช่นเดียวกับรูปที่ 3.12 จะสังเกตได้ว่าการตกตะกอนในช่วงแรกจะมีค่าความเร็วในการตกตะกอนคงที่ เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงและเรียกว่า Initial Settling Velocity หรือ ISV เมื่อการตกตะกอนผ่านไป ช่องว่างในน้ำจะเหลือน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดหนึ่งความเร็วเริ่มต้น (ISV) จะมีค่าลดลง อาจกล่าวได้ว่าสลัดจ์ได้เริ่มเข้าไปอยู่ในระยะเปลี่ยนแปลง (Transition Zone) ซึ่งเป็นระยะที่อนุภาคบางส่วนเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากจนสัมผัสกันพอดี อัตราการตกตะกอนจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคทั้งหมดสัมผัสกันพอดี ในระยะนี้สลัดจ์จะอยู่ในระยะอัดตัว (Compression Zone) ซึ่งมีการทับถมเพื่อบีบน้ำออกจากชั้นสลัดจ์เป็นครั้งสุดท้าย ระยะอัดตัวนี้ชั้นสลัดจ์จะมีการเคลื่อนที่ช้ามาก

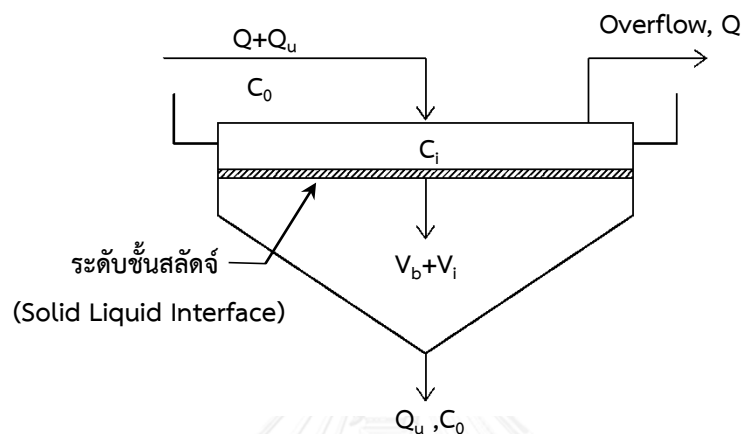
### 2.2.6 หลักการออกแบบถังตกตะกอนในระบบเอเอส

หลังจากได้ทำการศึกษาทฤษฎีกลไกของการตกตะกอนทั้ง 4 ชนิด และทฤษฎีในเรื่องต่างๆ ของระบบเอเอสแล้ว ถังตกตะกอนในระบบเอเอสจะประกอบด้วยฟล็อกชีวภาพเป็นจำนวนมาก กลไกหลักของการตกตะกอนน้ำเสียจะเกิดการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone Settling) ก่อน จากนั้นตามด้วยการตกตะกอนแบบอัดตัว (Compression Settling) โดยจะเกิดภายหลังจากที่ตะกอนตกลงมาทับถมกันแล้ว

ถังตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งตามหน้าที่ในการแยกสลัดจ์ออกจากน้ำเสียจะมีด้วยกัน 2 ประเภท คือแบ่งเป็น ถังตกตะกอนขั้นต้น (Primary Clarifier) และถังตกตะกอนขั้นที่สอง (Secondary Clarifier) ทั้งสองถังดังกล่าวจะทำหน้าที่ที่แตกต่างกัน สำหรับในระบบเอเอสจะใช้ถังตกตะกอนขั้นที่สองแยกสลัดจ์ออกจากน้ำใส

### 1) การออกแบบถังตกตะกอนชั้นที่สองด้วยวิธีฟลักซ์ของแข็ง (Solid Flux)

ดังที่กล่าวมาข้างต้น ทฤษฎีเกี่ยวกับการหาความเร็วของการตกตะกอนแบบมีอุปสรรคจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟลักซ์ของแข็ง (Solid flux) ในหัวข้อนี้ได้นำเอาทฤษฎีนี้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ของตะกอนสลัดจ์ในถังตกตะกอน  
(Water Pollution Control Federation, 1985)

จากรูปที่ 2.18 จะสามารถหาค่าต่างๆ ได้ ดังนี้

- Settling Flux หรือ Gravity Flux ;  $G_g$

$$G_g = \frac{C_i v_i}{1,000} ; \quad \text{กก./ตร.ม.-ชม.} \quad (2.22)$$

- Bulk Flux ;  $G_b$

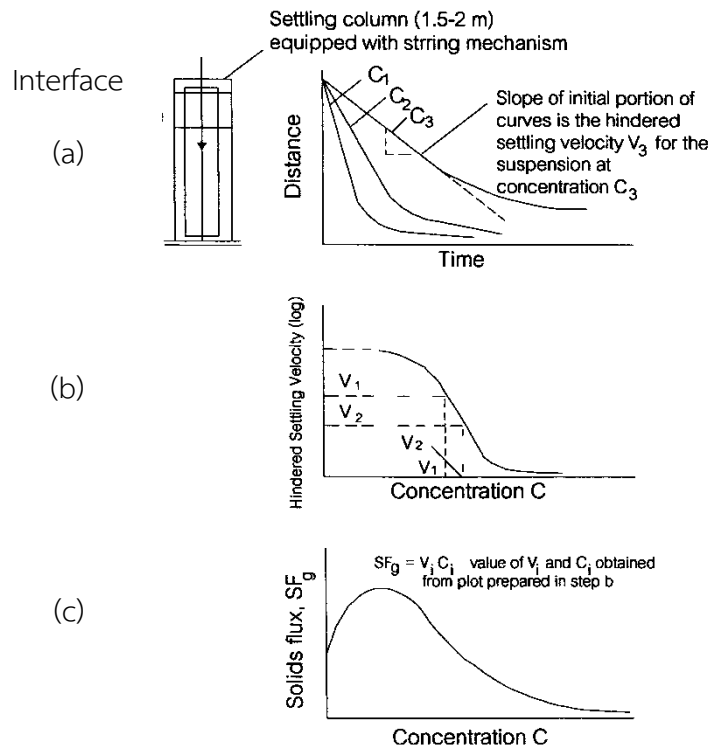
$$G_b = \frac{C_i v_b}{1,000} ; \quad \text{กก./ตร.ม.-ชม.} \quad (2.23)$$

- Total Flux ;  $G_T$

$$G_T = G_g + G_b \quad (2.24)$$

### 1.1) Settling Flux, $G_g$

ทำการหาค่า  $G_g$  จากการทดลองหาความเร็วจากการตกตะกอนแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การหา Settling Flux

(Metcalf and Eddy, 2014)

จากรูป a) การหาค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน หรือ Initial Settling Velocity (ISV) จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของระดับชั้นน้ำใสเทียบกับเวลาที่เกิดการตกตะกอนขึ้น ดังนั้นจะสามารถหาความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนได้จากความชันของเส้นโค้งบนช่วงของเส้นกราฟที่มีความโค้งน้อยที่สุด หรือกล่าวได้ว่าช่วงที่เส้นกราฟโค้งมีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นตรงมากที่สุด เนื่องจากความเร็วของการตกตะกอนมีค่าคงที่ เรียกว่า ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) ซึ่งมีความชันของกราฟ

$$\text{คำนวณได้จาก } V = \frac{S}{t}$$

โดยที่  $S$  คือ ระยะทางที่เกิดการตกตะกอน (เมตร)  
 $t$  คือ เวลาที่เกิดการตกตะกอน (วินาที)

จากรูป b) เมื่อได้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนแล้ว จึงนำค่าความเร็วที่ได้มาเขียนกราฟเทียบกับความเข้มข้นค่าต่างๆ ด้วยกราฟ log-scale เพื่อนำมาหาค่า Settling Flux

$$G_g = \frac{C_i V_i}{1,000} \quad (2.25)$$

จากรูป c) นำค่า Settling Flux จากการคำนวณในกราฟ b) มาเขียนกราฟเทียบกับความเข้มข้น จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.19 (c)

### 1.2) Bulk Flux, $G_b$

การเขียนกราฟ Bulk Flux เป็นสมการของฟังก์ชันเชิงเส้นซึ่งทำได้ง่ายกว่าการเขียนกราฟจาก Settling Flux มาก การเขียนสมการเส้นกราฟทำได้โดยใช้ความเร็วของการสูบสลัดจ์ออกจากถังตกตะกอน โดยคำนวณจากสมการ

$$v_b = \frac{Q_u}{A} \quad (2.26)$$

โดยที่  $Q_u$  คือ อัตราการสูบตะกอนออก (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)

$A$  คือ หน้าตัดท่อดูดสลัดจ์หมุนเวียน (ตารางเมตร)

จากสมการที่ (2.26) จะได้เป็น

$$v_b = \frac{G_b \times 1,000}{C_i} \quad (2.27)$$

เขียนกราฟ  $G_b$  ในแกน Y เทียบกับความเข้มข้นใน แกน X จะได้เส้น Bulk Flux

### 1.3) Total Flux, $G_T$

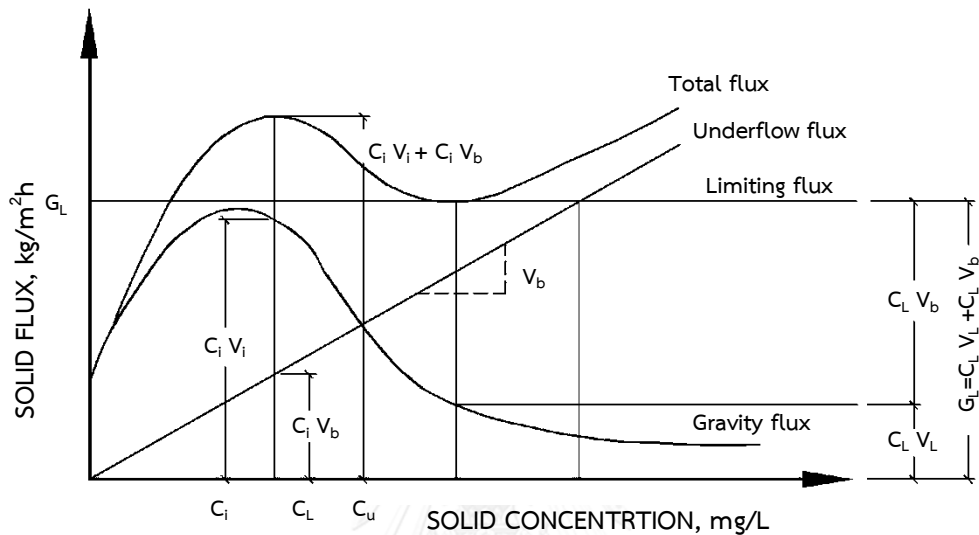
การเขียนกราฟ Total Flux ทำได้โดยนำค่าที่ได้จากกราฟ Settling Flux และ Bulk Flux มาเขียนรวมกันดังสมการ  $G_T = G_g + G_b$  เขียนกราฟและทำการหา Limiting Flux,  $G_L$  จากจุดที่กราฟ Total Flux โค้งตกลงต่ำที่สุด ซึ่งนำไปใช้เป็นค่าในการออกแบบหน้าตัดของถังตกตะกอน ซึ่งสามารถคำนวณขนาดของถังตะกอนได้จากสมการ ดังนี้

$$A = \frac{(Q + Q_u) \times C_o}{G_L \times 1,000} ; \quad \text{ตร.ม.} \quad (2.28)$$



ให้ อัตราการหมุนเวียนสลัดจ์  $\frac{Q_u}{Q} = \alpha$  ดังนั้น

$$A = \frac{(1 + \alpha)Q \times C_o}{G_L \times 1,000} ; \quad \text{ตร.ม.} \quad (2.29)$$



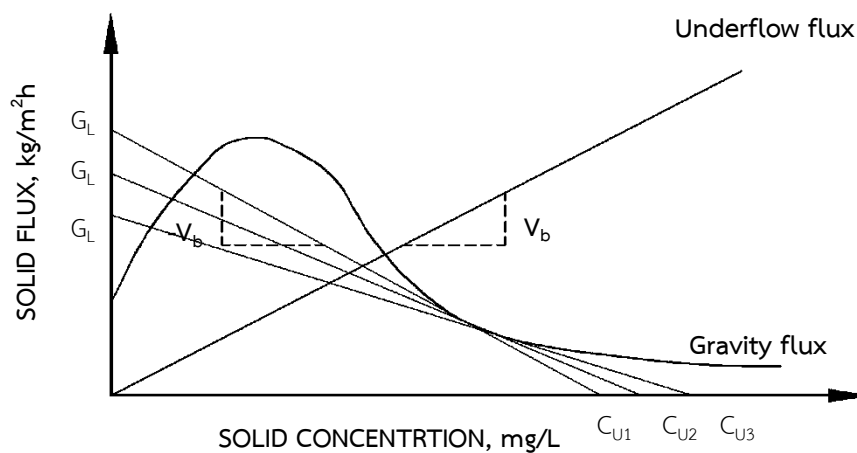
รูปที่ 2.20 การหาค่า  $G_L$  โดยวิธี Solid Flux  
(Metcalf and Eddy, 2014)

## 2) การออกแบบด้วยวิธีฟลักซ์ของแข็งประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีของโยซิโอะกะ

การหาค่า  $G_L$  ดังแสดงในรูปที่ 2.20 นั้นเป็นวิธีที่ไม่สะดวก วิศวกรจากประเทศญี่ปุ่นชื่อโยซิโอะกะได้คิดวิธีหาค่า  $G_L$  อย่างง่าย ของระดับ  $v_b$  ต่างๆ โดยวิธีออกแบบจะใช้เพียงกราฟ  $G_g$  เท่านั้น ทำให้สะดวกในการหาค่า  $G_L$  ได้อย่างง่ายดาย

วิธีของโยซิโอะกะทำได้โดยการคำนวณและลากเส้นกราฟ  $G_g$  จากนั้นลากเส้นตรงที่มีความชัน  $-v_b$  สัมผัสกับกราฟ  $G_g$  จุดตัดของเส้นตรงบนแกน  $G$  จะเท่ากับ  $G_L$  ส่วนจุดตัดบนแกน  $C$  ของกราฟเส้นตรงจะแทนค่า  $C_u$  ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสลัดจ์ที่ระบายออกจากกันถึงตกตะกอนด้วยอัตราเร็ว  $v_b$  ดังแสดงในรูปที่ 2.21

ด้วยเหตุนี้ข้อดี ก็คือ นอกจากจะหาค่า  $G_L$  ได้แล้ว ยังสามารถหาค่า  $C_u$  หรือความเข้มข้นของสลัดจ์ที่กันถึงตกตะกอนที่เหมาะสมได้ โดยการเปลี่ยนค่า  $v_b$  หรือความเร็วในการสูบสลัดจ์หมุนเวียนได้อีกด้วย



รูปที่ 2.21 การหาค่า  $G_L$  โดยวิธีของโยชิโอะกะ  
(Water Pollution Control Federation, 1985)

เนื่องจากค่า  $G_L$  เป็นค่าที่ทำให้ทราบว่า สลัดจ์สามารถเคลื่อนที่ผ่านถังตกตะกอนที่มีพื้นที่ 1 หน่วยได้ในอัตราไม่เกิน  $G_L$  หน่วยน้ำหนักต่อเวลา ดังนั้นถ้าทราบว่าสลัดจ์เข้าสู่ถังตกตะกอนในอัตราเท่าใด ก็จะสามารถคำนวณหาพื้นที่ของถังตกตะกอนที่ต้องการได้จาก

$$A = \frac{L_0}{G_L} \quad (2.30)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่ผิวของถังตกตะกอน  
 $L_0$  คือ มวลของสลัดจ์ที่เข้าถังตกตะกอนต่อเวลา

### 3) ค่ามาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนขั้นที่สอง

ค่ามาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบถังตกตะกอนขั้นที่สอง แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ โดยอ้างอิงมาจากหนังสือ Wastewater Engineering Treatment and Resource, Metcalf and Eddy, International Edition 2014. ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการนำไปใช้ เพื่อออกแบบถังตกตะกอนในระบบเอเอส

โดยค่าอัตราการน้ำล้น (Overflow Rate) ในเทอม  $Q/A$  และค่าภาระของแข็ง (Solid Loading Rate) มีความสำคัญในการออกแบบถังตกตะกอน โดยที่อัตราภาระของแข็งสามารถหาได้จากปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เข้าถังน้ำใสหารด้วยพื้นที่ผิวของถัง ส่วนอัตราการน้ำล้นสามารถหาได้จากอัตราไหลของน้ำเสียเข้าระบบ (หรือเท่ากับอัตราไหลของน้ำออกของถังตกตะกอนขั้นที่สอง) หารด้วยพื้นที่ผิวของถัง

ตารางที่ 2.2 อัตราน้ำล้นผิว, ภาระบรรทุกของแข็ง และความลึกสำหรับใช้ในการออกแบบ  
ถังตกตะกอนชั้นที่สอง

รูปแบบกระบวนการบำบัด	อัตราน้ำล้นผิว (ลบ.ม./ตร.ม.-วัน)		ภาระบรรทุกของแข็ง (กก./ตร.ม.-ชม.)		ความ ลึก (เมตร)
	Average	Peak	Average	Peak	
ถังตกตะกอนตามหลังถังเติมอากาศใน ระบบเอเอสทุกประเภท (ไม่รวมระบบ เอเอสแบบเติมอากาศยี่ตเวลา)	16-28	36-56	4-6	10	4.0- 5.5
ถังตกตะกอนตามหลังถังคั้ดพันธุ์ และ ระบบกำจัดธาตุอาหาร	24-32	40-64	5-8	10	4.0- 5.5
ถังตกตะกอนตามหลังถังเติมอากาศใน ระบบเอสแบบเติมอากาศยี่ตเวลา	8-16	24-32	1.0-5	8	4.0- 5.5

(Metcalf and Eddy, 2014)

ตารางที่ 2.3 ค่ามาตรฐานที่ใช้ในการเลือกขนาดถังตกตะกอนชั้นที่สอง

รายการ	ช่วงค่า	ค่าทั่วไป
ถังแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า		
ความลึกน้ำ, เมตร	3 – 4.9	4.3
ความยาว, เมตร	15 – 90	24 – 40
ความกว้าง, เมตร	3 – 24	4.9 – 9.8
ความเร็วใบกวาดสลัดจ์, เมตรต่อนาที	0.6 – 1.2	0.9
ถังแบบกลม		
ความลึกน้ำ, เมตร	3 – 4.9	4.3
เส้นผ่านศูนย์กลาง, เมตร	3 – 60	12 – 45
ความชันพื้นถังตกตะกอน, มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร	1/16 – 1/6	1/12
ความเร็วใบกวาดสลัดจ์, เมตรต่อนาที	0.02 – 0.05	0.03

(Metcalf and Eddy, 2014)

## 2.3 ปัญหาการไม่จมตัวของสลัดจ์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส

ระบบบำบัดน้ำเสียเอเอส (Activated Sludge) ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยระบบเอเอสจะสามารถบำบัดน้ำเสียได้โดยการใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นอาหารเลี้ยง จุลินทรีย์ต่างๆ ที่อาศัยอยู่ในถังเติมอากาศ สำหรับถังตกตะกอนจะทำหน้าที่แยกเซลล์จุลินทรีย์และสารแขวนลอยอื่นๆ ออกจากน้ำเสีย ทำให้ได้น้ำทิ้งที่ใสและมีความสะอาดจนสามารถระบายทิ้งได้

ถ้าหากถังตกตะกอนไม่สามารถแยกสารแขวนลอยต่างๆ ได้ น้ำทิ้งก็就会有ความสกปรกหลุดออกไปจากระบบเอเอสมาก ฉะนั้นจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบจึงต้องมีความสามารถในการตกตะกอนได้ดี จึงจะสามารถแยกสารแขวนลอยได้ไม่ยากจนเกินไป อย่างไรก็ตาม บางครั้งจุลินทรีย์ที่เลี้ยงไว้ตกตะกอนได้ช้ามาก จนทำให้ถังตกตะกอนไม่อาจแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำได้ เป็นสาเหตุให้น้ำทิ้งมีความขุ่นสูงและสกปรกเกินกว่าระบายทิ้งได้ กรณีที่ร้ายแรงที่สุดของจุลินทรีย์ที่ตกตะกอนช้าได้แก่ การเกิดโรคสลัดจ์ไม่จมตัว (Sludge Bulking) จากรายงานพบว่าโรงบำบัดน้ำเสียจากชุมชนมีปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวถึงร้อยละ 40-50 (สุรพล สายพานิช, 2528) ดังนั้นโรคสลัดจ์ไม่จมตัวเกิดขึ้นถึงขั้นรุนแรงแล้ว ระบบเอเอสมีกลิ่นเหม็นอย่างสิ้นเชิง

สลัดจ์ไม่จมตัว เกิดจากสภาวะที่จุลินทรีย์แบบเป็นเส้นใยที่มีปริมาณมากเกินไปมวลจุลินทรีย์ของระบบเอเอส จุลินทรีย์แบบเส้นใยในระบบบำบัดจะเกิดการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ มีลักษณะฟูโป่ง และอัดตัวกันแบบหลวมๆ ซึ่งกลุ่มจุลินทรีย์นี้มีน้ำหนักเบาไม่สามารถจมตัวตกตะกอน ผลที่เกิดขึ้นคือชั้นสลัดจ์ในถังตกตะกอนจะสะสมตัวและสูงขึ้นจนถึงขอบเวียร์น้ำล้น (Overflow Weir) และในที่สุด จะล้นออกไปกับน้ำทิ้ง และทำให้น้ำทิ้งที่ออกจากถังตกตะกอนมีความสกปรกสูง การบำบัดน้ำเสียจึงไม่ได้ผลดีเท่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้การสูญเสียสลัดจ์ (ที่หลุดไปพร้อมกับน้ำทิ้ง) ยังทำให้ไม่สามารถควบคุมปริมาณสลัดจ์ของระบบ (เท่ากับการควบคุมอายุสลัดจ์) ให้มีค่าอยู่ในระดับที่ต้องการได้ หากมีการสูญเสียสลัดจ์อย่างต่อเนื่อง ระดับเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งระบบเอเอสไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้

จุลินทรีย์แบบเส้นใยที่เกิดในระบบบำบัด ยังคงมีความสามารถในการบำบัดได้เหมือนปกติ การประสานตัวกันเองของเส้นใยจุลินทรีย์ช่วยทำให้ได้น้ำใสมากในระหว่างการตกตะกอน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการจมตัวของสลัดจ์ชนิดนี้มีอัตราช้ามาก ทำให้ชั้นน้ำใสมีความหนาน้อยมาก เช่น เมื่อปล่อยให้ตกตะกอนในกระบอกตวงขนาด 1,000 มล. นาน 30 นาที ชั้นน้ำใสอาจสูงเพียง 10 มล. ส่วนชั้นสลัดจ์สูงประมาณ 980 หรือ 990 มล. (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) จุลินทรีย์แบบเส้นใยที่พบในระบบเอเอสมีหลายประเภท เช่น แบคทีเรียแบบเส้นใย แอคทีโนไมซีส และฟังไจ ลักษณะการทำให้จุลินทรีย์แบบเส้นใยเจริญเติบโตมีมากมาย และแปรเปลี่ยนไปตามระบบบำบัดแต่ละแห่ง

### 2.3.1 สาเหตุของการเกิดสลัดจ์ไม่จมตัว

ปัญหาการไม่จมตัวของสลัดจ์ในระบบเอเอสแสดงว่า จุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าจุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อก ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ (ต่อลาภ ชัยวัฒน์, 2539)

- 1) สภาวะแวดล้อมในถังปฏิกริยา
- 2) ชนิดของสารอาหารในน้ำเสีย
- 3) Organic Loading หรือค่าอายุตะกอน
- 4) ลักษณะการไหลทางชลศาสตร์ในถังปฏิกริยา

#### 1) สภาวะแวดล้อมในถังปฏิกริยา

##### 1.1 ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำ

ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO) ในถังเติมอากาศควรมีค่าที่เหมาะสมตามปกติแล้วควรมีค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำอย่างน้อย 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันการเกิดจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย จากงานวิจัยของ Palm และคณะ (1980) ได้มีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในถังเติมอากาศกับค่า F/M เพื่อแสดงผลของการเกิดขึ้นหรือไม่ของปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในรูปภาพที่ 2.22 ค่าความเข้มข้นออกซิเจนควรมีเพียงพอให้สอดคล้องกับค่า F/M ที่จะเพิ่มขึ้น มิฉะนั้นเมื่อค่า F/M เพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้ทำการเพิ่มค่าความเข้มข้นออกซิเจนที่ละลายน้ำในระบบเอเอสก็เกิดแนวโน้มให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวขึ้น เมื่อพิจารณาจากรูปภาพแล้ว พื้นที่ที่แลเงาเป็นบริเวณที่เกิดสลัดจ์ไม่จมตัว ส่วนที่อยู่ใต้แนวเส้นที่ปลอดภัยสลัดจ์ไม่จมตัวจะเป็นบริเวณที่เหมาะสมกับการควบคุมระบบเอเอส ซึ่งไม่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว

##### 1.2 ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นอาหารเสริมหลักที่จำเป็นสำหรับจุลินทรีย์ในการสร้างเซลล์ ในทางปฏิบัติมักถือให้อัตราส่วน BOD : N : P ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 100 : 5 : 1 มิฉะนั้นอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยได้ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

##### 1.3 ค่าพีเอช

ค่าพีเอชที่เหมาะสม ควรมีค่าใกล้เคียง 7 คือสภาพเป็นกลางมากที่สุด หากค่าพีเอชต่ำจะทำให้ฟองที่เป็นเส้นใยเจริญเติบโต และก่อให้เกิดปัญหาการไม่จมตัวของสลัดจ์ได้

#### 1.4 ภาวะ F/M

ค่า F/M ควรมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.2–0.45 กรัม.บีโอดี/กรัม.เอ็มแอลเอสเอส.วัน จึงจะป้องกันปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ ถ้า F/M น้อยกว่า 0.2 และมีมากกว่า 0.45 จะมีแนวโน้มเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543)

#### 1.5 เหล็ก

เหล็กเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นและสำคัญในกระบวนการชีวเคมีของสิ่งมีชีวิตที่ใช้ ออกซิเจนในกระบวนการเอเอสต้องมีอัตราส่วน BOD : Fe ไม่ต่ำกว่า 200 : 1 ในทำนองเดียวกันหาก มีสารประกอบเหล็กมากเกินไปก็อาจทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยที่ใช้ธาตุเหล็กเป็นอาหารหลัก เจริญเติบโตขึ้นเป็นจำนวนมากก็ได้ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538)

#### 1.6 ซัลไฟด์

การที่มีซัลไฟด์ (Sulfides) อยู่ในน้ำเสียเป็นปริมาณสูงอาจทำให้เกิดสลัดจ์ไม่จมตัวได้ เนื่องจากมีจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยสามารถใช้ซัลไฟด์เป็นอาหาร เช่น *Thiotrix* และ *Beggiatoa sp.* การแก้ปัญหาที่เกิดจากสาเหตุนี้สามารถทำได้โดยการนำน้ำเสียมาเติมอากาศเพื่อไล่ซัลไฟด์ออกเสียก่อน หรืออาจใช้กระบวนการกรองจุลินทรีย์ (Tricking Filter) แบบ High rate บำบัดน้ำเสียขั้นแรก เพื่อให้ ออกซิไดส์ซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟตก่อนเข้าระบบบำบัดแบบเอเอส

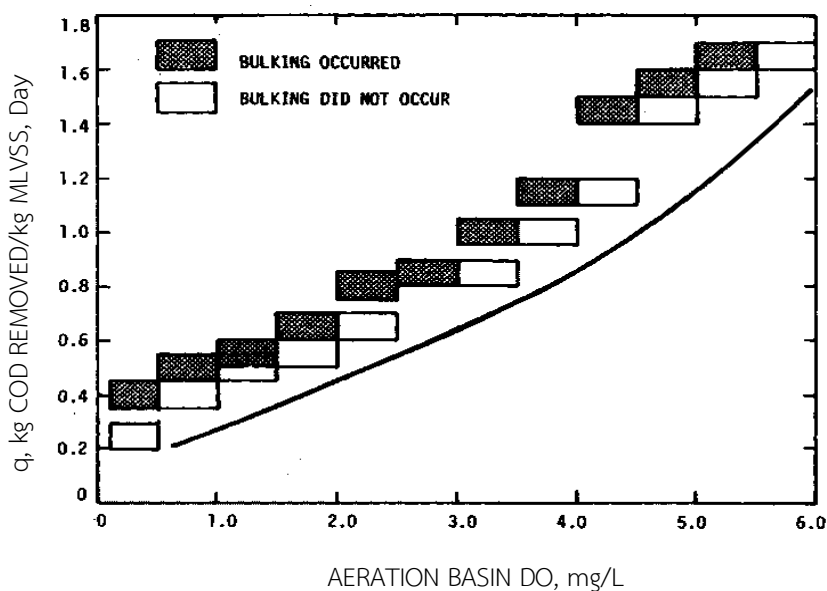
#### 1.7 การเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว

การเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว (Shock load) ทั้งปริมาณการไหลและความเข้มข้นซึ่งหากไม่ได้รับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถรับสถานการณ์เช่นนี้แล้ว มัก ่อ้อำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใย สาเหตุอาจเนื่องจากจุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อกไม่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ หรือการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์อย่างรวดเร็วมี ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอื่นๆ และเป็นสาเหตุต่อเนื่องกันก็อาจเป็นไปได้ เช่น ทำให้ออกซิเจนในน้ำต่ำลง มีค่าอาหารเสริมไม่เพียงพอ เป็นต้น วิธีแก้ไขทำได้โดยการสร้างบ่อพักน้ำเสีย เพื่อปรับสภาพให้มีค่าไม่ เปลี่ยนแปลงมากนักแล้วจึงส่งไปในถังเติมอากาศ

#### 1.8 สารพิษ

การที่มีสารพิษ เช่น โลหะหนักปนเข้ามาในน้ำเสียเป็นปริมาณไม่มากนักจะทำให้ จุลินทรีย์ที่ทนต่อสารพิษชนิดนั้นได้ไม่ตาย ส่วนจุลินทรีย์ที่เหลือก็เจริญเติบโตขึ้นเป็นอัตราส่วนที่เพิ่ม มากขึ้น เช่น การมีสารประกอบโครเมียมอยู่ในน้ำเสียจะทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยเจริญเติบโตได้ ดีกว่าจุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อก แต่ถ้าใส่สารเคมีที่สารออกซิไดส์อย่างแรง เช่น คลอรีนหรือไฮโดรเจน

เปอร์ออกไซด์ ลงไปในน้ำกลับพบว่าจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยสามารถทนความเป็นพิษได้น้อยกว่าและตายก่อนจุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อก จึงเป็นวิธีแก้ปัญหาการไม่จมตัวของสลัดจ์แบบเฉพาะหน้าวิธีหนึ่ง



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำกับค่า F/M ที่มีผลต่อการเกิดสลัดจ์ไม่จมตัว (Palm และคณะ, 1980)

## 2) ชนิดของสารอาหารในน้ำเสีย

ในระบบแอสที่ใช้กำจัดน้ำเสียที่มีส่วนประกอบซับซ้อน อาทิเช่น น้ำเสียจากที่อยู่อาศัย น้ำเสียจากโรงงานปลากระป๋อง เป็นต้น มักไม่เกิดปัญหาการไม่จมตัวของสลัดจ์หรือถ้าเกิดก็มักไม่รุนแรง และเกิดขึ้นเป็นครั้งคราวซึ่งหายได้เอง ส่วนระบบแอสที่เลี้ยงด้วยน้ำเสียที่เป็น แป้ง น้ำตาล หรือสารอาหารที่ย่อยได้ง่ายไม่มีสารอาหารประเภทอื่นมักจะเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวอย่างรุนแรงและถาวร

## 3) Organic Loading

Organic Loading คืออัตราส่วนอัตราการให้สารอาหารต่อมวลจุลินทรีย์ (Food to Microorganism ratio, F/M) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอายุตะกอน (Sludge age) การเปลี่ยนค่า Organic Loading หรือค่าอายุตะกอน จะทำให้อัตราส่วนของจุลินทรีย์แต่ละชนิดที่อยู่ในระบบแอสเปลี่ยนแปลงไป เช่น โพรโตซัวจะมีอัตราส่วนมากขึ้นถ้ามีอายุตะกอนมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการตกตะกอนของตะกอนจุลินทรีย์

กระบวนการเอเอสที่ได้รับสารอาหารมากเกินไปที่จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อกจะใช้หมด สารอาหารที่เหลือจะถูกจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยใช้ ดังนั้นระบบที่ได้รับ Organic Loading มากเกินไป หรือค่า F/M สูงเกินไป หรืออายุตะกอนต่ำเกินไปจึงอาจเกิดปัญหาไม่จมตัวของสลัดจ์

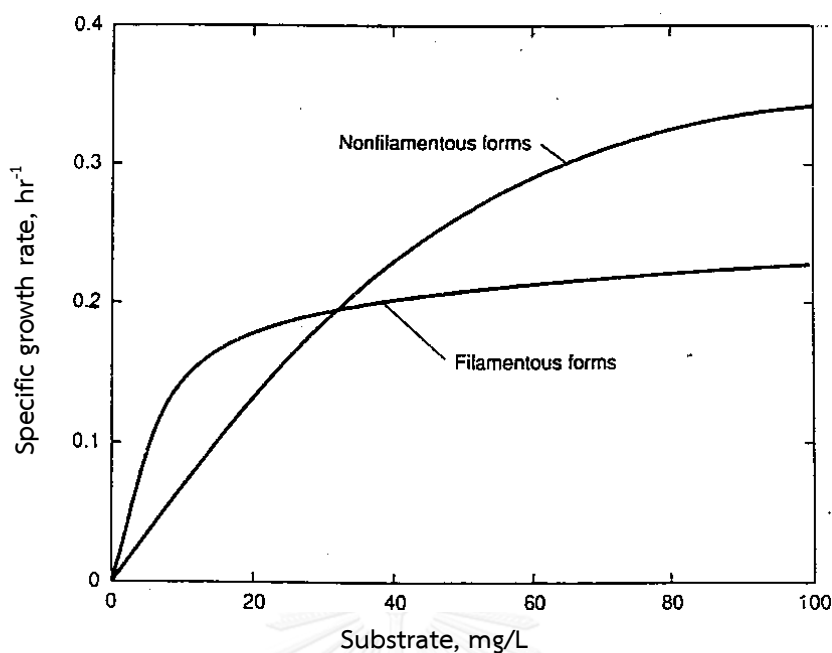
#### 4) ลักษณะการไหลทางชลศาสตร์ในถังปฏิกริยา

ลักษณะการไหลทางชลศาสตร์ในถังปฏิกริยา ก่อให้เกิดรูปแบบของระบบเอเอสได้หลายแบบ และรูปแบบแต่ละชนิดจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพ และการจมตัวของสลัดจ์ ลักษณะการไหลทางชลศาสตร์ในถังปฏิกริยาแบ่งออกเป็นสองแบบใหญ่ๆ ได้แก่ แบบกวนสมบูรณ์ (Completely mixed) และแบบไหลตามแนวยาว (Plug flow) จากการศึกษาในอดีตทั้งจากในห้องปฏิบัติการและจากโรงบำบัดน้ำเสีย มีข้อมูลมากพอที่จะกล่าวได้ว่า การไหลแบบกวนสมบูรณ์ที่มีการป้อนน้ำเสียเข้าถังปฏิกริยาอย่างต่อเนื่อง เป็นสถานะที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย และเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในถังตกตะกอน

จากผลการทดลอง Chudoba (1985) ดังแสดงในรูปที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของจุลินทรีย์แบบเส้นใยและจุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อกในระบบบำบัดขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับสถานะความเข้มข้นของสารอาหาร อธิบายได้ว่า โดยปกติจุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อกมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าและกินอาหารได้เร็วกว่าแบบเส้นใย ยกเว้นที่สถานะความเข้มข้นของสารอาหารต่ำ ดังนั้นแล้วในยามปกติ จุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อกจะมีจำนวนมาก ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องการตกตะกอนช้า แต่ถ้ายามใดที่จุลินทรีย์แบบเส้นใยเจริญเติบโตได้เร็วกว่า (ความเข้มข้นของสารอาหารหรือ Substrate ต่ำ) ก็จะเกิดสถานะที่ส่งเสริมให้เกิดปัญหาการจมตัวไม่ลงของสลัดจ์ได้

จากปัจจัยข้างต้นหรือหลายอย่างที่เกิดขึ้น สามารถเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ทั้งนั้น ในบางกรณีปัจจัยต่างๆ ได้ถูกควบคุมอย่างดีก็พบว่าสามารถเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม จากการทดลองของ Chudoba (1985) แสดงให้เห็นว่าถ้าความเข้มข้นของสารอาหาร (Substrate) มีค่าโดยประมาณไม่ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงแม้ว่าระบบเอเอสจะทำงานได้ดีเพียงใด ก็ทำให้จุลินทรีย์แบบเส้นใยเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบบสร้างฟล็อก และสามารถเกิดสลัดจ์ไม่จมตัวได้เช่นกัน





รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตโดยทั่วไปของจุลินทรีย์แบบเส้นใย และจุลินทรีย์แบบไม่ใช่เส้นใยกับความเข้มข้นของสารอาหาร (Chudoba, 1985)

จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยที่มีปัญหาต่อการทำงานในระบบเอเอส ได้แก่ พวกจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย (*Filamentous microorganisms*) มีลักษณะเป็นเส้นๆ ถ้าส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะดูคล้ายๆ กับเส้นผม ทำให้ยากแก่การตกตะกอนในถังตกตะกอน ตารางที่ 2.4 ได้แสดงสาเหตุของการเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว และชนิดของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว

ในบางครั้งการเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวอาจจะไม่ได้เกิดจากจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย แต่อาจเกิดจากการแตกออกของฟล็อก กลายเป็นพวก *Zoogloal* หรือ *viscous bulking* ซึ่งโครงสร้างของฟล็อกได้ถูกเปลี่ยนแปลงโดยมีการเกิด Extra-Cellular Polymer (ECP) ผลทำให้น้ำสลัดจ์มีลักษณะคล้ายวุ้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543)

ตารางที่ 2.4 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยที่ก่อให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว และสาเหตุของการเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว

ชนิดของจุลินทรีย์เส้นใย	สาเหตุของปัญหา
<i>Sphaerotilus natans</i> , <i>Halsicomenobacter hydrossis</i> , <i>Microthrix parvicella</i> , พวก 1701	ค่าออกซิเจนละลายต่ำ (Low DO)
<i>M. parvicella</i> , พวก 0041, 0092, 0675, 1851	Low F/M
<i>H. hydrossis</i> , <i>Nocardia</i> spp., <i>Nostocoida limicola</i> , <i>S. natans</i> , <i>Thiothrix</i> spp., พวก 021N, 0914	Complete mix reactor conditions
<i>Beggiatoa</i> , <i>Thiothrix</i> spp., พวก 021N, 0914	น้ำเสียเน่าดำ (Septic wastewater /sulfide available)
<i>S. natans</i> , <i>Thiothrix</i> spp., พวก 021N, possible <i>H. hydrossis</i> , พวก 0041, 0675	สภาวะขาดธาตุอาหาร
Fungi	Low pH

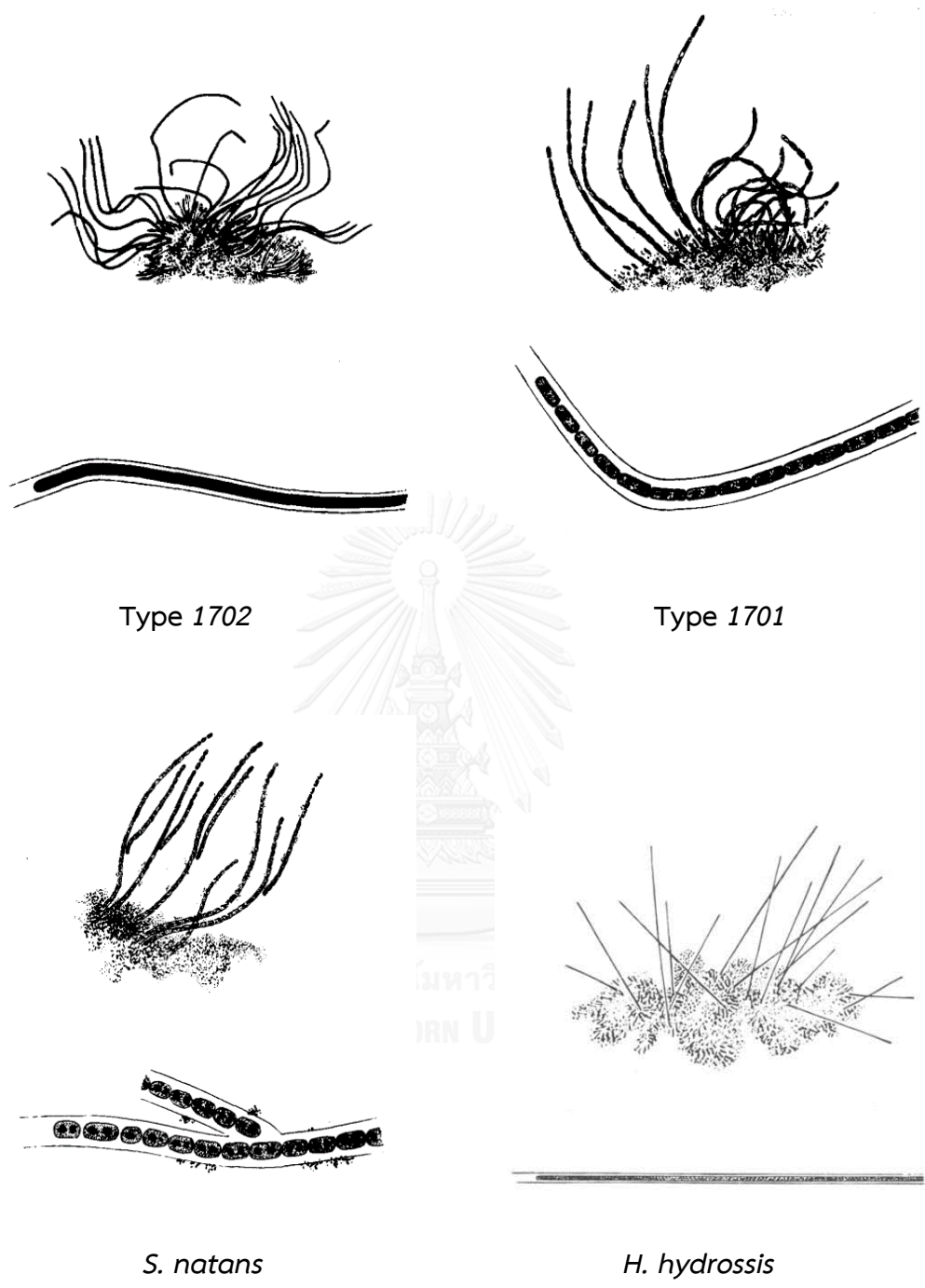
(Metcalf and Eddy, 2014)

### 2.3.2 ชนิดของจุลินทรีย์เส้นใยที่พบอยู่ในระบบเอเอส

นับตั้งแต่ได้มีการค้นพบระบบเอเอสเพื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น จุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยชนิดแรกที่เป็นปัญหาเกิดสลัดจ์ไม่จมตัว คือ *Sphaerotilus natans* ดังปรากฏในผลการทดลองที่ผ่านมา ต่อมาพบมีจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยอีกหลายชนิดในระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ เช่น *Beggiatoa trichomes*, *Bacillus*, *Blue green algae* นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ที่ไม่ใช่แบคทีเรียแต่มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ก่อปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว เช่น *Geotrichum candidum* หรือ *Leptomitus* spp. ซึ่งเป็นพวกฟังไจ พวกนี้ชอบอยู่ในน้ำที่มีค่าพีเอชต่ำ (Metcalf and Eddy, 2014)

พวกจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่พอที่จำแนกตามลักษณะรูปร่างของมันได้ 7 กลุ่ม ดังนี้

1. พวกมีเกราะหุ้ม, แกรมลบ (Sheath, Gram negative bacteria) พวกนี้จะมีลักษณะเส้นใยตรงหรือโค้งเล็กน้อย ได้แก่ พวก *Sphaerotilus natans*, พวก 1701, พวก 1702, พวก 0321 และ *Haliscomeobacter hydrolysis* ตามรูปที่ 2.24
2. พวกมีเกราะหุ้ม, แกรมบวก (Sheath-forming, Gram positive) มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือโค้งเล็กน้อย ไม่มีกิ่งก้านสาขา พวกนี้ได้แก่ พวก 0042, พวก 0675, พวก 1851 ตามรูปที่ 2.25
3. พวกที่ไม่มีเกราะหุ้ม, เส้นใยคดโค้ง เป็นพวกจุลินทรีย์หลายเซลล์คล้ายพวกสาหร่ายแกมมน้ำเขียว (Sheathless, Curled, Multicellular bacteria, resembling blue green algae) พวกนี้ได้แก่ *Cyanophyceae* พวกนี้จะไม่มีการกิ่งก้านสาขา เห็นเป็นเซลล์หลายๆ เซลล์มาเรียงต่อกันเป็นเส้นเห็นได้อย่างชัดเจน พวกนี้ได้แก่ พวก 021N, *Nostocoida* และ *Cynaophyceae* ตามรูปที่ 2.26
4. พวกที่เป็นเส้นใยเล็กบาง งอโค้งขดเป็นวง (Slender coiled bacteria) พวกนี้ไม่มีกิ่งก้านสาขา บางครั้งก็ลอยเป็นอิสระ พวกนี้ได้แก่ *Microtrix parvicella* ตามรูปที่ 2.27
5. พวกที่เป็นเส้นใยยาวตรง เป็นพวกหลายเซลล์ต่อกัน เป็นแกรมลบ (Straight, Multicellular, Gram negative bacteria) พวกนี้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกต่อเรียงกันเป็นปล้องๆ ไม่มีกิ่งก้านสาขา เช่น พวก 0803, พวก 1091, พวก 0092 ตามรูปที่ 2.28
6. พวกที่มีจุดเล็กๆ ตามเซลล์ (Filamentous bacteria motile by griding action) จุลินทรีย์พวกนี้มีเส้นใยค่อนข้างจะคดงอ มีก้ามละก้นเป็นจุดเล็กๆ อยู่ในเซลล์ พวกนี้เป็นพวกแกรมบวก เช่น พวก *Beggiation spp.* เป็นต้น ตามรูปที่ 2.29
7. พวกอื่นๆ (Additional types) พวกนี้ไม่มีจำแนกอยู่ในพวกไหน เช่นพวกที่มีรูปร่างคล้าย *Streptococcus* หรือพวกฟังไจ ก็จัดอยู่ในพวกนี้ ตามรูปที่ 2.30



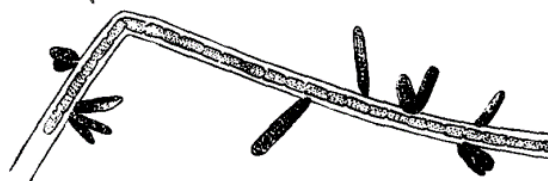
Type 1702

Type 1701

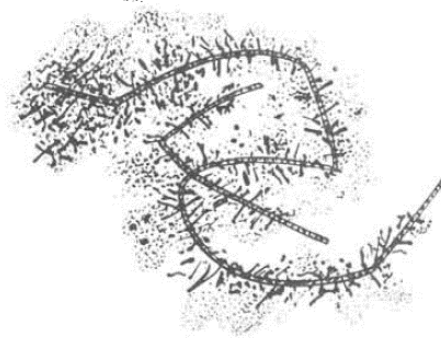
*S. natans*

*H. hydrossis*

รูปที่ 2.24 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 1  
(Eikelboom, 1975)



Type 1851



Type 0041

รูปที่ 2.25 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 2

(Eikelboom, 1975)

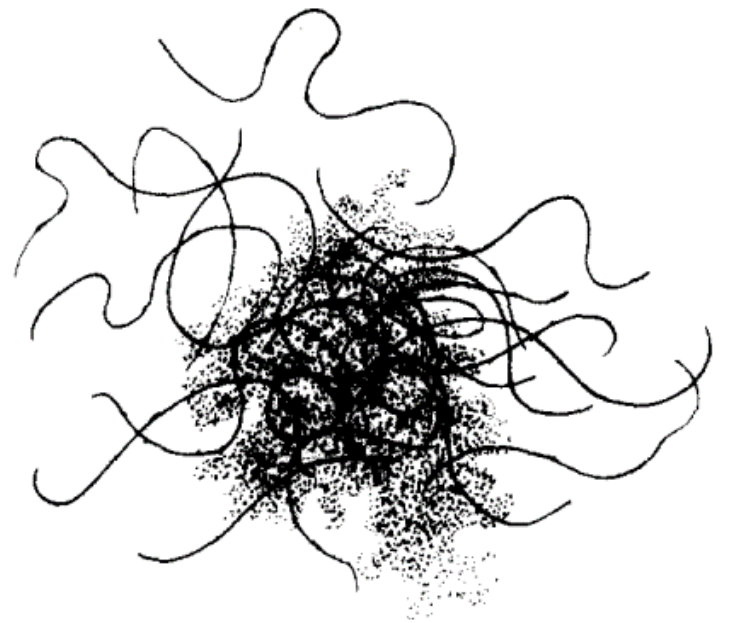


Type 021N



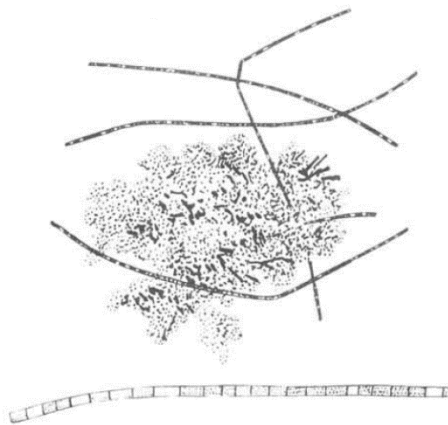
*N. limicola*

รูปที่ 2.26 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 3  
(Eikelboom, 1975)

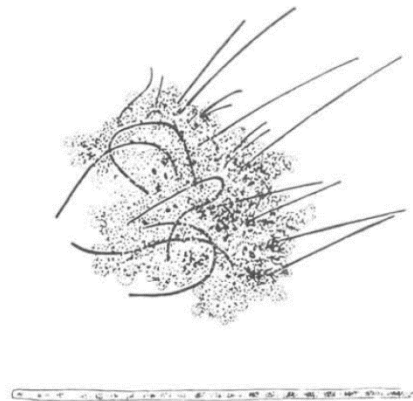


CHULALONGKORN UNIVERSITY *M. parvicella*

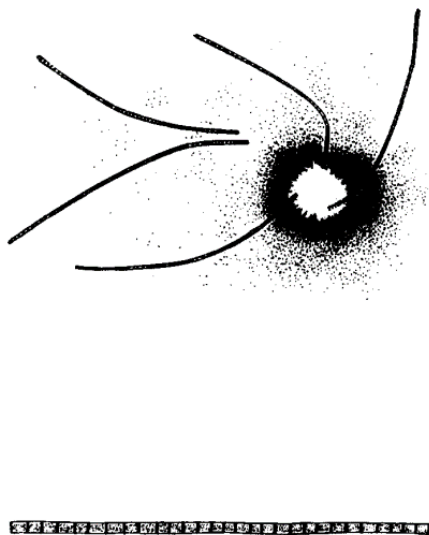
รูปที่ 2.27 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 4  
(Eikelboom, 1975)



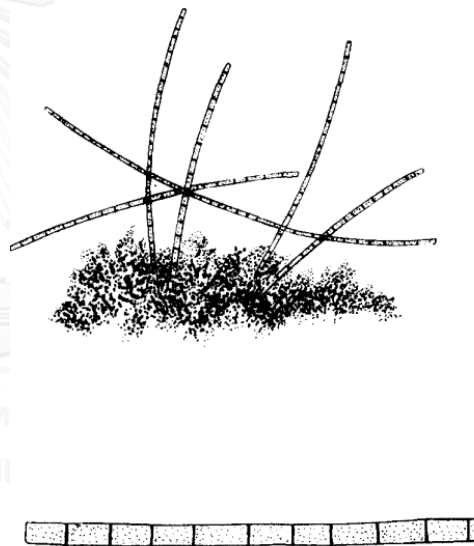
Type 1091



Type 0092



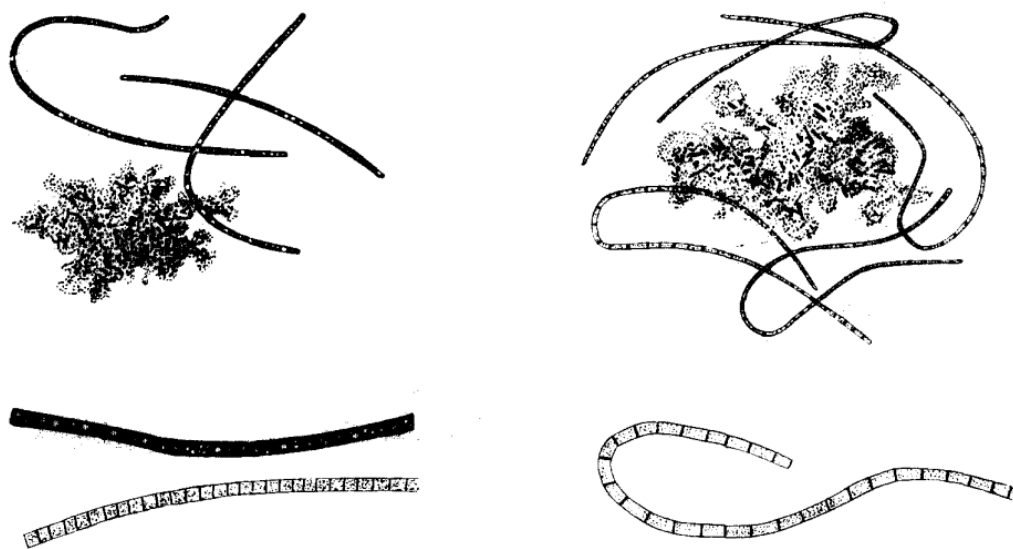
Type 0803



Type 0961

รูปที่ 2.28 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 5  
(Eikelboom, 1975)





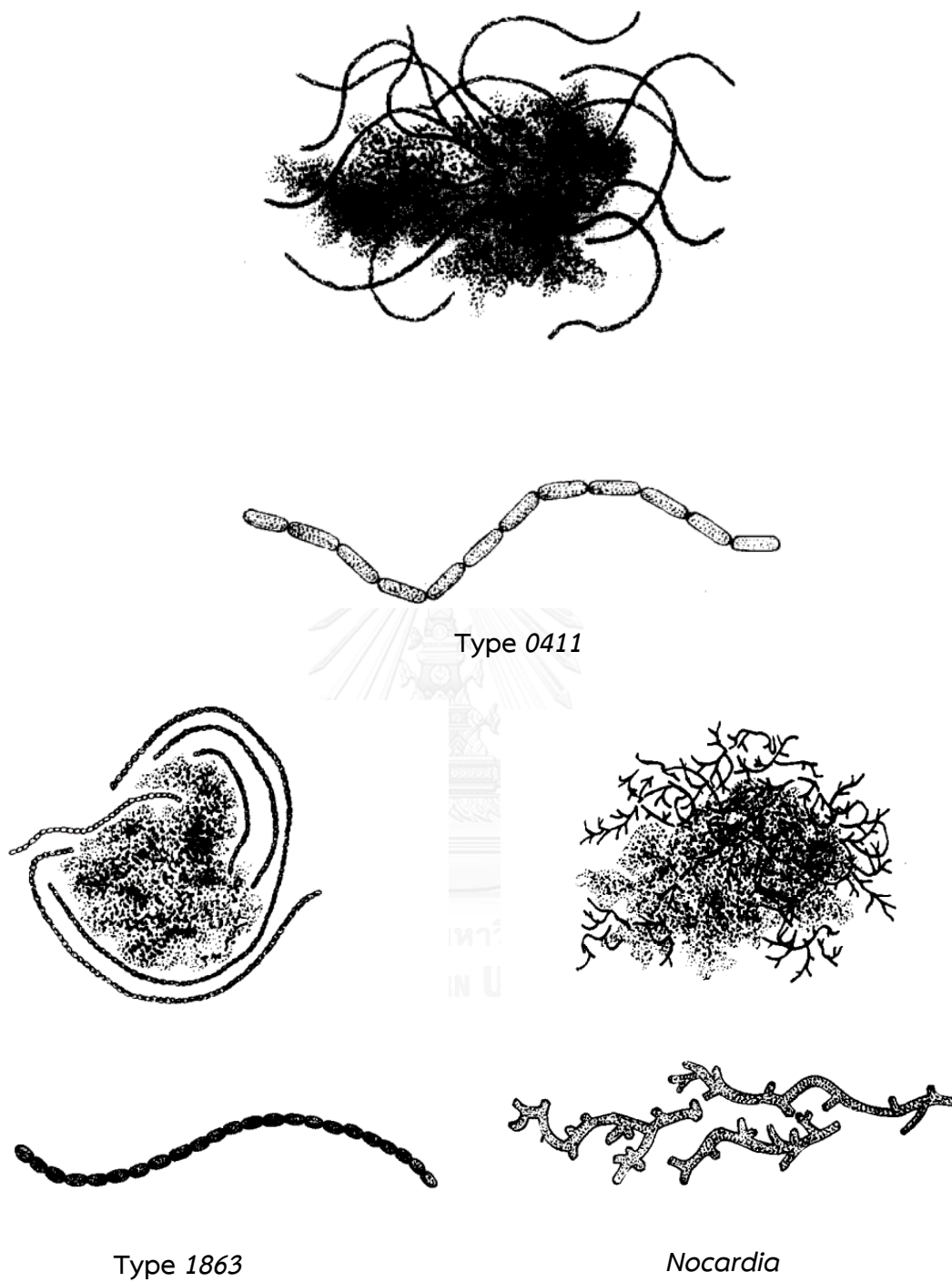
Type 0914

Type 1111



Type 1501

รูปที่ 2 29 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 6  
(Eikelboom, 1975)



รูปที่ 2.30 จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยกลุ่มที่ 7  
(Eikelboom, 1975)

### 2.3.3 การวัดความสามารถในการจมตัวของสลัดจ์

ค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (Sludge volume index, SVI) เป็นค่าที่แพร่หลายในการบอกถึงความสามารถในการจมตัวของระบบเอเอส ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$SVI = \frac{SV30 \times 1,000}{MLSS} \quad (2.31)$$

โดยที่  $SVI$  = ดรรชนีปริมาตรตะกอน (มิลลิลิตรต่อกรัม)  
 $SV30$  = ปริมาตรตะกอน (วัดเป็นหน่วยมิลลิลิตร) ที่ทิ้งให้ตกตะกอนนาน 30 นาที ในกระบอกตวงขนาด 1,000 มิลลิลิตร  
 $MLSS$  = น้ำหนักของตะกอนจุลินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

โดยทั่วไปสลัดจ์ที่เป็นปกติควรมี SVI ประมาณ 75 ถึง 150 มิลลิลิตรต่อกรัม ถ้าสลัดจ์มี SVI ต่ำกว่า 75 มิลลิลิตรต่อกรัม มักเป็นสลัดจ์ที่ประกอบด้วยเซลล์อิสระซึ่งแม้ว่าตกตะกอนได้รวดเร็วแต่ทั้งสลัดจ์ขุ่นไว้ในน้ำเป็นอันมาก แต่ถาสลัดจ์มี SVI สูงกว่า 200 มิลลิลิตรต่อกรัม มักเป็นสลัดจ์ที่มีปัญหาจมตัวไม่ลง (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542)

อย่างไรก็ตามค่าดรรชนีปริมาตรตะกอนนี้ เหมาะสำหรับการใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียแต่ละแห่งเท่านั้น และไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้ในแต่ละแห่งมาเปรียบเทียบกันได้อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าดรรชนีปริมาตรตะกอนเป็นค่าที่ขึ้นกับความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ (MLSS) ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันในการวัดแต่ละครั้ง และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำงานได้ในกรณีที่ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศต่ำกว่า 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ ความสามารถในการจมตัวของสลัดจ์จึงไม่ควรดูจากค่าดรรชนีปริมาตรตะกอนเพียงอย่างเดียว ควรจะตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์และมีการดูค่า SV30 ประกอบด้วย

วิธีวินิจฉัยอื่นๆ ได้แก่ การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์และการดูค่า SV30 ในกระบอกตวงใสขนาด 1,000 มิลลิลิตร ถ้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายปกติ หากพบแบคทีเรียเส้นใยขนาดเล็กจำนวนมากก็มีแนวโน้มว่าระบบเอเอสจะอาจเกิดโรคสลัดจ์จมตัวไม่ลง ส่วน SV30 ซึ่งเป็นค่าปริมาตรของสลัดจ์ ที่ทิ้งให้ตกตะกอนนาน 30 นาที ในกระบอกตวง 1,000 มิลลิลิตร หากสลัดจ์ที่เป็นโรคจมไม่ลงตัวจะตกตะกอนน้อย เช่น มีค่า SV30 ประมาณ 980 หรือ 990 มิลลิลิตรต่อลิตร หรือมากกว่า

### 2.3.4 การแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอสในปัจจุบัน

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เส้นใย เป็นปัญหาทั่วไปที่พบบ่อยที่สุดในการทำงานของระบบบำบัดแบบเอเอส การเพิ่มจำนวนขึ้นของจุลินทรีย์แบบเส้นใยทำให้ความสามารถในการตกตะกอนต่ำลง ในระบบกวนผสมแบบชั้นตอนเดียวมีแนวโน้มให้เกิดสลัดจ์ไม่จมตัวได้เสมอเนื่องจากสภาวะสารอาหารต่ำ (Low – Substrate levels) ที่จำเป็นต้องควบคุมในถังเติมอากาศเพื่อให้มีน้ำทิ้งมีบีโอดีต่ำ ซึ่งจุลินทรีย์แบบเส้นใยมีอัตราการเจริญสูงกว่าจุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อก แนวความคิดที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบัน คือการใช้ถังคัดพันธุ์ (Selector) ซึ่งเป็นถังปฏิบัติการที่รับน้ำเสียและสลัดจ์หมุนเวียนมาผสมกันก่อน

แนวความคิดของถังคัดพันธุ์ คือการคัดเลือกจุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อกให้เจริญเติบโตในถังบำบัดขั้นแรกที่สร้างสภาวะให้มีอัตราส่วน F/M สูง โดยควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เพียงพอ จุลินทรีย์แบบสร้างฟล็อกสามารถดูดซับสารอาหารละลายเข้าไปในเซลล์ในปริมาณมากและรวดเร็วในถังคัดพันธุ์ และเหลือสารอาหารจำนวนน้อยมากในถังปฏิบัติการที่ตามลงมา (ถังเติมอากาศหลัก) ซึ่งเป็นปริมาณไม่เพียงพอในการใช้เพื่อสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์แบบเส้นใยในถังเติมอากาศ ผลการควบคุมสลัดจ์ไม่จมตัวโดยถังคัดพันธุ์ทำงานได้ดีทั้งสภาวะเติมอากาศและไม่เติมอากาศ แอนน็อกซิก หรือแอนแอโรบิก หรือในสภาวะควบคุมร่วมกับแบบอื่นๆ ปริมาณอากาศหรือขนาดของเครื่องกวนต้องมีเพียงพอ เพื่อให้เกิดการกวนผสมภายในถังคัดพันธุ์

สำหรับแนวทางแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว ในเชิงปฏิบัติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทาง คือ (1) ในการแก้ไขปัญหานี้เฉพาะหน้าหรือสภาวะเร่งด่วน สามารถกระทำได้โดยการเติมคลอรีน หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไป ซึ่งจะไปทำลายโครงสร้างของจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยไม่ให้เกาะกันเป็นลูกโซ่ โดยถือว่าเป็นแนวทางแก้ไขได้โดยฉับพลัน และสามารถใช้กับระบบเอเอสที่มีอยู่เดิมได้ แต่มีข้อเสียคือ หนทางนี้ถือว่าการทำลายจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อกลงไปด้วย ทำให้ต้องเสียเวลาเดินระบบใหม่ อีกทั้งเมื่อหมดฤทธิ์ยาปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวก็ยังคงกลับมาคืนใหม่ได้อีก อีกแนวทางหนึ่งคือ (2) การแก้ไขปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว เป็นการแก้ไขปัญหามาโดยการใช้อุปกรณ์คัดพันธุ์ (Selector) ถือว่าเป็นแนวทางแก้ไขอย่างยั่งยืน เพราะจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยไม่สามารถเจริญเติบโตแข่งขันแบบชนิดสร้างฟล็อกได้ ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ข้อเสียคือ หากในระบบเอเอสเดิมที่ใช้อยู่ในระบบไม่มีถังคัดพันธุ์ ผู้ควบคุมจะต้องทำการออกแบบระบบเอเอสเดิมที่มีอยู่ให้สามารถติดตั้งถังคัดพันธุ์ใหม่ เพื่อใช้แก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวโดยเฉพาะ ทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นในขณะนั้น ไม่สามารถถูกบำบัดออกไปได้

จากเหตุดังกล่าวนี้เอง ผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะนำวัสดุช่วยตกตะกอน (Ballasting Agent) คือ ทอล์ก ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด มาใช้เพื่อจัดการแก้ปัญหานี้เฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า วัสดุช่วยตกตะกอนทั้งสามชนิด สามารถช่วยเพิ่มค่าความเร็วของการ

ตกตะกอนของสลัดจ์ (Initial Settling Velocity, ISV) ในระบบเอเอสให้สูงขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเอเอสที่ไม่ได้เติมวัสดุช่วยตกตะกอน สามารถใช้กับระบบเอเอสที่มีอยู่เดิม และไม่ทำลายจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อกอีกด้วย ทำให้เป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมากว่า จุลินทรีย์ชนิดเส้นใยอาจจะยึดเกาะติดกับวัสดุช่วยตกตะกอน ทำให้ช่วยเพิ่มความเร็วในการตกตะกอนในระบบเอเอสเดิม และสามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นหากแนวทางนี้สามารถแก้ปัญหาได้จริง การใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวจะถือว่าเป็นแนวทางใหม่ และคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวต่อไปในอนาคต

สำหรับการแก้ไขปัญหานี้ การใช้สารเคมีจำพวกคลอรีนหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระดับที่เหมาะสม โดยเติมลงไปในระบบหมุนเวียนสลัดจ์กลับ ซึ่งอัตราการเติมสารเคมีในช่วง 2-3 มก./ล.-คลอรีน ( $Cl_2$ ) ต่อ 1,000 มก./ล.-เอ็มแอลเอสเอส หรือในบางกรณีอาจใช้ถึง 8-10 มก./ล. ก็ได้ (Water pollution control federation, 1987) อาจใช้ฆ่าจุลินทรีย์แบบเส้นใยได้และถือว่าเป็นวิธีรักษาโรคอย่างชั่วคราว เพราะเมื่อหมดฤทธิ์ยาจุลินทรีย์แบบเส้นใยจะกลับคืนมาใหม่ ถ้าใช้สารเคมีดังกล่าวมากเกินไป แบคทีเรียชนิดสร้างฟล็อกจะถูกทำลายไปด้วย อีกทั้งการใช้สารเคมีไม่ได้ผลกับสลัดจ์ไม่จมตัวที่มีสาเหตุจากการอุ้มน้ำของจุลินทรีย์ (Bound water microorganisms) ดังนั้นการแก้ปัญหาโดยวิธีการเติมสารเคมีทำให้น้ำทิ้งมีความขุ่นเพิ่มมากขึ้นด้วย

## 2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในปัจจุบันระบบเอเอสมีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนเป็นสารช่วยตกตะกอนที่รู้จักกันดีในชื่อของวัสดุช่วยตกตะกอน (Ballasting Agent) ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะนำเอาวัสดุช่วยตกตะกอน มาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำ ผงทัลก์ (Talc) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางรถยนต์เก่า มาทำการวิจัยศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนเป็นส่วนใหญ่แต่ยังไม่ได้กล่าวถึงการนำวัสดุช่วยตกตะกอนมาใช้เพื่อที่จะแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว (Sludge Bulking) เลย ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุช่วยตกตะกอนมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวต่อไป จากผลการวิจัยของนักวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมาเกี่ยวกับวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด มีดังต่อไปนี้

### 2.4.1 ทัลก์ (Talc)

จากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ทัลก์ (Talc) ถูกใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนในระบบเอเอส โดยมีผลในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพของการตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียเอเอสซึ่งงานวิจัยดังกล่าว ได้แก่

**Cantet และคณะ (1996)** ศึกษาการยกระดับความสามารถในการบำบัดของระบบเอเอสด้วยการเติมผงทัลก์ (Upgrading performance of an activated sludge through addition of talqueous powder)

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเอเอสด้วยการผสมผงทัลก์ในถังเติมอากาศด้วยสมมุติฐาน คือ ปรับปรุงโครงสร้างของฟล็อก และช่วยในการเพิ่มความสามารถในการตกตะกอน โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ และใช้น้ำเสียจริงจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนเมือง Toulouse ประเทศฝรั่งเศส โดยทำการเดินระบบเอเอสในห้องปฏิบัติการเป็นเวลาประมาณ 1 ปี เริ่มเติมผงทัลก์เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งลักษณะของผงทัลก์จะมีขนาดไม่เกิน 300 ไมครอน มีความหนาแน่น 2.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเข้มข้น 80-120 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลที่ได้รับพบว่า การเติมผงทัลก์จะช่วยปรับปรุงความสามารถในการตกตะกอน และเพิ่มการเกิดไนตริฟิเคชันให้กับระบบสลัดจ์ที่ได้มีลักษณะเป็นสลัดจ์ที่ดี ตลอดจนสลัดจ์สามารถรีดน้ำได้ดีขึ้น

**Bidault และคณะ (1997)** ศึกษาการจับตัวเป็นก้อน และโครงสร้างของฟล็อกชีวภาพด้วยการเติมสารทัลก์ (Floc agglomeration and structuration by a specific talc mineral composition)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพในการสร้างฟล็อก โดยการเติมทัลก์ลงในถังเติมอากาศ เพื่อเป็นการปรับปรุงการรวมตัวกันและเพิ่มความหนาแน่นของฟล็อกที่เกิดขึ้นในระบบเอเอส โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยการทำจาร์เทส (Jar-Test) พร้อมทั้งวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตลอดจนสังเกตลักษณะฟล็อกจากกล้องจุลทรรศน์และขั้นที่ 2 นำไปประยุกต์ใช้จริงในโรงบำบัดน้ำเสีย 2 แห่ง ในเมือง Brittany ประเทศฝรั่งเศส โดยการเติมทัลก์ในการทดลองนี้จะเติมโดยเทียบกับความเข้มข้นของมวลจุลินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างกัน คือ 0 40 60 80 และ 100% (W/W) ขนาดของฟล็อกที่ได้จะเป็น 230 260 380 420 และ 450 ไมครอน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ทัลก์สามารถช่วยในการก่อตัวของฟล็อกให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนการนำไปใช้ในโรงบำบัดน้ำเสียจริงนั้น พบว่าน้ำเสียที่ใช้ทัลก์จะมีค่า SVI ลดลงทั้ง 2 แห่ง จะเห็นได้ว่าการเติมทัลก์ลงไปจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการตกตะกอนในระบบเอเอสได้จริง โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้บอกถึงข้อดีของทัลก์ไว้คือ เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำเสีย กัดกร่อนได้ยาก และเป็นแร่ที่มีความกระด้างต่ำที่สุดในโลก ไม่ละลายน้ำ เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่ให้จุลินทรีย์เกาะตัวได้ดี

**Eikelboom และคณะ (1998)** ศึกษาการควบคุมสลัดจ์อืดโดยการเติมทัลก์ชนิด PE 8418 (Control of bulking in a full scale plant by addition of talc (PE8418))

ทำการศึกษาการใช้ ทัลก์ (PE 8418) มาช่วยควบคุมการเกิดของสลัดจ์ในโรงบำบัดน้ำเสียระบบเอเอส ลักษณะน้ำเสียเป็นน้ำเสียจากอุตสาหกรรม แชมพู ผงซักฟอก น้ำผลไม้ และโรงฆ่าสัตว์ในประเทศเนเธอร์แลนด์ สาเหตุหลักของสลัดจ์เกิดจากโรงบำบัดน้ำเสียนี้ คือ การเกิดจุลชีพในกลุ่ม Filamentous ทำการทดลองโดยเติมทัลก์ด้วยอัตราส่วน 100% (W/W) ซึ่งผลจากการเติมทัลก์ลงไปจนถึงเติมอากาศเป็นเวลา 1 วัน ค่า SVI ลดลงจาก 850 มิลลิตรต่อกรัม เป็น 230 มิลลิตรต่อกรัม และเมื่อเติมต่อไปเมื่อเวลา 15 วัน พบว่าทำให้ลดลงเรื่อยๆ ถึง 125 มิลลิตรต่อกรัม และค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนของการทดลองนี้มีค่า 0.8 - 0.9 เมตรต่อชั่วโมง หลังจากเติมทัลก์ก็เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เมตรต่อชั่วโมง โดยสามารถลดปัญหาการเกิดสลัดจ์ได้ดีเป็นอย่างดี หนึ่งปัญหาอย่างหนึ่งของการเติมทัลก์ คือการเกิด Scum แต่ในการทดลองนี้กล่าวว่าการเกิด Scum ในถังเติมอากาศไม่มีปัญหาใดๆ ต่อการดำเนินการทั้งสิ้น

**Piirtola และคณะ (1999)** ศึกษาการควบคุมการเดินระบบเอเอส ด้วยวัสดุช่วยตกตะกอน (Activated sludge ballasting in pilot plant operation)

ศึกษาการใช้วัสดุช่วยตกตะกอน คือ  $\text{CaCO}_3$ , Apatite และ talc ในการควบคุมการเดินระบบเอเอส ที่มีซีไอดี 300 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการวิเคราะห์ลักษณะผิวของสาร ความเร็วในการตกตะกอนและความสามารถในการกรองซึ่งความสามารถในการกรองนี้เป็นตัวบ่งบอกถึงความแข็งแรงของฟล็อก โดยวัสดุที่ใช้ทั้งหมดนั้นทัลก์มีความสามารถช่วยปรับปรุง ลักษณะการตกตะกอนในแง่ของการเพิ่มความเร็วในการตกตะกอนและความสามารถในการกรอง ส่วน  $\text{CaCO}_3$  มีส่วนช่วยในการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว และ Apatite ไม่มีส่วนช่วยเพิ่มทั้งความเร็วของการตกตะกอนในการทดลองและความสามารถในการกรองใดๆ ทั้งสิ้น การทดลองนี้ทำการใส่ทัลก์ด้วยอัตราส่วน 120% (W/W) หลังจากเติม สามารถปรับปรุงค่า SVI จาก 800 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ทันที แต่ถ้าทำการเดินระบบเป็นเวลานาน การเติมทัลก์เพียง 10% (W/W) ก็เพียงพอที่จะช่วยเลี้ยงให้ตะกอนจุลินทรีย์ให้ค่า SVI ต่ำๆ ได้

#### 2.4.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon, PAC)

จากคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ชนิดผง ที่สามารถเป็นตัวดูดซับที่ดี งานวิจัยส่วนมากจึงเกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดซับมากกว่าการเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนและการจับตัวของผงถ่านกับจุลินทรีย์ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงในระบบเอเอส มีดังนี้

**Lee และคณะ (1989)** ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์แบบผง (PAC) ดูดซับโครเมียม (VI) ในน้ำเสียของกระบวนการบำบัดน้ำเสียเอเอส (Treatment of Cr(VI)-containing wastewater by addition of powder activated carbon to the activated sludge process)

ผลจากการเติมถ่านกัมมันต์แบบผง (PAC) เพื่อกำจัด Cr(VI) ในระบบเอเอสในงานวิจัยพบว่า อัตราการดูดซับของ PAC จะสูงกว่าการดูดซับ Cr(VI) ด้วยฟล็อกของจุลินทรีย์ในระบบ เมื่อแสดงผลของการเติม PAC จะสามารถกำจัดซีโอดีและ Cr(VI) ได้ถึง 96 และ 41% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเอเอสแบบธรรมดาจะสามารถกำจัดได้ 85 และ 9% ตามลำดับ ในงานวิจัยยังกล่าวว่าการเติม PAC จะช่วยในการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย

### 2.4.3 ยางบดละเอียด (Crumb rubber)

จากปัญหาในการกำจัดยางรถยนต์เก่าและการนำกลับมาใช้ใหม่ยังคงเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณยางรถยนต์ที่ถูกทิ้งในแต่ละปี จึงได้มีการนำเอายางรถยนต์เก่านั้นกลับมาใช้ในงานที่เกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสีย (Azizian และคณะ, 2003) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำเอายางรถยนต์เก่ามาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งงานวิจัยดังกล่าว ได้แก่

**Park และคณะ (2006)** ศึกษาการนำเอาเศษยางรถยนต์เก่ามาใช้เป็นสารกรองชีวภาพ (Evaluation of Tire derived rubber particles for biofiltration media)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเหมาะสมในการใช้เศษยางรถยนต์เก่า (Tire Derived Rubber Particles: TDRP) มาใช้เป็นตัวกลาง โดยทำการทดลองทั้งในสภาพที่เป็นแอโรบิก แอนแอโรบิก และแอนน็อกซิก ระบบที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่ Trickle filter, Denitrification filter และ Hybrid-static granular bed reactor (hybrid SGBR)

จากการทดลองพบว่าระบบ Trickle filter ที่ใช้เศษยางรถยนต์เก่านั้น สามารถกำจัด COD ได้ถึงร้อยละ 90 อีกทั้งระบบ hybrid SGBR นั้น หลังจากการใส่เศษยางรถยนต์เก่าแล้ว anaerobic granular sludge จะเกาะตัวที่เม็ดยางและมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้มากกว่าร้อยละ 97 และระบบ Anoxic TDRP filter นั้น พบว่าสามารถกำจัด  $\text{NO}_3\text{-N}$  ได้มากกว่าร้อยละ 97 นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่ายางรถยนต์เก่าที่ใช้เป็นตัวกลางไม่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ระบบและยังให้พื้นที่ผิวที่ดีต่อการเกาะตัวของจุลินทรีย์ด้วย



มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด มาใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน คือ

**เอกลักษณ์ ไชยพันธุ์ (2551)** ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนของสลัดจ์ในระบบเอเอสด้วยวัสดุช่วยตกตะกอน (Enhance efficiency of sludge settling in activated sludge with two types of ballasting agent)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการตกตะกอนของวัสดุช่วยตกตะกอนด้วยวัสดุที่ต่างกัน 2 ชนิดคือ ทัลก์ และถ่านกัมมันต์ชนิดผง โดยแปรเปลี่ยนปริมาณของวัสดุช่วยตกตะกอนใน 4 ถึงปฏิบัติการด้วยปริมาณ คือ 0% 20% 50% และ 80% (W/W)

ผลการทดลองพบว่า การเติมทัลก์ในถึงปฏิบัติการจะทำให้ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงกว่าการเติมถ่านกัมมันต์ชนิดผงในทุกความเข้มข้นและยังสูงกว่าสลัดจ์ที่ไม่ได้ทำการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน โดยการเปรียบเทียบระหว่างการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีความเข้มข้น 80% (W/W) และไม่เติมวัสดุช่วยตกตะกอนจะให้ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงสุดถึง 17.7 เมตรต่อนาที และต่ำสุดเพียง 4.0 เมตรต่อนาที ตามลำดับ

**ฉัตรรัตน์ แสงสุวรรณ (2552)** ศึกษาผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนในระบบเอเอสที่ใช้วัสดุช่วยตกตะกอน (Effect of sludge age on settling efficiency in activated sludge process using ballasting agents)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนในระบบเอเอสด้วยวัสดุช่วยตกตะกอน 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด พร้อมทั้งควบคุมอายุสลัดจ์ต่างกัน คือ 3 10 และ 30 วัน

ผลจากการทดลอง พบว่าอายุสลัดจ์ระหว่าง 3 ถึง 30 วัน ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพต่อการกำจัดซีโอดีของระบบที่เติมวัสดุช่วยตกตะกอน สำหรับค่าความเร็วเริ่มต้นของระบบที่เติมทัลก์จะสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผงและยางบดละเอียดในทุกๆ ค่าอายุสลัดจ์ โดยจะอยู่ที่ 10.6 7.2 และ 10.6 เมตรตามลำดับ และในแง่การกำจัดซีโอดียังพบว่าระบบที่เติมถ่านกัมมันต์ชนิดผงจะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับทัลก์และยางบดละเอียด โดยจะมีค่าสูงกว่า 97 และ 95% ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าฟล็อกจุลชีพห่อหุ้มวัสดุช่วยตกตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าฟล็อกจุลชีพในชุดควบคุม โดยมีลักษณะการเกาะตัวไม่ต่างกันในแต่ละอายุสลัดจ์

**สถิรต์น์ รอดอารี (2552)** ศึกษาผลของชนิดและขนาดวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนในระบบเอเอส (Effects of ballasting agent type and sizes on settling efficiency in activated sludge process)

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนของระบบเอเอส โดยใช้วัสดุช่วยตกตะกอน 3 ชนิด คือ ทัลก์, ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด โดยเปรียบเทียบวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดมีขนาดต่างกัน คือ ทัลก์ขนาด 2 5 10 และ 18 ไมโครเมตร ถ่านกัมมันต์ชนิดผงขนาด 5 10 24 และ 99 ไมโครเมตร และยางบดละเอียดที่มีขนาด 110 242 618 และ 848 ไมโครเมตร

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของระบบเอเอสที่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุม การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด และทุกขนาดสามารถช่วยเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนให้สูงขึ้นได้ โดยทัลก์จะสูงที่สุดเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์และยางรยนต์ โดยจะอยู่ที่ 17.64 13.94 และ 13.74 เมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่เติมวัสดุช่วยตกตะกอนมีค่าเพียง 2.81 เมตรต่อชั่วโมงเท่านั้น เมื่อทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดสามารถเข้ากันได้กับจุลชีพในระบบได้เป็นอย่างดี และพบการจับตัวของสลัดจ์กับวัสดุช่วยตกตะกอน ใน 3 ลักษณะ คือ (1)สลัดจ์ห่อหุ้มวัสดุช่วยตกตะกอน (2)สลัดจ์เคลือบผิววัสดุช่วยตกตะกอน (3)สลัดจ์เกาะติดผิววัสดุช่วยตกตะกอน นอกจากนี้การใช้ยางบดละเอียดยังเป็นแนวทางใหม่ในการนำเอาวัสดุเหลือใช้ นำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

ดังนั้น จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และ ยางบดละเอียด สามารถช่วยเพิ่มความเร็วของการตกตะกอนให้สูงขึ้นได้ โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาจะใช้วิธีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนลงไปในถังปฏิกริยาตั้งแต่วันแรกที่มีการเริ่มต้นเดินระบบเอเอส เพื่อให้เกิดการกวนผสม และช่วยเร่งการเกิดก้อนฟล็อกจุลินทรีย์ที่มีน้ำหนักมากขึ้น และให้สามารถตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะต่างกับงานวิจัยที่จะทดลองต่อไป คือ การทดลองจะทำการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีชนิด ขนาด และปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งจะทดลองเติมไประบบเอเอสทันที ในขณะที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว และพิจารณาค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนในแต่ละชุดการทดลอง เพื่อเป็นการตอบคำถามที่ว่า วัสดุช่วยตกตะกอนสามารถช่วยแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในกรณีเร่งด่วน ได้จริงหรือไม่

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์

1. ถังปฏิกรณ์พลาสติกใสขนาด 60 ลิตร
2. เครื่องเป่าอากาศและหัวกระจายอากาศ
3. ตะกอนจุลินทรีย์ที่สมบูรณ์แข็งแรงและตกตะกอนได้ดีจากโรงบำบัดน้ำเสียดินแดง
4. น้ำเสียสังเคราะห์ (Synthetic wastewater) ที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้น้ำตาลทราย

เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) ใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนและมีธาตุอาหารต่างๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ มีส่วนประกอบแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

ส่วนประกอบน้ำเสียสังเคราะห์	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
น้ำตาลทราย	3,274
ยูเรีย	491
$\text{NaHCO}_3$	394
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	131
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	34
$\text{K}_2\text{HPO}_4$	65
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	21

(สรุไซย ทักษิณวราจาร, 2526)

5. สารละลาย Stock Urea ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร
6. สารละลาย  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร

### 3.1.2 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสีย

1. เครื่องวัดพีเอช
2. เครื่องวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ
3. โถดูดความชื้น (Desiccator)
4. ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้ 103-105 องศาเซลเซียส
5. ตาชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
6. กระดาษกรอง GF/C 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 เซนติเมตร
7. ชุดกรองใช้กรวยกรองแบบบุชเชอร์
8. ฟอยล์อลูมิเนียม
9. ปากคืบ
10. เตาเผาแบบอุณหภูมิสูงที่ปรับอุณหภูมิได้ 500-600 องศาเซลเซียส
11. กรวยอิมฮอฟฟ์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
12. หลอดย่อย (Digestion Tube)
13. บิวเรต
14. ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร
15. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต 0.1 นอร์มัล
16. สารละลายกรดซัลฟูริก
17. สารละลายเฟอร์โรอินดิเคเตอร์
18. สารละลายฐานโปตัสเซียมไฮโดรเจนซัลไฟด์
19. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 นอร์มัล
20. กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 100 เท่า

### 3.1.3 วัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้ในงานวิจัย

การทดลองนี้วัดการเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนด้วยความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน หรือ Initial Settling Velocity (ISV) สารที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนของการทดลองนี้ต้องเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ กับทั้งจุลินทรีย์และน้ำเสีย มีขนาดอนุภาคเล็กแต่มิหนัก สามารถตกตะกอนได้ง่ายและสามารถที่จะเป็นเป้าสัมผัสให้จุลินทรีย์เกาะตัวได้ โดยงานวิจัยนี้เรียกสารชนิดนี้ว่า วัสดุช่วยตะกอน (Ballasting agent)

วัสดุช่วยตกตะกอนที่เลือกใช้ในการทดลองนี้ เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด มีราคาถูก มีความนิยมใช้ในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และนอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังได้มีการนำเอาวัสดุ

เหลือใช้ คือ ยางรถยนต์เก่า มาใช้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน ซึ่งถือเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

วัสดุที่นำมาใช้เพื่อเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนในการทดลองนี้ ได้แก่

1. ทัลก์ (Talc) บริษัท หล่อวัฒนา จำกัด, บริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด และบริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) เท่ากับ 8 19 41 และ 65 ไมโครเมตร
2. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Power Activated Carbon) บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) เท่ากับ 133 213 365 และ 802 ไมโครเมตร
3. ยางบดละเอียด (Crumb rubber) บริษัท คิวทูไทยแลนด์ จำกัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) เท่ากับ 223 408 450 และ 644 ไมโครเมตร ในการบดละเอียดยางรถยนต์เก่าจะใช้เครื่องบดพลาสติก ขึ้นยางรถยนต์เก่าจะถูกป้อนไปยังชุดงานบดด้วยชุดป้อนระบบสั่นผ่านเครื่องตรวจจับโลหะ เพื่อให้แน่ใจว่าโลหะทุกชนิดถูกแยกออกจากยางรถยนต์ที่บดแล้ว ยางรถยนต์จะถูกบดระหว่างจานหมุนซึ่งมีผิวสัมผัสแบบฟันเลื่อย และงานที่อยู่ฝั่ง ผงที่ได้จะถูกดูดด้วยพัดลมส่งมายังถังไซโคลอน และปล่อยผ่านเครื่องกรองขนาดตามที่ต้องการ สำหรับการวิเคราะห์ขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนจะให้เครื่องมือวัดขนาดอนุภาค โดยทำการวัดขนาดอนุภาคจำนวน 3 ซ้ำ ในแต่ละขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอน

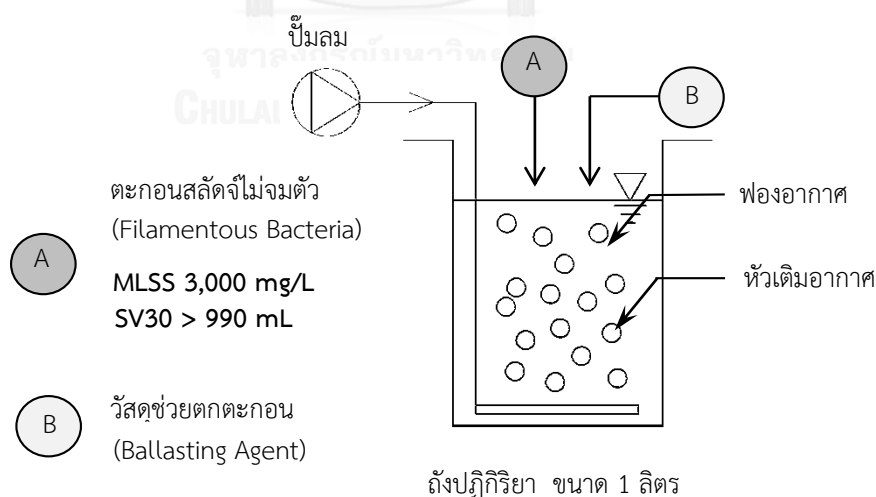
วัสดุช่วยตกตะกอนขนาดต่างๆ ที่เลือกใช้ในการทดลองนี้เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดตามท้องตลาด ไม่ต้องเตรียมเองและมีราคาถูก ซึ่งเห็นได้ว่าขนาดของทัลก์ และถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนยางบดละเอียดมีขนาดใหญ่ที่สุด สาเหตุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขนาดยางบดละเอียดค่อนข้างใหญ่ เพราะยางบดละเอียดมีความหนาแน่นน้อย และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ ความเร็วในการตกตะกอนต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ต้องเลือกใช้ยางบดละเอียดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เพื่อให้มีความเร็วในการตกตะกอนดีพอ อย่างไรก็ตามยางบดละเอียดก็มีข้อดีหลายอย่างคือ สามารถเป็นเป้าสัมผัสให้จุลินทรีย์มาเกาะทำให้เป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และยังเป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย ทั้งนี้ขนาดที่แตกต่างกันของวัสดุช่วยตกตะกอนจะมีผลต่อความเร็วเริ่มต้นการตกตะกอนทำให้รู้ว่าสลัดจ์ในถังตกตะกอนจะตกตะกอนได้ดีหรือไม่ และนอกจากนี้ขนาดที่ต่างกันยังมีผลต่อพื้นที่ผิวในการจับตัวขนาดจุลินทรีย์มากน้อยต่างกันด้วย จึงเป็นเหตุผลที่น่าสนใจและทดลองศึกษาซึ่งรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง แสดงในตารางที่ 3.2

### 3.1.4 อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ขนาดวัสดุช่วยตกตะกอน

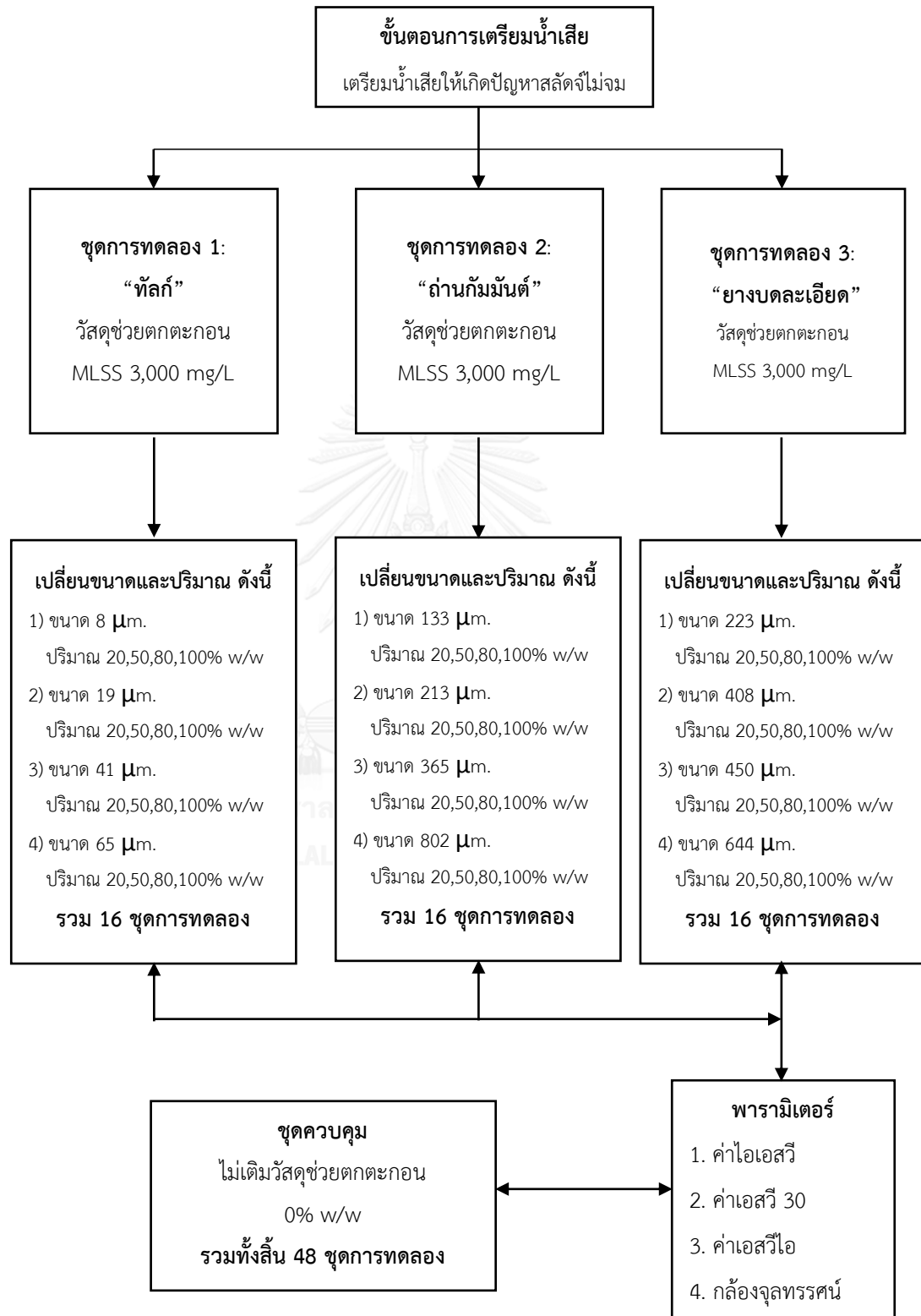
เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) ยี่ห้อ Malvern รุ่น Mastersizer Hydro 2000 MU ตั้งอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวด้วยการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และยางบดละเอียด ที่มีขนาดและปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจำลองระบบเอเอสให้เกิปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว เลี้ยงให้ระบบเกิดจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยในถังปฏิกรณ์ที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง จากนั้นนำน้ำเสียมาเจือจางให้มีค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (MLSS) ประมาณ 3,000 มก./ล. ใส่ลงในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (Batch) ขนาด 1 ลิตร เติมวัสดุช่วยตกตะกอนปริมาณที่ต่างกันดังนี้ คือ 0% 20% 50% 80% และ 100% w/w แล้วกวนผสมให้ทั่วถึงกัน โดยการเติมอากาศเป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากนั้นปล่อยให้ตกตะกอนแล้ว วัดความสูงของสลัดจ์ที่ตกตะกอนที่เวลาต่างๆ เพื่อหาค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) ด้วยวิธี Settling Test (สถิติรัตน์ รอดอารี, 2552) ซึ่งการทดลองกระทำที่ อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (Batch) สำหรับแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว



### 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมน้ำเสีย

เพื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว สำหรับใช้วิเคราะห์หาความเร็วตกตะกอนในขั้นตอนต่อไป

1. เริ่มต้นการเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์จากหัวเชื้อที่มีตะกอนจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย จากนั้นทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 60 ลิตร จำนวน 1 ถัง
2. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ (Synthetic wastewater) โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน ใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน และเติมธาตุอาหารต่างๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยในระบบ มีส่วนประกอบแสดงในตารางที่ 3.1 และให้จุลินทรีย์ได้ปรับสภาพเพื่อให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตในน้ำเสียสังเคราะห์ได้
3. คำนวณหาปริมาณสลัดจ์แขวนลอย (MLSS) ในระบบจากสมการที่ 3.1 หลังจากนั้นใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ระบบตามปริมาณสลัดจ์แขวนลอยในระบบที่คำนวณได้ ดังนี้

$$\frac{F}{M} = \frac{S}{(X \cdot \tau)} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\frac{F}{M}$  = ค่าอาหารต่อปริมาณจุลินทรีย์ในระบบถูกกำหนดจากการเลือกประเภทของระบบเอเอส คือ ระบบเอเอสแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge, CAS) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.3 กก.ซีโอดี/กก.เอ็มแอลเอสเอส·วัน

$S$  = ซีโอดีที่เข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับ 3,600 มิลลิกรัม/ลิตร

$X$  = ค่าสลัดจ์แขวนลอยที่ต้องการหาในระบบ, มิลลิกรัม/ลิตร

$\tau$  = เวลาพักน้ำของระบบ 3 วัน

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 3.1 สามารถหาค่าสลัดจ์แขวนลอยที่ต้องการในระบบ มีค่าประมาณ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

4. เดินระบบและควบคุมระบบโดยการควบคุมอายุสลัดจ์ให้คงที่ มีค่าเท่ากับ 10 วัน

การควบคุมอายุสลัดจ์ให้ได้ตามที่กำหนดไว้นั้น สำคัญต่อระบบมาก วิธีควบคุมอายุสลัดจ์ทำได้โดยการระบายน้ำ และสลัดจ์แขวนลอยออกจากถังปฏิกรณ์โดยตรง ปริมาณน้ำและสลัดจ์แขวนลอยที่ทิ้งในแต่ละวันสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.2 ดังนี้



$$Q_w = \frac{V}{\theta_c} \quad (3.2)$$

โดยที่  $Q_w$  = ปริมาณของน้ำและสลัดจ์แขวนลอยที่ทิ้งออกจากระบบ, ลิตร/วัน  
 $V$  = ปริมาตรรวมของถังปฏิกริยา, ลิตร  
 $\theta_c$  = ค่าอายุสลัดจ์, วัน

โดยที่ปริมาตรถังปฏิกริยา ( $V$ ) เท่ากับ 60 ลิตร และค่าอายุสลัดจ์ ( $\theta_c$ ) เท่ากับ 10 วัน ซึ่งจะคำนวณ  $Q_w$  จะได้เท่ากับ 6 ลิตรต่อวัน ดังนั้นการควบคุมอายุสลัดจ์ของระบบ จึงทำได้โดยการระบายน้ำออกจากถังปฏิกริยาโดยตรงเท่ากับ 6 ลิตรต่อวัน

5. ทดลองปรับค่าซีโอดีของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ หรือปรับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ (เช่น ค่าพีเอช และค่าออกซิเจนละลาย) เพื่อให้ระบบเกิดจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยมากขึ้น จนทำให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว

6. นำน้ำเสียจากถังปฏิกริยามาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ เพื่อทดสอบการตกตะกอนของปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวที่เกิดขึ้นในระบบ ควบคุมค่าเอสวี 30 ไม่ต่ำกว่า 990 มิลลิลิตรต่อลิตร และค่าเอ็มแอลเอสเอสประมาณ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.3.2 การทดลองที่ 1

การแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวโดยใช้ทัลก์ (Talc) เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน

1. นำน้ำเสียสังเคราะห์จากขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียปริมาตร 0.375 ลิตร ผสมกับทัลก์ขนาด 8 ไมโครเมตร ที่ปริมาณเต็ม 100% w/w ปริมาตร 0.125 ลิตร ใส่ในถังปฏิกริยาแบบที่ละเท (Batch) รวมปริมาตร 0.5 ลิตร ควบคุมค่าเอ็มแอลเอสเอสให้มีความเข้มข้น เท่ากับ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นกวนผสมเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้ระบบหยุดนิ่ง วัดค่าเอสวี 30 (SV30) และค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI)

2. นำน้ำเสียสังเคราะห์จากขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียปริมาตร 1.5 ลิตร ผสมกับทัลก์ขนาด 8 ไมโครเมตร ที่ปริมาณเต็ม 100% w/w ปริมาตร 0.5 ลิตร ใส่ในถังปฏิกริยาแบบที่ละเท (Batch) รวมปริมาตรทั้งสิ้น 2.0 ลิตร ควบคุมค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) ให้มีความเข้มข้น เท่ากับ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นกวนผสมเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้ระบบหยุดนิ่ง และนำไปวัดค่าความเร็วของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity, ISV)

3. คำนวณหาปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนที่เติมลงไปจากสมการที่ 3.3

$$W = \frac{MLSS \times V \times \%W/W}{1,000} \quad (3.3)$$

โดยที่  $W$  = ปริมาณวัสดุช่วยตะกอนที่เติมลงไป, มก.  
 $MLSS$  = ความเข้มข้นสลัดจ์แขวนลอยในระบบ, มก./ล.  
 $V$  = ปริมาตรถังปฏิกรณ์, ลบ.ม.  
 $\%W/W$  = สัดส่วนของวัสดุช่วยตกตะกอน (ร้อยละน้ำหนักของวัสดุช่วยตกตะกอนต่อน้ำหนักเอ็มแอลเอสเอส)

4. ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบกับชุดควบคุม

5. ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง

6. เปลี่ยนปริมาณทอล์กที่เดิมเป็น 80% 50% และ 20% w/w ตามลำดับ จากนั้นทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1 ถึง ข้อ 5

7. เปลี่ยนขนาดทอล์กเป็น 19 41 และ 65 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากนั้นทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง ข้อ 6 (รวมทั้งหมด 16 ชุดการทดลอง)

### 3.3.3 การทดลองที่ 2

การแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวโดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน

1. นำน้ำเสียสังเคราะห์จากขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียปริมาตร 0.375 ลิตร ผสมกับถ่านกัมมันต์ขนาด 133 ไมโครเมตร ที่ปริมาณเติม 100% w/w ปริมาตร 0.125 ลิตร ใส่ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท (Batch) รวมปริมาตร 0.5 ลิตร ควบคุมค่าเอ็มแอลเอสเอสให้มีความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นกวนผสมเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้ระบบหยุดนิ่ง วัดค่าเอสวี 30 (SV30) และค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI)

2. นำน้ำเสียสังเคราะห์จากขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียปริมาตร 1.5 ลิตร ผสมกับถ่านกัมมันต์ขนาด 133 ไมโครเมตร ที่ปริมาณเติม 100% w/w ปริมาตร 0.5 ลิตร ใส่ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท (Batch) รวมปริมาตรทั้งสิ้น 2.0 ลิตร ควบคุมค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) ให้มีความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นกวนผสมเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้ระบบหยุดนิ่ง และนำไปวัดค่าความเร็วของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity, ISV)

3. คำนวณหาปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนที่เติมลงไปจากสมการที่ 3.3
4. ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบกับชุดควบคุม
5. ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง
6. เปลี่ยนปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติมเป็น 80% 50% และ 20% w/w ตามลำดับ จากนั้นทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1 ถึง 5
7. เปลี่ยนขนาดถ่านกัมมันต์เป็น 213 365 และ 802 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากนั้นทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 6 (รวมทั้งหมด 16 ชุดการทดลอง)

### 3.3.4 การทดลองที่ 3

การแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวโดยใช้ยางบดละเอียดเป็นวัสดุช่วยตกตะกอน

1. นำน้ำเสียสังเคราะห์จากขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียปริมาตร 0.375 ลิตร ผสมกับยางบดละเอียดขนาด 223 ไมโครเมตร ที่ปริมาณเติม 100% w/w ปริมาตร 0.125 ลิตร ใส่ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (Batch) รวมปริมาตร 0.5 ลิตร ควบคุมค่าเอ็มแอลเอสเอสให้มีความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นกวนผสมเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้ระบบหยุดนิ่ง วัดค่าเอสวี 30 (SV30) และค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI)
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์จากขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียปริมาตร 1.5 ลิตร ผสมกับวัสดุช่วยตกตะกอนขนาด 110 ไมโครเมตร ที่ปริมาณเติม 100% w/w ปริมาตร 0.5 ลิตร ใส่ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (Batch) รวมปริมาตรทั้งสิ้น 2.0 ลิตร ควบคุมค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) ให้มีความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นกวนผสมเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้ระบบหยุดนิ่ง และนำไปวัดค่าความเร็วของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity, ISV)
3. คำนวณหาปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนที่เติมลงไปจากสมการที่ 3.3
4. ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบกับชุดควบคุม
5. ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง
6. เปลี่ยนปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เติมเป็น 80% 50% และ 20% w/w ตามลำดับ จากนั้นทดลองซ้ำตั้งแต่ ข้อ 1 ถึง 5
7. เปลี่ยนขนาดยางบดละเอียดเป็น 408 450 และ 644 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากนั้นทำการซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 6 (รวมทั้งหมด 16 ชุดการทดลอง)

### 3.4 สรุปตัวแปรที่จะศึกษาในงานวิจัย

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอน  2. ขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด - ทัลก์ (Talc) - ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) - ยางบดละเอียด (Crumb Rubber)  3. ปริมาณของวัสดุช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด - ทัลก์ (Talc) - ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) - ยางบดละเอียด (Crumb Rubber)	- ทัลก์ (Talc) - ถ่านกัมมันต์ชนิด (PAC) - ยางบดละเอียด (Crumb Rubber)  - ขนาดประมาณ 8 19 41 65 $\mu\text{m}$ - ขนาดประมาณ 133 213 365 802 $\mu\text{m}$ - ขนาดประมาณ 223 408 450 644 $\mu\text{m}$  - ปริมาณ 20% 50% 80% และ 100% w/w* - ปริมาณ 20% 50% 80% และ 100% w/w* - ปริมาณ 20% 50% 80% และ 100% w/w*
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 2. ความเข้มข้นในรูป COD 3. เวลาพักน้ำ 4. อายุสลัดจ์ 5. ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (MLSS)	- 20 ลิตรต่อวัน - 3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร - 3 วัน - 10 วัน - 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) 2. ดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI) 3. ปริมาตรตะกอนที่ 30 นาที ( $SV_{30}$ ) 4. ลักษณะการเกาะตัวของตะกอนกับวัสดุช่วยตกตะกอน	- Settling Test - Settle Volume Method (AWWA 213 C.) - Settle Volume Method (AWWA 213 B.) - กล้องจุลทรรศน์

\* w/w คือ ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน แสดงเป็นหน่วยร้อยละของน้ำหนักรวมวัสดุช่วยตกตะกอนต่อ น้ำหนักจุลินทรีย์ในระบบ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ชุด แบ่งออกเป็น 2 ช่วงการทดลอง ช่วงแรกเป็นขั้นตอนการเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ที่มีปัญหาไม่จมตัว โดยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยเพื่อใช้สำหรับทดลอง และช่วงที่สองเป็นการทดลองใช้วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด เพื่อแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว ส่วนการวิเคราะห์และสรุปผลแบ่งตามตัวแปรอิสระที่ทดลอง ได้แก่ ชนิด ขนาด และปริมาณของวัสดุช่วยตกตะกอน ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม ทั้งนี้ข้อมูลดิบ (Raw data) ที่ได้จากการทดลองทั้งหมดสรุปเป็นตารางดังแสดงในภาคผนวก

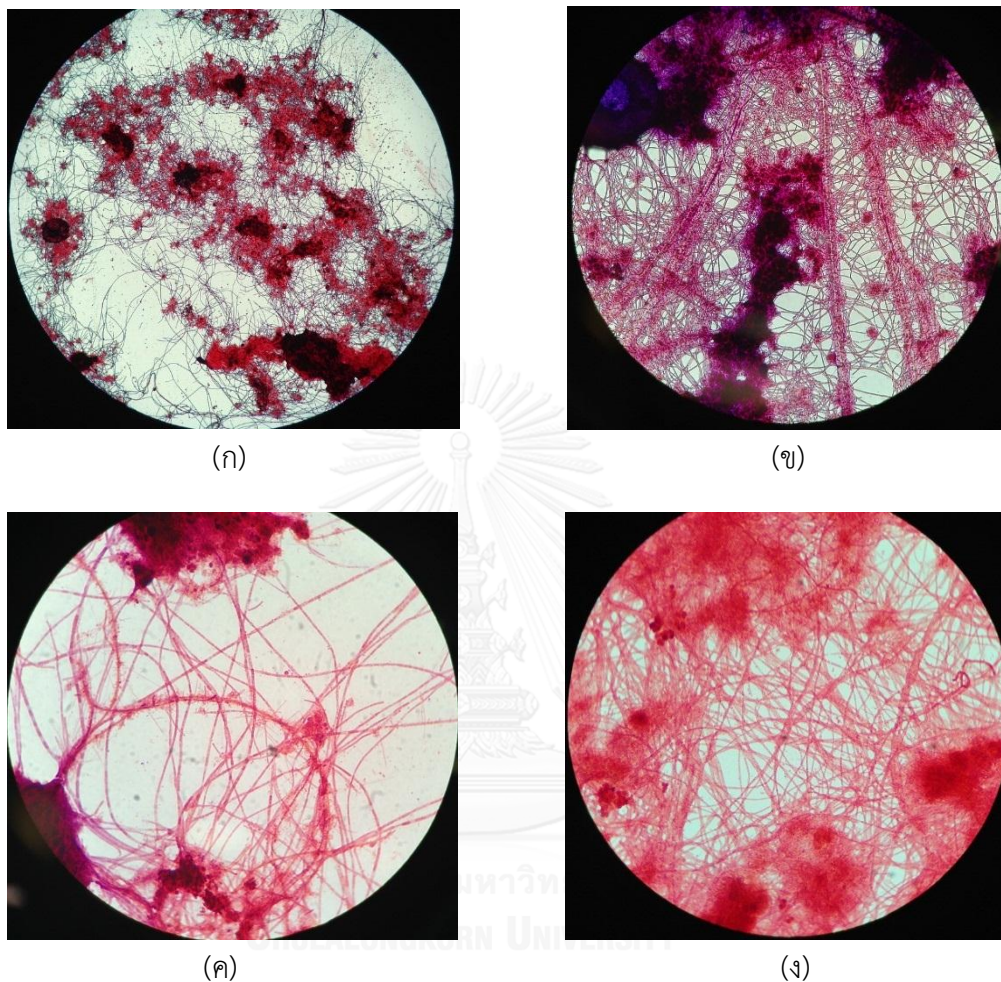
#### 4.1 ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอส

ในช่วงแรกทำการทดลองเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียดินแดงในระบบเอเอส โดยควบคุมค่าความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอสประมาณ 3,000 มก./ล. ค่าอายุสลัดจ์ (SRT) เท่ากับ 10 วัน อัตราป้อนน้ำเสีย 20 ลิตร/วัน และค่าปริมาณอาหารต่อปริมาณจุลชีพ (F/M) เท่ากับ 0.3 วัน<sup>-1</sup> เติบระบบแบบต่อเนื่องประมาณ 30 วัน พบว่าในช่วงแรก ค่าเอสวี 30 มีค่าประมาณ 200 มล./ล. และค่าเอสวีไอมีค่าประมาณ 50 - 60 มล./ก. สลัดจ์มีความสามารถการจมตัวดี หลังจากนั้นได้ปรับปริมาณหัวเติมอากาศให้ลดลง เพื่อให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ในถังปฏิกริยาลดลงตามไปด้วย มุ่งหวังให้จุลินทรีย์ประเภทเส้นใย (Filamentous) เจริญเติบโตเป็นกลุ่มหลักและมากกว่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ประเภทสร้างฟล็อก

ภายหลังจากทดลองเดินระบบอีกประมาณ 90 วัน พบว่าสลัดจ์เริ่มมีปัญหาในการจมตัวมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสามารถทำให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ตามแผนการทดลองบทที่ 3 โดยสลัดจ์มีค่าเอสวี 30 มากกว่า 990 มล./ล. ค่าความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอสประมาณ 4,000 มล./ล. ค่าซีไอดีในถังปฏิกริยาประมาณ 15 - 30 มก./ล. และเมื่อนำสลัดจ์ไปส่องกล้องจุลทรรศน์จะพบจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยเจริญเติบโตเป็นกลุ่มหลัก และติดสีแกรมลบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จุลินทรีย์เส้นใยที่เกิดขึ้นในระบบ ยังคงมีความสามารถบำบัดน้ำเสียได้เหมือนระบบปกติ พบได้จากค่าซีไอดีที่ต่ำ และเมื่อนำสลัดจ์ไปตกตะกอนจะเกิดขึ้นน้ำที่ใสมากแต่มีปริมาณน้อยมาก เพราะอัตราเร็วการตกตะกอนที่ช้ามาก ในส่วนการเดินระบบเอเอสในขณะเกิดปัญหานั้น พบว่าสลัดจ์มักหลุดออกนอกถังตกตะกอนไปกับน้ำทิ้งมาก ทำให้ค่าอายุสลัดจ์ในระบบลดลงโดยไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น การควบคุมเดินระบบในช่วงนี้จะเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก เพราะไม่สามารถควบคุมสลัดจ์

ในถังเดิมอากาศได้เลย ผู้วิจัยจึงต้องเอาใจใส่ดูแลเป็นอย่างมาก อีกทั้งต้องวัดผลพารามิเตอร์ที่ควบคุมระบบด้วยความถี่ที่มากกว่าเดิม สำหรับแก้ปัญหาทันทีเพื่อป้องกันมิให้ระบบล่มได้โดยง่าย



**รูปที่ 4.1** ฟล็อกจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยที่เกิดขึ้นในงานวิจัยถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์  
ก) กำลังขยาย 10 เท่า   ข) กำลังขยาย 40 เท่า   ค) และ ง) กำลังขยาย 100 เท่า

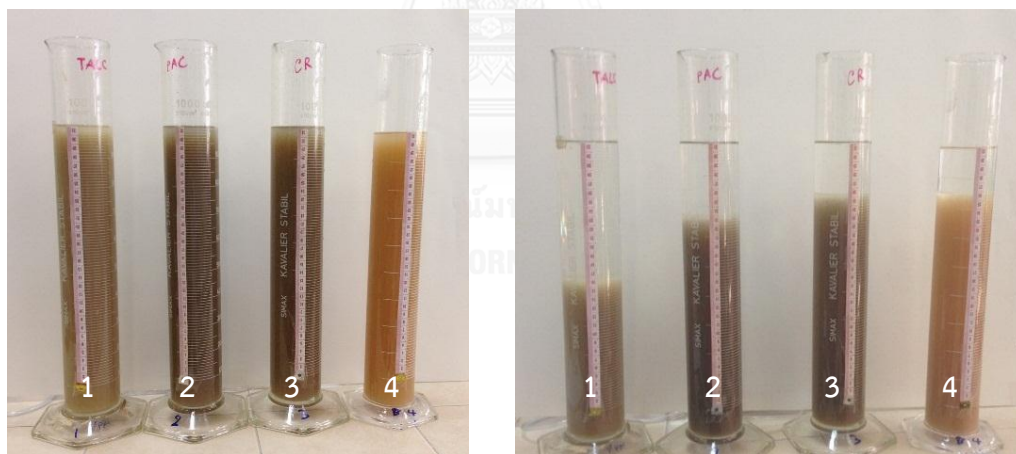
ผลการทดลองนี้ให้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้กล่าวมาคือ เมื่อเกิดสภาวะที่ขาดแคลนออกซิเจน (ค่า DO ต่ำ) ในถังปฏิกิริยา จุลินทรีย์ที่ประเภทเส้นใยสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าจุลินทรีย์ประเภทสร้างฟล็อกและเป็นจุลชีพหลักของระบบ ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียแบบเอเอสนั้นจะต้องมีวิธีใช้ในการป้องกันสัดจ์ไม่จมตัว ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนในการป้องกันปัญหาสัดจ์ไม่จมตัว โดยเลือกใช้วัสดุช่วยตกตะกอนที่ประสบความสำเร็จจากงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วคือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด ซึ่งจะกล่าวถึงผลโดยละเอียดต่อไป

## 4.2 ผลการศึกษาการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว

การดำเนินการวิจัยในช่วงที่สอง แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด คือ การแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวด้วยการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด การทดลองในแต่ละชุดได้รับการออกแบบและวางแผนให้มีสภาวะการทำงานที่เหมือนกันหมด หลังจากนั้นจะทำการสรุปและวิเคราะห์การวิจัยทั้ง 3 ชุด ตามตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผลของชนิด ขนาด และปริมาณของวัสดุช่วยตกตะกอน ตลอดจนพารามิเตอร์ต่างๆ มาเปรียบเทียบกัน ดังนี้

### 4.2.1 ผลของชนิดวัสดุช่วยตกตะกอน

ผลการทดลองชุดนี้เป็นการศึกษาชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอน คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด โดยเลือกใช้ขนาด คือ 65 213 และ 233 ไมโครเมตร ตามลำดับ ทำการเจือจางควบคุมค่าความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอสประมาณ 3,000 มก./ล. ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนเท่ากับ 100% w/w ทำการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท (Batch) จากนั้นวัดค่าไอเอสวี ค่าเอสวี 30 และพารามิเตอร์ต่างๆ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนลงไป



(ก) ก่อนการทดลอง

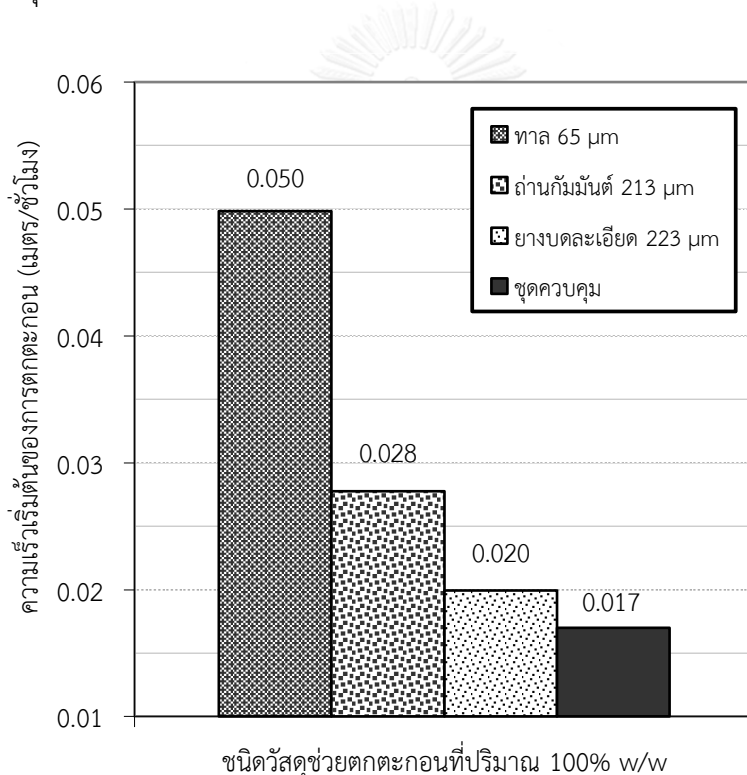
(ข) หลังการทดลอง

**รูปที่ 4.2** การเปรียบเทียบการตกตะกอนของสลัดจ์ด้วยวัสดุช่วยตกตะกอนด้วยปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w

ชุด1) ทัลก์      ชุด2) ถ่านกัมมันต์      ชุด3) ยางบดละเอียด      ชุด4) ชุดควบคุม

ผลการทดลองพบว่า ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด (หมายเลข 1 2 และ 3) สามารถทำให้สลัดจ์ตกตะกอนได้ดีกว่าชุดควบคุม (หมายเลข 4) อย่างชัดเจน โดยทัลก์ (หมายเลข 1) จะได้ดีที่สุด ตามด้วย ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด การตกตะกอนสามารถเห็นได้ชัดเจน สลัดจ์ไม่มีลักษณะขุ่นหรือฟุ้งกระจาย เห็นการแยกชั้นสลัดจ์กับชั้นน้ำใสได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.2

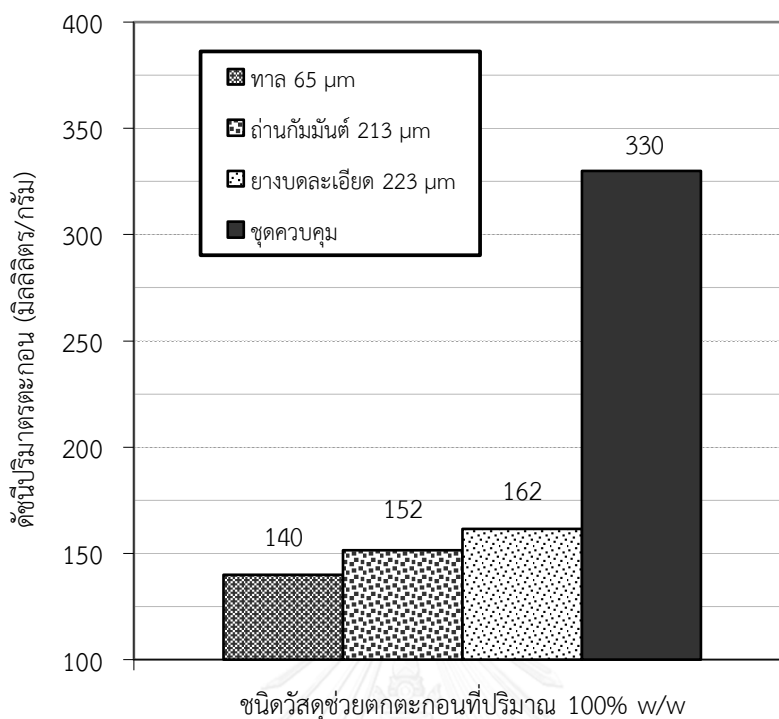
เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบค่าความเร็วของการตกตะกอน (ISV) ในแต่ละชนิดวัสดุช่วยตกตะกอน พบว่าวัสดุช่วยตกตะกอนแต่ละชนิดให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนได้ไม่เท่ากัน โดยทัลก์จะทำให้ค่าความเร็วของการตกตะกอนเริ่มต้นสูงสุดที่ 0.050 เมตร/ชม. (193% เทียบกับชุดควบคุม) ถ่านกัมมันต์ 0.028 เมตร/ชม. (63%) และยางบดละเอียด 0.020 เมตร/ชม. (17%) เทียบกับชุดควบคุมที่มีความเร็วของการตกตะกอนเพียง 0.017 เมตร/ชม. เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3



**รูปที่ 4.3** การเปรียบเทียบชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอนกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV)

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI) เปรียบเทียบกับวัสดุช่วยตกตะกอนแต่ละชนิด พบว่า ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด สามารถทำให้ค่าดัชนีปริมาตรตะกอนต่ำกว่าชุดควบคุมได้ทั้งหมด โดยทัลก์ทำให้ค่าดัชนีปริมาตรตะกอนต่ำสุดเท่ากับ 140 มล./ก. (น้อยกว่า 58% เทียบกับชุดควบคุม) ถ่านกัมมันต์ 152 มล./ก. (54%) และยางบดละเอียด 162 มล./ก. (51%) เมื่อเทียบกับค่าควบคุมเท่ากับ 330 มล./ก. ดังแสดงในรูปที่ 4.4





รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอนกับค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI)

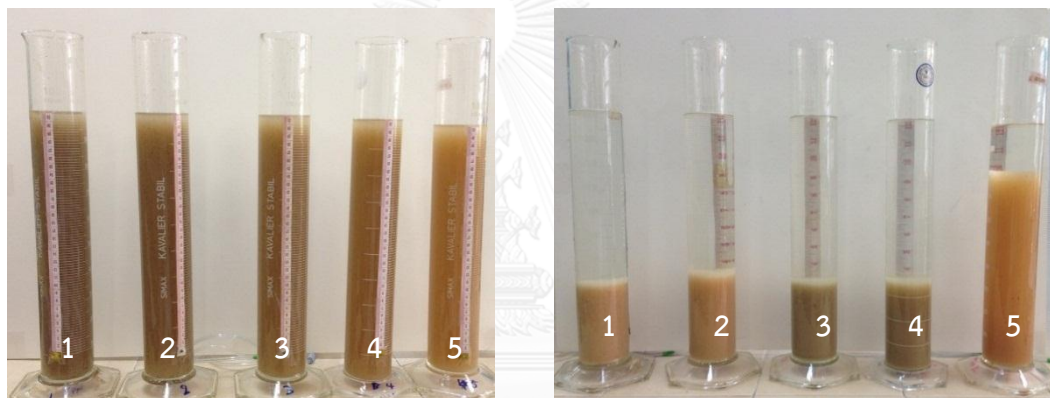
การเลือกขนาดวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใช้สำหรับการทดลองชุดนี้ พิจารณาจากขนาดวัสดุที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดและมีขายตามท้องตลาดในประเทศไทย เพื่อมุ่งหวังให้สามารถประยุกต์ใช้งานกับระบบบำบัดน้ำเสียจริงได้ดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกขนาดจากค่า Mesh Number และขนาดเฉลี่ย (หรือ  $D_{50}$ ) ของวัสดุแต่ละชนิดเป็นสำคัญ โดยผลการเลือกได้ขนาดดังนี้ คือ ทาลขนาด 200 mesh ถ่านกัมมันต์ขนาด 200 - 60 mesh และยางบดละเอียดขนาด 60 mesh จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาขนาดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) ได้เป็นค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ย (หรือ  $D_{50}$ ) เท่ากับ 65 213 และ 233 ไมโครเมตร ตามลำดับ สำหรับใช้ในงานทดลองดังกล่าวนี้

ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) และดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI) แปรผันตรงกับกำลังสองของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของแข็ง ( $D_p$ ) และความหนาแน่นของอนุภาค ( $\Delta\rho$ ) ตามกฎของสโตค (Stoke's Law equation,  $V_p = (4\rho d_p^2 g) / 18\mu$ ) ดังนั้น การเปรียบเทียบในชุดการทดลองวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวนี้ ควรต้องทดลองในขนาดที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะทำให้วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ความหนาแน่นวัสดุช่วยตกตะกอนยังมีค่าที่แตกต่างกันอยู่มาก โดยความหนาแน่นทาลมีค่าสูงสุด คือ 2.80 กรัม/ลบ.ซม. มากกว่าถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด คือ 2.20 และ 1.20 กรัม/ลบ.ซม. ตามลำดับ ดังนั้นทาลจึง

มีแนวโน้มทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) สูงกว่ากับถ่านกัมมันต์และยางบดละเอียด เพราะความหนาแน่นของทล็กมากที่สุด แม้ว่าขนาดจะเล็กสุดก็ตาม

#### 4.2.2 ผลของขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอน

การทดลองชุดนี้ เป็นการศึกษาขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอน ดังนี้ ทล็กขนาด 8 19 41 และ 65 ไมโครเมตร ถ่านกัมมันต์ขนาด 133 213 365 และ 802 ไมโครเมตร และยางบดละเอียดขนาด 223 408 450 และ 644 แต่ละชุดการทดลองทำการเจือจางควบคุม ค่าความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอส ประมาณ 3,000 มก./ล. ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนเท่ากับ 100% w/w ทำการเดินระบบด้วยถังปฏิกริยาแบบทีละเท (Batch) จากนั้นวัดค่าไอเอสวี ค่าเอสวี30 และพารามิเตอร์ต่างๆ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนลงไป



(ก) ก่อนการทดลอง

(ข) หลังการทดลอง

**รูปที่ 4.5** การตกตะกอนของสลัดจ์ด้วยทล็กขนาดแตกต่างกัน 4 ขนาด เทียบกับชุดควบคุมด้วย ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w

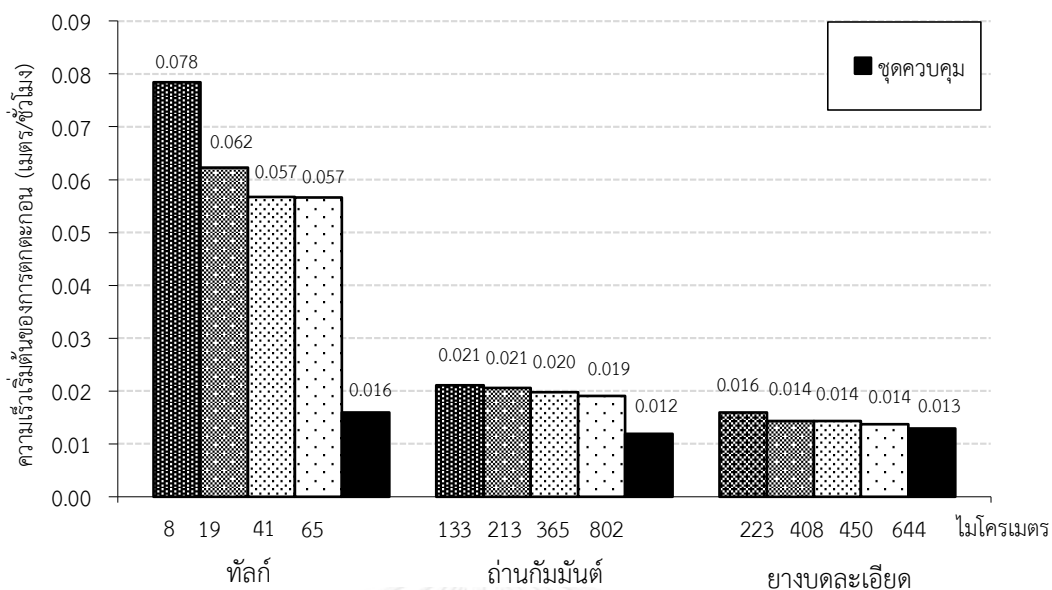
ชุด1) ทล็ก 8 ไมโครเมตร      ชุด2) ทล็ก 19 ไมโครเมตร      ชุด3) ทล็ก 41 ไมโครเมตร  
ชุด4) ทล็ก 65 ไมโครเมตร      ชุด5) ชุดควบคุม

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ทล็กในทุกขนาด (หมายเลข 1 2 3 และ 4) สามารถทำให้สลัดจ์ตกตะกอนได้ดีกว่าชุดควบคุม (หมายเลข 5) โดยทล็กขนาด 8 ไมโครเมตร จะตกตะกอนได้เร็วกว่าขนาด 19 41 และ 65 ไมโครเมตร ตามลำดับ การตกตะกอนสามารถเห็นได้ชัดเจน สลัดจ์ไม่มีลักษณะขุ่น ฟุ้งกระจาย สามารถเห็นการแยกชั้นสลัดจ์กับชั้นน้ำใสได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ในส่วนของถ่านกัมมันต์และยางบดละเอียดให้ผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับทล็ก รายละเอียดค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) แสดงในตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ค่าเฉลี่ยความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนในแต่ละขนาดวัสดุช่วยตกตะกอนที่ ปริมาณ วัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w

ชนิดวัสดุ ช่วยตกตะกอน	ขนาดวัสดุช่วยตกตะกอน (ไมโครเมตร)	ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนเฉลี่ย (เมตรต่อชั่วโมง)
ทัลก์	8	0.0784
	19	0.0623
	41	0.0567
	65	0.0566
	<b>ชุดควบคุม</b>	<b>0.0159</b>
ถ่านกัมมันต์	133	0.0211
	213	0.0206
	365	0.0197
	802	0.0190
	<b>ชุดควบคุม</b>	<b>0.0119</b>
ยางบดละเอียด	223	0.0159
	408	0.0143
	450	0.0143
	644	0.0137
	<b>ชุดควบคุม</b>	<b>0.0219</b>

จากผลการทดลอง พบว่า ทัลก์ขนาด 8 ไมโครเมตร ทำให้ค่าเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน สูงสุด เท่ากับ 0.0784 ม./ชม. (เพิ่ม 393% เทียบกับชุดควบคุม) สูงกว่าทัลก์ขนาด 19 41 และ 65 ไมโครเมตร เท่ากับ 0.0623 (เพิ่ม 292%) 0.0567 (เพิ่ม 256%) และ 0.0566 ม./ชม. (เพิ่ม 256%) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนเท่ากับ 0.0159 ม./ชม. เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6

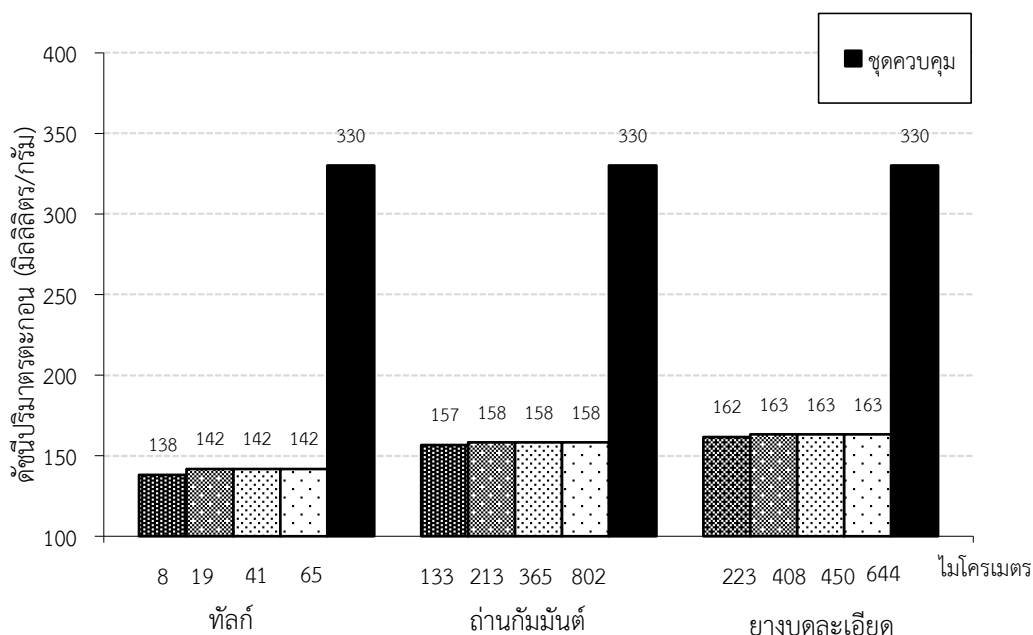


**รูปที่ 4.6** การเปรียบเทียบชนิดวัสดุช่วยตกตะกอนในแต่ละขนาดเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) ที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w

ถ่านกัมมันต์ขนาด 133 ไมโครเมตร ทำให้ค่าเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงสุด เท่ากับ 0.0211 ม./ชม. (เพิ่ม 77% เทียบกับชดควบคุม) สูงกว่าถ่านกัมมันต์ขนาด 213, 365 และ 802 ไมโครเมตร เท่ากับ 0.0206 (เพิ่ม 73%) 0.0197 (เพิ่ม 66%) และ 0.0190 ม./ชม. (เพิ่ม 60%) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชดควบคุมที่มีค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนเท่ากับ 0.0119 ม./ชม. เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6

ยางบดละเอียดขนาด 223 ไมโครเมตร ทำให้ค่าเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงสุด เท่ากับ 0.0159 ม./ชม. (เพิ่ม 23% เทียบกับชดควบคุม) สูงกว่ายางบดละเอียดขนาด 408 450 และ 644 ไมโครเมตร เท่ากับ 0.0143 (เพิ่ม 10%) 0.0143 (เพิ่ม 10%) และ 0.0137 ม./ชม. (เพิ่ม 6%) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชดควบคุมที่มีค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนเท่ากับ 0.0129 ม./ชม. เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6

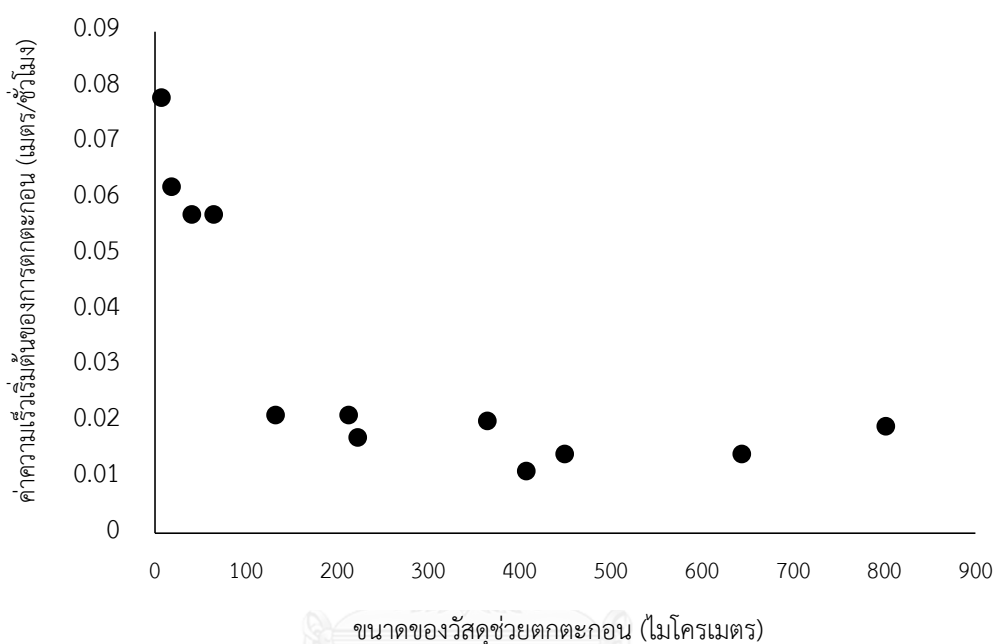
จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าวัสดุช่วยตกตะกอน คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด ที่มีขนาดเล็กจะช่วยเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนได้สูงกว่าขนาดใหญ่ และสูงกว่าชุดควบคุม โดยทัลก์ให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) สูงกว่า ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2.1 ดังนั้นวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะสามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ดีกว่าวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า เพราะวัสดุช่วยตกตะกอนขนาดเล็กมีความเร็วในการตกตะกอนต่ำกว่า ซึ่งเป็นการสร้างโอกาสให้วัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กสามารถชนกับฟล็อกได้มากกว่าวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้รวมกลุ่มกับฟล็อกได้แน่นกว่า พร้อมทั้งกวาดฟล็อกให้จมตัวได้เร็วกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบชนิดวัสดุช่วยตกตะกอนในแต่ละขนาดเทียบกับค่าดัชนีปริมาตรตะกอนที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w

จากรูปที่ 4.7 พบว่า ทัลก์ขนาด 8 ไมโครเมตร ทำให้ค่าดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI) น้อยที่สุดเท่ากับ 138 มล./ก. (เพิ่ม 58% เทียบกับชุดควบคุม) น้อยกว่าทัลก์ขนาด 19 41 และ 65 ไมโครเมตรเท่ากับ 142 มล./ก.(เพิ่ม 57%) และน้อยกว่าชุดควบคุมเท่ากับ 330 มล./ก. แสดงให้เห็นว่า ขนาดของทัลก์ไม่มีผลมากนักต่อการทำให้ค่าเอสวีไอลดลง ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องเช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด ที่มีค่าประมาณ 158 และ 163 มล./ก. ตามลำดับ

การใช้ค่าเอสวีไอซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำหรับวัดความสามารถในการตกตะกอน โดยทั่วไปแล้ว สลัดจ์ปกติควรมีค่าเอสวีไอ ประมาณ 75 ถึง 150 มล./ก. ซึ่งจากการทดลองแล้วพบว่ามีเพียงทล็ก (ค่าเอสวีไอประมาณ 142 มล./ก.) เท่านั้น ที่สามารถทำให้ค่าเอสวีไอลดลงอยู่ในระดับที่เป็นสลัดจ์ปกติได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าเอสวีไอของทล็กก็ยังมีแนวโน้มค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสลัดจ์ปกติ

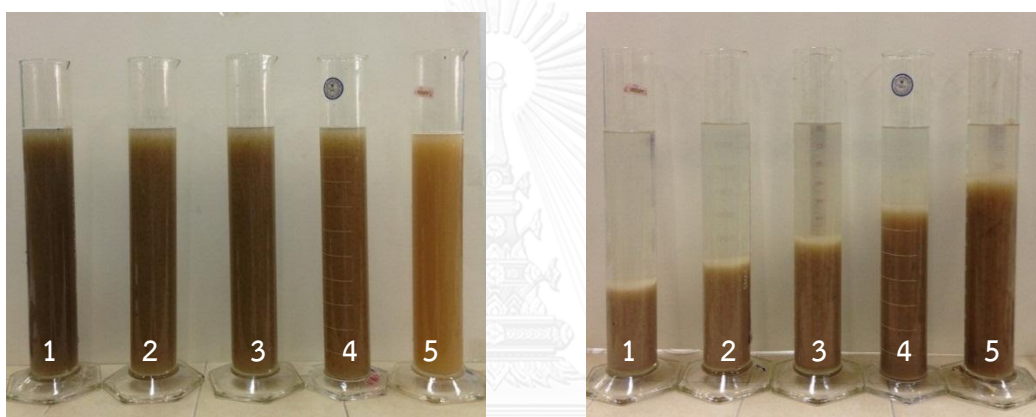


**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน ที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน 100% w/w

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวัสดุช่วยตกตะกอนกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน พบว่า วัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่าประมาณ 100 ไมโครเมตร ให้ค่าเอสวีไอสูงถึงประมาณ 0.05 - 0.08 เมตร/ชั่วโมง สำหรับวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร ให้ค่าเอสวีไอต่ำลงมาประมาณ 0.01 - 0.025 เมตร/ชั่วโมง เท่านั้น ดังนั้น ผลของขนาดวัสดุช่วยตกตะกอนมีความสัมพันธ์ต่อค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนอย่างชัดเจน โดยวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงกว่าขนาดใหญ่

#### 4.2.3 ผลของปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน

การทดลองชุดนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบค่าความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอนของสลัดจ์ที่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนในปริมาณที่ต่างกัน ดังนี้ 100% 80% 50% และ 20% w/w (น้ำหนักวัสดุช่วยตกตะกอนต่อน้ำหนักจุลินทรีย์) กับวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดต่างกัน ดังนี้ ทัลก์ขนาด 8 19 41 และ 65 ไมโครเมตร ถ่านกัมมันต์ขนาด 133 213 365 และ 802 ไมโครเมตร และยางบดละเอียดขนาด 223 408 450 และ 644 ไมโครเมตร แต่ละชุดการทดลองทำการเจือจางควบคุมค่าความเข้มข้นเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) ประมาณ 3,000 มก./ล.เท่ากันทุกชุดการทดลอง ทำการเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบทีละเท (Batch) จากนั้นวัดค่าไอเอสวี ค่าเอสวี30 และพารามิเตอร์ต่างๆ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนลงไป



(ก) ก่อนการทดลอง

(ข) หลังการทดลอง

**รูปที่ 4.9** การตกตะกอนของสลัดจ์ด้วยทัลก์ปริมาณแตกต่างกัน 4 ขนาด เทียบกับชุดควบคุม ชุด1) ทัลก์ปริมาณ 100% w/w ชุด2) ทัลก์ปริมาณ 80% w/w ชุด3) ทัลก์ปริมาณ 50% w/w ชุด4) ทัลก์ปริมาณ 20% w/w ชุด5) ชุดควบคุม

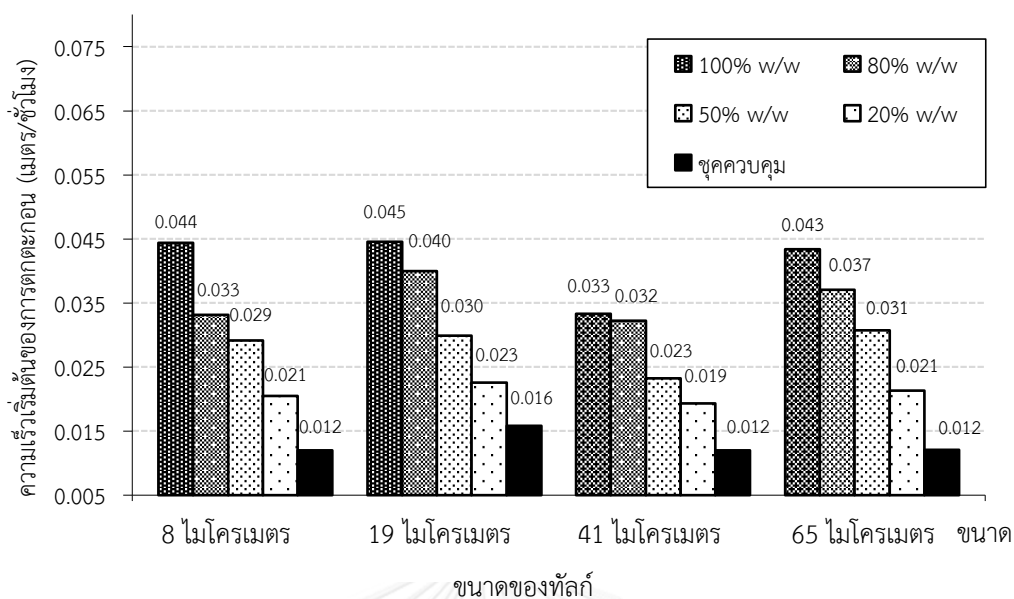
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในทุกปริมาณของทัลก์ (หมายเลข 1 2 3 และ 4) สามารถทำให้สลัดจ์ตกตะกอนได้ดีกว่าชุดควบคุม (หมายเลข 5) โดยทัลก์ปริมาณ 100% w/w จะตกตะกอนได้ดีกว่าที่ปริมาณ 80% 50% และ 20% w/w ตามลำดับ การตกตะกอนสามารถเห็นได้ชัดเจน สลัดจ์ไม่มีลักษณะขุ่น ฟุ้งกระจาย สามารถเห็นการแยกชั้นสลัดจ์กับชั้นน้ำใสได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ในส่วนของถ่านกัมมันต์และยางบดละเอียดให้ผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกับทัลก์ รายละเอียดค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV) ถูกแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนต่างกันเทียบกับชุดควบคุม (0% w/w)

วัสดุช่วยตกตะกอน	ขนาด (ไมโครเมตร)	ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนเฉลี่ย (เมตร/ชั่วโมง) ที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนต่างๆ (w/w)				
		ชุดควบคุม	20%	50%	80%	100%
ทัลก์	8	<b>0.0120</b>	0.0205	0.0291	0.0332	0.0444
	19	<b>0.0158</b>	0.0266	0.0299	0.0400	0.0445
	41	<b>0.0120</b>	0.0193	0.0232	0.0322	0.0333
	65	<b>0.0121</b>	0.0213	0.0307	0.0370	0.0434
ถ่านกัมมันต์	133	<b>0.0098</b>	0.0109	0.0133	0.0165	0.0187
	213	<b>0.0070</b>	0.0089	0.0104	0.0116	0.0132
	365	<b>0.0084</b>	0.0093	0.0115	0.0132	0.0141
	802	<b>0.0086</b>	0.0068	0.0080	0.0077	0.0077
ยางบดละเอียด	223	<b>0.0121</b>	0.0138	0.0156	0.0158	0.0172
	408	<b>0.0087</b>	0.0094	0.0097	0.0099	0.0107
	450	<b>0.0123</b>	0.0117	0.0122	0.0127	0.0137
	644	<b>0.0115</b>	0.0118	0.0125	0.0143	0.0144

จากผลการทดลอง พบว่า ทัลก์ขนาด 8 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 100% w/w ทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงสุด เท่ากับ 0.0444 ม./ชม. (เพิ่ม 269% เทียบกับชุดควบคุม) สูงกว่าทัลก์ที่ปริมาณ 80% 50% และ 20% w/w เท่ากับ 0.0332 (เพิ่ม 176%) 0.0291 (เพิ่ม 142%) และ 0.0205 ม./ชม. (เพิ่ม 71%) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนเท่ากับ 0.0120 ม./ชม.เท่านั้น ในส่วนของทัลก์ขนาด 19 41 และ 65 ไมโครเมตร ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องเช่นเดียวกับทัลก์ขนาด 8 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10

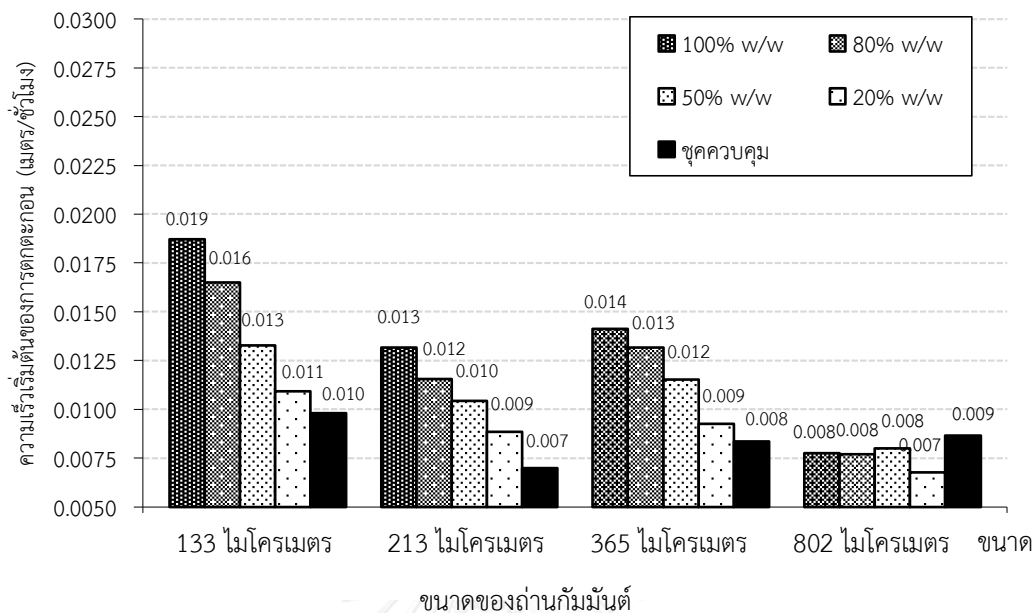




**รูปที่ 4.10** การเปรียบเทียบปริมาณทล็กที่ต่างกันเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน ในทุกขนาดของทล็ก

ในชุดถ่านกัมมันต์ขนาด 133 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 100% w/w ทำให้ค่าเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงสุด เท่ากับ 0.0187 ม./ชม. (เพิ่ม 91% เทียบกับชุดควบคุม) สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณ 80% 50% และ 20% w/w เท่ากับ 0.0165 (เพิ่ม 68%) 0.0133 (เพิ่ม 36%) และ 0.0109 ม./ชม. (เพิ่ม 11%) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนเท่ากับ 0.0098 ม./ชม.เท่านั้น สำหรับถ่านกัมมันต์ขนาด 213 และ 365 ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องเช่นเดียวกับขนาด 133 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10

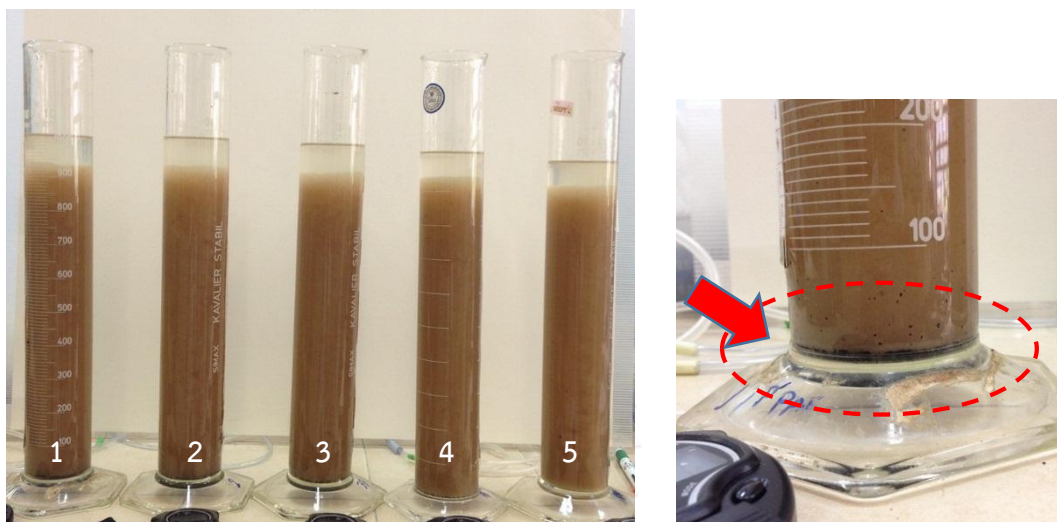
แต่ในส่วนของถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร (ขนาดใหญ่สุด) พบว่า ที่ปริมาณการเติม 100% 80% 50% และ 20% ให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน ดังนี้ 0.0077 0.0077 0.0080 และ 0.0068 ม./ชม. ตามลำดับ ต่ำกว่าชุดควบคุม คือ 0.0086 ม./ชม. ทุกชุดการทดลอง เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีขนาดใหญ่มีความเร็วในการตกตะกอนสูง วัสดุช่วยตกตะกอนไม่สามารถยึดเกาะกับสลัดจ์ได้ทัน ทำให้ตกลงกันถึงปฏิกิริยาทั้งหมด โดยไม่เกิดการกวาดจับสลัดจ์ ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ที่ขนาด 802 ไมโครเมตร ไม่เหมาะสมสำหรับใช้แก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่า 133 213 และ 365 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.11



**รูปที่ 4.11** การเปรียบเทียบปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต่างกันเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน ในทุกขนาดของถ่านกัมมันต์

การที่ถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร ไม่สามารถยึดเกาะกับสลัดจ์ได้ และตกลงที่ก้นถังตกตะกอนสามารถอธิบายได้ตามสมการของสโตค ( $V_p = (\Delta\rho d^2 g) / 18\mu$ ) วัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดใหญ่มีความเร็วการตกตะกอนแบบโตนสูงกว่าขนาดเล็กถึงกำลังสอง กล่าวได้ว่า ถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร (ขนาดใหญ่สุด) มีแนวโน้มที่ทำให้ค่าความเร็วในการตกตะกอนแบบโตนสูงมาก จนทำให้ถ่านกัมมันต์เกิดการทะลุผ่านสลัดจ์ และไม่สามารถเกาะตัวกับฟล็อก เมื่อพิจารณาลักษณะการเกาะตัวระหว่างฟล็อกกับถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร พบว่า ถ่านกัมมันต์ทุกปริมาณไม่สามารถเกาะตัวกับสลัดจ์ได้เลย เกิดการตกลงใต้กระบอกตวงเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งต่างจากวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กทำให้ความเร็วการตกตะกอนแบบโตนน้อยกว่า จนสามารถเกาะตัวเข้ากับฟล็อกและส่งผลให้ค่าไอเอวีเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ดังนั้น ในการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวไม่ควรใช้วัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดใหญ่จนเกินไป (ถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร) เพราะวัสดุช่วยตกตะกอนขนาดใหญ่จะมีความเร็วในการตกตะกอนแบบโตนสูงกว่า จนไม่สามารถโอกาสรวมกลุ่มกับฟล็อก และเกิดการกวาดฟล็อกลงมาได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.2 และรูปที่ 4.8 แต่ถึงอย่างไรค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนถ่านกัมมันต์ขนาด

802 ไมโครเมตร ที่ไม่สอดคล้องกับขนาด 133 213 และ 365 ไมโครเมตร นั้น อาจเกิดจากได้หลากหลายกรณี อาทิเช่น ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ ความผิดพลาดจากการช่วงเวลาที่ทำการทดลองเกิดจุลินทรีย์ประเภทเส้นใยเกิดขึ้นมากหรือน้อยลงอย่างทันทีทันใด หรืออาจเกิดจากความผิดพลาดของการวัดและเครื่องมือก็เป็นได้



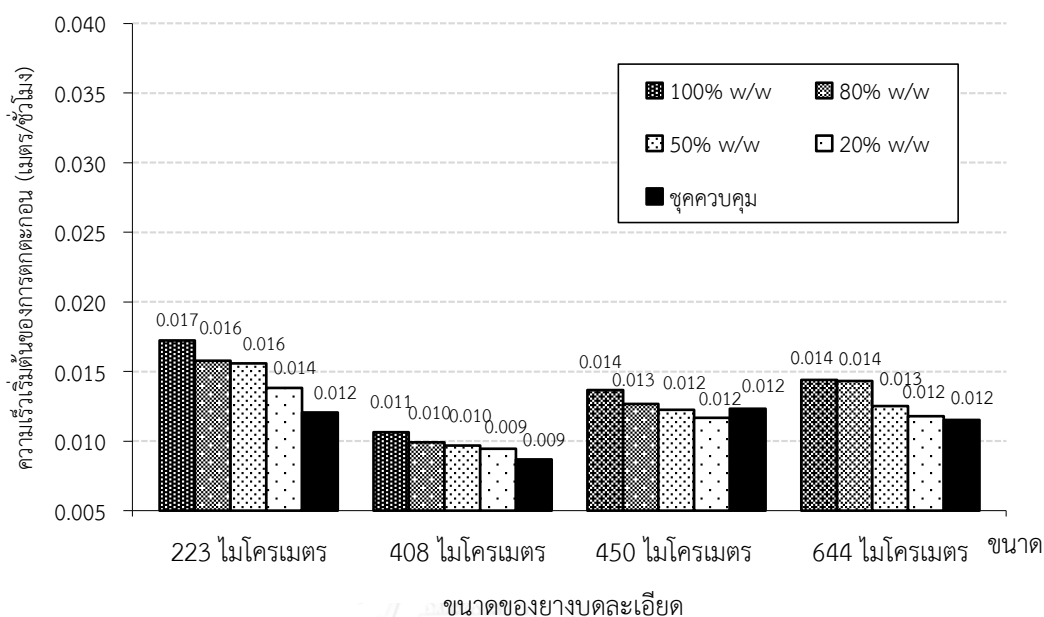
รูปที่ 4.12 การตกตะกอนของถ่านกัมมันต์ ขนาด 802 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

- ชุด1) ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 100% w/w                      ชุด2) ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 80% w/w  
 ชุด3) ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 50% w/w                      ชุด4) ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 20% w/w  
 ชุด5) ชุดควบคุม

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็น ชุดการทดลองของถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร (มีสีดำ) ไม่สามารถยึดเกาะกับสลัดจ์ (สีน้ำตาล) ได้ และตกลงด้านล่างกระบอกตวงทั้งหมด โดยภาพซ้ายมือ แสดงถึงชุดทดลองถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 100% 80% 50% และ 20% w/w (หมายเลข 1 2 3 และ 4) เทียบกับชุดควบคุม (หมายเลข 5) ซึ่งพบว่าไม่มีวัสดุช่วยตกตะกอนยึดเกาะกับสลัดจ์ได้เลย ดูจากสลัดจ์จะสีน้ำตาลเหมือนกับสีของสลัดจ์ในชุดควบคุม รูปขวามือแสดงถึงถ่านกัมมันต์ตกลงใต้กระบอกตวงทั้งหมด พบว่าด้านล่างกระบอกตวงมีสีดำของถ่านกัมมันต์

ยางบดละเอียดขนาด 223 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 100% w/w ทำให้ค่าเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงสุด เท่ากับ 0.0172 เมตร/ชั่วโมง (เพิ่ม 43% เทียบกับชุดควบคุม) สูงกว่ายางบดละเอียดที่ปริมาณ 80% 50% และ 20% w/w เท่ากับ 0.0158 (เพิ่ม 31%), 0.0156 (เพิ่ม 29%) และ 0.0138 เมตร/ชั่วโมง (เพิ่ม 25%) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่มีค่าความเร็วเริ่มต้นของ

การตกตะกอนเท่ากับ 0.0121 เมตร/ชั่วโมง เท่านั้น ในส่วนของยางบดละเอียดขนาด 408, 450 และ 644 ไมโครเมตร ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องเช่นเดียวกับยางบดละเอียดขนาด 223 ไมโครเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.13

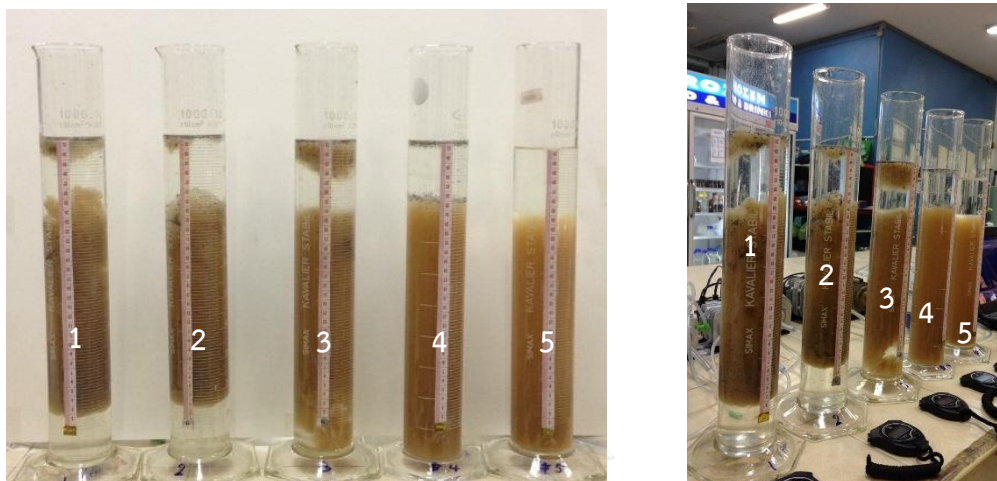


**รูปที่ 4.13** การเปรียบเทียบปริมาณยางบดละเอียดที่ต่างกันเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน ในทุกขนาดของยางบดละเอียด

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ยางบดละเอียดสามารถเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนที่สามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้จริง เช่นเดียวกับ ทัลก์และถ่านกัมมันต์ แต่ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนไม่สูงเท่ากับทัลก์และถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เป็นเพราะยางบดละเอียดมีค่าความหนาแน่นค่อนข้างน้อยเพียง 1.20 กรัม/ลบ.ซม. เทียบกับทัลก์และถ่านกัมมันต์ คือ 2.80 และ 2.20 กรัม/ลบ.ซม. ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการของสโตค เมื่อความหนาแน่นมีค่าน้อยทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอนลดลงไปด้วย กฎของสโตค (Stoke's Law equation,  $V_p = (\Delta\rho d^2 g) / 18\mu$ )

ชุดการทดลองที่ใช้ยางบดละเอียดเพื่อแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวนั้น เมื่อพิจารณาในรายละเอียดช่วงแรกของการทดลอง พบว่ายางบดละเอียดสามารถช่วยเพิ่มค่าความเร็วเริ่มต้นในการตกตะกอนได้ สลัดจ์ยึดเกาะกับยางบดละเอียดได้แน่น และสามารถตกลงที่ก้นถังปฏิกิริยาได้ แต่ในระยะเวลาต่อมา พบว่าในระบบได้เกิดฟองก๊าซลอยขึ้นบนผิวน้ำเป็นจำนวนมาก ซึ่งฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเกิดจากสลัดจ์ตะกอนที่ปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานานจนเกิดสภาวะดีไนตริฟิเคชัน (จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2538) และเมื่อวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) เหลือประมาณ 0.2 มก./ล. ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวไปผลักดันให้ยางบดละเอียดและตะกอนสลัดจ์ขณะที่ตกตะกอนให้ลอยตัวขึ้นมาบนผิวน้ำอีกครั้ง

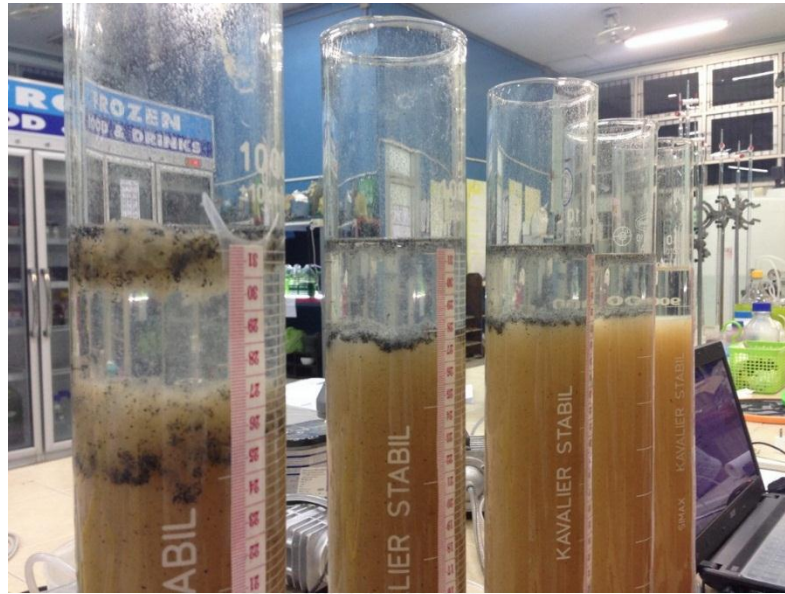


**รูปที่ 4.14** ปัญหาการตกตะกอนของยางบดละเอียดที่เกิดในสภาวะดีไนตริฟิเคชัน

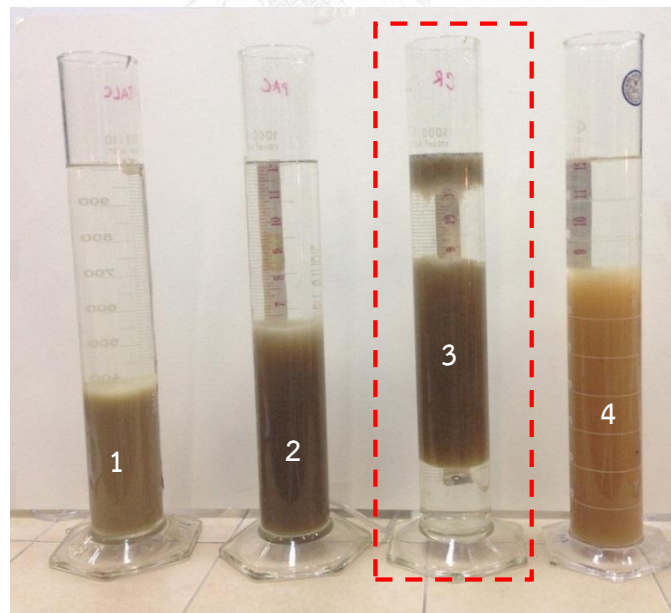
- ชุด1) ยางบดละเอียดปริมาณ 100% w/w      ชุด2) ยางบดละเอียดปริมาณ 80% w/w  
 ชุด3) ยางบดละเอียดปริมาณ 50% w/w      ชุด4) ยางบดละเอียดปริมาณ 20% w/w  
 ชุด5) ชุดควบคุม

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ยางบดละเอียดกับสลัดจ์ตะกอนลอยตัวขึ้นบนกระบอกตวง โดยที่ยางบดละเอียดที่ปริมาณ 100% และ 80% w/w (หมายเลข 1 และ 2) ลอยตัวขึ้นมากกว่า ยางบดละเอียดที่ปริมาณ 50 และ 20% w/w (หมายเลข 3,4) อย่างชัดเจน แต่ชุดควบคุม (หมายเลข 5) ไม่มีตะกอนสลัดจ์ลอยขึ้นบนกระบอกตวงเลย กล่าวได้ว่ายางบดละเอียดเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สลัดจ์ลอยตัวขึ้นมา

การที่ยางบดละเอียดเป็นตัวสาเหตุหลักทำให้สลัดจ์เกิดการลอยตัวขึ้นมา เป็นเพราะความหนาแน่นของยางบดละเอียดมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมาก (ประมาณ 1.20 กรัม/ลบ.ซม.) เมื่อเกิดแรงลอยตัวจากฟองก๊าซจากสลัดจ์ในกระบวนการดีไนตริฟิเคชันแล้ว ก็ช่วยผลักดันให้ยางบดละเอียดลอยตัวขึ้นบนกระบอกตวงอีกครั้ง อีกทั้งยังเอาสลัดจ์ลอยขึ้นบนผิวน้ำด้วย (ดังแสดงในรูปที่ 4.15)



รูปที่ 4.15 การลอยตัวของยางบดละเอียดกับตะกอนสลัดจ์ที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว  
เปรียบเทียบกับชุดควบคุม



รูปที่ 4.16 การลอยตัวของสลัดจ์กับยางบดละเอียดที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเปรียบเทียบกับสลัดจ์  
ถ่านกัมมันต์ และชุดควบคุม

ชุด1) สลัดจ์    ชุด2) ถ่านกัมมันต์    ชุด3) ยางบดละเอียด    ชุด4) ชุดควบคุม

จากรูปที่ 4.16 แสดงการตกตะกอนของวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด ในสถานะที่ระบบเกิดการบวมการดีไนตริฟิเคชัน พบว่ายางบดละเอียด (หมายเลข3) เพียงชนิดเดียวเท่านั้น ที่ทำให้สลัดจ์ลอยขึ้นมา ในส่วนทอล์ก ถ่านกัมมันต์และชุดควบคุม (หมายเลข1 2 และ 4) ไม่ทำให้สลัดจ์ลอยตัวขึ้นมาได้ ทั้งนี้เป็นเพราะทอล์กและถ่านกัมมันต์มีความหนาแน่นที่สูงกว่ายางบดละเอียด โดยทอล์กยังคงตกตะกอนได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2.1 ดังนั้นการใช้ยางบดละเอียดเป็นวัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวสามารถใช้ได้เพียงแต่อาจต้องระวังการเกิดดีไนตริฟิเคชันที่กั้นถึงตกตะกอน ซึ่งต่างจากทอล์กและถ่านกัมมันต์บดละเอียดที่แก้ปัญหาได้ดีกว่าตามผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนในปริมาณสูงสามารถช่วยเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนได้ในทันที และหากเติมในปริมาณที่สูงมากกว่า 100% w/w ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนก็มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอีกได้เพียงแต่ไม่เป็นการประหยัด ดังนั้นจากผลการทดลองนี้น่าจะช่วยเป็นข้อมูลในการตัดสินใจสำหรับการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียจริงด้วยปริมาณที่เหมาะสมกับความต้องการ

สำหรับแนวทางการคัดเลือกค่าของวัสดุช่วยตกตะกอนที่เหมาะสม จะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป ในหัวข้อที่ 4.5

#### 4.3 ผลการศึกษาการคำนวณเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดถึงตกตะกอนด้วยอัตราน้ำล้นผิว

ค่าที่ใช้ในการออกแบบ ถึงตกตะกอนในระบบเอเอสทั่วไป ใช้ค่าอัตราน้ำล้นผิว โดยค่าดังกล่าวประมาณมาจากการตกตะกอนแบบโอด (Metcalf and Eddy, 2014) ในทางปฏิบัติและในงานวิจัยนี้การตกตะกอนเป็นการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น จะทำการวิเคราะห์โดยวิธีการเปรียบเทียบระยะทางต่อเวลาโดยใช้ระบอกลงหรือค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนนั่นเอง และถือว่าเป็นค่าโดยประมาณใกล้เคียงกับอัตราน้ำล้นผิว (Surface loading rate) จากงานวิจัยจะทำการพิจารณาจากวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาดเล็กที่สุด คือ ทอล์กขนาด 8 ไมโครเมตร ถ่านกัมมันต์ชนิดผงขนาด 133 ไมโครเมตร และยางบดละเอียดขนาด 223 ไมโครเมตร ในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ค่าเฉลี่ยความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนต่างกันเทียบกับชุดควบคุม (0% w/w)

ชนิดวัสดุช่วยตกตะกอน	ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน (w/w)	ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน		ค่าอัตราน้ำล้นผิวที่ใช้ ออกแบบ (เมตร/วัน)	ปริมาณสลัดจ์ ที่ 30 นาที (SV30) (มล./ล.)	ดัชนีปริมาตรตะกอน (SVI) (มล./ก.)
		เมตร/วัน	ร้อยละที่เพิ่ม			
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
ถ่านกัมมันต์	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%	0.414	43%		950	158

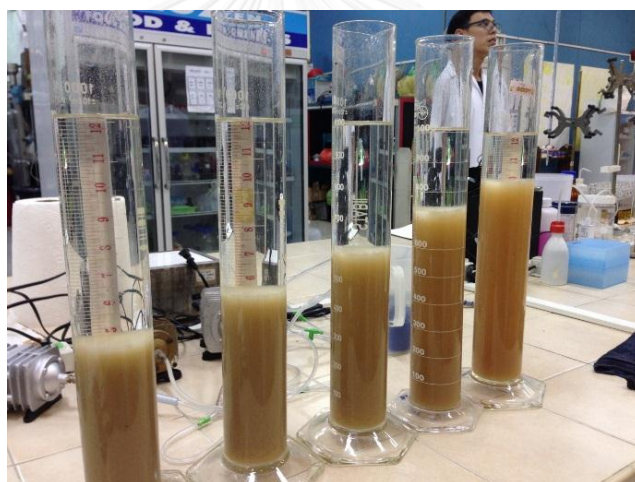
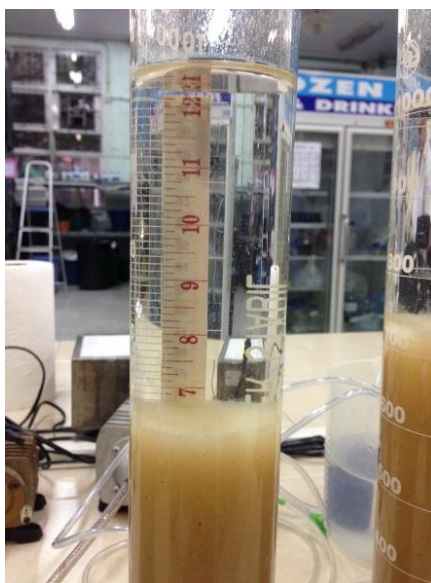
จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (หรือค่าอัตราน้ำล้นผิว) จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตรงตามปริมาณของวัสดุตกตะกอนที่เติมลงไปทั้ง 3 ชนิด โดยปริมาณของทัลก์ที่ 100% w/w จะให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงสุด เท่ากับ 1.066 เมตร/วัน (เพิ่ม 270% เทียบกับชุดควบคุม) แต่อย่างน้อยก็ค่าอัตราน้ำล้นผิวของถังตกตะกอนในระบบเอเอสทั่วไป (Metcalf and Eddy, 2014) อยู่มาก (ค่าอัตราน้ำล้นผิว 16 - 28 เมตร/วัน) สำหรับค่าเอสวี 30 และค่าเอสวีไอจะลดลงเป็นสัดส่วนกลับตามปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนที่เติมลงไปทั้ง 3 ชนิด และ



น้อยกว่าชุดควบคุมในทุกชุดการทดลอง แสดงว่าวัสดุช่วยตกตะกอนสามารถช่วยเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน และสามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.2

ในทางทฤษฎีปัจจุบันกำหนดว่าการที่ระบบจะสามารถเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้เมื่อมีค่าเอสวีไอ > 150 มล./ก. และ ค่าเอสวี 30 > 980 มล./ล. (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ดังนั้นการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด สามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวได้ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ตั้งที่ได้กล่าวมา แต่การตกตะกอนของสลัดจ์ยังไม่ดีพอเทียบเท่าการตกตะกอนของสลัดจ์ในสภาวะปกติ เมื่อพิจารณาจากค่าเอสวีไอและเอสวี30 เห็นได้ว่าการแสดงผลของการจมตัวของสลัดจ์ถึงแม้ว่าจะตกตะกอน (ค่าเอสวีไอและเอสวี30 ต่ำสุด 142 มล./ก. และ 850 มล./ล. ตามลำดับ) ได้ดีกว่าชุดควบคุม แต่ยังมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุดทางทฤษฎีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ค่าเอสวีไอ > 150 มล./ก. และ เอสวี30 > 980 มล./ล.) ดังนั้น การใช้วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิดยังไม่สามารถแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวอย่างถาวรหรือในระยะยาวได้ เพราะว่าการตกตะกอนยังดีไม่พอเทียบเท่าการตกตะกอนของสลัดจ์ตะกอนในสภาวะปกติ (ATV Working Group, 1989) แต่ยังมีมากพอสำหรับการแก้ปัญหาอย่างเร่งด่วนหรือทันทีทันใดเท่านั้น สำหรับการแก้ไขปัญหาก็ให้หายอย่างถาวร ยังจำเป็นต้องใช้ถังคัดพันธุ์ (Selector) (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) (Jenkins และคณะ, 1993) หรือการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนก่อนเริ่มเดินระบบเอเอสเลี้ยงพร้อมกับการเชื่อมจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยาสามารถช่วยแก้ปัญหาให้หายขาดได้ (เอกลักษณ์ ไชยพันธุ์, 2551) (สถิตรัตน์ รอดอารี, 2552) (ธัญรัตน์ แสงสุวรรณ, 2552)

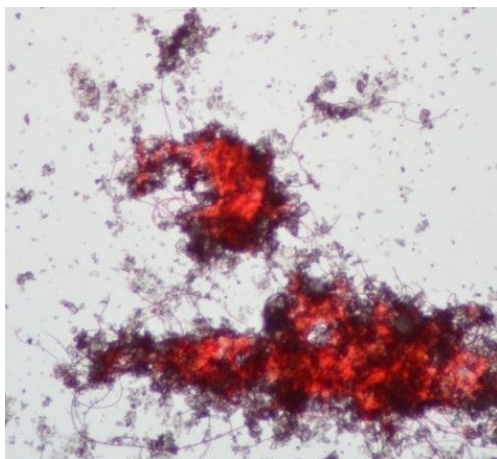
ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเกิดจากจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยซึ่งยังมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้เหมือนหรือดีกว่าปกติ เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยมักเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีสารอาหารต่ำ (Low-Substrate levels) และการประสานตัวกันเองของเส้นใยจุลินทรีย์ช่วยทำให้ได้น้ำใสมากในระหว่างการตกตะกอน (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ดังนั้น การใช้วัสดุช่วยตกตะกอนในขณะที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว ช่วยเพิ่มความเร็วการตกตะกอนได้ ส่งผลให้ถังตกตะกอนสามารถผลิตน้ำใสให้กับระบบได้ การได้น้ำใสที่มีคุณภาพดี ถือเป็นข้อดีอีกประการหนึ่ง สำหรับผู้ควบคุมพิจารณาเลือกใช้วัสดุช่วยตกตะกอนมาเพื่อแก้ปัญหา น้ำใสที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.17



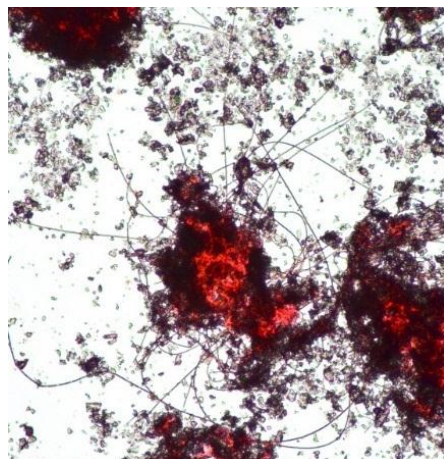
รูปที่ 4.17 ลักษณะน้ำใสที่เกิดขึ้น

#### 4.4 ผลการศึกษาลักษณะการเกาะตัวระหว่างวัสดุช่วยตกตะกอนกับฟล็อกของจุลชีพ

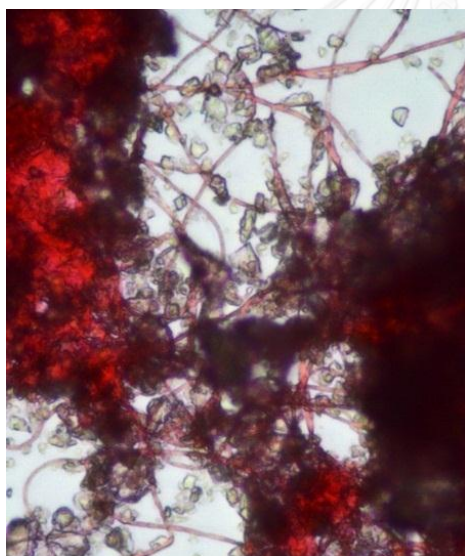
การทดลองชุดนี้เป็นการศึกษาลักษณะการเกาะตัวระหว่างวัสดุช่วยตกตะกอนกับฟล็อกจุลชีพที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยเลือกใช้ทัลก์เป็นตัวแทนวัสดุช่วยตกตะกอนที่ขนาด 8 19 41 และ 65 ไมโครเมตร เติมน้ำกับสลัดจ์ที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว กวนผสมให้ทั่วถึงกัน ปล่อยให้ตกตะกอน แล้วนำสลัดจ์ไปทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 4 10 40 และ 100 เท่า ในการศึกษาชุดนี้จะนำสลัดจ์ไปย้อมสีแกรมก่อน เพื่อให้จุลชีพติดสีและสามารถมองเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ถึง 4.22



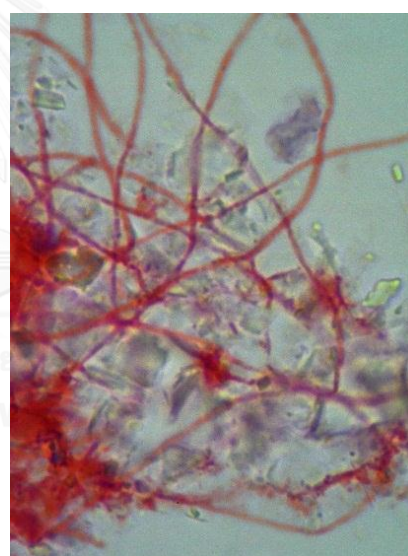
(ก)



(ข)

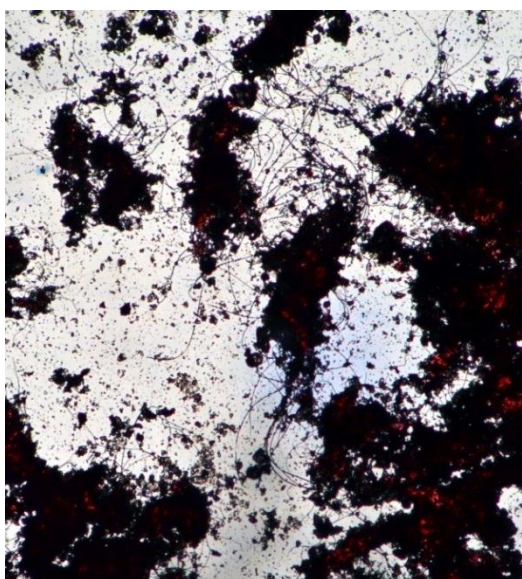


(ค)

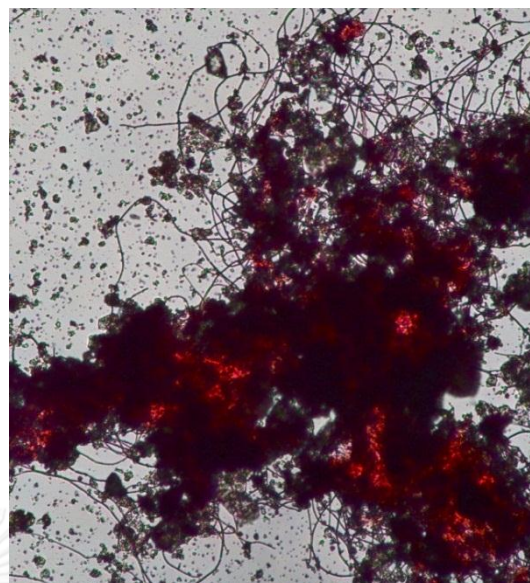


(ง)

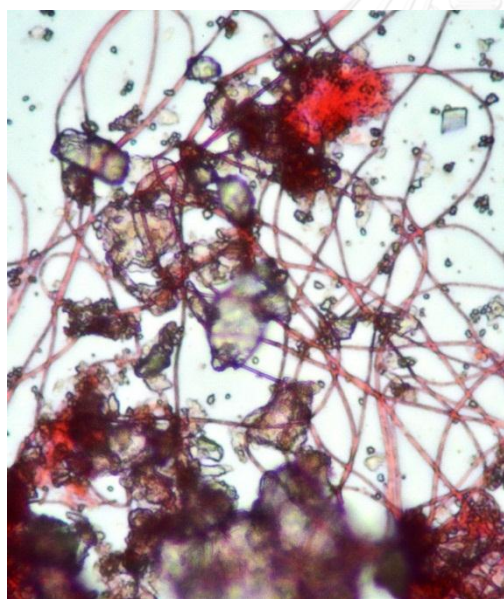
**รูปที่ 4.18** ขยายฟล็อกจูลซีพกับวัสดุช่วยตกตะกอนที่ลึกลงขนาด 8 ไมโครเมตร  
 ก) กำลังขยาย 4 เท่า ข) กำลังขยาย 10 เท่า ค) กำลังขยาย 40 เท่า ง) กำลังขยาย 100 เท่า



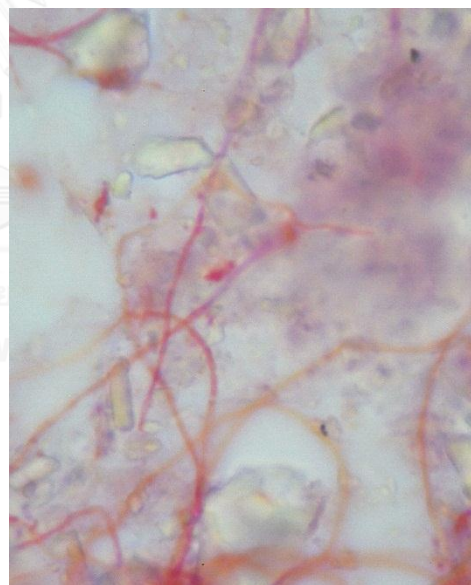
(ก)



(ข)



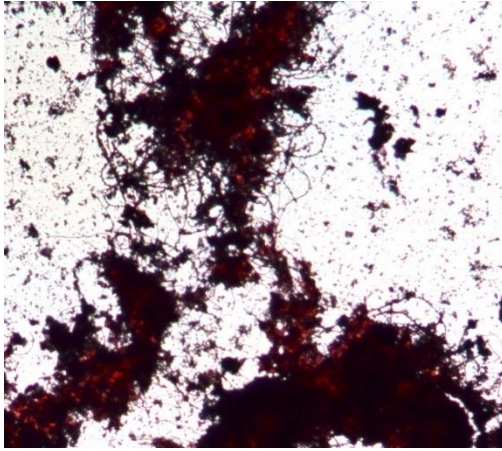
(ค)



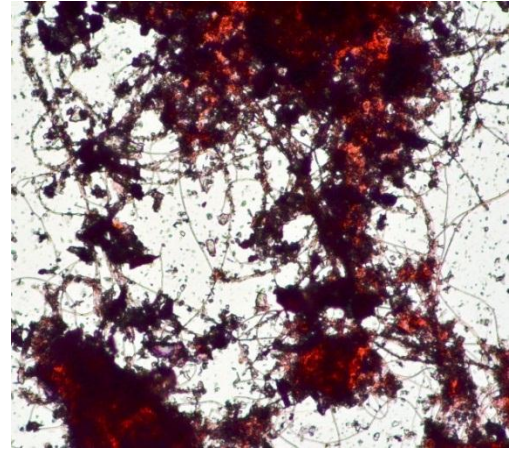
(ง)

รูปที่ 4.19 ขยายฟลือกจุลชีพกับวัสดุช่วยตกตะกอนที่ล็กขนาด 19 ไมโครเมตร

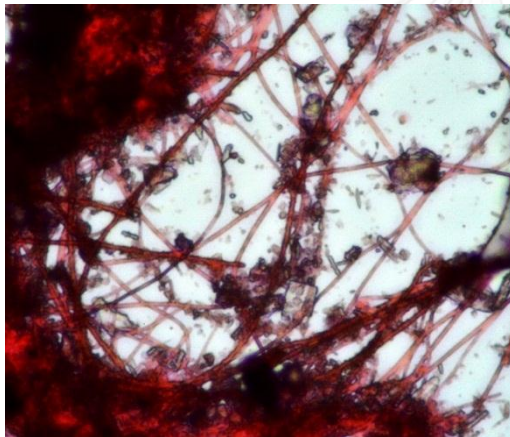
ก) กำลังขยาย 4 เท่า ข) กำลังขยาย 10 เท่า ค) กำลังขยาย 40 เท่า ง) กำลังขยาย 100 เท่า



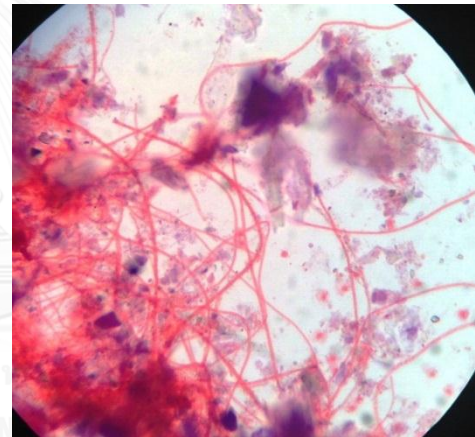
(ก)



(ข)



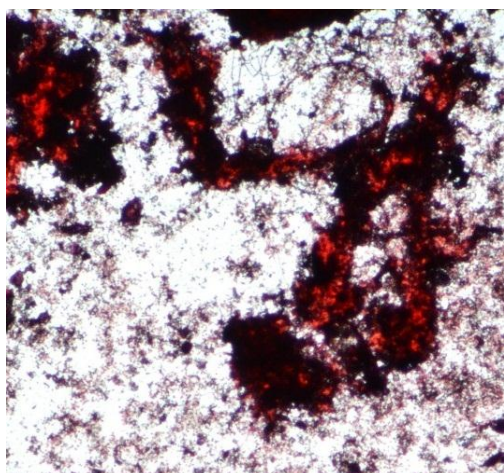
(ค)



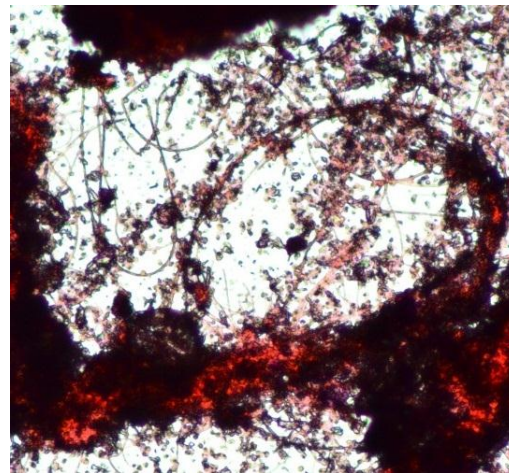
(ง)

รูปที่ 4.20 ขยายฟลื้อกจุลชีพกับวัสดุช่วยตกตะกอนที่ล็กขนาด 41 ไมโครเมตร

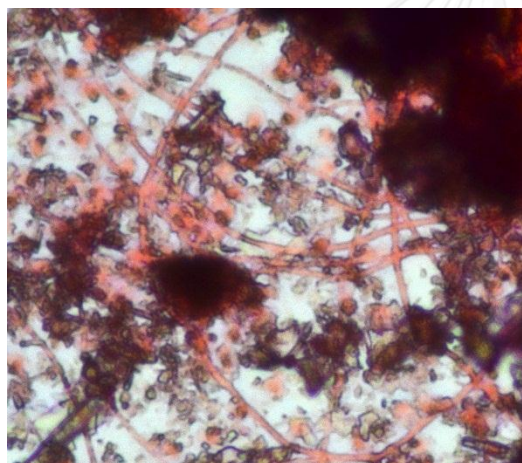
ก) กำลังขยาย 4 เท่า ข) กำลังขยาย 10 เท่า ค) กำลังขยาย 40 เท่า ง) กำลังขยาย 100 เท่า



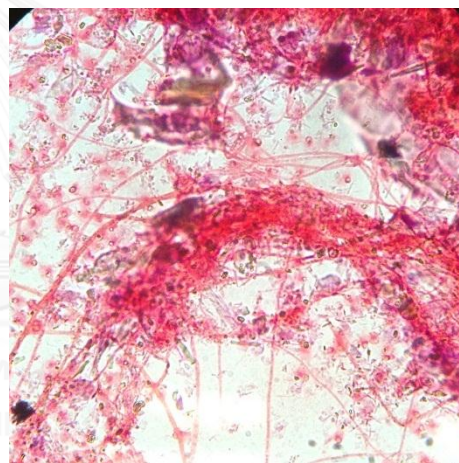
(ก)



(ข)



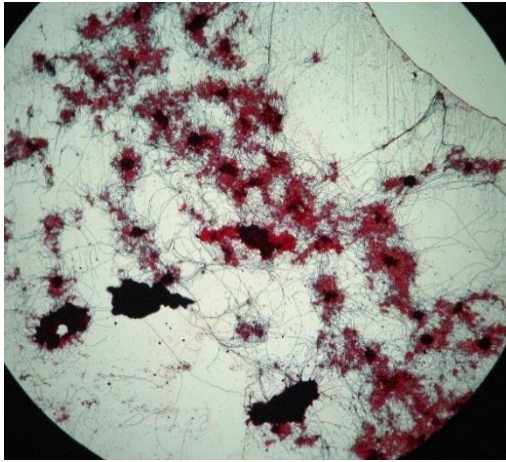
(ค)



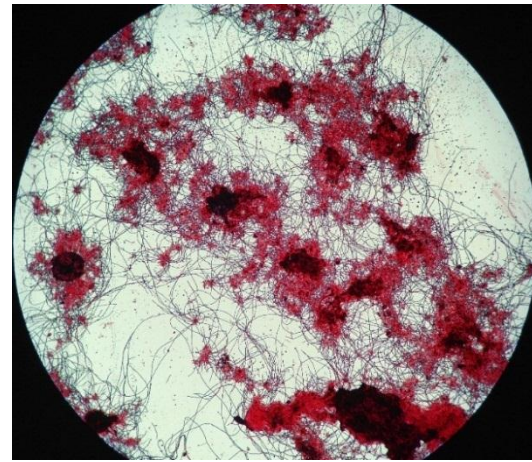
(ง)

รูปที่ 4.21 ขยายฟลื้อกจุลชีพกับวัสดุช่วยตกตะกอนที่ล็กขนาด 65 ไมโครเมตร

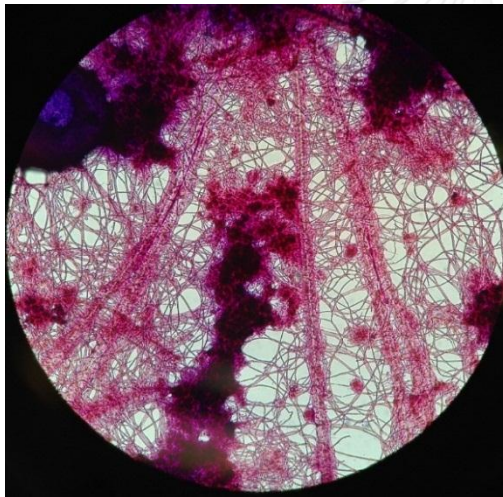
ก) กำลังขยาย 4 เท่า ข) กำลังขยาย 10 เท่า ค) กำลังขยาย 40 เท่า ง) กำลังขยาย 100 เท่า



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

**รูปที่ 4.22** ขยายฟลือกจุลชีพที่เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัว (ชุดควบคุม)

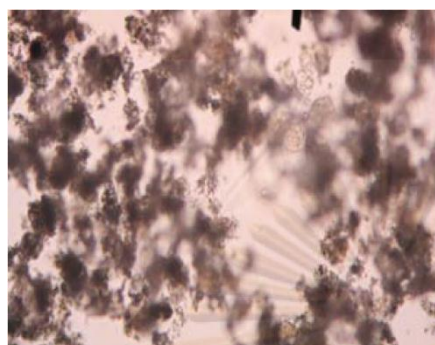
ก) กำลังขยาย 4 เท่า ข) กำลังขยาย 10 เท่า ค) กำลังขยาย 40 เท่า ง) กำลังขยาย 100 เท่า

จากการตรวจสอบตะกอนแขวนลอยด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบจุลินทรีย์ประเภทเส้นใยจำนวนมากและเป็นกลุ่มหลัก ส่วนจุลินทรีย์ประเภทสร้างฟล็อกพบเป็นจำนวนที่น้อยกว่า เมื่อย้อมสีแกรม จุลินทรีย์ประเภทเส้นใย พบว่าติดสีแกรมลบ(สีแดง) และเมื่อพิจารณาจากรูปร่างพบว่ามึลักษณะที่คล้ายกับแบคทีเรียเส้นใยประเภท *Microthrix parvicella* (Eikelboom, 1975) ในส่วนจุลินทรีย์ประเภทสร้างฟล็อกจะสังเกตเห็นจุลชีพในกลุ่ม *Rotirera*, *Free swimming* และ *Crawling Ciliates*, *Stalked Ciliates* และ *Flagellates* เคลื่อนที่กระจายตัวอยู่กันอย่างอิสระและมีจำนวนน้อย

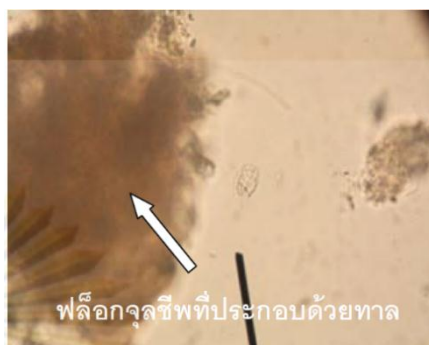
จากการสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าระบบที่มีการเติมทล้กลงไปจะเข้าไปเกาะติดจุลินทรีย์ประเภทเส้นใยและสลัดจ์อยู่เป็นจำนวนมาก โดยการเติมทล้ที่มีขนาดเล็ก คือ 8 ไมโครเมตร ลงไป พบว่า ทล้เข้าไปเกาะติดกับสายใยของจุลินทรีย์ และอยู่กระจัดกระจายในทุกส่วนของสลัดจ์และจุลชีพ มากกว่าทล้ขนาด 19 41 และ 65 ไมโครเมตร ในส่วนของทล้ขนาด 65 ไมโครเมตร ก็พบเข้ายึดเกาะเช่นเดียวกับทล้ขนาด 2 ไมโครเมตร แต่มีปริมาณที่น้อยกว่า และน้อยกว่าขนาด 19 และ 41 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ถึง 4.22

จากงานวิจัย สติร์ตัน รอดอารี (2552) พบว่า ระบบที่มีการเติมทล้ลงไปเลี้ยงพร้อมกับการเลี้ยงจุลินทรีย์ในถังปฏิกริยา สามารถช่วยเพิ่มค่าความเร็วของการตกตะกอนของสลัดจ์ เมื่อสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์จะพบกลุ่มก้อนปุยของจุลชีพที่ลักษณะเป็นก้อนใหญ่ โดยทล้ที่มีขนาดเล็ก (ขนาด 2 ไมโครเมตร) จะเกิดกลุ่มก้อนปุยของจุลชีพที่มีลักษณะก้อนที่ใหญ่กว่าระบบที่มีการเติมทล้ขนาดใหญ่ (ขนาด 5 10 และ 18 ไมโครเมตร) ส่วนชุดควบคุม (ไม่มีการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน) จะพบกลุ่มปุยของจุลชีพมีขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นที่น้อยกว่า การศึกษาลักษณะของการจับตัวระหว่างทล้กับฟล็อกของจุลชีพด้วยกล้องจุลทรรศน์ สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเติมทล้ปุยจุลชีพในระบบมีความหนาแน่นสูงขึ้นและเกิดฟล็อกลักษณะพิเศษคือ มีลักษณะของกลุ่มก้อนปุยของจุลชีพจับตัวกันเป็นก้อนๆ และมีจุลชีพอาศัยอยู่รอบๆ ภายในระบบสังเกตเห็นจุลชีพในกลุ่มต่างๆ เคลื่อนที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปอย่างอิสระ โดยจุลชีพเหล่านี้เป็นกลุ่มที่ระบบบำบัดน้ำเสียเอเอสต้องการ ดังนั้นความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนที่สูงขึ้นนั้น เกิดจากการจับตัวระหว่างทล้กับฟล็อกของจุลชีพ ทำให้ความหนาแน่น และน้ำหนักของฟล็อกสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะการจับตัวกันแบบห่อหุ้มระหว่างทล้กับฟล็อกของจุลชีพ เป็นสาเหตุให้ความเร็วในการตกตะกอนสูงขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24





(ก)



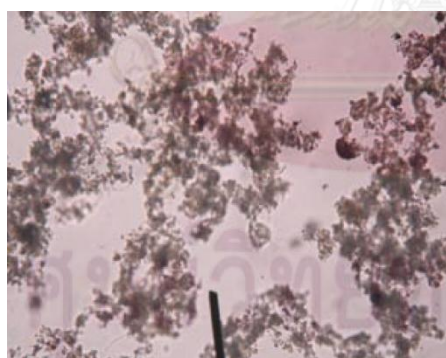
(ข)



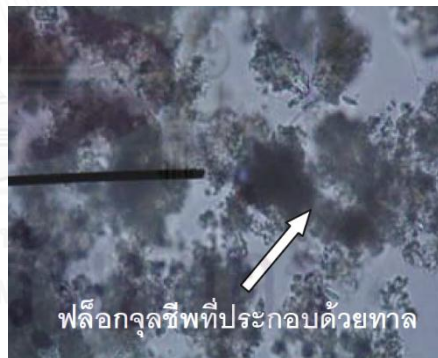
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

**รูปที่ 4.23** ขยายฟลือกจุลชีพของทัลก์ที่เลี้ยงพร้อมๆกับเดินระบบเอเอส

ก) ขนาด 2 ไมโครเมตร กำลังขยาย 10 เท่า

ข) ขนาด 2 ไมโครเมตร กำลังขยาย 40 เท่า

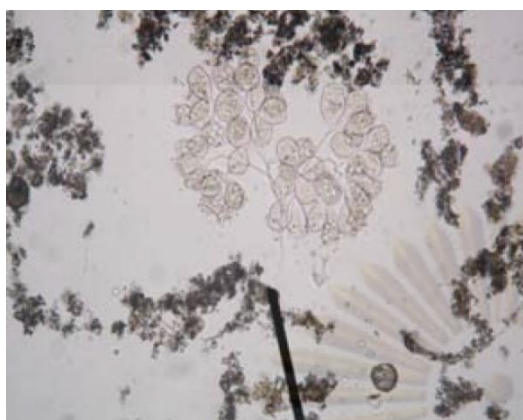
ค) ขนาด 5 ไมโครเมตร กำลังขยาย 10 เท่า

ง) ขนาด 5 ไมโครเมตร กำลังขยาย 40 เท่า

จ) ขนาด 10 ไมโครเมตร กำลังขยาย 10 เท่า

ฉ) ขนาด 10 ไมโครเมตร กำลังขยาย 40 เท่า

(สถิตรัตน์ รอดอารี, 2552)



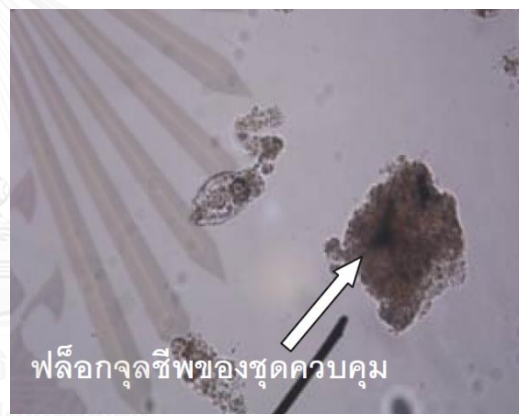
(ข)



(ช)



(ณ)



(ญ)

รูปที่ 4.24 ขยายฟลือกจุลชีพของทัลก์ที่เลี้ยงพร้อม กับเดินระบบเอเอส (ต่อ)

ข) ขนาด 18 ไมโครเมตร กำลังขยาย 10 เท่า    ช) ขนาด 18 ไมโครเมตร กำลังขยาย 40 เท่า

ณ) ชุดควบคุม กำลังขยาย 10 เท่า

ญ) ชุดควบคุม กำลังขยาย 40 เท่า

(สถิตรัตน์ รอดอารี, 2552)

ลักษณะการจับตัวของทล็กกับจุลชีพเส้นใยไม่พบลักษณะกลุ่มก้อนปุยของจุลชีพ ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยของ เอกลักษณ์ ไชยพันธุ์ (2551) สติรัตน์ รอดอารี (2552) และธัญรัตน์ แสงสุวรรณ (2552) ซึ่งพบลักษณะของกลุ่มก้อนปุยของจุลชีพจับตัวกันเป็นก้อนๆ จากงานวิจัยพบว่าการจับตัวของทล็กไปเกาะตัวกับเส้นใยของจุลชีพอยู่อย่างเป็นอิสระอย่างชัดเจน และกระจายอยู่รอบๆ ฟล็อก เป็นผลให้ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงขึ้น แต่ไม่สูงพอเทียบเท่าพร้อมกับการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในระบบที่เกิดกลุ่มก้อนของฟล็อกจุลชีพทำให้ความหนาแน่น และน้ำหนักของฟล็อกสูงขึ้นได้ อีกประการสำคัญคือการเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวส่งผลให้ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่สูงมากอยู่แล้ว การเติมทล็กลงไปในขณะที่เกิดปัญหาช่วยเพียงแค่อัดกับสายใยจุลชีพเพียงเท่านั้น จึงทำให้ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงขึ้นเพียงเพราะน้ำหนักวัสดุช่วยตกตะกอนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้น การใช้ทล็กเติมลงไปปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวสามารถเพิ่มความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนให้สูงขึ้นได้ แต่ไม่สูงมากพอเทียบเท่ากับการเติมทล็กไปพร้อมกับการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ได้ สอดคล้องกับผลของค่าไอเอสวีที่สูงขึ้นกว่าค่าควบคุม แต่ไม่สูงเท่ากับฟล็อกปกติ ดังที่ได้กล่าวถึงหัวข้อ 4.23 และ 4.24

#### 4.5 การประยุกต์ใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วัสดุช่วยตกตะกอนสามารถแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวได้เป็นอย่างดี ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาพิจารณาเลือกวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด เพื่อเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวให้กับผู้ควบคุมระบบ สำหรับควบคุมการทำงานให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด

จากตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของวัสดุช่วยตกตะกอนที่ขนาดและปริมาณต่างกัน พบว่าวัสดุช่วยตกตะกอนที่ให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนได้ดีที่สุดเทียบต่อการลงทุนได้ประหยัดที่สุด คือ ทล็กขนาด 41 และ 65 ไมโครเมตร (200 และ 325 mesh) ที่ปริมาณ 100% w/w จะต้องใช้งบลงทุนประมาณ 0.059 บาท/ชุด สำหรับ ทล็กขนาด 8 ไมโครเมตร (1,250 mesh) ที่ปริมาณ 100% w/w ใช้งบลงทุนประมาณ 0.099 บาท/ชุด ทั้งนี้เป็นเพราะทล็ก ขนาด 41 และ 65 ไมโครเมตร เป็นวัสดุที่สามารถผลิตในประเทศไทยได้ ทำให้มีราคาค่อนข้างถูก ส่วนทล็กขนาด 8 ไมโครเมตร (1,250 mesh) ถึงแม้ว่าจะให้ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงที่สุด แต่มีราคาค่อนข้างแพง เพราะทล็กขนาดดังกล่าวนี้ไม่สามารถผลิตภายในประเทศได้ ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ จึงทำให้ต้นทุนต่อหน่วยสูง

ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายวัสดุช่วยตกตะกอนเทียบกับที่ปริมาณต่างๆ ของวัสดุช่วยตกตะกอน

วัสดุช่วยตกตะกอน	ขนาด (ไมโครเมตร)	ค่าวัสดุช่วยตกตะกอน (บาท) ที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนต่างๆ (w/w)			
		20%	50%	80%	100%
ทัลก์	8	0.020	0.050	0.079	0.099
	19	0.120	0.300	0.480	0.600
	41	0.011	0.027	0.043	0.054
	65	0.011	0.027	0.043	0.054
ถ่านกัมมันต์	133	0.060	0.150	0.240	0.300
	213	0.060	0.150	0.240	0.300
	365	0.060	0.150	0.240	0.300
	802	0.060	0.150	0.240	0.300
ยางบดละเอียด	223	0.008	0.020	0.031	0.039
	408	0.008	0.020	0.031	0.039
	450	0.008	0.020	0.031	0.039
	644	0.005	0.012	0.019	0.024

เมื่อพิจารณาถึงแนวทางการใช้วัสดุช่วยตกตะกอน สำหรับควบคุมการทำงานของระบบเอเอส หากเกิดระบบเอเอสเกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวขึ้นแล้ว สำหรับแนวทางการควบคุมการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้า ได้ดังนี้

1. ปิดระบบน้ำเสียไหลเข้า (Influent) น้ำเสียไหลออก (Effluent) และลดการนำตะกอนไปทิ้งก่อน จะทำให้ความเข้มข้นของสลัดจ์สูงขึ้นจนกว่ากระบวนการจะทำงานได้ตามปกติ แต่ต้องระวังชั้นของสลัดจ์มิให้อยู่สูงเกินไป หากพบว่าชั้นของสลัดจ์สูงขึ้น ให้เพิ่มปริมาณการสูบน้ำกลับเข้าถังเติมอากาศ
2. ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ หากพบจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย (Filamentous Bacteria) ควรจำเป็นต้องกำจัดสาเหตุต้นตอที่ทำให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวเสียก่อน หรือปรับ

สภาพสิ่งแวดล้อมในถังเติมอากาศให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ชนิดสร้างฟล็อก จนแข่งขันกับจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยได้ เช่น ปรับค่าพีเอช ให้มีค่าใกล้เคียงกับ 7 การควบคุมปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO) ให้มีค่ามากกว่า 2 มก./ล. ควบคุมการไหลของน้ำในถังเติมอากาศให้เป็นแบบ Plug Flow ควบคุมอายุของตะกอนให้มีค่าสูงขึ้น เป็นต้น

3. หากยังไม่สามารถแก้ปัญหาได้ สามารถใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเป็นแนวทางเลือกเพื่อใช้แก้ปัญหาเฉพาะหน้าโดยการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนในตำแหน่งที่เกิดการผสมวัสดุช่วยตกตะกอนกับสลัดจ์ได้เร็วที่สุด เช่น ตำแหน่งในถังเติมอากาศ หรือตำแหน่งสูบสลัดจ์กลับเข้าถังเติมอากาศ (Return sludge)
4. ตรวจวัดค่าเอ็มแอลเอสเอส (MLSS) ในระบบ เพื่อคำนวณหาปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนที่ต้องเติมลงไป ซึ่งแนะนำให้ใช้หลักเป็นวัสดุช่วยตกตะกอน
5. เมื่อเติมวัสดุช่วยตกตะกอนจนหมด รอจนวัสดุช่วยตกตะกอนเข้าไปผสมกับสลัดจ์ในถังเติมอากาศโดยต้องมากกว่าค่าระยะเวลาที่เก็บน้ำ (Detention Time) เพื่อให้วัสดุช่วยตกตะกอนผสมกับสลัดจ์จนหมด พร้อมกันนี้ให้เปิดใบกวนผสมหรือหัวเติมลมในถังเติมอากาศ เพื่อให้วัสดุช่วยตกตะกอนผสมกับสลัดจ์ (Mixing) ได้มากที่สุด
6. ในระหว่างการเดินระบบให้ทำการ ควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในเติมอากาศให้มีค่า 0.5 - 1.0 มก./ล. เพื่อป้องกันมิให้เกิดสภาวะดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ในกรณีใช้ยางบดละเอียดเป็นวัสดุช่วยตกตะกอน

ผลจากการใส่วัสดุช่วยตกตะกอนลงไป คาดว่าสลัดจ์ในถังตกตะกอนจะตกตะกอนได้เร็วขึ้น และทำให้น้ำส่วนบนใส จากนั้นจึงสามารถค่อยๆ ปรับปริมาณน้ำเสียไหลเข้า (Influent) และน้ำออก (Effluent) ให้เหมาะสมได้ พร้อมทั้งตรวจสอบความลึกของชั้นสลัดจ์และปรับให้ชั้นสลัดจ์อยู่สูงจากพื้นของถังในระยะปลอดภัยอยู่เป็นระยะๆ เพื่อป้องกันมิให้สลัดจ์หลุดออกนอกถังตกตะกอนเป็นอันตราย

ในระหว่างการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวนั้น ผู้ควบคุมต้องพยายามเร่งรีบหาต้นตอสาเหตุอันก่อให้เกิดปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวให้พบเสียก่อน พร้อมแก้ไขต้นตอของสาเหตุโดยเร็ว หากการแก้ปัญหาได้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ ผู้ควบคุมจำเป็นต้องพิจารณาหาแนวทางเลือกใหม่ อาทิเช่น การใช้ถังคัดพันธุ์ (Selector) มาเพื่อแก้ปัญหาต่อไป

การพิจารณาเลือกใช้วัสดุช่วยตกตะกอนชนิดอื่น มาแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว นอกเหนือจากงานวิจัยนี้สามารถพิจารณาได้จากค่าความเร็วตกตะกอนของอนุภาคแบบโดด ตามสมการของสโตค (Stoke's Law equation) เทียบกับวัสดุช่วยตกตะกอนขนาดต่างๆ และค่าไอเอสวี ถือว่าเป็นข้อแนะนำเบื้องต้นให้กับผู้ควบคุมพิจารณาเลือกใช้ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความเร็วการตกตะกอนแบบโตนเทียบกับค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน

วัสดุ ช่วยตกตะกอน	ขนาด (ไมโครเมตร)	ค่าความเร็ว การตกตะกอน แบบโตน (เมตร/ชม.)	ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (เมตร/ชม.) ที่ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนต่างๆ (w/w)			
			20%	50%	80%	100%
ทัลก์	8	0.25	0.021	0.032	0.049	0.078
	19	1.43	0.023	0.030	0.042	0.062
	41	6.68	0.019	0.030	0.042	0.057
	65	16.79	0.021	0.030	0.048	0.057
ถ่านกัมมันต์	133	46.91	0.011	0.013	0.017	0.021
	213	120.32	0.009	0.010	0.012	0.021
	365	353.31	0.009	0.012	0.013	0.020
	802	1,705.78	0.007	0.008	0.008	0.019
ยางบดละเอียด	223	22.25	0.014	0.016	0.016	0.017
	408	74.49	0.009	0.010	0.010	0.011
	450	90.62	0.012	0.012	0.013	0.014
	644	185.60	0.012	0.013	0.014	0.014

จากผลการคำนวณค่าความเร็วการตกตะกอนแบบโตนตามสมการของสโตค (Stoke's Law equation) พบว่ามีช่วงแตกต่างกันค่อนข้างกว้าง พบตั้งแต่ 0.25 จนถึง 1,700 เมตร/ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ทั้งนี้เพราะค่าความเร็วการตกตะกอนแปรผันตรงกับความหนาแน่นของวัสดุช่วยตกตะกอนกับน้ำ และแปรผันตรงเป็นกำลังสองของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุช่วยตกตะกอน โดยการเลือกใช้สามารถสรุปเป็นข้อแนะนำเบื้องต้นได้ คือ ค่าความเร็วการตกตะกอนแบบโตนควรอยู่ในช่วงประมาณ 0.20 - 17 เมตร/ชั่วโมง เทียบเท่ากับขนาด 8 19 41 และ 65 ไมโครเมตร ของทัลก์ โดยขนาดดังกล่าวนี้สามารถทำให้ค่าเอสวีโอลดลงถึง 138 - 142 มล./กรัม ในปริมาณ 100% w/w น้อยกว่าค่าแนะนำจาก Metcalf and Eddy (ค่าเอสวีไอ < 150 มล./กรัม) เนื่องจากความเร็วการตกตะกอนที่ต่ำ สามารถสร้างโอกาสรวมกลุ่มกับฟล็อกได้ดีกว่าขนาดใหญ่ พร้อมกวาดฟล็อกให้จมตัวได้เร็วกว่า ในทางตรงกันข้าม ค่าความเร็วการตกตะกอนแบบโตนไม่ควรมากเกินไปกว่าประมาณ 1,700 เมตร/ชั่วโมง ซึ่งเทียบกับขนาด 802 ไมโครเมตรของถ่านกัมมันต์ เพราะวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีขนาด

ใหญ่มาก เกิดความเร็วกการตกตะกอนสูงมากจนทำให้สลัดจ์ไม่เกาะตัวและกวาดฟล็อกให้จมตัวได้นอกจากนี้ วัสดุช่วยตกตะกอนควรต้องไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ กับจุลินทรีย์และน้ำเสีย มีขนาดเล็กแต่มิมีน้ำหนัก ตกตะกอนได้ง่าย และเป็นเป้าสัมผัสให้จุลินทรีย์เกาะตัว ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 สำหรับค่าความเร็วกการตกตะกอนแบบโตน สรุปลเป็นข้อแนะนำเบื้องต้นให้กับผู้ควบคุมพิจารณาเลือกใช้วัสดุช่วยตกตะกอนชนิดอื่นๆ ได้ตามตารางที่ 4.6

**ตารางที่ 4.6** ข้อแนะนำเบื้องต้นให้กับผู้ควบคุมเลือกใช้วัสดุช่วยตกตะกอนชนิดอื่นๆ โดยพิจารณาจากค่าความเร็วกการตกตะกอนแบบโตน

ช่วงความเร็วกการตกตะกอนแบบโตน <sup>ก</sup> ของวัสดุช่วยตกตะกอน (เมตรต่อชั่วโมง)	ข้อแนะนำ
0.1 – 20	แนะนำใช้
20 – 100	ปานกลาง
10 – 500	พอใช้
500 – 1,500	พอใช้
มากกว่า 1,500	ไม่แนะนำ

<sup>ก</sup> ความเร็วกการตกตะกอนแบบโตน คำนวณจากสมการของสโตน @ อุณหภูมิน้ำ 25 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.6 เป็นข้อแนะนำเบื้องต้นให้กับผู้ควบคุมเพื่อเป็นแนวทางเลือกใช้วัสดุช่วยตกตะกอนชนิดอื่น ๆ หรือขนาดอื่น ๆ โดยคำนวณจากค่าความเร็วกการตกตะกอนแบบโตนเพียงอย่างเดียว เหมาะสำหรับผู้ควบคุมที่สามารถนำไปใช้ในกรณีเร่งด่วนหรือเฉพาะหน้า หรือใช้เป็นแนวทางในการคัดเลือกวัสดุช่วยตกตะกอนเบื้องต้นเท่านั้น แต่ถึงอย่างไร การแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวโดยใช้วัสดุช่วยตกตะกอน ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายอย่าง อาทิเช่น ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เส้นใยที่เกิดขึ้น ชนิดของวัสดุช่วยตกตะกอน ปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอน คุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้น เป็นต้น ซึ่งผู้ควบคุมจำเป็นต้องพิจารณาข้อควรระวังดังกล่าวด้วย

ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุช่วยตกตะกอนต้องทำการผสมกับเข้าน้ำก่อนการเติมเข้าสู่ระบบบำบัด เนื่องจากวัสดุช่วยตกตะกอนส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นผง ขนาดเล็ก เกิดแรงตึงผิวค่อนข้างมาก ทำให้ผสมเข้ากับน้ำได้ยาก จึงอาจจะต้องเข้าน้ำเพื่อเตรียมพร้อมก่อนเติมเข้าไปในระบบจริง สำหรับวิธีการกวนผสม (Mixing) ควรผสมวัสดุช่วยตกตะกอนจนกลายเป็นเนื้อเดียวกันจนหมด ไม่เกิดการ

ลอยตัวของวัสดุช่วยตกตะกอนบนผิวน้ำ ค่าความเข้มข้นของวัสดุช่วยตกตะกอนที่แนะนำประมาณ 3,000 มก./ลิตร สำหรับขั้นตอนการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน (Feed) เข้าสู่ระบบ ควรเป็นตำแหน่งที่มีระดับความปั่นป่วนสูง เพื่อให้เกิดการผสมผสานเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อาทิเช่น ตำแหน่งในถังเติมอากาศ ตำแหน่งสลับกลับเข้าถังเติมอากาศ (Return sludge) หรืออาจใช้อุปกรณ์กวนเร็วแบบ Static Mixer ซึ่งสามารถกวนผสมเข้าในท่อได้โดยตรง

การใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบเอเอส จากผลการทดลอง พบว่า ทัลก์ขนาด 8 ไมโครเมตร ที่ปริมาณการเติม 100% w/w ทำให้ค่าเอสวีโอลดลงได้น้อยที่สุด คือ 138 มล./ก. น้อยกว่าค่าเอสวีโอของ Metcalf and Eddy แนะนำ (น้อยกว่า 150 มล./กรัม) ซึ่งถือว่าเป็นค่าแนะนำสำหรับใช้แก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว แต่การควบคุมการบำบัดน้ำเสียควรต้องใส่วัสดุช่วยตกตะกอนในปริมาณไม่มากเกินไป เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบบำบัดน้อยที่สุด ดังนั้นการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนที่ปริมาณ 80% w/w นับว่าเพียงพอแล้ว เพราะการเติมที่ปริมาณ 80% w/w สามารถทำให้ค่าเอสวีโอลดลงประมาณ 160 - 180 มล./ก. นับว่าอยู่ในช่วงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเอสวีโอของ Metcalf and Eddy แนะนำ และน้อยกว่าชุดควบคุม (ประมาณ 330 มล./ก.) ซึ่งเพียงพอต่อการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวได้ อีกทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย

การกวนผสม (Mixing) ระหว่างวัสดุช่วยตกตะกอนกับสลัดจ์ในถังเติมอากาศ ควรต้องมีความเร็วแกรเดียนท์หรือความปั่นป่วนของน้ำสูงมากพอ เพื่อให้การผสมระหว่างวัสดุช่วยตกตะกอนกับสลัดจ์ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเกาะตัวพร้อมๆ กันทุกจุด ในทางตรงกันข้ามหากมีความปั่นป่วนไม่สูงพอ อาจทำให้วัสดุช่วยตกตะกอนไม่สามารถเกาะตัวกับสลัดจ์ได้ทั้งหมด และอาจทำให้วัสดุช่วยตกตะกอนนอนกันใต้ถังเติมอากาศ ดังนั้น การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนเข้าไปในระบบบำบัดทำให้ค่าความหนืดของน้ำมีค่าสูงขึ้น และทำให้ความเร็วแกรเดียนท์หรือความปั่นป่วนลดลง ควรจำเป็นต้องเพิ่มพลังงานที่ใช้สร้างความปั่นป่วน (Mixing Power) ให้สูงขึ้น เพื่อให้วัสดุช่วยตกตะกอนสามารถเกาะตัวกับสลัดจ์ได้มากที่สุด

ปริมาณสลัดจ์จากน้ำเสียเกิดจากการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนสำหรับแก้ปัญหาเฉพาะหน้า อาจส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้ของสลัดจ์ ทำให้แรงดันลดในท่อสูงขึ้น และอาจเกิดการอุดตันได้ง่าย ทั้งนี้ขอแนะนำคือ ควรหาวิธีแยกวัสดุช่วยตกตะกอนออกเสียก่อนนำไปกำจัดตะกอน หรือสามารถปรับอายุสลัดจ์ให้สูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้อัตราการทิ้งสลัดจ์น้อยลง หรืออาจต่อท่อแรงดันสูงเข้ากับท่อส่งตะกอนไว้หลายๆ แห่ง เพื่อการฉีดน้ำทะเลงการอุดตัน ทั้งนี้ค่า MLVSS/MLSS ที่แนะนำไม่ควรมากเกินไปกว่า 50% เหตุผลอีกประการคือ การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนลงไปในระบบทำให้ค่าของแข็งคงตัว (Inert) ในระบบสูงขึ้น ผู้ควบคุมต้องระมัดระวังการทิ้งสลัดจ์ให้



เหมาะสม โดยต้องนำค่าของแข็งคงตัวที่เพิ่มขึ้นจากการเติมวัสดุช่วยตกตะกอน มาใช้คำนวณหาค่า อัตราการทิ้งสลัดจ์เพื่อรักษาอายุสลัดจ์ของระบบให้เหมาะสมตามที่ออกแบบไว้

แนวทางการนำวัสดุช่วยตกตะกอนออกจากระบบเอเอส สามารถทำได้โดยทิ้งผ่านตะกอน ส่วนเกิน (Excess Sludge) ตามปกติ ขั้นตอนการกำจัดสลัดจ์หรือตะกอนจุลินทรีย์ สามารถใช้ถังหมัก แบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนตามขั้นตอนปกติได้ เพราะวัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด ไม่ก่อให้เกิดการเน่าเหม็นขึ้นภายหลัง สำหรับการใช้ทัลก์และถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุช่วยตกตะกอนร่วมกับ สลัดจ์ที่ย่อยแล้วสามารถนำไปใช้ถมที่หรือทำเป็นปุ๋ยสำหรับต้นไม้ได้ เพราะทัลก์และถ่านกัมมันต์ เป็น สารธรรมชาติ ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากยังมีน้ำปนอยู่มากจึงควรบีบน้ำออกจาก สลัดจ์ก่อนด้วยวิธีต่างๆ อาทิเช่น ตากบนลานทราย กรอง เหวียงน้ำออกด้วยเครื่อง เป็นต้น ในส่วน ยางบดละเอียด อาจต้องใช้วิธีอื่น อาทิเช่น การฝังกลบ (Landfill) หรือการเผา เพราะยางบดละเอียด ต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยตามธรรมชาติเป็นเวลานาน อาจเกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อมขึ้น



## บทที่ 5

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาการใช้วัสดุช่วยตกตะกอนเพื่อปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัว สรุปได้ดังนี้

1. วัสดุช่วยตกตะกอนทั้ง 3 ชนิด คือ ทัลก์ ถ่านกัมมันต์ และยางบดละเอียด สามารถแก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวได้ โดยค่าดัชนีปริมาตรตะกอนเท่ากับ 140 169 และ 216 มิลลิลิตร/กรัม ตามลำดับ น้อยกว่ากับชุดควบคุมเท่ากับ 330 มิลลิลิตร/กรัม

2. วัสดุช่วยตกตะกอนขนาดเล็กทำให้ความเร็วเริ่มของการตกตะกอนสูงกว่าขนาดใหญ่ โดยทัลก์ขนาด 8 ไมโครเมตร ปริมาณ 100% w/w ให้ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงที่สุดและมากกว่าชุดควบคุมถึง 393%

3. การเติมวัสดุช่วยตกตะกอนในปริมาณมาก สามารถทำให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงขึ้นได้ โดยวัสดุช่วยตกตะกอนในทุกชนิดและทุกขนาดที่ปริมาณ 100% w/w ให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงกว่าที่ปริมาณ 80% 50% และ 20% w/w ตามลำดับ และถ้าหากว่าเพิ่มปริมาณวัสดุช่วยตกตะกอนเพิ่มมากขึ้น ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนจะมีแนวโน้มสูงมากขึ้นตามไปด้วย เพียงแต่ไม่เป็นการประหยัด

4. ถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร ไม่เหมาะสมสำหรับใช้แก้ปัญหาเฉพาะหน้าสลัดจ์ไม่จมตัวได้ เนื่องจากมีขนาดใหญ่เกินไป จนทำให้สลัดจ์ไม่เกาะตัวและตกตะกอนลงมา

5. การใช้ยางบดละเอียดไม่เหมาะสมกับระบบที่เกิดสถานะดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ในถังตกตะกอน เพราะว่ายางบดละเอียดมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ (1.20 กรัม/ลบ.ซม) เป็นผลให้ฟองก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากสถานะดีไนตริฟิเคชันลอยขึ้นมา สามารถผลักดันให้ยางบดละเอียดและสลัดจ์ที่เกาะติดกันอยู่ลอยขึ้นมาเหนือผิวน้ำอีกครั้ง ต่างจากทัลก์และถ่านกัมมันต์ที่ไม่เกิดปัญหาดังกล่าว

6. ลักษณะการเกาะตัวของวัสดุช่วยตกตะกอนกับสลัดจ์ วัสดุช่วยตกตะกอนเข้าไปกระจายตัวอยู่ระหว่างเส้นใยจุลินทรีย์และสลัดจ์จำนวนมาก โดยวัสดุช่วยตกตะกอนเข้าไปเกาะติดกับเส้นใยอย่างอิสระ โดยไม่พบลักษณะการเกาะตัวแบบห่อหุ้ม การเกาะตัวในลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันแน่น ตกตะกอนได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสูงขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ยังคงเป็นเพียงการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น และถึงแม้ว่าแนวคิดในการนำวัสดุช่วยตกตะกอนมาใช้ในระบบเอเอสเพื่อสำหรับการแก้ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในกรณีเร่งด่วน จะให้ผลการศึกษาออกมาเป็นที่น่าพอใจ แต่ยังคงต้องมีการดำเนินการวิจัยต่อไปเพื่อปรับปรุงนำไปใช้กับน้ำเสียจริงและใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจริง ซึ่งอาจต้องมีการศึกษาในด้านการดูแลระบบ ลักษณะ และวิธีการของการเติมวัสดุช่วยตกตะกอนเข้าไปในระบบ รวมถึงการกำจัดวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใส่เข้าไปในระบบหรือแม้กระทั่งการนำเอาวัสดุช่วยตกตะกอนที่ใส่เข้าไปในระบบกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งยังคงเป็นเรื่องที่ต้องทำการศึกษาวิจัยต่อเนื่องต่อไป



## รายการอ้างอิง

- ATV Working Group (1989). Prevention and Control of Bulking Sludge and scum ATV. Technical Committee 2.6.1. (aerobic biological wastewater treatment process). Korrespondenz Abwasser **36**: 165-175.
- Azizian, M. F., P. O. Nelson, P. Thayumanavan and K. J. Williamson (2003). Environmental impact of highway construction and repair materials on surface and ground water : Crumb rubber asphalt concrete. Water management **23**: 719-728.
- Bidault, A., F. Clauss, D. Helaine and B. C. (1997). Floc agglomeration and structuration by a specific talc mineral composition. Water Science Technology **36**: 57-68.
- Cantet, J., E. Paul and F. Clauss (1996). Upgrading performance of an activated sludge through addition of talqueous powder. Water Science Technology **34**: 75-83.
- Chudoba, J. (1985). Control of activated sludge filamentous bulking-VI. Formulation of basic principles. Water Res **19**: 1017-1022.
- Eikelboom, D. H. (1975). Filamentous organisms observed in activated sludge. Water Research **9**(4): 365-388.
- Eikelboom, D. H. and J. Grovenstein (1998). Control of bulking in a full scale plant by addition of talc (PE 8481). Water Science Technology **37**: 297-301.

- Jenkins, D., M. G. Richard and G. T. Daigger, Eds. (1993). Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming Second edition. Boca Raton Ann Arbor London Tokyo, Lesis Publishers.
- Lee, S., H. S. Shin and B. C. Paik (1989). Treatment of Cr (VI)-containing wastewater by addition of powdered activated carbon to the activate sludge process. Water Research **23**: 67-72.
- Metcalf and Eddy (2014). Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery. Singapore, McGraw-Hill.
- Palm, J. C., D. Jenkins and D. S. Parker (1980). Relationship between organic loading, dissolved oxygen concentration and sludge settleability in the completely-mixed activated sludge process. Journal (Water Pollution Control Federation): 2484-2506.
- Park, J., T. G. Ellis and M. Lally (2006). Evaluation of tire derived rubber particles for biofiltration media. WEFTEC **06**: 3217-3230.
- Piirtola, L., B. Hultman and M. Lowen (1999). Activated sludge ballasting in pilot plant operation. Water Research **33**: 3026-3032.
- Wadell, H. (1935). Volume, Shape, and Roundness of Quartz Particles. The Journal of Geology **43**(3): 250-280.
- Water Pollution Control Federation (1985). Clarifier Design. Washington, D.C., Lancaster Press.

Water pollution control federation (1987). Activated sludge ,manual of practice OM-9.

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.

เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์ (2543). วิศวกรรมกรรมการบำบัดน้ำเสีย. นนทบุรี.

เอกลักษณ์ ไชยพันธุ์ (2551). การเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนของสลัดจ์ในระบบเอเอสด้วยวัสดุช่วยตกตะกอน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาสิ่งแวดล้อม (2538). การควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. (ม.ท.ป.)

ต่อลาภ ชัยวัฒน์ (2539). การศึกษาเปรียบเทียบถึงคัดพันธุ์แบบแอนนอซิกและแบบออกซิกในการป้องกันสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธัญรัตน์ แสงสุวรรณ (2552). ผลของอายุสลัดจ์ที่มีต่อประสิทธิภาพของการตกตะกอนในระบบเอเอสที่ใช้วัสดุช่วยตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์ (2537). วิศวกรรมประปา. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์ (2542). เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม, บริษัท แซน.อี.68 คอนซัลตัง เอ็นจิเนียรส์ จำกัด.

ยงยุทธ วงศ์ประภาณีวัฒน์ (2539). การใช้ถังคัดพันธุ์แบบแอนนอซิกเพื่อป้องกันสลดจ์ไม่จมตัวของระบบเอเอส, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถิตรัตน์ รอดอารี (2552). ผลของชนิดและขนาดวัสดุช่วยตกตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนในระบบเอเอส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรชัย ทักฉินวรารاجر (2526). การควบคุมการจมไม่ลงของแอกติเวตเต็ดสลัดจ์เนื่องจากจุลินทรีย์ที่เป็นเส้นใยโดยการป้อนน้ำเสียเข้าถังเติมอากาศหกลัง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรพล สายพานิช (2528). ทฤษฎี สาเหตุ และวิธีแก้ปัญหาตะกอนไม่จมตัวในกระบวนการตะกอนเร่ง ใน การสัมมนาย่อย เรื่อง การแก้ปัญหาตะกอนไม่จมตัวในระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์, จัดโดยสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมไทย, และการศึกษาต่อเนื่องและภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY





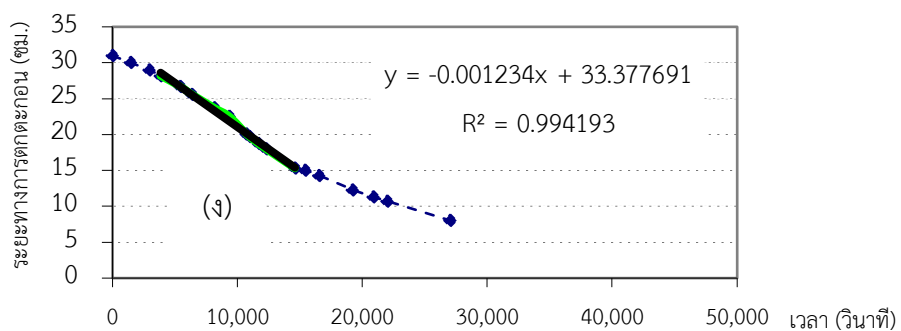
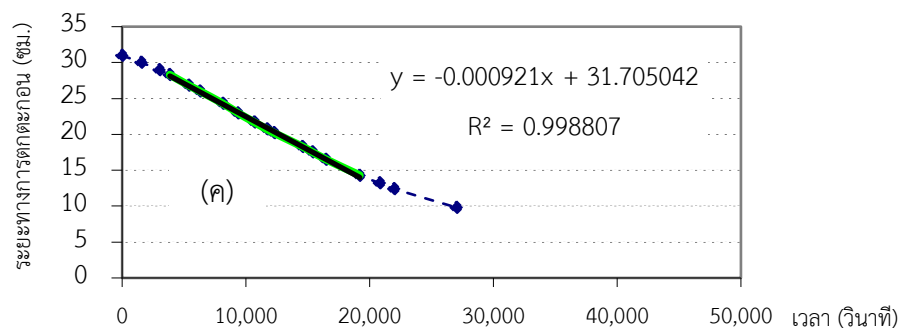
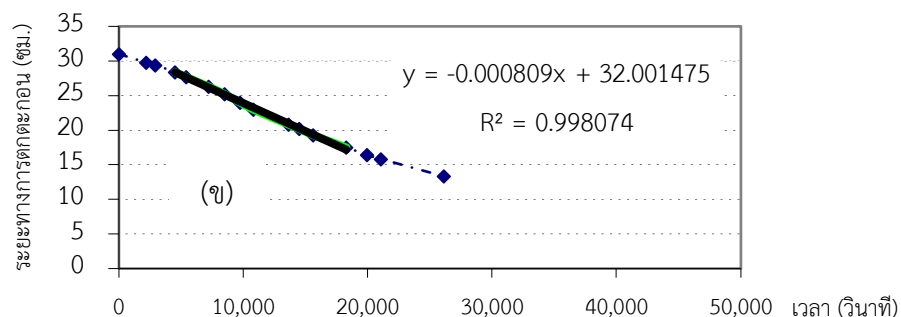
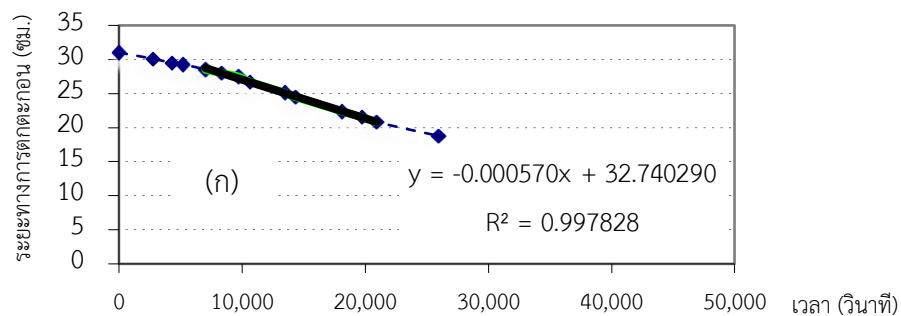
ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนจากการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวของทล็กในแต่ละขนาด ที่ปริมาณ 20%, 50%, 80% และ 100% w/w

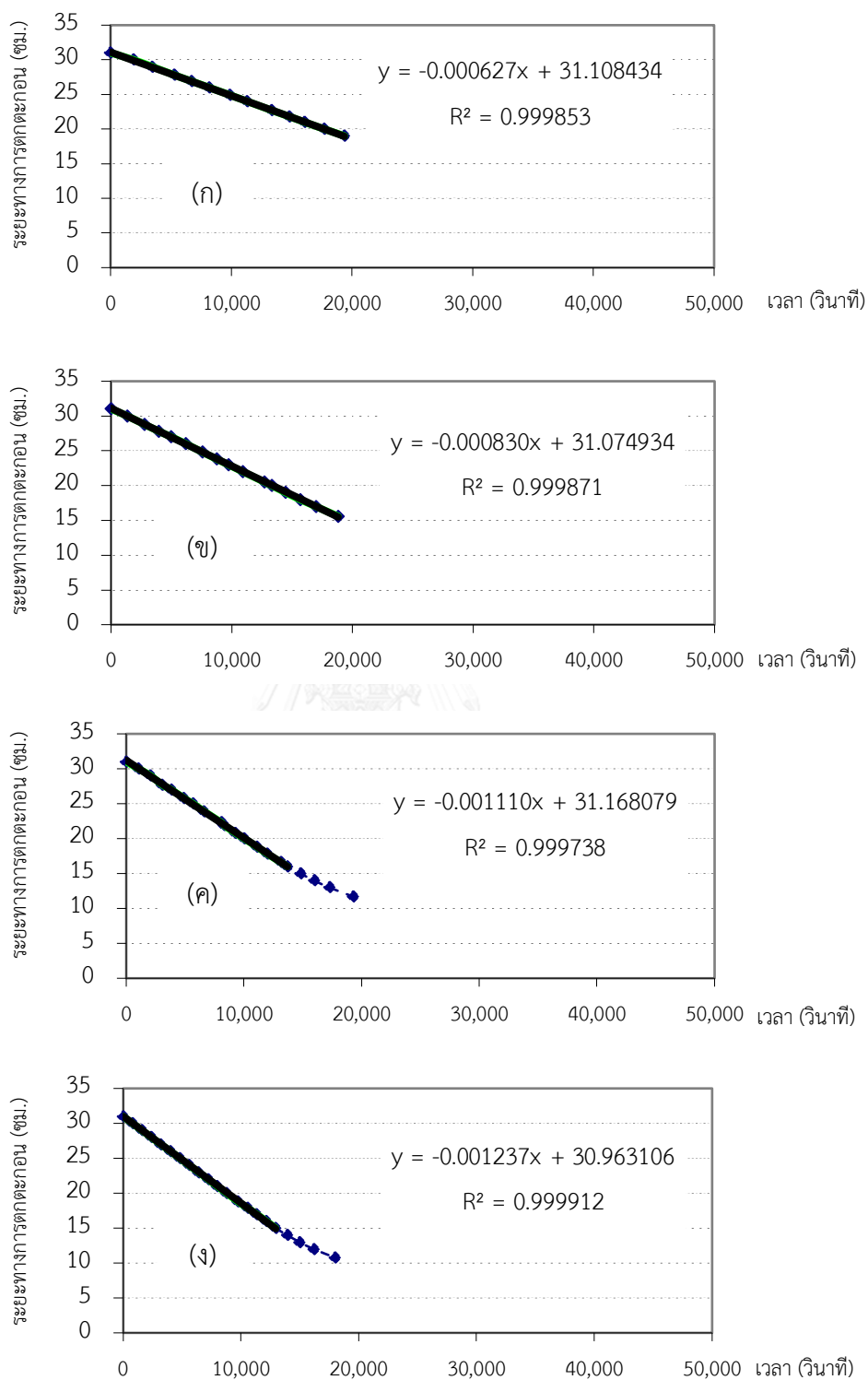
1.1) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยทล็กขนาด 8 ไมโครเมตร



รูปที่ ก.1 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม  
ทล็กขนาด 8 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

1.2) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยทัลก์ขนาด 19 ไมโครเมตร

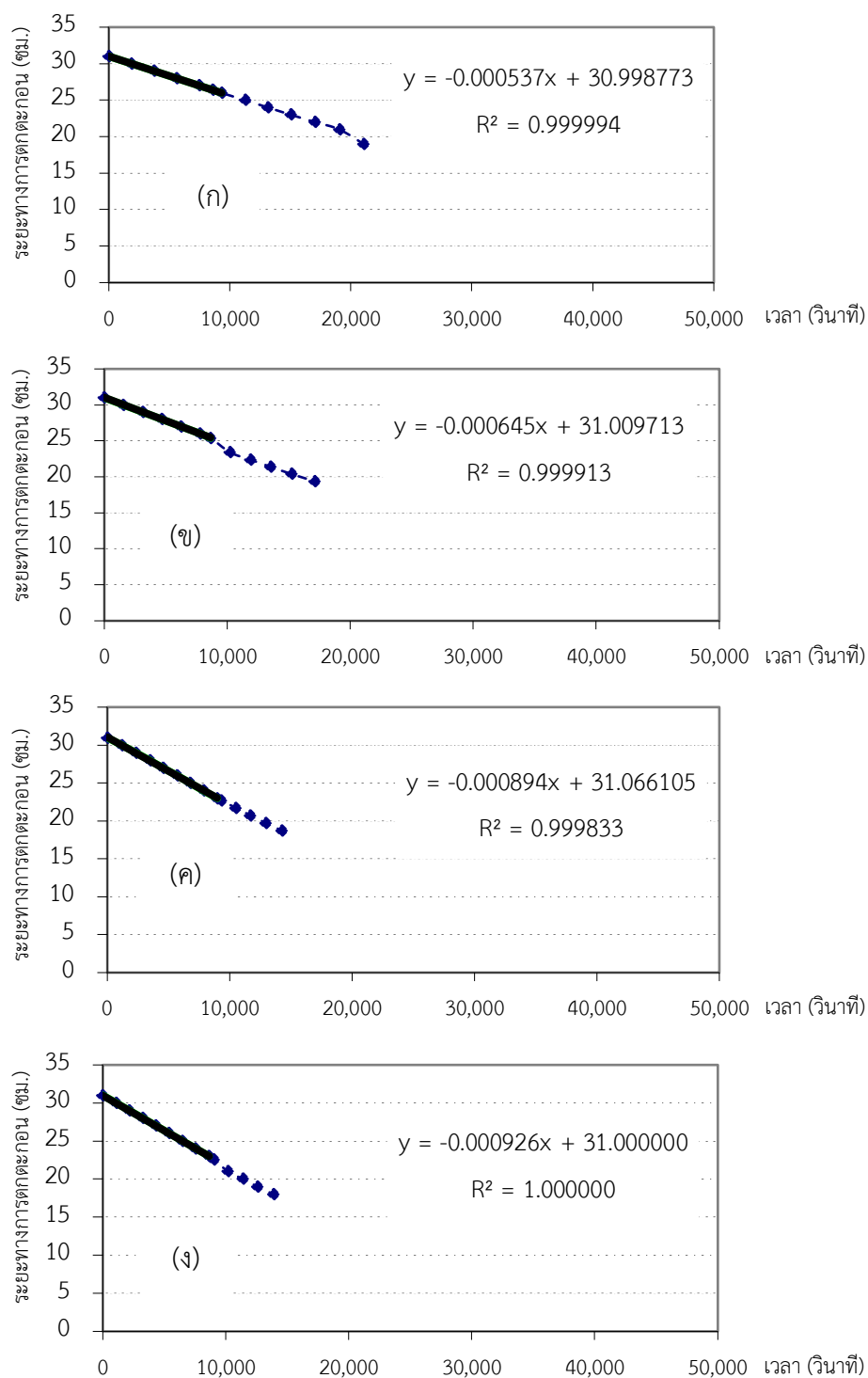


รูปที่ ก.2 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม

ทัลก์ขนาด 19 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

1.3) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยทล็กขนาด 41 ไมโครเมตร

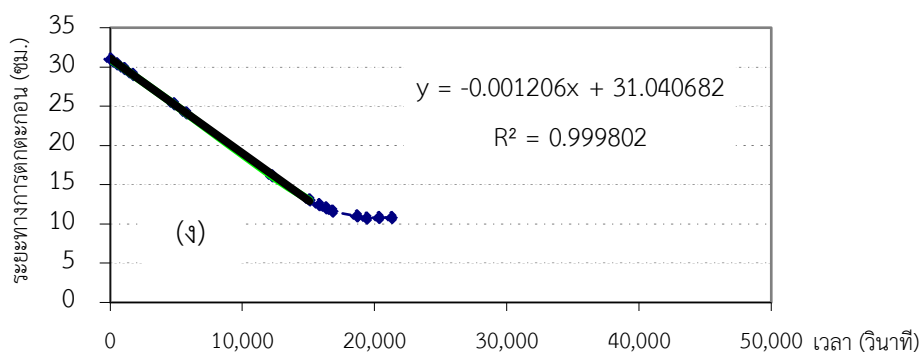
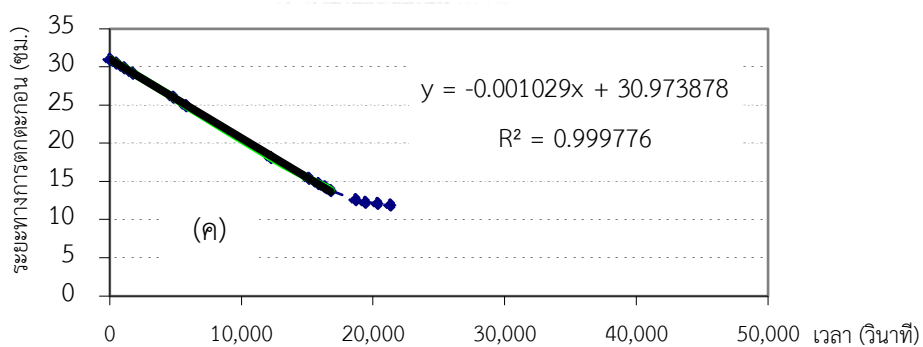
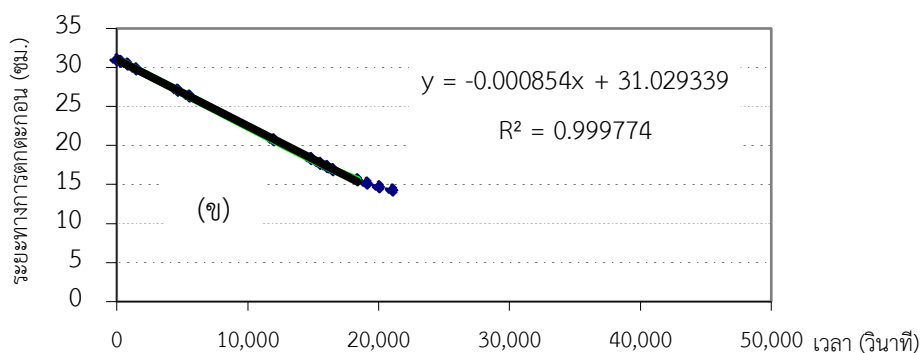
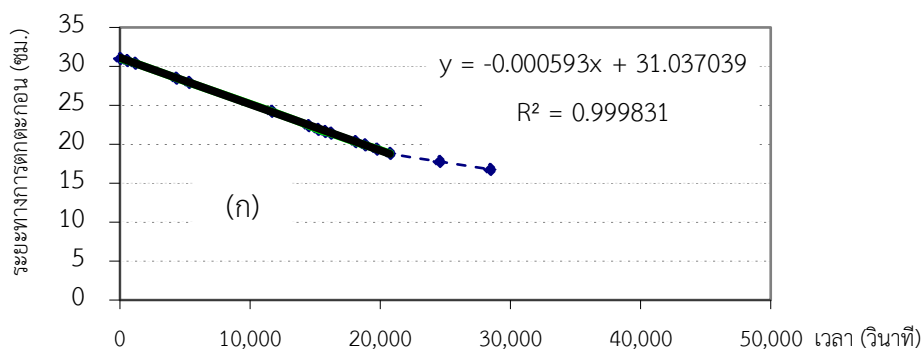


รูปที่ ก.3 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม

ทล็กขนาด 41 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

1.4) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยทล็กขนาด 65 ไมโครเมตร



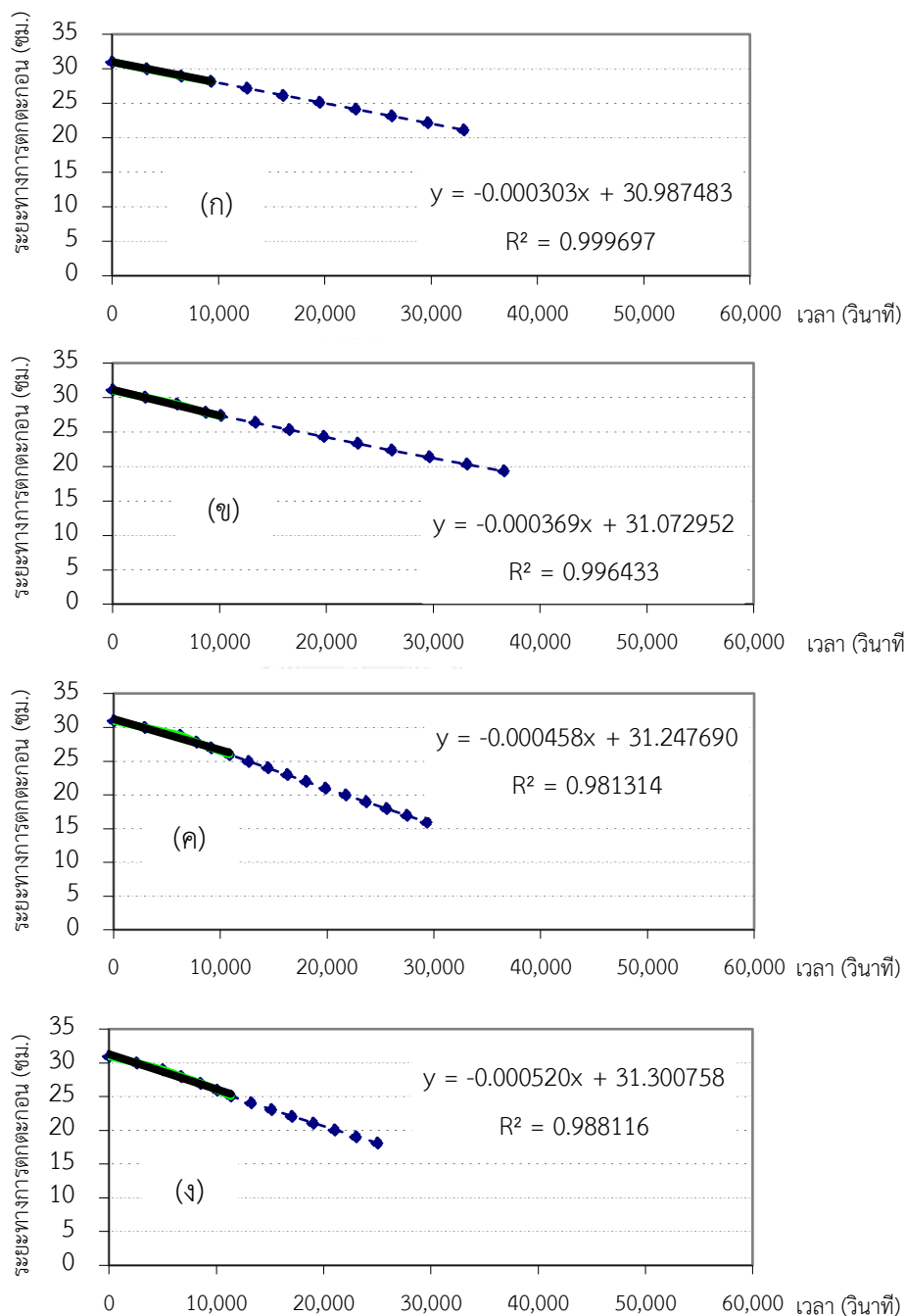
รูปที่ ก.4 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม

ทล็กขนาด 65 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

2. ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวของถ่านกัมมันต์ในแต่ละขนาด ที่ปริมาณ 20%, 50%, 80% และ 100% w/w

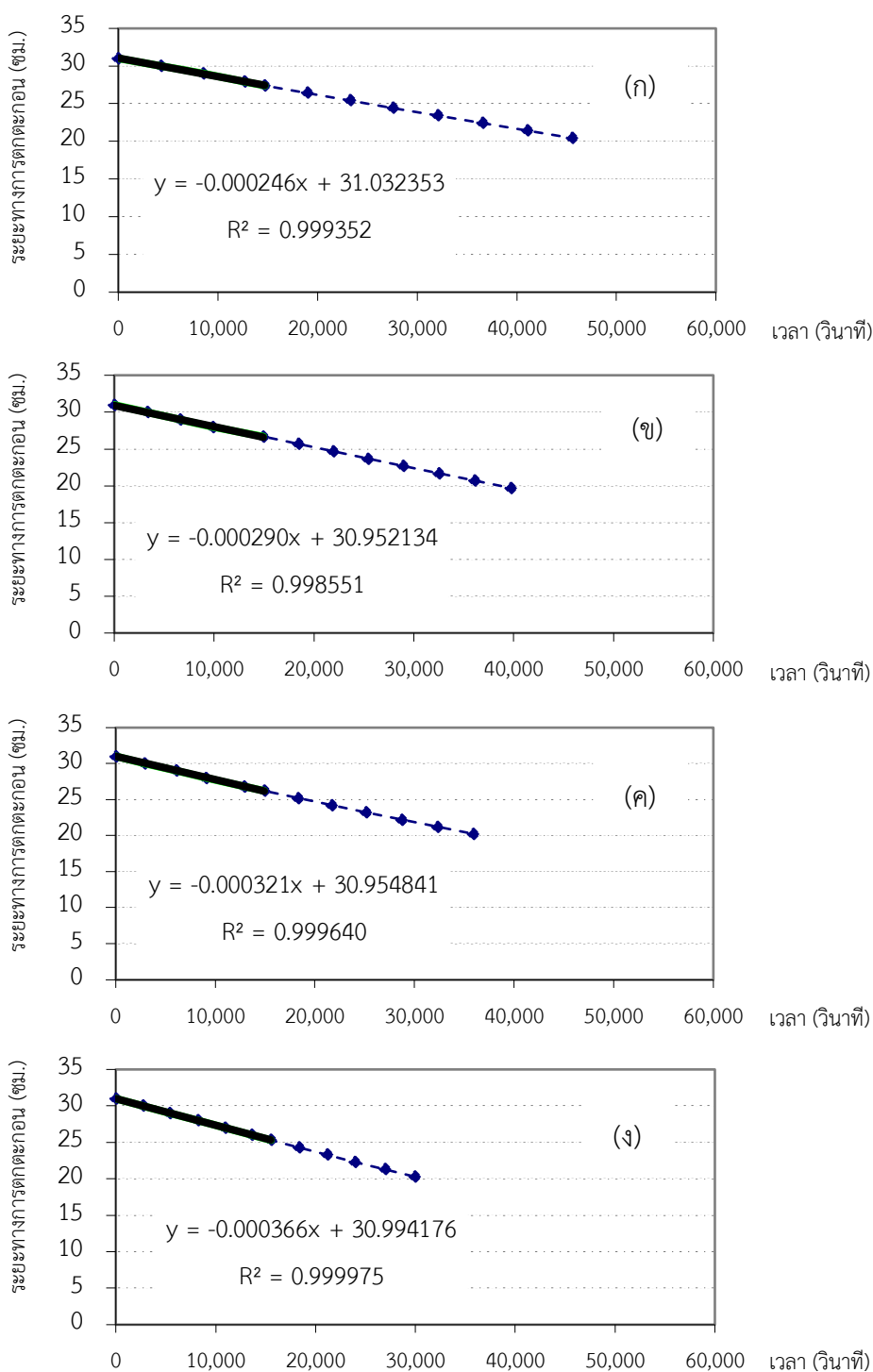
2.1) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 133 ไมโครเมตร



รูปที่ ก.5 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม ถ่านกัมมันต์ขนาด 133 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

## 2.2) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 213 ไมโครเมตร

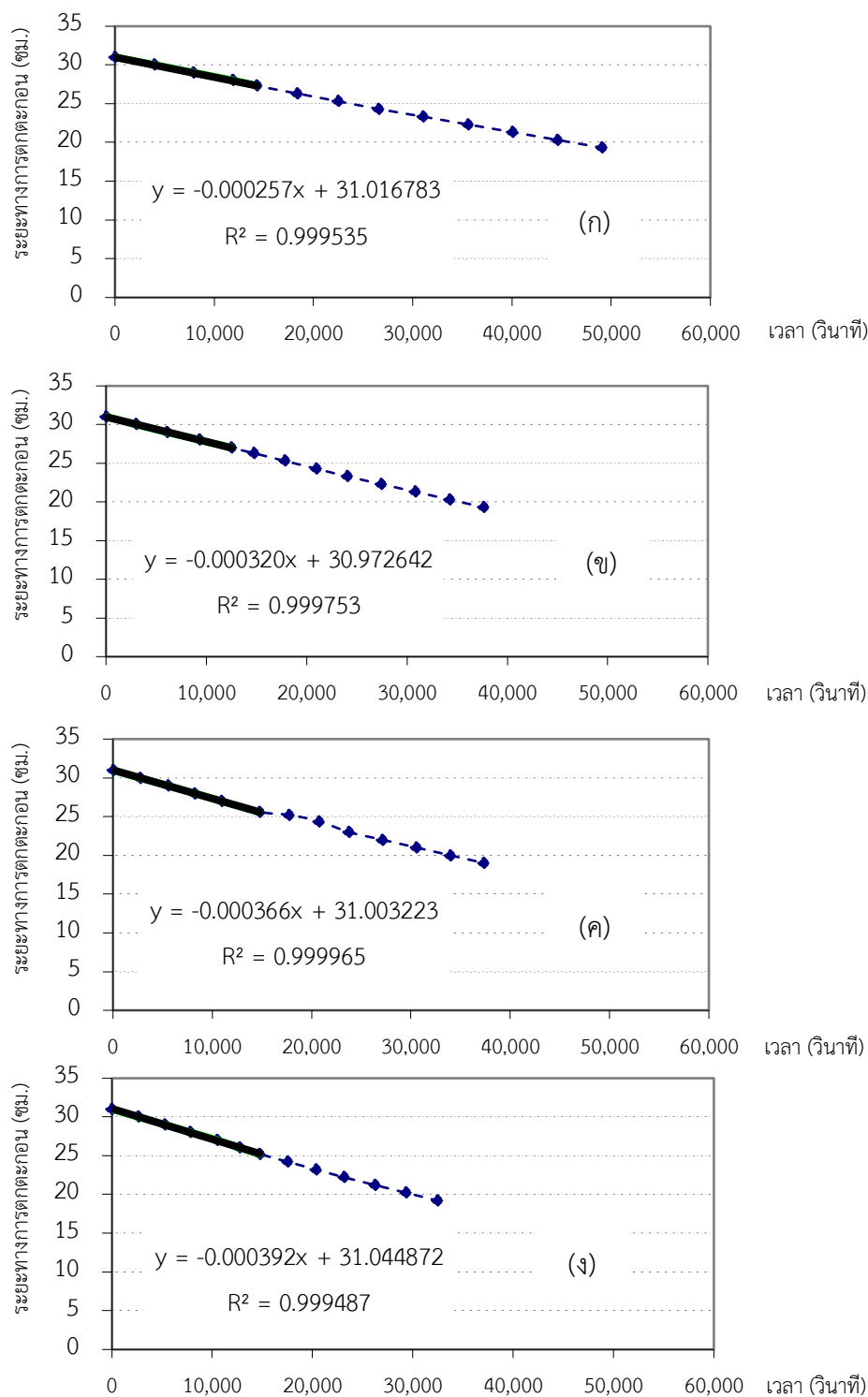


รูปที่ 6.6 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม

ถ่านกัมมันต์ขนาด 213 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

2.3) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 365 ไมโครเมตร



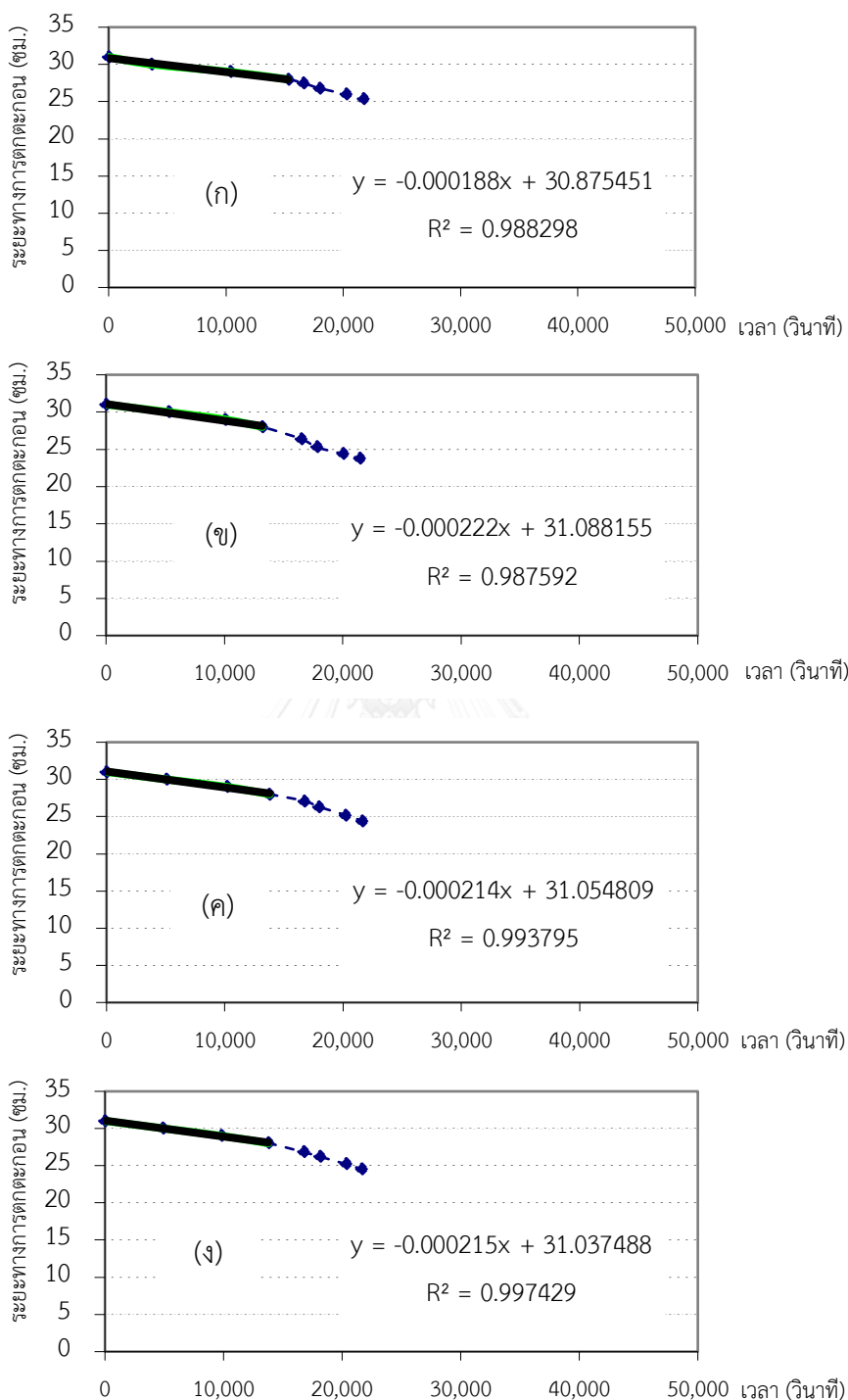
รูปที่ ๗.๗ ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม

ถ่านกัมมันต์ขนาด 365 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w ข) 50% w/w ค) 80% w/w ง) 100% w/w



2.4) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร



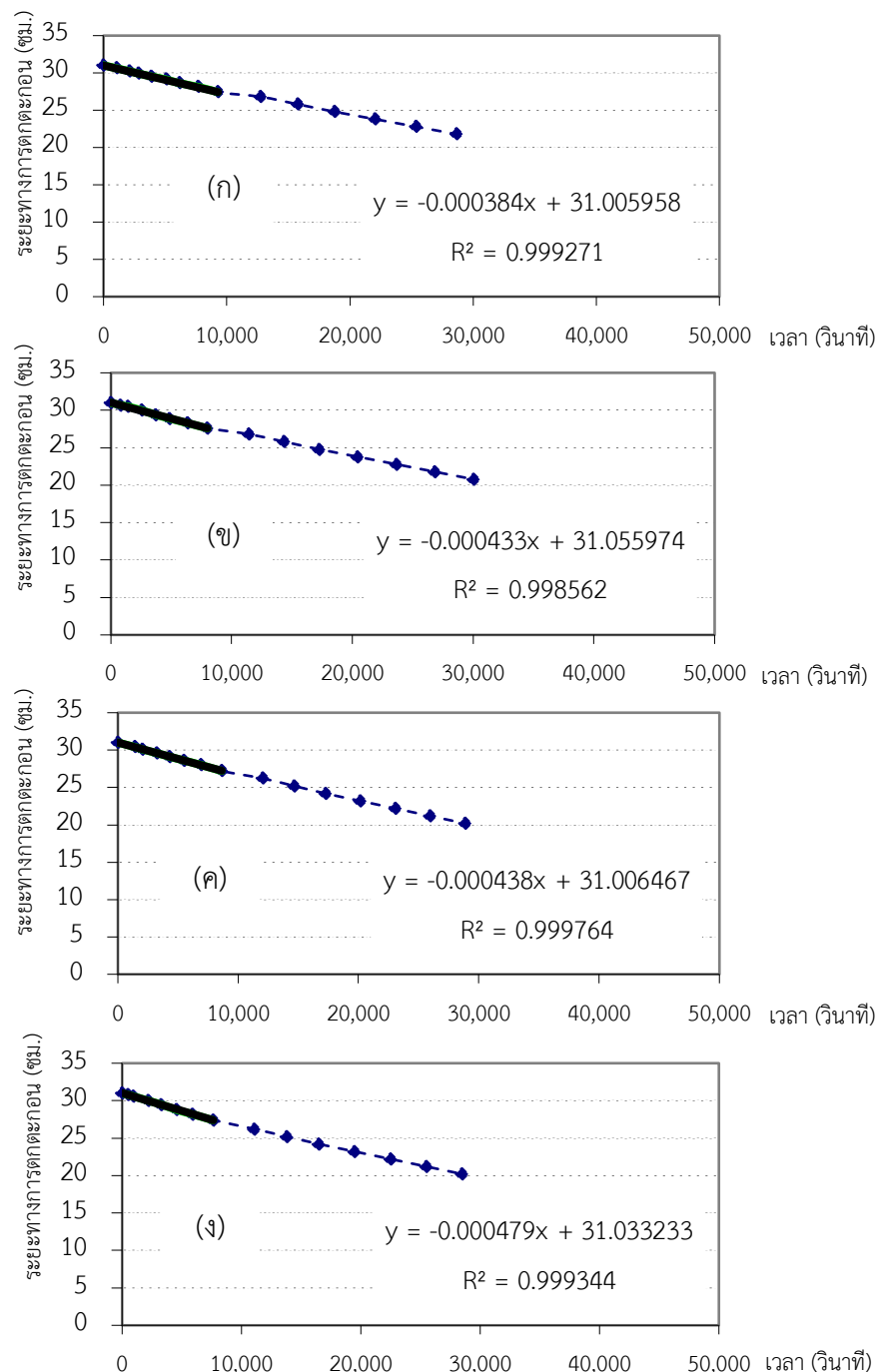
รูปที่ ๓.8 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม

ถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

3. ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวของยางบดละเอียดในแต่ละขนาด ที่ปริมาณ 20%, 50%, 80% และ 100% w/w

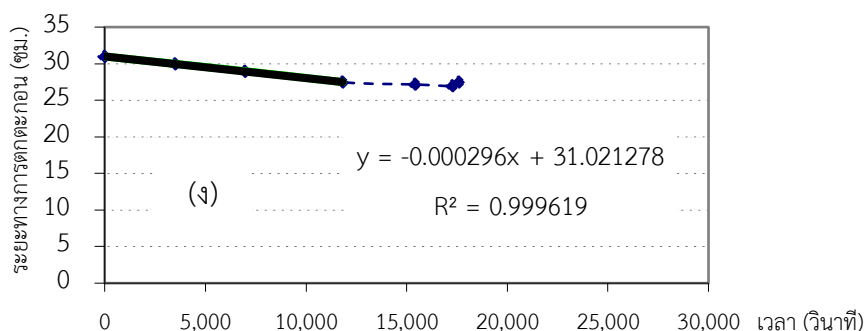
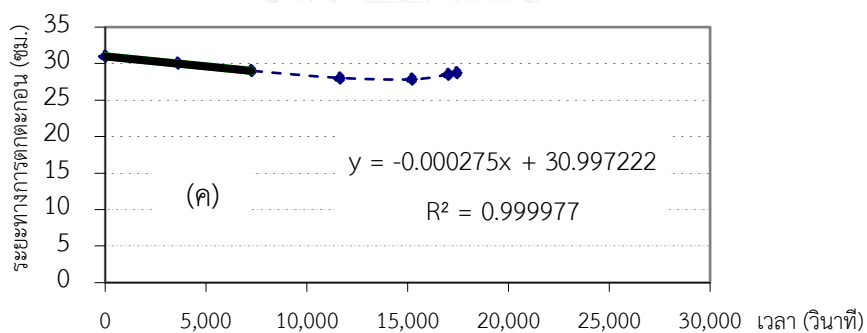
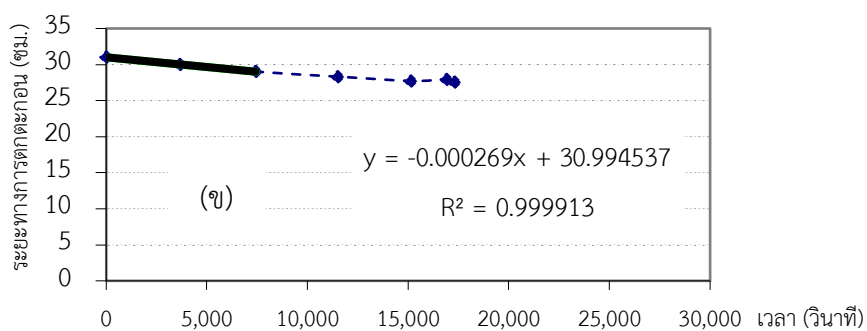
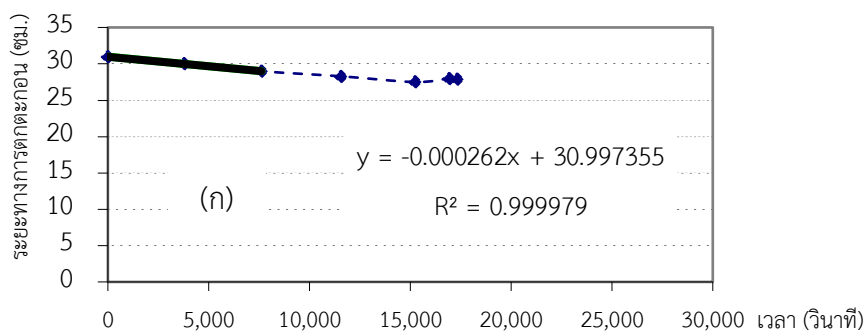
3.1) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยยางบดละเอียดขนาด 223 ไมโครเมตร



รูปที่ ๓.๙ ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติมยางบดละเอียดขนาด 223 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

### 3.2) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยยางบดละเอียดขนาด 408 ไมโครเมตร

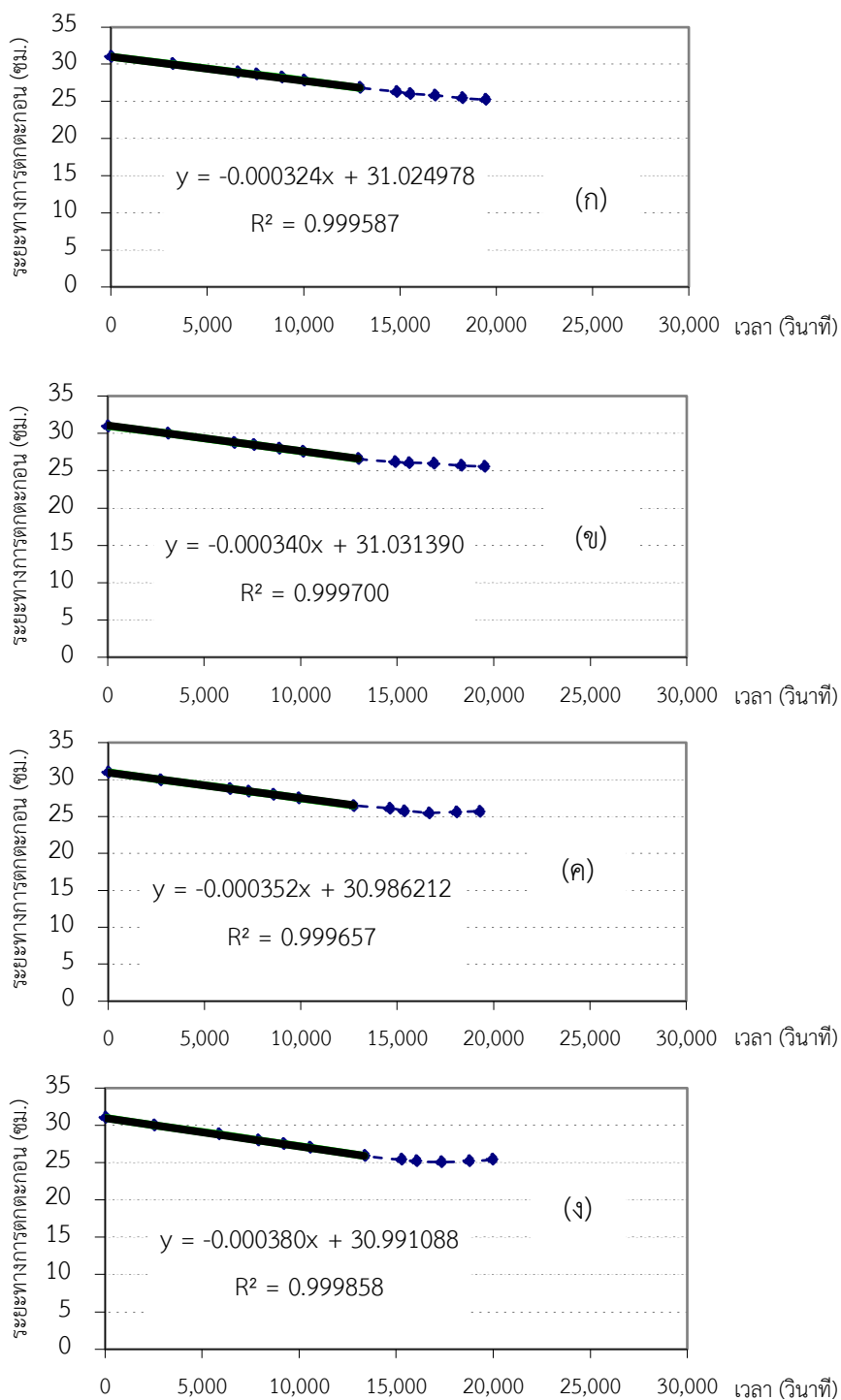


**รูปที่ ก.10** ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม

ยางบดละเอียดขนาด 408 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

3.3) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยยางบดละเอียดขนาด 450 ไมโครเมตร

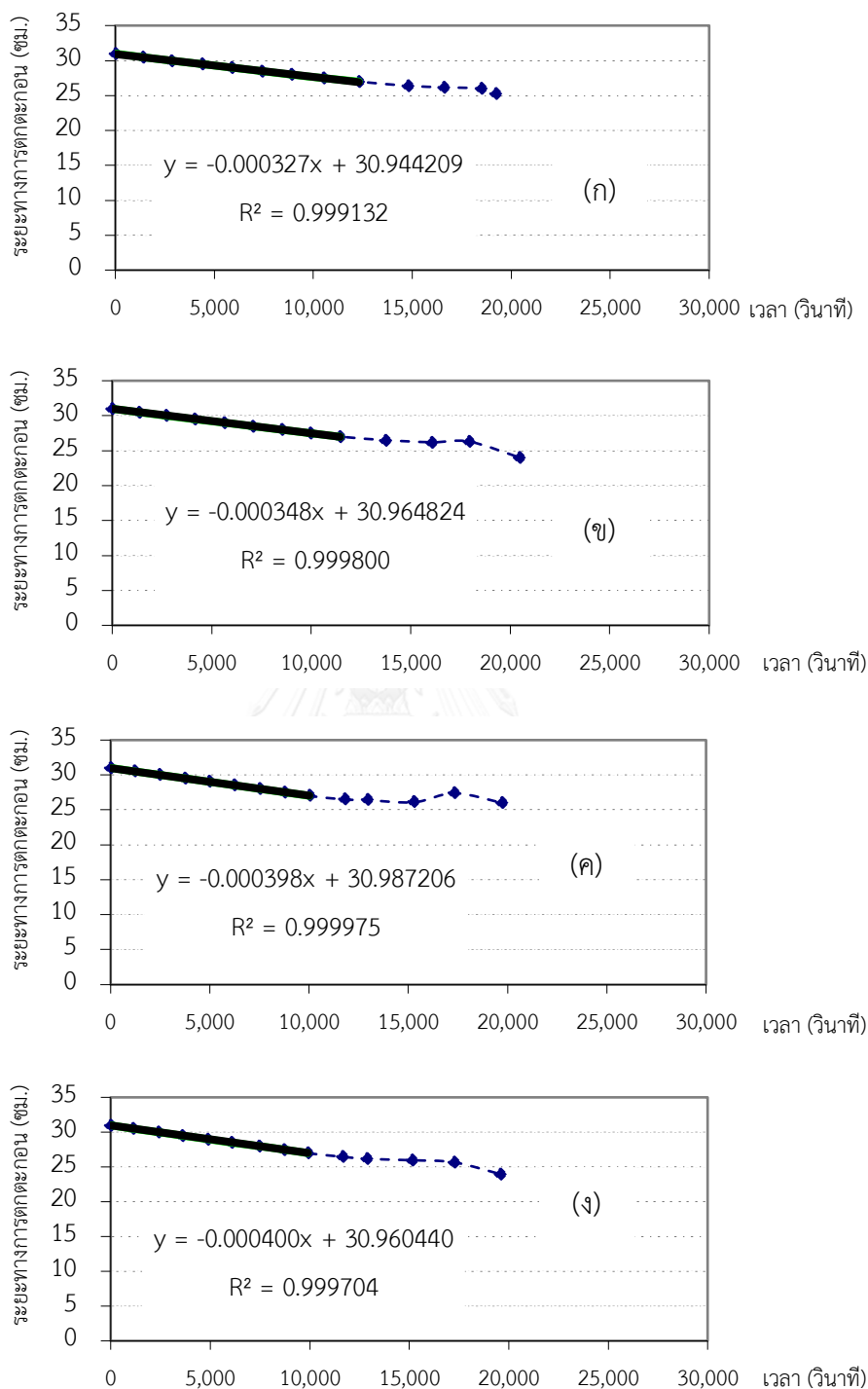


รูปที่ ก.11 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม

ยางบดละเอียดขนาด 450 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w ข) 50% w/w ค) 80% w/w ง) 100% w/w

### 3.4) ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ด้วยยางบดละเอียดขนาด 644 ไมโครเมตร



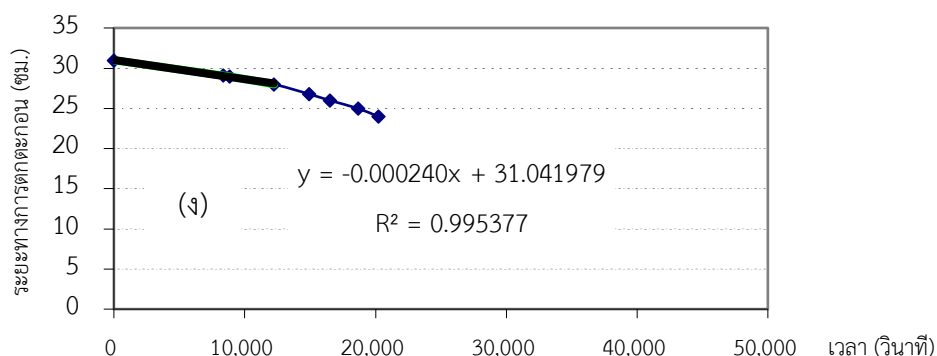
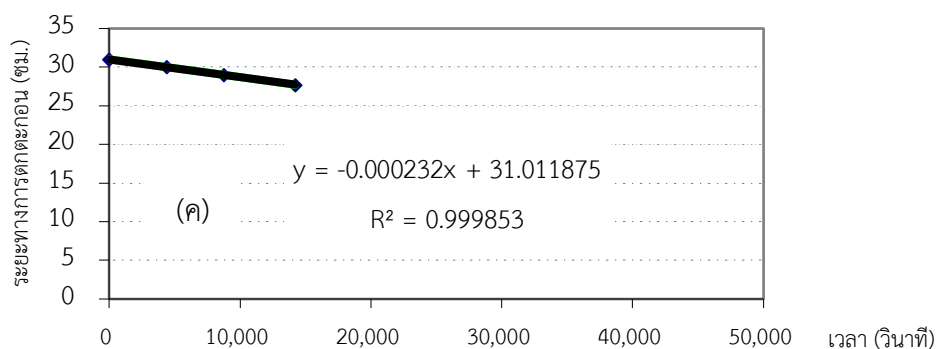
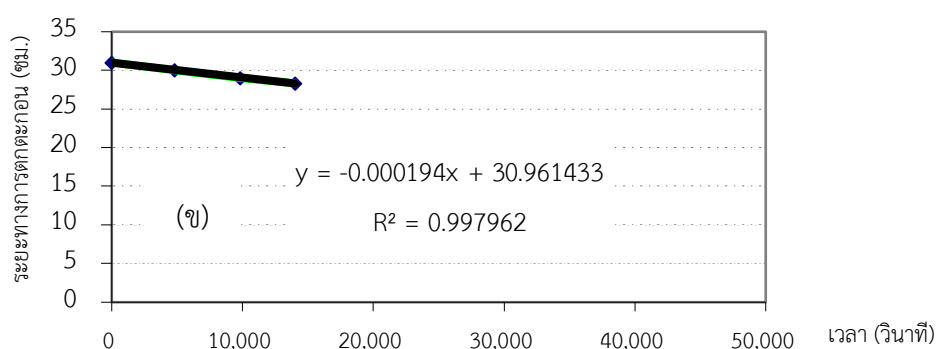
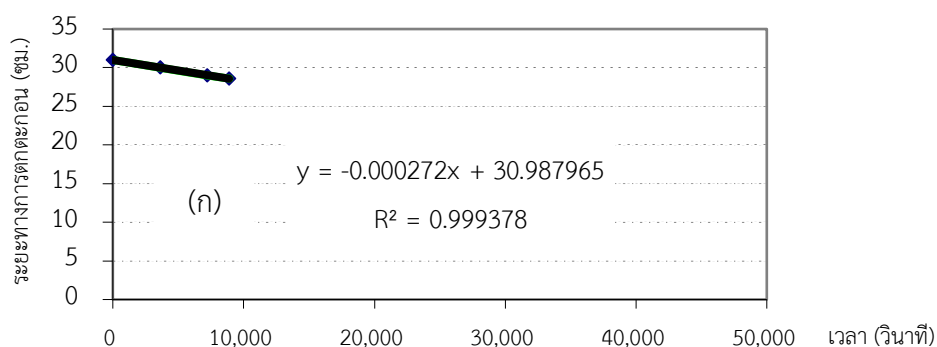
รูปที่ ก.12 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวในระบบที่มีการเติม

ยางบดละเอียดขนาด 644 ไมโครเมตร ที่ปริมาณต่างกัน

ก) 20% w/w   ข) 50% w/w   ค) 80% w/w   ง) 100% w/w

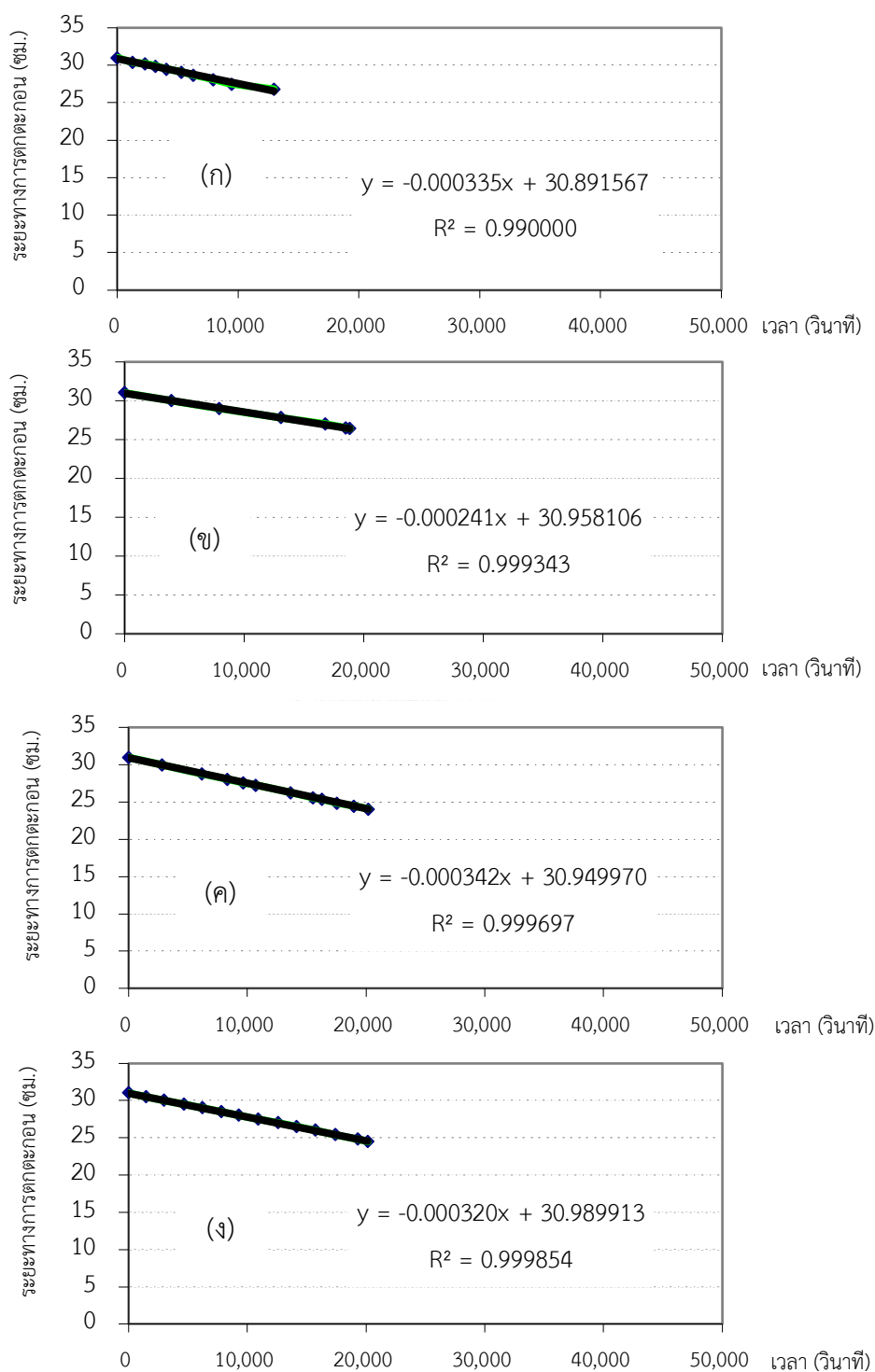


#### 4.2 ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ชุดการทดลองถ่านกัมมันต์



**รูปที่ ก.14** ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวชุดควบคุมชุดการทดลองถ่านกัมมันต์  
 ก) ชุดควบคุมถ่านกัมมันต์ขนาด 133 ไมโครเมตร ข) ชุดควบคุมถ่านกัมมันต์ขนาด 213 ไมโครเมตร  
 ค) ชุดควบคุมถ่านกัมมันต์ขนาด 365 ไมโครเมตร ง) ชุดควบคุมถ่านกัมมันต์ขนาด 802 ไมโครเมตร

#### 4.3 ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนชุดการทดลองยางบดละเอียด



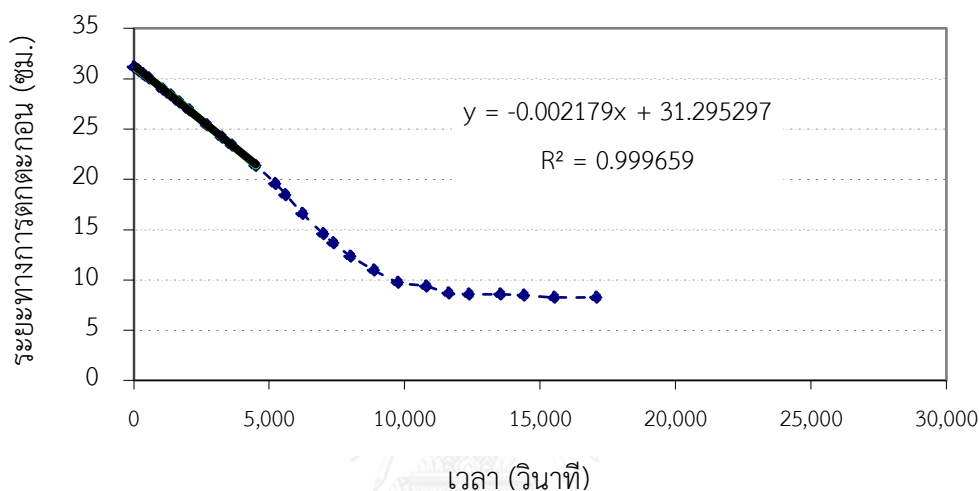
รูปที่ ก.15 ความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ไม่จมตัวชุดควบคุมชุดการทดลองยางบดละเอียด

- ก) ชุดควบคุมยางบดละเอียด 223 ไมโครเมตร    ข) ชุดควบคุมยางบดละเอียด 408 ไมโครเมตร  
ค) ชุดควบคุมยางบดละเอียด 450 ไมโครเมตร    ง) ชุดควบคุมยางบดละเอียด 644 ไมโครเมตร





การหาค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนของสลัดจ์ที่เกิดปัญหาไม่จมตัวในระบบเอเอส เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับชั้นสลัดจ์ (เซนติเมตร) เทียบกับเวลา (วินาที) จะได้กราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ ข.1 สำหรับการตกตะกอนช่วงแรกจะมีค่าคงที่ เรียกว่า ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (Initial Settling Velocity, ISV) โดยค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน คือค่าความชันของกราฟในช่วงแรกที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง



รูปที่ ข.1 กราฟค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนสลัดจ์ที่เกิดปัญหาไม่จมตัว โดยใช้ถังลึกลงขนาด 8 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 100% w/w เป็นวัสดุช่วยตกตะกอน

$$\begin{aligned}
 \text{จากกราฟจะได้ค่าความชัน} &= \text{ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอน (ISV)} \\
 &= 0.02179 \text{ เซนติเมตร/วินาที} \\
 &= 0.0784 \text{ เมตร/ชั่วโมง}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าความเร็วเริ่มต้นของการตกตะกอนของสลัดจ์มีค่าเท่ากับ 0.0784 เมตร/ชั่วโมง

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

เรือเอกธีรทัต กงทอง เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

ในช่วงเวลาขณะทำงานวิจัย ผู้วิจัยเป็นข้าราชการ สังกัดกองทัพเรือ ได้รับการอนุมัติจากต้นสังกัด คือ กองออกแบบ กรมช่างโยธาทหารเรือ ให้ลาเรียนในเวลาราชการ โดยมุ่งหวังนำความรู้ที่ได้ไปช่วยพัฒนางานออกแบบวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมในกองทัพเรือ ภาคประชาชน และระดับประเทศชาติอย่างยั่งยืนต่อไป

โดยส่วนหนึ่งของผลงานวิจัยได้เผยแพร่ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 และ 5th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (สวสท.) ระหว่างวันที่ 11-12 พฤษภาคม 2559 ในชื่อหัวข้อ การประยุกต์ใช้วัสดุช่วยตกตะกอน เพื่อแก้ปัญหาเฉพาะหน้า สลัดจ้ไม่จมตัวในระบบเอเอส