

การศึกษาถึงปฏิกิริยาแบบอวกาศยกเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำ



นายกันตพงศ์ ผิวเหลือง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF AIR-LIFT REACTOR FOR TURBIDITY REMOVAL IN WATER



Mr. Kantapong Pewluang

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University


หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาดังปฏิบัติการแบบอากาศยกเพื่อกำจัดความชื้นใน น้ำ
โดย	นายกันตพงศ์ ผิวเหลือง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ

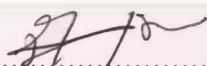
---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

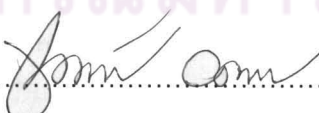
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงค์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ชาวเขียว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ชนาธิป ผาริโน)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.พิเชฐ ชัยวิวัฒน์วรกุล)

กัณฑ์พิชิต : การศึกษาถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำ.  
 (STUDY OF AIR-LIFT REACTOR FOR TURBIDITY REMOVAL IN WATER) อ.ที่  
 ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร.  
 ชัยพร ภูประเสริฐ 141 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสภาวะที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ถึง  
 ปฏิกิริยาแบบอากาศยก (Air-Lift Reactor, ALR) เพื่อรวมกระบวนการสร้าง-รวมตะกอน และการตกตะกอนเข้า  
 ด้วยกัน โดยทำการศึกษาด้วยน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของดินคาโอลิน 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร  
 จากการศึกษาพบว่า ถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงกว่าถึงปฏิกิริยาแบบ  
 ฟองอากาศ (Bubble column, BCR) รวมถึงช่วยประหยัดพลังงานและเวลาการกวนผสม โดยการเลือกใช้ค่า  
 อัตราการเติมอากาศที่มีขอบเขตการไหลที่เหมาะสมนั้น มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ทั้ง  
 ผลต่อการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศ สารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) และอนุภาคความขุ่นในน้ำตัวอย่าง โดย  
 จากการเดินระบบแบบที่ละเทพบ้างถึง ALR ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด 97.67% ที่อัตราการเติมอากาศ 3  
 ลิตรต่อนาทีและระยะเวลาการกวนผสม 1 นาทีซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ได้ใกล้เคียงกับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี  
 จาร์เทสต์ โดยที่ความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่นส่งผลต่อประสิทธิภาพการเดินระบบที่ได้จาก  
 กรณี 1 กรัมต่อลิตรที่สูงกว่า 0.1 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด  
 ความขุ่นของถึง ALR พบว่าไม่เห็นผลชัดเจนจากการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ประกอบประเภทโคน ในขณะที่ การ  
 เพิ่มขนาดของท่อภายในจาก 10 เซนติเมตร ( $ALR_{10}$ ) เป็น 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) พบว่าสามารถเพิ่ม  
 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และยังช่วยลดพลังงานในการเติมอากาศ โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดความ  
 ขุ่นสูงที่สุด 98.03% ที่อัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาทีและระยะเวลาการกวนผสม 1 นาที นอกจากนี้ จากการ  
 เดินระบบแบบต่อเนื่องพบว่า การประยุกต์ใช้ถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกพร้อมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคน  
 แบบพิเศษสามารถนำมาใช้ในการกำจัดความขุ่นได้ดีกว่าถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกธรรมดา เนื่องจากมีการ  
 แบ่งโซนเพื่อปรับสภาพความปั่นป่วน รวมถึงสร้างส่วนที่ทำให้เกิดการรวมตะกอนที่ดีขึ้น โดยประสิทธิภาพการ  
 กำจัดความขุ่นสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 85% โดยลดลงจากการเดินระบบแบบที่ละเทประมาณ 15% เนื่องจาก  
 ประเด็นในด้านระยะเวลากักน้ำที่ต่ำกว่า รวมถึงแรงเฉือนที่ส่งผลต่อปริมาณตะกอนภายในระบบบำบัด อย่างไรก็ตาม  
 การประยุกต์ใช้ถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกในการกำจัดความขุ่นในน้ำนั้น ยังมีข้อจำกัดกับค่าความเข้มข้น  
 ของอนุภาคต่ำ รวมถึงค่าที่ได้ยังไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา แต่น่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะนำมา  
 ประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบขั้นต้น (Pre-treatment for raw water) เพื่อช่วยลดขนาดระบบบำบัด  
 ขั้นต้น ปริมาณสารเคมี รวมถึงปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการผลิตน้ำประปาในกรณีที่น้ำดิบมีความขุ่นสูง

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต..... กัณฑ์พิชิต ชิงพลอง  
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา..... 2552..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 4970219621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : AIRLIFT REACTOR / COAGULATION AND FLOCCULATION /  
SEDIMENTATION / TURBIDITY REMOVAL

KANTAPONG PEWLUANG : STUDY OF AIR-LIFT REACTOR FOR TURBIDITY  
REMOVAL IN WATER. THESIS ADVISOR : PISUT PAINMANAKUL,  
Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., 141 pp.

The objective of this research is to analyze the turbidity removal efficiency and the suitable operating condition obtained with Air-Lift Reactor (ALR) as the hybrid process of coagulation, flocculation and sedimentation processes. The synthetic wastewater prepared by 1 and 0.1 g/l of kaolin concentration was used in this work. The results showed that removal efficiencies of the ALR are greater than those of bubble column reactor (BCR) with lower mixing energy and time. Moreover, the applied gas flow rate has been proven as an important parameter for classifying the appropriate flow regime, interaction among of bubble, coagulant (alum) and suspended particle and thus overall treatment. From batch process, the highest treatment efficiency (97.67%) can be obtained with the ALR at 3 LPM of gas flow rate and 1 minute of mixing time: this was close to jar test experiments. Note that, due to the higher amount of target for sweep-floc coagulation, higher efficiencies were found in case of 1 g/L. In order to improve the ALR performance, the application of cone-device has provided the insignificant effect, whereas the increasing of internal tube from 10 cm (ALR<sub>10</sub>) to 12 cm (ALR<sub>12</sub>) can enhance the removal efficiency (98.03%) with lower gas flow rate (2 LPM) and 1 minute mixing time: this condition was thus applied for the continuous process. The maximum removal efficiencies (85%) can be obtained with the ALR combined with special cone-device which separates the reactor zone and controls the turbulent condition and thus sedimentation. It can be noted that flow-shortcut and shear force occurred in continuous system could be responsible for the lower efficiency (15%) than in batch system. Even some limitations in terms of removal efficiency obtained with very low particle concentration and of achievement for water supply standard, the ALR can be possibly apply as the pre-treatment for raw water for reducing the size of treatment process, chemical dosage and also the sludge generated in case of high turbid water.

Department : ..... Environmental Engineering

Field of Study : Environmental Engineering

Academic Year : 2009 .....

Student's Signature กัญจน์ ปิ่นน้อย

Advisor's Signature Pisut P.

Co-Advisor's Signature Chaiyaporn P.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้โอกาส คำแนะนำและมุมมองความคิดแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ และ ดร. พิเชฐ ชัยวิวัฒน์วรกุล ที่สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ทิชม แก้ไขให้งานวิจัยนี้เป็นในแนวทางที่ดีที่สุด รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความรู้ในวิชาต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนการวิจัย จนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือ จนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง ผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการศึกษามาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ลักษณะของน้ำเสีย.....	5
2.2 การบำบัดน้ำและน้ำเสียในรูปของความขุ่น.....	9
2.2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน.....	9
2.2.2 กระบวนการตกตะกอน.....	18
2.3 ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Airlift Reactor, ALR).....	22
2.3.1 ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก.....	22
2.3.2 โครงสร้างของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก.....	23
2.3.3 การจำแนกชนิดของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก.....	23
2.3.4 ข้อดีของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก.....	25
2.3.5 ค่าอุทกพลศาสตร์ในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก.....	26
2.3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 รูปแบบการวิจัย.....	41
3.2 สถานที่การทดลอง.....	41
3.3 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง.....	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 สารเคมี.....	44
3.5 การเตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่น.....	44
3.6 การวัดค่าอุทกพลศาสตร์.....	44
3.7 วิธีดำเนินการวิจัย.....	45
3.7.1 การศึกษาการกำจัดความขุ่นในน้ำด้วยกระบวนการกำจัดทางเคมี (จาร์เทสต์).....	45
3.7.2 การศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ของถังปฏิริยาแบบอากาศยกและถัง ปฏิริยาแบบฟองอากาศ.....	46
3.7.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิริยาแบบ อากาศยกและถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	52
4.1 น้ำเสียสังเคราะห์และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยการทดลองจาร์ เทสต์.....	52
4.1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น.....	52
4.1.2 การศึกษาความเข้มข้นของสารส้มที่มีความเหมาะสมสำหรับการ กำจัดความขุ่นในน้ำด้วยการทดลองจาร์เทสต์.....	52
4.2 การศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ของถังปฏิริยาแบบอากาศยกและถังปฏิริยา แบบฟองอากาศ.....	54
4.2.1 การศึกษาขนาดฟองอากาศ ( $d_b$ ).....	54
4.2.2 การศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a).....	56
4.2.3 การศึกษาค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ.....	58
4.3 ศึกษาผลกระทบจากชนิดของอุปกรณ์เติมอากาศแบบยัดหยุ่น.....	61
4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยก.....	61
4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ.....	64
4.3.3 ผลกระทบจากค่าความเร็วเกรเดียนต์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความ ขุ่น.....	66



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.4 ผลกระทบจากเวลาทวนเร็วต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	71
4.4 การศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก.....	74
4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยกร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคน (Cone).....	74
4.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีขนาดท่อภายใน 12 เซนติเมตร (ALR <sub>12</sub> ).....	76
4.4.3 การศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ของถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายใน 12 เซนติเมตร (ALR <sub>12</sub> ).....	78
4.4.4 ผลกระทบจากค่าความเร็วเกรเดียนต์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	80
4.4.5 ผลกระทบจากเวลาทวนเร็วต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น.....	82
4.4.6 อัตราการรวมตัวปรากฏ (Apparent Aggregation Rate, K <sub>app</sub> ).....	83
4.4.7 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นบริเวณก้นถังปฏิริยา (Sludge).....	84
4.5 การเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ของถังปฏิริยาแบบอากาศยก (Airlift reactor) ในการกำจัดความขุ่น.....	87
4.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	87
4.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนแบบพิเศษโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก .....	102
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่อความเข้มข้นสารส้ม (จาร์เทสต์).....	103

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข ตัวอย่างรูปถ่ายขนาดฟองอากาศ.....	124
ภาคผนวก ค การศึกษาลักษณะตะกอน.....	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	141



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.7.1..... 46
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.7.2.1..... 48
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.7.2.2..... 48
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.7.3..... 51
ตารางที่ 4.1	ความเร็วเกรเดียนท์ของถังปฏิบัติการแบบอากาศยกและถังปฏิบัติการแบบ ฟองอากาศ ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ..... 71
ตารางที่ 4.2	ความเร็วเกรเดียนท์ (G) และเวลาในการกวนผสม (T), (G.T)..... 73
ตารางที่ 4.3	ความเร็วเกรเดียนท์ของถังปฏิบัติการแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) และถัง ปฏิบัติการแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ..... 81
ตารางที่ 4.4	ค่าอัตราการรวมตัวปรากฏ ( $K_{app}$ ) ที่ค่าความเร็วเกรเดียนท์และเวลากวน ผสมต่างๆ ของถัง BCR, $ALR_{10}$ และ $ALR_{12}$ ในน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร..... 83
ตารางที่ 4.5	ค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นตะกอนด้านล่างที่ค่า ความเร็วเกรเดียนท์และเวลากวนผสมต่างๆ ของถัง BCR, $ALR_{10}$ และ $ALR_{12}$ ในน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร..... 85

## สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 2.1	ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ silicon tetrahedral sheet วงกลมสีดำ คือ อะตอมซิลิกอนและวงกลมสีขาว คืออะตอมออกซิเจน.....	6
รูปที่ 2.2	ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ aluminium hydroxide sheet และ magnesium hydroxide sheet.....	6
รูปที่ 2.3 ก	โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอไลน์.....	7
รูปที่ 2.3 ข	โมเดลโครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอไลน์.....	7
รูปที่ 2.4	รูปถ่ายอนุภาคดินคาโอไลน์.....	8
รูปที่ 2.5	การจำแนกขนาดของสารต่างๆ ในน้ำ.....	9
รูปที่ 2.6	ผลของการเติมเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์.....	10
รูปที่ 2.7	การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของ คอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ.....	11
รูปที่ 2.8	เกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัมผัสมระหว่างอนุภาคต่างๆ ทั้ง 5 ประเภท	12
รูปที่ 2.9	กลไกในการสร้างโคแอกกูแลนต์ด้วยสารส้มทั้ง 2 ประเภท.....	15
รูปที่ 2.10	การตกตะกอนแบบโคตโตจนถึงตกตะกอนแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	18
รูปที่ 2.11	การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม.....	20
รูปที่ 2.12	การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น.....	20
รูปที่ 2.13	วิธีหาค่าฟของการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น.....	21
รูปที่ 2.14	ถังปฏิบัติการแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน.....	24
รูปที่ 2.15	ปฏิบัติการแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายนอก.....	25
รูปที่ 2.16	ชนิดของหัวพ่นอากาศ.....	26
รูปที่ 2.17	ตัวอย่างการวัดขนาดฟองโดยใช้รูปที่ถ่ายได้จากการทดลอง.....	28
รูปที่ 2.18	ขอบเขตการไหลในถังปฏิบัติการแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน (ยึดหลักการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซ).....	31
รูปที่ 2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่อ อัตราน้ำล้นผิวเป็น 30 ซม./นาที.....	33
รูปที่ 2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่อ อัตราน้ำล้นผิวเป็น 60 ซม./นาที.....	33

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21	แผนผังของถังส้มฝัดแบบอากาศยกที่ใช้ในการทดลอง..... 34
รูปที่ 2.22	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระดับความลึกที่เกิดการกรองตะกอน เมื่อใช้ สารกรอง 3 ชนิด และ 1 ชนิด ..... 36
รูปที่ 2.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่อ อัตราน้ำล้นผิวเป็น 30 ซม./นาที่..... 37
รูปที่ 2.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่อ อัตราน้ำล้นผิวเป็น 60 ซม./นาที่..... 38
รูปที่ 2.25	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและค่าภาวะบรรทุก สารอินทรีย์ต่างๆ ที่อัตราการหมุนเวียนล้างสารกรองเท่ากับ 2 วัน ..... 38
รูปที่ 2.26	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและอัตราการหมุนเวียน ล้างตัวกลางต่างๆที่ค่าภาวะบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.- วัน..... 39
รูปที่ 2.27	ความแตกต่างของ gas residence time ที่ความเร็วของก๊าซต่างๆ ในระบบ แอกติเวเต็ดสไลด์จ์ของ IALR และ EALR..... 39
รูปที่ 2.28	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่ความเร็วของก๊าซต่างๆ ใน (a) IALR(b) EALR ที่ภาระต่อน 2 และ 4 g MLSS l <sup>-1</sup> ..... 39
รูปที่ 3.1	ชุดโมเดลทดลอง..... 41
รูปที่ 3.2	แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์การทดลอง..... 42
รูปที่ 3.3	อุปกรณ์สร้างฟองอากาศ..... 42
รูปที่ 3.4	เครื่องมือถ่ายภาพ..... 43
รูปที่ 3.5	เครื่องมือวัดอัตราการไหลอากาศ..... 43
รูปที่ 3.6	เครื่องมือวัดอัตราการไหลน้ำ..... 43
รูปที่ 3.7	ขั้นตอนการศึกษาการหาขนาดฟองอากาศและพื้นที่ผิวส้มฝัดจำเพาะ (ALR <sub>10</sub> )..... 47
รูปที่ 3.8	ขั้นตอนการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถัง ปฏิริยาแบบอากาศยกและถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ..... 50

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.1	น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่นที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร.....	52
รูปที่ 4.2	น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่นที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร.....	52
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดและความเข้มข้นของสารส้ม...	53
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศและอัตราการเติมอากาศของถัง ปฏิริยาแบบอากาศยกและถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ.....	55
รูปที่ 4.5	ลักษณะของฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.3(ก), 1(ข), 3(ค) และ 5(ง) ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ในถังปฏิริยาแบบอากาศยก.....	56
รูปที่ 4.6	ลักษณะของฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.3(ก), 1(ข), 3(ค) และ 5(ง) ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ.....	56
รูปที่ 4.7	การเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของถังปฏิริยาแบบอากาศยกและ ถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ.....	57
รูปที่ 4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับความเร็วที่เกิดฟอง.....	57
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะและอัตราการเติมอากาศของ ถังปฏิริยาแบบอากาศยกและถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ.....	58
รูปที่ 4.10	ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ.....	59
รูปที่ 4.11	ขอบเขตการไหลของถังปฏิริยาแบบอากาศยก.....	59
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศและ อัตราการเติมอากาศของถังปฏิริยาแบบอากาศยก.....	60
รูปที่ 4.13	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยก.....	61
รูปที่ 4.14	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยก.....	62
รูปที่ 4.15a	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ด้วยถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ.....	66
รูปที่ 4.15b	ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ.....	65

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.16a	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วگردیدنที่ในการกวนผสมของการกำจัดความชื้นที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร	67
รูปที่ 4.16b	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วگردیدنที่ในการกวนผสมของการกำจัดความชื้นที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร.....	67
รูปที่ 4.17a	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วگردیدنที่ในการกวนผสมของการกำจัดความชื้นที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร	69
รูปที่ 4.17b	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วگردیدنที่ในการกวนผสมของการกำจัดความชื้นที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร.....	69
รูปที่ 4.18	ลักษณะการไหลของของเหลวภายในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและถังปฏิกริยาแบบอากาศยก.....	70
รูปที่ 4.19	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกและถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ.....	72
รูปที่ 4.20	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นโดยการลดปริมาณสารเคมี.....	73
รูปที่ 4.21	อุปกรณ์ประกอบประเภทโคน.....	75
รูปที่ 4.22	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (ALR <sub>10</sub> ) ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคน.....	75
รูปที่ 4.23	ลักษณะการไหลของของเหลวในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคน.....	76
รูปที่ 4.24a	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร (ALR <sub>12</sub> ).....	77
รูปที่ 4.24b	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร (ALR <sub>12</sub> ).....	77
รูปที่ 4.25	ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และอัตราการเติมอากาศของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร (ALR <sub>12</sub> ).....	78

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.26	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วการ เดียนทีในการกวนผสมของการกำจัดความชื้นที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร.....	80
รูปที่ 4.27	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และเวลากวนเร็ว ในการกวนผสมของการกำจัดความชื้นที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อ ลิตร.....	81
รูปที่ 4.28	ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และเวลากวนเร็ว ในการกวนผสมของการกำจัดความชื้นที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อ ลิตร.....	82
รูปที่ 4.29a	ความสูงของชั้นตะกอนที่เวลาการตกตะกอนต่างๆ ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อ ลิตร.....	86
รูปที่ 4.29b	ความสูงของชั้นตะกอนที่เวลาการตกตะกอนต่างๆ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัม ต่อลิตร.....	86
รูปที่ 4.30	การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่ มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความ เข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร.....	88
รูปที่ 4.31	ลักษณะกลไกภายในถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีการเดินระบบ แบบต่อเนื่อง.....	89
รูปที่ 4.32	การปรับปรุงอุปกรณ์ประกอบประเภทโคน.....	90
รูปที่ 4.33	ลักษณะกลไกภายในถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ ประกอบประเภทโคนที่มีการปรับปรุง โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	90
รูปที่ 4.34	การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่ มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนแบบ พิเศษ โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร.....	91
รูปที่ 4.35	การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่ มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนที่มี การปรับปรุง โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร	92



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.1	ลักษณะการต่ออนุกรมของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก..... 98
รูปที่ 5.2	คุณภาพน้ำดิบที่เข้าในระบบผลิตน้ำประปา..... 99



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากความต้องการน้ำประปาในปัจจุบันนี้ได้เพิ่มจากในอดีตมาก ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดิน เช่น แม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ หรืออ่างเก็บน้ำ เป็นต้น และค่าใช้จ่ายในด้านต่างๆ ในการผลิตน้ำประปา โดยทั่วไป น้ำดิบเหล่านี้มีสารแขวนลอยขนาดเล็กที่เป็นต้นเหตุของความขุ่นปะปนมาด้วย ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีองค์ประกอบของระบบผลิตน้ำประปาให้ถูกสุขลักษณะ เหมาะแก่การอุปโภคบริโภค และเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตน้ำประปาที่กำหนดไว้ ซึ่งจากปัญหาความขุ่นในน้ำที่ได้กล่าวมาสามารถใช้ระบบการบำบัดได้โดยใช้กระบวนการสร้าง-รวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) และกระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนนี้คือ ใช้ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และถังตกตะกอน โดยที่ถังกวนเร็วและถังกวนช้าจะใช้ใบพัดในกวนผสม ซึ่งเป็นระบบที่มีการทำงานหลายขั้นตอน ใช้พื้นที่มาก ใช้เวลานาน ใช้พลังงานสูง บำรุงดูแลรักษาได้ยาก เป็นเหตุให้ค่าใช้จ่ายสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงระบบการบำบัดด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นแทนการใช้อุปกรณ์การกวนผสมแบบเดิม

ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air-Lift Reactor, ALR) เป็นรูปแบบหนึ่งของถังปฏิกริยาระหว่างก๊าซและของเหลว โดยทั่วไปจะถูกใช้งานที่หลากหลาย เช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวเคมี การหมัก การผลิตเบียร์ ไวน์ การดูดซับก๊าซ โดยมีโครงสร้างคล้ายถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble Column Reactor, BCR) โดยมีการดัดแปลงภายในโดยจะมีท่อภายใน (draft tube) อยู่ภายในของคอลัมน์ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่หมุนเวียนของของเหลวซึ่งเป็นผลมาจากการอัดอากาศผ่านท่อภายใน จึงเป็นผลทำให้มีการไหลเวียนของของเหลวในถังปฏิกริยาเพียงพอสำหรับการผสมของของเหลวโดยไม่ต้องใช้เครื่องกวนสำหรับผสมของเหลว อีกทั้งยังเป็นระบบที่สามารถออกแบบและบำรุงรักษาได้ง่าย ใช้พื้นที่ในการบำบัดน้อย โดยในงานวิจัยส่วนใหญ่ จะทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดความขุ่นโดยถังน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน การพัฒนาความรู้พื้นฐานด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารเพื่อช่วยในการออกแบบถังสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวแบบอากาศยก การกระจายตัวของฟองก๊าซในถังสัมผัสแบบอากาศยก การศึกษาด้านอุทกพลศาสตร์ ขอบเขตการไหล การกระจายขนาดของฟลอค และการถ่ายเทมวลสาร ในถังปฏิกริยาแอกติเวเต็ดสลัดจ์แบบอากาศยก ขอบเขตการไหลวนของฟองในถังปฏิกริยา

แบบอากาศยก แบบที่มีการไหลวนภายใน เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาการใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกสำหรับการบำบัดน้ำที่มีความขุ่น

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ถัง ALR ดังกล่าว เพื่อรวมกระบวนการสร้าง-รวมตะกอนและการตกตะกอนเข้าด้วยกัน โดยอาศัยหลักการการไหลวนของของเหลว (Liquid Recirculation) และการกวนผสม (Mixing) จากฟองอากาศภายในถัง ALR โดยจะทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่มีความขุ่น โดยใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก และเปรียบเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำที่มีความขุ่นโดยใช้วิธีการกำจัดทางเคมีทั่วไป โดยคาดว่าจะสามารถประหยัดพลังงาน พื้นที่ก่อสร้าง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาได้ ซึ่งส่งผลดีในทางเศรษฐศาสตร์ในระบบผลิตน้ำประปาต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกสำหรับกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเพื่อบำบัดน้ำที่มีความขุ่น

1.2.2 เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของขอบเขตการไหล (Flow regime) เมื่อความเข้มข้นของดินคาโอลินเปลี่ยนแปลง

1.2.3 เพื่อทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

1.2.4 เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์ประกอบต่อพารามิเตอร์ทางด้านอุทกพลศาสตร์ รูปแบบการไหลและการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

1.2.5 เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการวิจัยระบบห้องปฏิบัติการที่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีเป้าหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำด้วยถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air-Lift Reactor, ALR) โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ทำการเตรียมตัวอย่างน้ำขุ่นสังเคราะห์ให้ดินคาโอลินเป็นตัวสร้างความขุ่นที่มีค่าความเข้มข้นของดินคาโอลิน 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยมีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 7

1.3.2 สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นได้แก่ อะลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) ที่มีสูตรทางเคมี  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

1.3.3 ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นโดยใช้วิธีการทดลองจาร์เทสต์

1.3.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

- ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble Column Reactor, BCR)

ทำจากอะคริลิคใสรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 80 ซม. โดยด้านล่างเชื่อมติดกับรูปทรงกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 30 ซม.

- ถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air-Lift Reactor, ALR)

ทำจากอะคริลิคใสรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 80 ซม. โดยด้านล่างเชื่อมติดกับรูปทรงกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. สูง 30 ซม. และมีท่อภายในรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 40 ซม.

1.3.5 การทดลองเพื่อหาค่าอุทกพลศาสตร์ที่อัตราการเติมอากาศในช่วง 0.2-10 ลิตรต่อนาที ได้แก่

- ขนาดของฟองอากาศ
- พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ
- ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ

1.3.6 ศึกษาผลกระทบของขนาดท่อภายในที่มีผลต่อค่าอุทกพลศาสตร์และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก รวมไปถึงผลกระทบในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ประกอบในรูปแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและการเดินระบบแบบต่อเนื่องของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

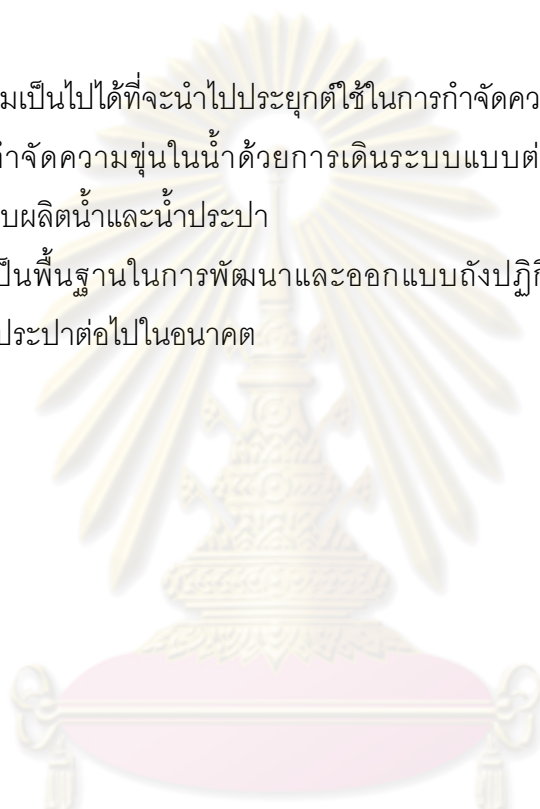
2.3.1 เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในเชิงของการสร้างและรวมตะกอน และการตกตะกอน

2.3.2 ลดพื้นที่ในการก่อสร้าง ขั้นตอน เวลาในการดำเนินงาน และประหยัดพลังงานที่ใช้ในการกำจัดความขุ่น

2.3.3 สามารถเข้าใจกลไกและตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการทำงานของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

2.3.4 มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดความขุ่นในน้ำได้จริง และนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดความขุ่นในน้ำด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะส่งผลดีในทางเศรษฐศาสตร์ในระบบผลิตน้ำและน้ำประปา

2.3.5 เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาและออกแบบถังปฏิกริยาแบบอากาศยกสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปาต่อไปในอนาคต



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะของน้ำเสีย

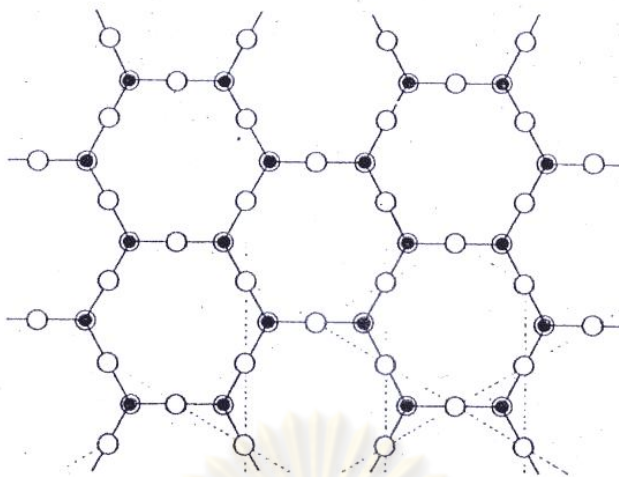
##### 2.1.1 ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียจำแนกออกเป็น 3 ลักษณะคือ

- 1) ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ จะประกอบไปด้วย ปริมาณของแข็งทั้งหมด กลิ่น อุณหภูมิ สี และความขุ่น ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของน้ำเสียทางกายภาพได้
- 2) ลักษณะน้ำเสียทางเคมี จะประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ น้ำเสียที่มาจากบ้านเรือน จะประกอบด้วย 50% ของสารอินทรีย์และ 50% ของสารอนินทรีย์
- 3) ลักษณะน้ำเสียทางชีววิทยา จะประกอบด้วยจุลินทรีย์มากมายหลายชนิดเจริญอยู่ จุลินทรีย์ที่พบในน้ำเสียทั่วไป ได้แก่ แบคทีเรีย สาหร่าย ฟังไจ โปรโตซัว โรทีเฟอร์ คัสตาเซียนและไวรัส เป็นต้น

ในงานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงลักษณะของน้ำเสียทางกายภาพ คือ ความขุ่นของน้ำผิวดินสำหรับการผลิตน้ำประปา ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องทำการบำบัดให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งและมาตรฐานการผลิตน้ำประปา ตามลำดับ และเพื่อความใกล้เคียงความเป็นจริงจะใช้ดินคาโอลินเป็นตัวสร้างความขุ่น เพราะดินคาโอลินมีส่วนผสมของแร่ดินคาโอลิไนท์และสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของความขุ่นในน้ำผิวดินที่นำมาผลิตน้ำประปา ซึ่งพบมากในแหล่งน้ำของประเทศ ไทย โดยความรู้เกี่ยวกับความขุ่นที่กล่าวมาจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

##### 2.1.2 องค์ประกอบและลักษณะของน้ำขุ่น

2.1.2.1 ความขุ่นที่พบทั่วไปในน้ำผิวดิน มักเกิดจากการมีสารแขวนลอยอันได้แก่อนุภาคดินเหนียวอยู่ในน้ำ อนุภาคดินเหนียวเหล่านี้มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นโมเลกุลประเภทหนึ่งของ sheet silicates ซึ่งประกอบด้วยกรรมรวมตัวในหลายรูปแบบของ silicon tetrahedral sheet กับ aluminium hydroxide sheet และ magnesium hydroxide sheet โมเลกุลซึ่งเป็นองค์ประกอบของอนุภาคดินเหนียว มีลักษณะโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2

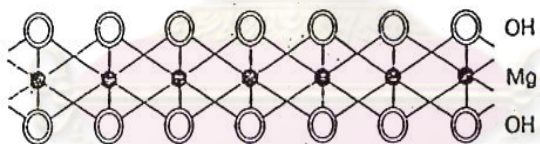


รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ silicon tetrahedral sheet วงกลมสีดำ คืออะตอม

ซิลิกอนและวงกลมสีขาว คืออะตอมออกซิเจน (Patrick, 1986)



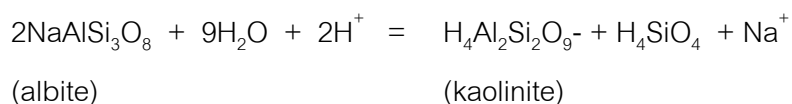
Diagrammatic representation of an aluminium hydroxide sheet-dioctahedral structure



Diagrammatic representation of a magnesium hydroxide sheet-dioctahedral structure

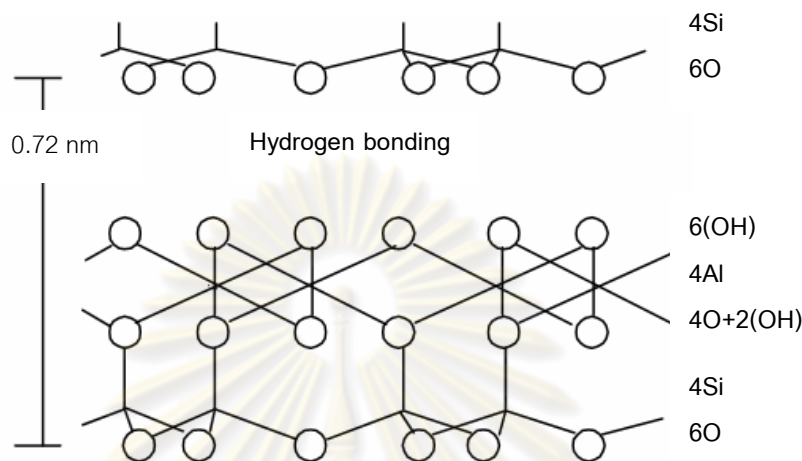
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ aluminium hydroxide sheet และ magnesium hydroxide sheet (Patrick, 1986)

ดินคาโอลินเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย silicon tetrahedral sheet และ aluminium hydroxide sheet ดินคาโอลินมีกำเนิดมาจากกลไกการพอง (Weathering) ของ albite ในสภาพที่เป็นกรด ทำให้ได้ผลึกของดินคาโอลินจากสารละลาย ดังสมการ



นอกจากนั้น ดินคาโอลินยังสามารถเกิดได้จาก กลไกการแยกตัวบางส่วน (Partial disintegration) ในสภาพกรดของดินเหนียวที่มีสัดส่วน ซิลิกา ต่ออลูมินา เท่ากับ 2 : 1 เช่น montmorillonite กลไกนี้เป็นกลไกการผูกพันอีกแบบหนึ่งที่ silicon tetrahedral sheet แยกตัวออก ทำให้โครงสร้างสัดส่วน ซิลิกา ต่อ อลูมินา เป็น 1 : 1 ซึ่งคือโมเลกุลของดินคาโอลินดังแสดงในรูปที่

2.3



รูปที่ 2.3 ก โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลิน (Patrick, 1986)



รูปที่ 2.3 ข โมเดลโครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลิน (Foth, 1990)

เชื่อมระหว่างโมเลกุล แต่ละชุดของดินคาโอลินเป็นแรงเชื่อมของไฮโดรเจนบอนด์ ไฮโดรเจนบอนด์นี้เป็นแรงดึงดูดระหว่างออกซิเจนอะตอมของโมเลกุลหนึ่งและจากสมบัตินี้เองทำให้ดินคาโอลินเป็นดินเหนียวประเภทไม่พองน้ำ (Nonexpanding clay) โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลินสามารถประกอบกันเป็นโครงสร้างผลึกหรืออนุภาคแบบ pseudo-hexagonal crystal ได้ มีขนาดตั้งแต่ 0.2-2 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.4



จากโครงสร้างของอนุภาคดินคาโอลินที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าดินคาโอลินมีสมบัติพิเศษคือพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กและมีรูปร่างเป็นแผ่นยาว (Sheet) นอกจากนี้ซิลิเกตไอออนซึ่งมีประจุบวก 4 ใน tetrahedral sheet ยังสามารถถูกแทนที่โดยอลูมิเนียมไอออนซึ่งมีประจุบวก 3 ได้ (Isomorphous replacement) การแทนที่ของไอออนนี้จะเกิดขึ้นเป็นบางจุดมากกว่าจะเกิดการแทนที่แบบกระจายสม่ำเสมอ ลักษณะเช่นนี้ทำให้ดินคาโอลินมีความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าและมักมีประจุเป็นลบ

อนุภาคดินคาโอลินซึ่งมีประจุลบเหมือนกันที่เคลื่อนเข้ามาใกล้กันจะเกิดแรงผลักรังกันและกัน ดังนั้นปัจจัยหลักที่ทำให้อนุภาคดินคาโอลินสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพคือแรงผลักระหว่างไอออนลบของอนุภาค นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลดินคาโอลินบางส่วนจะมีโมเลกุลน้ำเกาะอยู่และโมเลกุลน้ำนี้เองจะเป็นสิ่งขวางกั้นไม่ให้อนุภาคเข้ามาสัมผัสกันโดยตรงซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้อนุภาคสามารถแขวนลอยได้อย่างมีเสถียรภาพอีกด้วย



รูปที่ 2.4 รูปถ่ายอนุภาคดินคาโอลิน (Patrick, 1986)

## 2.2 การบำบัดน้ำและน้ำเสียในรูปของความขุ่น

กระบวนการบำบัดน้ำที่มีความขุ่นมีหลายวิธี ได้แก่

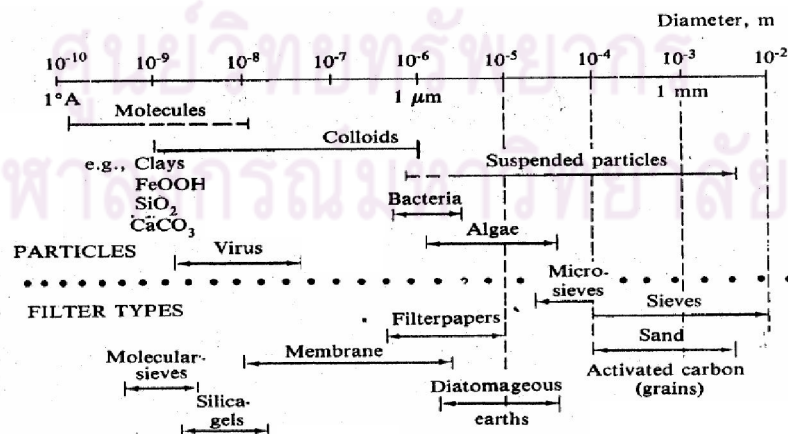
- การสร้างและรวมตะกอน
- การดูดติดผิว
- การแลกเปลี่ยนประจุ
- ระบบบำบัดทางชีวภาพ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้เลือกกระบวนการสร้างและรวมตะกอน และกระบวนการตกตะกอน เพื่อบำบัดน้ำที่มีความขุ่น เนื่องจากเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในระบบผลิตน้ำประปากันอย่างแพร่หลาย

### 2.2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (กระบวนการสร้างและรวมตะกอน)

#### 2.2.1.1 อนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์ โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง  $10^{-6}$  จนถึง  $10^{-3}$  มม. (รูปที่ 2.5) เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจำตัว โดยพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือ สารจำพวกสารลดแรงตึงผิว ส่วนพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักจะมีประจุเป็นลบ เช่น อนุภาคของดินเหนียว และเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุ ทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดแรงผลักดันระหว่างอนุภาค ส่งผลทำให้อนุภาคเหล่านั้นมีความเสถียรภาพสูง ดังนั้นการทำให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกันและจับกันเป็นกลุ่มก้อนจะมีขั้นตอน 2 ขั้นตอนคือ การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ (Destabilization) และการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่หมดเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสและเกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อน (Flocculation)



รูปที่ 2.5 การจำแนกขนาดของสารต่างๆ ในน้ำ (มันสิน ตันฑุลวศน์, 2542)

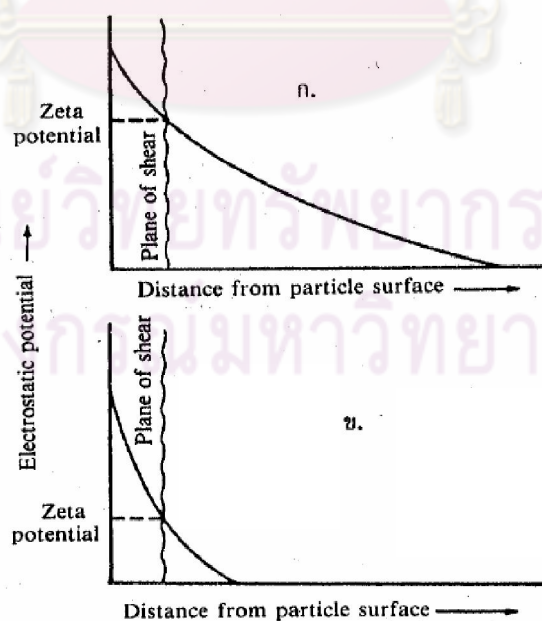
2.2.1.2 การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ (Destabilization) โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

- โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer)
- โดยการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption/Charge Neutralization)
- โดยใช้ผลึกสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (ห่อหุ้มอนุภาค)
- โดยใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer Bridging)

ก) กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย

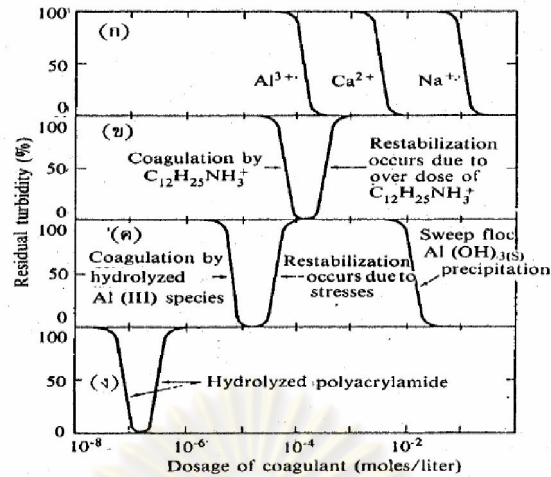
โดยการเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ในชั้นกระจายให้มากขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิววนอกสุดของน้ำลดตามไปด้วย (รูปที่ 2.6) การทำลายความเสถียรโดยการลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆ มีข้อที่น่าสนใจดังนี้

- 1) ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีไอออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยวิธีการ ลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์
- 2) ไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวก (Charge Reversal) (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.6 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติมไอออน (ข)

หลังจากการเติมไอออนแล้ว (มันลีน ตัณจุลเวศน์, 2542)



รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆจะเห็นว่าแบบ (ก) ซึ่งเป็นการลดความหนาของชั้นกระจายด้วย  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$  และ  $Na^{+}$  ต้องการสารเคมีมากที่สุด ส่วนแบบ (ง) ซึ่งเป็นการใช้โพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมโยง (สะพาน) ให้อนุภาค คอลลอยด์มารวมตัวกัน มีความต้องการสารโคแอกกูแลนต์ที่น้อยที่สุด (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

#### ข) กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

สารเคมีบางหมู่สามารถดูดติด (Adsorb) บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับของคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในทางลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์กลไกแบบดูดติดผิวนี้นี้แตกต่างจากกลไกแบบแรก (ซึ่งอิออนต่างประจุหรือ Counter Ion อยู่ในชั้นกระจายโดยไม่ดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์) 3 ประการ ดังนี้

1) กลไกแบบดูดติดผิวต้องการอิออนต่างชนิดน้อยกว่ากลไกแบบแรก เนื่องจากอิออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่า อิออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้

2) การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิวเป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) กล่าวคือ ปริมาณของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดของปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ (ที่ถูกควรเป็นพื้นที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์) แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric)

3) ประการสุดท้าย กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (Charge Reversal) ทั้งนี้โดยการใช้โคแอกกูแลนต์มากเกินไป ซึ่งข้อที่ควรสังเกตเกี่ยวกับ Charge Reversal ของกลไกแบบดูดติดผิวคือ การที่อิออนต่าง

ประจุสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์จนประจุเปลี่ยนเป็นตรงกันข้าม ย่อมแสดงว่ามีปฏิกิริยาเคมีระหว่างอิออนต่างประจุกับอนุภาคจนสามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกันได้

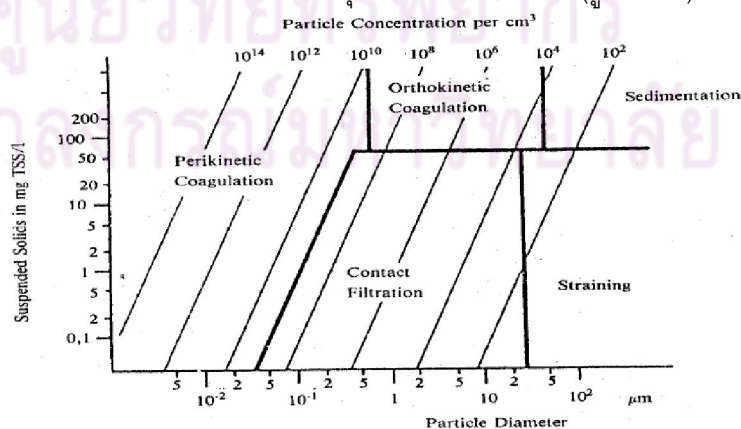
ค) กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์เข้ามาเกาะจับ (Sweep Coagulation) เช่น การใส่สารส้มให้เกิดผลึก  $Al(OH)_3$  เหมือนวุ้นสีขาวเพื่อให้อนุภาคมาเกาะแล้วรวมกันเป็น ฟล็อกได้ กลไกการใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรกคือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดโคแอกกูแลชั่น ได้ดีในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลนต์ที่น้อยกว่า เหตุผลคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย แม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม กระบวนการโคแอกกูแลชั่นอาจไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควร การใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆ สำหรับเป็นสารเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูง โอกาสสัมผัสย่อมมีมาก จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่ากับกรณีแรก

ง) กลไกการใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม

โดยใช้สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไต่ลงไปในน้ำเพื่อจะให้อิออนจำนวนมากเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์และยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่นๆเพื่อทำให้เกิดฟล็อก

2.2.1.3 การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ทั้งหมดเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสและเกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อน

ซึ่งวิธีการสร้างสัมผัสให้กับอนุภาคมีหลายวิธีดังนี้ (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 เกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคต่างๆ ทั้ง 5 ประเภท (มันส์ตัน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

ก) ทำให้อนุภาค คอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสดังเกิดขึ้น คือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกันเป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วฟล็อกที่เกิดขึ้นอาจแตกหรือหลุดออกจากกันได้ วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสดังหรือสร้างฟล็อกคูลูเลชัน เรียกว่า ถังกวนช้า และวิธีการสร้างสัมผัสดังนี้มีชื่อเทคนิคว่า Orthokinetic Flocculation อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล็อกคูลูเลชันแบบนี้ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 – 1 ไมครอนและมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.

ข) การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสัมผัสแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเรียกว่า Perikinetic Flocculation

ค) การสัมผัสระหว่างอนุภาคที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอนที่มีอัตราไม่เท่ากัน เนื่องจากอนุภาคต่างๆ เกิดฟล็อกคูลูเลชันและเกิดขึ้นพร้อมๆ กับการตกตะกอนทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย อนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกคูลูเลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดังกล่าวอาจเกิดฟล็อกคูลูเลชันมาก่อนแล้วครั้งหนึ่ง เมื่อมาถึงการตกตะกอนจึงเกิดฟล็อกคูลูเลชันอีก ในขณะที่มีการตกตะกอน

ง) ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟล็อกคูลูเลชันอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสดังแบบ Orthokinetic Flocculation แต่อาจเกิดขึ้นช้าเนื่องจากโอกาสสัมผัสน้อย วิธีแก้ไขอาจกระทำดังนี้

- ใช้ถังกรองทรายแบบกรองเร็วหรือถังกรองแบบ 2 ชั้น ชั้นกรองช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสให้และยังบังคับให้อนุภาคต่างๆเคลื่อนที่เข้ามาชิดกันด้วย การใช้ถังกรองช่วยสร้างฟล็อกคูลูเลชันเช่นนี้เรียกว่ากรองสัมผัส (Contact Filtration) แต่เนื่องจากช่องว่างในชั้นกรองมีจำกัด วิธีนี้จึงใช้ได้กับอนุภาคที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร การใช้กรวดขนาดเล็กแทนทรายอาจเพิ่มปริมาตรช่องว่างได้แต่เป็นการลดพื้นที่สัมผัส ดังนั้นจึงอาจได้ผลในทาง ฟล็อกคูลูเลชันไม่ดีเท่าชั้นทราย

- ให้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคใหม่ ในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ ทำให้ฟล็อกจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (Sludge Blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ผ่านชั้นสลัดจ์ อีกวิธีหนึ่งคือ นำเอาฟล็อกกลับคืนมาผสมกับอนุภาค

คอลลอยด์จากนั้นจึงสร้างสัมผัสดำแบบ Orthokinetic Flocculation ไปตามปกติ การใช้ถึง ตกตะกอนแบบ Solids Contact Clarifier ก็ใช้หลักนี้

จ) ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอน แต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสดำอาจใช้วิธีการกรองได้เช่นกัน แต่สารกรองที่ใช้ควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย

#### 2.2.1.4 โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก

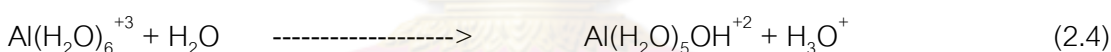
ก) เคมีของสารส้มและสารประกอบเหล็กในน้ำ

เมื่อสารส้ม เฟอร์คลอไรด์และเฟิร์สซัลเฟต ละลายน้ำจะมีการแตกตัวของอิออนบวก และลบเกิดขึ้นดังนี้

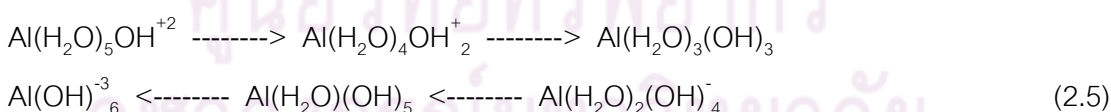


สมการที่ 2.1 ถึง 2.3 อาจทำให้เข้าใจผิดถึงสถานะของอิออนบวกซึ่งเป็นของโลหะ อะลูมิเนียมและเหล็ก ทั้งนี้เพราะอิออนของโลหะทุกชนิดจะอยู่รวมกับน้ำและไม่สามารถดำรงอยู่ในรูปอิสระได้

เนื่องจาก  $\text{Al}^{+3}$  และ  $\text{Fe}^{+3}$  มีอำนาจเป็นกรดซึ่งสามารถให้  $\text{H}^+$  จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ ให้เป็น อิออนต่างๆของอะลูมิเนียมและเหล็ก ซึ่งมี  $\text{OH}^-$  เป็น Ligand



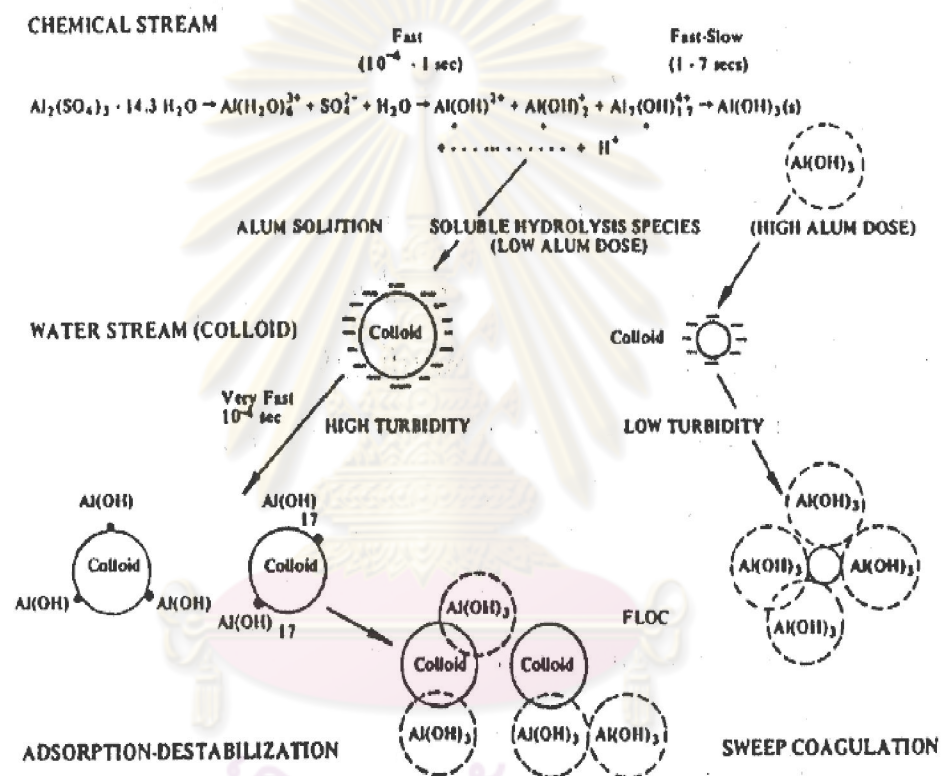
สมการที่ 2.4 นี้ เป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขั้นแรกสุด ซึ่งนำ 1 โมเลกุลของ  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$  ถูกแทนที่ด้วย หมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) 1 หมู่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นได้ต่อไปอีก ทำให้โมเลกุลของน้ำ ถูกแทนที่เพิ่มขึ้น ประจุบวกจะลดลงเรื่อยๆจนหมดและกลายเป็นประจุลบ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีลำดับดังนี้



ข) กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก

สารส้มหรือสารประกอบเหล็ก สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จนเกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยกลไกหลัก 2 ประการ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของโคแอกกูแลนท์และพีเอชของน้ำ กลไกดังกล่าวคือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุและกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก หรือ Sweep Coagulation อนึ่ง ในการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มหรือเหล็กของน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่มักมีกลไกแบบ Sweep Coagulation เป็นกลไกหลัก โดยอาจมีกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเป็นกลไกร่วมซึ่งมีบทบาทน้อยกว่า

ลำดับของปฏิกิริยาไฮโดไลซิสในสมการที่ 2.5 มีความสำคัญในการกำหนดกลไกของโคแอกกูเลชันเป็นอันมาก อีออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกทั้งหลายเกิดขึ้นได้ภายในเวลา  $10^{-4}$  - 1 วินาที ส่วนผลึก  $Al(OH)_3$  เกิดขึ้นภายในเวลา 1-7 วินาที ดังนั้นถ้าสามารถให้อีออนคอมเพล็กซ์ดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ภายในเวลา  $10^{-4}$ -1 วินาที ทำให้ไม่มี  $Al(OH)_3$  เกิดขึ้นกลไกก็จะเป็นแบบดูดติดผิว/ทำลายประจุ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าการดูดติดผิวไม่เกิดขึ้นภายในเวลา 1 วินาที ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็จะดำเนินต่อไปจนกระทั่ง Hydroxo Complexes กลายเป็น  $Al(OH)_3$  กลไกก็จะเป็นแบบ Sweep Coagulation รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงกลไกทั้งสองชนิดที่สารส้มใช้ในการสร้างโคแอกกูเลชัน



รูปที่ 2.9 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มทั้ง 2 ประเภท (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2542)

- กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวก ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งมักมีประจุเป็นลบให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้อนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอน ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีช่วงความเหมาะสมที่แคบ ซึ่งจะควบคุมการทำงานให้ดีขึ้นยาก เพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณต่ำเกินไป โคแอกกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้าสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะ



ดูดติดผิวอนุภาคมากทำให้อนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุบวกและเกิดเสถียรภาพขึ้นอีกแต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

- กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation) ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มเกินพอจนปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนได้  $Al(OH)_3$  ดังสมการที่ (4) การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารส้มเป็นจำนวนมากพอ จนมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว ซึ่งทำให้ผลึกของ  $Al(OH)_3$  ซึ่งมีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคและทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียว ไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า จึงทำหน้าที่สร้างเป้าสัมผัสอนุภาคคอลลอยด์จนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง

#### 2.2.1.5 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

##### ก) การควบคุมด้วยวิธีจาร์เทสต์

จาร์เทสต์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม และใช้อย่างกว้างขวาง จาร์เทสต์เป็นวิธีทดสอบอย่างง่าย ๆ โดยทำการทดลองในบีกเกอร์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับความเร็วรอบได้ ส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารโคแอกกูแลนต์และกำหนดหนดสภาวะต่างๆ ได้แก่ ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง ความเร็วรอบ ระยะเวลาการกวนน้ำและระยะเวลาในการตกตะกอนไว้ค่าหนึ่งจึงทำการทดลองโดยแปรเปลี่ยนปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ ส่วนระดับพีเอชอาจแปรเปลี่ยนหรือคงที่ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์จากนั้นก็จะได้ค่าประมาณ ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ และ ระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดโคแอกกูเลชัน ในการทดลองควรทำหลายๆ ครั้งเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

วิธีการทำจาร์เทสต์ (มันสิน ตันจุลเวศน์, 2542)

- 1) วิเคราะห์น้ำตัวอย่างเพื่อหาสี ความขุ่น พีเอช และความเป็นด่าง
- 2) เติมน้ำตัวอย่าง 800 มิลลิลิตร ลงในแก้วบีกเกอร์แต่ละใบและเติมสารเคมีเป็นโคแอกกูแลนต์ลงไปในแก้ว ตามปริมาณที่ต้องการใช้
- 3) กวนสารเคมีที่อัตราความเร็ว 100 รอบต่อนาที นาน 1 นาที
- 4) เปลี่ยนมากวนช้า 30 รอบต่อนาที นาน 30 นาที แล้วตั้งทิ้งให้ตกตะกอนนาน 30 นาที
- 5) ดูดน้ำส่วนใสไปทำการวิเคราะห์ ความขุ่นและพีเอช

##### ข) พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ความเร็วเกรเดียนท์ (G) หมายถึง ความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการ โคแอกกูเลชัน โดยเฉพาะกลไกการดูดติดผิว และทำลายประจุความปั่นป่วนของน้ำในถังกวนเร็วจะต้องมีระดับสูง กล่าวคือ ไม่น้อยกว่า  $300 \text{ วินาที}^{-1}$  เพื่อให้การกระจายของสารส้มเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และ สม่ำเสมอ แต่ในถังกวนช้าจะมีความปั่นป่วนต่ำมีค่าไม่เกิน

60-100 วินาที<sup>-1</sup> เพื่อให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วสัมผัสกันและจับตัวเป็นก้อนใหญ่ พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วนสามารถคำนวณได้จากสมการของแคมท์ และ สไตน์ดังนี้

$$G = \left( \frac{P}{uV} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

เมื่อ

- G = ความเร็วแกรเดียนท์ (วินาที<sup>-1</sup>)
- P = พลังงานที่ใช้ (นิวตัน-เมตร/วินาที)
- u = ความหนืดของน้ำ (นิวตัน-วินาที/(เมตร<sup>2</sup>))
- V = ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว (เมตร<sup>3</sup>)

กรณีที่มีการกวนผสมเกิดจากอากาศหรือก๊าซออกซิเจน (Pneumatic mixing) ในถังกวนผสมหรือ ถังเติมอากาศในระบบ Activated-sludge เป็นความปั่นป่วนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ขึ้นของฟองอากาศในของเหลว โดยค่าความเร็วแกรเดียนท์ของฟองอากาศ 5 ไมโครเมตร จะอยู่ในช่วง  $G_{avg} < 200$  วินาที<sup>-1</sup> ถึง  $G_{max} = 8,200$  วินาที<sup>-1</sup> การทำให้เกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชันและโคแอกกูเลชัน โดยการใช้ฟองอากาศสามารถทำการคำนวณระดับของพลังงาน ที่ใช้ในการปั่นกวนด้วยสูตร (Metcalf และ Eddy, 2004)

$$P = C_1 Q_G \log \left( \frac{h + C_2}{C_2} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ

- P = พลังงานที่ใช้ นิวตัน (ม./วินาที)
- C<sub>1</sub> = ค่าคงที่เท่ากับ 3904
- C<sub>2</sub> = ค่าคงที่เท่ากับ 10.4
- h = ระดับความลึกหัวเติมอากาศ (ม.)
- Q<sub>G</sub> = อัตราการไหลอากาศ (ม.<sup>3</sup>/นาที)

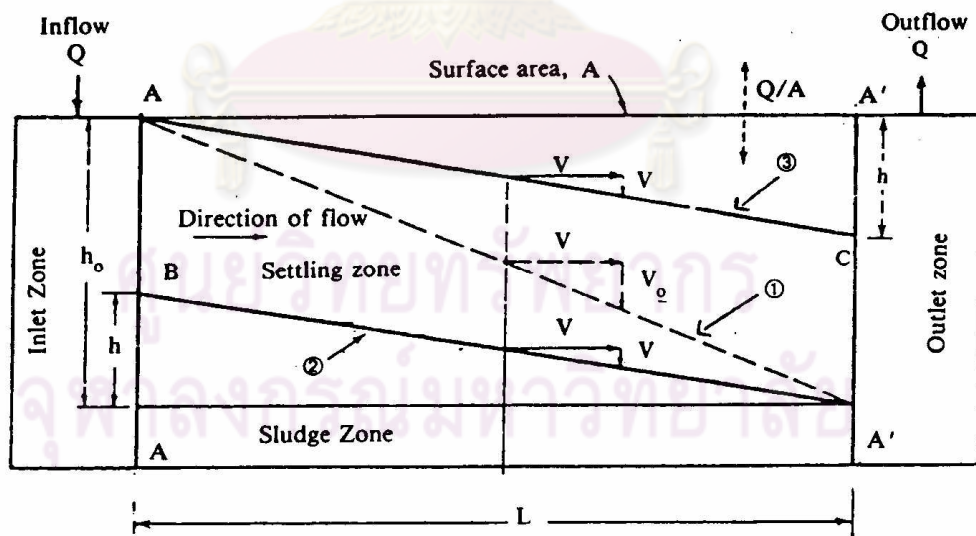
## 2.2.2 กระบวนการตกตะกอน

การตกตะกอนเป็นการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้ได้น้ำใสและตะกอนสลัดจ์ การตกตะกอนแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ตามความเข้มข้นและลักษณะของอนุภาค ดังนี้

- การตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling)
- การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculation settling)
- การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (Zone of settling หรือ Hinder settling)
- การตกตะกอนแบบอัดตัว (Compression settling)

### 2.2.2.1 การตกตะกอนแบบโดด

รูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงถึงตกตะกอนแบบอุดมคติ ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ บริเวณทางน้ำเข้า บริเวณที่ใช้ตกตะกอน และบริเวณทางน้ำออก กรณีของถึงแบบอุดมคตินี้ถือว่าแต่ละอนุภาคของน้ำเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณตกตะกอนในลักษณะที่เป็นระนาบแนวตั้ง โดยมีความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยขนาดต่างๆคงที่ตลอดทั้งระนาบ อนุภาคน้ำเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และสม่ำเสมอด้วยอัตราเร็วเท่ากับ  $v$  และไปถึงระนาบ A'-A' โดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง ความเร็ว  $v$  นี้เท่ากับอัตราการไหลของน้ำ ( $Q$ ) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งของถึง หรือ  $h_0W$  โดยที่  $h_0$  และ  $W$  เป็นความลึกและความกว้างของถึง ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 การตกตะกอนแบบโดดในถึงตกตะกอนแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (มันลิน ตันทูลเวสตัน,

สมมติว่าอนุภาคทั้งหมดตกตะกอนอย่างอิสระ และอนุภาคที่ตกถึงก้นถังถือว่าถูกกำจัดออกไป ระบายเอียงในแนว 1 แสดงถึงวิถีทางเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่สามารถถูกกำจัดออกไปทั้งหมด อนุภาคเล็กที่สุดตามหลักเกณฑ์นี้มีความเร็วของการตกตะกอนเท่ากับ  $V_0$  ตามความหมายดังกล่าว อนุภาคใดๆที่มีความเร็วของการตกตะกอนเท่ากับ  $V_0$  หรือสูงกว่า จะถูกกำจัดออกด้วยถังตกตะกอนแบบอุดมคติ

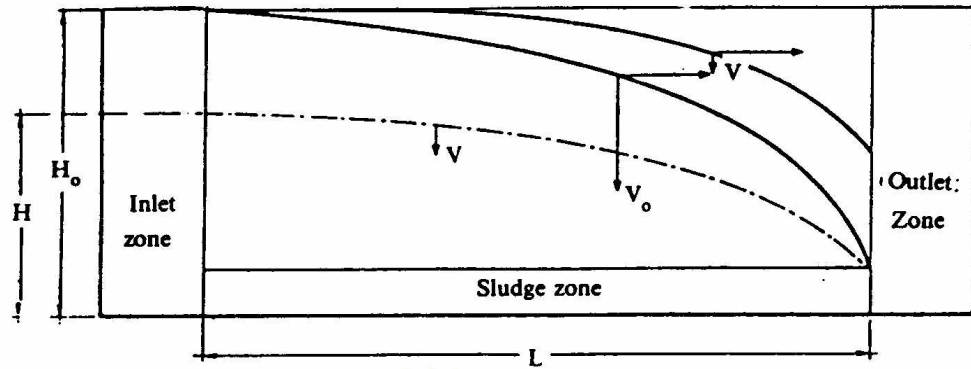
อนุภาคที่มีความเร็วในการตกตะกอนเท่ากับ  $V$  ซึ่งน้อยกว่า  $V_0$  จะมีวิถีของการตกตะกอนอยู่ในระนาบ 2 หรือ 3 จะเห็นได้ว่าอนุภาคเช่นนี้อาจถูกกำจัดออกจากถังตกตะกอนได้ถ้าเข้าสู่ถังตกตะกอน ณ จุดที่อยู่ต่ำกว่าจุด B (ดูภาพที่ 2.10) มิฉะนั้นแล้วจะไม่ถูกกำจัด จากการวิเคราะห์ปรากฏว่าอนุภาคที่มีอัตราการตกตะกอนเท่ากับ  $V$  (น้อยกว่า  $V_0$ ) แต่สามารถถูกกำจัดได้ มีปริมาณเท่ากับ  $h/h_0$  หรือ  $V/V_0$  โดยที่  $h$  เท่ากับความลึกจากก้นถังจนถึงจุด B ส่วน  $h_0$  เท่ากับความลึกทั้งหมดของระดับน้ำ

ถ้าให้	$t =$	เวลาที่ใช้ในการตกตะกอน	
จะได้	$t =$	$L/v$ หรือ $h_0/V_0$	
ดังนั้น	$V_0 =$	$h_0/t = h_0v/L$	
แต่เพราะว่า	$v =$	$Q/h_0W$	
เพราะฉะนั้น	$V_0 =$	$h_0Q/Lh_0W = Q/WL$	
เนื่องจาก	$WL =$	พื้นที่ผิวน้ำของถัง = $A$	
ดังนั้น	$V_0 =$	$Q/A$	(2.8)

เทอม  $Q/A$  นี้มีบทบาทสำคัญมากในการออกแบบและควบคุมถังตกตะกอน และมีชื่อเรียกได้หลายอย่างเช่น Surface Loading Rate, Surface Overflow Rate ซึ่งในที่นี้จะขอแปลเป็นไทยว่า “อัตราน้ำล้นผิว”

#### 2.2.2.2 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม

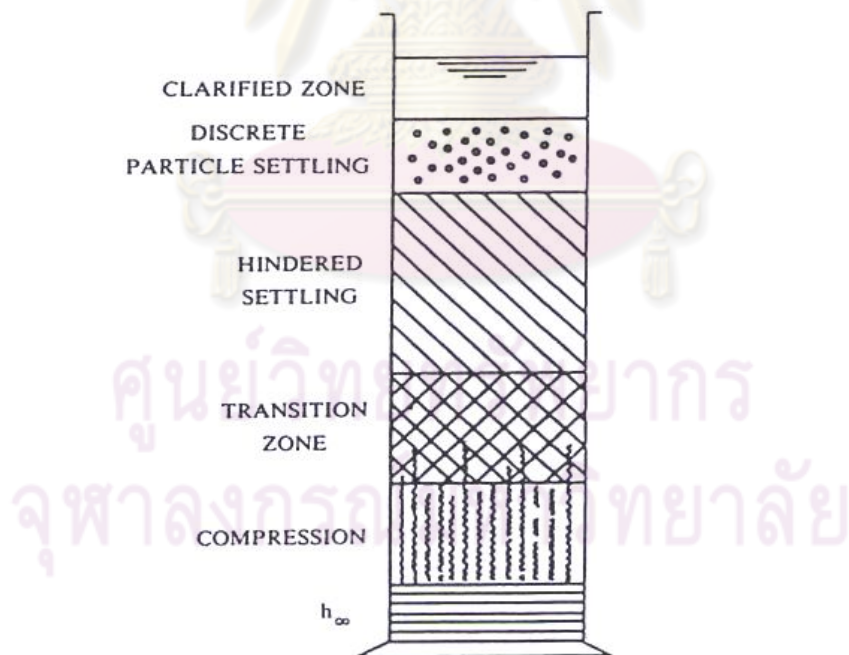
ในกรณีที่การตกตะกอนของอนุภาคต่างๆมีโอกาสรวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้น ความเร็วในการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นทำให้วิถีของการตกตะกอนเป็นเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2.11 การตกตะกอนของสารส้มหรือตกตะกอนที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันจัดว่าเป็นการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม อนึ่งแม้ว่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนแบบโคแอกกูเลชันจะขึ้นอยู่กับอัตราน้ำล้นผิวเพียงอย่างเดียวแต่ประสิทธิภาพในการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มจะขึ้นอยู่กับอัตราน้ำล้นผิวและเวลากักน้ำ



รูปที่ 2.11 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (มันลีน ดัณฑุลเวศน์, 2542)

### 2.2.2.3 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้นหรือแบบมีอุปสรรค

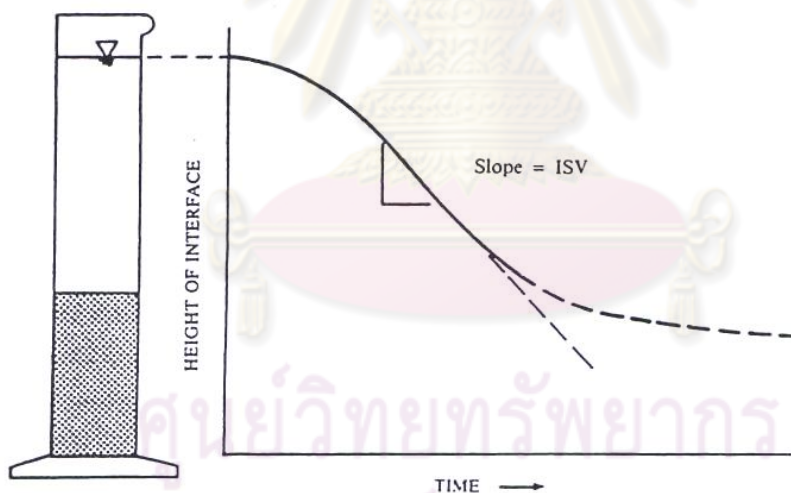
การตกตะกอนแบบแบ่งชั้นเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคต่างๆ จับตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่จนเสมือนเป็นวัตถุก้อนเดียวที่ตกตะกอนด้วยอัตราเดียวกัน เมื่อมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นจะเห็นการแยกตัวระหว่างชั้นสลัดจ์และน้ำอย่างเด่นชัดเจน (รูปที่ 2.12) การตกตะกอนเช่นนี้เกิดขึ้นได้เฉพาะกับน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยเข้มข้นสูงมากเช่นประมาณ 500 มก./ล. หรือมากกว่า



รูปที่ 2.12 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (มันลีน ดัณฑุลเวศน์, 2542)

เมื่อปล่อยให้มีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นในกระบอกตรงหรือกระบอกใสและวัดระดับของชั้นสลัดจ์ที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อนำความสูงของชั้นสลัดจ์มาพล็อตเทียบกับเวลา จะได้กราฟที่มี

ลักษณะดังแสดงในรูป 2.13 ชั้นสลัดจ์จะตกตะกอนด้วยอัตราคงที่และสูงสุดในระยะแรก จากนั้นจะตกตะกอนช้าลงเรื่อยๆ ในที่สุดเกือบไม่มีการตกตะกอนเกิดขึ้นเลย การเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วในการตกตะกอนจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นสลัดจ์ที่เกิดขึ้น ระยะแรกอนุภาคต่างแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างหลวม ดังนั้นถึงแม้ว่าการตกตะกอนจะเป็นแบบมีอุปสรรค (Hindered Settling) แต่ก็ยังมีช่องว่างในการตกตะกอนได้อีกบ้าง การตกตะกอนในช่วงแรกจะมีค่าคงที่และเรียกว่า Initial Settling Velocity หรือ ISV (อัตราเร็วในการตกตะกอนเริ่มต้น) สำหรับการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นนี้ อัตราเร็วเริ่มต้นซึ่งคงที่นี้มีความหมายมากและใช้เป็นดัชนีที่บอกรถึงความสามารถในการตกตะกอนของสลัดจ์ สลัดจ์ที่ตกตะกอนได้ดีย่อมมี ISV สูง และสลัดจ์ที่ตกตะกอนได้เลวจะมี ISV ต่ำ เมื่อการตกตะกอนผ่านไปช่องว่างในน้ำจะเหลือน้อยลงเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดหนึ่งอัตราเร็วเริ่มต้นจะมีค่าลดลง กล่าวได้ว่าสลัดจ์เริ่มเข้าไปอยู่ในระยะเปลี่ยนแปลง (Transition Zone) ซึ่งเป็นระยะที่อนุภาคบางส่วนเคลื่อนที่เข้ามาใกล้จนสัมผัสกันพอดี อัตราการตกตะกอนจะลดลงเรื่อยๆ กระทั่งอนุภาคทั้งหมดสัมผัสกันพอดี ต่อจากนี้สลัดจ์จะอยู่ในระยะอัดตัว (Compression Zone) ซึ่งมีการทับถมเพื่อบีบน้ำออกจากชั้นสลัดจ์เป็นครั้งสุดท้าย ระยะอัดตัวนี้มีการเคลื่อนที่ช้ามาก



รูปที่ 2.13 วิถีการกราฟของการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (มันลิน ตันทูลเวศน์, 2542)

จากกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน และกระบวนการตกตะกอน ในปัจจุบันกระบวนการดังกล่าวจะใช้อุปกรณ์กวนเร็วและกวนช้า คือ ใบพัด และยังต้องมีถังตกตะกอนอีกหนึ่งถัง จึงทำให้เป็นกระบวนการที่มีการทำงานหลายขั้นตอน ใช้เวลามาก ใช้พื้นที่ในการบำบัดมาก ซึ่งเป็นต้นเหตุของราคาที่สูง ดังนั้นจึงควรพิจารณาระบบการบำบัด ที่สามารถรวมกระบวนการบำบัดต่างๆ ได้ภายในขั้นตอนเดียว เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด ลด

ระยะเวลา ลดพื้นที่ที่ใช้ในการบำบัด โดยผู้จัดทำงานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะใช้ระบบถังปฏิริยาแบบอากาศยก (Air-lift Reactor, ALR) มาใช้ในการศึกษาและพัฒนาสำหรับกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเพื่อบำบัดน้ำที่มีความขุ่น เพราะเป็นระบบที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนถังปฏิริยาระหว่างก๊าซและของเหลว เช่น ระบบถังกวนโดยใช้ใบพัด เนื่องจากถังปฏิริยาแบบอากาศยก เป็นระบบที่สามารถออกแบบและบำรุงรักษาได้ง่าย มีลักษณะการไหลวนภายในที่ก่อให้เกิดการผสมผสานที่ดีจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ขึ้นตอนการกวนผสมแทนการใช้ใบพัด รวมไปถึงกระบวนการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนและการตกตะกอนอีกด้วย

## 2.3 ถังปฏิริยาแบบอากาศยก (Air-Lift Reactor, ALR)

### 2.3.1 ถังปฏิริยาแบบอากาศยก

ถังปฏิริยาแบบอากาศยกเป็นรูปแบบหนึ่งของถังปฏิริยาระหว่างก๊าซและของเหลว โครงสร้างของถังปฏิริยาแบบอากาศยกคล้ายถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column reactor, BCR) ในข้อที่ว่าไม่มีเครื่องมือกลใดๆภายในถัง โดยในงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา ถังปฏิริยาแบบฟองอากาศเป็นถังปฏิริยาที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมทางด้านชีวเคมีใช้ในการเพาะเลี้ยงเซลล์พืช เซลล์สัตว์ และจุลินทรีย์ แต่พบว่าอัตราการรอดของเซลล์มีค่าต่ำ ยังไม่เป็นที่น่าพอใจและโดยเฉพาะในกรณีของ เซลล์สัตว์และเซลล์พืชที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีความไวต่อแรงเฉือน ทำให้เกิดการแตกหัก เซลล์ได้รับความเสียหายนำไปสู่การเสียชีวิตในภายหลัง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพของถังปฏิริยาแบบฟองอากาศขึ้น เพื่อให้มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับกระบวนการที่จะนำไปใช้และหนึ่งในความสำเร็จของการปรับปรุงประสิทธิภาพของถังปฏิริยาฟองอากาศคือถังปฏิริยาแบบอากาศยก ซึ่งมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิริยาฟองอากาศ คือมีการไหลเวียนของของเหลวดี ทำให้เกิดการผสมที่ดีกว่าและมีแรงเฉือน ต่ำกว่าในถังปฏิริยาฟองอากาศ ทำให้อัตราการรอดของเซลล์มากขึ้น นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนง่ายต่อการออกแบบ และง่ายต่อการขยายขนาดเพื่อใช้ในทางอุตสาหกรรม

ถังปฏิริยาแบบอากาศยก มีการดัดแปลงภายในโดยจะมีท่อภายใน (draft tube) อยู่ภายในของคอลัมน์ การเคลื่อนที่หมุนเวียนของของเหลวเป็นผลมาจากการอัดอากาศผ่านท่อภายใน จึงเป็นผลทำให้มีการไหลเวียนของของเหลวในถังปฏิริยาเพียงพอสำหรับการผสมของของเหลวโดยไม่ต้องใช้เครื่องกวนสำหรับผสมของเหลว ดังนั้นถังปฏิริยาแบบอากาศยกจึงเหมาะสำหรับกระบวนการชีววิทยา เนื่องจากไม่มีผลที่เกิดจากการเสียดสีซึ่งเกิดจากเครื่องกวนและแรงเฉือน (Shear rate) ต่ำกว่าถังปฏิริยาฟองอากาศ เนื่องจากในถังปฏิริยาฟองอากาศของเหลวมี

การเคลื่อนที่แบบไหลสวนทางกัน เป็นผลให้เพิ่มความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของเหลวและฟองแก๊ส ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพแรงเฉือน สำหรับถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกของเหลวเคลื่อนที่แบบไหลทางเดียวกัน ทำให้ลดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของเหลวและฟองแก๊สทำให้ค่าแรงเฉือนในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกต่ำลง แต่ถ้าในด้านกระบวนการทางชีวเคมี จุดเด่นของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก คือ มี แรงเฉือนต่ำกว่าถังปฏิกรณ์แบบอื่น ๆ จึงเหมาะที่จะใช้ในการเพาะเลี้ยงเซลล์พืชที่มีขนาดใหญ่กว่าจุลชีพและเซลล์สัตว์ที่ไม่มีผนังเซลล์ เนื่องจากมีความไวต่อแรงเฉือน แรงเฉือนเป็นผลเนื่องมาจากสมบัติทางกายภาพของของไหล ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่เซลล์ ดังนั้นในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ แรงเฉือนจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ควรพิจารณาคำนึงถึงในการออกแบบเพราะถ้าแรงเฉือนมีค่าต่ำก็จะสามารถลดความเสียหายของเซลล์ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดสีได้

ในงานวิจัยนี้จะนำถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมาประยุกต์ใช้งานในระบบบำบัดน้ำที่มีความขุ่นด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดในแง่ของการสร้างและรวมตะกอน และการตกตะกอน การลดระยะเวลาในการบำบัด การลดปริมาณสารเคมี และการลดพลังงานที่ใช้ในการบำบัดกับระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีที่ใช้อยู่ทั่วไป คือ ถังกวน (Stirred tank reactor, STR)

### 2.3.2 โครงสร้างของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

ภายนอกของถังปฏิกรณ์จะมีโครงสร้างคล้ายกับถังปฏิกรณ์ฟองอากาศ แต่ภายในได้มีการดัดแปลงให้มีท่อภายใน ซึ่งเมื่อป้อนอากาศให้ท่อภายใน เกิดเป็นฟองอากาศลอยขึ้นในคอลัมน์ และช่วยพาเอาของไหลให้ไหลตามขึ้นมา แล้วไหลกลับทางด้านข้าง ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีฟองอากาศไหลผ่าน ดังนั้นภายในถังปฏิกรณ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

(1) ส่วนเติมอากาศ (Riser) เป็นส่วนที่มีตัวพ่นอากาศทำหน้าที่ปล่อยฟองอากาศเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของของเหลวภายในถังปฏิกรณ์ซึ่งเป็นผลทำให้ไม่ต้องใส่กลไกจากภายนอกในการหมุนเวียนของของเหลว พร้อมทั้งจะให้ประสิทธิภาพในการดำเนินงานดีกว่าและในขณะเดียวกันนั้นการปล่อยฟองอากาศยังเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับของเหลวอีกด้วย ซึ่งจะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี

(2) ส่วนไม่เติมอากาศ (Downcomer) ส่วนนี้จะทำให้เกิดการไหลเวียนของของเหลวในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจากการที่มีท่อภายในเป็นผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนของฟองอากาศกับของเหลวได้ดีและทั่วถึง



### 2.3.3 การจำแนกชนิดของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

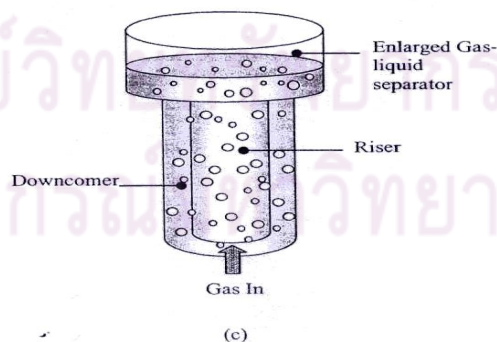
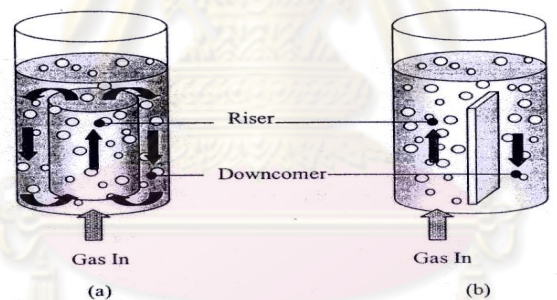
ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ ชนิดที่มีการไหลวนภายใน และชนิดที่มีการไหลวนภายนอกดังแสดงในรูปที่ 2.14

#### 2.3.3.1 ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน

ชนิดที่มีการไหลวนภายในสามารถกระทำได้คือ การติดตั้งท่อภายใน ในถังรูปทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2.14 a) หรือทำการติดตั้งแผ่นกั้นในแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 2.14 b) ซึ่งบางชนิดมีการขยายส่วนการแยกก๊าซจากของเหลวขึ้นที่บริเวณด้านบนเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงก๊าซไหลเข้าไปในส่วนที่ไม่เติมอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.14 c)

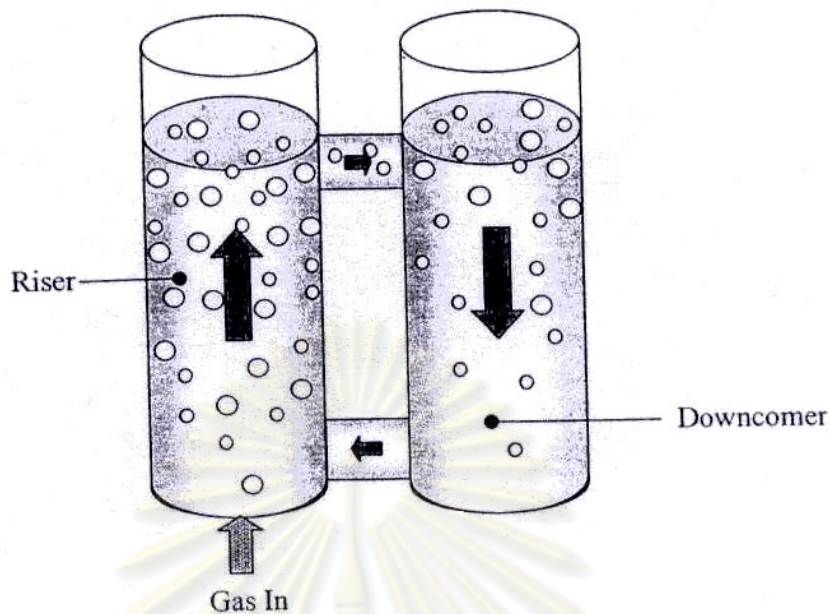
#### 2.3.3.2 ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายนอก

ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายนอกประกอบไปด้วยถังสองถังที่เชื่อมต่อกันที่บริเวณด้านบนและด้านล่างที่ซึ่งมีก๊าซน้อยหรือไม่มีก๊าซไหลวนเข้าไปในส่วนที่ไม่เติมอากาศ ขณะที่ส่วนที่ไม่เติมอากาศถูกแยกทางกายภาพออกจากส่วนที่เติมอากาศ ในกรณีนี้อาจจะกำหนดถึงการประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน เช่นส่วนที่เติมอากาศอาจถูกใช้ในส่วนของไนตริไฟเคชันในขณะที่ส่วนที่ไม่เติมอากาศจะถูกใช้งานในส่วนของดีไนตริไฟเคชัน รูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงแบบของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายนอก



รูปที่ 2.14 ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน a) ท่อภายในในถังปฏิกริยารูปทรงกระบอกที่ซึ่งอากาศถูกพ่นในส่วนของท่อภายใน b) แผ่นกั้นที่ตั้งในแนวตั้งของถังปฏิกริยา c)

ท่อภายในในถังปฏิกริยารูปทรงกระบอกที่มีส่วนขยายการแยกก๊าซ-ของเหลวที่ด้านบน (นลินี



รูปที่ 2.15 ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายนอก (นลินี ตัณชิตกุล, 2547)

#### 2.3.4 ข้อดีของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีข้อดีหลายประการกว่าถังปฏิกริยาชนิดอื่นๆ (ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศและถังกวนแบบใช้ใบพัด) เช่น

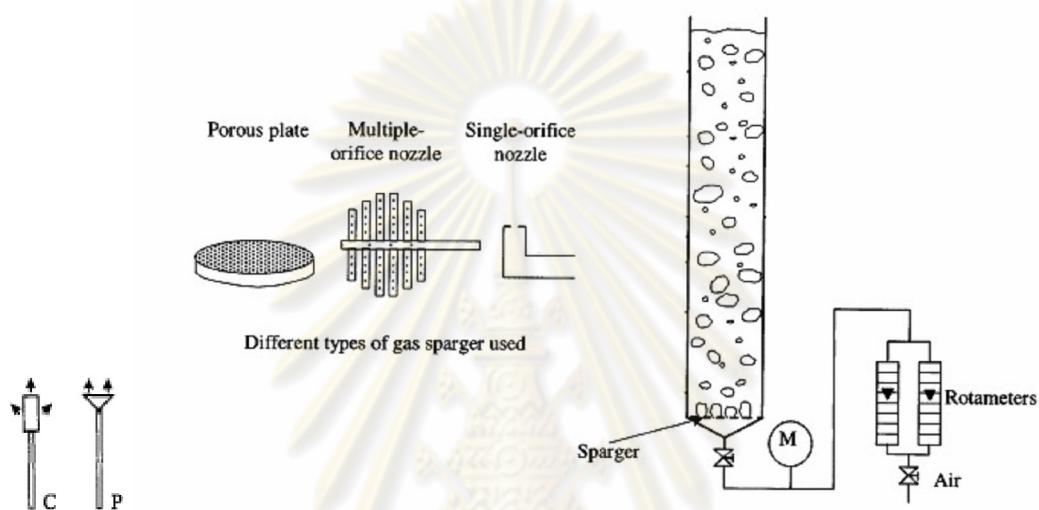
- ออกแบบง่าย
- ดูแลรักษาง่าย
- ใช้พลังงานต่ำ
- กำหนดรูปแบบการไหลได้
- ควบคุมอัตราการไหลวนของของเหลวได้
- เวลาในการกวนผสมน้อย
- การกวนผสมไม่รุนแรงและคงที่

จากการจำแนกชนิดของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกผู้ทำงานวิจัยฉบับนี้จะเลือกใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน (Internal Loop) แบบที่ใช้ท่อภายในติดตั้งบริเวณตรงกลางของถัง ดังรูปที่ 2.14 a เนื่องจากถังปฏิกริยาชนิดนี้มีคุณสมบัติในการไหลวนที่เหมาะสมกว่าแบบที่ใช้แผ่นกั้น ดังรูปที่ 2.14 b ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งจะกล่าวต่อไปในข้อ 2.3.7 ต่อไป

### 2.3.5 ค่าอุทกพลศาสตร์ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Hydrodynamics)

#### 2.3.5.1 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์

(1) ชนิดของหัวพ่นอากาศ (Sparger) หัวพ่นอากาศที่ใช้มีหลายแบบซึ่งประกอบด้วย แบบรูพรุน (Porous Plate) แบบท่อทรงกระบอก (Cylindrical Tube) แบบหัวพ่นหลายหัว (Multiple Orifice Nozzle) แบบหัวพ่นหัวเดียว (Single Orifice Nozzle) แบบแผ่นเจาะรู (Perforate Plates) ที่สามารถกำหนดทั้งขนาดและจำนวนรูได้



รูปที่ 2.16 ชนิดของหัวพ่นอากาศ c : cylindrical tube, p : perforate plate (พรทิพย์ วงศ์สุโขโต,

2545)

(2) พื้นที่หน้าตัดของท่อภายใน ถ้ามีพื้นที่หน้าตัดมากจะทำให้มีพื้นที่แลกเปลี่ยนออกซิเจนกับของเหลวมาก มีผลทำให้อัตราการถ่ายโอนมวลสารระหว่างแก๊สกับของเหลวมากขึ้น

#### 2.3.5.2 ตัวแปรสำคัญในการออกแบบถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

ลักษณะเฉพาะของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีผลมาจากตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการออกแบบดังนี้

1. ขนาดของฟองแก๊สและการกระจายตัวของขนาดฟองเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ เพราะมีผลโดยตรงต่อพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวซึ่งเชื่อมโยงไปถึงผลของการถ่ายโอนมวลสารระหว่างแก๊สและของเหลว ขนาดของฟองแก๊สที่ต่างกันมีผลมาจากหัวพ่นอากาศ หัวพ่นอากาศต่างชนิดกันทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีขนาดต่างกัน ซึ่งความเร็วของแก๊สป้อนก็มีผลต่อขนาดของฟองแก๊ส ยิ่งความเร็วมากฟองแก๊สจะสามารถแตกกลายเป็นฟองที่มีขนาดเล็ก

ลง นอกจากนี้ขนาดฟองยังขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลวที่ใช้ในถังปฏิกริยา ถ้าของเหลวที่ใช้เป็นของเหลวหนืด เช่น กลิเซอรอล ฟองมีโอกาสที่จะเกิดการรวมตัวได้ง่ายกว่าการแตกเนื่องจากฟองเคลื่อนตัวช้าเพราะความหนืดของของเหลวทำให้ฟองสองฟองมีเวลาที่จะใกล้กันมากขึ้นจนสามารถเกิดการรวมตัวของฟองแก๊สได้ทำให้ฟองมีขนาดใหญ่กว่าในกรณีของของเหลวไม่หนืด เช่น น้ำกลั่นและ เอทิลแอลกอฮอล์ ขนาดของฟองแก๊สมีขนาดเล็กกว่าในของเหลวหนืดเนื่องจากของเหลวไหลได้ง่ายกว่าทำให้ฟองแก๊สสองฟองไหลออกจากกัน โอกาสที่จะรวมตัวกันจึงมีน้อย

2. สัดส่วนของก๊าซ คือสัดส่วนปริมาตรของแก๊สในปริมาตรของการกระจายตัวของแก๊สกับของเหลวไฮลด์อัฟ มีความสำคัญในสามส่วนด้วยกันคือ

- แสดงถึงศักยภาพของการถ่ายโอนมวลสาร ดังนั้นถ้าระบบมีสัดส่วนของก๊าซสูงหมายถึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวมากทำให้การถ่ายโอนมวลสารมากขึ้น
- ความแตกต่างของสัดส่วนของก๊าซระหว่างส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศเป็นแรงเคลื่อนทำให้เกิดการไหลหมุนเวียนของของเหลว ดังนั้นในการเพิ่มสัดส่วนของก๊าซไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มฟองแก๊ส ยังเพิ่มการไหลเวียนของของเหลวด้วยและในการออกแบบลักษณะโครงสร้างของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีอิทธิพลสำคัญต่อสัดส่วนของก๊าซคือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด
- อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของส่วนไม่เติมอากาศต่อส่วนเติมอากาศ ( $A_d/A_r$ ) มีผลต่อสัดส่วนของก๊าซ เมื่อลดอัตราส่วน  $A_d/A_r$  ทำให้สัดส่วนของก๊าซเพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนเติมอากาศมีพื้นที่มาก ทำให้มีโอกาสเกิดสัดส่วนของก๊าซได้มาก เพราะสัดส่วนของก๊าซส่วนใหญ่เกิดภายในส่วนเติมอากาศ

3. อัตราการถ่ายโอนมวลสารระหว่างแก๊สกับของเหลวในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีอิทธิพลมาจากสมบัติทางกายภาพของของผสม คือความเร็วของก๊าซ สัดส่วนของก๊าซ ขนาดของฟองแก๊ส และความเร็วของของเหลว โดยที่อัตราการถ่ายโอนมวลสารระหว่างแก๊สกับของเหลวจะแสดงในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตรทั้งหมด (Overall Volumetric Mass Transfer Coefficient,  $k_L a$ ) โดยที่สัมประสิทธิ์นี้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบถังปฏิกริยาในทางอุตสาหกรรม และงานวิจัยส่วนมากได้ทดลองหาสัมประสิทธิ์นี้ แต่ค่านี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้เข้าใจถึงกระบวนการถ่ายโอนมวลสารระหว่างแก๊สกับของเหลว จึงได้มีการแยกพารามิเตอร์ออกเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร ( $k_L$ ) และ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลว ( $a$ ) ซึ่งมีเพียงไม่กี่งานวิจัยที่หาความสัมพันธ์แบบนี้

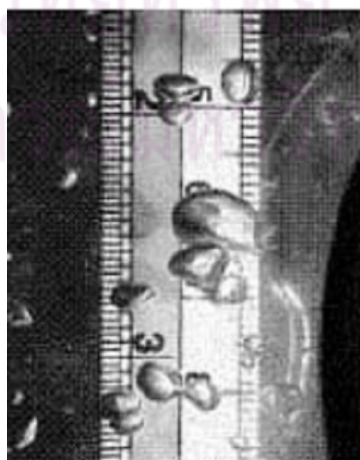
4. ความเร็วของของเหลวและพฤติกรรมการผสมเป็นอีกปัจจัยที่จำเป็น โดยเฉพาะในการควบคุมความเป็นกรดเบสและความเข้มข้นของของเหลวที่ใช้เพื่อให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตที่ใช้เพาะเลี้ยงเพื่อให้ได้ผลผลิตผลสูงสุดโดยที่ความเร็วของของเหลวขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนอากาศ ชนิดของของเหลวที่ใช้ในถังปฏิกรณ์ สัดส่วนของก๊าซ ความดันที่ลดลงตามความสูงของคอลัมน์ซึ่งความเร็วของของเหลวเป็นแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญที่ทำให้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกแตกต่างจากถังปฏิกรณ์แบบอื่นๆ ความเร็วของของเหลวมีผลต่อแรงเฉือนในถังปฏิกรณ์ ดังนั้นเมื่อความเร็วของของเหลวในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกเป็นแบบเนื้อเดียวทำให้แรงเฉือนมีค่าต่ำตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ที่ทำให้การเพาะเลี้ยงเซลล์พืชและเซลล์สัตว์ประสบความสำเร็จในถังปฏิกรณ์ชนิดนี้

5. แรงเฉือน (shear force) เป็นผลเนื่องมาจากสมบัติทางกายภาพของของไหลทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่เซลล์ ดังนั้นในการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ แรงเฉือนจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบเพราะถ้าแรงเฉือนมีค่าต่ำก็จะสามารถลดความเสียหายของเซลล์ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดสีได้

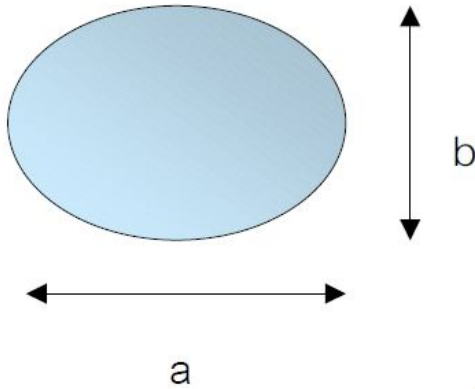
### 2.3.5.3 การวัดและการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ

#### 1. ขนาดฟองก๊าซ

วัดขนาดของฟองแก๊สในส่วนเติมอากาศ โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงยี่ห้อ BASLER A602f-2 โดยในแต่ละการทดลองใช้ฟองแก๊สระหว่าง 100-150 ฟอง ในการคำนวณโดยอ่านขนาดของฟองจากสเกลที่ติดไว้กับท่อภายใน ซึ่งในกรณีที่ฟองไม่ใช่วงกลม จะคำนวณหาขนาดฟองอากาศเทียบเท่า (Equivalent Bubble Diameter) จากสมการที่ 2.9 แล้วนำมาคำนวณ Mean diameter จากสมการที่ 2.10



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการวัดขนาดฟองโดยใช้รูปที่ถ่ายได้จากการทดลอง (พรทิพย์ วงศ์สุโขโต, 2545)



$$d_{Bi} = (a^2 b)^{1/3} \quad (2.9)$$

$$d_B = \frac{\sum_{i=1}^a d_{Bi}^3}{\sum_{i=1}^a d_{Bi}^2} \quad (2.10)$$

เมื่อ

A : แกนเอกของวงรี

B : แกนโทของวงรี

$d_{Bi}$  : ขนาดฟองอากาศเทียบเท่า (equivalent size of bubble)

## 2. พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area)

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ คือสัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ( $S_B$ ) ต่อปริมาตรทั้งหมดของระบบ ( $V_{TOTAL}$ ) โดยตัวแปรนี้ขึ้นกับค่าตัวแปรสำคัญๆ ได้แก่  $d_B$ ,  $f_B$ , และ  $U_B$  โดยค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในงานทดลองนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.11) และ (2.12)

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} = \frac{6Q_G}{\pi D^3_B} \quad (2.11)$$

$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} \quad (2.12)$$

$$S_B = \pi d^2 \quad (2.13)$$

เมื่อ

a = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (interfacial area,  $m^{-1}$ )

$N_B$  = จำนวนฟองที่เกิด (number of bubbles generated)

$S_B$  = พื้นผิวของฟองทั้งหมด (total bubble surface,  $m^2$ )

$V_{TOTAL}$  = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ทั้งหมด (total volume in reactor,  $m^3$ )

$f_B$  = ความถี่ในการเกิดฟอง (bubble formation frequency,  $s^{-1}$ )

$H_L$  = ความสูงของของเหลว (liquid height, m)

$U_B$  = ความเร็วที่เกิดฟอง (bubble rising velocity, m/s)

$d_B$  = เส้นผ่านศูนย์กลางฟอง (bubble diameter, m)

### 3. ความเร็วของของเหลว (Liquid Velocity)

วัดโดยการฉีดสีเข้าไปใน จุด 2 จุด แล้ววัดระยะทางและจับเวลาที่สีใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างจุด 2 จุด คำนวณได้จากสมการที่ 2.14

$$U_{Ld} = \frac{L_d}{t_d} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$U_{Ld}$ : ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ, เมตรต่อวินาที

$t_d$ : เวลาที่สีใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างจุด 2 จุด, วินาที

### 4. สัดส่วนของก๊าซโดยรวม

Overall gas holdup ( $\epsilon_{g,o}$ ) หาโดยใช้วิธีการขยายปริมาตร (Volume expansion) ซึ่ง  $\epsilon_{g,o}$  คำนวณจากสมการที่ 2.15

$$\epsilon_{g,o} = \frac{H_D - H_L}{H_D} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$H_D$ : ความสูงของของเหลวในขณะที่พ่นอากาศ, เมตร

$H_L$ : ความสูงของของเหลวที่ยังไม่ได้ผ่านการพ่นอากาศ, เมตร

หรือ

หาจากความสัมพันธ์จากสมการพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะได้แก่

$$a = \left( \frac{6\epsilon}{d_B(1-\epsilon)} \right) \quad (2.16)$$

#### 2.3.5.4 ขอบเขตการไหล (Flow regime)

โดยทั่วไปขอบเขตการไหลวนสามารถวิเคราะห์ใช้ 2 วิธี ได้แก่ การพิจารณาจากหลักการเกิดของฟองและการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซ (นลินี ตัณฑกุล, 2547)

1. การพิจารณาจากหลักการเกิดของฟองอากาศ

1) Homogeneous bubble flow : ขอบเขตนี้เกิดขึ้นที่ความเร็วก๊าซต่ำๆ (น้อยกว่า 0.015) ฟองอากาศในขอบเขตนี้มีการกระจายขนาดในช่วงแคบๆ และของเหลวไหลที่ความปั่นป่วนต่ำ

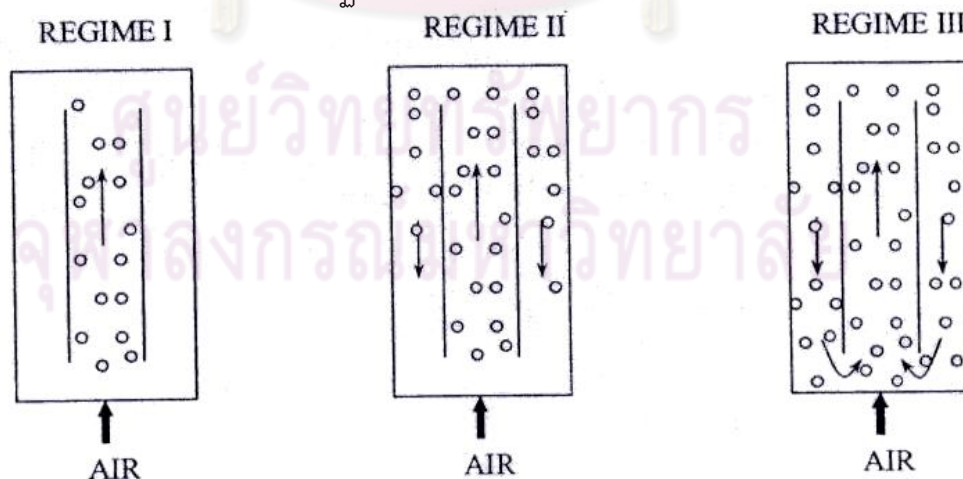
2) Heterogeneous bubble flow หรือ Churn turbulent flow : ขอบเขตนี้เกิดขึ้นที่ความเร็วก๊าซสูงๆ ความปั่นป่วนในเฟสของเหลวสูงกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับขอบเขตการไหลแบบ Homogeneous

2. การพิจารณาจากหลักการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ

1) No gas entrainment (Regime I) : ขอบเขตนี้เกิดขึ้นที่ความเร็วของก๊าซต่ำๆ ไม่มีฟองอากาศเคลื่อนที่เข้าไปในส่วนไม่เต็มอากาศ ขณะที่ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยของฟองอากาศในของเหลว

2) Gas entrainment but no gas recirculation (Regime II) : ในขอบเขตนี้ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศจะเท่ากับความเร็วของฟองอากาศ ซึ่งผลลัพธ์ในฟองอากาศ ฟองจะถูกนำพาเข้าไปในส่วนไม่เต็มอากาศแต่ฟองจะไม่ไหลวนกลับไปในส่วนเต็มอากาศ

3) Complete gas recirculation (Regime III) : ขอบเขตนี้เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศสูงกว่าความเร็วของฟองอากาศ ฟองอากาศเกิดการไหลวนโดยของเหลวจากส่วนไม่เต็มอากาศเข้าไปในส่วนเต็มอากาศอีกครั้ง ดังรูปที่ 2.18 แสดงขอบเขตการไหลทั้ง 3 แบบ ของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกดชนิดที่มีการไหลวนภายใน



รูปที่ 2.18 ขอบเขตการไหลในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกดชนิดที่มีการไหลวนภายใน (ยึดหลักการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซ) (นลินี ตันติกุล, 2547)

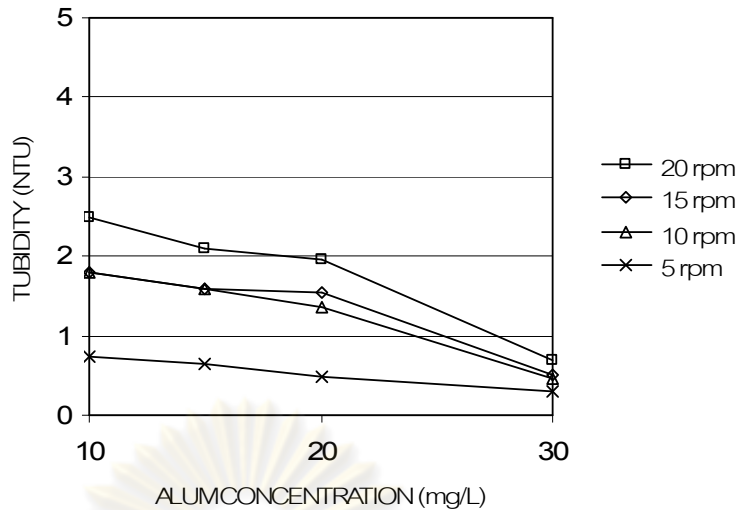


จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวมาแล้วของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกดชนิดที่มีการไหลวนภายในจะเห็นได้ว่ามีลักษณะการไหลวนดังที่แสดงในรูปที่ 2.18 ใน ขอบเขตการไหลแบบที่ 2 (Regime II) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยอาศัยกลไกการไหลวนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกดชนิดที่มีการไหลวนภายใน กล่าวคือ ผู้ทำการวิจัยคาดว่าในสัณฐานเดิมอากาศจะทำหน้าที่สร้างตะกอน และส่วนไม่เต็มอากาศจะทำหน้าที่รวมตะกอนแทนการใช้ใบพัดกวน เมื่อเกิดการรวมตะกอนขึ้นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ก็จะตกลงสู่ถังตกตะกอนที่อยู่ด้านล่างส่วนตะกอนที่ยังมีขนาดเล็กก็จะไหลวนกลับเข้าไปในสัณฐานเดิมอากาศเพื่อทำการสร้างตะกอนอีกครั้ง และผู้ทำการวิจัยนี้ยังคาดหวังอีกว่า เมื่อตะกอนที่มีขนาดเล็กที่ไหลวนกลับเข้าไปในสัณฐานเดิมอากาศจะเข้าไปสร้างตะกอนโดยใช้สารตกตะกอนที่เหลืออยู่ภายในถังปฏิกริยา ทำให้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในเชิงของการลดปริมาณของสารตกตะกอนได้ และการประหยัดพื้นที่ในการบำบัด คือได้มีการรวมกระบวนการตกตะกอนทางเคมีไว้ในถังปฏิกริยาเดียวกันทั้ง 3 กระบวนการ

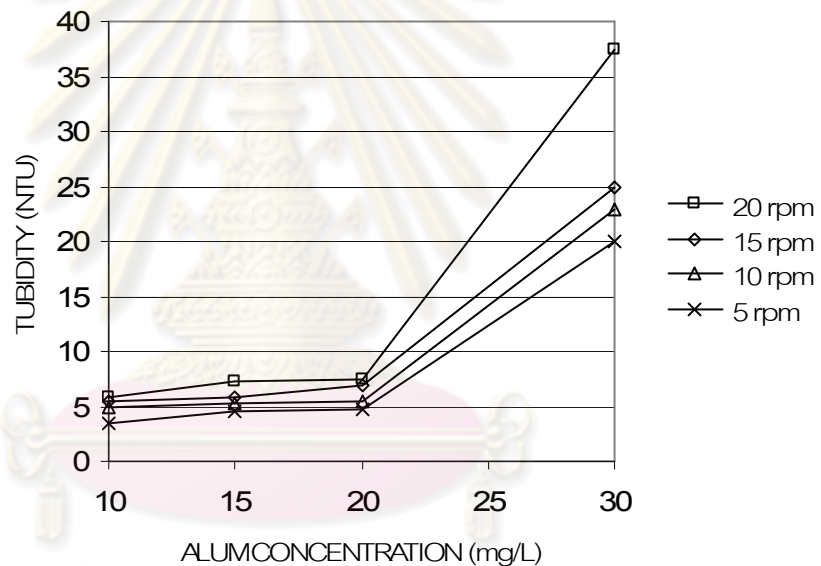
## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**วิจารณ์ ตันติธรรม (2536)** ศึกษาการกำจัดความขุ่นโดยถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอนกระทำโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 300 ซม. น้ำขุ่นสังเคราะห์ที่ใช้เตรียมจากดินคาโอลิน (Kaolinite) ผสมน้ำประปาให้มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน (Coagulant) และใช้โพลีเมอร์ประจุลบความเข้มข้น 0.3 มก./ล. เป็นสารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant Aid) ตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารส้มในช่วง 10 - 30 มก./ล. ความเร็วรอบใบกวนในช่วง 5 - 20 รอบ/นาที และ อัตราน้ำล้นผิวในช่วง 30 - 60 ซม./นาที

ผลการวิจัยพบว่า ค่าความขุ่นของน้ำผลิตขึ้นอยู่กับทั้งอัตราน้ำล้นผิว และความเข้มข้นของสารส้ม ในช่วงอัตราน้ำล้นผิว 30 - 45 ซม./นาที ค่าความขุ่นของน้ำผลิตจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงอัตราน้ำล้นผิว 45 - 60 ซม./นาที ค่าความขุ่นของน้ำผลิตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ การเพิ่มอัตราน้ำล้นผิวและ/หรือ การเพิ่มความเร็วยกเว้นใบกวน นอกจากจะทำให้ค่าความขุ่นของน้ำผลิตเพิ่มขึ้น ยังจะทำให้ความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอน และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในถังทำน้ำใสลดลง



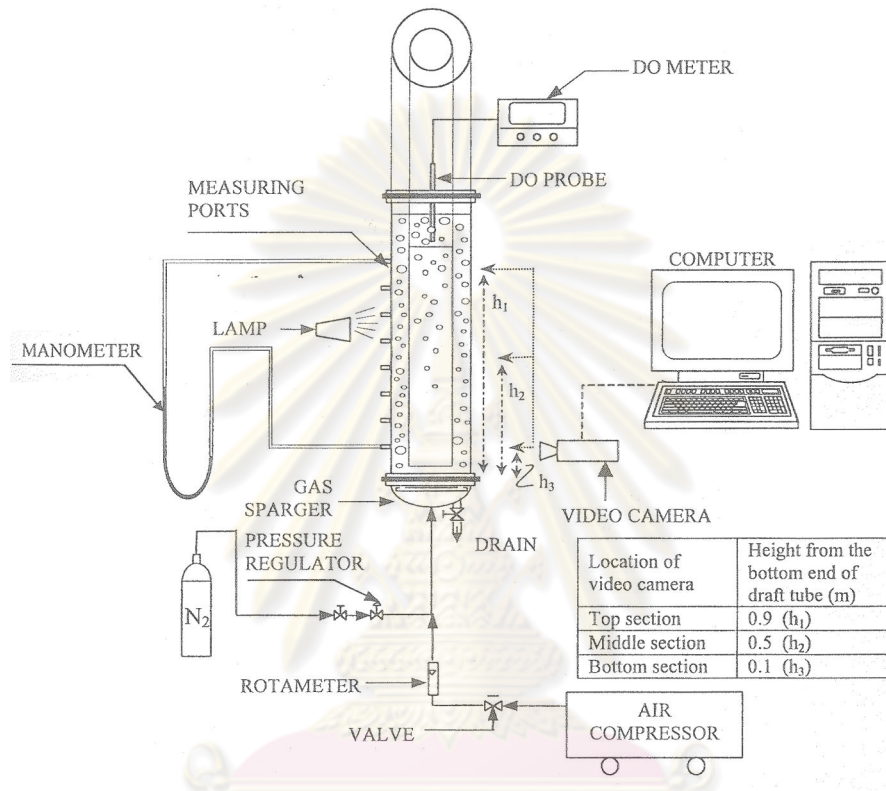
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่ออัตราน้ำล้นผิว เป็น 30 ซม./นาที (วิจารณ์ ตันติธรรม, 2536)



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำผลิตและความเข้มข้นสารส้ม เมื่ออัตราน้ำล้นผิว เป็น 60 ซม./นาที (วิจารณ์ ตันติธรรม, 2536)

จากการทดลองนี้พบว่า การกวนผสมที่ปั่นป่วนมากเกินไปทำให้ตะกอนที่จับตัวรวมกันดี แล้วแยกออกจากกันอีกครั้งหนึ่ง ทำให้น้ำที่ได้มีความขุ่นสูงขึ้น การกวนผสมจึงเป็นตัวแปรหนึ่ง ที่ควรพิจารณาเมื่อใช้การกวนผสมด้วยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการเติมอากาศ การกวนผสมจึงเป็น ปัจจัยที่สำคัญในการบำบัดโดยใช้ถึงปฏิกริยาแบบอากาศยกกวนผสม

**ประเสริฐ ภวสันต์, (2545)** ศึกษาการกระจายตัวของฟองก๊าซในถังสัสมัดแบบอากาศยก โดยใช้ถังสัสมัดแบบอากาศยกที่มีลักษณะเป็นท่อสองชั้นซ้อนกัน ท่อด้านนอกทำจากพลาสติกใส (อะคริลิก) ความสูง 1.2 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.137 เมตร ท่อภายใน (draft tube) ทำจากพลาสติกใสเช่นกัน ความสูง 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.093, 0.0735 และ 0.034 เมตร ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แผนผังของถังสัสมัดแบบอากาศยกที่ใช้ในการทดลอง

ผลการทดลองพบว่า

1. เมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซในระบบจะทำให้ขนาดของฟองอากาศเล็กลง และทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศจากการกระจายตัวแบบปกติเป็นการกระจายตัวแบบ Log-normal
2. ขนาดของฟองอากาศจะเล็กลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นของถังสัสมัด และที่ความเร็วของก๊าซสูงๆ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของส่วนไม่เต็มอากาศและส่วนเต็มอากาศจะทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลง
3. ตัวกระจายก๊าซที่มีจำนวนมากจะทำให้ฟองอากาศมีขนาดเฉลี่ยใหญ่ขึ้น ในขณะที่ตัวกระจายอากาศที่มีจำนวนรูน้อยๆ จะทำให้มีการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศค่อนข้างกว้าง

งานวิจัยฉบับนี้แสดงให้เห็นว่าข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของฟองอากาศสามารถนำไปใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสก๊าซและของเหลวได้ โดยสามารถแยกวิเคราะห์ระหว่างผลของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลวและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารได้ และพบว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลวจะมีบทบาทสำคัญในการกำหนดค่าอัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟสมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

**พรทิพย์ วงศ์สุโขโต. (2545)** ศึกษาพฤติกรรมของฟองก๊าซและการไหลวนภายในของของเหลวในถังสัมผัสแบบอากาศยกประเภทที่มีการไหลวนแบบภายใน โดยทำการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนหลักดังนี้

1. การศึกษาการกระจายตัวของฟองก๊าซในถังสัมผัสและผลกระทบของการกระจายตัวของฟองก๊าซต่ออัตราการถ่ายเทมวลระหว่างก๊าซและของเหลว
2. การศึกษาปรากฏการณ์การไหลวนภายในของของเหลวในส่วนให้อากาศ (riser) ของถังสัมผัสฯ
3. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการถ่ายเทมวลสารของถังสัมผัสฯ

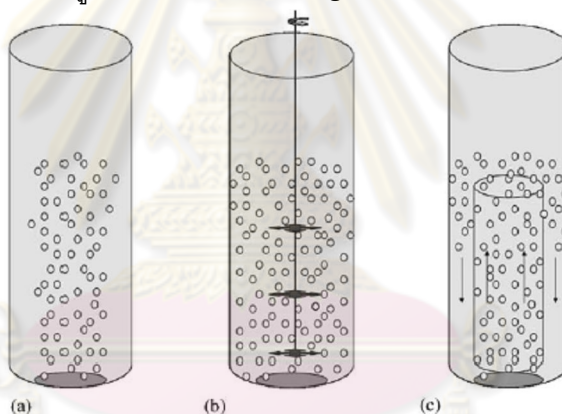
ผลการทดลอง

1. เมื่อความเร็วของก๊าซที่ให้กับระบบมีค่าต่ำกว่า 1 ซม.ต่อวินาที จะมีขนาดฟองก๊าซเฉลี่ยเท่ากับ 7-8 มิลลิเมตร โดยมีการกระจายตัวแบบปกติ
2. เมื่อความเร็วของก๊าซอยู่ในช่วง 2-4 ซม.ต่อวินาที จะมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบที่ซับซ้อน ซึ่งในช่วงนี้มีฟองก๊าซอยู่ 2 กลุ่มหลักคือ กลุ่มที่มีขนาดฟองก๊าซเฉลี่ยเท่ากับ 7-8 มิลลิเมตร และกลุ่มที่มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 3-5 มิลลิเมตร
3. การเพิ่มความเร็วของก๊าซในช่วงการทดลองของงานวิจัยนี้ไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
4. แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาสามารถทำนายพฤติกรรมการถ่ายเทมวลสารในระบบถังสัมผัสอากาศยกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้

จากการทดลองนี้พบว่าการไหลของของเหลวในส่วนให้อากาศนั้นมีทั้งส่วนที่ไหลขึ้นและไหลลง โดยที่สัดส่วนของของเหลวที่ไหลขึ้นต่อของเหลวที่ไหลลงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของพื้นที่ของส่วนให้อากาศกับพื้นที่ของส่วนไม่ให้อากาศไม่มีผลต่อสัดส่วนของพื้นที่ของของเหลวไหลลงกับพื้นที่ที่ของเหลวไหลขึ้นในส่วนให้อากาศ แต่มีผลกับ

สัดส่วนของเหลวที่ไหลขึ้นต่อของเหลวที่ไหลลง ซึ่งสัดส่วนของของเหลวที่ไหลขึ้นต่อของเหลวที่ไหลลงนั้นจะมีปริมาณมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของส่วนไม่ให้อากาศต่อพื้นที่หน้าตัดของส่วนให้อากาศเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถออกแบบถังปฏิกรณ์โดยอาศัยอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของส่วนไม่เติมอากาศกับพื้นที่หน้าตัดส่วนเติมอากาศ และทำให้เห็นถึงความสำคัญของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายในเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี

Bo Jin และ Paul Lant (2004) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารเปรียบเทียบลักษณะของถังปฏิกรณ์ ภาวะตะกอนและอัตราการเติมอากาศที่มีผลกับขอบเขตการไหล ค่าอุทกพลศาสตร์ การกระจายขนาดของฟล็อก และคุณสมบัติตะกอนในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ ของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบใช้ใบพัด ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ในระบบบำบัดของ Wacal, Brisbane, Australia มี TSS 240-300 mg/l และ 3,500-4,000 mg COD/l โดยน้ำเสียที่ใช้นี้มีค่าอยู่ในช่วง  $4000 \pm 200$  mg COD/l

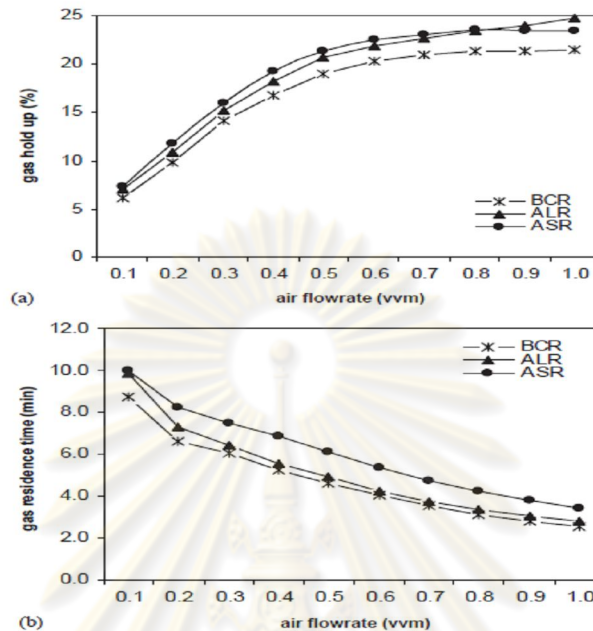


รูปที่ 2.22 แผนภาพแสดงรูปแบบของถังปฏิกรณ์รูปแบบต่างๆในการทดลอง (a) ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (b) ถังปฏิกรณ์แบบใช้ใบพัด (c) ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Bo Jin and Paul Lant, 2004)

จากการทดลองพบว่า

1. ถังปฏิกรณ์แบบใช้ใบพัด (ASR) แสดงให้เห็นว่ามีสัดส่วนของก๊าซและความต้านทานที่สูงที่สุด ดังรูปที่ 2.23 ขอบเขตการไหลและแรงเฉือนมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกันเป็นผลให้เกิดฟล็อกจำนวนมากที่มีขนาดเล็กและอัดตัวกันแน่น
2. ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ALR) เกิดการไหลวนของเหลวทำให้เกิดการไหลวน ซึ่งเป็นตัวช่วยเร่งให้สัดส่วนของก๊าซและการรวมตัวของตะกอนที่เพิ่มขึ้น

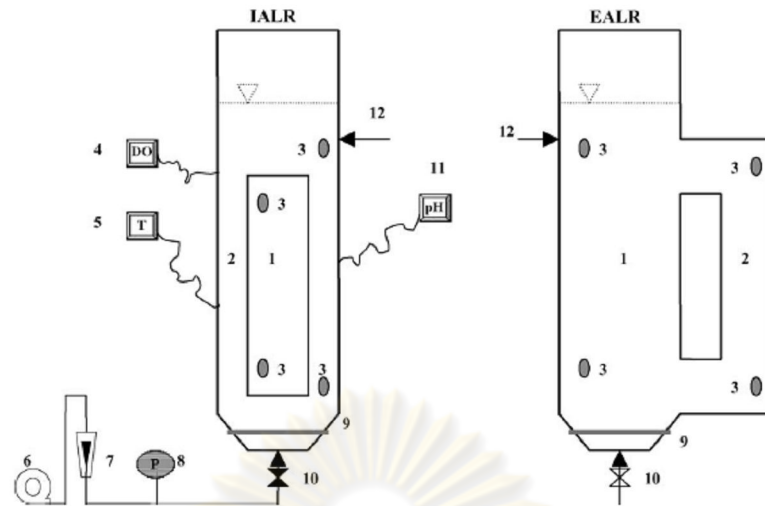
3. ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (BCR) เกิดการกระจายของขอบเขตการไหลที่มีความปั่นป่วนสูงและไม่เป็นเนื้อเดียวกันในสัดส่วนของก๊าซและการกวนผสม ซึ่งทำให้เกิดฟลอคขนาดใหญ่และอัดตัวกันอย่างหลวมๆ



รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงภายใน (a) สัดส่วนของก๊าซ และ (b) gas residence time กับอัตราการไหลอากาศ ในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ ของถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบใช้ใบพัด (Bo Jin and Paul Lant, 2004)

จากงานวิจัยนี้พบว่าในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ALR) มีการไหลวนของของเหลวที่ทำให้การรวมตัวของตะกอนจากแอกติเวเต็ดสลัดจ์เพิ่มขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการรวมตัวที่ดีของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

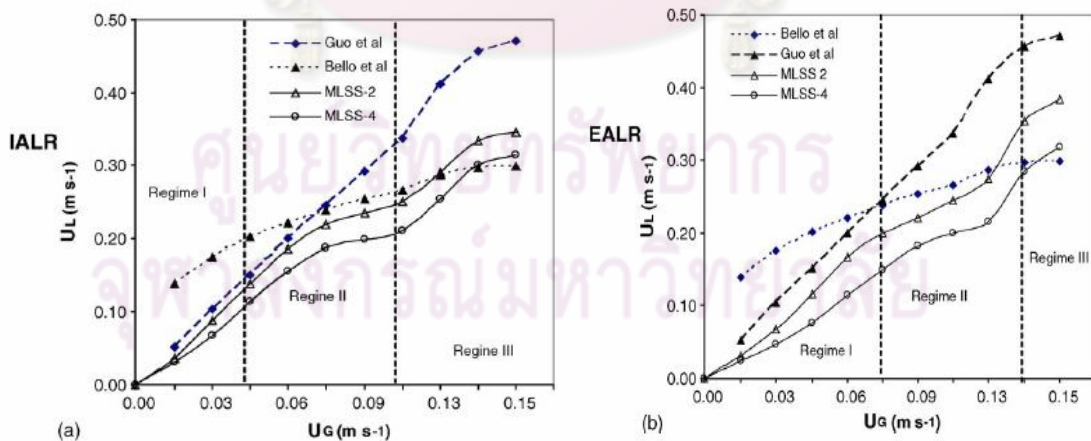
Bo Jin, Pinge Yin และ Paul Lant (2006) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามลกระทบของสภาวะการดำเนินงานและคุณสมบัติของของเหลว เกี่ยวกับค่าอุทกพลศาสตร์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก การทดลองถูกควบคุมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน (IALR) และภายนอก (EALR) ดังรูป 2.24 The activated sludge liquid displayed a non-Newtonian rheological behavior.



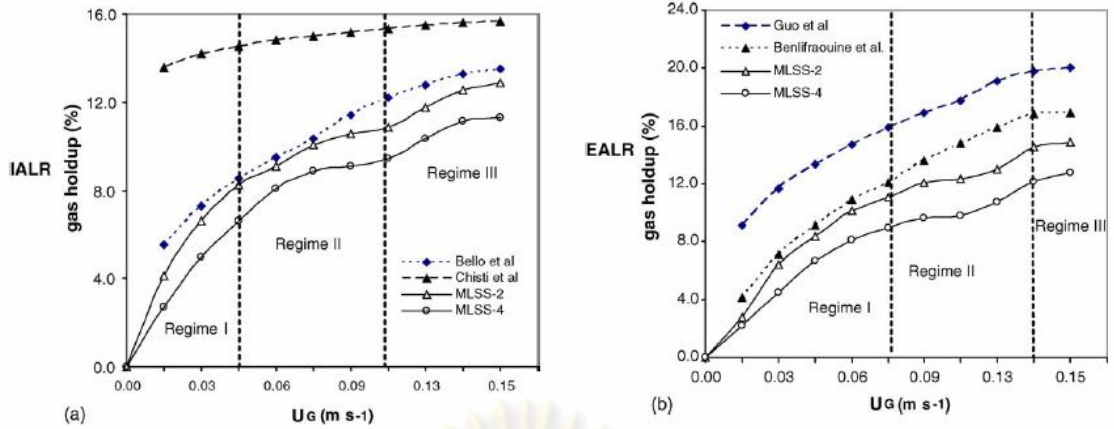
รูปที่ 2.24 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (1) ส่วนเติมอากาศ ;(2) ส่วนไม่เติมอากาศ ;(3) เครื่องวัด pH ;(4) เครื่องวัด DO ;(5) เครื่องวัดอุณหภูมิ ;(6) อุปกรณ์อัดอากาศ ;(7) อุปกรณ์ควบคุมการไหลอากาศ ;(8) เครื่องวัดความดัน ;(9) ตัวกระจายก๊าซ ;(10) วาล์ว ;(11) เครื่องวัด pH ;(12) จุดเติมสาร (Bo Jin, Pinge Yin and Paul Lant, 2006)

จากผลการทดลองพบว่า

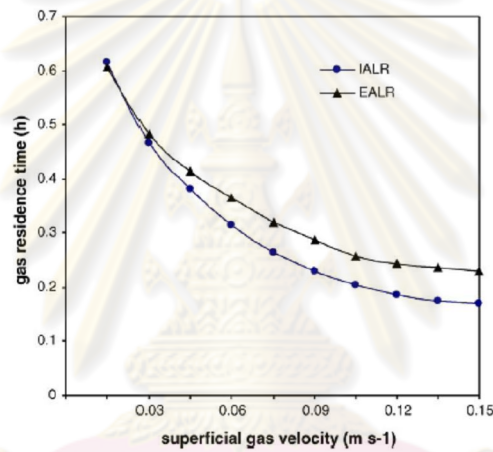
1. เมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซทำให้ความเร็วในการไหลวนของของเหลว สัดส่วนของก๊าซและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารเพิ่มขึ้น ในขณะที่ gas residence time ลดลง
2. ความเร็วในการไหลวนของของเหลว สัดส่วนของก๊าซ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารลดลง ในขณะที่ภาวะตะกอนเพิ่มขึ้น



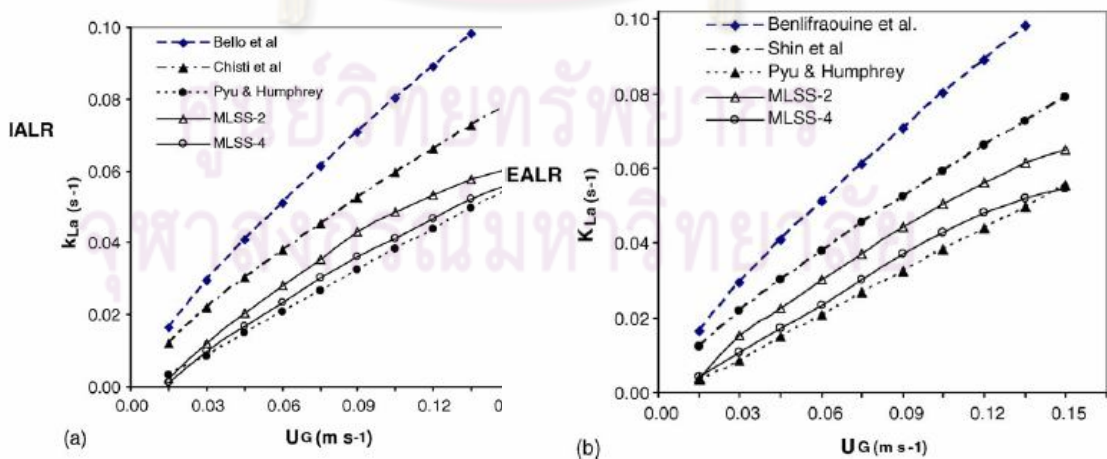
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหลวนของของเหลวที่ความเร็วของก๊าซต่างๆ ใน (a) IALR (b) EALR ที่ภาวะตะกอน 2 และ 4 g MLSS l<sup>-1</sup> (Bo Jin, Pinge Yin and Paul Lant, 2006)



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนของก๊าซที่ความเร็วของก๊าซต่างๆ ใน (a) IALR (b) EALR ที่ภาระต่อน 2 และ 4 g MLSS l<sup>-1</sup> (Bo Jin, Pinge Yin and Paul Lant, 2006)



รูปที่ 2.27 ความแตกต่างของ gas residence time ที่ความเร็วของก๊าซต่างๆ ในระบบแอกติเวเต็ดสลัดจ์ของ IALR และ EALR (Bo Jin, Pinge Yin and Paul Lant, 2006)



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่ความเร็วของก๊าซต่างๆ ใน (a) IALR (b) EALR ที่ภาระต่อน 2 และ 4 g MLSS l<sup>-1</sup> (Bo Jin, Pinge Yin และ Paul Lant, 2006)



จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าขอบเขตการไหลในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกในแอกติเวเต็ด สลัดจ์ มีผลที่สำคัญต่ออัตราการไหลวนของของเหลวและสัดส่วนของก๊าซแต่มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล และความเร็วการไหลวน, สัดส่วนของก๊าซและ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารลดลง ขณะที่ภาระตะกอนเพิ่มมากขึ้น และจากกราฟด้านบนแสดงให้เห็นว่าถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายในให้ผลในค่าสัดส่วนของก๊าซ ความเร็วของของเหลว และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารที่ดีกว่าถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายนอก จึงเลือกใช้ว่าถังปฏิกริยาแบบอากาศยกชนิดที่มีการไหลวนภายใน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง จะเห็นได้ว่า งานวิจัยส่วนใหญ่จะทำการศึกษากับการกระจายตัวของฟองก๊าซในถังปฏิกริยาแบบอากาศ ยก การศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ในถังปฏิกริยาแอกติเวเต็ดแบบอากาศยก เป็นต้น ซึ่งจะพบได้ว่า ยังไม่มีงานวิจัยที่ทำการศึกษถังปฏิกริยาแบบอากาศยกเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกเพื่อกำจัดความขุ่นใน น้ำ โดยมุ่งเน้นไปที่น้ำเสียที่อยู่ในรูปของความขุ่น เนื่องจากมีความสำคัญในระบบผลิตน้ำประปา



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 รูปแบบการวิจัย

เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) กระทำภายใต้สภาวะการณ์ที่กำหนดขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ

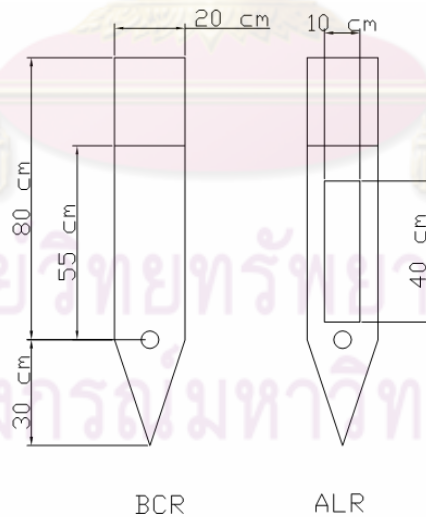
##### 3.2 สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาคารภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

##### 3.3 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

###### 3.3.1 ชุดโมเดลทดลองและการติดตั้งอุปกรณ์

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทำด้วยอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร สูง 0.80 เมตร ที่ด้านล่างติดตั้งกรวยเพื่อไว้กักเก็บตะกอนสูง 0.30 เมตร ด้านในประกอบด้วยท่อภายในทำด้วยอะคริลิกใสขนาด 0.10 เมตร สูง 0.40 เมตร ติดตั้งตามแนวแกนตรงกลางของถังปฏิกรณ์ วางที่ระยะห่างจากตัวกระจายอากาศ 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 ชุดโมเดลทดลอง



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการต่อชุดอุปกรณ์การทดลอง

### 3.3.2 หัวเติมอากาศ

ใช้หัวเติมอากาศ (Sand diffuser) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์สร้างฟองอากาศ

### 3.3.3 เครื่องเติมอากาศ

เครื่องเติมอากาศใช้เครื่องอัดอากาศ (air compressor) ยี่ห้อ NITTO รุ่น LA-45B

### 3.3.4 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

เครื่องวัดพีเอช (pH meter) บริษัท Scientific Promotion (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น

CG840

### 3.3.5 ชุดทดสอบจาร์เทสต์ (Jar Test)

ชุดทดสอบจาร์เทสต์ (Jar Test) บริษัท วอเตอร์เทสต์ จำกัด (Water Test CO., LTD)  
รุ่น WT-JT2

### 3.3.6 เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter)

เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity Meter) ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100A

### 3.3.7 เครื่องมือถ่ายภาพ (High speed camera)

เครื่องมือถ่ายภาพ (High speed camera) ยี่ห้อ BASLER A602f-2 ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องมือถ่ายภาพ

### 3.3.8 เครื่องมือวัดอัตราการไหลอากาศและน้ำ (Flow meter)

เครื่องมือวัดอัตราการไหลน้ำและอากาศ (Flow meter) ยี่ห้อ FBC-V-SA-30-LM ดังรูป  
ที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดอัตราการไหลอากาศ



รูปที่ 3.6 เครื่องมือวัดอัตราการไหลน้ำ

### 3.4 สารเคมี

#### 3.4.1 คาโอลิน

#### 3.4.2 อะลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม)

### 3.5 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่น

ชั่งดินคาโอลิน 1 และ 0.1 กรัมผสมน้ำ 1 ลิตร ตามลำดับ แล้วปั่นกวนผสมให้เข้ากันด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที ตลอดเวลา เป็นจำนวน 20 ลิตร

### 3.6 การวัดค่าทางอุทกพลศาสตร์

#### 3.6.1 การวัดขนาดฟองอากาศ ( $d_B$ )

ซึ่งวิเคราะห์จากการเก็บภาพ (100 – 150 ฟอง) ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง ความเร็ว 100 ภาพต่อวินาที (Basler high speed camera) และวัดขนาดด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพถ่าย และคำนวณขนาดฟองจากสมการที่ (2.9)

#### 3.6.2 การหาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area, $a$ )

ทำได้โดยการนำค่าขนาดของฟองอากาศที่วัดได้มาคำนวณหาพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะจากสมการที่ (2.11, 2.12 และ 2.13)

#### 3.6.3 การวัดความเร็วของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ (Downcomer Liquid Velocity, $U_{Ld}$ )

สามารถหาได้จากการฉีดสีที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลวในระบบและจับเวลาการเดินทางของสีจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และจึงนำมาคำนวณหาความเร็วของของเหลวจากสมการที่ (2.14)

### 3.7 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ

3.7.1 การศึกษาการกำจัดความขุ่นในน้ำด้วยกระบวนการกำจัดทางเคมี (จาร์เทสต์)

3.7.2 การศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

3.7.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

3.7.1 การศึกษาการกำจัดความขุ่นในน้ำด้วยกระบวนการกำจัดทางเคมี (จาร์เทสต์)

การศึกษาในขั้นนี้มีเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเลือกใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ เวลาที่ใช้ในกวนผสม ค่าพีเอช ความเร็วเกรเดียนท์ (ความสามารถในการกวนผสม) เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลและเปรียบเทียบกับผลการทดลองในขั้นต่อไป

3.7.1.1 สารโคแอกกูแลนต์ คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) โดยในการศึกษาจะใช้ความเข้มข้นของดินคาโอลิน 2 ค่า คือ 0.1 และ 1 กรัมต่อลิตร

1. วิเคราะห์น้ำตัวอย่างสังเคราะห์เพื่อหาค่า ความขุ่น พีเอช
2. ตวงน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ใส่ในบีกเกอร์ 6 ใบ ๆ ละ 1 ลิตร วางบนเครื่องกวน
3. เติมสารโคแอกกูแลนต์ ได้แก่ สารส้ม ลงในบีกเกอร์ด้วยปริมาณที่พิจารณาแล้วว่าเหมาะสม ได้แก่ 2.5, 5, 10, 20, 30 และ 40 มก./ล. เทใส่พร้อมๆกันทั้ง 6 ใบ
4. กวนน้ำและสารโคแอกกูแลนต์ด้วยความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 1 นาที
5. ลดความเร็วของเครื่องกวนลงเหลือ 30 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที
6. สังเกตดูและจดบันทึกเวลาที่เกิดฟลอคปรากฏให้เห็นเป็นครั้งแรกของแต่ละบีกเกอร์ ตลอดจนขนาดและปริมาณของฟลอค
7. ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที สังเกตดูการจมตัวของตะกอนและตะกอนที่นอนก้น ตลอดจนฟลอคที่เหลือซึ่งไม่นอนก้นในบีกเกอร์ทั้ง 6 ใบด้วย
8. ดูดเอาน้ำใสด้านบน โดยมีให้กระเทือนถึงตะกอนที่จมอยู่ก้นบีกเกอร์ นำไปวิเคราะห์หาค่าความขุ่นและพีเอช
9. พล็อตกราฟระหว่างปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้กับความขุ่น เพื่อหาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่สามารถกำจัดความขุ่นได้มากที่สุด
10. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ ได้แก่ 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มก./ล.

### ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.7.1

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณน้ำตัวอย่าง	1. 1 ลิตร
2. พีเอช	2. 7
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์	1. 2.5 - 100 มก./ล.
2. ความเข้มข้นน้ำตัวอย่าง	2. 0.1 และ 1 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ความขุ่น	1. ความขุ่น

#### 3.7.2 การศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

การศึกษาในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ท่อภายใน 10 ซม.) และถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ได้แก่ ขนาดฟองอากาศ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ และสัดส่วนของก๊าซโดยรวม ในน้ำตัวอย่างที่เป็นน้ำประปา และน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่นที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้อัตราการเติมอากาศที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศต่อไป

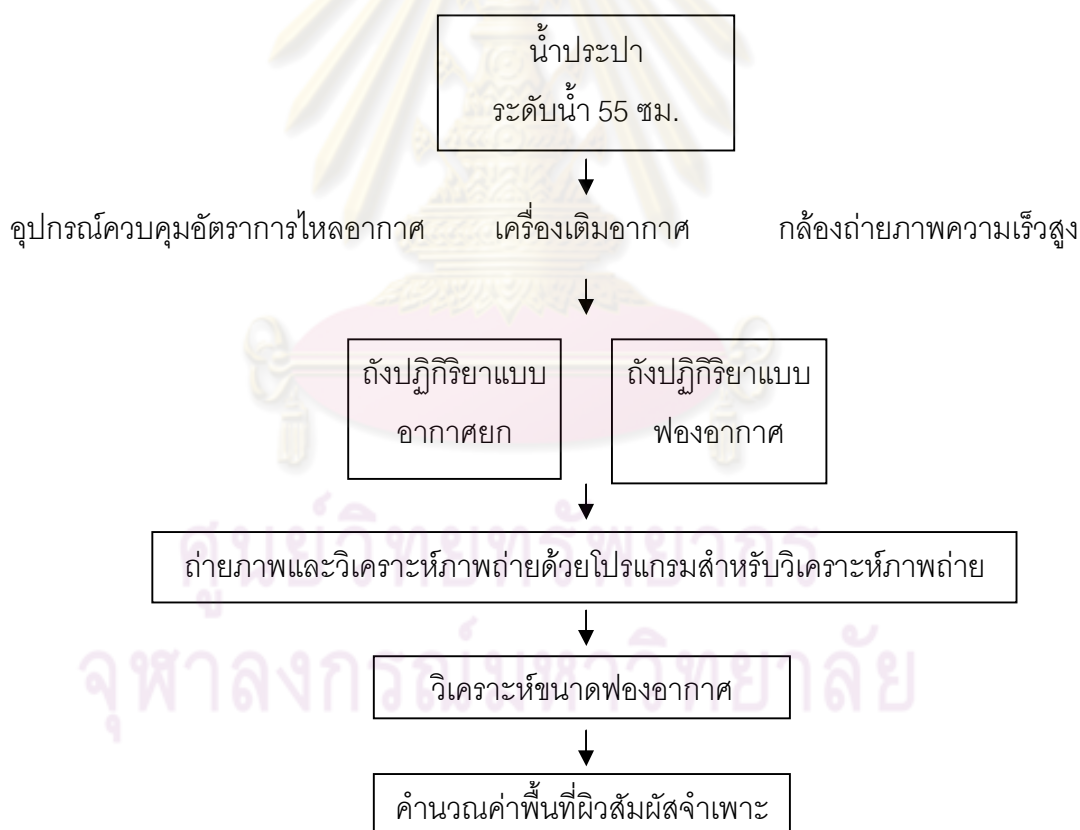
##### 3.7.2.1 การหาขนาดฟองอากาศและพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

การทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.1 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดฟองอากาศและพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่ออัตราการเติมอากาศต่างๆ ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ โดยในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกจะทำการศึกษาขนาดฟองอากาศในส่วนเต็มอากาศ และจะทำการศึกษาขนาดฟองอากาศที่ความสูง 25 ซม. โดยการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง 100 ภาพต่อวินาที (Basler camera) และทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยชุดคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ภาพถ่าย (Polon Store and Bubble measuring program) แล้วนำไปคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะจากสมการ (2.6)

### วิธีการทดลอง

1. เติมน้ำประปาลงในถังปฏิริยาแบบอากาศยกและถังปฏิริยาแบบฟองอากาศที่ระดับความสูง 55 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.1
2. ติดตั้งอุปกรณ์เติมอากาศและอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลอากาศและกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 3.2
3. ทำการเติมอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.2 ลิตรต่ออนาที
4. ถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง และวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ภาพถ่าย
5. วิเคราะห์ขนาดฟองอากาศและคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ
6. ปรับอัตราการเติมอากาศตั้งแต่ 0.3 - 10 ลิตรต่ออนาที

#### ขั้นตอนในการดำเนินการทดลองที่ 3.7.2.1



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาการหาขนาดฟองอากาศและพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ



ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.7.2.1

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความสูงระดับน้ำ	1. 55 เซนติเมตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราการเติมอากาศ	1. 0 - 10 ลิตรต่อนาที
2. ชนิดของถังปฏิกริยา	2. ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกและแบบฟองอากาศ
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ขนาดฟองอากาศ	1. ขนาดฟองอากาศ
2. พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ	2. พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ

## 3.7.2.2 การหาความเร็วของของเหลวของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

การวัดความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ ทำโดยการฉีดสีที่จุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง แล้วจับเวลาที่สีเดินทางระหว่าง 2 จุด ( $t_d$ ) ซึ่งความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศหาได้จากสมการ 3.1)

$$U_{Ld} = \frac{L_d}{t_d} \quad (3.1)$$

โดยที่  $L_d$  คือระยะทางที่สีเดินทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในส่วนไม่เต็มอากาศของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.7.2.2

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความสูงระดับน้ำ	1. 55 เซนติเมตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราการเติมอากาศ	1. 0 - 10 ลิตรต่อนาที
2. ความเข้มข้นของน้ำตัวอย่าง	2. น้ำประปา, 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ	1. ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ

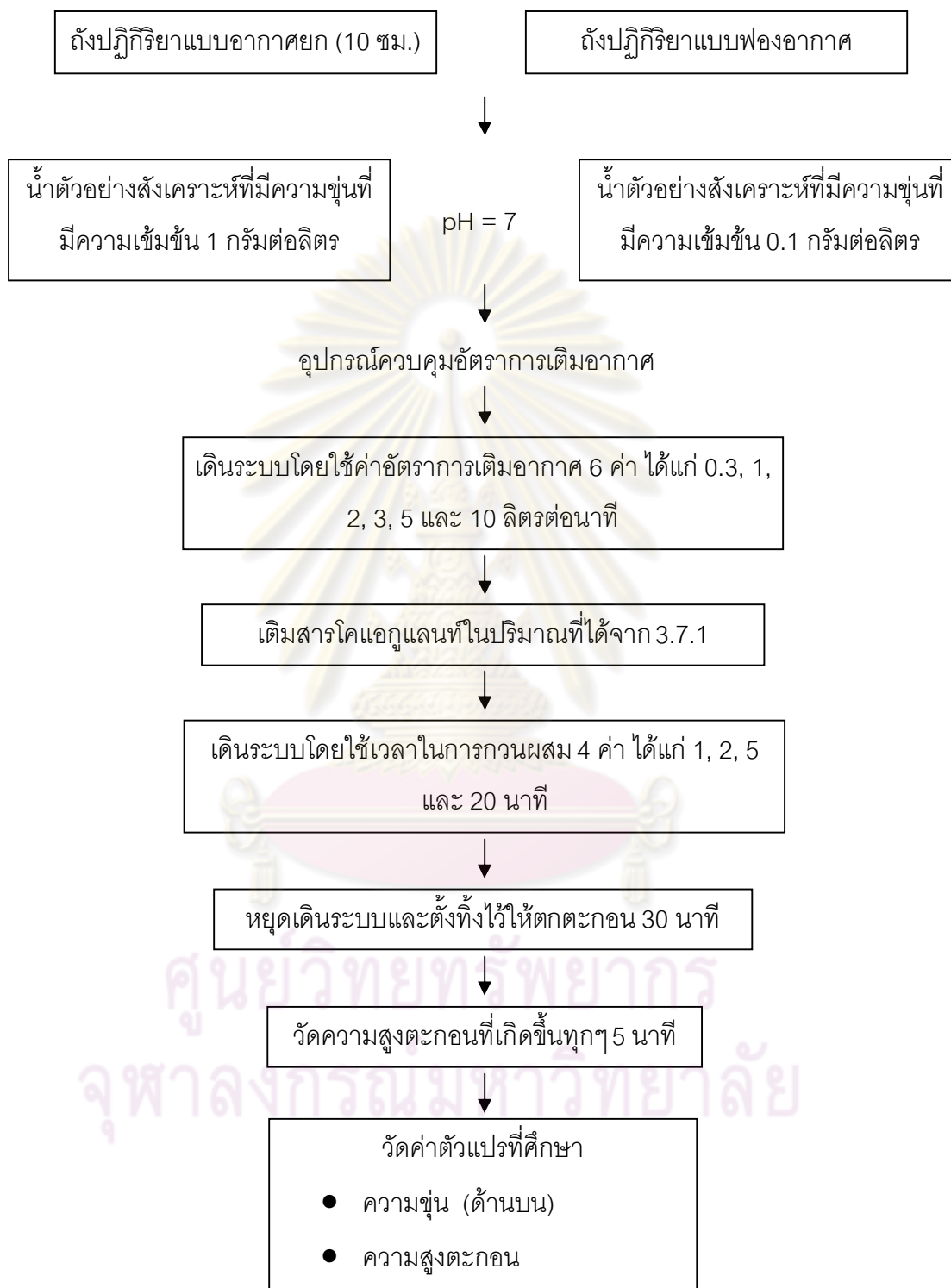
### 3.7.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกและถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

การทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยการศึกษาในชั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (ท่อภายใน 10 ซม.) และถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่นที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยการทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองโดยการเดินระบบแบบกะ (Batch) เวลาในการกวนผสม 1, 2, 5 และ 20 นาที ตกตะกอน 30 นาที อัตราการเติมอากาศ 0.3, 1, 2, 3, 5 และ 10 ลิตรต่อนาที มีการควบคุมปริมาตรของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์จากความสูงของน้ำตัวอย่างจากความสูง โดยควบคุมความสูงที่ 55 เซนติเมตร



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.7.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิริยาแบบอากาศยกและถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิริยาแบบอากาศยกและถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ

### ขั้นตอนในการเดินระบบ

1. นำน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่นที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 ใส่ในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก โดยควบคุมปริมาตรจากความสูงของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ 55 เซนติเมตร
  2. เดินระบบโดยใช้อัตราการเติมอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที
  3. เติมสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) ในปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.7.1
  4. เดินระบบโดยใช้เวลาในการกวนผสม (กวนเร็ว) จากการเติมอากาศเป็นเวลา 1 นาที
  5. หยุดเดินระบบและตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที และวัดความสูงตะกอนที่เกิดขึ้นทุกๆ 5 นาที
  6. นำน้ำใสด้านบนมาวิเคราะห์ความขุ่นและนำตะกอนด้านล่างมาวิเคราะห์
  7. เปลี่ยนอัตราการเติมอากาศในการเดินระบบ ได้แก่ 1, 2, 3, 5 และ 10 ลิตรต่อนาที
  8. เปลี่ยนเวลาในการกวนผสม (กวนเร็ว) ได้แก่ 2, 5 และ 20 นาที
  9. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-8 โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ
  10. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-9 โดยใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่นที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

### ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.7.3

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความสูงระดับน้ำตัวอย่าง	1. 55 เซนติเมตร
2. pH เริ่มต้น	2. 7
3. เวลาในการตกตะกอน	3. 30 นาที
4. สารโคแอกกูแลนต์	4. สารส้ม
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราการเติมอากาศ	1. 0.3, 1, 2, 3, 5 และ 10 ลิตรต่อนาที
2. เวลาในการกวนผสม (กวนเร็ว)	2. 1, 2, 5 และ 20 นาที
3. ความเข้มข้นน้ำตัวอย่างสังเคราะห์	1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ความขุ่น	1. ความขุ่น
2. ความสูงตะกอน	2. ความสูงตะกอน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 4.1 น้ำเสียสังเคราะห์และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยการทดลองจาร์เทสต์

ในส่วนนี้ จะกล่าวถึงลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่นที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ รวมถึงผลการทดลองการกำจัดความขุ่นที่ได้จากกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation-Flocculation process) โดยวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์จาร์เทสต์ (Jar test)

##### 4.1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น

ในการทดลองนี้ จะใช้ผงดินคาโอลิน ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 8.2 ไมครอน (วิจารณ์ ตันติธรรม, 2536) ในการสร้างน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความขุ่น โดยใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 2 ค่า ได้แก่ 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร (ประมาณ 1,200 NTU และ 120 NTU ตามลำดับ) ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบผลกระทบของความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 [มันสิน ตันกุลเวศน์, 2542] ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยใช้สารโคแอกูแลนต์ ได้แก่ สารส้ม ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้ถึงปฏิกริยาแบบต่างๆ ในการกำจัดความขุ่นต่อไป



รูปที่ 4.1 ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

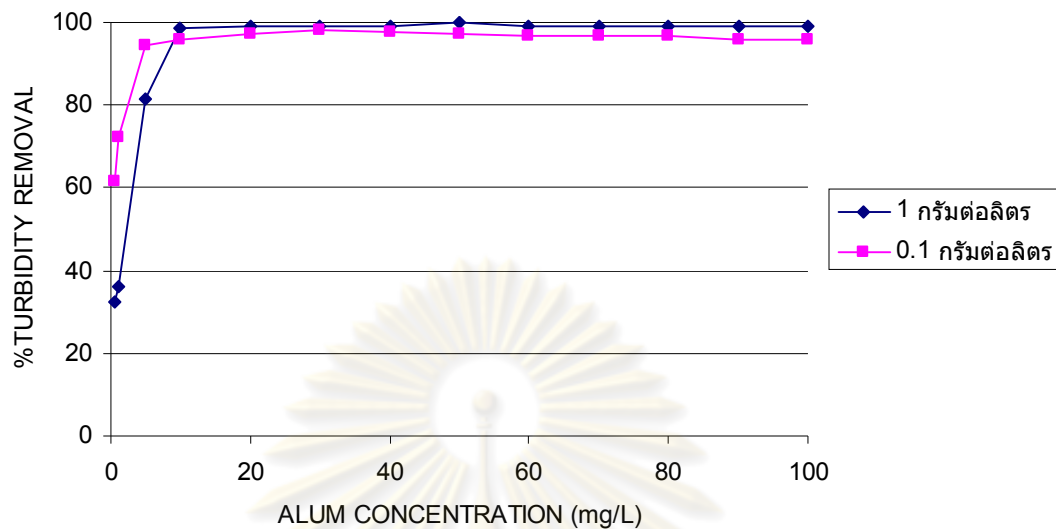


รูปที่ 4.2 ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

##### 4.1.2 การศึกษาความเข้มข้นของสารส้มที่มีความเหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่นในน้ำด้วยการทดลองจาร์เทสต์

การทดลองแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและความเข้มข้นของสารส้ม ในช่วง 0.5-100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการกวนเร็วด้วยความเร็ว

100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที กวนช้า 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที และตั้งทิ้งไว้ ตกตะกอน 30 นาที แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดและความเข้มข้นของสารส้ม

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มสำหรับการกำจัดความขุ่นในน้ำที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ความเข้มข้นของสารส้มเท่ากับ 50 mg/L และ 30 mg/L ตามลำดับ สามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้สูงสุดและผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา (ไม่เกิน 5 NTU) โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 99.78% และ 98.35% ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มขึ้นอีก พบว่าทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่อนข้างคงที่และมีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยประมาณ 1% - 2% เนื่องจากในการทดลองนี้ กลไกการทำลายเสถียรภาพโดยกลไกจับอนุภาคแบบห่อหุ้มอนุภาค (Sweep Coagulation) จะเป็นกลไกหลักในการทำงาน ทำให้การเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (charge reversal) ซึ่งสัมพันธ์กับกลไกการดูดติดผิว/ทำลายประจุมีผลกระทบที่ต่ำกว่า ซึ่งกลไกดังกล่าวนี้โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นภายในเวลา  $10^{-4}$ -1 วินาที (จึงเป็นเรื่องยากที่จะเกิดการทำลายเสถียรภาพได้อย่างสมบูรณ์ในเวลาดังกล่าว) ในขณะที่การทดลองนี้ใช้เวลาในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ คือ 1 นาที นอกจากนี้ ผลเสียจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มที่มากเกินไป นอกจากจะทำให้อนุภาคความขุ่นบางส่วนที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะกลับมามีอยู่ในสภาวะเสถียร (Restabilization) ทำให้เกิดแรงผลักดันระหว่างอนุภาคความขุ่นที่ดูดซับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวก ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจึงค่อนข้างคงที่หรือมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยนั้น กล่าวได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารส้มในการกำจัดความขุ่นโดยไม่จำเป็นอีกทางหนึ่งด้วย ในขณะที่ เมื่อความเข้มข้นของ

สารส้มต่ำเกินไปพบว่าจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีค่าต่ำ เนื่องจากการทำลายเสถียรภาพเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ [มันลิน ตันทุลเวศน์, 2542]

นอกจากนี้ ข้อเสียอีกประการที่สำคัญของกระบวนการนี้คือ ต้องใช้เวลาในการกำจัดและกระบวนการกำจัดความขุ่นหลายขั้นตอน (การกวนเร็ว, กวนช้า และการตกตะกอน) ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการรวมกระบวนการกำจัดความขุ่นดังกล่าวด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยก (ALR) และถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ให้มีขั้นตอนต่างๆในการกำจัดอยู่ในอุปกรณ์การกำจัดเดียวกัน เพื่อเป็นการช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพื้นที่ในการก่อสร้าง รวมไปถึงระยะเวลาในการเดินระบบอีกด้วย โดยค่าความเข้มข้นสารส้มในช่วง 20-50 mg/L สำหรับความขุ่นในน้ำที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร และ 10-30 mg/L สำหรับความขุ่นในน้ำที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร ซึ่งให้ผลการกำจัดความขุ่นค่อนข้างดี (รูปที่ 4.3) จะถูกนำมาใช้ในการกำจัดความขุ่นในการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก (ALR) และถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ต่อไป

## 4.2 การศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและเฟสของเหลวภายในถังปฏิริยาแบบอากาศยกและถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ

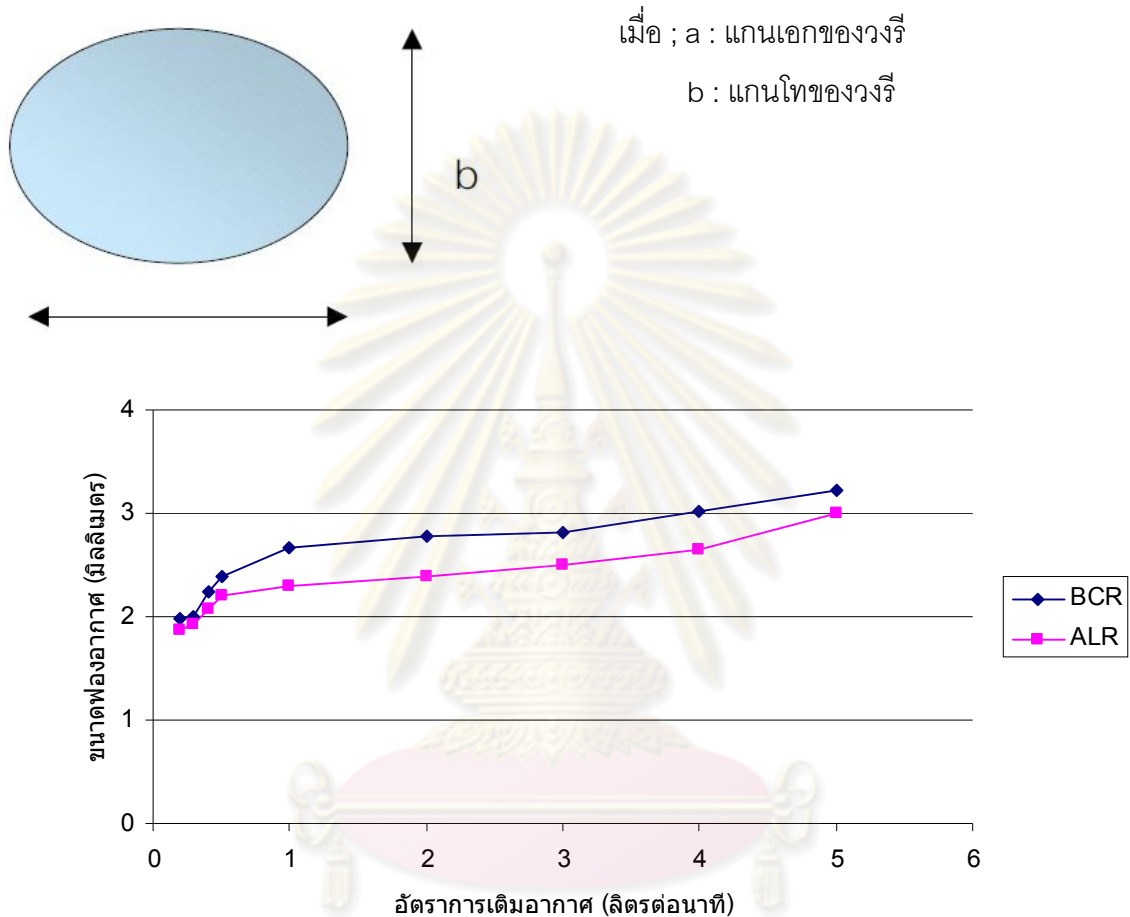
เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ถังปฏิริยาทั้งสองรูปแบบในการกำจัดความขุ่นสำหรับประยุกต์ใช้งานแทนที่กระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation-Flocculation process) นั้น ในขั้นต้นจึงมีความจำเป็นต้องเข้าใจถึงลักษณะหรือรูปแบบการไหลของถังในส่วนของฟองอากาศและของเหลวที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิริยา โดยที่ค่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและของเหลว (Bubble and liquid phase hydrodynamic parameters) ที่ได้มีการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ขนาดฟองอากาศ ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ รวมไปถึงความเร็วในการไหลของของเหลวภายในถังปฏิริยา เป็นต้น

### 4.2.1 การศึกษาขนาดฟองอากาศ ( $d_b$ )

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศและอัตราการเติมอากาศของถังปฏิริยาแบบอากาศยกและถังปฏิริยาแบบฟองอากาศในน้ำตัวอย่างที่ประกอบด้วย 2 เฟส ได้แก่ น้ำและอากาศ โดยถังปฏิริยาที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร สูง 0.80 เมตร ที่ด้านล่างติดตั้งกรวยเพื่อไว้กักเก็บตะกอนสูง 0.30 เมตร ด้านในประกอบด้วยท่อภายในขนาด 0.10 เมตร สูง 0.40 เมตร ติดตั้งตามแนวแกนตรงกลางของถังปฏิริยา เราได้ค่า  $d_b$  จาก

กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง โปรแกรมการวิเคราะห์ภาพถ่าย และหาค่า  $d_{Bi}$  เฉลี่ยของฟองที่ 100-150 ภาพ โดยในกรณีนี้ที่ฟองอากาศไม่เป็นทรงกลมเราสามารถคำนวณตามสมการ (2.9) (ประเสริฐ ภาสันต์, 2547)

$$d_{Bi} = (a^2b)^{1/3} \quad (2.9)$$

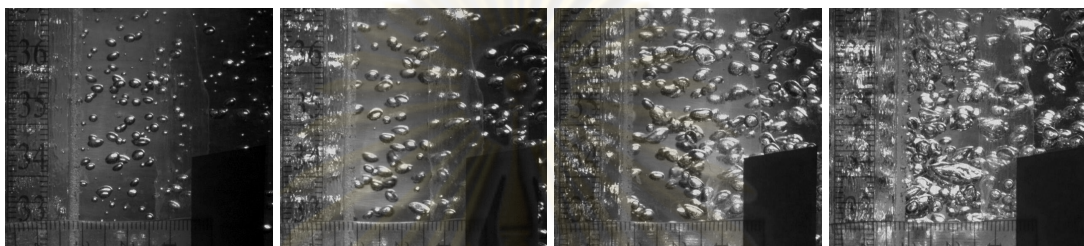


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศและอัตราการเติมอากาศของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 พบว่าที่อัตราการเติมอากาศต่ำๆ (0.2-0.3 ลิตรต่อนาที) ขนาดของฟองอากาศจะมีขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุด (ประเสริฐ ภาสันต์, 2547) เนื่องจากฟองอากาศจะมีการเคลื่อนที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีปฏิกริยาต่อกันน้อยมาก ในขณะที่อัตราการเติมอากาศสูงๆ (0.5-5 ลิตรต่อนาที) ขนาดของฟองอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเติมอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการชนและการรวมตัวกันของฟองอากาศที่มีจำนวนมากขึ้นในระบบ (Painmanakul และคณะ 2005) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 เป็นลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ ตามลำดับ ที่อัตราการเติมอากาศ 0.3, 1, 3 และ



5 ลิตรต่ออนาที นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกและถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ พบว่าขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีขนาดเล็กกว่าในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยสภาพความปั่นป่วนหรือควมผสม (Turbulent and mixing condition) ที่เกิดขึ้นภายในท่อภายใน (Draft tube) ของถัง ALR น่าจะส่งผลต่อการแตกตัวของฟองอากาศภายในบริเวณดังกล่าวซึ่งส่งผลต่อขนาดฟองอากาศที่วิเคราะห์ได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดลองนี้ใช้หัวเติมอากาศชนิดเดียวกันคือหัวเติมอากาศแบบแข็ง (Rigid Orifice) ซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดของฟองอากาศภายในถังปฏิกริยาทั้งสองชนิด ดังนั้น ขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจึงไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



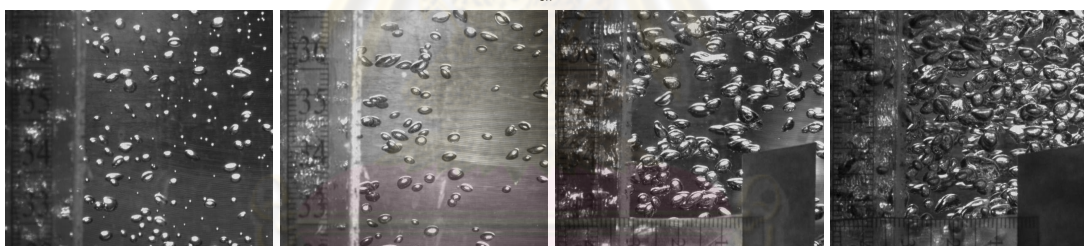
(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 4.5 ลักษณะของฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.3(ก), 1(ข), 3(ค) และ 5(ง) ลิตรต่ออนาทีตามลำดับ ในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 4.6 ลักษณะของฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศ 0.3(ก), 1(ข), 3(ค) และ 5(ง) ลิตรต่ออนาทีตามลำดับ ในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

#### 4.2.2 การศึกษาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (a)

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะและอัตราการเติมอากาศของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกและถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ โดยค่า a สามารถคำนวณตามหัวข้อ 2.3.5.3 จากสมการ (2.11), (2.12) และ (2.13) และในการทดลองนี้จะทำการคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในบริเวณที่มีฟองอากาศเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7



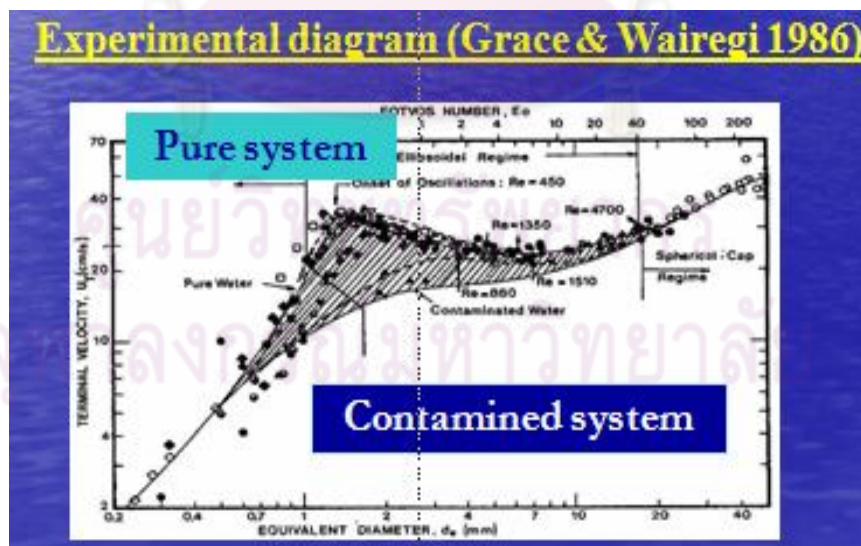
รูปที่ 4.7 ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะของถังปฏิกริยาแบบอากาศยกและถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} = \frac{6Q_G}{\pi D^3_B} \quad (2.11)$$

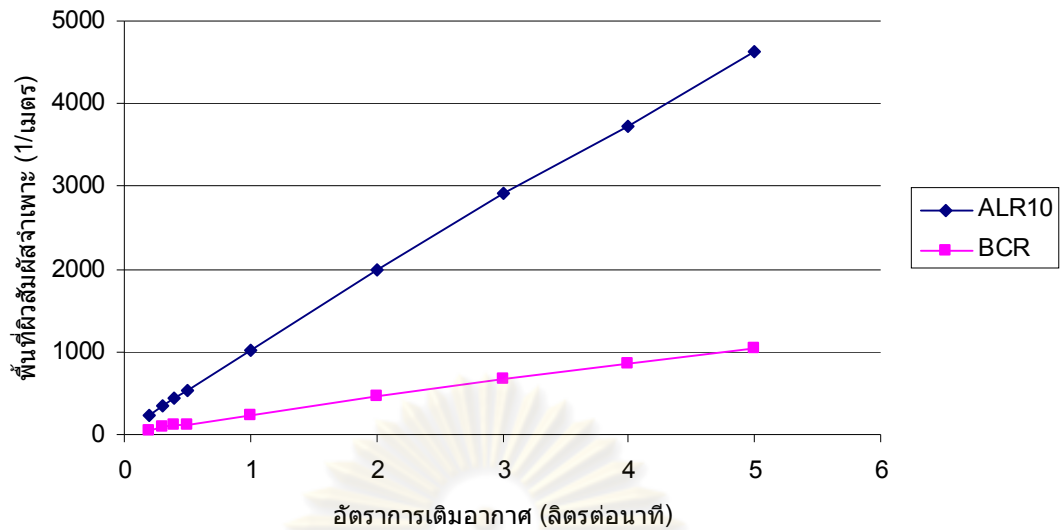
$$a = N_B \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} = f_B \times \frac{H_L}{U_B} \times \frac{S_B}{V_{TOTAL}} \quad (2.12)$$

$$S_B = \pi d^2 \quad (2.13)$$

โดยที่ค่า  $U_B$  หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับความเร็วที่เกิดฟอง (Grace & Wairegi, 1986) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับความเร็วที่เกิดฟอง (Grace & Wairegi, 1986)



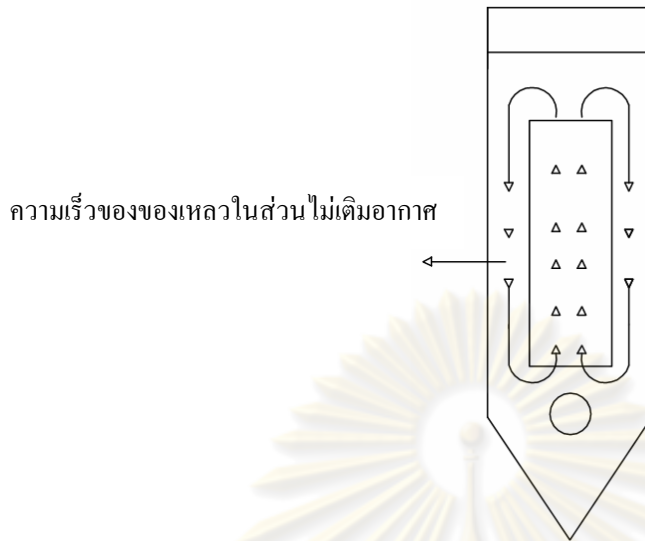
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะและอัตราการเติมอากาศของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 พบว่า ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) แปรผันตรงกับจำนวนฟองอากาศ ( $N_B$ ) ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ โดยที่ค่า  $a$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเติมอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า  $a$  ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกมีค่าสูงกว่าถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ เนื่องจากผลการคำนวณค่า  $a$  จากสมการ (2.11) ที่มีความแตกต่างกันในส่วนของปริมาตรของของเหลว ( $V_{TOTAL}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 อีกทั้งค่า  $a$  น่าจะส่งผลต่อการกวนผสมสารเคมี กล่าวคือ ถ้า  $a$  มีค่ามากจะทำให้โอกาสการสัมผัสกันของสารเคมี อนุภาคความขุ่นและฟองอากาศ เกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้ความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งต้องการค่าความเร็วเกรเดียนท์สูงๆ ในเวลาต่ำๆ เกิดขึ้นได้ดีด้วย [มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2539] นอกจากนี้ ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกน่าจะประหยัดพลังงานในการกวนผสมเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศที่อัตราการเติมอากาศที่เท่าๆกัน โดยสามารถให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสและการกวนผสมที่สูงกว่า

#### 4.2.3 การศึกษาค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ ( $U_{Ld}$ )

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศและอัตราการเติมอากาศของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ในน้ำตัวอย่าง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำประปา น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยค่า  $U_{Ld}$  สามารถคำนวณได้ในหัวข้อ 2.3.5.3 ตามสมการ (2.14)

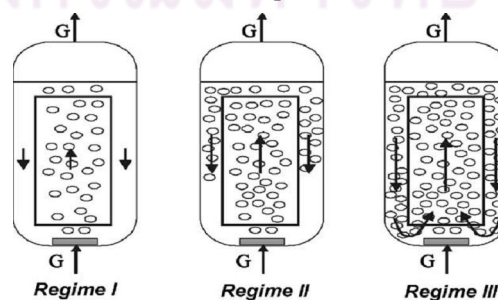
$$U_{Ld} = \frac{L_d}{t_d} \quad (2.14)$$



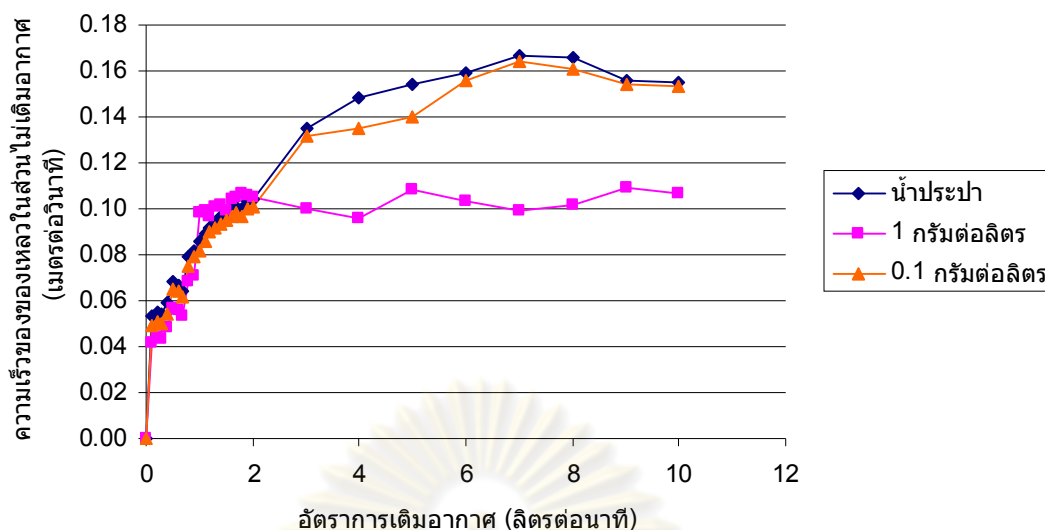
รูปที่ 4.10 ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ

โดยที่ค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแบ่งขอบเขตการไหล (Flow regime) ภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการค่าความเร็วในการไหลวนที่เหมาะสมในการกวนผสมและการวนกลับของปริมาณสารเคมีภายในระบบบำบัดทั้งในส่วนเต็มอากาศและส่วนไม่เต็มอากาศ กล่าวคือ

- ขอบเขตการไหลที่ 1 : เกิดขึ้นที่อัตราการเติมอากาศต่ำๆ ทำให้ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศไม่เพียงพอสำหรับการนำพาฟองอากาศเข้าสู่ส่วนไม่เต็มอากาศ
- ขอบเขตการไหลที่ 2 : เกิดขึ้นที่อัตราการเติมอากาศที่สูงขึ้น โดยที่ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศมีค่าเท่ากับความเร็วฟองที่ลอยขึ้น (Bubble swarm riser velocity) ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นในส่วนไม่เต็มอากาศ และการเปลี่ยนแปลงจากขอบเขตนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเป็นเรื่องที่ยากในการหาจุดเปลี่ยนขอบเขตการไหลที่ 3 ที่ซึ่งเกิดการไหลวนของฟองอากาศอย่างสมบูรณ์ (M. Blazej และคณะ, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ขอบเขตการไหลของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (M. Blazej และคณะ, 2004)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศและอัตราการเติมน้ำของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก

อย่างไรก็ตาม ในทางทฤษฎีเราสามารถประยุกต์ใช้ค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศที่สัมพันธ์กับอัตราการเติมน้ำต่าง ๆ นั้น เพื่อแบ่งขอบเขตการไหลของเฟสของไหลภายในถัง ALR ได้ (M. Blazej และคณะ, 2004) โดยจากผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 ทำให้สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า

- ระบบที่ใช้น้ำประปามีขอบเขตการไหลที่ 1 ในช่วงอัตราการเติมน้ำ 0.1-2 ลิตรต่ออนาที และขอบเขตการไหลที่ 2 ตั้งแต่ค่าอัตราการเติมน้ำ 3 ลิตรต่ออนาทีขึ้นไป
- ระบบที่ใช้น้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร มีขอบเขตการไหลที่ 1 ในช่วงอัตราการเติมน้ำ 0.1-0.9 ลิตรต่ออนาที และขอบเขตการไหลที่ 2 ตั้งแต่ค่าอัตราการเติมน้ำ 1 ลิตรต่ออนาทีขึ้นไป
- ระบบที่ใช้น้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร มีขอบเขตการไหลที่ 1 ในช่วงอัตราการเติมน้ำ 0.1-2 ลิตรต่ออนาที และขอบเขตการไหลที่ 2 ตั้งแต่ค่าอัตราการเติมน้ำ 3 ลิตรต่ออนาทีขึ้นไปเช่นเดียวกับระบบที่ใช้น้ำประปา

จากผลการทดลองจึงกล่าวได้ว่า ของแข็งแขวนลอยในน้ำสามารถส่งผลต่อค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศที่ใช้ในการแบ่งขอบเขตการไหลของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก โดยที่อัตราการเติมน้ำต่างๆจะมีค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศที่ใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่ออัตราการเติมน้ำมีค่าสูงๆ และยังสามารถเห็นได้ชัดกว่าที่ขอบเขตการไหลที่ 2 นั้นมีค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเดินระบบที่อัตราการเติมน้ำที่สูงมากๆ เมื่อต้องการการหมุนเวียนปริมาณ

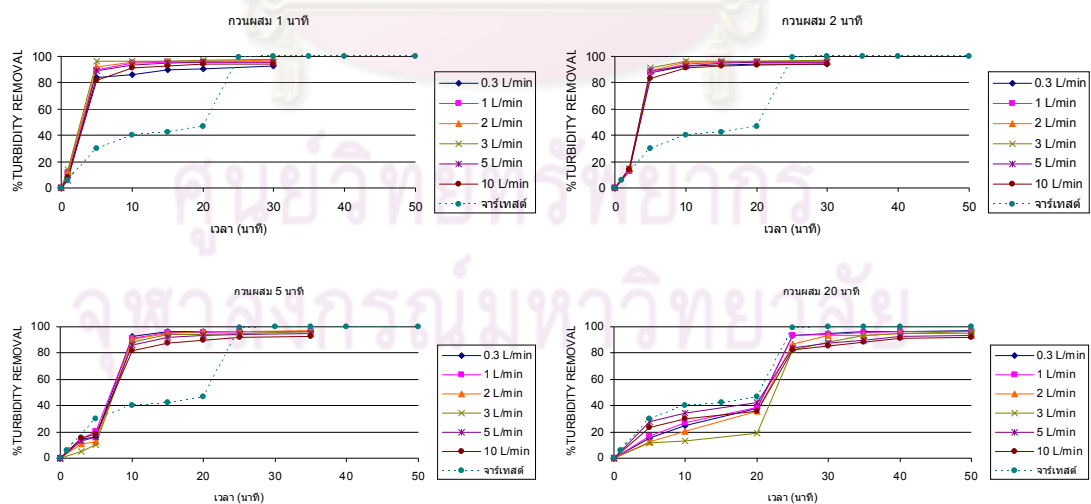
สารเคมีหรือของเหลวภายในถัง ALR ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานไปอีกทางหนึ่งด้วย ทั้งนี้การแบ่งขอบเขตการไหลจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดขุ่นต่อไป

#### 4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Airlift reactor) และถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column)

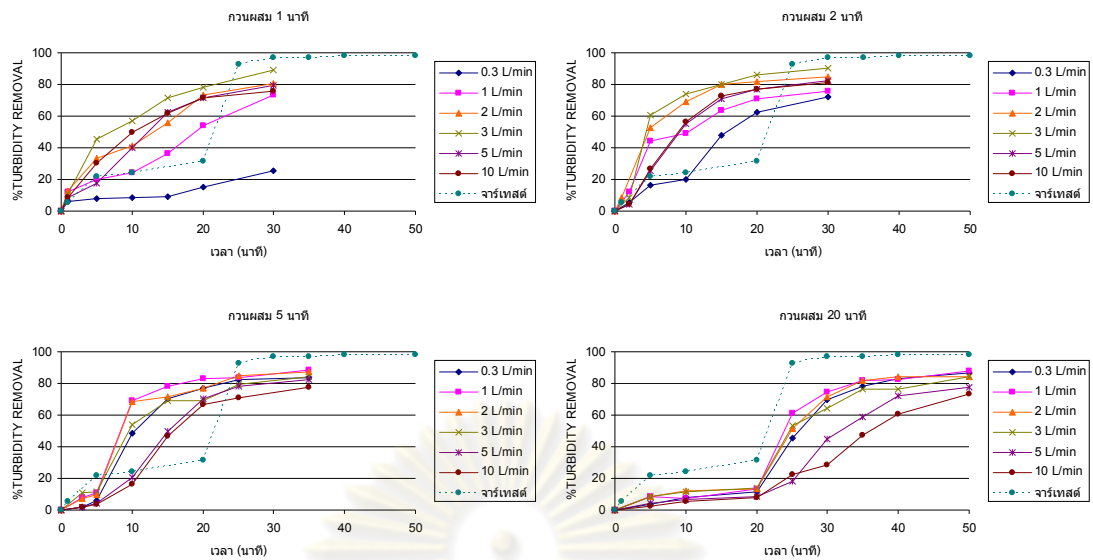
ในส่วนนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการกำจัดความขุ่นในน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์ 2 รูปแบบ ได้แก่ ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ALR) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและท่อภายใน (Draft tube) เท่ากับ 20 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ และถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (BCR) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 20 เซนติเมตร โดยเดินระบบแบบทีละเท (Batch process) ที่เวลาในการกวนเร็วเพื่อผสมสารเคมีต่างๆ (1, 2, 5 และ 20 นาที) และอัตราการเติมอากาศต่างๆ (0.3, 1, 2, 3, 5 และ 10 ลิตรต่อนาที) โดยกำหนดให้มีการตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาทีในทุกๆ การทดลอง

##### 4.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำสังเคราะห์ (ความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร)

รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 10 เซนติเมตร (ALR<sub>10</sub>)



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.13 พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่ได้จากการเดินระบบในทุกรูปแบบนั้น จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันในช่วงร้อยละ 92 ถึง 98 และรูปที่ 4.14 จะมีค่าที่แตกต่างกันในช่วงร้อยละ 25 ถึง 91 ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกเพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำที่เวลากวนผสมและอัตราการเติมอากาศต่างๆ สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ช่วง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- ช่วงที่ 1 ระยะเวลาการกวนเร็วเพื่อผสมสารเคมี (Rapid mixing period) พบว่า ทั้ง 2 ความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในช่วงนี้จะมีค่าค่อนข้างต่ำและจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการกวนผสมสารเคมีภายในถังปฏิกรณ์ ALR โดยกล่าวได้ว่าจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในท่อภายใน รวมถึงการไหลวนของเหลวภายในของถังปฏิกรณ์ (Liquid recirculation in ALR reactor) ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารส้มและอนุภาคความขุ่น รวมถึงเกิดการกลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคตะกอนความขุ่นขึ้น อย่างไรก็ตาม ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นสามารถส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของค่าประสิทธิภาพโดยรวมและยังเป็นข้อจำกัดในการรวมอนุภาค (สร้างฟล็อก) รวมถึงการตกตะกอนในช่วงของการบำบัดต่อไป เนื่องจากการไหลวนที่เกิดขึ้นยังทำให้เกิดกลไกการสร้างฟล็อกแบบ Perikinetic Flocculation เพื่อสร้างสัมผัสในการรวมตะกอนความขุ่นให้มีขนาดใหญ่ ในขณะที่เดินระบบในช่วงที่ 1 อีกทางหนึ่งด้วย

- ช่วงที่ 2 ระยะการรวมและตกตะกอนของอนุภาค (Flocculation and sedimentation period) โดยที่ความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ 1 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาประมาณ 5 นาที เนื่องจากหลังจากหยุดเติมอากาศทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคความขุ่นที่ถูกทำลายเสถียรภาพและตกตะกอนแยกออกจากน้ำสังเคราะห์ ในขณะที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในช่วงนี้เกิดขึ้นค่อนข้างช้า ด้วยเหตุที่ว่าความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างเคราะห์มีค่าต่ำทำให้ความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคความขุ่นดังกล่าวลดลงด้วย นอกจากนี้ ในกรณีที่เพิ่มระยะเวลาการผสมสารเคมี พบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราการเติมอากาศส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกันมากกว่าที่ระยะเวลาการผสมต่างๆ โดยอาจเป็นผลมาจากกลไกการสร้างฟล็อกแบบ Perikinetic Flocculation โดยที่แตกต่างกันตามอัตราการเติมอากาศที่เลือกใช้เพื่อการผสมสารเคมี
- ช่วงที่ 3 ระยะคงตัวของประสิทธิภาพการบำบัด (Steady-state treatment period) สำหรับความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ในช่วงนี้พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเข้าสู่ค่าคงที่(มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 80 ถึงร้อยละ 98) โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ได้ที่ต่ำกว่าการทดลองจาร์เทสต์ น่าจะเป็นผลจากการที่ในระบบนี้ไม่มีการกวนซ้ำ (20 นาที) เพื่อสร้างโอกาสในการสัมผัสระหว่างอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพด้วยพลังงานภายนอก โดยที่กลไกการผสมสารเคมีและการรวมตัวของอนุภาคจากช่วงที่ 1 และ 2 ส่งผลกระทบต่อทั้งค่าประสิทธิภาพบำบัดสูงสุดรวมถึงอัตราเร็วในการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าว ในขณะที่ ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นและอยู่ในช่วงที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระยะเวลาการผสม 1 นาที ซึ่งน่าจะสัมพันธ์กับข้อจำกัดในการทำลายเสถียรภาพที่เกิดขึ้น เนื่องจากจำนวนเป้า (Target) ที่ต่ำ ทำให้ความปั่นป่วนและระยะเวลาการผสมที่ประยุกต์ใช้นั้นไม่เหมาะสม เหมือนในกรณีที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีจำนวนเป้าสัมผัสสูงๆ

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากเวลาการเติมอากาศ (1, 2, 5 และ 20 นาที) เพื่อการผสมสารเคมีพบว่า ที่เวลาการเติมอากาศ 1 และ 2 นาที อัตราการเติมอากาศ 3 ลิตรต่อนาทีนั้น จะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงที่สุดประมาณร้อยละ 98 และร้อยละ 91 สำหรับน้ำสังเคราะห์ความขุ่น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยที่ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่แตกต่างกันนั้นน่าจะมีสาเหตุมาจากปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่นที่สามารถ



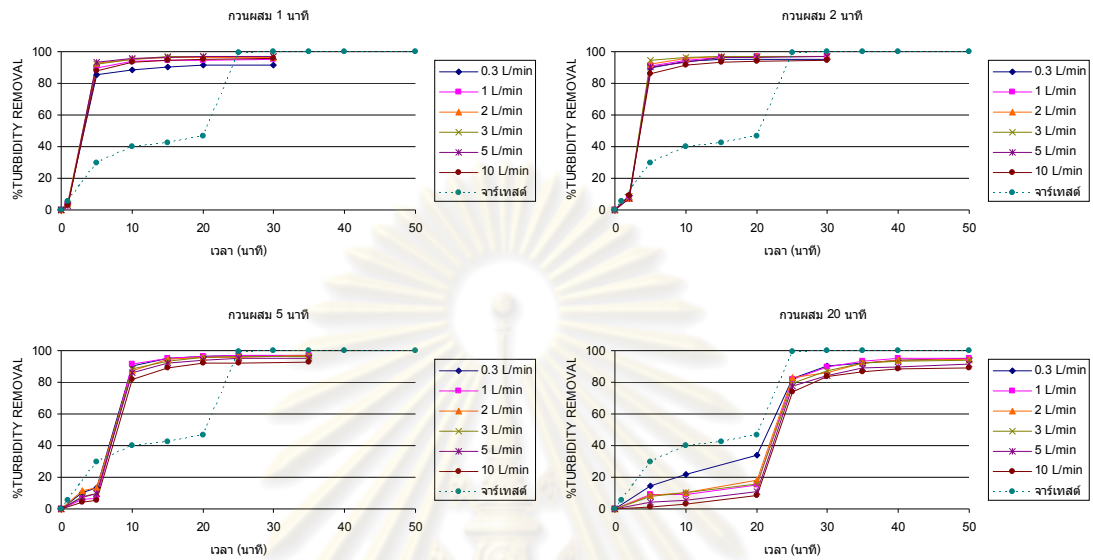
เป็นเป้าหมาย (Target) สำหรับสารโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม) ในการเกิดกลไกห่อหุ้มคอลลอยด์ (Sweep floc Coagulation) ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ เวลาในการกวนผสมสารเคมีเท่ากับ 1 นาทีนั้น กล่าวได้ว่า สอดคล้องกับเวลาที่ใช้ในการกวนเร็วเพื่อทำลายเสถียรภาพสำหรับกระบวนการบำบัดทางเคมีทั่วไป (1-2 นาที) [มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2539] และเมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราการเติมอากาศต่างๆ โดยแบ่งตามขอบเขตการไหลที่สอดคล้องกับการศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ภายในถัง ALR จะพบว่าที่อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสม (3 ลิตรต่อนาที) จัดอยู่ในขอบเขตการไหลแบบที่ 2 (Type 2 of flow regime) ซึ่งเกิดการไหลวนของของเหลว รวมถึงสารเคมีภายในถังปฏิบัติการ นอกจากนี้ที่อัตราการเติมอากาศดังกล่าวน่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient, G) ซึ่งทำให้เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคตะกอนความขุ่นอย่างเหมาะสม โดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าวพบที่สามารถเกิดได้ทั้งกับน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันได้อย่างชัดเจน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าค่าความขุ่นเริ่มต้น อัตราการเติมอากาศและระยะเวลาในการกวนผสมนั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยรวมของการประยุกต์ใช้ถังปฏิบัติการแบบอากาศยก

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจาร์เทสต์ที่สภาพการทำงานที่เหมาะสม (ค่าพีเอชและความเข้มข้นสารส้มเท่ากับ 7 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) พบว่ามีค่าประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ การเลือกใช้ถัง ALR นั้นสามารถลดเวลาในการกำจัดความขุ่น (31 นาที) ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ได้เมื่อเทียบกับการกำจัดความขุ่นในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ด้วยการทดลองแบบจาร์เทสต์ (51 นาที) ที่ต้องการระยะเวลาในการกวนช้าเพื่อการรวมตะกอนเพื่อสร้างฟล็อกสำหรับการตกตะกอนในขั้นต่อไป โดยในส่วนต่อไปจะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ได้จากถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ (Bubble column) เพื่อพิจารณาถึงกลไกการกำจัดความขุ่นที่เกิดขึ้นซึ่งอาจมีความแตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพของถังปฏิบัติการที่เลือกใช้

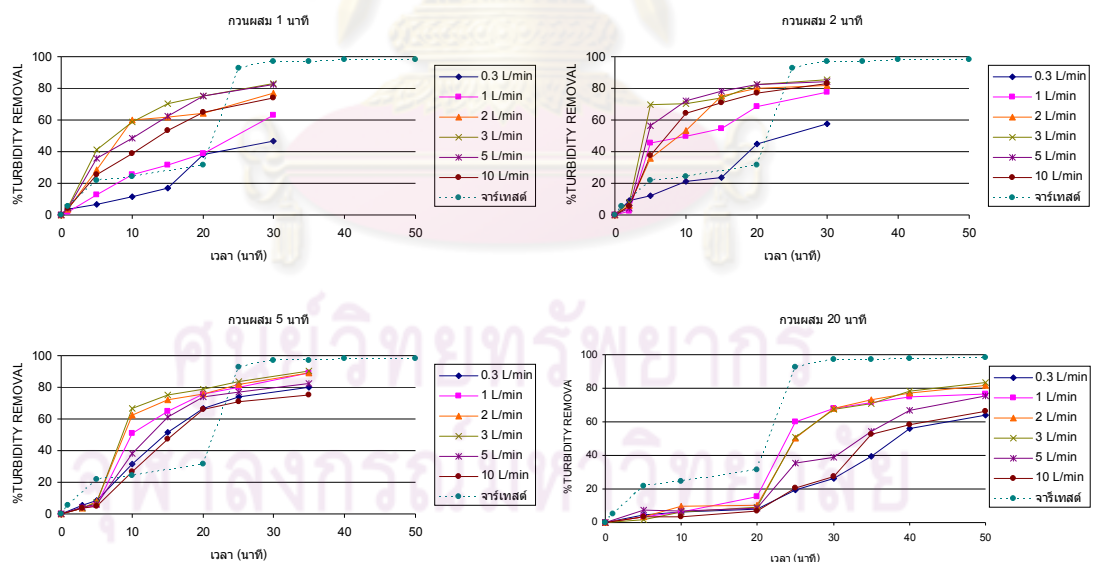
#### 4.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ

รูปที่ 4.15a และ 4.15b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและเวลาการทำงานของถังกำจัดความขุ่นที่เวลาในการกวนเร็วเพื่อผสมสารเคมีต่างๆ (1, 2, 5 และ 20 นาที) และอัตราการเติมอากาศ 0.3, 1, 2, 3, 5 และ 10 ลิตรต่อนาที แล้วตั้งทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความขุ่นที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยประยุกต์ใช้ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ ซึ่งพบว่าให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่อนข้างแตกต่างกัน ในช่วงประมาณ 89%-97% และ 45%-90% ตามลำดับ โดยพบว่าที่

ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ใช้ อัตราการเติมอากาศ 5 ลิตรต่อนาที และเวลาทวนเร็วเพื่อทวนผสม สารเคมี 1 นาที ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงที่สุด และที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร ใช้ อัตราการเติมอากาศ 3 ลิตรต่อนาที และเวลาทวนเร็วเพื่อทวนผสมสารเคมี 5 นาที ให้ค่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงที่สุด



รูปที่ 4.15a ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อ ลิตร



รูปที่ 4.15b ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัม ต่อลิตร

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศเพื่อ กำจัดความขุ่นในน้ำ ที่เวลาทวนผสมและอัตราการเติมอากาศต่างๆ ทั้ง 2 ความเข้มข้น แบ่งได้

ออกเป็น 3 ช่วง เช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยก และประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเช่นกัน แต่จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ต่ำกว่าถังปฏิริยาแบบอากาศยกเล็กน้อย โดยที่ถังปฏิริยาแบบฟองอากาศจะต้องใช้เวลาในการกวนผสมสารเคมีและอัตราการเติมอากาศที่สูงกว่าถังปฏิริยาแบบอากาศยก เนื่องจากถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ มีความสามารถในการกวนผสมที่ดีกว่าถังปฏิริยาแบบอากาศยก ด้วยเหตุที่ว่าถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ มีพื้นที่ในส่วนเติมอากาศที่มากกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ในส่วนการวิเคราะห์ค่าอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ รวมไปถึงไม่มีการไหลวนของของเหลวภายในถังปฏิริยาแบบฟองอากาศ จึงทำให้เกิดการสัมผัสกัน (mixing) ระหว่างสารส้ม อนุภาคความขุ่น และฟองอากาศได้ไม่ดี จึงทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคตะกอนความขุ่นลดลง เป็นเหตุให้เมื่อหยุดเติมอากาศ ประสิทธิภาพในขั้นตอนของการกวนช้าเพื่อรวมตะกอนลดลงไปด้วย

#### 4.3.3 ผลกระทบจากค่าความเร็วเกรเดียนต์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ค่าความเร็วเกรเดียนต์ (G) หมายถึง ความปั่นป่วนของน้ำซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการกวนผสมของระบบบำบัดโดยการเปลี่ยนแปลงของค่า G จะขึ้นอยู่กับอัตราการเติมอากาศ สามารถคำนวณตามสมการ (2.6) และ (2.7)

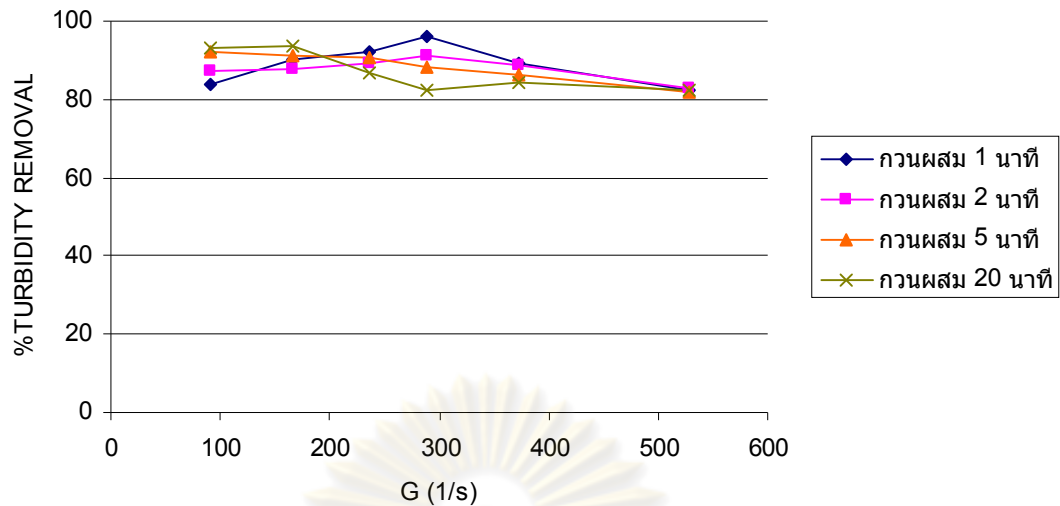
$$G = \left( \frac{P}{uV} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

$$P = C_1 Q_G \log \left( \frac{(h + C_2)}{C_2} \right) \quad (2.7)$$

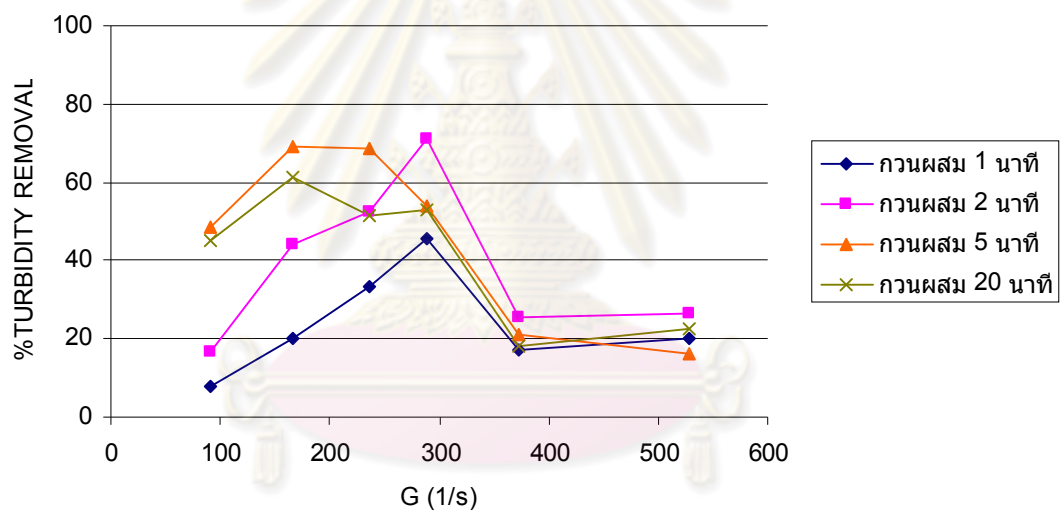
โดยในการทดลองนี้จะนำค่าความเร็วเกรเดียนต์ในการกวนผสมสารเคมีมาพล็อตกับประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นหลังจากหยุดเติมอากาศเพื่อกวนผสมสารเคมีเป็นเวลา 5 นาที เนื่องจากการทดลองนี้ทำการศึกษาผลกระทบจากค่าความเร็วเกรเดียนต์ต่อการรวมตัวของอนุภาคความขุ่นที่ถูกทำลายเสถียรภาพ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยรวมในที่สุด

##### 4.3.3.1 ถังปฏิริยาแบบอากาศยก

รูปที่ 4.16a และ 4.16b แสดงผลการศึกษาลักษณะของค่าความเร็วเกรเดียนต์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 10 เซนติเมตร ( $ALR_{10}$ )



รูปที่ 4.16a ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วเกรเดียนท์ในการกวนผสมของการกำจัดความขุ่นที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.16b ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วเกรเดียนท์ในการกวนผสมของการกำจัดความขุ่นที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

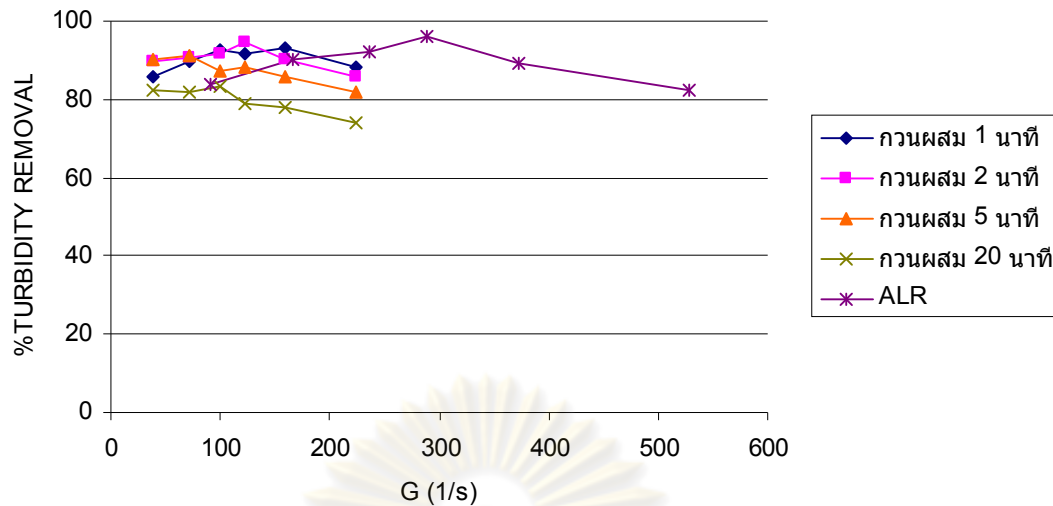
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.16 พบว่ากรณีที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1 กรัมต่อลิตรค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่มีผลค่อนข้างน้อยต่อค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยที่ค่าความเร็วเกรเดียนท์ประมาณ 290 1/s ให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุด เนื่องจากจำนวนเป้าหมาย (Target) ของอนุภาคจำนวนมากเกิดการรวมตัวของฟล็อกได้ดีและตกตะกอน โดยไม่มีความจำเป็นต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการเดินระบบที่อัตราการเติมอากาศสูงๆ ส่งผลให้เป็นการประหยัดพลังงานได้อีกทางหนึ่ง ในขณะที่ กรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 กรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด

ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ความเร็วเกรเดียนท์ในการกวนผสมเท่ากับ 290 (1/s) สามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นได้สูงสุด โดยให้ประสิทธิภาพในการ 70.87% ทั้งนี้เมื่อเพิ่มค่าความเร็วเกรเดียนท์ขึ้นอีก พบว่ามีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นลดลง อาจเนื่องมาจากกลไกการไหลวนภายในของถังปฏิบัติการแบบอากาศยก (ประเสริฐ ภาวสันต์, 2547) ทำให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์ในการกวนผสมที่มากเกินไป และเกิดความปั่นป่วนในส่วนเติมอากาศมีค่าสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนในส่วนไม่เติมอากาศมีค่าสูงขึ้นด้วย เป็นผลให้อุณหภูมิความชื้นที่ถูกทำลายเสถียรภาพในส่วนไม่เติมอากาศแล้วเกิดการแตกตัวออกจากกัน จึงไม่สามารถรวมตัวเป็นฟล็อกในส่วนไม่เติมอากาศแล้วตกตะกอนได้อย่างเหมาะสม ซึ่งต่างจากกรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 กรัมต่อลิตร ที่กล่าวข้างต้น นอกจากนี้เมื่อค่าความเร็วเกรเดียนท์ต่ำเกินไปพบว่าทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความชื้นมีค่าต่ำ ทำให้ความปั่นป่วนในส่วนเติมอากาศและส่วนไม่เติมอากาศมีค่าต่ำไปด้วย เป็นผลให้การทำลายเสถียรภาพเกิดได้ไม่สมบูรณ์และไม่เกิดการรวมตัวของฟล็อกเพื่อตกตะกอนได้ ตามลำดับ

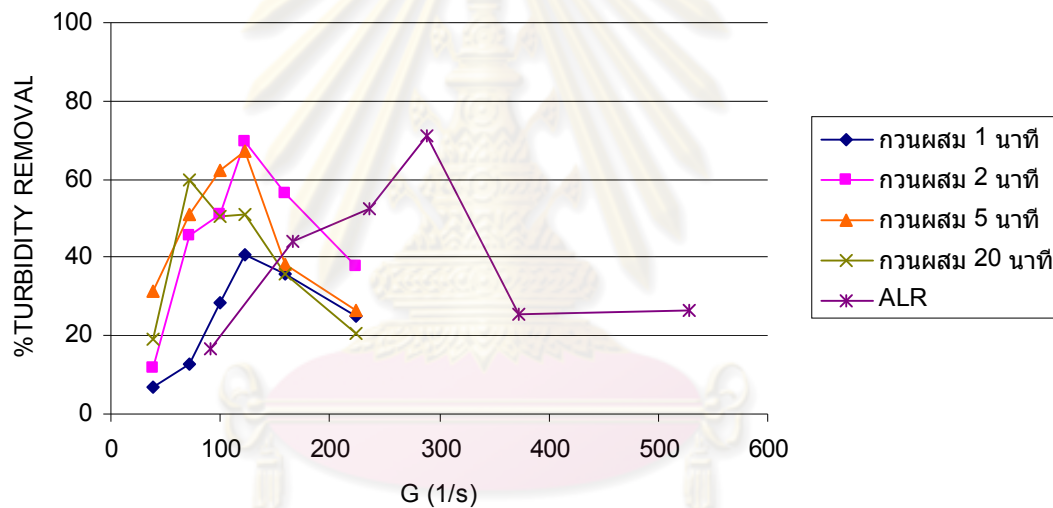
#### 4.3.3.2 ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ

รูปที่ 4.17a และ 4.17b แสดงผลการศึกษาลักษณะของค่าความเร็วเกรเดียนท์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการกวนผสมสารเคมี คือ 123 1/s (3 L/min) โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 94.76% และ 69.57% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้เช่นกัน โดยที่ค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่ได้ในกรณีนี้มี พบว่ามีค่าที่ต่ำกว่ากรณีของถังปฏิบัติการแบบอากาศยก ทั้งนี้จะเป็นผลมาจากปริมาตรเฟสน้ำภายในระบบที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.7 (ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการกวนผสม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17a ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วเกรเดียนท์ในการกวนผสมของการกำจัดความขุ่นที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

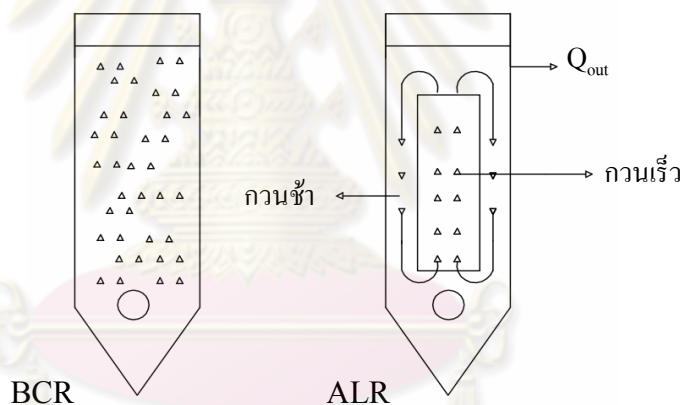


รูปที่ 4.17b ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วเกรเดียนท์ในการกวนผสมของการกำจัดความขุ่นที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.17 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก แต่จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ต่ำกว่า เนื่องจากถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศไม่มีการไหลวนของของเหลวภายในและมีค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่ต่ำกว่าถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ( $123 \text{ (1/s)} < 290 \text{ (1/s)}$ ) จึงทำให้ความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นจากการกวนผสมลดลงไปด้วย จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าต่ำกว่าถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก โดยที่ถ้าต้องการค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกันระหว่างถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศและถัง

ปฏิกิริยาแบบอากาศยกนั้น อาจจำเป็นต้องเลือกใช้ระยะเวลาการกวนผสมที่นานขึ้น ดังจะเห็นได้ในกรณีของถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศต้องใช้เวลา 2 นาที ในขณะที่ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกใช้เวลา 1 นาที ก็เพียงพอ

ดังนั้น จึงกล่าวโดยสรุปได้ว่าถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกมีความสามารถในการกวนผสมสารเคมีที่สูงกว่าถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ เนื่องจากที่อัตราการเติมอากาศที่เท่ากันนั้น ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก (ALR) จะให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่สูงกว่าถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ (BCR) เป็นผลให้ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกมีความปั่นป่วนของน้ำซึ่งเป็นค่าที่บอกระดับความสามารถในการกวนผสมของระบบที่สูงกว่าถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังมีการไหลวนภายในถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก ทำให้เกิดการกวนเร็วในส่วนเติมอากาศและเกิดการกวนช้าในส่วนไม่เติมอากาศ จึงความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบแบบต่อเนื่องได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ลักษณะการไหลของของเหลวภายในถังปฏิกิริยาแบบฟองอากาศและถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก

ศูนย์วิจัยที่ปรึกษา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเร็วเกรเดียนท์ของถังปฏิบัติการแบบอากาศยกและถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

อัตราการเติมอากาศ (ลิตรต่อนาที)	ความเร็วเกรเดียนท์ (G, 1/s)		
	BCR	ALR	Jar test
0.3	38.9251	91.3618	183.08
1	71.0672	166.812	183.08
2	100.504	235.968	183.08
3	123.092	288.927	183.08
5	158.911	373.003	183.08
10	224.754	527.506	183.08

โดยที่ค่าความเร็วเกรเดียนท์ของการกวนผสมด้วยวิธีจาร์เทสต์ (Jar test) หาได้จากสมการ (4.1) และ (4.2)

$$\text{กวนช้า} \quad P = C_D A \rho \frac{v^3}{2} \quad (4.1)$$

$$\text{กวนเร็ว} \quad P = K_T n^3 D_i^5 \rho \quad (4.2)$$

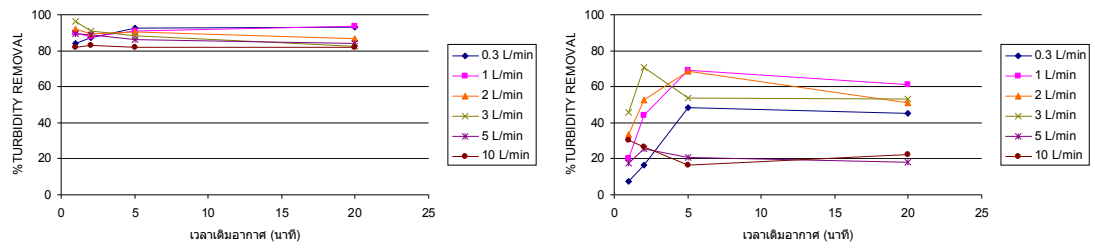
#### 4.3.4 ผลกระทบจากค่าเวลากวนเร็วต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

##### 4.3.4.1 ถังปฏิบัติการแบบอากาศยก

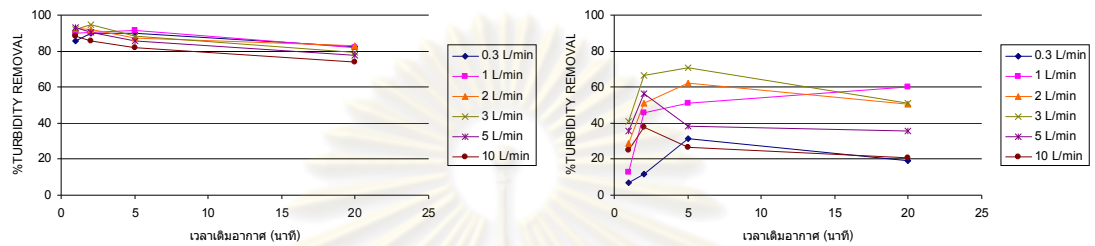
รูปที่ 4.19 แสดงผลการศึกษามลกระทบของค่าเวลากวนเร็วต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิบัติการแบบอากาศยก ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลาการกวนเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในการกวนผสมสารเคมี คือ 1 นาที และ 2 นาที โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 96.19% และ 70.87%, ตามลำดับ และถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศใช้เวลาในการกวนผสม คือ 2 และ 5 นาที โดยใช้ประสิทธิภาพในการกำจัด 94.76% และ 70.69% ตามลำดับ



### ถังปฏิบัติการแบบอากาศยก



### ถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ



1 กรัมต่อลิตร

0.1 กรัมต่อลิตร

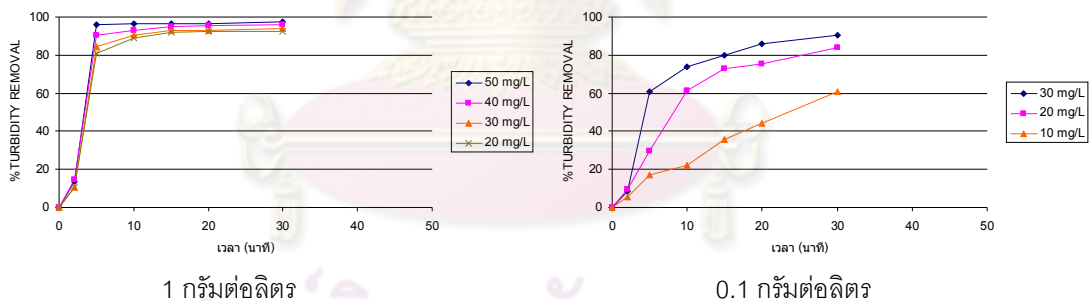
รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิบัติการแบบอากาศยกและถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศ

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าในกรณีที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1 กรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าที่เวลาการกวนผสมต่ำๆ นั้น จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่สูง เนื่องจากโอกาสการสัมผัสกันของสารเคมี อนุภาคความขุ่นและฟองอากาศเกิดขึ้นได้ดีอยู่แล้วอันเนื่องมาจากเป่าสัมผัสจำนวนมาก โดยที่ผลกระทบของเวลาการกวนผสมในกรณีของถังปฏิบัติการแบบอากาศยกมีน้อยกว่าถังปฏิบัติการแบบฟองอากาศซึ่งมีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะในกรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร เนื่องจากฟองที่เกิดขึ้นภายในถัง BCR นั้นไปทำลายฟล็อกที่เกิดขึ้นและขัดขวางการแยกออกจากกันด้วยการตกตะกอน ซึ่งแตกต่างจากกรณีของถังปฏิบัติการแบบอากาศยก ที่มีการแบ่งโซนอย่างชัดเจน ในขณะที่กรณีของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตร จะมีค่าระยะเวลาการกวนผสมที่มากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 กรัมต่อลิตร โดยที่ผลที่ได้ระหว่าง ถัง ALR และ BCR มีลักษณะที่คล้ายกัน ทั้งนี้การเลือกใช้ค่าอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเดินระบบที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ โดยอาจกล่าวได้ว่าเป็นข้อจำกัดประการหนึ่งของการใช้ถังปฏิบัติการแบบอากาศยกในการกำจัดความขุ่นในทางปฏิบัติ ซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสุดท้ายหลังจากการตกตะกอนที่ประมาณ 90% เท่านั้น

ตารางที่ 4.2 ตารางค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) และเวลาในการกวนผสม (T), (G.T)

		1 กรัมต่อลิตร			0.1 กรัมต่อลิตร		
		G (1/s)	T (s)	G.T.	G (1/s)	T (s)	G.T.
Jar test	กวนเร็ว	168.58	60.00	10114.80	168.58	60.00	10114.80
	กวนช้า	14.50	1200.00	17400.00	14.50	1200.00	17400.00
รวม		27514.80			27514.80		
ALR	กวนเร็ว	288.92	60.00	17335.20	288.92	120.00	34670.40
BCR	กวนเร็ว	123.09	120.00	14770.80	123.09	300.00	36927.00

จากกราฟรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกและถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้ปริมาณสารส้มที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดความขุ่นที่ได้จากการทดลองจาร์เทสต์ ดังนั้นจึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการลดปริมาณสารเคมี (สารส้ม) ลง โดยเลือกเดินระบบที่อัตราการเติมอากาศและเวลาการกวนผสมที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยการลดปริมาณสารเคมี

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าในกรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 กรัมต่อลิตรนั้น การประยุกต์ใช้ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกในการกำจัดความขุ่นมีแนวโน้มที่จะสามารถลดปริมาณสารเคมีลงได้ โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดประมาณ 95% แต่ในกรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตรนั้น ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น อย่างไรก็ตาม จากประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าความขุ่นที่ได้นั้นยังคงไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา (ต่ำกว่า 5 NTU) ซึ่งยัง

ต้องการถึงกรองตามระบบของการผลิตน้ำประปาต่อไป โดยที่การใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยกนั้น  
ยังน่าจะส่งผลดีในด้านต่างๆ เช่น

- กำจัดความขุ่นได้ในอุปกรณ์เดียวกัน กล่าวคือสามารถรวมขั้นตอนการกวนเร็ว กวนช้า  
และการตกตะกอนเข้าด้วยกัน
- ลดระยะเวลาในการบำบัด รวมถึงขนาดของถังปฏิริยาโดยรวม
- ลดพลังงานในการกวนผสม กล่าวคือสามารถใช้อัตราการเติมอากาศต่ำๆได้ โดยที่ให้ค่า  
ความเร็วเกรเดียนท์ที่สูงๆ ภายในบริเวณท่อภายในสำหรับกวนผสมสารเคมี
- ใช้สารเคมีได้คุ้มค่ามากขึ้นจากกลไกการไหลวนภายในดังที่กล่าวด้านบน

โดยที่อาจมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจากรูปแบบ  
ของกลไกการทำงาน รวมถึงตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและของเหลวในถัง  
ปฏิริยาแบบอากาศยก ซึ่งจะได้ทำการศึกษาในส่วนตัวต่อไป

#### 4.4 การศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิริยาแบบ อากาศยก (Airlift reactor)

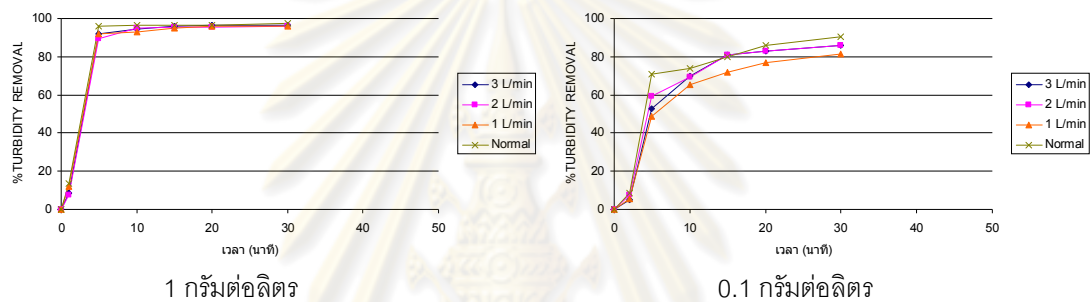
ในส่วนนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในน้ำ  
สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยประยุกต์ใช้แนวทางการเพิ่มอุปกรณ์  
ประเภทโคน (Cone) เพื่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิริยา และการเพิ่มขนาดท่อภายใน (Draft  
tube) จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ( $ALR_{10}$ ) ไปเป็น 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) เป็นต้น  
โดยทำการเดินระบบแบบทีละเท (Batch process) ที่เวลาในการกวนเร็วเพื่อผสมสารเคมีต่างๆ  
(1, 2, 5 และ 20 นาที) และอัตราการเติมอากาศต่างๆ (0.3, 1, 2, 3, 5 และ 10 ลิตรต่อนาที) โดย  
กำหนดให้มีการตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาทีในทุกๆ การทดลอง

4.4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยกร่วมกับการปรับรูปแบบ  
การไหลด้วยอุปกรณ์ประเภทโคน (cone)

รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่าง  
สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิริยาแบบ  
อากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคน ดังรูปที่ 4.21 โดยใช้สภาวะในการ  
ดำเนินการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่สูงที่สุดจากการทดลองในหัวข้อ 4.3.1

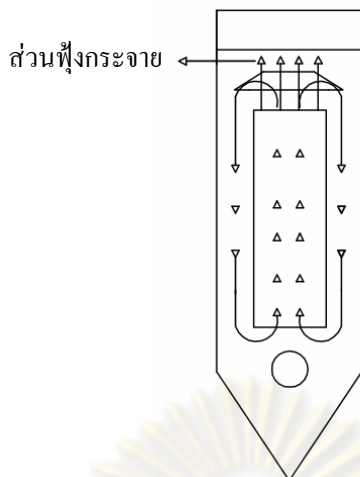


รูปที่ 4.21 อุปกรณ์ประกอบประเภทโคน



รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (ALR<sub>10</sub>) ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.22 เห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนมีค่าลดลงประมาณ 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนไปขวางทิศทางการไหล โดยของเหลวที่ไหลผ่านโคนด้านบนมีความปั่นป่วนค่อนข้างสูง จึงเกิดการฟุ้งกระจายและตกค้างของอนุภาคตะกอนบริเวณด้านบน ทำให้ส่งผลต่อการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling mechanism) ของอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วภายในถังปฏิกรณ์ ดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 4.23

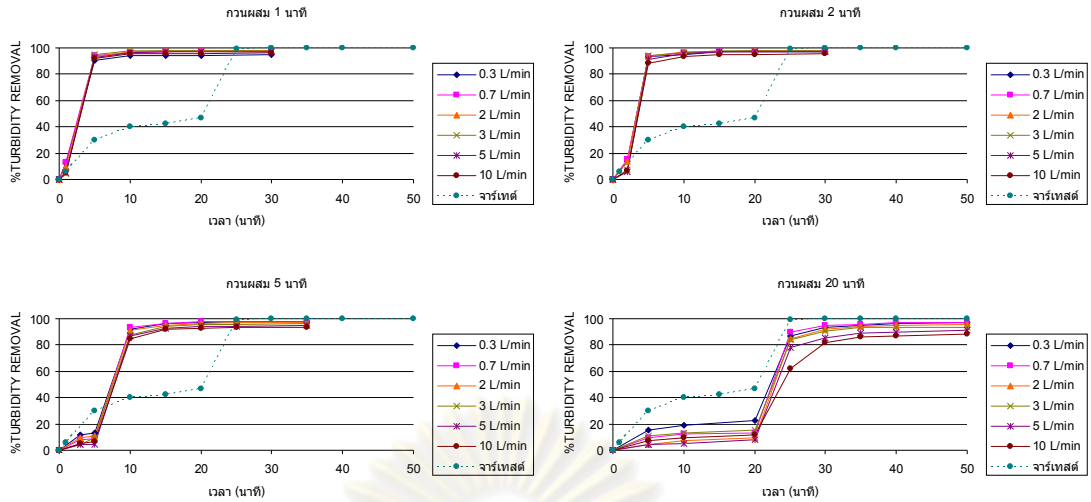


รูปที่ 4.23 ลักษณะการไหลของของเหลวในถังปฏิบัติการแบบอากาศยกพร้อมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคน

จึงกล่าวได้ว่าอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับถังปฏิบัติการแบบอากาศยกในการทดลองนี้ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นด้วยถังปฏิบัติการแบบอากาศยกต่อไป ด้วยการเพิ่มขนาดท่อภายใน (Draft tube) จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ( $ALR_{10}$ ) ไปเป็น 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) เพื่อปรับลักษณะตัวแปรอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและของเหลวในถังปฏิบัติการแบบอากาศยกซึ่งจะทำการทดลองในหัวข้อถัดไป

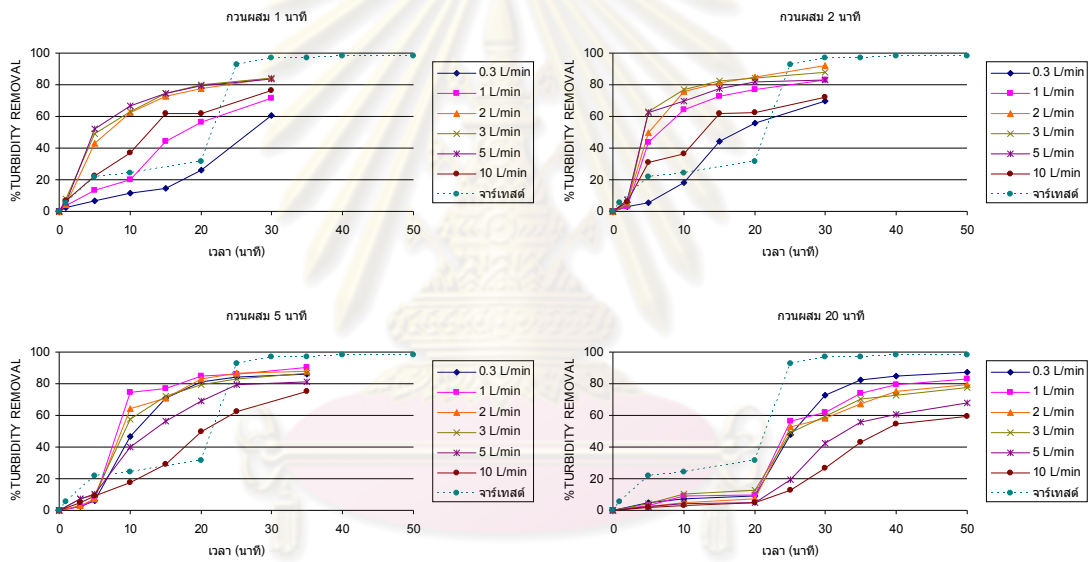
4.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นด้วยถังปฏิบัติการแบบอากาศยกที่มีขนาดท่อภายใน 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ )

รูปที่ 4.24a และ 4.24b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิบัติการแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ )



รูปที่ 4.24a ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อ

ลิตร



รูปที่ 4.24b ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัม

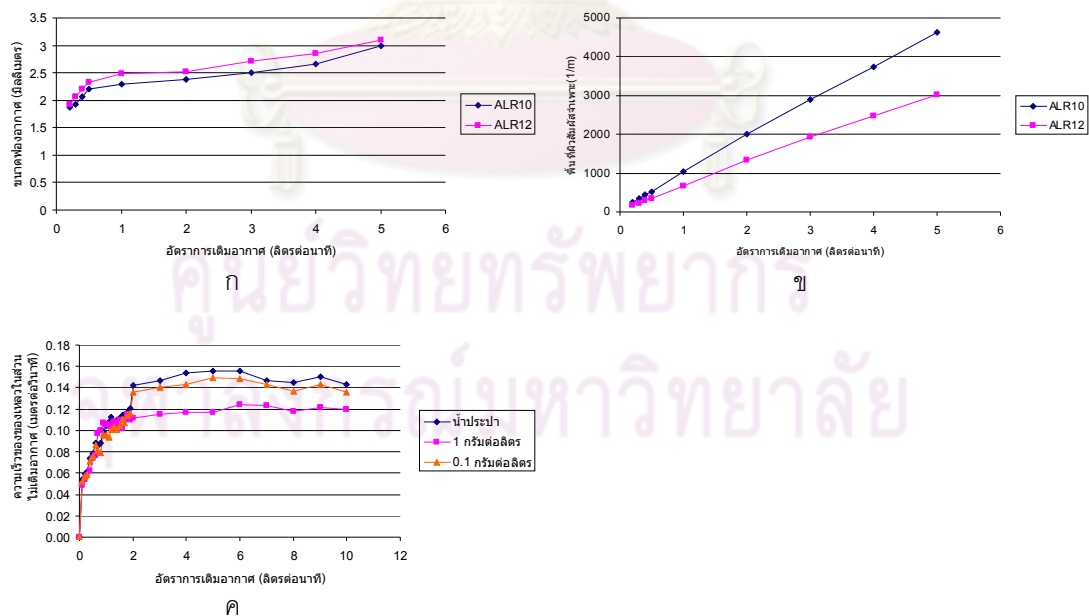
ต่อลิตร

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.24a พบว่าให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่ได้จากการเดินระบบในทุกรูปแบบนั้น จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันในช่วงร้อยละ 89 ถึง 98 และรูปที่ 4.24b จะมีค่าที่แตกต่างกันในช่วงร้อยละ 59 ถึง 93 ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีขนาดท่อภายใน 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) เพื่อกำจัดความขุ่นในน้ำที่เวลากวนผสมและอัตราการเติมอากาศต่างๆ สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ช่วง เช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีขนาดท่อภายใน 10 เซนติเมตร ( $ALR_{10}$ )

โดยเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากเวลาการเติมอากาศ (1, 2, 5 และ 20 นาที) เพื่อควนผสมสารเคมีพบว่า ที่เวลาควนเร็วเพื่อควนผสมสารเคมี 1 และ 2 นาที อัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อ นาทีนั้น จะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงที่สุดประมาณร้อยละ 98 และร้อยละ 93 สำหรับน้ำสังเคราะห์ความขุ่น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถึง  $ALR_{12}$  ใช้อัตราการเติมอากาศสำหรับการควนผสมสารเคมีที่ต่ำกว่าถึง  $ALR_{10}$  ( $2 \text{ L/min} < 3 \text{ L/min}$ ) ด้วยเหตุที่ว่า พื้นที่หน้าตัดของท่อภายในมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดส่วนไม่เติมอากาศและส่วนเติมอากาศ ( $A_d/A_s$ ) มีค่าลดลง เป็นการเพิ่มสัดส่วนของก๊าซซึ่งเป็นแรงเคลื่อนทำให้เกิดการไหลหมุนเวียนของของเหลว (ใช้สารเคมีได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น) [ทักษการณ บุนยประสิทธิ์, 2547] เป็นผลให้ใช้อัตราการเติมอากาศสำหรับการควนผสมลดลง จึงทำให้เป็นการประหยัดพลังงานในการเติมอากาศสำหรับการควนผสมสารเคมี รวมถึงเป็นการช่วยในการตกตะกอนของกลุ่มตะกอนในส่วนไม่เติมอากาศได้ดียิ่งขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย

#### 4.4.3 การศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ )

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และอัตราการเติมอากาศของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) ได้แก่ ขนาดฟองอากาศ พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ และความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ



รูปที่ 4.25 ตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และอัตราการเติมอากาศของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ )

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.25 ก) ขนาดฟองอากาศ ข) พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ค) ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ สามารถกล่าวโดยสรุป ได้ดังนี้

ก) ขนาดฟองอากาศ พบว่าขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) มีขนาดใหญ่กว่าถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 10 เซนติเมตร ( $ALR_{10}$ ) โดยกล่าวได้ว่ามีแนวโน้มที่ขนาดฟองอากาศจากถัง  $ALR_{12}$  ที่มีขนาดใหญ่กว่าถัง  $ALR_{10}$  เล็กน้อย โดยปรากฏการณ์การแตกตัวของฟองอากาศ (Bubble break-up phenomena) อันเนื่องมาจากพลังงานการกวนผสมและความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายในท่อภายในที่มีขนาดเล็กน่าจะเป็นสาเหตุสำคัญของปรากฏการณ์ดังกล่าว โดยความแตกต่างดังกล่าวจะสามารถส่งผลกระทบต่อทั้งในส่วนของจำนวนฟองอากาศ รวมถึงพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในที่สุด อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างดังกล่าวมีค่อนข้างน้อยเนื่องจากการในการทดลองนี้ยังคงใช้หัวเติมอากาศแบบแข็ง (Rigid Orifice) ดังที่กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อ 4.2.1

ข) พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ พบว่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในถัง  $ALR_{12}$  มีค่าต่ำกว่าถัง  $ALR_{10}$  เนื่องจากผลการคำนวณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะดังที่กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อ 4.2.2 โดยยังอาจกล่าวได้ว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซที่เท่ากันนั้น การเลือกใช้ชนิดของถัง ALR ที่มีขนาดท่อภายในที่แตกต่างกันนั้น นอกจากจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่แตกต่างกันแล้ว ยังสามารถส่งผลกระทบต่อสภาพความปั่นป่วนของเฟสของเหลวสำหรับการกวนผสมสารเคมีอีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

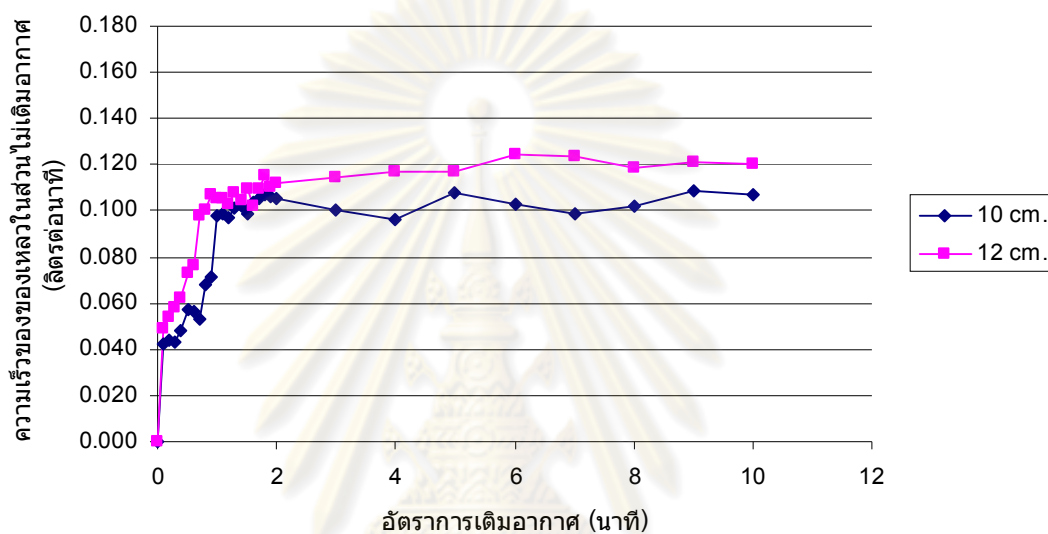
ค) ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ พบว่า

- ระบบที่ใช้น้ำประปามีขอบเขตการไหลที่ 1 ในช่วงอัตราการเติมอากาศ 0.1-1 ลิตรต่อนาที และขอบเขตการไหลที่ 2 ตั้งแต่ค่าอัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาทีขึ้นไป
- ระบบที่ใช้น้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร มีขอบเขตการไหลที่ 1 ในช่วงอัตราการเติมอากาศ 0.1-0.6 ลิตรต่อนาที และขอบเขตการไหลที่ 2 ตั้งแต่ค่าอัตราการเติมอากาศ 0.7 ลิตรต่อนาทีขึ้นไป
- ระบบที่ใช้น้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร มีขอบเขตการไหลที่ 1 ในช่วงอัตราการเติมอากาศ 0.1-1 ลิตรต่อนาที และขอบเขตการไหลที่ 2 ตั้งแต่ค่าอัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาทีขึ้นไปเช่นเดียวกับระบบที่ใช้น้ำประปา

จากผลการทดลองจึงกล่าวได้ว่าของแข็งแขวนลอยในน้ำสามารถส่งผลกระทบต่อค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศที่ใช้ในการแบ่งขอบเขตการไหลของถัง  $ALR_{12}$  เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.2.3 อีกทั้งยังเห็นได้ชัดว่าถัง  $ALR_{12}$  จะมีอัตราการเติมอากาศที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขอบเขตการไหลที่ 1 ไปยังขอบเขตการไหลที่ 2 ที่ต่ำกว่าถัง  $ALR_{10}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.26 เนื่องจากมีค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศที่สูงกว่าถัง  $ALR_{10}$



อันเนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดในส่วนดังกล่าวที่มีค่าต่ำกว่า โดยค่าความเร็วที่เพิ่มสูงขึ้นดังกล่าวได้ว่าอาจส่งผลโดยรวมต่อการกวนช้า (Slow mixing for Flocculation) เพื่อสร้างสัมผัสมวลภายในส่วนไม่เติมอากาศ รวมถึงความสามารถในการกวนกลับของน้ำเสีย หรือรวมทั้งปริมาณสารส้มที่ประยุกต์ใช้ในการทดลองอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การเลือกเดินระบบด้วยอัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมนับว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากถ้าเดินระบบด้วยค่าที่สูงเกินไปจะส่งผลเสียต่อความปั่นป่วนที่สูงเกินไปสำหรับการกวนช้าและการกวนกลับของสารเคมี รวมถึงอาจทำลายหรือก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของปริมาณตะกอนที่สะสมตัวอยู่กันถึงปฏิกรณ์แบบอากาศยกได้

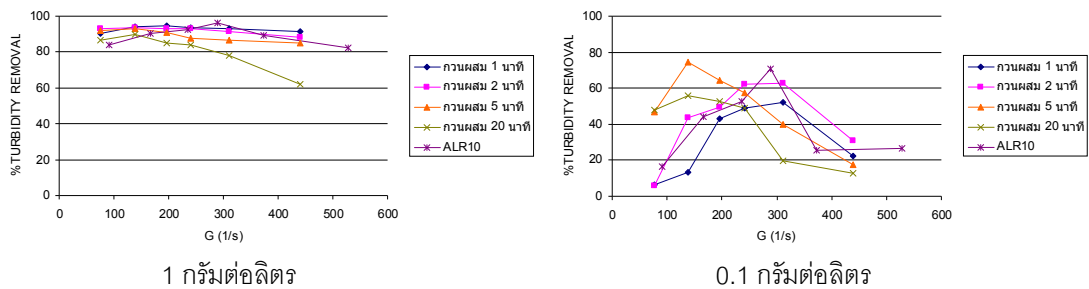


รูปที่ 4.26 อัตราการไหลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขอบเขตการไหล

#### 4.4.4 ผลกระทบจากค่าความเร็วเกรเดียนต์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

ค่าความเร็วเกรเดียนต์ (G) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการกวนผสมของระบบบำบัดโดยการเปลี่ยนแปลงของค่า G จะขึ้นอยู่กับอัตราการเติมอากาศ สามารถคำนวณตามสมการ (2.6) และ (2.7) ดังที่กล่าวถึงในบทที่ผ่านมา

รูปที่ 4.27 แสดงผลการศึกษาลักษณะของค่าความเร็วเกรเดียนต์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถึงปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และความเร็วเกรเดียนท์ในการกวนผสมของการกำจัดความขุ่นที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเร็วเกรเดียนท์ของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) และถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ

	ความเร็วเกรเดียนท์ (G, 1/s)		
	$ALR_{10}$	$ALR_{12}$	Jar test
อัตราการเติมอากาศ (ลิตรต่อนาที)			
0.3	91.3618	76.1525	183.08
1	166.812	139.035	183.08
2	235.968	196.025	183.08
3	288.927	240.815	183.08
5	373.003	310.891	183.08
10	527.506	439.666	183.08

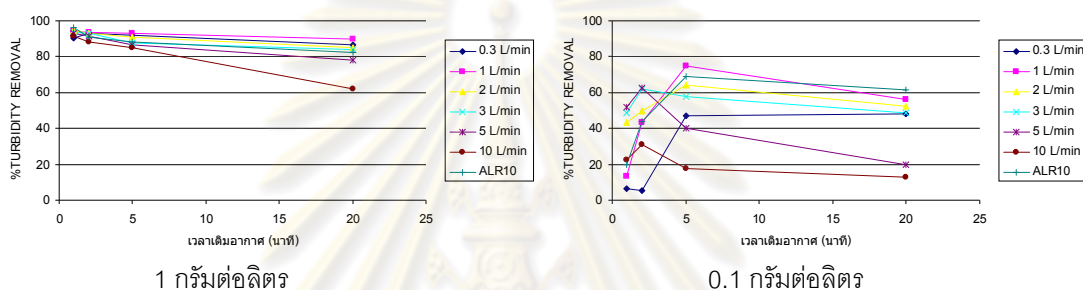
จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.27 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่อค่าความเร็วเกรเดียนท์ในการกวนผสมสารเคมีของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกันกับถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) และให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ 1 กรัมต่อลิตร ใช้อัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีค่าความเร็วเกรเดียนท์ 196 1/s ให้ประสิทธิภาพการกำจัด 94.54% และที่ 0.1 กรัมต่อลิตร ใช้อัตราเติมอากาศ 1 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีค่าความเร็วเกรเดียนท์ 139 1/s ให้ประสิทธิภาพการกำจัด 74.62% ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่าการเพิ่มขนาดของท่อภายในสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกได้ เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดในส่วนไม่เติมอากาศที่ลดลงทำให้โอกาสสัมผัสภายในเกิดขึ้นได้ดี ในขณะที่เดียวกันยังสามารถช่วยประหยัดพลังงานในการเติม

อากาศเพื่อกวนผสมสารเคมีได้อีกด้วย เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดในส่วนดังกล่าวที่ลดลงทำให้ใช้ค่าความเร็วกระเดียนท์ในการสร้างสัมผัสที่ลดลงด้วยเช่นกัน

#### 4.4.5 ผลกระทบจากค่าเวลากวนเร็วต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น

รูปที่ 4.28 แสดงผลการศึกษผลกระทบของค่าเวลากวนเร็วต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการประยุกต์ใช้ถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลากวนเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในการกวนผสมสารเคมี คือ 1 นาที และ 5 นาที โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 94.54% และ 74.62% ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของน้ำตัวอย่างสังเคราะห์และเวลากวนเร็วในการกวนผสมของการกำจัดความขุ่นที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าผลกระทบของค่าเวลากวนเร็วของถึง  $ALR_{12}$  ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น ทั้งในกรณีที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดไปในทิศทางเดียวกันกับถึง  $ALR_{10}$  โดยจะเห็นได้ว่าเวลากวนเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในการกวนผสมสารเคมี คือ 1 นาที และ 5 นาที โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัด 96.54% และ 74.62% ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าถึง  $ALR_{10}$  แต่จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตรนั้น จะต้องใช้เวลาในการกวนผสมสูงกว่าถึง  $ALR_{10}$  อาจเนื่องจากท่อภายในมีขนาดเพิ่มขึ้นและมีเป่าสัมผัสน้อยจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการกวนผสมเพื่อทำลายเสถียรภาพนานขึ้น

#### 4.4.6 อัตราการรวมตัวปรากฏ (Apparent Aggregation Rate, $K_{app}$ )

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาค่า  $K_{app}$  ของถัง BCR,  $ALR_{10}$  และ  $ALR_{12}$  ในน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยค่า  $K_{app}$  สามารถหาค่าได้จากความชันที่ดีที่สุดของการพล็อตกราฟระหว่างค่าความขุ่นที่เหลือ ( $1/N_t$ ) กับเวลาทวนซ้ำ ( $t_s$ ) โดยที่ค่า  $K_{app}$  ที่เหมาะสมแสดงถึงลักษณะที่เหมาะสมของการเกิดฟล็อก (Ideal floc) ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผสมน้ำมีของแข็งแขวนลอย โดยมีค่าความเร็วเกรเดียนท์และเวลาทวนผสมที่เหมาะสม (MHAISALKAR และคณะ, 1990)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าอัตราการรวมตัวปรากฏ ( $K_{app}$ ) ที่ค่าความเร็วเกรเดียนท์และเวลาทวนผสมต่างๆ ของถัง BCR,  $ALR_{10}$  และ  $ALR_{12}$  ในน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร

BCR ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร					BCR ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร				
เวลาทวนผสม (นาที)	1	2	5	20	เวลาทวนผสม (นาที)	1	2	5	20
G (1/s)	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$	G (1/s)	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$
38.92513148	0.000254	0.000531	0.000927	0.000394	38.92513148	0.000277	0.000388	0.001136	0.000336
71.06724189	0.000459	0.000840	0.000945	0.000440	71.06724189	0.000490	0.001023	0.002122	0.000736
100.5042573	0.000738	0.000920	0.000838	0.000366	100.5042573	0.000955	0.001501	0.002219	0.000935
123.0920737	0.000934	0.000811	0.000814	0.000306	123.0920737	0.001503	0.001656	0.002399	0.001049
158.9111838	0.000892	0.000821	0.000544	0.000220	158.9111838	0.001431	0.001656	0.001306	0.000554
224.7343514	0.000583	0.000435	0.000370	0.000185	224.7343514	0.000884	0.001545	0.000903	0.000418
ALR 10 ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร					ALR 10 ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร				
เวลาทวนผสม (นาที)	1	2	5	20	เวลาทวนผสม (นาที)	1	2	5	20
G (1/s)	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$	G (1/s)	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$
91.366779	0.000304	0.000436	0.000796	0.000659	91.366779	0.000078	0.000830	0.001542	0.001356
166.812153	0.000599	0.000578	0.000751	0.000573	166.812153	0.000752	0.000922	0.002165	0.001484
235.908009	0.000840	0.000744	0.000834	0.000420	235.908009	0.001208	0.001747	0.001939	0.001251
288.927125	0.000856	0.000780	0.000663	0.000467	288.927125	0.002330	0.002696	0.001466	0.001046
373.003314	0.000632	0.000570	0.000511	0.000275	373.003314	0.001184	0.001533	0.001409	0.000676
527.506346	0.000435	0.000416	0.000332	0.000233	527.506346	0.000960	0.001457	0.001004	0.000482
ALR 12 ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร					ALR 12 ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร				
เวลาทวนผสม (นาที)	1	2	5	20	เวลาทวนผสม (นาที)	1	2	5	20
G (1/s)	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$	G (1/s)	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$	$K_{app}$
76.1524574	0.000426	0.000838	0.001272	0.000611	76.1524574	0.000382	0.000676	0.001697	0.001388
139.0347291	0.001232	0.001268	0.001341	0.000715	139.0347291	0.000667	0.001312	0.002187	0.000951
196.6247995	0.001280	0.001174	0.001016	0.000445	196.6247995	0.001440	0.003134	0.001862	0.000754
240.8152148	0.001156	0.001182	0.000726	0.000327	240.8152148	0.001460	0.002051	0.001723	0.000668
310.8911055	0.000957	0.000965	0.000561	0.000221	310.8911055	0.001184	0.001533	0.001409	0.000676
439.6664178	0.000645	0.000530	0.000405	0.000156	439.6664178	0.000894	0.000744	0.000712	0.000282

โดยในงานวิจัยนี้ จะประยุกต์ใช้ค่าดังกล่าวเพื่อเป็นค่าที่ยืนยันถึงความสามารถในการสร้างพลีอคจากการเดินระบบในถังปฏิริยาที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในที่สุด โดยในงานวิจัยนี้พบว่าที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ค่า  $K_{app}$  ของถัง BCR,  $ALR_{10}$  และ  $ALR_{12}$  มีค่าเท่ากับ 0.000892, 0.000856 และ 0.001280 ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 0.002399, 0.002696 และ 0.003134 นอกจากนี้ ค่า  $K_{app}$  ในกรณีของ  $ALR_{12}$  ที่มีค่าสูงที่สุดนั้นบ่งบอกถึงความสามารถในการรวมตัวของอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพในบริเวณส่วนไม่เติมอากาศที่มากที่สุด โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวจึงส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นดังที่ได้กล่าวข้างต้น

#### 4.4.7 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในบริเวณก้นถังปฏิริยา (Sludge)

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาตะกอนที่เกิดขึ้นในบริเวณก้นถังปฏิริยาจากการทดลองประยุกต์ใช้ถัง BCR,  $ALR_{10}$  และ  $ALR_{12}$  ในน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยทำการหาค่าความชัน (Slope) ของความสูงชั้นตะกอนตามเวลา

โดยจากตาราง 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นตะกอนที่ความเร็วเกรเดียนท์และเวลากวนผสมต่างๆ สำหรับเฟสน้ำความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ของถัง  $ALR_{10}$  มีค่าต่ำกว่าถัง BCR เนื่องจากอาจได้รับผลกระทบจากรูปแบบการไหลวนลงสู่ด้านล่างจากเฟสของเหลวที่เกิดขึ้นภายในถัง  $ALR_{10}$  จึงเกิดการอัดตัวกันของตะกอนได้ดีกว่า ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นตะกอนบริเวณด้านล่างถังปฏิริยา ในขณะที่ถัง  $ALR_{12}$  พบว่ามีค่าความชันที่สูงกว่าผลที่ได้จากทั้งถัง BCR และ  $ALR_{10}$  โดยถึงแม้ว่าจะได้รับผลกระทบจากรูปแบบการไหลวนจากเฟสของเหลวที่เกิดขึ้นภายในเช่นเดียวกับกรณีถัง  $ALR_{10}$  แต่ด้วยปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นซึ่งมากกว่าอันเนื่องมาจากประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่า รวมถึงสภาวะการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพในบริเวณไม่เติมอากาศที่เหมาะสมกว่านั้น จึงน่าจะเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นตะกอนตามเวลาที่สูงกว่านั่นเอง

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นจากการประยุกต์ใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยก (ALR) สำหรับเฟสน้ำความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.28a และ 4.28b ตามลำดับนั้น พบว่าความหนาของชั้นตะกอนที่ระยะเวลาต่างๆ ของการเดินระบบ (10, 15, 20 และ 30 นาที) ของในกรณีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้ในกรณีของ 0.1 กรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอนุภาคความขุ่นเริ่มต้นในการเดินระบบ รวมถึงประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าในกรณีของ 1 กรัมต่อลิตรที่มีจำนวนเป้าสัมผัสที่สูงกว่า นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของความหนาชั้นตะกอนทั้งสองกรณีนั้น มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

กล่าวคือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในกรณีของ 0.1 กรัมต่อลิตร ในขณะที่มีค่าลดลงในกรณีของ 1 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงความหนาชั้นตะกอนด้านล่างที่ค่าความเร็วกระแสน้ำและเวลากวนผสมต่างๆ ของถัง BCR, ALR<sub>10</sub> และ ALR<sub>12</sub> ในน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร

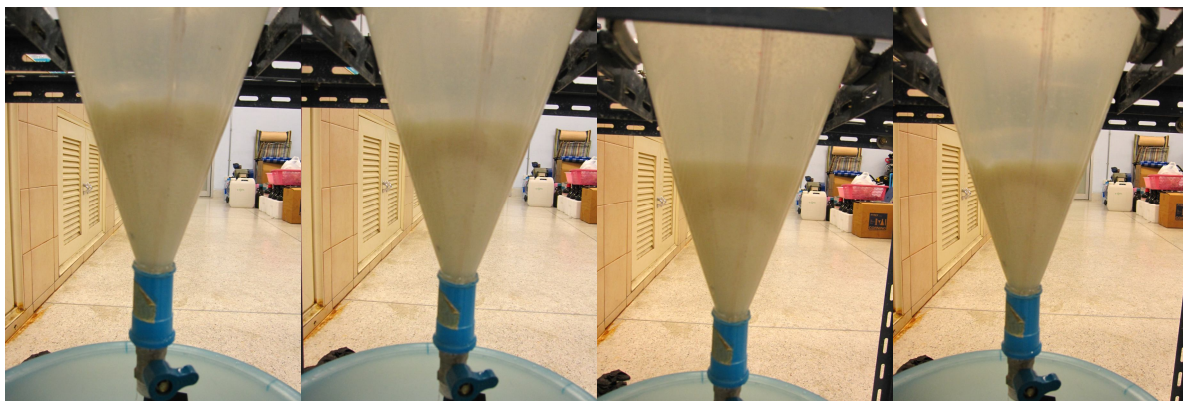
BCR ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร					BCR ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร				
เวลากวนผสม (นาที)	1	2	5	20	เวลากวนผสม (นาที)	1	2	5	20
G (1/s)	Slope	Slope	Slope	Slope	G (1/s)	Slope	Slope	Slope	Slope
38.92513148	2.694	3.636	3.466	2.938	38.92513148	0.1602	0.2254	0.2484	0.1384
71.06724189	3.184	3.654	3.24	3.07	71.06724189	0.2188	0.2921	0.3058	0.2078
100.5042573	3.522	3.672	3.352	3.07	100.5042573	0.2827	0.337	0.3293	0.2082
123.0920737	3.466	3.786	3.428	3.258	123.0920737	0.2937	0.339	0.3041	0.173
158.9111838	3.278	3.692	3.316	3.146	158.9111838	0.3214	0.3717	0.3443	0.1999
224.7343514	3.636	3.636	3.41	2.976	224.7343514	0.2984	0.3745	0.3219	0.1843

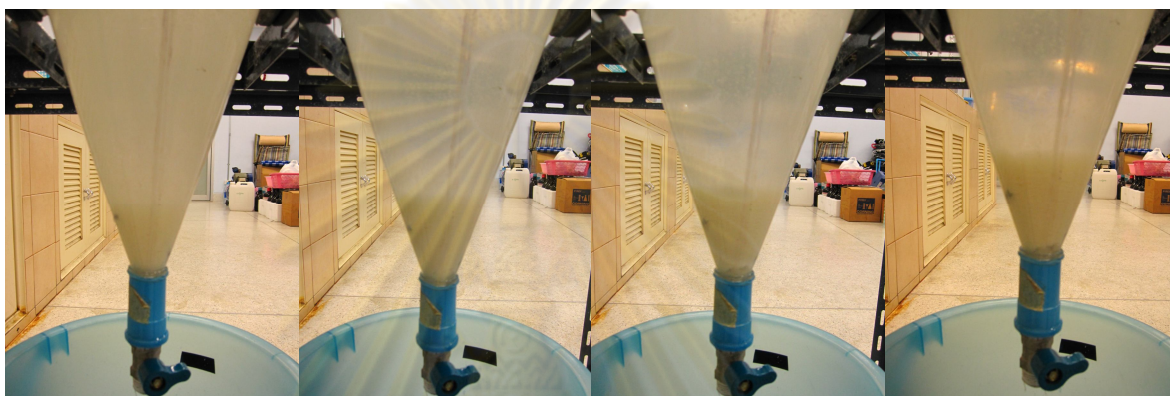
ALR 10 ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร					ALR 10 ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร				
เวลากวนผสม (นาที)	1	2	5	20	เวลากวนผสม (นาที)	1	2	5	20
G (1/s)	Slope	Slope	Slope	Slope	G (1/s)	Slope	Slope	Slope	Slope
91.366779	2.386	2.606	2.818	1.766	91.366779	0.1506	0.2138	0.2746	0.2174
166.812153	3.036	2.816	2.942	2.784	166.812153	0.2006	0.2839	0.3241	0.2117
235.908009	3.074	2.836	3.074	2.622	235.908009	0.266	0.3344	0.319	0.2146
288.927125	2.95	2.704	2.974	2.642	288.927125	0.3287	0.3517	0.3234	0.2031
373.003314	3.01	2.712	2.912	2.726	373.003314	0.3215	0.3558	0.3235	0.2009
527.506346	2.99	2.96	2.96	2.808	527.506346	0.3215	0.3504	0.2914	0.1817

ALR 12 ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร					ALR 12 ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร				
เวลากวนผสม (นาที)	1	2	5	20	เวลากวนผสม (นาที)	1	2	5	20
G (1/s)	Slope	Slope	Slope	Slope	G (1/s)	Slope	Slope	Slope	Slope
76.1524574	3.052	3.446	3.428	3.09	76.1524574	0.2621	0.2929	0.3724	0.2408
139.0347291	3.522	3.616	3.504	3.296	139.0347291	0.3542	0.4216	0.4458	0.2382
196.6247995	3.672	3.636	3.504	3.202	196.6247995	0.4094	0.4255	0.4367	0.2364
240.8152148	3.484	3.504	3.428	3.22	240.8152148	0.392	0.4654	0.4306	0.2293
310.8911055	3.542	3.512	3.352	2.95	310.8911055	0.4273	0.4558	0.4241	0.2224
439.6664178	3.522	3.446	3.352	2.844	439.6664178	0.4047	0.4366	0.4045	0.2047



รูปที่ 4.29 (a) ความสูงของชั้นตะกอนที่เวลาการตกตะกอนต่างๆ ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.29 (b) ความสูงของชั้นตะกอนที่เวลาการตกตะกอนต่างๆ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

โดยที่ค่าความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร อาจกล่าวได้ว่าการเกิดการตกตะกอน 3 ลักษณะ (มันซิน ตันตุลเวศน์, 2542) ได้แก่ 1) การตกตะกอนแบบโดด (Discrete settling) เกิดขึ้นบริเวณผิวน้ำด้านบนของถังปฏิกริยา 2) การตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) เกิดขึ้นบริเวณท้องทรงกระบอกในส่วนที่ไม่เต็มอากาศ เนื่องจากเกิดการรวมกันของฟล็อกเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการตกตะกอนของสารส้มหรือตกตะกอนที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันซึ่งจัดว่าเป็นการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม และ 3) การตกตะกอนแบบแบ่งชั้นหรือแบบอัดตัว (Zone or compression settling) บริเวณกรวยด้านล่าง เนื่องจากเกิดกดทับของตะกอนที่ตกลงสู่ด้านล่างกรวย รวมถึงอาจได้รับผลกระทบจากรูปแบบการไหลวนจากเฟสของเหลวที่เกิดขึ้นภายในถัง ALR จึงทำให้ความสูงของชั้นตะกอนที่เวลาต่างๆ มีค่าลดลงอีกทางหนึ่งด้วยดังรูปที่ 4.29(a) ในขณะที่ ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตรซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นโดยรวมของอนุภาคที่ต่ำกว่านั้น กล่าวได้ว่าจะเกิดการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มเป็นหลักโดยมีความสูงของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นตามเวลา รวมถึงการที่ความสูงชั้นตะกอนที่ค่อนข้างต่ำและห่างจากบริเวณด้านล่างของท่อภายใน (Draft tube) เมื่อเทียบกับกรณีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ดังนั้น

จึงได้รับผลกระทบจากการไหลวนของเฟสของเหลวที่ต่ำกว่าและส่งต่อแรงภายนอกซึ่งส่งผลต่อการกัดตัวของชั้นตะกอนที่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเดินระบบในระยะเวลาที่เท่ากัน ดังรูปที่ 4.29 (b)

ดังนั้น จากผลการทดลองที่ผ่านจะเห็นได้ว่ารูปแบบการเดินระบบที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุด ในการประยุกต์ใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยกในการกำจัดความขุ่นในน้ำโดยการเดินระบบแบบที่ละเท ได้แก่ การใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ข้อดีจากทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น การประหยัดพลังงานการเติมอากาศ ลดสภาพความปั่นป่วนในการกวนผสมสารเคมีลง เพิ่มความสามารถในการกวนซ้สร้างสัมผัสและการตกตะกอนบริเวณส่วนไม่เติมอากาศ รวมถึงการวนกลับของสารเคมีซึ่งช่วยในการประหยัดปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และความหนาของชั้นตะกอนลงได้ โดยที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรใช้อัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาที่ เวลาในการกวนผสม 1 นาที่ (98.03%) ในขณะที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตรใช้อัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาที่ เวลาในการกวนผสม 2 นาที่ (92.13%) ซึ่งจะนำรูปแบบการเดินระบบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดความขุ่นในน้ำโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ในหัวข้อถัดไป

#### 4.5 การเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous system) ของถังปฏิริยาแบบอากาศยก (Airlift reactor) ในการกำจัดความขุ่น

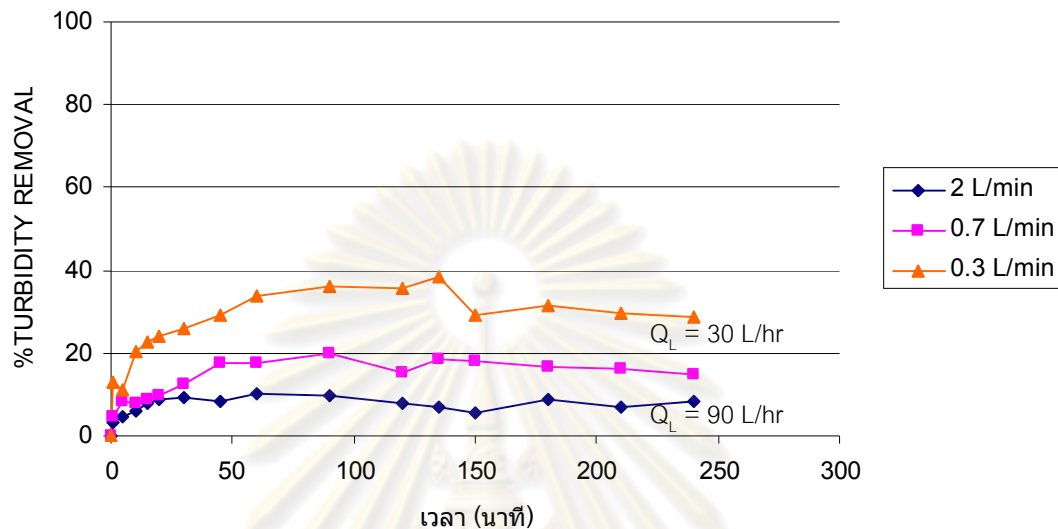
ในส่วนนี้ จะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดความขุ่นในน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous process) โดยประยุกต์ใช้รูปแบบของถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น รวมถึงศึกษาผลกระทบจากค่าอัตราการไหลของน้ำสังเคราะห์ที่เข้าสู่ถังปฏิริยา

จากผลการทดลองที่ผ่านมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุด ในกรณีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ใช้อัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาที่ เวลาในการกวนผสม 1 นาที่ ในขณะที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร ใช้อัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาที่ เวลาในการกวนผสม 2 นาที่ ดังนั้น จะทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยการประยุกต์ใช้ถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยรูปแบบการเดินระบบข้างต้น

4.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

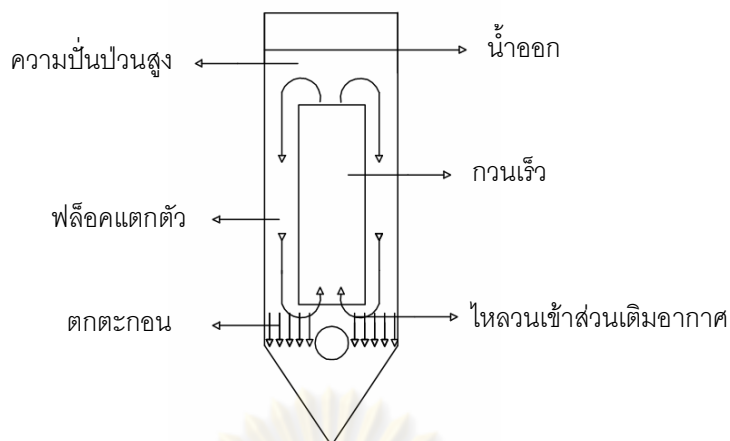


รูปที่ 4.30 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำเข้า ( $Q_L$ ) 90 ลิตรต่อชั่วโมง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.7 และ 0.3 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำเข้า 30 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.30 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.30 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาการกำจัด โดยจะเห็นได้ว่าที่อัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลน้ำเข้า 90 ลิตรต่อชั่วโมงนั้น จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่อนข้างต่ำมาก อาจเนื่องมาจากอัตราการเติมอากาศและอัตราการไหลน้ำเข้าที่มีค่าสูงเกินไป ซึ่งส่งผลเสียต่อทั้งสภาพความปั่นป่วน (Turbulent condition) และระยะเวลาที่น้ำ (Detention time) ที่ไม่เหมาะสม โดยเมื่อทำการลดอัตราการเติมอากาศและอัตราการไหลน้ำเข้าลง พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่สูงขึ้น อาจเป็นเพราะว่าที่อัตราการเติมอากาศและอัตราการไหลน้ำเข้าสูงๆ ซึ่งผลที่ได้ยืนยันผลกระทบบที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้ส่วนไม่เติมอากาศเกิดความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์มากเกินไป ส่งผลกระทบท่ออนุภาคความขุ่นที่ถูกทำเสถียรภาพในส่วนเติมอากาศแล้วรวมตัวกันเป็นฟlocsในส่วนไม่เติมอากาศเกิดการแตกตัวไม่สามารถตกตะกอนได้ดี และส่วนใหญ่จะไหลวนกลับเข้าสู่ส่วนเติมอากาศอีกครั้งจากกลไกการไหลวนของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก และสาเหตุสำคัญอีกประการหนึ่งที่ส่งต่อประสิทธิภาพการบำบัดที่ค่อนข้างต่ำ กล่าวคือเกิดความปั่นป่วนบริเวณผิวบนของถังปฏิกรณ์ตลอดเวลาทำให้น้ำที่ออกมีความขุ่นที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 4.31

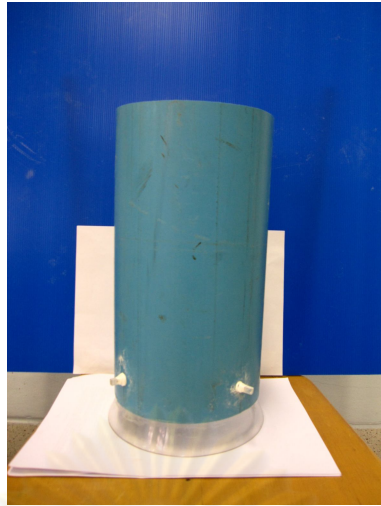


รูปที่ 4.31 ลักษณะกลไกภายในถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

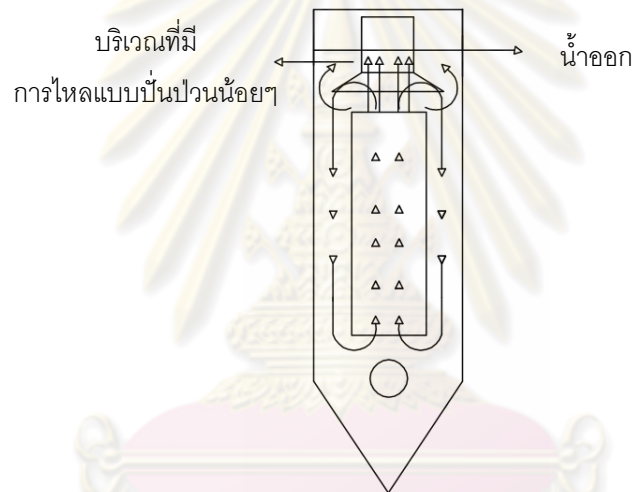
ดังนั้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอัตราการเติมอากาศและอัตราการไหลน้ำเข้ามีความสำคัญต่อการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้อัตราการเติมอากาศสูงๆ และมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกในการการกำจัดความขุ่น โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง โดยที่นอกจากปัจจัยด้านปริมาณสารเคมี (Chemical dosage) ด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและเฟสของเหลว (Bubble and liquid phase hydrodynamic parameters) และอัตราการไหลของน้ำเสียหรือระยะเวลาพักน้ำ (Detention time) ที่สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการเดินระบบถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยก (Airlift reactor) นั้น การปรับสภาพหรือรูปแบบการไหลเพื่อควบคุมความดันป้อนภายในนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงขึ้นในการเดินระบบแบบต่อเนื่องอาจจะต้องมีการปรับปรุงหรือเพิ่มเติมอุปกรณ์ประกอบสำหรับแบ่งโซนภายในถึงปฏิกิริยา และอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนที่ใช้ทำการศึกษาในหัวข้อ 4.4.1 น่าจะมีความเป็นไปได้ที่จะนำทำการศึกษา ซึ่งจะทำให้ทำการศึกษาในหัวข้อถัดไป

4.5.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถึงปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนแบบพิเศษโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการประยุกต์อุปกรณ์ประกอบประเภทโคนแบบพิเศษ (Modified cone) อีกชั้นหนึ่ง โดยติดตั้งท่อทรงกระบอกบริเวณด้านบนของโคน โดยให้มีความสูงกว่าระดับน้ำในถึงปฏิกิริยา เพื่อสร้างโซนที่ทำให้เกิดความดันป้อนของน้ำบริเวณทางน้ำออกน้อยที่สุด รวมถึงส่งผลกระทบกับค่าอุทกพลศาสตร์ของทั้งฟองอากาศและเฟสของเหลวที่น้อยที่สุดเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33

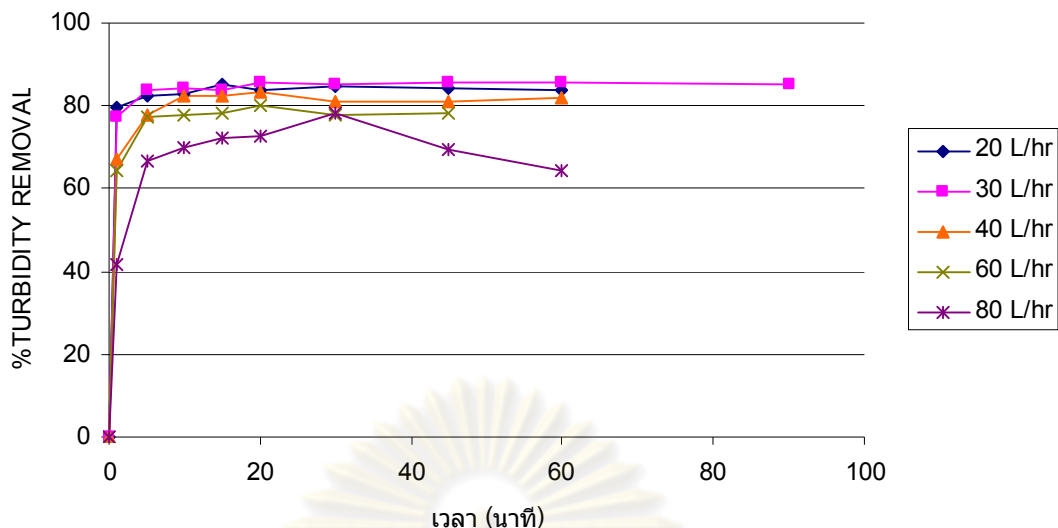


รูปที่ 4.32 การปรับปรุงอุปกรณ์ประกอบประเภทโคน



รูปที่ 4.33 ลักษณะกลไกภายในถังปฏิบัติการแบบอากาศยกที่มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ประกอบประเภทโคนที่มีการปรับปรุง โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 4.34 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิบัติการแบบอากาศยก ที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนแบบพิเศษ โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ค่าอัตราการเติมอากาศ 0.3 ลิตรต่ออนาที ในทุกการทดลอง และอัตราการไหลน้ำเข้า 20, 30, 40, 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ



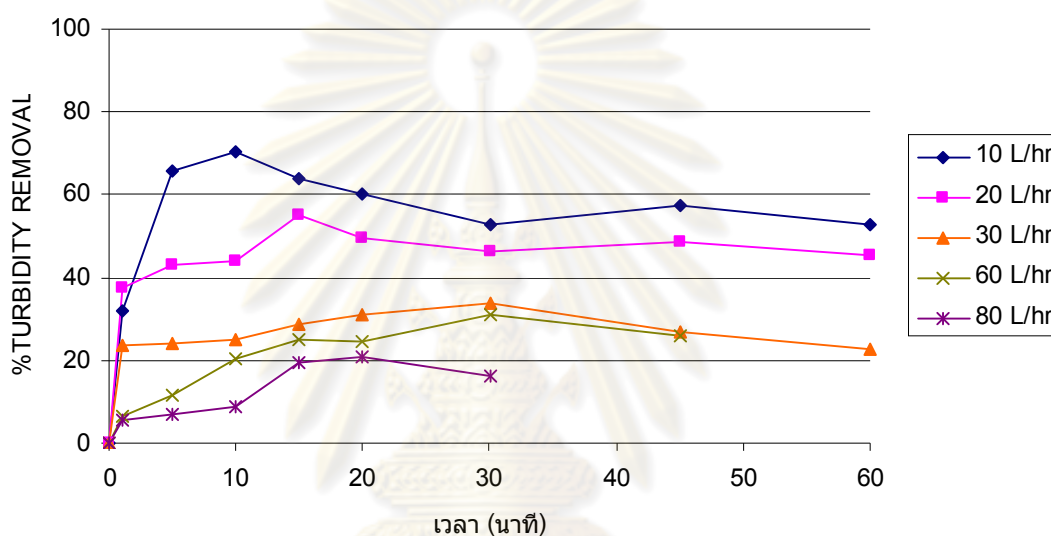
รูปที่ 4.34 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนแบบพิเศษ โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.33 พบว่าที่ค่าอัตราการไหลน้ำเข้า ( $Q_L$ ) มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น โดยที่ค่า  $Q_L$  สูงๆนั้นจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง เนื่องจากมีเวลากักเก็บน้ำภายในถังปฏิกิริยาไม่นาน ส่งผลเสียต่อระยะเวลาในการกวนเร็วเพื่อทำลายเสถียรภาพในส่วนท่อภายใน (Draft tube) รวมถึงโอกาสการจับตัวกันหรือการสร้างสัมผัสของตะกอนที่ถูกทำลายแล้วเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ในบริเวณส่วนที่ไม่เติมอากาศ นอกจากนี้จากค่า  $Q_L$  ที่สูงๆ นั้นยังส่งผลกระทบต่อสภาพความปั่นป่วนบริเวณทางออกด้านบนถังปฏิกิริยาอีกทางหนึ่งด้วย โดยที่ค่า  $Q_L$  เท่ากับ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่ 85.63% โดยที่การเดินระบบแบบต่อเนื่องข้างต้นสามารถให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นที่ค่อนข้างคงตัว (เมื่อเดินระบบด้วยสภาพการทำงานที่เหมาะสม) ตลอดระยะเวลาการเดินระบบบำบัดในงานวิจัยนี้ ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของการประยุกต์ใช้ถังปฏิกิริยาแบบอากาศยกสำหรับการกำจัดความขุ่นในทางปฏิบัติ

ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับการเดินระบบแบบที่ละเท (Batch) พบว่าการเดินระบบแบบต่อเนื่องให้ประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่า ( $85.63\% < 98.03\%$ ) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากเวลากักเก็บของน้ำในถังปฏิกิริยาของการเดินระบบแบบต่อเนื่องมีค่าต่ำกว่าการเดินระบบแบบที่ละเท ซึ่งส่งผลให้โอกาสการสัมผัสกันเพื่อรวมตัวเป็นฟล็อกให้มีขนาดใหญ่ลดลงด้วย นอกจากนี้ การเดินระบบแบบต่อเนื่องจะมีแรงเฉือน (Shear Force) จากอัตราการไหลเข้าของน้ำ ซึ่งอาจทำให้ฟล็อกเกิด

การแตกตัวมีขนาดเล็กลง เป็นผลให้ความสามารถในการตกตะกอนได้ลดลง รวมถึงสามารถฟุ้งกระจายภายในถัง ALR อันเนื่องมาจากการไหลวนของเฟสของเหลวภายในระบบอีกทางหนึ่งด้วย

รูปที่ 4.35 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนที่มีการปรับปรุง โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร โดยใช้ค่าอัตราการเติมอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที ในทุกการทดลอง และอัตราการไหลน้ำเข้า ( $Q_L$ ) 10, 20, 30, 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 4.35 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนที่มีการปรับปรุง โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.34 พบว่าค่า  $Q_L$  มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเช่นเดียวกัน โดยที่ค่า  $Q_L$  เท่ากับ 10 ลิตรต่อชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงสุดที่ 70.4% ระยะเวลาในการกำจัด 10 นาที โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองดังรูปที่ 4.33 และ 4.34 จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น รวมถึงอัตราการไหลน้ำเข้า และระยะเวลาในการกำจัด โดยที่ค่าความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เราสามารถประยุกต์ใช้กับค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย ( $Q_L$ ) ที่สูงกว่าในกรณีของค่าความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร ( $30 > 10$  ลิตรต่อชั่วโมง) ซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนอนุภาคซึ่งเป็นเป้าสัมผัสนในระบบที่แตกต่างกัน

โดยสรุป จึงกล่าวได้ว่าอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนที่มีการปรับปรุงโดยการเชื่อมท่อรูปทรงกระบอกติดบริเวณด้านบนเพื่อเป็นการสร้างโซนที่มีความปั่นป่วนต่ำๆ นั้น สามารถช่วยในการสร้างให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคความชุ่มที่ถูกละลายเสถียรภาพแล้วจับตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ (ไม่แตกตัวเนื่องจากความปั่นป่วนบริเวณผิวหน้าและทางออกของน้ำในถังปฏิกริยา) แล้วเกิดการตกตะกอนอย่างเหมาะสม โดยที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดความชุ่มในน้ำด้วยถังปฏิกริยาแบบอากาศยกโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องได้ โดยให้ประสิทธิภาพการกำจัดประมาณร้อยละ 85 และ 70 ในน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ด้วยประสิทธิภาพการบำบัดที่ยังคงมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการบำบัดทางเคมีด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน และการตกตะกอนด้วยถังปฏิกริยาที่แยกกันอย่างชัดเจนนั้น ในอนาคต การศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด รวมถึงการวิเคราะห์ในเชิงลึกในด้านรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกที่เกิดขึ้นภายในอย่างชัดเจน รวมถึงทำให้เราสามารถปรับปรุงและปรับเปลี่ยนกระบวนการและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในทางปฏิบัติได้อย่างเหมาะสม



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากำจัดความขุ่นในน้ำด้วยการรวมกระบวนการสร้าง-รวมตะกอนและการตกตะกอนเข้าด้วยกัน โดยการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Airlift reactor, ALR) และถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Bubble column reactor, BCR) เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน และพื้นที่ใช้สอยในระบบผลิตประปา โดยทำการศึกษาดัชนีประสิทธิภาพการกำจัดของฟองอากาศและของเหลว (Bubble and liquid phase hydrodynamic parameters) ภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกและถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดระยะเวลาการกำจัด ปริมาณสารเคมี และปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากถังปฏิกรณ์ทั้งสอง โดยเดินระบบแบบทีละเท (Batch system) และแบบต่อเนื่อง (Continuous system) โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้การทดลองจาร์เทสต์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ถังปฏิกรณ์ที่ทำด้วยอะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร สูง 0.80 เมตร ที่ด้านล่างติดตั้งกรวยเพื่อไว้กักเก็บตะกอนสูง 0.30 เมตร ด้านในประกอบด้วยท่อภายในทำด้วยอะคริลิกใสขนาด 0.10 เมตร สูง 0.40 เมตร ติดตั้งตามแนวแกนตรงกลางของถังปฏิกรณ์ วางที่ระยะห่างจากตัวกระจายอากาศ 5 เซนติเมตร โดยจากการศึกษาที่ผ่านมา สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยการทดลองจาร์เทสต์ พบว่าความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนที่ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดความขุ่นในน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 และ 0.1 กรัมต่อลิตร มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนที่เพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ความเข้มข้นของสารสัมเท่ากับ 50 mg/L และ 30 mg/L ตามลำดับ สามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นได้สูงสุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสัมขึ้นอีก พบว่าทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่อนข้างคงที่หรือมีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อย โดยกลไกการห่อหุ้มตะกอน (Sweep-floc coagulation) เป็นกลไกหลักในการบำบัดเฟสน้ำในงานวิจัยนี้

5.1.2 การศึกษาดัชนีประสิทธิภาพการกำจัดของฟองอากาศและของเหลว (Bubble and liquid phase hydrodynamic parameters) ภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Air-Lift Reactor) และ

ถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column) ในด้านขนาดฟองอากาศ ( $d_B$ ) พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) และความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ ( $U_{Ld}$ ) กล่าวโดยสรุปคือ

- ขนาดฟองอากาศ ( $d_B$ ) พบว่า อัตราการไหลอากาศที่สูงขึ้น มีผลต่อขนาดฟองอากาศที่เพิ่มสูงขึ้น โดยที่ขนาดฟองอากาศในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีขนาดใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศเล็กน้อย เนื่องจากการทดลองนี้ใช้หัวเติมอากาศชนิดเดียวกัน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น
- พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ ( $a$ ) พบว่า ค่า  $a$  แปรผันตรงกับจำนวนฟองอากาศ ( $N_B$ ) ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยา โดยที่ค่า  $a$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเติมอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า  $a$  ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีค่าสูงกว่าถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ
- ความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ พบว่าของแข็งแขวนลอยในน้ำสามารถส่งผลต่อค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ นอกจากนี้ ค่าดังกล่าวยังประยุกต์ใช้ในการแบ่งขอบเขตการไหลของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก โดยที่อัตราการเติมอากาศต่างๆจะมีค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศที่ใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่ออัตราการเติมอากาศมีค่าสูงๆ และยังเห็นได้อีกว่าที่ขอบเขตการไหลที่ 2 นั้นมีค่าความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศค่อนข้างคงที่ ดังนั้น จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเดินระบบที่อัตราการเติมอากาศที่สูงมากๆ เป็นการประหยัดพลังงานไปอีกทางหนึ่งด้วย โดยที่การแบ่งขอบเขตการไหลจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดขุ่นต่อไป

5.1.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air-Lift Reactor) และถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column) โดยการเดินระบบแบบกะ (Batch) พบว่าถังปฏิกริยาแบบอากาศยกมีความสามารถในการกวนผสมสารเคมีที่สูงกว่าถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ เนื่องจากที่อัตราการเติมอากาศที่เท่ากัน ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกจะให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient) และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area) ที่สูงกว่าถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการกวนผสมของระบบที่สูงกว่าถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ นอกจากนี้ ยังมีการไหลวนภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่ทำให้เกิดการกวนเร็วในส่วนเติมอากาศและเกิดการกวนช้าในส่วนไม่เติมอากาศ รวมถึงช่วยให้เกิดการใช้งานสารเคมีในการทำลายเสถียรภาพอย่างคุ้มค่า ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระบบแบบต่อเนื่อง เพื่อพิจารณาแนวทางในการประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต



5.1.4 การเกิดตะกอน และการเกิดฟลอคภายในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Airlift reactor) และถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (Bubble column) พบว่าความหนาของชั้นตะกอนที่ระยะเวลาต่างๆ ของการเดินระบบ (10, 15, 20 และ 30 นาที) ของในกรณีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตรมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้ในกรณีของ 0.1 กรัมต่อลิตร โดยที่ค่าความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เกิดการตกตะกอน 3 ลักษณะ ได้แก่ 1) การตกตะกอนแบบโดด 2) การตะกอนแบบรวมกลุ่ม (Flocculent settling) เกิดขึ้นบริเวณท่อทรงกระบอกในส่วนที่ไม่เติมอากาศ และ 3) การตกตะกอนแบบแบ่งชั้นหรือแบบอัดตัว (Zone or compression settling) ในขณะที่ ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตรซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นโดยรวมของอนุภาคที่ต่ำกว่านั้น กล่าวได้ว่าจะเกิดการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มเป็นหลักโดยมีความสูงของชั้นตะกอนเพิ่มขึ้นตามเวลา รวมถึงการที่ความสูงชั้นตะกอนที่ค่อนข้างต่ำและห่างจากบริเวณด้านล่างของท่อภายใน (Draft tube) เมื่อเทียบกับกรณีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงได้รับผลกระทบจากการไหลวนของเฟสของเหลวที่ต่ำกว่าและส่งต่อแรงภายนอกซึ่งส่งผลต่อการอัดตัวของชั้นตะกอนที่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเดินระบบในระยะเวลาที่เท่ากัน

5.1.5 การศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (Air-Lift Reactor) โดยการเดินระบบแบบกะ (Batch) พบว่า

- อุปกรณ์ประกอบประเภทโคนไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับถังปฏิกริยาแบบอากาศยกในการทดลองนี้ได้ เนื่องจากอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนไปขวางทิศทางการไหล ของเหลวที่ไหลผ่านโคนด้านบนมีความปั่นป่วนค่อนข้างสูง จึงเกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคตะกอน เป็นผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง
- ถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีขนาดท่อภายใน 12 เซนติเมตร ( $ALR_{12}$ ) ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงขึ้น โดยสามารถลดอัตราการเติมอากาศในการกวนผสมลงได้ เนื่องจากด้วยเหตุที่ว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อภายในมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดส่วนไม่เติมอากาศและส่วนเติมอากาศ ( $A_u/A_e$ ) มีค่าลดลงทำให้เกิดการไหลหมุนเวียนของของเหลวเกิดขึ้นได้ดี เป็นผลให้ใช้อัตราการเติมอากาศสำหรับการกวนผสมลดลง โดยเป็นการประหยัดพลังงานได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งน่าส่งผลดีในด้านเศรษฐศาสตร์ในระบบผลิตน้ำประปา

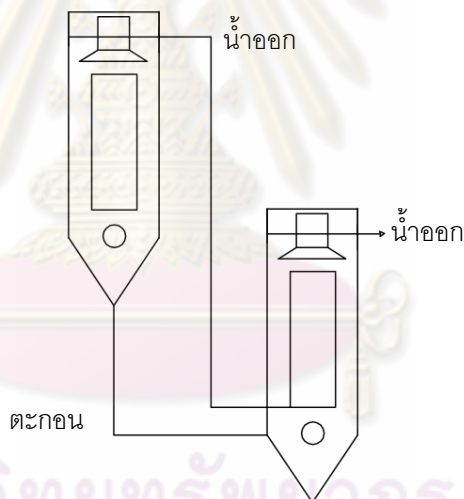
5.1.5 การเดินระบบแบบต่อเนื่องของถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Air-Lift reactor) ในการกำจัดความขุ่น พบว่า

- ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องพบว่ามีความต่ำมาก เนื่องจากเกิดความปั่นป่วนบริเวณผิวบนของถังปฏิกรณ์ตลอดเวลา และยังพบอีกว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้อัตราการเติมอากาศสูงๆ เนื่องจากทำให้ส่วนไม่เติมอากาศเกิดความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์มากเกินไป ส่งผลกระทบต่ออนุภาคความขุ่นที่ถูกทำเสถียรภาพในส่วนเติมอากาศแล้วรวมตัวกันเป็นฟล็อกในส่วนไม่เติมอากาศเกิดการแตกตัวไม่สามารถตกตะกอนได้ดีและส่วนใหญ่จะไหลวนกลับเข้าสู่ส่วนเติมอากาศอีกครั้ง
- ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีท่อภายในขนาด 12 เซนติเมตร ร่วมกับอุปกรณ์ประกอบประเภทโคนแบบพิเศษ โดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีการสร้างโซนที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนที่ต่ำเพื่อกระบวนการรวมตะกอนได้อย่างชัดเจน
- นอกจากปัจจัยด้านปริมาณสารเคมี (Chemical dosage) ด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและเฟสของเหลว (Bubble and liquid phase hydrodynamic parameters) และอัตราการไหลของน้ำเสียหรือระยะเวลาพักน้ำ (Detention time) ที่สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก (Air-Lift Reactor) นั้น การปรับสภาพหรือรูปแบบการไหลเพื่อควบคุมความปั่นป่วนภายในนับว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกแบบต่อเนื่อง

อย่างไรก็ดี การประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกในการกำจัดความขุ่นในน้ำนั้น ยังคงไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตน้ำประปา (ไม่เกิน 5 เอ็นทียู) ซึ่งยังคงต้องการถังกรองในขั้นตอนต่อไปของการผลิตน้ำประปาต่อไป โดยจากการทดลองที่ผ่านนั้นจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกนั้นในปัจจุบันอาจมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานในลักษณะของการบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment) เพื่อจัดการกับเฟสน้ำที่มีความเข้มข้นสูง รวมถึงยังคงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาขีดความสามารถของการประยุกต์ใช้ถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกในการกำจัดความขุ่นในน้ำต่อไปทั้งในด้านประสิทธิภาพการบำบัด และในด้านเศรษฐศาสตร์ในอนาคต

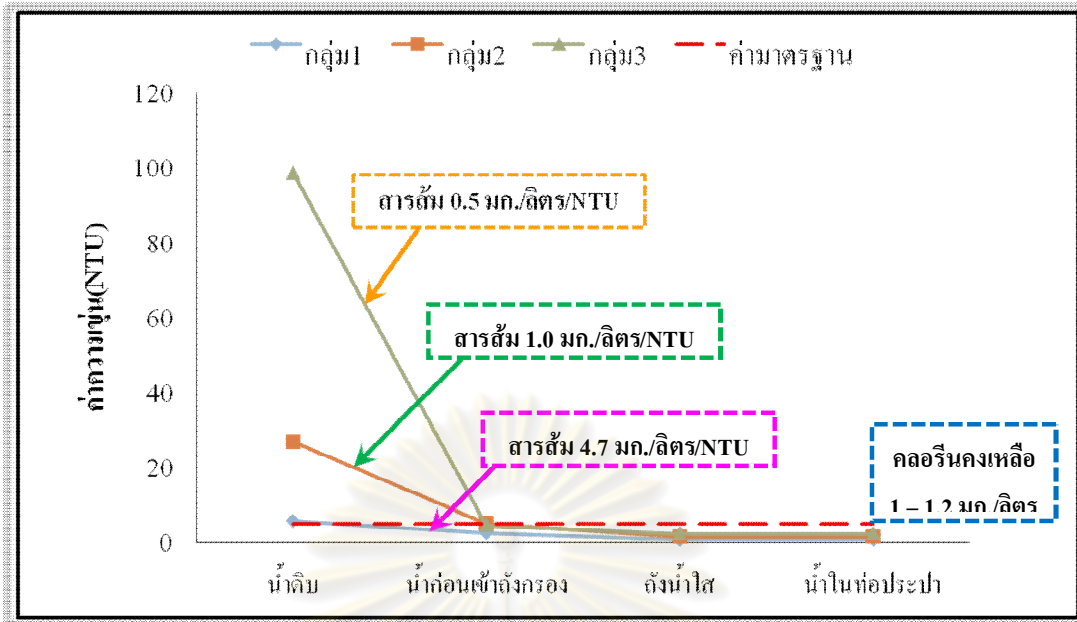
## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของ การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด รวมถึงการวิเคราะห์ในเชิงลึกในด้านรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกที่เกิดขึ้นภายในอย่างชัดเจน รวมถึงทำให้เราสามารถปรับปรุงและปรับเปลี่ยนกระบวนการและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในทางปฏิบัติได้อย่างเหมาะสม
- ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous Process) โดยการนำถังปฏิกริยาแบบอากาศยกที่มีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ประกอบประเภท โคนที่มีการปรับปรุงมาต่ออนุกรม (Process in series) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 เช่นในกรณีที่เฟส น้ำที่เข้าระบบผลิตน้ำประปามีความเข้มข้นสูงๆ นั้นจึงควรผ่านระบบการบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment) ซึ่งผลการทดลองที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ได้ จากถังปฏิกริยาแบบอากาศยกนั้นสามารถนำไปใช้ในการบำบัดขั้นต้นได้ ซึ่งเห็นได้จากค่าความขุ่นของน้ำดิบที่เข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 ลักษณะการต่ออนุกรมของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 คุณภาพน้ำดิบที่เข้าในระบบผลิตน้ำประปา (การประปาส่วนภูมิภาค, 2550)

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การประปาส่วนภูมิภาค. ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา[Online]. 2550. แหล่งที่มา :

[http://www.geocities.com/pwa2saraburi/palit\\_num.htm](http://www.geocities.com/pwa2saraburi/palit_num.htm)[2550, ธันวาคม 6]

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มิตรนรา  
การพิมพ์, 2539.

คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ประจำปี 2545-2546. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย.

พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

พัชการณ บุญยประสิทธิ์. การเพาะเลี้ยงกล้วยไม้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแอร์ลِفต์. วิทยานิพนธ์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
, 2547.

นลินี ตันทิกุล. พฤติกรรมทางด้านอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวลสารภายในถังสัมผัสแบบ

อากาศยกขนาดใหญ่ที่มีท่อภายในหลายท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชา

วิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ประเสริฐ ภาสันต์. การพัฒนาความรู้พื้นฐานด้านพฤติกรรมอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทมวล

สารเพื่อช่วยในการออกแบบถังสัมผัสระหว่างก๊าซและของเหลวแบบอากาศยก.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ประเสริฐ ภาสันต์. การศึกษาการกระจายตัวของฟองก๊าซภายในถังสัมผัสแบบอากาศยก.

โครงการวิจัยเลขที่ 172-เคมี-2544 ทูลส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์, คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

พรทิพย์ วงศ์สุโชโต. พฤติกรรมของฟองก๊าซและการไหลวนภายในของของเหลวในถังสัมผัส

อากาศยกประเภทที่มีการไหลวนภายใน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชา

วิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

มันดิน ตันฑุลเวศน์. วิศวกรรมประปา. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย, 2542.

วิจารณ์ ตันติธรรม. การกำจัดความขุ่นโดยถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน. วิทยานิพนธ์

ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย, 2536.

## ภาษาอังกฤษ

Bo Jin and Paul Lant. Flow regime, hydrodynamics, floc size distribution and sludge properties in activated sludges bubble column, air-lift and stirred reactors.

Chemical Engineering Science 59 (2004): 2379-2388.

Bo Jin, Ping Yin and Paul Lant. Hydrodynamics and mass transfer coefficient in three-phase air-lift reactor. Chemical Engineering Process 45 (2006): 608-617.

Chisti M.Y. Airlift Bioreactor. Elsevier Applied Science, London and New York, 1989.

ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

Grace, J.R., and Wairegi, T. Properties and Characteristics of Drops and

Bubbles. Encyclopedia of Fluid Mechanics. Huston: Cheremisinoff. Gulf

Publishing Corporation, 1986

M. Blazej, M. Kisa, J. Makos. Scale influence on the hydrodynamics of an internal loop airlift reactor. Chemical Engineering Process 43 (2004): 1519-1527.

McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. Unit operations of chemical engineering. 7<sup>th</sup>

ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater engineering treatment and reuse. 4th ed. Singapore:

McGraw-Hill, 2004.

Painmanakul P, Loubire K, Hbrard G and Buffire P. Study of different membrane

spargers used in wastewater treatment characterization and performance.

Chemical Engineering Process (2004): 1347-1359.

V.A.Mhaisalkar, R.Paramasivam and A.G.Bhole. Optimizing physical parameters of

Rapid mix design for coagulation-flocculation of turbid water. Water Resource.

Volume 25 (1991): 43-52.

W.A.J. van Benthum, R.G.J.M. van der Lans. Bubble recirculation regimes in an internal-

loop airlift reactor. Chemical Engineering Science. 54 (1999):3995-4006.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก-1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นต่อความเข้มข้นสารส้ม (จาร์เทสต์)

ตารางที่ ก-1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นต่อความเข้มข้นสารส้ม 1 กรัมต่อลิตร

ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น (%)	ความเข้มข้นสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
32.62	0.5
36.28	1
81.38	5
98.8	10
99.05	20
99.14	30
99.26	40
99.78	50
99.05	60
99.17	70
99.15	80
99.13	90
99.07	100

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่อความเข้มข้นสารส้ม 0.1 กรัมต่อลิตร

ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (%)	ความเข้มข้นสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
61.48	0.5
72.13	1
94.26	5
96	10
97	20
98.35	30
97.73	40
97.33	50
96.93	60
96.67	70
96.67	80
96	90
96	100

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-2 การศึกษาค่าอุทกพลศาสตร์

ตารางที่ ก-2.1 ตารางขนาดฟองอากาศในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ( $ALR_{10}$  และ  $ALR_{12}$ ) และถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (BCR)

อัตราการเติมอากาศ (ลิตรต่อนาที)	ขนาดฟองอากาศ (มิลลิเมตร)		
	$ALR_{10}$	BCR	$ALR_{12}$
0.2	1.873	1.975	1.92
0.3	1.93	2	2.063
0.4	2.065	2.235	2.21
0.5	2.2	2.38	2.334
1	2.29	2.669	2.48
2	2.383	2.771	2.525
3	2.5	2.816	2.708
4	2.652	3.017	2.86
5	3	3.218	3.103

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-2.2 ตารางพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$  และ  $ALR_{12}$ )  
และถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR)

อัตราการเติมอากาศ (ลิตรต่อนาที)	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (เมตร <sup>1</sup> )		
	$ALR_{10}$	BCR	$ALR_{12}$
0.2	237.8646	57.0822	162.1503
0.3	348.8024	84.8287	230.5604
0.4	442.3325	104.4005	292.6511
0.5	528.3051	124.9574	352.1753
1	1027.5928	232.0430	676.2975
2	1999.6201	453.4815	1336.9430
3	2906.1941	673.7908	1918.7317
4	3730.9054	863.7368	2475.6877
5	4620.9600	1043.5985	3010.5317

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-2.3 ตารางความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ )

$Q_y$ (L/min)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
น้ำประปา	0.000	0.053	0.055	0.054	0.059	0.068	0.067	0.064	0.079	0.082	0.086	0.104	0.135	0.148	0.154	0.159	0.167	0.166	0.156	0.155
1 กรัมต่อลิตร	0	0.042	0.044	0.043	0.048	0.057	0.056	0.053	0.068	0.071	0.098	0.105	0.100	0.096	0.108	0.103	0.099	0.102	0.109	0.107
0.1 กรัมต่อลิตร	0.000	0.049	0.051	0.050	0.054	0.065	0.064	0.062	0.075	0.079	0.082	0.101	0.132	0.135	0.140	0.156	0.164	0.161	0.154	0.153

ตารางที่ ก-2.4 ตารางความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ )

$Q_y$ (L/min)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
น้ำประปา	0.000	0.054	0.059	0.061	0.074	0.078	0.088	0.086	0.088	0.099	0.104	0.142	0.147	0.154	0.156	0.156	0.147	0.145	0.150	0.143
1 กรัมต่อลิตร	0.000	0.049	0.054	0.058	0.062	0.073	0.079	0.097	0.100	0.107	0.106	0.112	0.115	0.117	0.117	0.125	0.124	0.118	0.121	0.120
0.1 กรัมต่อลิตร	0.000	0.052	0.056	0.059	0.071	0.076	0.086	0.081	0.079	0.096	0.095	0.136	0.141	0.143	0.150	0.149	0.143	0.137	0.143	0.136

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-3 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความชื้น

ตารางที่ ก-3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	10.32	11.91	11.33	13.77	5.69	8.05
5	84	90.12	92.27	96.19	89.19	82.11
10	85.84	94.63	95.86	96.5	93.17	91.54
15	89.44	95.33	96.56	96.65	95.04	92.44
20	90.72	95.8	96.64	96.73	95.61	93.9
30	92.48	95.55	97.11	97.67	95.85	93.98

ตารางที่ ก-3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	13.31	12.75	15.5	13.44	14.84	13.7
5	87.32	87.78	89.3	91.02	88.75	82.88
10	92.76	94.44	95.35	96.09	92.66	91.21
15	93.15	95.31	95.89	96.48	94.84	92.92
20	94.33	95.38	96.12	96.64	95.39	93.15
30	94.49	95.7	96.67	96.8	95.55	94.16

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	14.57	14.67	11.02	5.17	13.39	15.56
5	15.75	20.08	12.74	10.49	16.11	17.98
10	92.39	91.16	90.46	88.14	86.07	81.87
15	96.28	95.43	94.84	94.35	92.06	87.7
20	96.43	95.8	96.01	94.43	93.77	89.73
25	96.51	96.11	96.48	94.67	94.32	92.06
35	96.67	96.57	96.87	96.29	95.1	92.68

ตารางที่ ก-3.4 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	15.63	16.67	12.61	11.76	27.95	23.37
10	24.94	27.08	20.43	13.04	34.38	29.64
20	37.66	38.37	35.91	18.88	42.09	35.82
25	93.35	93.47	86.59	82.4	84.18	82.17
30	94.76	94.5	93.22	88.56	87.55	85.7
35	96.18	95.88	93.7	93.76	90.04	88.19
40	96.43	96.01	94.81	94.72	92.77	91.16
50	96.76	96.35	95.21	96.08	93.17	92.21

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.5 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลา  
กวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	4.91	3.87	4.66	3.89	2.5	3.1
5	85.66	89.7	92.77	91.9	93.04	88.15
10	88.54	93.73	95.26	95.23	95.54	93.32
15	90.41	94.73	96.22	96.9	96.56	94.59
20	91.27	94.81	96.54	97.06	96.79	95.39
30	91.5	94.97	96.62	97.14	97.26	95.62

ตารางที่ ก-3.6 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลา  
กวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	9.27	8.04	7.39	8.4	7.5	8.89
5	89.86	90.62	91.83	94.76	90.16	85.86
10	93.93	94.8	95.95	96.61	93.05	91.5
15	94.89	96.14	96.89	96.84	96.17	93.35
20	95.29	96.69	97.04	97.07	96.25	94.13
30	95.37	96.85	97.2	97.22	96.8	94.36



## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลา  
กวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	10.36	6.26	11.25	7.93	7.44	4.19
5	13.39	6.82	13.42	10	9.54	5.56
10	90.04	91.39	87.04	88.26	85.77	81.8
15	95.06	95.37	94.34	93.55	92	89.21
20	96.18	96.26	95.97	95.87	93.78	92.03
25	96.89	96.91	96.04	96.2	94.91	92.19
35	97.05	97.08	96.97	96.53	94.99	93

ตารางที่ ก-3.8 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลา  
กวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	14.67	9.21	8.33	7.77	4.15	1.31
10	21.61	9.38	10.02	10.18	5.75	3.01
20	34.05	15.27	18.19	16.01	10.61	8.49
25	82.54	81.99	83.09	79.1	77.81	74
30	90.11	89.46	86.14	87.02	84.36	83.72
35	91.95	93.52	92.15	92.15	88.99	86.88
40	94.18	95.02	94.07	93.08	89.86	88.35
50	95.37	95.27	94.79	93.78	91.54	89.27

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.9 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	5.93	12.17	12.82	11.21	8.7	8.62
5	7.62	20	33.33	45.69	17.39	30.17
10	8.47	24.35	41.03	56.9	40	50
15	9.32	36.52	55.55	71.55	62.61	62.07
20	15.25	53.91	73.5	78.44	71.3	71.55
30	25.42	73.04	80.34	89.22	79.13	75.8

ตารางที่ ก-3.10 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	5.22	12.07	8.62	8.7	4.42	4.42
5	16.52	43.97	52.59	70.87	25.66	26.55
10	20	49.14	68.97	73.91	54.87	56.64
15	47.83	63.79	80.17	80	70.79	72.57
20	62.61	70.69	81.9	85.91	76.99	76.99
30	72.17	75.86	85.09	90.43	82.3	81.42

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.11 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	1.69	8.18	7.14	10.62	1.74	1.72
5	5.93	10.91	9.82	11.5	4.35	3.45
10	48.31	69.09	68.75	53.98	20.87	16.38
15	70.34	78.18	71.43	69.03	49.54	46.55
20	77.12	82.73	76.79	69.03	70.43	66.38
25	82.2	83.73	84.55	79.65	78.26	70.69
35	83.9	88.36	87.14	84.07	82.61	77.59

ตารางที่ ก-3.12 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	3.48	8.77	8.7	8.7	4.31	2.59
10	7.83	7.02	12.17	11.3	6.9	5.17
20	11.3	13.26	13.04	13.91	8.62	7.76
25	45.22	61.4	51.3	53.04	18.1	22.41
30	69.57	74.56	71.3	64.35	44.83	28.45
35	78.26	81.58	81.74	76.52	58.62	47.41
40	83.04	82.46	84.52	76.52	72.41	60.34
50	86.87	88.07	84	84.35	77.59	73.28

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.13 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิบัติการแบบพองอากาศ (BCR) ที่เวลา  
กวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	3.54	1.8	3.57	4.55	4.46	4.5
5	6.96	12.61	28.57	40.91	35.71	25.23
10	11.5	25.23	59.82	58.56	48.21	38.74
15	16.81	31.53	61.61	70.19	62.5	53.15
20	38.05	38.74	64.29	75.45	75	64.86
30	46.9	63.06	76.79	82.91	82.14	73.87

ตารางที่ ก-3.14 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิบัติการแบบพองอากาศ (BCR) ที่เวลา  
กวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	9.32	2.68	6.14	7.83	4.35	5.26
5	11.86	45.54	35.96	66.57	56.56	37.72
10	21.19	50	53.51	70.43	72.17	64.04
15	23.72	54.46	75.44	73.91	78.26	71.05
20	44.92	68.75	79.82	82.7	82.61	77.19
30	57.65	77.68	81.58	85.3	84.35	83.33

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.15 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิบัติการแบบพองอากาศ (BCR) ที่เวลา  
กวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	5.22	3.45	3.6	3.57	4.24	3.42
5	8.7	5.17	8.11	7.14	5.93	5.13
10	31.3	50.86	62.16	70.96	38.14	26.5
15	51.3	64.66	72.07	75	61.02	47.01
20	66.96	75.86	75.68	78.57	73.73	65.82
25	73.91	80.17	81.98	83.48	77.12	71.19
35	80	89.14	89.19	90.09	82.2	75.21

ตารางที่ ก-3.16 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิบัติการแบบพองอากาศ (BCR) ที่เวลา  
กวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	4.39	3.48	3.48	1.82	7.63	3.57
10	6.14	6.09	9.57	6.36	6.78	3.57
20	7.89	15.65	10.43	9.09	8.47	7.14
25	19.3	60	50.4	50.91	35.59	20.54
30	26.32	67.83	67.83	67.27	38.98	27.68
35	39.47	71.3	73.04	70.91	54.24	52.68
40	56.14	74.78	77.39	78.18	66.95	58.04
50	64.04	76.52	81.74	83.27	75.42	66.07

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.17 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	12.33	13.06	9.37	4.43	5.07	5.03
5	90.63	94	96.54	93.61	92.87	91.65
10	94.08	96.43	97.32	97.5	96.2	95.75
15	94.25	97.08	97.48	97.67	97.07	95.9
20	94.49	97.57	97.72	97.75	97.23	95.98
30	94.66	97.89	98.03	97.83	97.31	96.44

ตารางที่ ก-3.18 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	14.12	15.68	13.68	7.61	5.5	6.35
5	93.19	93.63	93.16	93.02	91.35	88.32
10	95.24	96.1	97.05	96.58	95.47	93.34
15	96.72	97.29	97.2	97.52	96.77	94.67
20	96.8	97.77	97.67	97.67	97.01	94.98
30	96.88	97.85	97.82	97.83	97.17	95.38

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.19 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	11.74	8.02	9.57	4.67	4.24	5.2
5	13.14	9.07	10.62	9.57	4.65	6.85
10	92.2	93.2	91.07	87.61	86.86	84.8
15	96.22	96.68	94.53	93.89	92.65	91.65
20	97.29	97.65	96.14	95.9	93.8	92.36
25	97.54	97.73	97.02	95.98	94.29	93.54
35	97.78	97.89	97.35	96.14	94.86	93.62

ตารางที่ ก-3.20 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	15.25	9.76	4.61	10.94	4.03	7.51
10	19.03	12.43	7.49	12.89	5.32	9.15
20	22.56	13.38	9.61	15.63	7.9	12.04
25	86.79	89.69	84.99	84.06	77.82	62.24
30	93.32	94.89	91.66	90.16	85.24	82.02
35	94.97	95.67	94.2	93.36	88.71	86.16
40	96.23	96.77	95.23	93.67	89.92	86.94
50	96.93	97.32	95.39	93.75	91.45	88.27

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.21 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	2.42	3.88	4	7.75	5.51	6.45
5	6.45	13.18	43.2	48.84	51.97	22.58
10	11.29	20.23	62.4	62.79	66.93	36.89
15	14.25	44.19	72.8	74.42	74.8	62.1
20	25.81	56.59	77.6	79.84	79.53	62.1
30	60.48	71.32	84	84.49	83.46	76.61

ตารางที่ ก-3.22 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	3.13	3.1	5.51	4.13	7.14	5.96
5	5.6	43.41	49.61	62.81	62.7	30.89
10	18.4	64.34	75.59	76.86	69.84	36.59
15	44	72.87	81.1	82.64	77.78	61.79
20	56	76.74	85.04	84.05	81.75	62.6
30	69.6	82.94	92.13	88.02	83.33	72.36



## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.23 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	2.34	2.31	2.99	7.2	7.32	4.62
5	6.25	6.92	7.46	9.6	10.57	9.23
10	46.88	74.62	64.18	57.6	39.84	17.69
15	71.09	76.92	70.89	72	56.1	29.23
20	81.25	84.62	82.84	79.2	69.11	50
25	84.38	85.85	86.57	83.2	79.67	62.31
35	85.94	90.08	87.76	86.8	81.3	75.38

ตารางที่ ก-3.24 ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลา  
กวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)/ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	4.8	3.25	2.5	4	2.46	1.61
10	7.2	8.8	5	10.4	4.09	3.23
20	8.8	9.6	7.5	12.8	4.92	4.84
25	48	56.1	52.5	48.8	19.67	12.9
30	72.8	61.79	58.33	59.2	42.62	26.61
35	82.4	73.98	67.5	70.4	55.74	42.74
40	84.8	79.67	75	72.8	60.66	54.84
50	87.2	82.93	79.17	77.6	68.03	59.68

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ภาคผนวก ก-3 การศึกษาการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ ก-3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก (ALR<sub>12</sub>) ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยการระบบแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการเติมอากาศ 2 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำเข้า 90 ลิตรต่อชั่วโมง และ อัตราการเติมอากาศ 0.7 และ 0.3 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำเข้า 30 ลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	NTU			%Removal		
0	1361	1280	1343	0	0	0
1	1320	1220	1170	3.01	4.69	12.88
5	1296	1171	1191	4.78	8.32	11.32
10	1276	1179	1067	6.25	7.89	20.55
15	1254	1167	1040	7.86	8.83	22.56
20	1243	1154	1021	8.67	9.84	23.98
30	1238	1120	997	9.04	12.5	25.76
45	1248	1056	952	8.3	17.5	29.11
60	1221	1053	891	10.29	17.73	33.66
90	1229	1027	858	9.7	19.77	36.11
120	1253	1082	865	7.94	15.47	35.59
135	1266	1044	825	6.98	18.44	38.57
150	1288	1051	954	5.36	17.89	28.97
180	1243	1068	923	8.67	16.56	31.27
210	1265	1075	945	7.05	16.02	29.64
240	1249	1092	960	8.23	14.69	28.52

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก (ALR<sub>12</sub>) ร่วมกับ อุปกรณ์ประกอบประเภทโคนแบบพิเศษ ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยการเดินระบบ แบบต่อเนื่อง ที่อัตราการเติมอากาศ 0.3 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำเข้า 20, 30, 40 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	%TURBIDITY REMOVAL				
	0	0	0	0	0
1	79.66	77.42	67.27	64.26	41.83
5	82.5	83.83	78	77.48	66.61
10	82.66	84.22	82.22	77.64	70.07
15	84.96	83.91	82.3	78.13	72.24
20	83.81	85.63	83.16	80.21	72.57
30	84.88	85.31	80.81	77.96	78.04
45	84.27	85.63	81.21	78.29	69.43

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ก-3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของถังปฏิกิริยาแบบอากาศยก (ALR<sub>12</sub>) ร่วมกับ อุปกรณ์ประกอบประเภทโคนแบบพิเศษ ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร โดยการเดินระบบ แบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลน้ำเข้า 10, 20, 30 60 และ 80 ลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (นาที)	%TURBIDITY REMOVAL				
	0	0	0	0	0
1	32	37.6	23.44	6.5	5.38
5	65.6	43.2	24.22	11.38	6.92
10	70.4	44	25	20.33	8.94
15	64	55.2	28.91	25.2	19.23
20	60	49.6	31.25	24.39	20.77
30	52.8	46.4	33.59	30.89	16.15
45	57.6	48.8	26.69	26.02	
60	52.8	45.6	22.66		

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

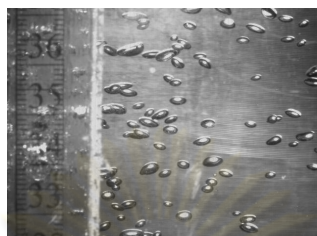
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข-1 ตัวอย่างรูปถ่ายขนาดฟองอากาศของถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ



ก) 0.3 ลิตรต่อนาที



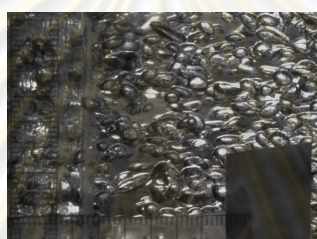
ข) 1 ลิตรต่อนาที



ค) 2 ลิตรต่อนาที



ง) 3 ลิตรต่อนาที

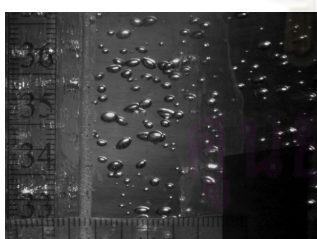


จ) 5 ลิตรต่อนาที

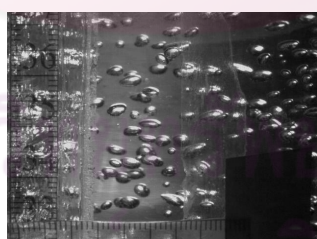


ฉ) 10 ลิตรต่อนาที

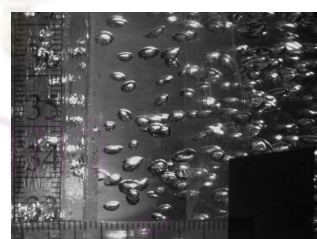
ภาคผนวก ข-2 ตัวอย่างรูปถ่ายขนาดฟองอากาศของถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (ALR<sub>10</sub>) ที่อัตราการเติมอากาศต่างๆ



ก) 0.3 ลิตรต่อนาที



ข) 1 ลิตรต่อนาที



ค) 2 ลิตรต่อนาที



ง) 3 ลิตรต่อนาที



จ) 5 ลิตรต่อนาที



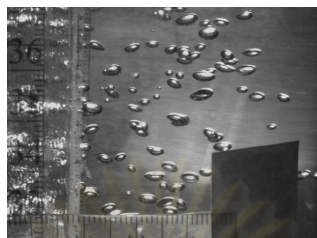
ฉ) 10 ลิตรต่อนาที

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

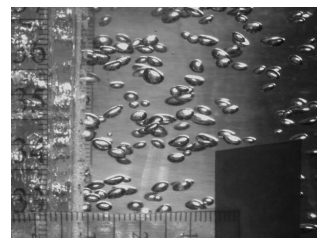
ภาคผนวก ข-3 ตัวอย่างรูปถ่ายขนาดฟองอากาศของถังปฏิริยาแบบอากาศยก (ALR<sub>12</sub>) ที่อัตรา  
การเติมอากาศต่างๆ



ก) 0.3 ลิตรต่อนาที



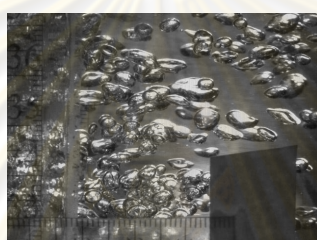
ข) 1 ลิตรต่อนาที



ค) 2 ลิตรต่อนาที



ง) 3 ลิตรต่อนาที

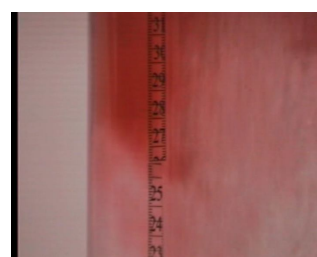
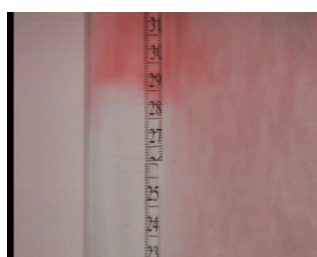
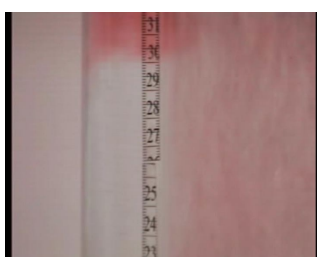
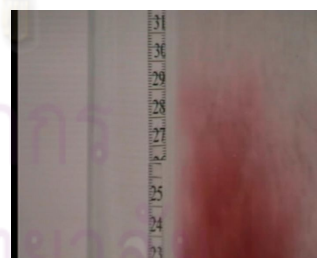
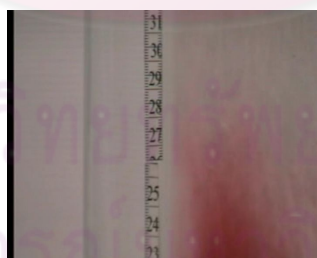
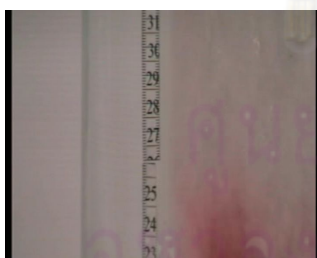


จ) 5 ลิตรต่อนาที



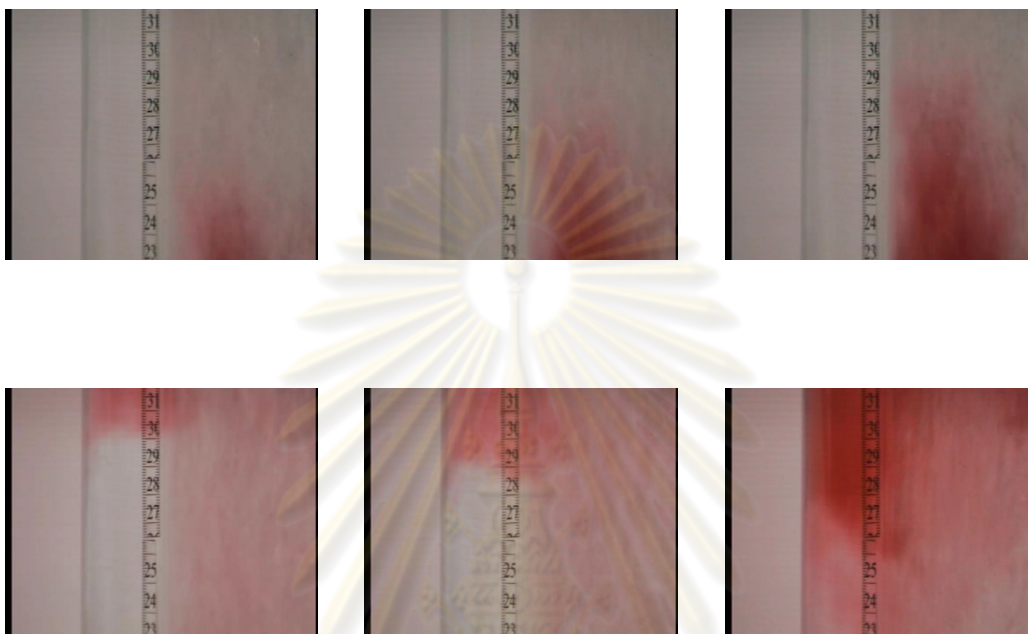
ฉ) 10 ลิตรต่อนาที

ภาคผนวก ข-4 ตัวอย่างรูปถ่ายความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เติมอากาศ ของถังปฏิริยาแบบ  
อากาศยก (ALR<sub>10</sub>)



## ภาคผนวก ข (ต่อ)

ภาคผนวก ข-5 ตัวอย่างรูปถ่ายความเร็วของของเหลวในส่วนไม่เต็มอากาศ ของถังปฏิริยาแบบ  
อากาศยก (ALR<sub>12</sub>)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

ภาคผนวก ค-1 การศึกษาลักษณะตะกอน

ตารางที่ ค-1.1 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลาทวนผสม 1 นาที  
ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
5	0	15.18	15.37	0	0	0
10	11.94	13.8	14.71	14.75	15.05	14.95
15	11.03	13.37	13.7	13.61	13.92	13.45
20	10.15	12.89	13.27	13.32	13.51	12.76
30	10.89	12.56	13.08	13.18	13.32	12.24

ตารางที่ ค-1.2 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลาทวนผสม 2 นาที  
ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	13.03	14.08	14.18	13.52	13.56	14.8
15	12.27	13.27	13.36	12.89	13.17	13.85
20	12.12	12.92	13.06	12.67	12.77	13.37
30	11.93	12.43	12.71	12.24	12.52	12.89

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.3 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลาทวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	14.09	0	0	0	0	0
15	13.85	14.71	15.37	14.87	14.56	14.8
20	13.42	14.06	14.71	14.42	14.32	14.09
25	13.03	13.47	13.7	13.56	13.61	13.23
35	12.65	12.89	13.13	13.01	12.89	12.89

ตารางที่ ค-1.4 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลาทวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
20	8.88	0	0	0	0	0
25	10.27	0	0	0	0	0
30	12.89	13.92	13.11	13.21	13.63	14.04
35	12.56	13.06	12.88	12.97	13.27	13.56
40	12.37	12.62	12.75	12.7	12.98	13.26
50	12.18	12.37	12.48	12.38	12.57	12.75

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.5 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลาทวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
15	0	0	4.77	6.68	6.11	6.11
20	2.32	3.82	5.45	7.54	7.4	7.4
30	4.77	6.02	6.92	8.04	7.93	7.93

ตารางที่ ค-1.6 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลาทวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	7.45	6.92	6.3	6.21
15	3.18	5.25	7.93	8.31	8.5	8.5
20	4.65	6.45	8.31	8.69	8.74	8.59
30	5.56	7.07	8.31	8.69	8.74	8.59

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.7 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลาทวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
15	5.25	7.4	7.16	6.83	5.25	4.68
20	7.01	8.26	8.26	8.31	8.02	6.5
25	7.16	8.45	8.45	8.59	8.5	7.74
35	7.4	8.69	8.45	8.59	8.79	8.08

ตารางที่ ค-1.8 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{10}$ ) ที่เวลาทวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
30	6.11	5.49	5.73	5.49	0	0
35	7.93	7.31	8.12	7.54	7.4	7.16
40	8.5	8.45	8.36	7.78	8.5	7.4
50	8.59	8.54	8.45	8.12	8.83	7.97

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.9 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลาทวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	13.47	15.92	17.61	17.33	0	18.18
15	12.34	14.32	16.73	16.39	16.39	16.48
20	11.73	13.66	14.41	15.35	15.82	15.73
30	11.3	13	13.84	14.32	14.69	14.5

ตารางที่ ค-1.10 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลาทวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	18.18	0	0	18.93	18.46	18.18
15	15.54	18.27	18.36	16.29	16.58	19.39
20	14.88	16.29	17.33	15.82	15.92	15.73
30	14.13	15.07	15.92	14.97	14.79	14.69

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.11 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลาการผสม 5 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
15	17.33	0	0	17.14	16.58	17.05
20	15.92	16.2	16.76	16.2	15.92	15.63
25	14.97	15.73	15.82	15.45	15.16	14.79
35	13.94	14.6	14.6	14.41	14.13	13.94

ตารางที่ ค-1.11 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลาการผสม 20 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	16.29	15.73	0
35	14.69	15.35	15.35	14.97	14.69	14.88
40	14.03	14.6	14.79	14.6	14.41	14.22
50	13.37	13.66	13.66	13.75	13.56	13.47

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.13 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลาการผสม 1 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
15	2.77	3.45	4.77	5.87	6.83	4.63
20	3.54	4.77	6.54	6.83	7.54	6.68
30	4.07	5.65	7.07	7.16	7.73	7.64

ตารางที่ ค-1.14 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลาการผสม 2 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	8.2	6.92
15	4.3	5.73	7.4	7.03	9.02	8.59
20	4.93	6.68	7.88	7.88	8.88	9.02
30	5.54	7.02	7.88	8.02	9.22	9.22



## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.15 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลากรวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
15	0	6.49	7.64	6.73	6.68	0
20	5.87	7.88	7.64	7.73	8.59	8.36
25	6.68	8.12	8.69	8.02	9.02	8.59
35	6.92	8.12	8.98	8.12	9.31	8.79

ตารางที่ ค-1.16 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบฟองอากาศ (BCR) ที่เวลากรวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
30	0	5.87	4.77	0	0	0
35	5.13	7.64	7.88	6.68	7.16	5.87
40	5.69	8.16	8.07	7.21	8.45	7.64
50	6.17	8.16	8.4	7.54	8.88	8.59

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.17 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (ALR<sub>12</sub>) ที่เวลาทวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\Q <sub>g</sub> (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	15.26	17.61	18.36	17.42	17.71	17.61
15	14.22	15.92	16.58	15.92	16.29	16.1
20	13.47	14.97	15.63	15.16	15.35	15.16
30	13.09	14.03	14.6	14.03	14.5	14.13

ตารางที่ ค-1.18 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก (ALR<sub>12</sub>) ที่เวลาทวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\Q <sub>g</sub> (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	17.23	18.08	18.18	17.52	17.56	17.23
15	15.45	16.39	16.48	16.01	16.29	16.2
20	14.6	15.26	15.54	15.35	15.45	15.35
30	13.94	14.41	14.69	14.22	14.5	14.32

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.19 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลากรนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
15	17.14	17.52	17.52	17.14	16.76	16.76
20	15.63	15.92	15.82	15.54	15.63	15.54
25	14.5	14.97	15.07	15.07	14.79	14.79
35	13.66	14.03	14.03	14.03	13.94	13.94

ตารางที่ ค-1.19 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลากรนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
30	15.45	16.48	16.01	16.1	0	0
35	14.5	14.88	14.79	15.07	14.75	14.22
40	13.84	14.22	14.13	14.41	13.94	13.47
50	12.81	13.37	13.28	13.66	13.33	12.9

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.21 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลาทวนผสม 1 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	9.17	6.21	8.93	7.31
15	0	6.68	10.27	8.69	9.98	9.41
20	6.54	7.97	10.27	9.41	10.31	9.98
30	7.16	8.83	10.03	9.79	10.74	9.98

ตารางที่ ค-1.22 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลาทวนผสม 2 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	8.83	10.27	10.31	8.93	0
15	0	10.03	10.65	11.12	10.93	9.5
20	6.92	10.27	10.65	11.6	11.12	10.22
30	7.97	10.36	10.36	11.36	11.12	10.22

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-1.23 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลาทวนผสม 5 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
15	8.93	11.46	11.22	10.22	9.41	6.68
20	9.88	11.84	11.84	11.46	11.08	9.5
25	10.03	11.84	11.84	11.46	11.32	10.74
35	9.69	11.65	11.22	11.27	11.17	11.08

ตารางที่ ค-1.24 ความสูงของตะกอนในถังปฏิกริยาแบบอากาศยก ( $ALR_{12}$ ) ที่เวลาทวนผสม 20 นาที ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)\ $Q_g$ (L/min)	0.3	1	2	3	5	10
0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
30	7.15	6.49	6.53	6.29	0	0
35	8.65	8.31	9.02	8.44	8.3	7.96
40	9.33	9.45	9.16	8.88	9.4	8.4
50	9.54	9.54	9.25	9.12	9.74	8.98

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกันตพงศ์ ผิวเหลือง เกิดวันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา พ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย