

การศึกษารูปแบบถึงปฏิกริยาสำหรับการกำจัดสาหร่ายโดยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Study of Reactor Configuration for Algae Removal by Dissolved Air Flotation



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษารูปแบบถึงปฏิบัติการสำหรับการกำจัดสาหร่ายโดย
	การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย
โดย	น.ส.ภาวินี พงศ์พันธ์พฤทธิ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ยมณฑล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ณัฐวิญญู ชวเลิศพรศิยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ยมณฑล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ณัฐวิญญู ชวเลิศพรศิยา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเชียร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มรุตพัชร จำนงค์วงศ์)

ภาวินี พงศ์พันธ์พฤทธิ : การศึกษารูปแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการกำจัดสาหร่ายโดยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย. (Study of Reactor Configuration for Algae Removal by Dissolved Air Flotation) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ณัฐวิญญู ชวลิตพรศิยา

กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้อย่างกว้างขวางในการแยกอนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำและมีแนวโน้มในการลอยมากกว่าการตกตะกอน เช่น สาหร่ายขนาดเล็ก ซึ่งเป็นปัญหาในการผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน โดยเฉพาะสาหร่ายที่มีความสามารถในการสร้างสารพิษ เช่น สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส ซึ่งเป็นสาหร่ายที่มีเสถียรภาพและแขวนลอยในน้ำ งานวิจัยนี้จึงศึกษาหาสภาวะในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายและการแยกสาหร่ายด้วย DAF ซึ่งจะต้องศึกษารูปแบบการไหลภายในถังที่เกิดขึ้นต่อรูปแบบของถังลอยตะกอน และประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายภายใต้สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม พบว่า การทำลายเสถียรภาพสาหร่ายด้วย PACl ประสิทธิภาพในการแยกสูงสุดรองลงมาคือ สารส้ม และการปรับพีเอช 11 ประสิทธิภาพการแยกสูงสุดเท่ากับ 93.98 86.19 และ 19.58% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ต้องใช้ PACl ในปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารส้มและฟล็อกที่เกิดจาก PACl ยังทำให้ลอยได้ยาก ดังนั้น จึงเลือกใช้สารส้มในการทำลายเสถียรภาพสาหร่าย และวิเคราะห์รูปแบบการไหลด้วยการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลากัก (RTD) และการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยปรับเปลี่ยนลักษณะการติดตั้งแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัสและโซนแยกภายในถังลอยตะกอนขนาด 40 ลิตร ได้แก่ ความสูง มุม และความยาวของโซนสัมผัส พบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 ซม. มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส 14 ซม. เกิดจุดอับเพียง 6.21% และส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายสูงสุดถึง 80.22% รวมถึงการศึกษาแนวทางการขยายขนาด (Scale-up) ถังปฏิกรณ์ตามทฤษฎี Geometric scale-up ด้วยโปรแกรม CFD ส่งผลต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์เพียงเล็กน้อย สาหร่ายความเข้มข้นสูงที่แยกออกมาได้สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทางเลือกประเภทหนึ่งในการผลิตไบโอดีเซลซึ่งมีประสิทธิภาพในการผลิตสูง

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070277721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Microcystis aeruginosa, Destabilization, Dissolved air flotation,
Residence time distribution, Computational fluid dynamics

Pavinee Pongpunpurt : Study of Reactor Configuration for Algae Removal
by Dissolved Air Flotation. Advisor: Prof. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D. Co-
advisor: Nattawin Chawaloeshonsiya, Ph.D.

Dissolved air flotation (DAF) is an efficient process and used extensively for separating low density particles and tend to float easier than settle down such as microalgae that cause of problems for conventional water treatment plants especially algae that have ability to synthesis toxins as *Microcystis aeruginosa* are stabilized particles and suspended in water. This research aimed to study optimum condition for destabilization and separation microalgae by DAF which could study flow pattern, depend on reactor configuration, and separation efficiency of algae under optimum operation of DAF. The results revealed PACl is highest efficiency followed by alum and pH 11 were 93.98, 86.19 and 19.5%, respectively. However, PACl is using dosage more than alum and flocs difficult to float. Therefore, we choose alum for destabilization microalgae and analyze flow pattern by residence time distribution (RTD) and computational fluid dynamics (CFD). Reactor configuration varied baffle, between contact zone and separation zone, position in 40L reactor include height, angle and contact zone length (L) found that baffle height 20 cm, angle 90 degree and L 14 cm which had dead zone 6.21% and maximum separation efficiency up to 80.22%. Scale-up followed by geometric scale-up theory using CFD slight affect flow pattern. Concentrated algae could use to alternative energy as biodiesel production which high productivity.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ญัฐวิญญู ชวเลิศพรศิยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่มอบโอกาสในการทำงานวิจัยนี้แก่ข้าพเจ้า ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความคิดเห็นอันมีค่าอย่างประเมินไม่ได้ตลอดการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศรีณย์ เตชะเสน รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มรุพัชร จำนงค์วงศ์ ที่กรุณาใช้เวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ดิชม และแก้ไขงานวิจัยนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุก ๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าอย่างมากมาย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นายกริชชาติ ว่องไวลิขิต และนายเชิยรสิทธิ์ กิตติจิตต์ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันมีค่าแก่ข้าพเจ้าตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่ในการศึกษาและทำวิจัยระดับปริญญาโทมาบัดนี้ของข้าพเจ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาวินี พงศ์พันธ์พฤทธิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูปภาพ.....	4
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	12
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.1 สาหร่าย	16
2.1.1 กลุ่มของสาหร่ายและการจัดจำแนก.....	16
2.1.2 วิธีการวิเคราะห์จำนวนสาหร่าย	23
2.1.3 ปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง	25
2.1.4 สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส (<i>Microcystis sp.</i>).....	26
2.1.5 การควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่าย.....	26
2.2 กระบวนการแยกสาหร่าย	27
2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน	30
2.3.1 พฤติกรรมของคอลลอยด์	30

2.3.2 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์.....	34
2.3.3 โคแอกกูแลนต์.....	40
3.3.3.4 โพลีเมอร์.....	46
2.4 กระบวนการทำให้ลอย.....	47
2.4.1 ประเภทของกระบวนการทำให้ลอย.....	48
2.5 โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	50
2.6 รูปแบบการไหลและการวิเคราะห์.....	51
2.6.1 รูปแบบการไหลในอุดมคติ (Ideal flow regimes).....	52
2.6.2 รูปแบบการไหลแบบไม่อุดมคติ (Non-ideal flow).....	53
2.6.3 หลักการกระจายเวลา.....	55
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	61
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย.....	68
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	68
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์.....	68
3.1.2 สารเคมี.....	72
3.2 แผนการทดลอง.....	74
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	77
3.3.1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายและศึกษาลักษณะสมบัติของสาหร่าย.....	77
3.3.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย.....	79
3.3.3 การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและศึกษา รูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD.....	82
3.3.4 การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม CFD.....	88
3.3.5 การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ ในการแยกสาหร่าย.....	89

3.3.6 การศึกษาแนวทางการขยายขนาดถึงปฏิกิริยา	91
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	93
4.1 การศึกษาลักษณะสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส	93
4.1.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของสาหร่าย.....	93
4.1.2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย	95
4.1.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่ายและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (A_{680})	96
4.1.4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับค่าความขุ่นของสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	97
4.1.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับปริมาณของแข็งแขวนลอยของสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	98
4.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย	100
4.2.1 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยการปรับพีเอช	103
4.3 การออกแบบถึงปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและศึกษารูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD	123
4.3.2 การออกแบบถึงปฏิกิริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	125
4.3.3 การวิเคราะห์ผลการกระจายเวลากัก.....	133
4.4 การศึกษารูปแบบการไหลภายในถึงปฏิกิริยาด้วยโปรแกรม CFD	140
4.4.1 Mesh.....	140
4.4.2 การตั้งค่าแบบจำลอง.....	142
4.4.3 การสอบเทียบรูปแบบการไหลภายในถึงปฏิกิริยาด้วยหลักการ RTD จากการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรม CFD.....	144
4.4.4 การวิเคราะห์ถึงปฏิกิริยาด้วยโปรแกรม CFD	148
4.5 การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถึงปฏิกิริยาในการแยกสาหร่าย.....	160

4.5.1 ระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	160
4.5.2 ระบบสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก	161
4.5.3 กระบวนการโคแอกกูเลชันในเส้นท่อ.....	162
4.5.4 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย.....	163
4.6 การศึกษาแนวทางการขยายขนาดถึงปฏิบัติการ.....	169
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	174
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	174
5.2 ข้อเสนอแนะ	175
ภาคผนวก.....	176
ภาคผนวก ก การศึกษาลักษณะสาหร่าย	177
ภาคผนวก ข การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย	181
ภาคผนวก ค การออกแบบถึงปฏิบัติการสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและศึกษารูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD.....	184
ค.1 การคำนวณความเร็วที่เข้าสู่โซนสัมผัส.....	184
ค.2 การคำนวณระยะเวลาโซนสัมผัส.....	184
ภาคผนวก ง การศึกษารูปแบบการไหลภายในถึงปฏิบัติการด้วย CFD	186
ภาคผนวก จ การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถึงปฏิบัติการในการแยกสาหร่าย.....	187
จ.1 การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอย.....	187
จ.2 การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย	189
บรรณานุกรม.....	191
ประวัติผู้เขียน.....	196

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ข้อมูลพื้นฐานของสาหร่ายที่พบบ่อยในประเทศไทย.....	20
ตารางที่ 2-2 การเลือกสไลด์นับเซลล์ตามขนาดและความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย	24
ตารางที่ 2-3 เปรียบเทียบกระบวนการแยกสาหร่าย.....	29
ตารางที่ 2-4 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์จากค่าตัวแปรไร้นหน่วยด้านการแพร่.....	59
ตารางที่ 2-5 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการแยกสาหร่ายโดยการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค ร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย.....	64
ตารางที่ 3-1 สูตรอาหารเลี้ยงสาหร่าย MA.....	73
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรการศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยการปรับพีเอช.....	79
ตารางที่ 3-3 ตัวแปรการศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ...	81
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรการศึกษาการกระจายเวลากักและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วย หลักการ RTD.....	86
ตารางที่ 3-5 ตัวแปรการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม CFD	88
ตารางที่ 3-6 ตัวแปรการเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	90
ตารางที่ 3-7 ตัวแปรการศึกษาพลศาสตร์การไหลภายในรูปแบบถังปฏิกรณ์ที่ขยายขนาดด้วยหลักการ Geometric scale-up.....	92
ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทีสความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร	94
ตารางที่ 4-2 ค่าซีตาโพเทนเชียลของสาหร่ายที่ค่าพีเอช 7 และ 11	107
ตารางที่ 4-3 ปริมาตรน้ำอัดความดันที่ใช้ในสภาวะการทดลองต่าง ๆ เพื่อให้อัตราส่วนอากาศต่อ ปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย ในการแยก สาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร	119

ตารางที่ 4-4 ปริมาณน้ำอัดความดันที่ใช้ในสภาวะการทดลองต่าง ๆ เพื่อให้อัตราส่วนอากาศต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย ในการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร	120
ตารางที่ 4-5 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในน้ำหลังผ่านกระบวนการแยกด้วยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการเติมสารโคแอกกูแลนต์	121
ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพทำลายเสถียรภาพสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายในอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว	122
ตารางที่ 4-7 ระยะเวลาที่กักเฉลี่ยของถังปฏิกริยาเมื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งของแผ่นกั้น	137
ตารางที่ 4-8 แบบจำลอง (Model) และพารามิเตอร์สำหรับการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วยโปรแกรม CFD	142
ตารางที่ 4-9 ขอบเขตและสภาวะการทำงาน of แบบจำลอง (Operation and boundary conditions)	143
ตารางที่ 4-10 เปรียบเทียบระยะเวลาที่กักเฉลี่ยของถังปฏิกริยาจากการทดลอง RTD และแบบจำลอง CFD เมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งและความสูงของแผ่นกั้น	147
ตารางที่ 4-11 สภาวะที่ใช้ในการเดินระบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	163
ตารางที่ 4-12 ขอบเขตและสภาวะการทำงาน of แบบจำลอง (Operation and boundary conditions) ถังปฏิกริยาขนาด 350 ลิตร	169
ตารางที่ 4-13 ความเร็วเกรเดียนท์และสัดส่วนปริมาตรอากาศในถังขนาด 40 และ 350 ลิตร	171
ตารางที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคสาหร่าย	177
ตารางที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์ค่าซีตาโพเทนเชียล	178
ตารางที่ ก-3 อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย	179
ตารางที่ ก-4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร กับความเข้มข้นสาหร่าย	180
ตารางที่ ก-5 ค่าความขุ่นกับความเข้มข้นสาหร่าย	180
ตารางที่ ก-6 ปริมาณของแข็งแขวนลอยกับความเข้มข้นสาหร่าย	181
ตารางที่ ข-1 การปรับพีเอช	181

ตารางที่ ข-2 การเติมสารส้มเพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มล.	182
ตารางที่ ข-3 การเติมสารส้มเพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มล.	182
ตารางที่ ข-4 การเติม PACl เพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มล.	182
ตารางที่ ข-5 การเติม PACl เพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มล.	182
ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับค่าการนำไฟฟ้า.....	184
ตารางที่ ค-2 ปริมาตรรูปแบบการไหลต่าง ๆ	185
ตารางที่ ง-1 ปริมาตรอากาศและความเร็วเกรเดียนท์ของโซนสัมผัสและโซนแยกภายในถังปฏิกริยา เมื่อมีการติดตั้งรูปแบบแผ่นกั้นที่แตกต่างกัน.....	186
ตารางที่ จ-1 สภาพที่ใช้ในการเดินระบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการ ทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	187
ตารางที่ จ-2 การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย.....	189

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 Sedgwick-Rafter (S-R) counting chamber.....	24
รูปที่ 2-2 Haemocytometer counting chamber	24
รูปที่ 2-3 โมเดลอธิบายทฤษฎี Electric Double Layer Theory.....	32
รูปที่ 2-4 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์.....	33
รูปที่ 2-5 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยกลไก (ก) การลดความหนาของชั้นกระจายด้วย Al^{3+} , Ca^{2+} และ Na^+ (ข) การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า (ค) การเพิ่มน้ำหนักและขนาด และ (ง) การใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม	35
รูปที่ 2-6 กลไกการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์โดยการใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม	39
รูปที่ 2-7 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูแลนต์ด้วยสารส้ม.....	42
รูปที่ 2-8 กลไกในการเกิดโคแอกกูแลนต์ด้วยสารส้ม.....	43
รูปที่ 2-9 Stability Diagram ของสารส้มในน้ำที่ไม่มีความขุ่น	44
รูปที่ 2-10 การเกิดจุดอับและการไหลลัดภายในถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์	52
รูปที่ 2-11 รูปแบบการไหลในอุดมคติของถังปฏิกริยาที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง	53
รูปที่ 2-12 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวิเคราะห์เทอร์เซอร์และตัวอย่างผลการวิเคราะห์เทอร์เซอร์ (ก) การ ทดลองแบบจ่ายครั้งเดียว (ข) การทดลองแบบจ่ายต่อเนื่อง.....	56
รูปที่ 2-13 ผลการวิเคราะห์เทอร์เซอร์ (ก) ถังปฏิกริยาแบบท่อ (ข) ถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์	57
รูปที่ 2-14 รูปแบบการไหลของ Compartment model ต่าง ๆ.....	58
รูปที่ 2-15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายระหว่างตัวดักจับแต่ละชนิด	62
รูปที่ 2-16 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในการใช้	62
รูปที่ 2-17 รูปแบบและขนาดของถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	65
รูปที่ 2-18 แบบจำลอง CFD แสดงสัดส่วนปริมาตรอากาศภายในถังปฏิกริยาจากมากไปน้อยตาม โหนดสีจากสีอ่อนไปจนถึงสีเข้ม (ก) แผ่นกั้นตั้งฉาก และ (ข) แผ่นกั้นเอียงทำมุม 60 องศา	66

รูปที่ 2-19 รูปแบบของถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (ก) ไม่มีการติดตั้งแผ่นกั้นแบบ แท่ง (ข) ติดตั้งแผ่นกั้นแบบแท่ง (Bar-type baffles)	67
รูปที่ 2-20 การแบ่งโซนการไหลภายในถังปฏิกริยาและ Compartment model ของถังปฏิกริยา .	67
รูปที่ 2-21 ผลการวิเคราะห์เทอร์เซอร์ที่เวลาต่าง ๆ ของถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	67
รูปที่ 3-2 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (Flottatest device).....	69
รูปที่ 3-3 ชุดอุปกรณ์ร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย..	70
รูปที่ 3-4 Haemocytometer counting chamber	71
รูปที่ 3-5 แผนการทดลอง	76
รูปที่ 3-6 ขั้นตอนการเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่าย	77
รูปที่ 3-7 การวิเคราะห์จำนวนสาหร่ายจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์และใช้โปรแกรม ImageJ.	78
รูปที่ 3-8 ขั้นตอนการศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยการปรับพีเอช	80
รูปที่ 3-9 ขั้นตอนการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์	82
รูปที่ 3-10 ระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	83
รูปที่ 3-11 ถังลอยตะกอนด้วยอากาศละลาย (DAF tank).....	85
รูปที่ 3-12 ขั้นตอนการศึกษาระยะเวลากักเก็บและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา ด้วยหลักการ RTD.....	87
รูปที่ 3-13 ขั้นตอนการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วยโปรแกรม CFD.....	89
รูปที่ 3-14 การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	91
รูปที่ 3-15 ขั้นตอนการศึกษาแนวทางการขยายขนาดถังปฏิกริยา	92
รูปที่ 4-1 สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส กำลังขยาย 400 เท่า.....	94
รูปที่ 4-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส.....	95
รูปที่ 4-3 การเจริญเติบโต (Growth curve) ของสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส	96
รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่ายกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (A_{680}).....	97
รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับค่าความขุ่น	98

รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับปริมาณของแข็งแขวนลอย	99
รูปที่ 4-7 อุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (ก) จุดเก็บตัวอย่าง (ข) จุดเติมน้ำอัดความดัน (ค) เครื่องกวนสาร	101
รูปที่ 4-8 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น) ของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 และ 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ	103
รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น) ในน้ำสังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัวร่วมกับการเติมสารส้ม	109
รูปที่ 4-10 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (ก) เริ่มต้น (ข) หลังการทำให้ลอยร่วมกับเติมสารส้ม 0.29 และ (ค) 0.88 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	109
รูปที่ 4-11 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น) ในน้ำสังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว ร่วมกับการเติมสารส้ม	111
รูปที่ 4-12 ลักษณะน้ำหลักผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (ก) เริ่มต้น (ข) หลังการทำให้ลอยร่วมกับเติมสารส้ม 0.06 (ค) 0.18 (ง) 0.29 (จ) 0.88 และ (ฉ) 1.17 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	112
รูปที่ 4-13 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น (ก) 8×10^5 และ (ข) 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัวด้วยการทำให้ลอยร่วมกับการเติมสารส้มความเข้มข้น 0.29 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	113
รูปที่ 4-14 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น) ในน้ำสังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว ร่วมกับการเติม PACl	114
รูปที่ 4-15 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (ก) เริ่มต้น (ข) หลังการทำให้ลอยร่วมกับเติม PACl 0.28 (ค) 0.57 และ (ง) 1.14 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	115

รูปที่ 4-16 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น) ในน้ำ สังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว ร่วมกับการ เติม PACl	116
รูปที่ 4-17 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ ทดสอบการลอยตัว (ก) เริ่มต้น (ข) หลังการทำให้ลอยร่วมกับเติม PACl 0.06 (ค) 0.11 (ง) 0.17 (จ) 0.28 และ (ฉ) 0.80 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	116
รูปที่ 4-18 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น (ก) 8×10^5 และ (ข) 3×10^6 เซลล์/ มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัวด้วยการทำให้ลอยร่วมกับการเติม PACl ความเข้มข้น 0.28 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	117
รูปที่ 4-19 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร หลังการแยก ด้วยการทำให้ลอยและปรับอัตราส่วนอากาศต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 0.04 มิลลิกรัม อากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย โดยเติม (ก) สารส้ม 0.29 (ข) สารส้ม 0.58 (ค) PACl 0.28 และ (ง) 0.57 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	119
รูปที่ 4-20 ถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF tank) ขณะเดินระบบ	123
รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์และค่าการนำไฟฟ้า	124
รูปที่ 4-22 Compartment model การไหลในถังปฏิกรณ์ที่มีรูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์แบบ กวนสมบูรณ์ต่อกับแบบท่อ หรือ รูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์แบบท่อต่อกับแบบกวนสมบูรณ์ ...	125
รูปที่ 4-23 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่ตำแหน่งความยาวของโซน สัมผัส 12 เซนติเมตร มุมของแผ่นกั้น 90 องศา ที่ความสูงของแผ่นกั้นต่าง ๆ	127
รูปที่ 4-24 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่ตำแหน่งความยาวของโซน สัมผัส 12 เซนติเมตร มุมของแผ่นกั้น 60 องศา ที่ความสูงของแผ่นกั้นต่าง ๆ	127
รูปที่ 4-25 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่ตำแหน่งความยาวของโซน สัมผัส 12 เซนติเมตร มุมของแผ่นกั้น 45 องศา ที่ความสูงของแผ่นกั้นต่าง ๆ	128
รูปที่ 4-26 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร โดย ติดตั้งที่ความยาวโซนสัมผัสต่าง ๆ	129

รูปที่ 4-27 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกริยาเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร โดยติดตั้งที่ความยาวโชนสัมผัสต่าง ๆ	130
รูปที่ 4-28 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกริยาเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร โดยติดตั้งที่ความยาวโชนสัมผัสต่าง ๆ	130
รูปที่ 4-29 ปริมาตรของถังปฏิกริยาที่ใช้ในการคำนวณเวลากักโดย (ก) โชนสัมผัส (ข) โชนแยก	131
รูปที่ 4-30 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกริยาเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร ตำแหน่งความยาวของโชนสัมผัส 12 เซนติเมตร ที่แผ่นกั้นมุมต่าง ๆ.....	132
รูปที่ 4-31 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกริยาเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร ตำแหน่งความยาวของโชนสัมผัส 12 เซนติเมตร ที่แผ่นกั้นมุมต่าง ๆ.....	132
รูปที่ 4-32 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกริยาเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร ตำแหน่งความยาวของโชนสัมผัส 12 เซนติเมตร ที่แผ่นกั้นมุมต่าง ๆ.....	133
รูปที่ 4-33 Compartment model ถังปฏิกริยาที่มีการไหลรูปแบบกวนสมบูรณ์ต่อการไหลรูปแบบท่อ หรือมีการไหลรูปแบบท่อต่อกับรูปแบบการกวนสมบูรณ์ โดยมีจุดอับเกิดขึ้นภายในถัง	134
รูปที่ 4-34 การเกิดการไหลลัด (Bypassing หรือ Shortcircuiting) ภายในถังปฏิกริยา.....	134
รูปที่ 4-35 ปริมาตรของการไหลในถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ ถังปฏิกริยาแบบท่อ และจุดอับ เมื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งแผ่นกั้น จากการคำนวณตามรูปแบบการไหลในอุดมคติ (ideal) และจากผลการทดลอง (exp)	136
รูปที่ 4-36 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกริยาเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร ความยาวโชนสัมผัส 14 เซนติเมตร และมุม 90 องศา	138
รูปที่ 4-37 การแบ่ง Mesh ภายในถังปฏิกริยาที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา	140
รูปที่ 4-38 การแบ่ง Mesh ภายในถังปฏิกริยาที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 60 องศา	141
รูปที่ 4-39 การแบ่ง Mesh ภายในถังปฏิกริยาที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 45 องศา	141
รูปที่ 4-40 การกำหนดขอบเขต (Boundary) ของถังปฏิกริยา	143

รูปที่ 4-41 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นมุม 90 องศา ความสูง 15 เซนติเมตร.....	145
รูปที่ 4-42 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นมุม 90 องศา ความสูง 20 เซนติเมตร.....	145
รูปที่ 4-43 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นมุม 90 องศา ความสูง 25 เซนติเมตร.....	146
รูปที่ 4-44 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร เอียงทำมุม 45 องศา.....	146
รูปที่ 4-45 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร เอียงทำมุม 60 องศา.....	147
รูปที่ 4-46 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส (ก) 10 เซนติเมตร (ข) 12 เซนติเมตร และ (ค) 14 เซนติเมตร	149
รูปที่ 4-47 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร ความยาวโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร มุม (ก) 45 องศา และ (ข) 60 องศา	149
รูปที่ 4-48 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส (ก) 10 เซนติเมตร (ข) 12 เซนติเมตร และ (ค) 14 เซนติเมตร	150
รูปที่ 4-49 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร ความยาวโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร มุม (ก) 45 องศา และ (ข) 60 องศา	151
รูปที่ 4-50 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส (ก) 10 เซนติเมตร (ข) 12 เซนติเมตร และ (ค) 14 เซนติเมตร	152
รูปที่ 4-51 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร ความยาวโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร มุม (ก) 45 องศา และ (ข) 60 องศา	152
รูปที่ 4-52 การกำหนดโซนสัมผัสและโซนแยกภายในถังปฏิกรณ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	153

รูปที่ 4-53 ความเร็วเกรเดียนต์ของไอชนสัมผัสและไอชนแยกเมื่อปรับเปลี่ยนการติดตั้งแผ่นกั้น	155
รูปที่ 4-54 สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในไอชนสัมผัสและไอชนแยกเมื่อปรับเปลี่ยนการติดตั้งแผ่นกั้น	156
รูปที่ 4-55 แบบจำลองอัตราการกระจายตัวของพลังงานต่อมวลของน้ำในถังปฏิกริยา (ก) ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวไอชนสัมผัส 10 เซนติเมตร	158
รูปที่ 4-56 แบบจำลองสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในถังปฏิกริยา (ก) ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวไอชนสัมผัส 10 เซนติเมตร	159
รูปที่ 4-57 ระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	160
รูปที่ 4-58 ระบบสร้างฟองขนาดเล็ก	161
รูปที่ 4-59 อุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ	162
รูปที่ 4-60 บริเวณผิวหน้าของถังปฏิกริยาขณะแยกสำหรับความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	164
รูปที่ 4-61 ถังปฏิกริยาขณะเดินระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายด้วยอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอย 0.08 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย (ก) ด้านข้างของถัง และ (ข) บริเวณผิวหน้า	165
รูปที่ 4-62 น้ำสังเคราะห์สำหรับความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร (ก) ก่อน (ข) หลังผ่านกระบวนการแยก และ (ค) บริเวณผิวหน้าของไอชนแยก (Separation zone)	166
รูปที่ 4-63 บริเวณผิวหน้าของถังลอยตะกอน เมื่อเดินระบบเพื่อแยกสำหรับความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร (ก) ก่อน และ (ข) หลังผ่านการแยกสำหรับด้วยกระบวนการทำให้ลอย	166
รูปที่ 4-64 ถังลอยตะกอนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายหลังเดินระบบกระบวนการทำให้ลอยโดยใช้น้ำดิบจริงจากสระมรกตความเข้มข้นสำหรับ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร (ก) บริเวณผิวหน้า และ (ข) บริเวณด้านข้างของถังปฏิกริยา	168
รูปที่ 4-65 แนวทางการไหลในถังปฏิกริยาที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวไอชนสัมผัส 10 เซนติเมตร ขนาด (ก) 40 ลิตร และ (ข) 350 ลิตร	170
รูปที่ 4-66 ความเร็วของอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวไอชนสัมผัส 14 เซนติเมตร ถังปฏิกริยาขนาด (ก) 40 ลิตร (ข) 350 ลิตร	171

รูปที่ 4-67 อัตราการกระจายตัวของพลังงานต่อมวลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร ถังปฏิกรณ์ขนาด (ก) 40 ลิตร (ข) 350 ลิตร.....	172
รูปที่ 4-68 สัดส่วนปริมาตรอากาศในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร	173
รูปที่ ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสังเคราะห์สำหรับความเข้มข้น 10^7 เซลล์/มิลลิลิตร ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ.....	180
รูปที่ ข-1 องค์ประกอบของสาร PACL.....	183



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปนเปื้อนของสารประกอบไนเตรทและฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำจากกิจกรรมต่าง ๆ เช่น เกษตรกรรม ชุมชน และอุตสาหกรรม ส่งผลให้เกิดการเจริญของสาหร่ายอย่างรวดเร็วและหนาแน่น หรือปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง (Algal bloom) ซึ่งทำให้คุณภาพของแหล่งน้ำดิบเปลี่ยนไป ทั้งด้านกลิ่น รส สีอันไม่พึงประสงค์ และมีโอกาสในการเกิดสารพิษ (พงศศักดิ์และรัฐชา, 2557) เช่น *Microcystis aeruginosa* ซึ่งเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินประเภทหนึ่งที่สามารถสร้างสารพิษที่เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วและพบมากที่สุด มีความสามารถในการสร้างสารพิษไมโครซิสติน (Microcystins) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งระดับ (ยูวดี พิรพรพิศาล, 2556) โดยมาตรฐานคุณภาพน้ำประปา ของการประปานครหลวงตามข้อแนะนำขององค์การอนามัยโลก ปี 2011 กำหนดความเข้มข้น สารไมโครซิสติน-แอลอาร์ (Microcystin-LR) ในน้ำประปาไม่เกิน 1 ไมโครกรัมต่อลิตร อีกทั้งสาหร่าย ยังส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา ทำให้ระบบการกรองมีปัญหา ประสิทธิภาพลดลง หรือต้องเพิ่มขึ้นขั้นตอนการบำบัดขั้นต้นก่อนนำน้ำเข้าสู่กระบวนการผลิต นอกจากนี้วิธีการกำจัด สาหร่ายในปัจจุบันที่มีการใช้คลอรีนอาจทำให้เกิดสารพลอยได้ (Disinfection by-products, DBPs) ที่เป็นสารก่อมะเร็ง เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) ฮาโลอะซิติกแอซิด (Haloacetic acids, HAAs) (Chen, 2008)

กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved air flotation, DAF) เป็น กระบวนการที่ใช้ในการแยกของแข็งออกจากของเหลว โดยการสร้างฟองอากาศให้เคลื่อนที่ชนกับ อนุภาคแขวนลอย เพื่อลดความถ่วงจำเพาะของอนุภาคและลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ (อนุรักษ์ ปิติรักษ์กุล, 2543) จึงมีประสิทธิภาพและนิยมใช้ในการแยกอนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำ หรือใกล้เคียงกับน้ำ และมีแนวโน้มในการลอยมากกว่าการตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้ตกตะกอนช้ามาก หรืออาจ ไม่ตกตะกอน ทำให้การใช้ถังตกตะกอนในการแยกมีประสิทธิภาพต่ำ (Metcalf และ Eddy, 2003) และถ้าแยกด้วยการกรองก็พบว่ามีปัญหาด้านการอุดตัน ดังนั้นการใช้ DAF ในกระบวนการบำบัด ขั้นต้น เพื่อแยกสาหร่ายออกจากน้ำจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากสาหร่ายเป็นอนุภาคที่มี

ขนาดเล็ก (3-30 ไมครอน) และความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ (Zhang และคณะ, 2010) โดยกรณีที่ใช้ DAF ในการแยกสาหร่ายจะได้สาหร่ายที่มีความเข้มข้นสูงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องจากสาหร่ายเป็นพลังงานทางเลือกประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีประสิทธิภาพในการผลิตสูง เมื่อเทียบกับแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น ๆ (Amaro, Guedes และ Malcata, 2011; Lam และ Lee, 2012) อีกทั้งยังได้น้ำที่มีความสะอาดมากขึ้น

ระบบ DAF ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ถังอัดความดัน (Pressure vessel) เพื่ออัดอากาศทำให้ความดันสูงและอากาศสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น เมื่อปล่อยน้ำสู่ความดันบรรยากาศทำให้เกิดฟองขนาดเล็กประมาณ 10-100 ไมครอน และถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF tank) ซึ่งประกอบด้วยโซนสัมผัส (Contact zone) และโซนแยก (Separation zone) (Shawwa และ Smith, 2000) โดยแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัสและโซนแยกภายในของถังปฏิกริยาจะมีผลต่อเวลากัก รูปแบบการไหล และความปั่นป่วนของของไหลภายในถัง แต่เนื่องจากในสภาวะการทำงานจริง รูปแบบการไหลไม่ได้มีลักษณะเป็นไปตามอุดมคติจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ระบบการกวนผสม สมบัติการถ่ายเทสารและการแพร่ ดังนั้น ก่อนการใช้งานถังปฏิกริยาจึงควรทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลากัก (Residence time distribution, RTD) โดยการวิเคราะห์เทรเซอร์ (Tracer) เพื่อประเมินการกระจายเวลากักและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา รวมถึงการทำนายรูปแบบการไหลด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยในการออกแบบรูปแบบของถังปฏิกริยาที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเกิดจุดอับ (Dead zone) หรือการไหลลัด (Bypassing) ของการไหลภายในถังปฏิกริยาที่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกลดลง อีกทั้งการใช้โปรแกรม CFD ยังเป็นการทวนสอบ (Validate) รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาและระยะเวลาที่ได้ออกจากการวิเคราะห์ตามหลัก RTD

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนารูปแบบถังปฏิกริยาที่เหมาะสมในการแยกสาหร่ายจากน้ำ โดยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยการวิเคราะห์รูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกริยาด้วยหลักการ RTD และการสร้างแบบจำลอง CFD รวมถึงศึกษาสภาวะในการเดินระบบที่เหมาะสมสำหรับการแยกสาหร่ายในน้ำสังเคราะห์สาหร่ายและแนวทางในการขยายขนาดถังปฏิกริยาที่พัฒนาขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของลักษณะถังปฏิกรณ์ต่อรูปแบบการไหลและประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved air flotation, DAF)

1.2.2 เพื่อศึกษาพลศาสตร์การไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) สำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

1.3.2 น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ น้ำสังเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส (*Microcystis aeruginosa*) ความเข้มข้น 10^5 และ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และน้ำดิบที่มีการบลูมของสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส

1.3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่าย คือ สารส้ม โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ กรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์

1.3.4 ใช้โปรแกรม CFD ในการทำนายพฤติกรรมการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์และวิเคราะห์การกระจายเวลากัก (Residence time distribution, RTD) โดยใช้เทรเซอร์ (Tracer) คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ภายในถังปฏิกรณ์ขนาด 0.25x0.60x0.40 ลูกบาศก์เมตร เมื่อเปลี่ยนความยาวของโซนสัมผัส (Contact zone) เท่ากับ 10 12 และ 14 เซนติเมตร ความสูงของแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัสและโซนแยก (Separation zone) เท่ากับ 15 20 และ 25 เซนติเมตร และมุมของแผ่นกั้นในแนวระนาบ เท่ากับ 45 60 และ 90 องศา โดยพิจารณารูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมจากการศึกษาสัดส่วนปริมาตรของอากาศภายในถังด้วย CFD และการกระจายเวลากักด้วย RTD

1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายในการแยกสาหร่ายภายในถังปฏิกรณ์ที่ออกแบบขึ้นโดยการวัดความเข้มข้นของสาหร่ายและวัดความขุ่น เพื่อเป็นพารามิเตอร์บ่งชี้คุณภาพน้ำและประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 รูปแบบถึงปฏิกิริยา แนวทางการออกแบบ และการเดินระบบถึงปฏิกิริยาสำหรับแยกสาหร่ายออกจากน้ำด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

1.4.2 สภาพที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย เพื่อแยกสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสติสออกจากน้ำ

1.4.3 แบบจำลองพลศาสตร์การไหลของของไหลในถึงปฏิกิริยาจากโปรแกรม CFD



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาหร่าย

สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างอาหารได้ด้วยตนเองจากกระบวนการสังเคราะห์แสง เช่นเดียวกับพืชทั่วไป มีขนาดเล็กตั้งแต่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าไปจนกระทั่งถึงขนาดใหญ่ มีความยาวหลายร้อยเมตร สาหร่ายมีลักษณะหลายแบบ เช่น เซลล์เดี่ยว กลุ่มเซลล์ หรือโคโลนี เส้นสายทั้งแตกแขนงและไม่แตกแขนง ทลัสส์ที่คล้ายมีราก ลำต้น และใบคล้ายพืชชั้นสูง แต่ไม่มีระบบท่อลำเลียงเหมือนพืชชั้นสูง เป็นต้น โดยทุกเซลล์ทำหน้าที่สังเคราะห์แสงเพื่อการดำเนินชีวิตเหมือนกัน (ยุวดี พิรพรพิศาล, 2556)

สาหร่ายมีความก้ำกึ่งระหว่างแบคทีเรียและพืชชั้นต่ำ คือ มีโครงสร้างของเซลล์ซับซ้อนกว่าแบคทีเรียแต่ต่ำกว่าพืชชั้นต่ำ จึงจัดได้ว่าสาหร่ายมีวิวัฒนาการเชื่อมโยงระหว่างสิ่งมีชีวิตดังกล่าว โดยเฉพาะสาหร่ายสีเขียวซึ่งมีวิวัฒนาการร่วมกับพืชชั้นสูงบางชนิด

2.1.1 กลุ่มของสาหร่ายและการจัดจำแนก

สาหร่ายมีลักษณะของเซลล์ ขนาด และรูปร่างที่แตกต่างกัน สาหร่ายแต่ละชนิดมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3-1 ปริมาณและชนิดของสาหร่ายที่พบในแหล่งน้ำจะแตกต่างกัน ขึ้นกับความเข้มข้นของสารอาหารในแหล่งน้ำนั้น ๆ เช่น *Microcystis sp.* เจริญเติบโตในแหล่งน้ำที่มีสารอาหารสูง ในขณะที่ *Scenedesmus sp.* มักจะพบในแหล่งน้ำที่มีสารอาหารปานกลาง สาหร่ายที่ดำรงชีวิตลอยเป็นอิสระ (Free-floating algae) หรือแพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ สาหร่ายสีเขียว ไดอะตอม และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน อีกทั้ง ยังมีการจำแนกสาหร่ายออกเป็นหลายกลุ่มตามหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้

1.) รงควัตถุที่อยู่ในเซลล์

สาหร่ายทุกชนิดมีรงควัตถุหลัก คือ คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll A) ส่วนรงควัตถุรองจะแตกต่างกันไป เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและแดง มีรงควัตถุพวกไฟโคไซยานินและไฟโคเออริธริน ในขณะที่สาหร่ายสีเขียวจะมีรงควัตถุรองจำพวกแคโรทีนอยด์ เป็นต้น ซึ่งรงควัตถุเหล่านี้ช่วยในการสังเคราะห์แสง โดยเป็นกระบวนการที่สำคัญในการดำรงชีวิตอยู่ของสาหร่าย

2.) องค์ประกอบของผนังเซลล์

องค์ประกอบของผนังเซลล์ของสาหร่ายแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันไป บางชนิดมีส่วนประกอบเป็นเซลลูโลส เช่น ซิลิกาในไดอะตอม อัลจิน หรืออัลจินเนตในสาหร่ายสีน้ำตาล วัณในสาหร่ายสีแดง เป็นต้น โดยในบางชนิดอาจมีส่วนประกอบเป็นแคลเซียมในสาหร่ายที่มีผนังเซลล์แข็ง เช่น ในสาหร่ายสีเขียวและสีแดงบางชนิด เป็นต้น

3.) อาหารที่สะสมในเซลล์

สาหร่ายแต่ละกลุ่มมีอาหารที่สะสมในเซลล์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตจากกระบวนการสังเคราะห์แสงที่ไม่เหมือนกัน เช่น การสะสมอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในสาหร่ายสีเขียว การสะสมลามินารินในสาหร่ายสีน้ำตาล หรือการสะสมน้ำมันในสาหร่ายยูกลีนา เป็นต้น

4.) จำนวนและตำแหน่งของแฟลเจลลัม

สาหร่ายบางชนิดเคลื่อนที่ด้วยแฟลเจลลัม อาจเรียกว่าหนวด หรือเส้น โดยจำนวนและตำแหน่งของแฟลเจลลัมในเซลล์สามารถใช้ในการจัดจำแนกสาหร่ายได้

Bold and Wynne (1978) แบ่งสาหร่ายออกเป็น 9 กลุ่ม ดังนี้

2.1.1.1 สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue-green algae) หรือไซยาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria)

สาหร่ายกลุ่มนี้มีกำเนิดมาก่อนสาหร่ายกลุ่มอื่น ๆ และมีความคล้ายคลึงกับแบคทีเรีย โดยเป็นพวกที่นิวเคลียสไม่มีเยื่อหุ้ม หรือพวกโพรแคริโอต พบได้ทั่วไปในที่มีความชื้น น้ำจืด น้ำกร่อย น้ำเค็ม น้ำที่มีคุณภาพดีและไม่ดี สามารถพบได้ทั้งในดิน ผิวดิน หิมะ หรือน้ำพุร้อน มักเรียกสาหร่ายประเภทนี้ว่า ตะไคร่น้ำ ซึ่งเป็นพวกที่ดำรงชีวิตแบบพรางก่ตอนพืชในแหล่งน้ำจืดทั่วไป บางชนิดอาจ

เจริญและเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำที่มีสารอาหารสูง หรือสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแล้ว
สร้างสารพิษออกมาซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำบริเวณนั้น

2.1.1.2 สาหร่ายสีเขียว (Green algae)

เป็นสาหร่ายที่พบเห็นในน้ำทั่วไป ทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม มีรูปร่างหลากหลาย
ตั้งแต่เซลล์เดี่ยว เซลล์เดี่ยวเกาะกันเป็นกลุ่ม หรือเรียกว่า โคลนิน เป็นเส้นสาย เป็นทลัสส์ ส่วนมากมี
ขนาดใหญ่และดำรงชีวิตแบบแพลงก์ตอนพืช แต่มีบางชนิดดำรงชีวิตโดยการยึดเกาะกับดิน หินใต้น้ำ
หรือพืชน้ำ

2.1.1.3 สาหร่ายไฟ (Stoneworts)

มีลักษณะคล้ายพืชชั้นสูง ทลัสส์ขนาดใหญ่คล้ายสาหร่ายหางกระรอก ส่วนใหญ่เป็นสาหร่าย
น้ำจืด โดยทั่วไปจะยึดเกาะกับพื้นดินใต้ท้องน้ำและบางชนิดมีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบในทลัสส์

2.1.1.4 สาหร่ายยูกลีโนอยด์ (Euglenoids)

ดำรงชีวิตแบบแพลงก์ตอนพืชทั้งหมด สามารถเจริญได้ในน้ำที่มีสารอินทรีย์สูง หรือน้ำ
คุณภาพไม่ดีได้มากกว่าสาหร่ายประเภทอื่น ๆ จึงเป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำที่ค่อนข้างสกปรกได้ชัดเจน
ทุกชนิดมีแฟลเจลลัมช่วยในการเคลื่อนที่ บางครั้งจึงจัดอยู่ในพวกโปรโตซัว

3.1.1.5 สาหร่ายสีน้ำตาล (Brown algae)

เป็นสาหร่ายที่มีทลัสส์ขนาดใหญ่ ส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายทะเล โดยทั่วไปจะยึดเกาะอยู่กับพื้น
ทรายใต้ท้องทะเล หรืออาจหลุดลอยมากับกระแสน้ำ ในเขตอบอุ่นเป็นสาหร่ายเศรษฐกิจที่สามารถ
นำกลับมาสกัดสารอัลจิน หรือ อัลจินเตที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมที่สำคัญหลายประเภท

2.1.1.6 สาหร่ายคริส์โซไฟต์ (Chrysophytes)

ส่วนใหญ่ดำรงชีวิตแบบแพลงก์ตอนพืชทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม สาหร่ายในกลุ่มนี้มีอยู่ประเภท
หนึ่งซึ่งมีสมาชิกมากที่สุด คือ ไดอะตอม นักสาหร่ายวิทยาปัจจุบันได้แยกออกเป็นดิวิชันใหม่ คือ
Division Bacillariophyta มีลักษณะสำคัญ คือ เซลล์ประกอบด้วยฝา หรือฟรัสตุล 2 ฝาประกบกัน
ส่วนใหญ่เป็นซิลิกา มีลวดลายสวยงาม ซึ่งใช้ในการวินิจฉัยชนิดของไดอะตอม มีรงควัตถุสีน้ำตาล
มากกว่าคลอโรฟิลล์ จึงมองเห็นเซลล์เป็นสีน้ำตาล รูปร่างของสาหร่ายประเภทนี้มีรูปร่างแบบ

เรขาคณิตชัดเจน พบทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม และดำรงชีวิตทั้งแบบเป็นแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายที่เกาะอยู่กับสิ่งยึดเกาะใต้อุ้งเท้า

2.1.1.7 สาหร่ายไดโนแฟลเจลเลต (Dinoflagellates)

มีแฟลเจลลัม 2 เส้น ช่วยในการเคลื่อนที่ เซลล์มักจะมีเยื่อหุ้มเซลล์เป็นแผ่นอีคาคลุมอยู่ มองคล้ายกระเบื้องโมเสก ดำรงชีวิตแบบแพลงก์ตอนพืชทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม บางครั้งเจริญอย่างรวดเร็วในน้ำทะเล ทำให้ผิวน้ำทะเลเป็นสีแดง หรือสีน้ำตาล เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ซึ่ปลาวาฬ หรือเรดไทด์ (Red tide) และบางชนิดสร้างสารพิษที่มีผลต่อระบบประสาท

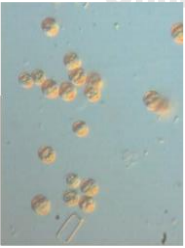


2.1.1.8 สาหร่ายคริปโตโมนาดี (Cryptomonads)

เป็นกลุ่มสาหร่ายที่มีสมาชิกน้อยที่สุด มีแฟลเจลลัม 2 เส้นที่มีขนาดไม่เท่ากัน ดำรงชีวิตแบบแพลงก์ตอนพืชทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม

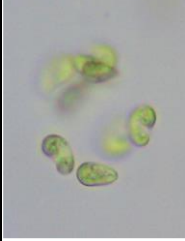


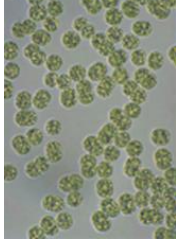
2.1.1.9 สาหร่ายสีแดง (Red algae)

มีทลัสส์คล้ายพุ่มไม้ที่แตกแขนงเป็นฝอย เจริญอยู่บนผิวดิน ทราล หรือหิน พบในน้ำจืดและน้ำเค็ม แต่ส่วนใหญ่จะพบในน้ำเค็มเป็นสาหร่ายเศรษฐกิจที่สำคัญ โดยนำมาสกัดวุ้นซึ่งนำมาใช้เป็นอาหารและใช้ในด้านอุตสาหกรรมหลายประเภท

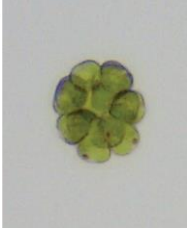

ตารางที่ 2-1 ข้อมูลพื้นฐานของสาหร่ายที่พบบ่อยในประเทศไทย

ชนิดของสาหร่าย	รูปภาพ	ขนาดเซลล์ (µm)	ลักษณะเซลล์	สภาพแวดล้อมที่พบ
<i>Chlorella sp.</i>		2-15	เซลล์มีรูปร่างกลม อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรืออยู่เป็นกลุ่มประมาณ 4-16 เซลล์	พบในแหล่งน้ำทั่วไป
<i>Coelastrum sp.</i>		2-30	เซลล์มีรูปร่างกลม อยู่เป็นกลุ่ม จับตัวกันแน่นเป็นทรงกลมประมาณ 4 ถึง 128 เซลล์ ส่วนมากมี 16 เซลล์กรณีที่อยู่รวมเป็นโคโลนีอาจมีขนาดถึง 100 µm	พบในแหล่งน้ำนิ่ง ส่วนมากจะพบในแหล่งน้ำที่มีสารอาหารปานกลางหรือสูง
<i>Eudorina sp.</i>		5-15	เซลล์มีรูปร่างกลม มีแฟลกเจลลา 2 เส้นอยู่รวมกันเป็นกลุ่มในเมือกเป็นทรงกลมประมาณ 16-32 เซลล์ กรณีที่อยู่รวมเป็นโคโลนีอาจมีขนาด 60-200 µm สีเขียวอ่อน	พบในแหล่งน้ำที่มีสารอาหารปานกลางและเติบโตได้ในช่วงฤดูร้อน

ตารางที่ 2-1 (ต่อ) ข้อมูลพื้นฐานของสาหร่ายที่พบบ่อยในประเทศไทย

ชนิดของสาหร่าย	รูปภาพ	ขนาดเซลล์ (μm)	ลักษณะเซลล์	สภาพแวดล้อมที่พบ
<i>Kirchneriella</i> sp.		ความยาว 6-30 ความกว้าง 1-12	เซลล์มีรูปร่างพระจันทร์เสี้ยว คล้ายเกือบ มักอยู่รวมกันเป็นกลุ่มในเมือกประมาณ 4-8 เซลล์ สีเขียวอ่อน	พบในแหล่งน้ำที่มีสารอาหาร สมบูรณ์ บางสปีชีส์เติบโตได้ดี ในน้ำที่มีไนเตรตสูง (2.0-3.0 มิลลิกรัมต่อลิตร)
<i>Melosira</i> sp.		ความยาว 30-40 ความกว้าง 15-20	เซลล์มีรูปร่างกลม หรือทรงกระบอก เรียง ต่อกันยาวเป็นสายโซ่	
<i>Merismopedia</i> sp.		1-10	เซลล์มีรูปร่างกลม อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม ภายในเมือกเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม สีเขียวแกม น้ำเงิน	พบในแหล่งน้ำนิ่ง หรือใน แหล่งน้ำที่มีสารอาหารสูง
<i>Microcystis</i> sp.		3.2-6.6	เซลล์มีรูปร่างกลม รี ยาว หรือมีรูปร่าง ไม่แน่นอน เซลล์รวมตัวกันเป็นกลุ่ม มี เมือกใสล้อมรอบ	พบในแหล่งน้ำที่มีสารอาหาร สูง

ตารางที่ 2-1 (ต่อ) ข้อมูลพื้นฐานของสาหร่ายที่พบบ่อยในประเทศไทย

ชนิดของสาหร่าย	รูปภาพ	ขนาดเซลล์ (μm)	ลักษณะเซลล์	สภาพแวดล้อมที่พบ
<i>Pandorina</i> sp.		8-20	เซลล์มีรูปร่างกลม ขนาดเท่า ๆ กันทุกเซลล์ มีแฟลกเจลลลา 2 เส้น อยู่รวมกันเป็นวงกลมในเมือก ประมาณ 4 8 16 หรือ 32 เซลล์ กระจุกที่อยู่รวมเป็นโคโคไลนอาจมีขนาดถึง 100 μm สีเขียวอ่อน	พบในแหล่งน้ำนิ่ง
<i>Scenedesmus</i> sp.		5-15	เซลล์มีรูปร่างหลายแบบ มักเรียงตัวต่อกันเป็นกลุ่ม 4 8 หรือ 16 เซลล์ มีสีเขียว	พบในแหล่งน้ำนิ่ง หรือแหล่งน้ำที่มีสารอาหารปานกลาง

2.1.2 วิธีการวิเคราะห์จำนวนสาหร่าย

วิธีการที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณสาหร่ายในน้ำ หรือชีวมวลสาหร่าย (Algal biomass) แบ่งเป็น 2 วิธีหลัก ดังนี้

2.1.2.1 การวัดโดยอ้อม (Indirect measurement)

ข้อดีของการวัดด้วยวิธีนี้ คือ สะดวกและได้ข้อมูลที่รวดเร็ว แต่มีข้อจำกัด คือ อาจมีความผิดพลาดจากเซลล์ที่ตายแล้ว หรือของแข็งแขวนลอยอื่น ๆ การวัดโดยอ้อมเป็นวิธีการวัดปริมาณสาหร่ายทั้งหมดโดยไม่มีการแบ่งแยกชนิดของสาหร่าย มีหลายวิธี เช่น

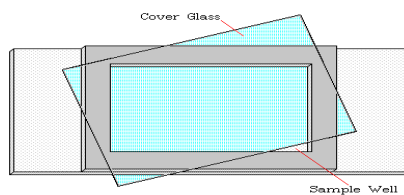
1.) การวัดความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เนื่องจากสาหร่ายทุกชนิดมีคลอโรฟิลล์เป็นองค์ประกอบของเซลล์ ดังนั้น การวัดปริมาณคลอโรฟิลล์จึงสามารถใช้เป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงปริมาณสาหร่ายในน้ำได้

2.) การหาความหนาแน่นของสาหร่ายโดยอาศัยแสง (Optical density) โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ขึ้นกับชนิดของสาหร่ายที่ต้องการตรวจวัด

2.1.2.2 การวัดโดยตรง (Direct measurement หรือ Total count)

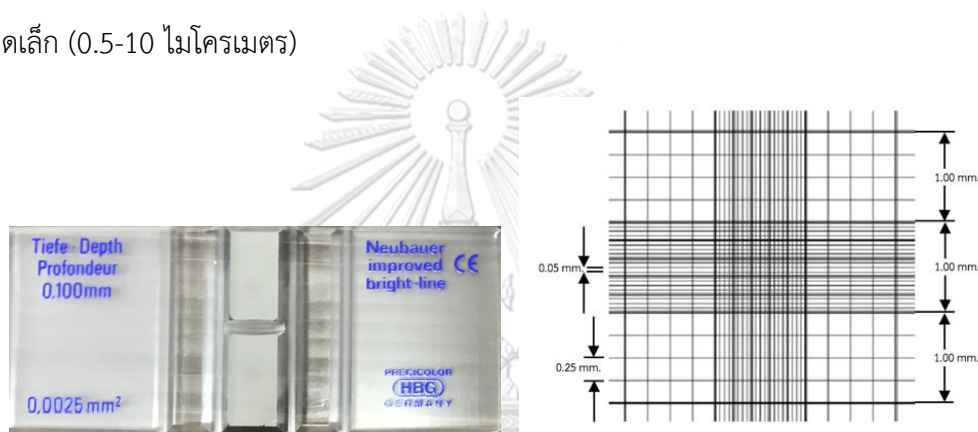
การวัดโดยตรงเป็นวิธีการที่สามารถบ่งชี้ถึงชนิดและปริมาณของสาหร่ายแต่ละชนิดที่พบได้ด้วยการนับโดยไซสโตไดน์เซลล์ (Counting chamber) และกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งสไลด์ที่ใช้ในการนับเซลล์มีหลายชนิด เช่น

1.) Sedgwick-Rafter (S-R) counting chamber มีลักษณะเป็นสไลด์ใสที่ทำด้วยกระจกหรือพอลิสไตรีน ขนาด 76 x 40 มม. มีกรอบสี่เหลี่ยม พื้นที่ 50 x 20 มม. ลึก 1 มม. ปริมาตรตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 2-1 เมื่อปิดกระจกปดสไลด์ ภายในกรอบสี่เหลี่ยมบนสไลด์จะแบ่งช่องออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่ละช่องมีปริมาตร 1 ไมโครลิตร Sedgwick-Rafter counting chamber เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานมากที่สุดในการนับปริมาณสาหร่ายเนื่องจากใช้งานง่าย ให้ออกมาเชื่อถือ แต่มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถใช้กำลังขยายสูงได้



รูปที่ 2-1 Sedgwick-Rafter (S-R) counting chamber

2.) Haemocytometer counting chamber เป็นสไลด์ที่มีตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 ตาราง อยู่บริเวณตรงกลางสไลด์ แต่ละตารางมีพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตร ลึก 0.1 มิลลิเมตร บริเวณรอบ ตารางมีร่องลึกขนาดใหญ่ล้อมรอบเพื่อให้น้ำขังได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-2 นิยมใช้สำหรับนับสาหร่าย ขนาดเล็ก (0.5-10 ไมโครเมตร)



รูปที่ 2-2 Haemocytometer counting chamber

อย่างไรก็ตาม การเลือกชนิดของสไลด์ที่ใช้ในการนับจำนวนเซลล์สาหร่ายขึ้นกับขนาดและความเข้มข้นเซลล์สาหร่าย เนื่องจากสไลด์แต่ละชนิดมีข้อจำกัดในการนับจำนวนสาหร่ายที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การเลือกสไลด์นับเซลล์ตามขนาดและความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย

ชนิดของสไลด์นับเซลล์	ขนาดเซลล์ (ไมโครเมตร)	ความเข้มข้นของเซลล์ (เซลล์/มิลลิลิตร)
Sedwick-Rafter	50-500	$30 \cdot 10^4$
Haemocytometer (ลึก 0.1 มม.)	2-30	$10^4 \cdot 10^7$
Haemocytometer (ลึก 0.2 มม.)	5-75	$10^4 \cdot 10^6$

2.1.3 ปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง

ปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่ง (Algal bloom) เกิดจากการบลูมของแพลงก์ตอนพืชในแหล่งน้ำจืด เช่น คู คลอง หนอง บึง ทะเลสาบ หรืออ่างเก็บน้ำ สาเหตุหลักของปัญหาจากการที่แหล่งน้ำได้รับสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในปริมาณมากจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น การเกษตร อุตสาหกรรม ชุมชน หรือน้ำที่ทิ้งจากบ้านเรือน ซึ่งสารอาหารเหล่านี้จะไปกระตุ้นให้แพลงก์ตอนพืชเกิดการสังเคราะห์แสงได้มากขึ้นและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว จนส่งผลให้แหล่งน้ำไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ มีการประเมินว่าแหล่งน้ำที่เกิดการบลูมของแพลงก์ตอนพืชจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์มากกว่า 40 ไมโครกรัมต่อลิตร และถ้าปริมาณคลอโรฟิลล์สูงกว่า 100 ไมโครกรัมต่อลิตร จะมีโอกาสที่ปลาในแหล่งน้ำจะตายเนื่องจากการขาดออกซิเจน (Florida LakeWatch, 2000) หรือสามารถบ่งชี้ว่ามีการเกิดปรากฏการณ์สาหร่ายสะพรั่งได้จากการที่ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์สูงกว่า 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (ศุภพิชญ์ ชัยภัทรกุล, 2555)

ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์นี้ ทำให้เกิดการขาดแคลนของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen, DO) โดยเฉพาะเวลากลางคืนที่สาหร่ายหายใจและใช้ออกซิเจนในน้ำ ส่งผลให้สัตว์น้ำขาดอากาศที่จะใช้ในการหายใจ และเมื่อเซลล์ของแพลงก์ตอนตายลง ทำให้เกิดการย่อยสลายซึ่งต้องใช้ออกซิเจน ทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย เสื่อมโทรมลง นอกจากนี้จะส่งผลต่อความหลากหลายทางชีวภาพและสิ่งมีชีวิตในน้ำแล้ว ยังส่งผลต่อคุณภาพของน้ำดิบในกรณีที่จะนำแหล่งน้ำนั้นมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา ทำให้ระบบการกรองน้ำมีปัญหาเนื่องจากเซลล์ของสาหร่ายที่มีขนาดเล็กส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง หรืออาจต้องมีการบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment) ก่อนจึงจะสามารถนำมาใช้ได้ ซึ่งในการบำบัดขั้นต้น โดยทั่วไปวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุด คือ การเติมสารเคมี เช่น คลอรีน ลงไปในน้ำเพื่อกำจัดสาหร่ายออกก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต (Pre-chlorination) ซึ่งการเติมคลอรีนนี้อาจทำให้เกิดสารพลอยได้ที่เป็นสารก่อมะเร็ง (Disinfection by-products, DBPs) เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) ฮาโลอะซิติกแอซิด (Haloacetic acids, HAAs) (Chen, 2008) อีกทั้ง สาหร่ายบางชนิดสามารถสร้างสารพิษที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น *Microcystis aeruginosa* เป็นสาหร่ายประเภทสร้างพิษที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและพบมากที่สุด สามารถสร้างสารพิษชื่อ ไมโครซิสติน (Microcystins) โดยจะปลดปล่อยสารพิษออกจากเซลล์เมื่อเซลล์แตก ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งดับในมนุษย์ (ยูวดี พิรพรพิศาล, 2556) ส่วนมากจะพบการเกิดพิษของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินได้ในสัตว์เลี้ยงที่บริโภคน้ำเข้าไป หรือในสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำนั้น ๆ เช่น ถ้าสุนัข

ได้รับพิษเข้าไปจะแสดงอาการหนาวสั่น ท้องเสีย อ่อนเพลีย ตัวซีด จนถึงช็อคได้ถ้าได้รับสารพิษในปริมาณมาก ซึ่งปริมาณที่องค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดค่าความปลอดภัยในน้ำดื่มให้มีสารไมโครซิสตินได้ไม่เกิน 1 ไมโครกรัมต่อลิตร และจำนวนเซลล์ของสาหร่ายได้ไม่เกิน 20,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

2.1.4 สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสติส (*Microcystis sp.*)

สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสติสมักพบในแหล่งน้ำนิ่งและไหลเอื่อย สีที่พบในธรรมชาติเป็นสีเขียว หรือสีเขียวแกมน้ำเงิน สีของเซลล์เป็นสีเขียวแกมน้ำเงิน ดำรงชีวิตลอยเป็นอิสระ ลักษณะเป็นกลุ่มเซลล์มีรูปร่างไม่แน่นอน อาจเป็นรูปกึ่งทรงกลม ภายในกลุ่มเซลล์ประกอบด้วยเซลล์จำนวนมากอัดรวมกันอยู่ภายใต้เมือกหุ้ม กลุ่มเซลล์เพิ่มขึ้นได้โดยอาศัยการแบ่งเซลล์ เซลล์มีลักษณะทรงกลมหรือครึ่งวงกลม หลังจากการแบ่งเซลล์ มีก้ำขเวซิเคิลในเซลล์ที่อยู่ในกลุ่มเซลล์ที่ลอยลอยอยู่ในน้ำ แต่จะมีน้อยลง หรือไม่ปรากฏภายในเซลล์ที่อยู่ในกลุ่มเซลล์ที่จมอยู่พื้นท้องน้ำ เป็นสาหร่ายประเภทสร้างพิษที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและพบมากที่สุด สร้างสารพิษชื่อ ไมโครซิสติน (Microcystins) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งตับ โดยการพบสาหร่ายสายพันธุ์นี้ สามารถบ่งบอกได้ถึงคุณภาพน้ำค่อนข้างไม่ดี มีสารอาหารสูง (Eutrophic status)

2.1.5 การควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่าย

แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ การควบคุมน้ำดิบและการควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำประปา

2.1.5.1 การควบคุมน้ำดิบ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- 1.) ทางกายภาพ ได้แก่ การใช้ถ่านกัมมันต์ การใช้คลื่นเสียง
- 2.) ทางเคมี ได้แก่ การใช้สารเคมีกำจัดสาหร่าย (Algicides) ซึ่งนิยมใช้คอปเปอร์ซัลเฟต หรือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยสารเคมีที่เลือกใช้ไม่ควรเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่นในแหล่งน้ำ
- 3.) การควบคุมการปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งชุมชนและอุตสาหกรรม โดยควบคุมปริมาณธาตุสำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส
- 4.) การป้องกันการแบ่งชั้นของน้ำ โดยการเติมอากาศลงในแหล่งน้ำให้เกิดการผสมกัน ส่งผลให้น้ำเย็นที่อยู่ด้านล่างเคลื่อนสู่ด้านบนผิวน้ำ

2.1.5.2 การควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำประปา

1.) ทางกายภาพ การดักสาหร่ายที่ลอยอยู่ที่ผิวน้ำของถังกรองและถังตกตะกอนออก หรือสร้างที่บังแสงเพื่อลดปัจจัยในการเจริญเติบโตของสาหร่าย และกำหนดตำแหน่งสูบน้ำดิบเข้าระบบให้อยู่ต่ำกว่าระดับผิวน้ำพอสมควร

2.) ทางเคมี การปรับค่าพีเอชให้ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสาหร่าย การเติมสารคลอรีนในถังตกตะกอนก่อนกระบวนการกรอง เพื่อลดจำนวนสาหร่ายแต่อาจก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน ซึ่งเป็น DBPs ชนิดหนึ่ง โดย Environmental Protection Agency (EPA) กำหนดค่ามาตรฐานของสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

3.) การเพิ่มสารโคแอกกูแลนต์และการเติมถ่านกัมมันต์ แต่เป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนสูง

4.) การใช้ระบบกรอง

2.2 กระบวนการแยกสาหร่าย

การแยกสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวทำให้สาหร่ายที่แยกได้มีความเข้มข้นมากขึ้น 100-800 เท่า และมีค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solids, TSS) ประมาณ 2-7 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการแยกสาหร่ายแต่ละวิธีจะใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกสาหร่าย ดังแสดงในตารางที่ 2-3 โดยการเลือกวิธีการแยกสาหร่ายที่เหมาะสมทำให้สามารถนำสาหร่ายไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งปัจจุบันวิธีการที่ใช้ในการแยกสาหร่าย มีข้อจำกัด คือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง ความเป็นพิษของสารโคแอกกูแลนต์ และความเป็นไปได้ในการขยายขนาด (Scale-up) อีกทั้ง ลักษณะของสาหร่ายซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และความหนาแน่นของสาหร่ายที่มีความใกล้เคียงกับน้ำก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกสาหร่าย (Laamanen, Ross และ Scott, 2016) โดยมีวิธีการที่นิยมใช้ในการแยกสาหร่าย ดังนี้

1.) การหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugation) เป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีข้อดี คือ ไม่ต้องใช้สารเคมี ทำให้สาหร่ายที่แยกออกมาได้ไม่เกิดการปนเปื้อน อย่างไรก็ตาม วิธีนี้เป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องการพลังงานในการเร่งให้อนุภาคตกตะกอนเร็วขึ้นภายใต้สนามของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อแยกเซลล์สาหร่ายที่แขวนลอยอยู่

2.) การกรองด้วยเมมเบรน (Filtration and membrane separation) เป็นวิธีการที่ไม่ใช้สารเคมี แต่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและการบำรุงรักษาสูง เนื่องจากสาหร่ายทำให้เมมเบรนอุดตันเร็วขึ้น ประสิทธิภาพและระยะเวลาในการกรองน้อยลง หรือต้องเพิ่มความถี่ในการล้างย้อน (Backwash) ให้มากขึ้น

3.) การตกตะกอน (Gravity sedimentation) เป็นวิธีการในการแยกสาหร่ายที่ต้องใช้ระยะเวลาอันยาวนานถ้าไม่มีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยในการเร่งการตกตะกอน

4.) โคลแอกกูเลชัน (Coagulation) ใช้การเติมสารเคมี หรือปรับพีเอช เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่าย เนื่องจากสาหร่ายมีขนาดอนุภาคที่เล็กและมีประจุที่ผิวเป็นประจุลบทำให้ตกตะกอนได้ยาก หรือใช้ระยะเวลาในการตกตะกอนนาน

5.) การทำให้ลอย (Flotation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกของแข็งออกจากของเหลว โดยการสร้างฟองอากาศให้เคลื่อนที่ขึ้นกับอนุภาคแขวนลอย เพื่อลดความถ่วงจำเพาะของอนุภาค และลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ อนุภาคสาหร่ายเป็นอนุภาคที่มีโอกาสลอยขึ้นมากกว่าตกตะกอนแต่เนื่องจากประจุที่ผิวของสาหร่ายที่มีคุณสมบัติเป็นลบ จึงอาจจะต้องเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของสาหร่ายก่อนจะเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอย ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายสูงขึ้น

ตารางที่ 2-3 เปรียบเทียบกระบวนการแยกสสาร (Laamanen, Ross และ Scott, 2016)

กระบวนการ	กลไกการแยก	โคแอกกูแลนต์	ค่าใช้จ่าย	การนำกลับ (%)	ประสิทธิภาพ	ข้อเสีย
การหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	หมุนเหวี่ยงด้วย ความเร็วสูง	ไม่ใช้	สูง	มากกว่า 90	++	ใช้พลังงาน องค์กรประกอบ ของเซลล์อาจเกิดการ เปลี่ยนแปลง
การกรองด้วยเมมเบรน	การไหลผ่านเมม เบรน	บางครั้ง	สูง	70-90	+	ต้องมีการทำความสะอาด หรือเปลี่ยนเมมเบรน
การตกตะกอน	ตกตะกอน เนื่องจากแรงโน้ม ถ่วงของโลก	บางครั้ง	ต่ำ	10-90	-	ใช้เวลานาน องค์กรประกอบ ของเซลล์อาจเปลี่ยนแปลง
การทำให้อัตกด้วยอากาศละลาย	การชนของ ฟองอากาศ	บางครั้ง	ปานกลาง	50-90	+	ใช้พลังงาน องค์กรประกอบ ของเซลล์อาจเกิดการ เปลี่ยนแปลง ค่าใช้จ่ายใน การโคแอกกูแลนต์

2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

อนุภาคขนาดเล็ก หรือ อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particle) มีขนาดอยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร อนุภาคคอลลอยด์มักสร้างปัญหาในการผลิตน้ำประปาเนื่องจากมีขนาดเล็กมาก ไม่สามารถตกตะกอนเองได้ภายในระยะเวลาที่จำกัด จึงมีความจำเป็นในการทำให้เกิดการจับกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์เป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือฟล็อก (Floc) เพื่อให้ตกตะกอนได้ง่าย กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า กระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งเป็นการเติมสารเคมี หรือ โคแอกกูแลนต์ ลงไปในน้ำโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสภาวะที่ทำให้อนุภาคแขวนลอย คอลลอยด์ หรือสิ่งปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชัน หรือเพื่อกำจัดอนุภาคและสารละลายออกจากน้ำ ในส่วนของกระบวนการฟล็อกคูเลชัน เป็นการรวมตัวกันของอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพ กลายเป็นฟล็อก และตกตะกอนซึ่งเป็นผลจากการเติมโคแอกกูแลนต์ โดยทั่วไป กำจัดฟล็อกออกด้วยการตกตะกอนโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงโลก หรือการกรอง (Crittenden และคณะ, 2012)

2.3.1 พฤติกรรมของคอลลอยด์

การที่อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานานโดยไม่ตกตะกอน เรียกว่า เป็นระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง ซึ่งระบบคอลลอยด์ หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปในสารตัวกลาง (Continuous medium) อนุภาคที่กระจายอยู่ในนั้น เรียกว่า Dispersed phase ส่วนสารตัวกลาง เรียกว่า Dispersing phase หรือ Dispersed medium

ลักษณะสำคัญของระบบคอลลอยด์ คือ บทบาทของผิวสัมผัสระหว่าง Dispersed phase และ Dispersing phase เนื่องจากขนาดที่เล็กมากของ Dispersed phase ทำให้น้ำหนักไม่มีความสำคัญเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวของสาร ระบบคอลลอยด์สามารถจำแนกออกเป็น 2 แบบ ตามแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Dispersed phase และ Dispersing phase คือ ระบบที่แรงยึดเหนี่ยวมีกำลังอ่อน หรือไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) และระบบที่แรงยึดเหนี่ยวมีกำลังแรง หรือไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ในกรณีที่ Dispersing phase เป็นน้ำ คอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิกสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่าคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิก เนื่องจากคอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิกมีโมเลกุลน้ำห่อหุ้ม

อยู่ จึงต้องใช้แรงมากในการบังคับให้อนุภาคจับกันกันเป็นกลุ่มก้อน เพราะโมเลกุลน้ำเป็นเสมือน สิ่งกีดขวางที่ป้องกันมิให้อนุภาคต่าง ๆ เข้าใกล้และจับตัวกัน (มันส์ลีย์ ดัชนีอุตสาหกรรม, 2542)

2.3.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์อาจมีประจุบวก หรือลบ ก็ได้ แต่ที่พบทั่วไปมักจะเป็นอนุภาคที่มีประจุลบ และมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (ไม่ชอบน้ำ) การที่อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำโดยไม่รวมตัวกันเป็นฟลอค ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ

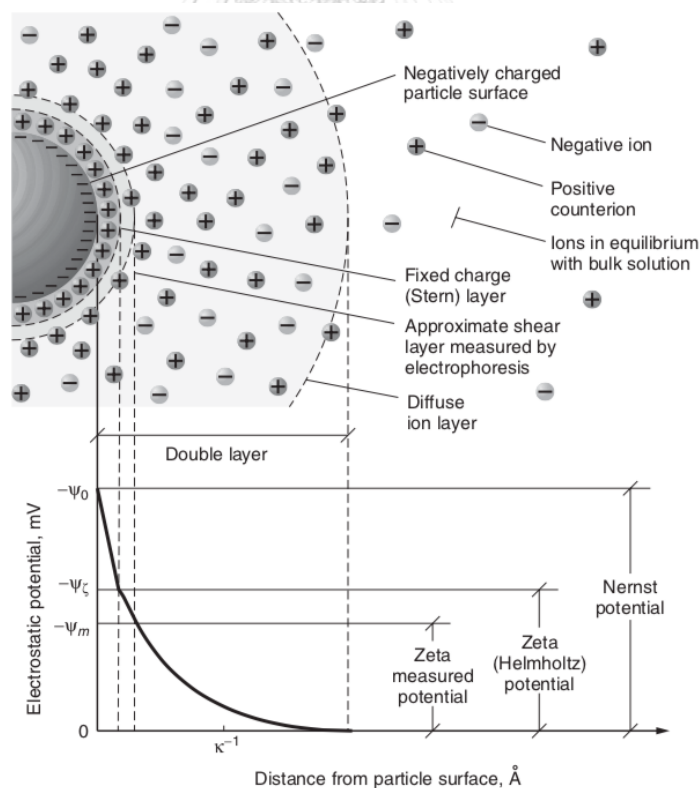
2.3.1.2 Electric double layer theory

ความแตกต่างระหว่างคอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิกและแบบไฮโดรฟิลิก คือ เสถียรภาพ (Stability) ของคอลลอยด์ โดยคอลลอยด์แบบไฮโดรโฟบิกเป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างอไอออนชนิดเดียวกัน ในขณะที่คอลลอยด์แบบไฮโดรฟิลิกเกิดขึ้นจากแรงผลักระหว่างโมเลกุลของน้ำที่ห่อหุ้มอนุภาค (Particle solvation) ซึ่งความแตกต่างที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลต่อกลไกในการทำลายเสถียรภาพ

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอลลอยด์ คือ Electric double layer Theory ซึ่งผู้คิดทฤษฎีนี้ คือ Helmholtz และพัฒนาให้สมบูรณ์ขึ้นโดย Gouy, Chapman และ Stern ดังแสดงในรูปที่ 2-3 พิจารณาจากอนุภาคที่เป็นอไอออนลบ เนื่องจากประจุลบของอนุภาค คอลลอยด์สามารถสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้อไอออนประจุบวกในน้ำเข้ามาหาได้และแออัดกันอยู่ใกล้ อนุภาคผิวคอลลอยด์ โดยส่วนที่เป็นอไอออนบวก เรียกว่า Counter ion ความหนาแน่นของอไอออนบวก จะสูงที่สุดที่บริเวณที่อยู่ติดกับอนุภาคคอลลอยด์และลดน้อยลงไปตามระยะห่างจากอนุภาค ทั้งนี้ เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst potential) และน้อยลงเมื่อห่างออกไป ณ ตำแหน่งที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ แสดงว่า ไม่อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้า ของคอลลอยด์ ทำให้การกระจายตัวของอไอออนบวกและลบเป็นไปตามทฤษฎี Double layer ที่กล่าวว่า อไอออนบวกชั้นในสุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ เนื่องจาก อไอออนบวกมักมีโมเลกุล ของน้ำห่อหุ้มอยู่ ชั้นที่อยู่ระหว่างผิวอนุภาคคอลลอยด์และจุดศูนย์กลางของอไอออนที่อยู่ใกล้ที่สุด เรียกว่า Stern Layer มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ Stern potential ส่วนชั้นที่อยู่ถัดมาด้านนอก คือ

Diffuse Layer หรือชั้นกระจาย ซึ่งครอบคลุมไปถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้า (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์)

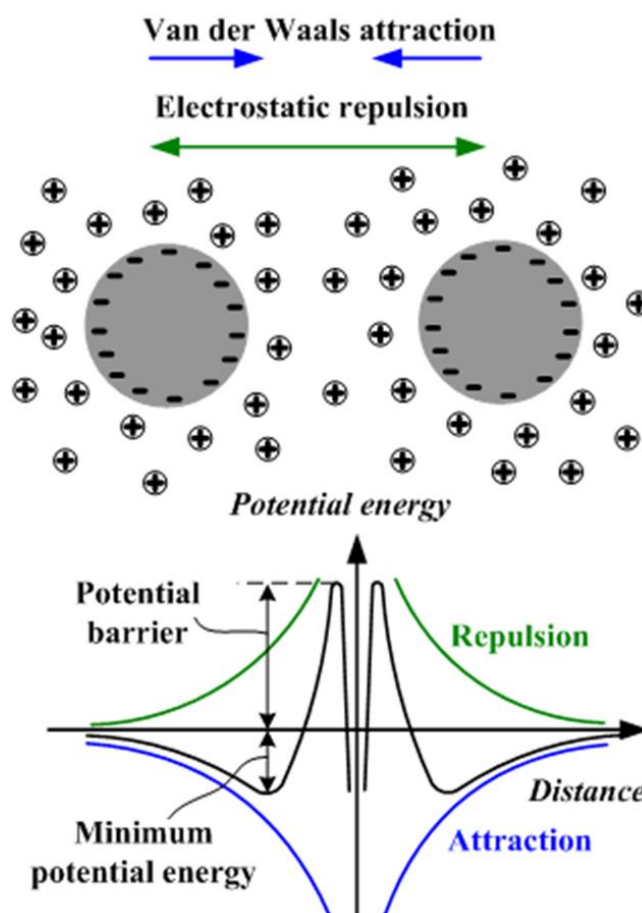
ศักย์ไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ (Nernst potential) ไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าที่จุดอื่นซึ่งไม่ใช่ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ โดยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า (Electrophoretic mobility) และคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้นี้ เรียกว่า ซีตาโพเทนเชียล (Zeta potential, Z_p) ซึ่งหมายถึง ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวนอกสุดของน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคคอลลอยด์ ที่บริเวณผิวนอกนี้ เรียกว่า Plane of shear ตำแหน่งที่แน่นอนของ Plane of shear ไม่เป็นที่ทราบ เชื่อกันว่าอยู่นอก Stern layer แต่ยังคงอยู่ในชั้นกระจายอย่างแน่นอน บทบาทของซีตาโพเทนเชียลมีมากกว่าศักย์ไฟฟ้าอื่น ๆ เนื่องจาก ซีตาโพเทนเชียล ใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงระดับเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูง จะมีค่าซีตาโพเทนเชียลสูงด้วย ในทางตรงกันข้าม ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ จะมีค่าซีตาโพเทนเชียลต่ำและทำให้รวมตัวกันเป็นตะกอนได้ง่าย



รูปที่ 2-3 โมเดลอธิบายทฤษฎี Electric Double Layer Theory (Crittenden และคณะ, 2012)

2.3.1.3 เสถียรภาพของคอลลอยด์

เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูด (Attractive force) และแรงผลัก (Repulsive Electrostatic force) ระหว่างอนุภาค ในกรณีที่แรงผลักมากกว่าแรงดูดส่งผลให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ในทางตรงกันข้าม กรณี แรงดูดมากกว่าแรงผลัก อนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพ และจับกลุ่มรวมกันเป็นฟลอคได้ โดยแรงดูดระหว่างอนุภาค เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากซีตาโพเทนเชียล ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค แรงดูดจะมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมาก ซึ่งโดยทั่วไปแรงผลักที่เกิดจากซีตาโพเทนเชียลจะทำให้ไม่เกิดการดึงดูดระหว่างอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2-4



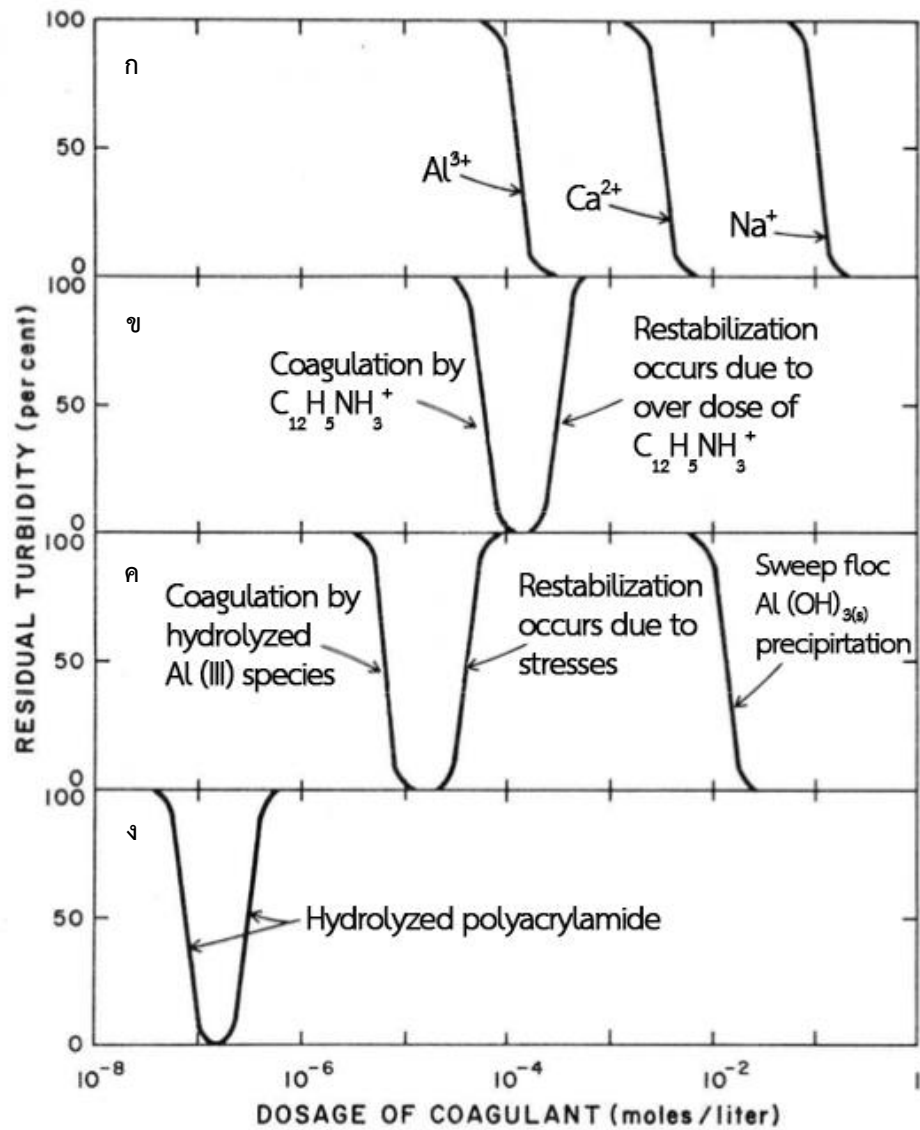
รูปที่ 2-4 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ (Hyerim Hwang, 2011)

2.3.2 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์อาศัยกลไก 4 แบบ คือ

2.3.2.1 การลดความหนาของชั้นกระจาย (Compression of the electrical double layer)

การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค เป็นการเพิ่มจำนวน Counter ion ในชั้นกระจาย ส่งผลให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง ประจุบวกเข้าไปอัดกันแน่นขึ้น บริเวณใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อำนาจของประจุลบไม่สามารถส่งออกไปไกลได้เท่าเดิม ไอออนต่าง ๆ มีความสามารถในการลดความหนาของชั้นกระจาย หรือซีตาโพเทนเชียล ได้ไม่เท่ากัน โดยไอออนที่มีวาเลนซ์ (Valence) มากจะลดความหนาของชั้นกระจายได้มาก กล่าวคือ ไอออนที่มีวาเลนซ์ 1 2 และ 3 มีอำนาจเป็นสัดส่วน 1:100:1000 ตามลำดับ เช่น เมื่อใช้ Al^{3+} จะให้ผลที่ดีกว่า Ca^{2+} ถึง 10 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2-5 (ก) แต่โดยทั่วไปไอออนบวกเหล่านี้ มักจะมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ เช่น Al^{3+} มีน้ำ 6 โมเลกุลจับอยู่และควรเขียนให้ถูกต้อง คือ $Al(H_2O)_6^{3+}$ อย่างไรก็ตาม ไม่นิยมเขียนโมเลกุลน้ำ โดยถือว่าเป็นที่เข้าใจกันแล้ว ซึ่งผลเสียจากการที่มีโมเลกุลน้ำห่อหุ้มอยู่ คือ ทำให้ไอออนบวกของโลหะไม่สามารถสัมผัสและดูดติดผิวคอลลอยด์ได้ ไอออนบวกจึงรวมกันหนาแน่นอยู่ในชั้นกระจายและไม่สามารถทำลายประจุลบได้ดีเท่าที่ควร และไม่ว่าจะเติมไอออนบวกมากเพียงใด คอลลอยด์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนจากประจุลบเป็นบวกได้ (Charge reversal) ดังแสดงในรูปที่ 2-5 (ข) เปรียบเทียบกับ 2-5 (ค) และ (ง)



รูปที่ 2-5 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยกลไก
 (ก) การลดความหนาของชั้นกระจายด้วย Al^{3+} , Ca^{2+} และ Na^+ (ข) การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า
 (ค) การเพิ่มน้ำหนักและขนาด และ (ง) การใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม
 (มันส์ลิปป์ ตัณฑุลเวศม์, 2542)

2.3.2.2 การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and charge neutralization)

สารเคมีบางหมู่สามารถดูดติด (Adsorbed) บนผิวของอนุภาคได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ การดูดติดผิวมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดยมีความแตกต่างจากกลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย 3 ประการ คือ

1.) กลไกแบบดูดติดผิวต้องการอ้อนน้อยกว่า เนื่องจากอ้อนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ เช่น จากรูปที่ 2-5 (ก) และ (ข) พบว่า Dodecylammonium ($C_{12}H_{25}NH_3^+$) เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ดี เมื่อใช้ในปริมาณ 6×10^{-5} โมลต่อลิตร สามารถดูดติดผิวของคอลลอยด์ประจุลบของเงินไอโอไดด์ (AgI) และถ้าต้องการให้ได้ผลที่เท่ากัน จะต้องใช้ Na^+ สูงถึง 0.1 โมลต่อลิตร

2.) การทำลายเสถียรภาพด้วยกลไกแบบดูดติดผิวเป็นแบบสโตยชิโอเมตริก (Stoichiometric) คือ ปริมาณของโคแอกกูแลนต์เพิ่มขึ้น หรือลดลง ตามปริมาณ หรือพื้นที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ แต่การทำลายเสถียรภาพด้วยกลไกแบบลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่เป็นไปตามสโตยชิโอเมตริก ดังที่กล่าวไปใน 2.3.2.1

3.) กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามได้โดยการเติมโคแอกกูแลนต์ที่มากเกินไป ดังในรูปที่ 2-5 (ข) เมื่อเติม $C_{12}H_{25}NH_3^+$ ในปริมาณที่พอเหมาะ จะทำให้ความขุ่นลดลงต่ำที่สุด แต่เมื่อเติมในปริมาณที่มากเกินไป ส่งผลให้คอลลอยด์มีประจุตรงกันข้ามและกลับมามีเสถียรภาพ แต่ในกลไกการลดความหนาชั้นกระจาย คอลลอยด์จะไม่กลับมามีเสถียรภาพอีกไม่ว่าจะเติมอ้อนไปในปริมาณมากเพียงใด เนื่องจาก จำนวนอ้อนต่างชนิดในชั้นกระจายถูกจำกัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์เสมอ ส่วนอ้อนต่างประจุที่เติมมากเกินไปนั้น จะไปอยู่นอกชั้นกระจาย

2.3.2.3 การเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (Enmeshment in a precipitate หรือ Sweep flocculation)

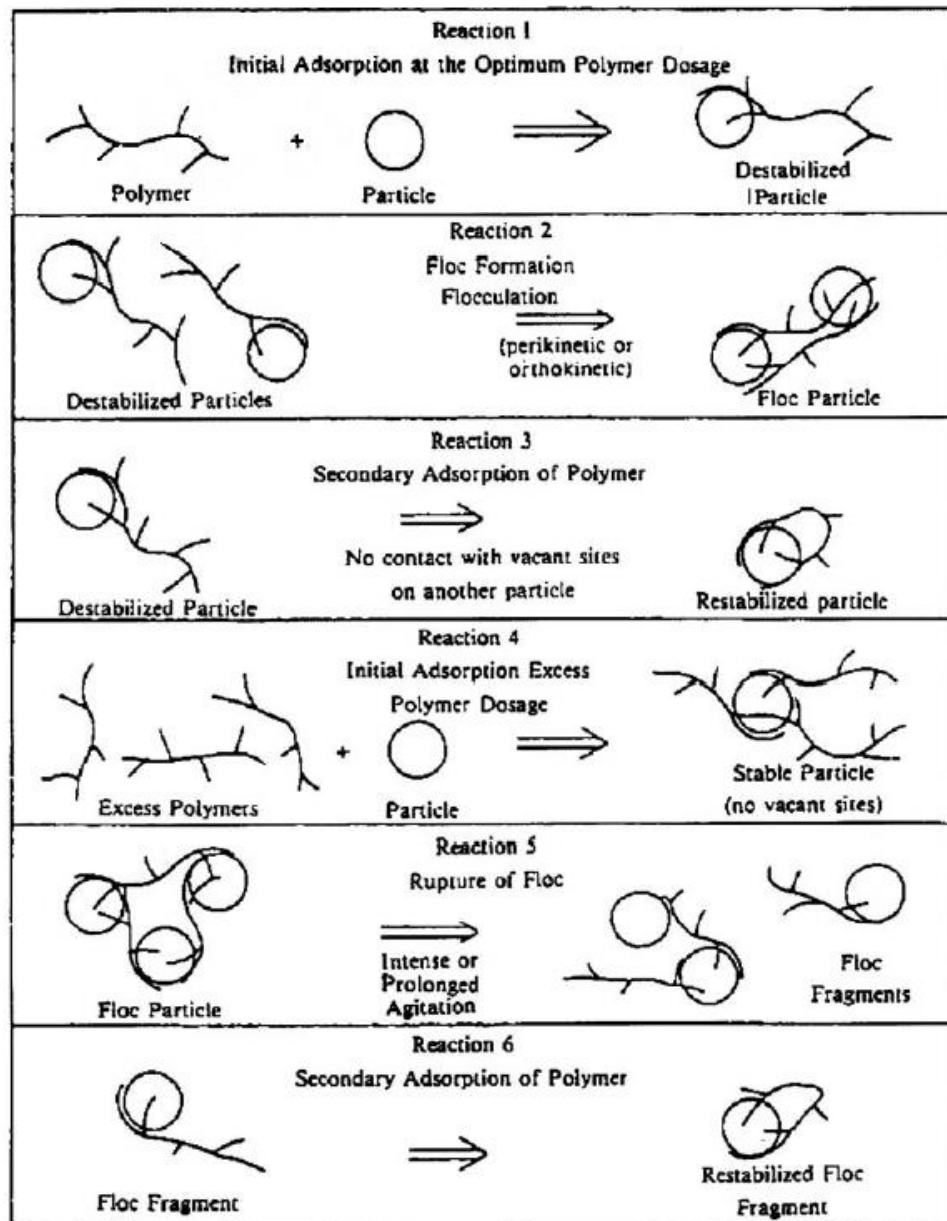
การเพิ่มน้ำหนักและขนาดอนุภาคคอลลอยด์ หรือการห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ โดยการเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปใต้น้ำในปริมาณที่มากพอ จะเกิดการตกผลึกขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าว เพื่อให้ผลึกมีขนาดใหญ่ หรืออาจจับตัวกับผลึก ลักษณะดังกล่าวที่เกิดขึ้นนี้ อาจถือว่าการเพิ่มน้ำหนักและขนาดให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ส่งผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้โดยการเติมโคแอกกูแลนต์ เช่น สารส้ม (Alum) เฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride, FeCl_3) แมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium carbonate, MgCO_3) และปูนขาว (Calcium hydroxide, Ca(OH)_2) สามารถทำให้เกิดโคแอกกูแลนต์ได้โดยการสร้างผลึก (Precipitate) Al(OH)_3 , Fe(OH)_3 , Mg(OH)_2 และ CaCO_3 ซึ่งไม่ละลายน้ำ

กลไกที่ใช้ผลึกสารอนินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไกอื่น คือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีความต้องการโคแอกกูแลนต์มากกว่าน้ำที่มีความขุ่นมาก เนื่องจาก น้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย แม้จะเกิดการทำลายเสถียรภาพแล้วก็ตาม โคแอกกูแลนต์อาจยังไม่เกิดดีเท่าที่ควร ต้องใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงเพื่อสร้างผลึกจำนวนมากสำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นมาก โอกาสสัมผัสมาก จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากการเติมโคแอกกูแลนต์มากเท่ากรณีที่มีความขุ่นต่ำ และเนื่องจากกลไกนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวอนุภาคคอลลอยด์ โคแอกกูแลนต์จึงไม่จำเป็นต้องเกิดในขณะที่ใช้ตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำสุด อย่างไรก็ตาม พีเอชมีบทบาทสำคัญมากกับกลไกแบบนี้ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการตกผลึกสารแต่ละตัวจะมีระดับพีเอชที่ต่างกัน

2.3.2.4 การใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer bridging)

สารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาล และโปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดคอลลอยด์ได้ สารเหล่านี้มักมีขนาดโมเลกุลใหญ่มาก ประจุไฟฟ้าอาจเป็น บวก ลบ หรือไม่มีประจุ

การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์ต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า Polymer bridging (รูปที่ 2-6) ตามทฤษฎีนี้ โมเลกุลของสารโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 1 การเกาะติดเป็นผลมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียสภาพแล้ว (Destabilized particle) อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (ปฏิกิริยาที่ 2) การต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์จะเกิดขึ้นได้ตราบเท่าที่มีโพลีเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของโพลีเมอร์ไม่มีที่เกาะจับกับอนุภาคอื่น ปลายอิสระก็จะเกาะจับบนอนุภาคเดิม (ปฏิกิริยาที่ 3) ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่นและมีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่าง เรียกว่า อนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized particle) การใช้โพลีเมอร์ที่มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์ จนไม่มีที่ว่างสำหรับที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น (ปฏิกิริยาที่ 4) อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงมีเสถียรภาพ และจากปฏิกิริยาที่ 5 การกวนที่แรง หรือนานเกินไปทำให้ฟลอคแตกออกเป็นส่วน ๆ และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิมและอนุภาคคอลลอยด์กลับมามีเสถียรภาพ (ปฏิกิริยาที่ 6)



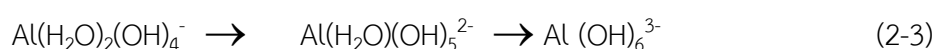
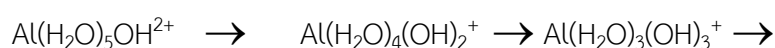
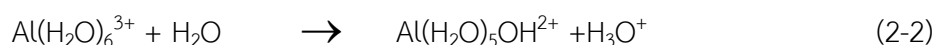
รูปที่ 2-6 กลไกการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์โดยใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม
(Amirtharajah และ Mills, 1982)

2.3.3 โคแอกกูแลนต์

อนุภาคสาหร่ายเป็นอนุภาคที่มีความไม่ชอบน้ำและมีประจุที่ผิวเป็นลบ จึงมักจะแขวนลอยอยู่ในน้ำและแยกได้ยากถ้าไม่มีการเติมโคแอกกูแลนต์เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่าย อีกทั้ง การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอย เนื่องจาก การเติมโคแอกกูแลนต์ทำให้อนุภาคสาหร่ายมีความชอบน้ำมากขึ้นและประจุที่ผิวของอนุภาคมีความเป็นกลาง โดยปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ต้องใช้จะขึ้นกับความไม่ชอบน้ำของอนุภาคสาหร่าย โดยข้อเสียที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้สารเคมีเป็นโคแอกกูแลนต์ เช่น การใช้โออนโลหะเป็นโคแอกกูแลนต์ ฟล็อกที่เกิดขึ้นจะมีโลหะปนอยู่ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อศักยภาพในการนำสาหร่ายที่แยกได้ไปใช้ประโยชน์ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณาในการเลือกโคแอกกูแลนต์ คือ โคแอกกูแลนต์ที่ใช้ไม่ควรส่งผลกระทบต่อกระบวนการ หรือผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นและอาจพิจารณาถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น ราคา ความเป็นพิษ ประสิทธิภาพ

2.3.3.1 สารส้ม

โคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับประเทศไทย คือ สารส้ม (Aluminium sulfate, Alum) เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่าง ๆ และหาซื้อได้ง่ายในราคาพอสมควร เมื่อสารส้มละลายน้ำ จะมีการแตกตัวของไอออน ดังสมการที่ 2-1 โดยทั่วไปแล้วไอออนของอะลูมิเนียม (Al^{3+}) จะอยู่รวมกับน้ำ 6 โมเลกุล ในรูป $Al(H_2O)_6^{3+}$ ไอออนที่ประกอบด้วยโลหะและน้ำ เรียกว่า Aqua metal Ion โมเลกุลของน้ำ เรียกว่า ลิแกนด์ (Ligand) และ Al^{3+} มีอำนาจเป็นกรด สามารถให้โปรตอน (H^+) จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ (Hydrolyzed) ให้เป็นไอออนต่าง ๆ ของอะลูมิเนียม ซึ่งมีไฮดรอกซิล (OH^-) เป็นลิแกนด์



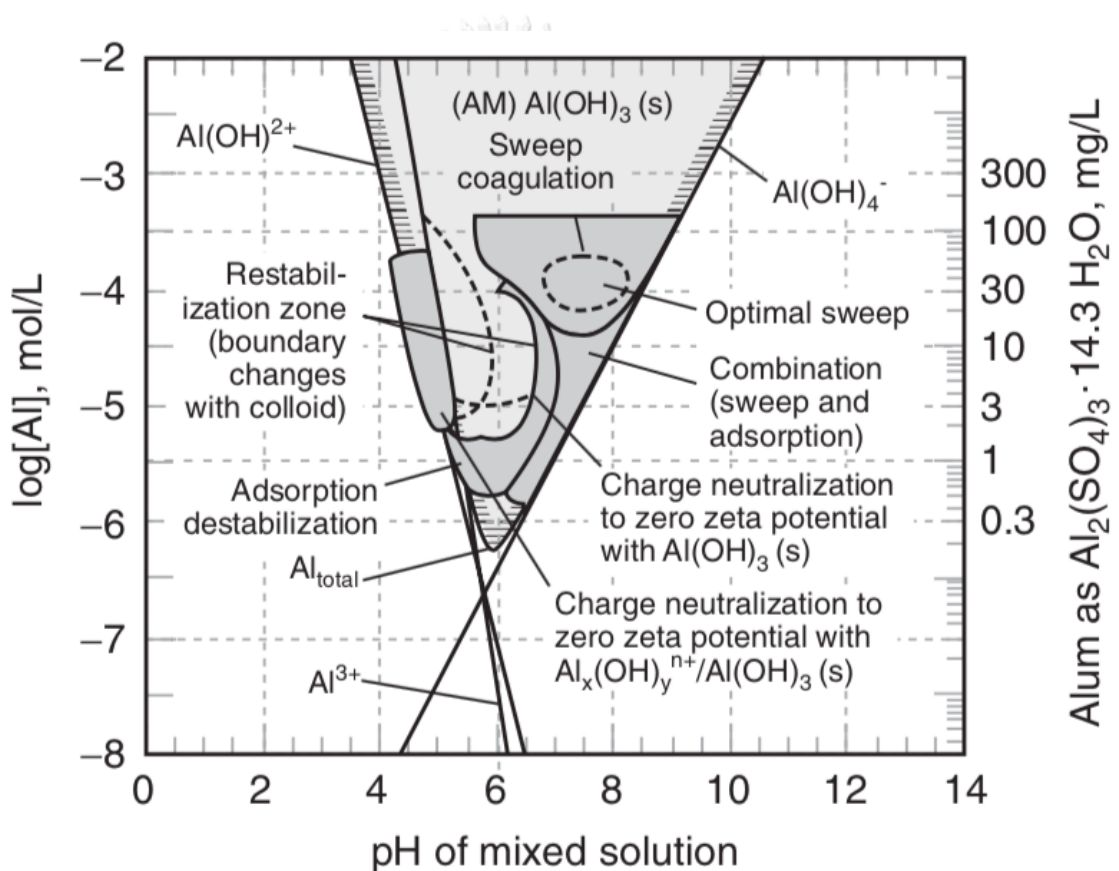
สมการที่ 2-2 เป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขั้นแรกสุด ซึ่งน้ำ 1 โมเลกุลของ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นได้ต่อไปอีก ทำให้โมเลกุลของน้ำถูกแทนที่เพิ่มขึ้น ประจุบวกลดลงเรื่อย ๆ จนหมดและกลายเป็นประจุลบ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีลำดับดังแสดงในสมการที่ 2-3 อีออนคอมเพล็กซ์ที่เพิ่งกล่าวไปทั้งหมด เป็นอีออนที่มีอะลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียวและเรียกว่า Monometric hydroxo complex สารดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยาและรวมกันจนกลายเป็นสารคอมเพล็กซ์ที่มีอะลูมิเนียมมากกว่า 1 อะตอม เรียกว่า Polymeric hydroxo complex เช่น $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ และ $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$

อีออนคอมเพล็กซ์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxo metal complex) พร้อมทั้งจะดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์และหักล้างประจุคอลลอยด์ได้ ถ้าอีออนมีประจุตรงข้ามและมากกว่าของคอลลอยด์ คอลลอยด์จะแสดงประจุเป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (Charge reversal) กลไกการทำลายเสถียรภาพที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับพีเอชของน้ำและปริมาณโคแอกกูแลนต์ โดยมีกลไกหลัก 2 แบบ คือ

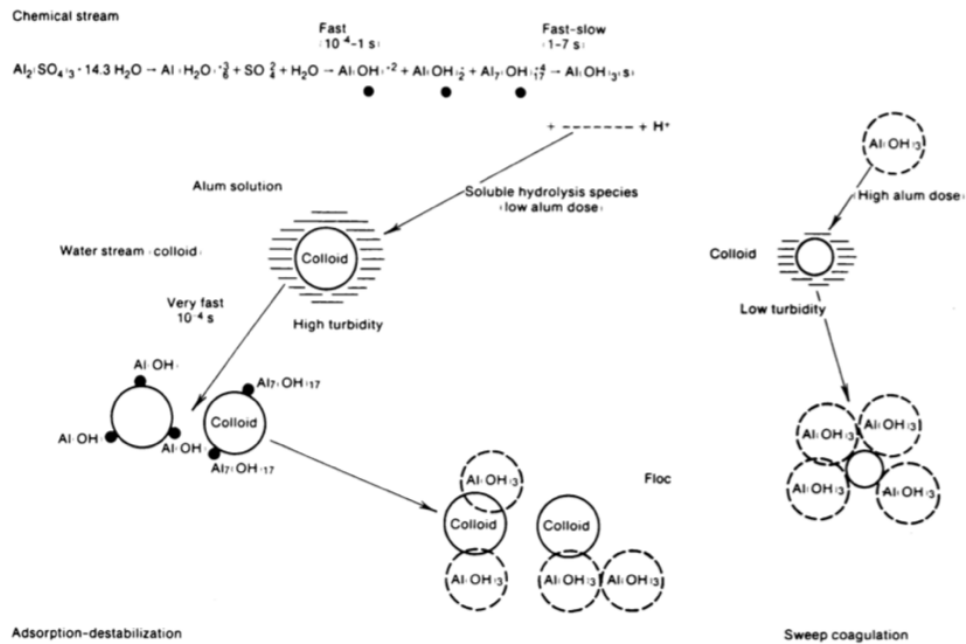
1.) กลไกการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ เกิดขึ้นโดยการแตกตัวเป็นอีออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่าง ๆ เช่น $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ หรือ $\text{Al}_6(\text{OH})_{20}^{4+}$ ซึ่งสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคและทำลายประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวกันจนกลายเป็นฟล็อก เกิดขึ้นเมื่อสารส้มมีน้อยจนกระทั่งผลคูณความเข้มข้นของ $[\text{Al}^{3+}]$ และ $[\text{OH}]^3$ ต่ำกว่า K_{sp} และพีเอชต้องไม่สูง หรือต่ำเกินไป กลไกแบบนี้มีข้อดี คือ ใช้สารส้มในปริมาณน้อยและได้สลัดจ์ที่มีคุณสมบัติคือ อดตัวได้แน่นและทำให้แห้งได้ง่าย แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบและควบคุมให้โคแอกกูแลนต์มีกลไกแบบนี้มักไม่สามารถกระทำได้ เนื่องจาก การสัมผัสระหว่างอีออนคอมเพล็กซ์และอนุภาคคอลลอยด์ ยากที่จะทำให้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในเวลา 10^{-4} ถึง 1 วินาที และความสามารถในการละลายของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ อยู่ในระดับต่ำ (เช่น $\text{Al}(\text{OH})_3$ จะตกผลึกเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า $7.8 \times 10^{-5.6}$ มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7)

2.) กลไกการเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ เกิดโดยการสร้างผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุ๋ย มาห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ก็จะเกาะตัวจับอยู่บนผลึกนั้น เมื่อเกิดขึ้นมาก ๆ จะได้ฟล็อกขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย สารส้มที่ใช้ต้องปริมาณสูงมากพอจนทำให้ผลคูณความเข้มข้นของ $[\text{Al}^{3+}]$ และ $[\text{OH}]^3$ สูงกว่า K_{sp} นอกจากนี้พีเอชของน้ำควรอยู่ในช่วง 6-7.5 จึงจะได้ผลดีที่สุด กลไกแบบนี้เกิดง่ายกว่าการดูดติดและทำลาย

ประจุมาก แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้สารส้มในปริมาณที่มากและสลัดจ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำ คือ อัดตัวไม่แน่นและทำให้แห้งยาก จากรูปที่ 2-7 Amirtharaja และ Mills (1982) ได้เสนอหลักการออกแบบและควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยกลไกแบบเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์จะได้ผลดีที่สุด (Optimal) ที่พีเอช 6.8-8.2 และสารส้ม 20-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนกลไกแบบดูดติดและทำลายประจุ และแบบผสม ทำให้เกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยสารสมน้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

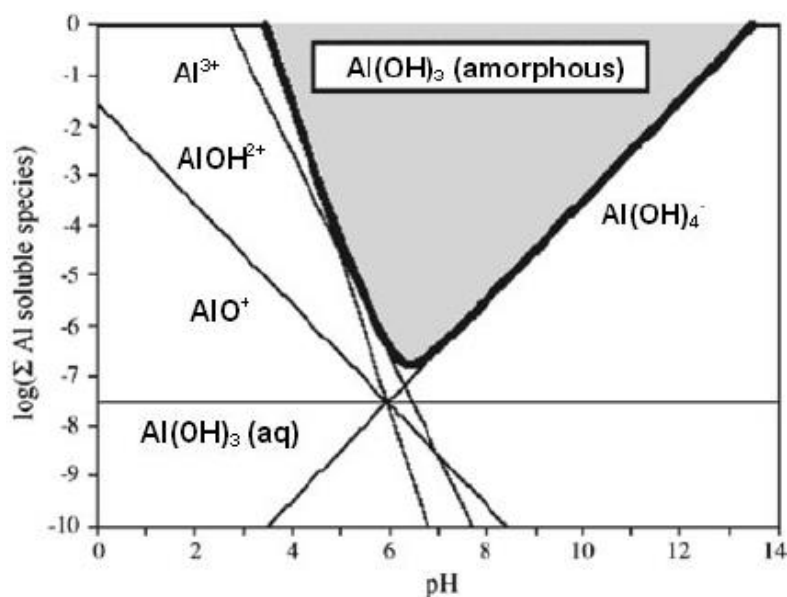


รูปที่ 2-7 โดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม
(Crittenden และคณะ, 2012)



รูปที่ 2-8 กลไกในการเกิดโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม
(Amirtharajah และ Mills, 1982)

ลำดับของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในสมการที่ 2-3 มีความสำคัญในการกำหนดกลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชันมาก อีออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกทั้งหลาย (ก่อนที่จะกลายเป็นผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$) เกิดขึ้นได้ภายในเวลา 10^{-4} ถึง 1 วินาที ส่วนผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ เกิดขึ้นภายในเวลา 1-7 วินาที ดังนั้น ถ้าสามารถให้อีออนคอมเพล็กซ์ดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ภายในเวลา 10^{-4} ถึง 1 วินาที จะทำให้ไม่มี $\text{Al}(\text{OH})_3$ เกิดขึ้น กลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบดูดติดและทำลายประจุ แต่ในทางตรงข้าม ถ้าการดูดติดผิวไม่เกิดขึ้นภายใน 1 วินาที ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งอีออนคอมเพล็กซ์กลายเป็นผลึก กลไกจะเป็นแบบการเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ อีกทั้งพีเอชของน้ำยังเป็นปัจจัยกำหนดความเข้มข้นและชนิดของอีออนคอมเพล็กซ์ต่าง ๆ โดยความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของอีออนคอมเพล็กซ์สามารถแสดงได้ด้วยไดอะแกรม Stability Diagram (รูปที่ 2-9) รวมถึงขอบเขตของการตกผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งกลไกหลักที่เกิดขึ้นในการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มคือ การเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์



รูปที่ 2-9 Stability Diagram ของสารส้มในน้ำที่ไม่มีความขุ่น
(Yilmaz, Boncukcuoğlu และ Kocakerim, 2007)

2.3.3.2 โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl) เป็นสารเคมีที่มีโครงสร้างโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นสายยาว โดยมีสูตรโมเลกุล คือ $(Al_n(OH)_mCl_{3n-m})_i$ เมื่อ $n = 2, 2.7 < m < 3.9$ และ $i > 0$ ซึ่ง PACl เป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่มีประสิทธิภาพในการตกตะกอน เมื่ออยู่ในน้ำจะมีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นจำนวนมากและถูกควบคุมปฏิกิริยาด้วยพีเอชของระบบ (ธงชัยและกาญจนิศา, 2535)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ ค่าพีเอชและสภาพต่าง (Alkalinity) โดยในการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ ส่งผลให้ค่าพีเอชลดต่ำลงมาก ดังสมการที่ 2-4 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ตะกอนของสารประกอบไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) ซึ่งส่งผลให้ค่าพีเอชลดต่ำลงและส่งผลต่อสภาพความเป็นต่างของน้ำ ดังนั้น จึงต้องมีการเติมสารเคมี เช่น แคลเซียมไบคาร์บอเนตร่วมกับสารส้ม ดังสมการที่ 2-5 เพื่อปรับสภาพน้ำไม่ให้พีเอชลดต่ำลง โดยจะทำให้เกิดผลพลอยได้ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกระบวนการตกตะกอนเนื่องจากก๊าซจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำและพาตะกอนลอยขึ้นมาด้วย หรือทำให้ตะกอนตกข้างล่างและทำให้เกิดความกระด้างถาวรขึ้น



การใช้ PACl เป็นสารโคแอกกูแลนต์จะลดการเกิดปัญหาดังกล่าว ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ เมื่อมีการสร้างตะกอนเกิดขึ้น คลอไรด์ไอออนที่เกิดขึ้นจะเข้าร่วมกับตะกอนและเกิดการตกตะกอน จึงไม่มีส่งผลกระทบต่อค่าพีเอชและสภาพความเป็นด่าง เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า จึงไม่ทำให้เกิดปัญหาตะกอนลอยและไม่เกิดความกระด้างถาวรเหมือนการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ อีกทั้ง จำนวนสารเคมีที่ใช้เพื่อปรับสภาพน้ำก็น้อยกว่า ดังสมการที่ 2-6



ประโยชน์ของการใช้ PACl เป็นสารโคแอกกูแลนต์ คือ มีอำนาจในการสร้างและรวมตะกอนสูง เมื่อเทียบกับการใช้สารส้ม มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ช่วงการทำงานของพีเอชกว้าง โดยปกติสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในช่วง 6-9 ในส่วนของกลไกในการทำลายเสถียรภาพอนุภาค เมื่อ PACl อยู่ในน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็น Al^{3+} เช่นเดียวกับสารส้ม ดังนั้น กลไกในการทำปฏิกิริยาจึงใกล้เคียงกับกลไกการทำปฏิกิริยาของสารส้ม

3.3.3.3 การปรับพีเอช

การปรับพีเอชเพื่อเหนี่ยวนำ (pH-induced) ให้เกิดการโคแอกกูเลชัน หรือเปลี่ยนประจุที่ผิวของอนุภาคสำหรับ การเพิ่มพีเอชส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคเกิดเป็นฟล็อก โดยการเพิ่มขึ้นของพีเอชในน้ำโดยทั่วไปเกิดจากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของสำหรับและการตกตะกอนของแคลเซียม หรือแมกนีเซียม ซึ่งอาศัยหลักการทำลายประจุไฟฟ้า และการเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ เมื่ออนุภาคสำหรับรวมตัวกันจนมีน้ำหนักและขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชันและตกตะกอนลงได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มพีเอชด้วยการเติมสารละลายเบสก็สามารถทำให้เกิดกระบวนการนี้เช่นกัน

3.3.3.4 โพลีเมอร์

โพลีเมอร์ (Polymer) สามารถใช้เพื่อเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่ได้ โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของโพลีเมอร์ที่ใช้ส่วนมากโพลีเมอร์ที่มีสายโซ่ยาว (Long chain polymers) จะเป็นเหมือนสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคและเกิดเป็นฟลอค โพลีเมอร์ที่มีประจุบวกสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสำหรับายซึ่งเป็นประจุลบได้และโพลีเมอร์นั้นต้องมีอ้อนเพื่อเป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคสำหรับายแต่ละอนุภาค โดยกระบวนการในการเกิดโคแอกกูแลชันโดยใช้โพลีเมอร์ขึ้นกับประจุ ความหนาแน่น และความยาวของโพลีเมอร์ แต่เนื่องจากโพลีเมอร์มีราคาสูงกว่าการใช้ฮีออนโลหะ ปัญหาในเรื่องของการปนเปื้อน และส่งผลต่อการแยกสำหรับายเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ จึงมักจะหลีกเลี่ยงการใช้โพลีเมอร์

การใช้โพลีเมอร์เพื่อช่วยในการแยกสำหรับายไม่ส่งผลต่อปริมาณน้ำมัน หรือกระบวนการสกัดน้ำมันออกจากสำหรับาย อย่างไรก็ตามการที่โพลีเมอร์เกาะติดที่ผิวบริเวณผิวของเซลล์และทำหน้าที่คอยดักจับ (Trap) ไขมันเชิงซ้อนหลังจากการสกัด ทำให้ปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวต่ำ ซึ่งส่งผลให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีความคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative stability) และเลขซีเทนสูง (Borges และคณะ, 2011)

2.4 กระบวนการทำให้ลอย

กระบวนการทำให้ลอย (Flotation) เป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกทางกายภาพ โดยอาศัยหลักการเพิ่มความเร็วสุดท้าย (U_T) จากการประยุกต์ใช้สมการ หรือกฎของสโตกส์ (Stokes's law) ดังแสดงในสมการที่ 2-7 ด้วยการเพิ่มผลต่างของความหนาแน่นระหว่างอนุภาคและเฟสของเหลว ($\Delta\rho$) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการทำให้ตะกอนที่มีน้ำหนักเบา หรือมีแนวโน้มจะลอยขึ้นสู่ผิวของเหลว ซึ่งเป็นหน่วยปฏิบัติการที่ตรงข้ามกับการตกตะกอน จึงนิยมใช้กับน้ำที่มีอนุภาคแขวนลอยที่ตกตะกอนยากและมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ (พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 2557)

$$U_T = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot D_p^2}{18 \cdot \mu_c} \quad (2-7)$$

โดย U_T = ความเร็วสุดท้ายของสารกระจาย

$\Delta\rho$ = ผลต่างความหนาแน่นของสารกระจาย (อนุภาค) และสารต่อเนื่อง (ของไหล)

g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคในสารกระจาย

μ = ค่าความหนืดของสารต่อเนื่อง

โดยแนวทางในการนำระบบการทำให้ลอยไปใช้ เช่น การบำบัดก่อนขั้นต้น (Pre-treatment) และการบำบัดขั้นต้น (Primary treatment) เพื่อลดปริมาณอนุภาคขนาดเล็กและความสกปรกโดยรวม หรือเป็นระบบสำหรับแยกตะกอนบางประเภทออกจากรน้ำเสียที่ไม่สามารถแยกออกได้ด้วยวิธีอื่น หรือใช้ระยะเวลาที่นานมาก อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นระบบเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของตะกอนในการบำบัดน้ำเสียสำหรับการจัดการและนำกลับไปใช้ใหม่ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของระบบการทำให้ลอย คือ ต้องการเครื่องมือในการควบคุมและการควบคุมระบบยาก ค่าใช้จ่ายด้านค่าไฟฟ้า ค่าสารเคมี และค่าบำรุงรักษามากกว่าการตกตะกอนด้วยถังตกตะกอน

2.4.1 ประเภทของกระบวนการทำให้ลอย

โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของการสร้างฟองอากาศ ดังนี้

2.4.1.1 การทำให้ลอยด้วยอากาศ (Induced air flotation, IAF)

อาศัยหลักการเติมอากาศที่ความดันบรรยากาศเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเกิดจากการทำงานของเครื่องจักร โดยการปั่นกววน หรือพ่นฟองอากาศโดยตรงจากหัวเติมอากาศ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาด 700-1,500 ไมโครเมตร เมื่อถูกปล่อยสู่น้ำเสียที่ต้องการบำบัด ฟองอากาศจะเข้าไปเกาะกับอนุภาคที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย แล้วลอยตัวขึ้นสู่ด้านบน ทำให้อนุภาคถูกแยกออกจากน้ำได้ด้วยแรงลอยตัวของฟองอากาศ โดยมีข้อดี คือ ระบบมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา การบำรุงรักษาค่อนข้างง่าย ใช้ระยะเวลาสั้นในการกำจัดอนุภาคที่มีแนวโน้มในการลอยขึ้น เช่น น้ำมัน มีประสิทธิภาพสูง และค่าใช้จ่ายต่ำ และยังเป็น การเพิ่มค่าออกซิเจนในน้ำด้วย เนื่องจากการเติมอากาศลงสู่น้ำเสีย

2.4.1.2 การทำให้ลอยด้วยสุญญากาศ (Vacuum flotation, VF)

หลักการทำงานของระบบนี้ คือ การเป่าอากาศลงในน้ำจนค่าการละลายของอากาศในน้ำเสียถึงจุดอิ่มตัว จากนั้น ตะกอนจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำในลักษณะของไข หรือฝ้าไข (Scum) จากปริมาณอากาศที่ไม่สามารถละลายในน้ำได้ โดยมีรูปแบบการทำงาน 2 รูปแบบ คือ การเป่าอากาศเข้าไปในน้ำโดยตรงและการเป่าอากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำ ระบบ VF เป็นระบบปิด หลังการเป่าอากาศเข้าไปในถังปิดแล้ว สภาพภายในถังจะเป็นสุญญากาศ เมื่อเปิดฝาดังออก อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะลอยขึ้นไปที่ผิวน้ำพร้อมกับพาเอาตะกอนเบาที่แขวนลอยอยู่ในน้ำไปด้วย จากนั้น ทำการกวาดตะกอนเบาที่บริเวณผิวน้ำออกจากถัง

2.4.1.3 การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Dissolved air flotation, DAF)

หลักการของ DAF คือ การสร้างฟองอากาศโดยอากาศจะถูกทำให้ละลายที่ความดันสูงประมาณ 4-5 บาร์ และเมื่อลดความดันให้เท่ากับความดันบรรยากาศ อากาศที่ละลายน้ำจะแยกตัวออกมาเป็นฟองขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของฟองที่เกิดขึ้นมีขนาดประมาณ 30-100 ไมโครเมตร ซึ่งจะเกาะและพุงอนุภาคแขวนลอยต่าง ๆ ในน้ำ ให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ จากนั้นเครื่องกวาดตะกอนที่ผิวน้ำจะกวาดอนุภาคที่แยกออกมา ระบบนี้เป็นที่นิยม เนื่องจาก ประสิทธิภาพสูง แต่มี

ข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายที่สูงมากในการเดินระบบเพราะต้องใช้พลังงานสูงและต้นทุนทางด้านเทคโนโลยี เพื่อทำให้เกิดความดันตามต้องการในทางทฤษฎี ปริมาณของอากาศที่เกิดขึ้น สามารถคำนวณได้โดยอาศัยหลักสมการความสัมพันธ์ของเฮนรี (Henry's law) ดังสมการที่ 2-8 โดยค่าคงที่ของเฮนรี (H) สามารถประมาณค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ ในอีกรูปหนึ่ง คือ H' ดังสมการที่ 2-9

$$x = \frac{y \cdot P}{H} \quad (2-8)$$

$$H' = -0.000002 (T-273)^3 + 0.00039 (T-273)^2 - 0.02745 (T-273) + 1.2472 \quad (2-9)$$

โดย x = สัดส่วนโมลของก๊าซในเฟสของเหลว
 y = สัดส่วนโมลของก๊าซในเฟสก๊าซ
 P = ค่าความดันสมบูรณ์ที่เดินระบบ (4-5 บาร์)
 H = ค่าคงที่ของเฮนรี (โมลก๊าซต่อลูกบาศก์เมตรน้ำต่อบรรยากาศ)
 H' = ค่าคงที่ของเฮนรีที่อุณหภูมิต่าง ๆ (โมลก๊าซต่อลูกบาศก์เมตรน้ำต่อบรรยากาศ)
 T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ความเข้มข้นของเฟสก๊าซ (C) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ที่ถูกปล่อยออกมาเมื่อลดความดันลงสู่ความดันบรรยากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-10

$$C = \frac{x \cdot MW_{Gas} \cdot \rho}{MW_{Water}} \quad (2-10)$$

โดย C = ความเข้มข้นของเฟสก๊าซ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 x = สัดส่วนโมลของก๊าซในเฟสของเหลว
 MW_{Gas} = มวลโมเลกุลของก๊าซ
 ρ = ความหนาแน่นของน้ำ
 MW_{Water} = มวลโมเลกุลของน้ำ

ดังนั้น สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นของเฟสก๊าซ จากสมการที่ 2-11 และอัตราการไหล (Q_{Gas}) ที่ถูกปล่อยออกมาจากการลดความดันภายในถัง DAF จากผลต่างของความเข้มข้นข้างต้น ดังแสดงในสมการที่ 2-12

$$C_{(mg/L)} = \frac{y \cdot H' \cdot MW_{Gas} \cdot P}{1000} \quad (2-11)$$

$$Q_{Gas}(m^3/s) = \frac{y \cdot H' \cdot Q_{PW} \cdot P_{gauge} \cdot T \cdot 0.082}{1000} \quad (2-12)$$

2.5 โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) เป็นวิธีการหนึ่งในกลศาสตร์ของไหลที่ใช้กระบวนการเชิงตัวเลข (Numerical method) และขั้นตอนวิธี (Algorithm) ในการวิเคราะห์ หรือคาดการณ์ผลของของไหลเมื่อไหลผ่านวัตถุที่เราสนใจ โดยของไหลในนั้นอาจเป็น น้ำ อากาศ น้ำมัน โคลน หรือของไหลใด ๆ ที่สามารถหาคุณสมบัติของสารนั้นได้ หลักการของ CFD คือ ใช้การคำนวณโดยการแบ่งขอบเขตของปริมาตรที่เราสนใจออกเป็นก้อนเล็ก ๆ ที่เรียกว่า Mesh และอาศัยสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-stokes equations) ดังแสดงในสมการที่ 2-13 แสดงสมมติฐานของการไหลเมื่อของไหลเป็นของไหลแบบนิวตัน (Newtonian fluid) ซึ่งมีค่าความหนืดและความหนาแน่นคงที่ เพื่อคำนวณผลของการไหลจาก Mesh หนึ่งไปยังอีก Mesh หนึ่ง โดยผลที่ได้จาก CFD คือ ทำให้สามารถมองเห็นการเคลื่อนที่ของของไหลในสถานะหนึ่ง ๆ ทำนายสถานะของไหลในของเชิงความเร็วได้อย่างแม่นยำ และนำไปสู่การออกแบบที่ถูกต้อง แต่ผลที่ได้นั้นเป็นค่าประมาณซึ่งจะใกล้เคียงความจริงมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับการแบ่ง Mesh และการกำหนดค่าต่าง ๆ ในแบบจำลอง

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2-13)$$

โดย ρ = ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

u = ความเร็วของไหล (เมตรต่อวินาที)

P = ความดันของไหล (นิวตันต่อตารางเมตร)

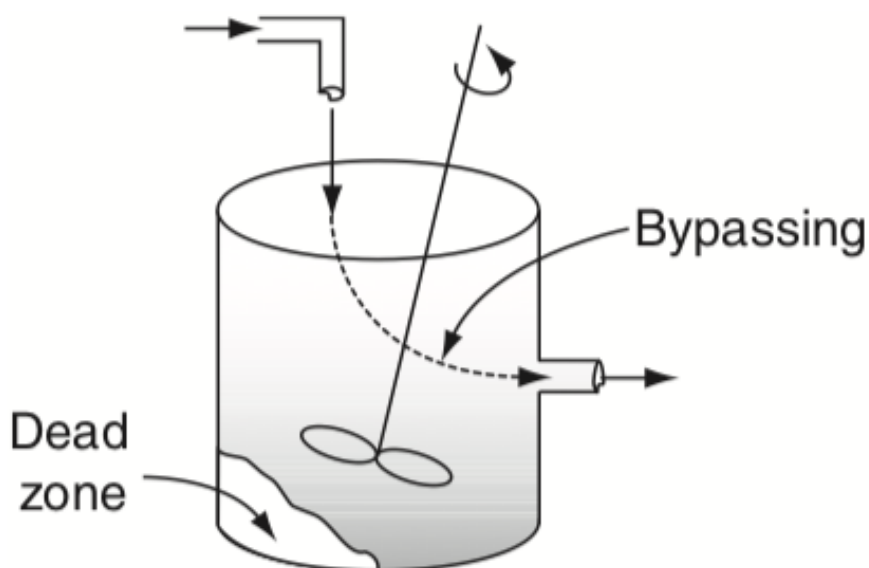
ν = ความหนืดจลน์ (ตารางเมตรต่อวินาที)

∇ = ตัวดำเนินการเกรเดียนต์ (Del operator)

∇^2 = ตัวดำเนินการลาปลาซ (Laplacian operator)

2.6 รูปแบบการไหลและการวิเคราะห์

การอธิบายถึงกลไกการทำงานของถังปฏิกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน และใช้ในการออกแบบถังปฏิกรณ์ จะใช้การตั้งสมมติฐานของรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ให้เป็นแบบอุดมคติ แต่ในสภาวะจริงรูปแบบการไหลอาจไม่เป็นไปตามสมมติฐาน เช่น การไหลภายในท่อ อาจมีรูปแบบที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของเหลวกับผนังท่อ ทำให้เกิดความปั่นป่วนและการไหลไม่เป็นไปตามอุดมคติ การกวนผสมในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ อาจไม่ทั่วถึงเนื่องจากบางส่วนในถังปฏิกรณ์อาจเกิดจุดอับ (Dead zone) ทำให้ของเหลวบางส่วนตกค้างอยู่ภายในถังปฏิกรณ์นานเกินกว่าระยะเวลาพัก (Residence time) ที่ออกแบบไว้ หรืออาจทำให้เกิดการไหลลัด (Bypassing) ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ดังนั้น การวิเคราะห์รูปแบบการไหลโดยใช้หลักการกระจายเวลา (Residence time distribution, RTD) จึงมีความสำคัญในการประเมินรูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์



รูปที่ 2-10 การเกิดจุดอับและการไหลลัดภายในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์

2.6.1 รูปแบบการไหลในอุดมคติ (Ideal flow regimes)

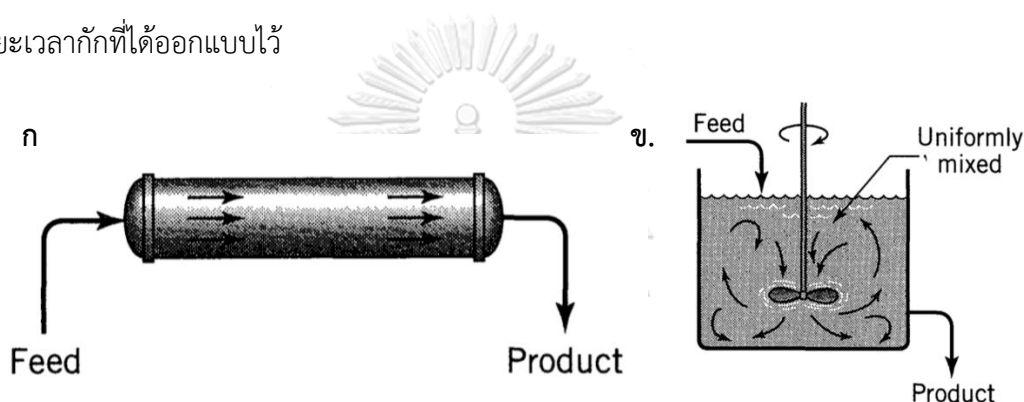
รูปแบบการไหลในอุดมคติภายในถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2-11 แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.6.1.1 การไหลในถังปฏิกรณ์แบบท่อ (Plug flow)

เป็นรูปแบบการไหลของของเหลวที่ไหลผ่านถังปฏิกรณ์ซึ่งมีความยาวมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัด โดยมีสมมติฐานว่าของเหลวจะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ทำให้ไม่เกิดความปั่นป่วนตามแนวการไหล โดยของเหลวในพื้นที่หน้าตัดเดียวกันจะมีสมบัติที่เหมือนกันเสมอ หรือในกรณีที่มีสารเจือปนในของเหลว ความเข้มข้นของสารที่เจือปนในพื้นที่หน้าตัดเดียวกันจะเท่ากันเสมอ ดังนั้น ในสมมติฐานนี้ของเหลวจะไหลผ่านถังปฏิกรณ์ด้วยระยะเวลาที่ตามทีออกแบบไว้

2.6.1.2 การไหลในถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ (Completely mixed flow)

เป็นรูปแบบการไหลของของเหลวที่ไหลผ่านถังปฏิกริยาที่มีการติดตั้งใบกวน หรืออุปกรณ์กวนผสมอื่น ๆ เพื่อสร้างความปั่นป่วนให้กับของเหลว จนเกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ตามสมมติฐานว่า เมื่อสร้างความปั่นป่วนภายในถังปฏิกริยาอย่างเพียงพอ จะทำให้เกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ จนทำให้ของเหลวมีคุณสมบัติสม่ำเสมอทันทีเมื่อไหลเข้าสู่ถังปฏิกริยา หรือในกรณีของเหลวที่มีสารเจือปน เมื่อไหลเข้าสู่ถังปฏิกริยาจะถูกกวนผสมทันทีจนความเข้มข้นของสารเจือปนมีความสม่ำเสมอและกระจายตัวเท่ากันทุกตำแหน่งภายในถัง หลังจากนั้น ของเหลวจะไหลออกจากถังตามระยะเวลาที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 2-11 รูปแบบการไหลในอุดมคติของถังปฏิกริยาที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง

(ก) ถังปฏิกริยาแบบท่อ (ข) ถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์

2.6.2 รูปแบบการไหลแบบไม่อุดมคติ (Non-ideal flow)

รูปแบบการไหลของของเหลวภายในถังปฏิกริยาในสภาวะจริง มักไม่เป็นไปตามอุดมคติแต่เป็นการเกิดร่วมกันของการไหลทั้งสองแบบ คือ การไหลในถังปฏิกริยาแบบท่อและการไหลในถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ เช่น การไหลในถังปฏิกริยาแบบท่ออาจเกิดการผสมตามแนวการไหลของของเหลว ทั้งตามและทวนกระแสของการไหล เนื่องจาก สมบัติการแพร่กระจายของสารเจือปน หรือเกิดความปั่นป่วนภายในถังปฏิกริยา ทำให้รูปแบบการไหลไม่เป็นไปตามอุดมคติ ส่งผลให้สารเจือปน หรือของเหลวบางส่วนไหลออกจากถังปฏิกริยาเร็ว หรือช้ากว่าระยะเวลาที่ได้ออกแบบไว้ โดยปัจจัยที่ทำให้เกิดการไหลแบบไม่อุดมคติ นอกจากปัจจัยด้านรูปทรงของถังปฏิกริยาแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ดังนี้

1.) อุณหภูมิ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างของเหลวที่กำลังไหลเข้าถังปฏิกริยาและของเหลวที่อยู่ภายในถังปฏิกริยา สามารถทำให้เกิดการแยกชั้น เนื่องจากความหนาแน่นที่ต่างกันตามอุณหภูมิ ในกรณีของเหลวชนิดเดียวกัน ของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ลอยอยู่ด้านบน ดังนั้น ผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้ของเหลวที่ไหลเข้าสู่ถังปฏิกริยาแยกตัวออกจากของเหลวภายในถังปฏิกริยาและไม่เกิดการผสมกัน ทำให้เกิดการไหลลัด (Short circuit) หรือการไหลแบบไม่อุดมคติ

2.) แรงลม สำหรับถังปฏิกริยาที่มีพื้นที่ผิวกว้างมาก จะได้รับอิทธิพลจากแรงลม โดยทิศทางลมจะส่งผลต่อทิศทางการไหลของของเหลวบริเวณผิวสัมผัสผิวนอนเกิดการไหลวน หรือทำให้ของเหลวที่ไหลอยู่ภายในถังปฏิกริยาคลาดเคลื่อนไปจากระยะเวลาที่ที่ออกแบบไว้

3.) ระบบการกวนผสม ในกรณีของถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ การเลือกชนิด ขนาด และจำนวนชุดอุปกรณ์กวนผสม รวมไปถึงพลังงานที่ใช้ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกวนผสมภายในถัง หากระบบการกวนผสมไม่เหมาะสมกับถังปฏิกริยา อาจทำให้ของเหลวบางส่วนไม่ได้รับการกวนผสมและเกิดเป็นจุดอับภายในถังปฏิกริยา

4.) ระบบกระจายน้ำเข้าและขาออกของถังปฏิกริยา การออกแบบระบบอย่างเหมาะสมจะทำให้ของเหลวที่ไหลเข้าถังปฏิกริยาเกิดการกระจายตัวทั่วปริมาตรถังปฏิกริยาอย่างสม่ำเสมอและถ้ามีการกวนผสมของเหลวก็จะถูกกวนผสมอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ของเหลวไหลออกจากถังปฏิกริยาอย่างสม่ำเสมอ โดยการออกแบบระบบกระจายน้ำที่สามารถลดการเกิดจุดอับภายในถังปฏิกริยาและทำให้ระยะเวลาที่เป็นไปตามที่ออกแบบ

5.) สมบัติการถ่ายเทสาร (Advection) และการแพร่ (Dispersion) ในการไหลในถังปฏิกริยาแบบท่อ ความเร็วของของเหลวขณะไหลไปข้างหน้า ทำให้เกิดการถ่ายเทสารไปตามทิศการไหลของของเหลวจนเกิดการผสมกันตามแนวการไหล ขณะเดียวกัน ความแตกต่างของความเร็วการไหลบริเวณกึ่งกลางพื้นที่หน้าตัดกับผนังของถังปฏิกริยาในพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน ทำให้เกิดการปั่นป่วนและกวนผสมตามแนวการไหล ประกอบกับสมบัติการแพร่ของสารเจือปนในระดับโมเลกุลก็สามารถทำให้เกิดการผสมตามแนวการไหลได้เช่นกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ของเหลว หรือสารบางส่วนไหลออกจากถังปฏิกริยาเร็วกว่าระยะเวลาที่ออกแบบไว้

ผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการไหลล้น หรือจุดอับภายในถัง ซึ่งส่งผลให้การไหลของของเหลวภายในถังไม่เป็นไปตามอุดมคติ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของถังปฏิกริยาลดลงและคลาดเคลื่อนไปจากวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้น ในขั้นตอนของการออกแบบถังปฏิกริยา ควรออกแบบให้มีปริมาตรมากกว่าที่ต้องการ เพื่อป้องกันผลกระทบจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการไหลแบบไม่อุดมคติและควรศึกษาระยะเวลาที่เพื่อประเมินรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา

2.6.3 หลักการกระจายเวลา

การวิเคราะห์การกระจายเวลากักในถังปฏิกริยา ทำได้โดยการวิเคราะห์เทรเซอร์ (Tracer study) ซึ่งเป็นการเติมสารเคมี หรือสีที่ใช้เป็นสารเทรเซอร์เข้าไปในของเหลวก่อนไหลเข้าถังปฏิกริยา เพื่อเป็นตัวบ่งชี้รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา รูปแบบของการทดลองศึกษาการกระจายเวลากักในถังปฏิกริยามี 2 รูปแบบ คือ การทดลองแบบจ่ายครั้งเดียว (Pulse input experiment) และการทดลองแบบจ่ายต่อเนื่อง (Step tracer experiment) ดังแสดงในรูปที่ 2-12 (Fogler, 2004) การศึกษาการกระจายเวลากักโดยการตรวจวัดความเข้มข้นของสารเทรเซอร์ที่ขาออกของถังปฏิกริยา ณ เวลาต่าง ๆ หลังจากการเติมสารเทรเซอร์ ทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารเทรเซอร์ตามเวลา จากนั้น วิเคราะห์ความเข้มข้นของเทรเซอร์ที่ได้จากการตรวจวัดเป็นระยะเวลาที่เฉลี่ย (Mean residence time, \bar{t}) ของถังปฏิกริยาและฟังก์ชันการกระจายเวลา เพื่อประเมินประสิทธิภาพและรูปแบบของถังปฏิกริยา โดยสามารถคำนวณระยะเวลาที่เฉลี่ยจากสมการที่ 2-13 และคำนวณค่าความแปรปรวน (Variance, σ_t^2) จากสมการที่ 2-14

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tE(t)dt = \sum_t t_t E_t(t) \Delta t_t \quad (2-13)$$

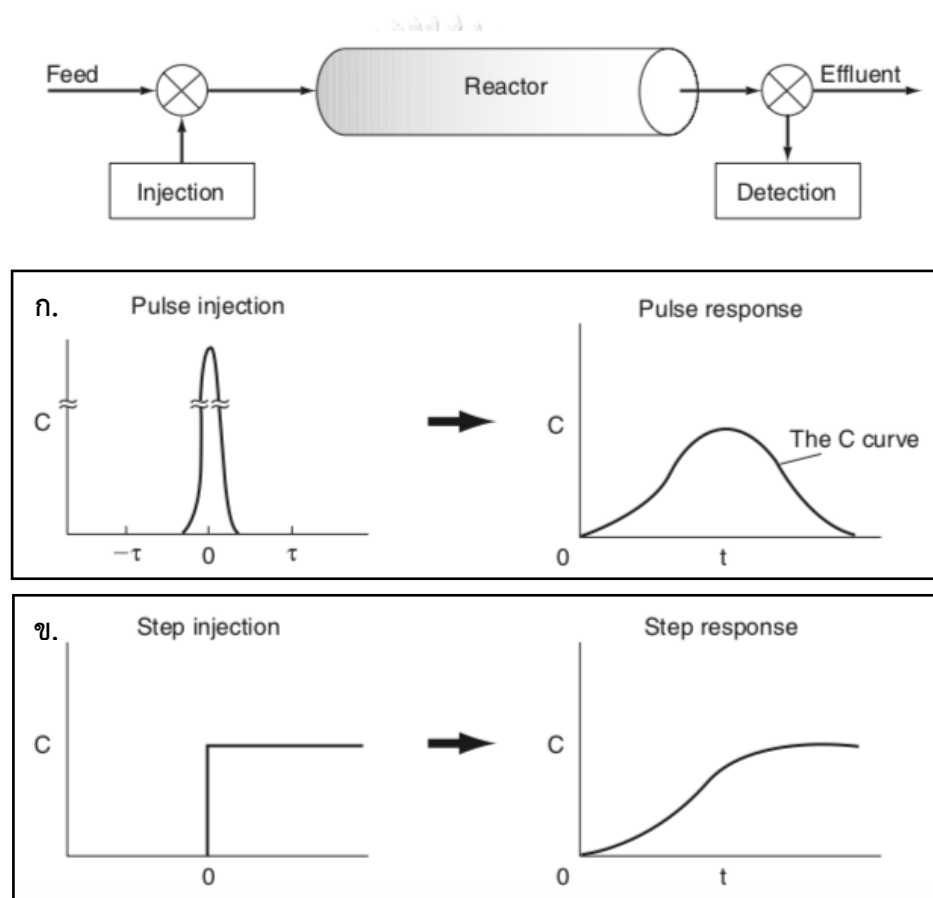
$$\sigma_t^2 = \int_0^{\infty} t^2 E(t)dt - \bar{t}^2 = \sum_t t_t^2 E_t(t) \Delta t_t - \bar{t}^2 \quad (2-14)$$

โดย \bar{t} = ระยะเวลาที่เฉลี่ย (วินาที)

$E(t)$ = ฟังก์ชันการกระจายเวลากัก (วินาที⁻¹)

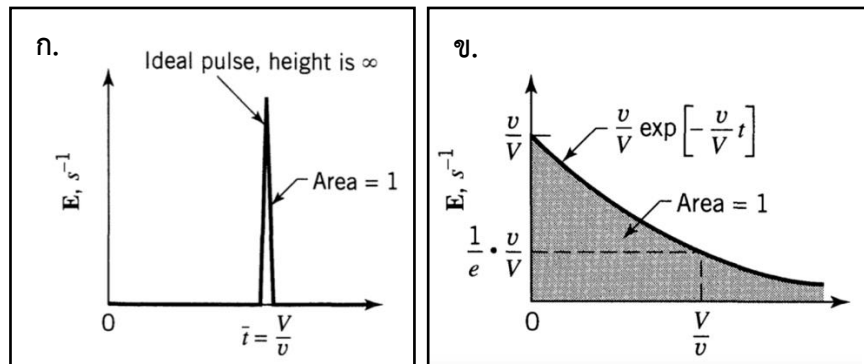
σ_t^2 = ความแปรปรวน (วินาที²)

จากการคำนวณค่าระยะเวลาที่เฉลี่ยและความแปรปรวน สามารถประเมินรูปแบบการไหลเบื้องต้นได้ว่าคลาดเคลื่อนไปจากสถานะอุดมคติที่ได้ออกแบบไว้เล็กน้อยเพียงใด ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ที่แสดงถึงปริมาณสารเทอร์เซอร์ที่ไหลออกจากถังปฏิกริยา ณ เวลาต่าง ๆ ทำให้สามารถประเมินเป็นค่าระยะเวลาที่เฉลี่ยของถังปฏิกริยาและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาได้ ดังในรูปที่ 2-13 (ก) และ (ข) แสดงผลการวิเคราะห์เทอร์เซอร์ในกรณีที่ถังปฏิกริยาเป็นถังปฏิกริยาแบบท่อและแบบกวนสมบูรณ์ ตามลำดับ



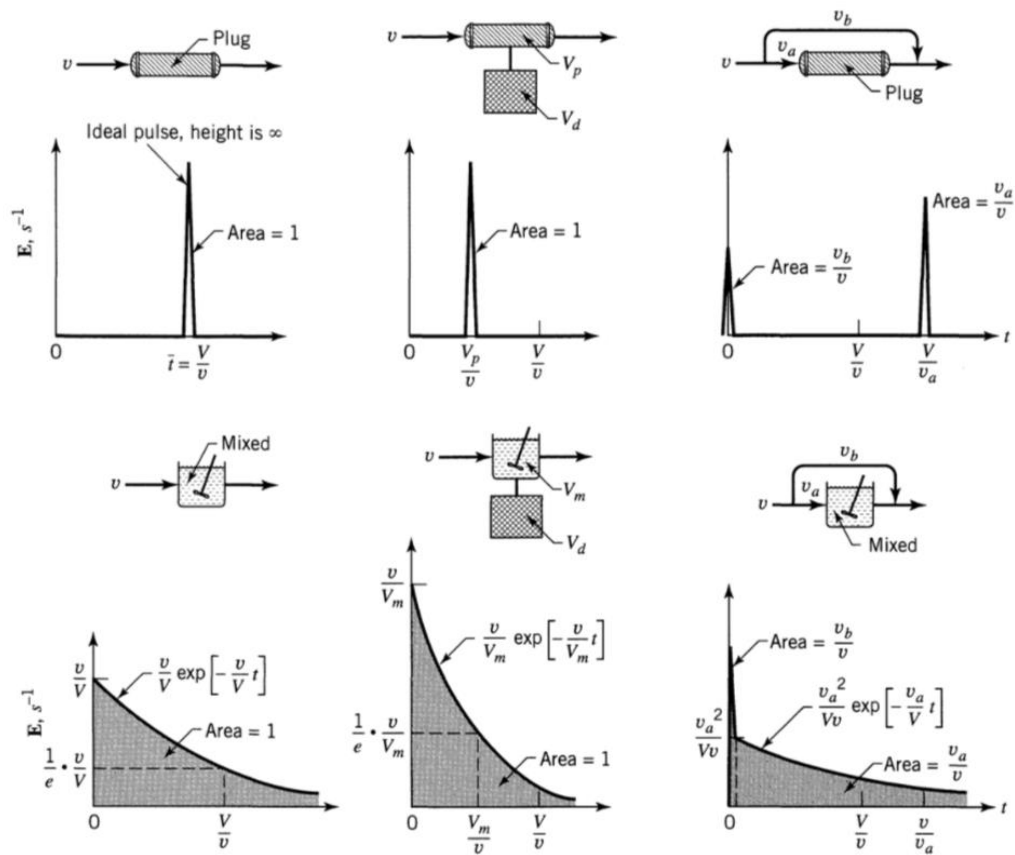
รูปที่ 2-12 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวิเคราะห์เทอร์เซอร์และตัวอย่างผลการวิเคราะห์เทอร์เซอร์

(ก) การทดลองแบบจ่ายครั้งเดียว (ข) การทดลองแบบจ่ายต่อเนื่อง



รูปที่ 2-13 ผลการวิเคราะห์เทอร์เซอร์ (ก) ถึงปฏิกิริยาแบบท่อ (ข) ถึงปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์

การวิเคราะห์รูปแบบของถังปฏิกิริยาและการไหลภายในถังปฏิกิริยาจะใช้แบบจำลองที่เรียกว่า Compartment model โดยพิจารณาจากปริมาตร (Total volume, V) และการไหลผ่านถังปฏิกิริยา (Total throughflow, v) จากรูปที่ 2-14 ปริมาตรทั้งหมดในถังปฏิกิริยาจริง (Active volume, V_A) เกิดจากการรวมกันของปริมาตรถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ (Mixed flow region, V_M) หรือปริมาตรของถังปฏิกิริยาแบบท่อ (Plug flow region, V_p) โดยไม่รวมปริมาตรที่เกิดจากจุดอับภายในถังปฏิกิริยา (Dead region, V_d) โดยที่ v คือ อัตราการไหลผ่านถังปฏิกิริยาที่ประกอบด้วย ส่วนที่ไหลผ่านถังปฏิกิริยา (Active flow, v_a) ส่วนที่เกิดการไหลลัด (Bypass flow, v_b) และส่วนไหลเวียนกลับ (Recycle flow, v_r) การวิเคราะห์ปริมาตรและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยาด้วยการเทียบกราฟฟังก์ชันการกระจายเวลากัก (E curve) ที่วิเคราะห์ได้จากถังปฏิกิริยาจริงกับกราฟฟังก์ชันการกระจายเวลากักทางทฤษฎี ดังแสดงในรูปที่ 2-14 อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์การกระจายเวลากักอาจไม่ตรงกับแบบจำลองทางทฤษฎีทั้งหมด แต่ก็สามารถใช้เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกิริยาได้ (Fogler, 2004)



รูปที่ 2-14 รูปแบบการไหลของ Compartment model ต่าง ๆ

นอกจากนี้ ค่าความแปรปรวนของความเข้มข้นของสารเทอร์เซอร์สามารถบ่งบอกถึงรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ได้ว่าเป็นรูปแบบการไหลแบบท่อ หรือกวนสมบูรณ์ โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ 2-15 ในกรณีที่เป็นระบบปิด หรือคาดว่าจะเกิดการแพร่เพียงเล็กน้อย และสมการที่ 2-16 ในกรณีที่เป็นระบบเปิด หรือระบบทั่วไปที่มีการแพร่ โดยพิจารณาถึงระดับการแพร่ตามแนวทางการไหลจากสมการที่ 2-17 ซึ่งจะทำนายว่ารูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์เป็นแบบท่อ หรือกวนสมบูรณ์ โดยเมื่อทราบค่าตัวแปรไร้หน่วยด้านการแพร่ (Dispersion number) จากสมการแล้วสามารถสรุปรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ได้ดังแสดงในตารางที่ 2-4

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\tau^2} = 2 \frac{D}{uL} \quad (2-15)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\tau^2} = 2 \frac{D}{uL} + 8 \left(\frac{D}{uL} \right)^2 \quad (2-16)$$

$$d = \frac{D}{uL} = \frac{D}{L^2} \quad (2-17)$$

โดย σ_{θ}^2 = ความแปรปรวนของอัตราส่วนความเข้มข้นของสารเทอร์เซอร์ (C_t/C_0) (วินาที²)

C_t = ความเข้มข้นของสารเทอร์เซอร์ ณ เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเทอร์เซอร์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

σ_t^2 = ความแปรปรวนของความเข้มข้นของสารเทอร์เซอร์ (วินาที²)

τ = ระยะเวลาที่ตามทฤษฎี หรือการคำนวณ (วินาที)

D = สัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวการไหล (ตารางเมตรต่อวินาที)

u = ความเร็วของของเหลว (เมตรต่อวินาที)

L = ระยะทางของการไหล (เมตร)

d = ตัวแปรไร้มิติด้านการแพร่ (Dispersion number)

t = เวลา (วินาที)

ตารางที่ 2-4 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาจากค่าตัวแปรไร้มิติด้านการแพร่

d	รูปแบบการไหล
0	ไม่มีการแพร่ เป็นการไหลในถังปฏิกริยาแบบท่อในอุดมคติ
0 - 0.05	มีการแพร่เพียงเล็กน้อย
0.05 - 0.25	มีการแพร่ในระดับกลาง
น้อยกว่า 0.25	มีการแพร่ในระดับสูง หรือมีการกวนผสม
$d \cong \infty$	เป็นการไหลในถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์

นอกจากการทำนายรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์โดยใช้ตัวแปรไร้หน่วยด้วยการแพร่ (d) แล้ว อีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ทำนายรูปแบบการไหลได้ คือ การใช้เลขเพกเลต (Peclet number, Pe) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปัจจัยด้านการพา (Advection) และการแพร่ (Dispersion) ดังสมการที่ 2-18

$$Pe = \frac{uL}{D} \quad (2-18)$$

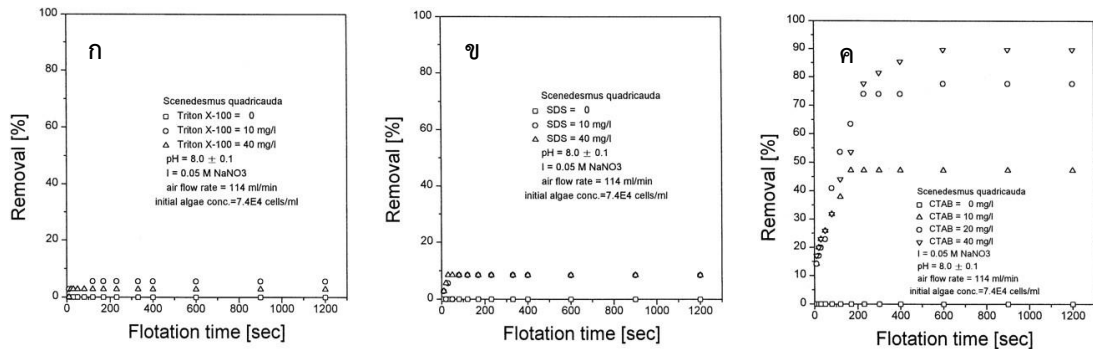
โดยเมื่อเลขเพกเลตมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปัจจัยด้านการแพร่และการกระจายตัวของสสาร มีผลเด่นชัดกว่าปัจจัยการพา รูปแบบการไหลจึงเป็นการกวนสมบูรณ แต่ถ้เลขเพกเลตมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าปัจจัยด้านการพาโดยของเหลวมีผลเด่นชัดมากกว่าปัจจัยด้านการแพร่และการกระจายตัวของสสาร หรือเป็นรูปแบบการไหลแบบท่อ



2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

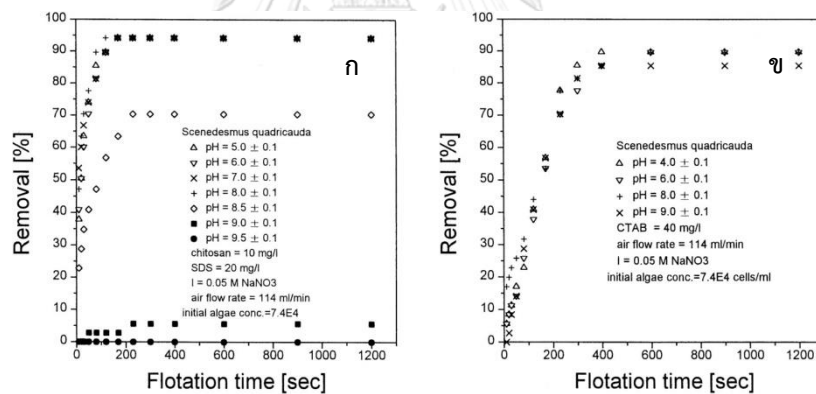
Kwon และคณะ (2014) ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกสาหร่าย *Tetraselmis sp.* KCTC12236BP ด้วยกระบวนการฟลอคคูเลชันร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยสารเคมีที่ใช้ คือ อะลูมิเนียมซัลเฟต เพอร์ริคซัลเฟต และโคโคซาน พบว่า การเติมสารเคมีความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 1.2 0.7 และ 4.0 กรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 5.84 5.98 และ 7.22 ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่าย เท่ากับ 84 89 และ 95% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การเติมสารเคมีที่เป็นสารอินทรีย์อาจก่อให้เกิดปัญหา เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสาเหตุของโรคอัลไซเมอร์และเพอร์ริคซัลเฟตเป็นสารกัดกร่อน ซึ่งอาจไม่เหมาะสมในกรณีที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระดับนำร่อง (Pilot scale) ในขณะที่การใช้โคโคซานซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ทำให้ค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีราคาถูก ซึ่งเหมาะสมในการนำสาหร่ายที่แยกออกมาไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยผลจากการเติมสารที่มีประจุบวกทำให้ประจุผิวของสาหร่ายจากเดิมที่มีประจุลบ มีความเป็นกลางและเกิดการรวมตัวกัน ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายด้วยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen, Liu และ Ju (1998) ที่พบว่าการใช้ตัวดักจับประจุบวกร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวดักจับชนิดอื่น ๆ โดยทำการศึกษาการแยกสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus quadricauda* จากน้ำด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการใช้สารเคมีคือ ตัวดักจับ (Collector) 3 ชนิด ได้แก่ ประจุบวก *N-Cetyl-N-N-N-trimethylammonium bromide* (CTAB) ประจุลบ *Sodium dodecylsulfate* (SDS) และไม่มีประจุ Triton X-100 ในสภาวะที่ค่าพีเอช เท่ากับ 8 พบว่า ตัวดักจับไม่มีประจุ สามารถกำจัดสาหร่ายได้ต่ำมาก (น้อยกว่า 10%) และตัวดักจับประจุลบก็กำจัดสาหร่ายได้ค่อนข้างต่ำเช่นกัน ในขณะที่ตัวดักจับประจุบวกสามารถกำจัดสาหร่ายได้ถึง 90% ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 2-15 เนื่องจากออรอนของตัวดักจับถูกดูดซับบริเวณผิวระหว่างอากาศและของเหลว (Air/liquid interface) ความคงตัวของฟองอากาศจึงเพิ่มขึ้น เมื่อสัมผัสกับผิวของของแข็ง ทำให้อนุภาคของแข็งมีความชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อแรงระหว่างประจุ (Electrostatic interactions) ดังนั้น แรงระหว่างประจุมิบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของตัวดักจับ ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการแยกสาหร่ายด้วยการทำให้ลอย และในการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย (รูปที่ 2-16) ในการใช้ SDS 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และ โคโคซาน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5-8 ประสิทธิภาพการกำจัด

สาหร่ายสูงถึง 95% เนื่องจาก ในสภาวะที่พีเอชน้อยกว่า 8 เมื่อพิจารณาจากซีตาโพเทนเชียล พบว่า บริเวณผิวของสาหร่ายมีประจุเป็นบวกและเมื่อพีเอชมากกว่า 8 บริเวณผิวของสาหร่ายมีประจุลบ ทำให้เมื่อใช้ตัวดักจับประจุลบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจึงลดลง ในขณะที่เดียวกันการใช้ CTAB 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4-9 ทำให้กำจัดสาหร่ายได้ 85-90%



รูปที่ 2-15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายระหว่างตัวดักจับแต่ละชนิด

(ก) Triton X-100 (ข) SDS และ (ค) CTAB



รูปที่ 2-16 ผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายในการใช้

(ก) ตัวดักจับประจุลบ (ข) ตัวดักจับประจุบวก

Gu (2017) ทำการศึกษาการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศ ละลายในการบำบัดน้ำปนเปื้อนสาหร่ายซึ่งประกอบไปด้วยสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella sp.* CPCC522, *Merismopedia sp.* CPCC711, *Aulacoseira granolata* CPCC397 และ *Microcystis aeruginosa* CPCC633 โดยใช้โคแอกกูแลนต์ คือ เฟอร์ริกซัลเฟต โพลีเฟอร์ริกซัลเฟต สารส้ม และ โพลีอะลูมินัมคลอไรด์ พบว่าโคแอกกูแลนต์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารส้ม (Alum base coagulant) ซึ่งก็คือสารส้มและโพลีอะลูมินัมคลอไรด์ มีประสิทธิภาพสูงกว่าโคแอกกูแลนต์ที่มี

องค์ประกอบหลักเป็นเหล็ก (Ferric base coagulant) และมีความต้องการปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่น้อยกว่า และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น พบว่า โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือ สารส้ม โพลีเฟอร์ริคซัลเฟต และเฟอร์ริคซัลเฟต ตามลำดับ โดยในการศึกษาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์จะต้องใช้ในปริมาณที่มากกว่าโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการแยกเท่ากัน

Besson และ Guiraud (2013) ศึกษาการเพิ่มพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์ *Dunaliella salina* และแยกออกจากน้ำด้วยกระบวนการทำให้ลอย ในการทดสอบเบื้องต้นโดยไม่มีการปรับพีเอชด้วยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ กระบวนการทำให้ลอยจะไม่สามารถแยกสาหร่ายได้ ในขณะที่เมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายของกระบวนการทำให้ลอยเพิ่มมากขึ้นและสูงสุดถึง 90% โดยจากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของพีเอชนอกจากจะทำให้สาหร่ายรวมตัวกันเกิดเป็นฟล็อกได้ ยังส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์อีกด้วย

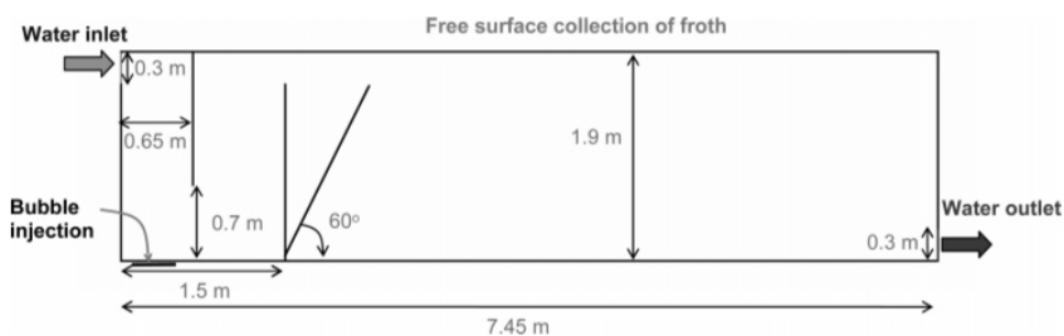
จากผลการศึกษาของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งทำการศึกษาเกี่ยวกับการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสรุปในตารางที่ 2-5 พบว่า ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่ายควรใช้สารโคแอกกูแลนต์ที่มีประจุบวก อีกทั้ง สาหร่ายแต่ละชนิดต้องการสภาวะในการทำลายเสถียรภาพที่แตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นค่าพีเอช ชนิด และปริมาณของโคแอกกูแลนต์ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

ตารางที่ 2-5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแยกสาหร่ายโดยการทำให้เสียสภาพของอนุภาคร่วมกับกระบวนการที่ปล่อยด้วยอากาศละลาย

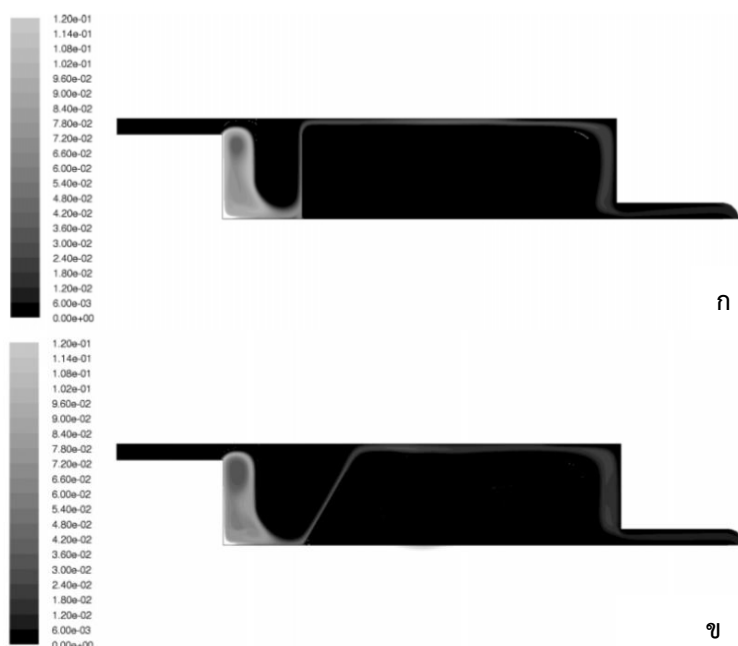
สาหร่าย	ทีเอช	โคแอกกูแลนต์	ปริมาณโคแอกกูแลนต์ (กรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการแยก (%)	อ้างอิง
<i>Tetraselmis</i> sp. KCTC12236BP	5.84	Al ₂ (SO ₄) ₃	1.2	84	Kwon et al. (2014)
	5.98	Fe ₂ (SO ₄) ₃	0.7	89	
	7.22	Chitosan	4	95	
Mixed species					
<i>Chlorella</i> sp. CPCC522		Al ₂ (SO ₄) ₃	0.015	80	Gu (2017)
<i>Merismopedia</i> sp. CPCC711	6.5-7	PACl	0.012	80	
<i>Aulacoseira granalata</i> CPCC397					
<i>Microcystis aeruginosa</i> CPCC633)					
<i>Scenedesmus quadricauda</i>		CTAB	0.40	90	Chen, Liu และ Ju (1998)
	8	SDS	0.01	10	
		Triton X-100	0.01	10	
		SDS และ Chitosan	0.03	95	
<i>Dunaliella salina</i>	10	NaOH	0.35	90	Besson และ Guiraud (2013)

คำย่อ: CTAB, N-Cetyl-N-N-trimethylammonium bromide; SDS, Sodium dodecylsulfate

Kostoglou, Karapantsios และ Matis (2007) ทำการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วยการทำแบบจำลอง CFD เพื่อออกแบบถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสำหรับการบำบัดน้ำและน้ำเสียโดยภายในถังปฏิกริยามีแผ่นกั้น 2 แผ่น โดยแผ่นกั้นแรกบริเวณใกล้กับทางน้ำเข้าเพื่อควบคุมการไหลของน้ำและแผ่นกั้นที่สองซึ่งกำหนดเป็นสองแบบคือ ตั้งฉากและเอียงทำมุม 60 องศา กับบริเวณด้านล่างของถังปฏิกริยา โดยมีการเติมอากาศบริเวณมุมด้านล่างซ้ายของถังปฏิกริยา ดังแสดงในรูปที่ 2-17 จากการพิจารณาสัดส่วนปริมาตรอากาศ (Gas volume fraction) ภายในถังปฏิกริยา เมื่อกำหนดความเร็วน้ำทางเข้า (Inlet liquid velocity) 0.26 เมตรต่อวินาที ขนาดฟองอากาศ 100 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาค 3 ไมโครเมตร และอัตราการไหลอากาศ 0.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าฟองอากาศเกิดความปั่นป่วนสูงในบริเวณทางเข้าน้ำและแผ่นกั้นใกล้ทางเข้าน้ำ และมีฟองอากาศบางส่วนไหลตามกระแส น้ำ ขึ้นสู่ผิวน้ำตามแนวแผ่นกั้นที่สองไปจนถึงบริเวณทางออกน้ำ (รูปที่ 2-18) อีกทั้ง เมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคขนาด 3 และ 10 ไมโครเมตร ด้วยฟองอากาศขนาด 100 ไมโครเมตร อัตราการไหลน้ำ 0.26 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลอากาศ 0.2 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยอนุภาคที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพคือ ซีโอไลต์ (Zeolite) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคเมื่อกำหนดตำแหน่งของแผ่นกั้นให้ตั้งฉากและเอียงทำมุม 60 องศา มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 83.44 - 87.56%

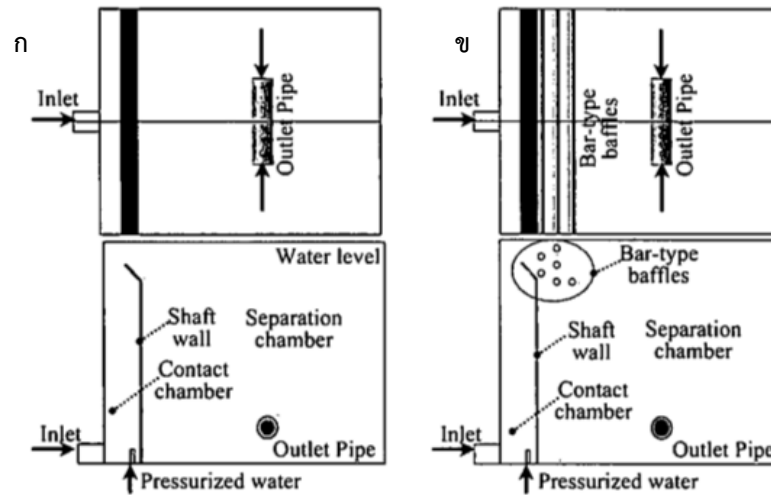


รูปที่ 2-17 รูปแบบและขนาดของถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

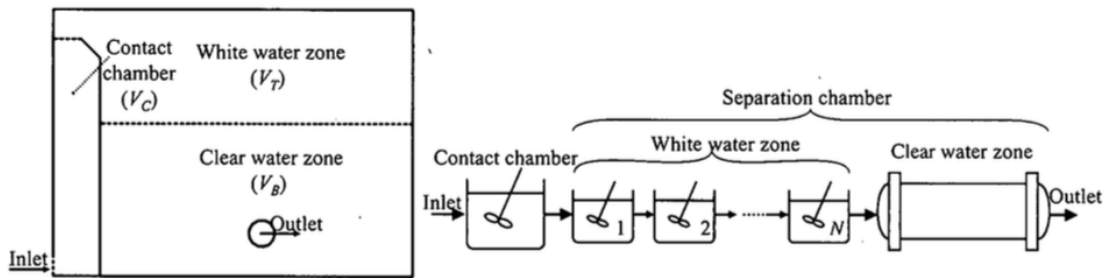


รูปที่ 2-18 แบบจำลอง CFD แสดงสัดส่วนปริมาตรอากาศภายในถังปฏิกริยาจากมากไปน้อยตาม โทนสีจากสีอ่อนไปจนถึงสีเข้ม (ก) แผ่นกั้นตั้งฉาก และ (ข) แผ่นกั้นเอียงทำมุม 60 องศา

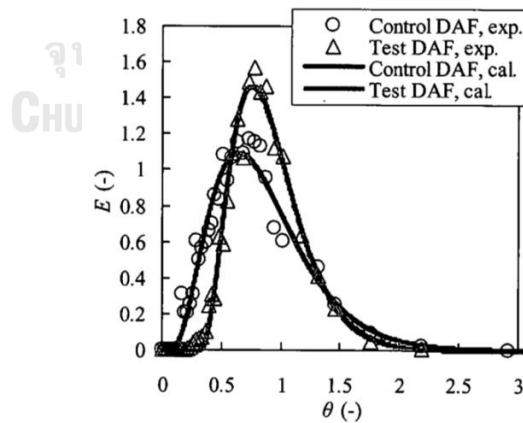
Terashima และคณะ (2013) ศึกษาการพัฒนาถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ด้วยการติดตั้งแผ่นกั้นแบบแท่ง (Bar-type baffles) ดังแสดงในรูปที่ 2-19 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของถังปฏิกริยา โดยศึกษารูปแบบการไหลจากการวิเคราะห์การกระจายเวลากักภายในถังปฏิกริยาซึ่งใช้สารละลายลิเทียมคลอไรด์เป็นสารเทรเซอร์ โดยรูปแบบและ Compartment model ของถังปฏิกริยาแสดงในรูปที่ 2-20 ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก คือ 1.) Contact chamber ส่วนที่น้ำสัมผัสกับฟองอากาศ 2.) White water zone ส่วนที่มีปริมาณฟองอากาศมากและน้ำมีการไหลแบบปั่นป่วน และ 3.) Clear water zone ส่วนที่มีอากาศเป็นองค์ประกอบค่อนข้างน้อย การไหลของน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ โดยในส่วนของ Contact chamber และ White water zone มีรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ และ Clear water zone เป็นการไหลในถังปฏิกริยาแบบท่อ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เทรเซอร์ (รูปที่ 2-21) และคำนวณระยะเวลาที่เมื่อตรวจวัดปริมาณเทรเซอร์ได้ 10% (θ_{10}) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงการเกิดการไหลลัดภายในถังปฏิกริยา เมื่อค่า θ_{10} สูง แสดงว่าเกิดการไหลลัดต่ำ โดยจากการศึกษาพบว่าเมื่อมีการติดตั้งแผ่นกั้นแบบแท่งบริเวณด้านบนของ Contact chamber ทำให้ค่า θ_{10} เพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 0.54 แสดงว่าเกิดการไหลลัดน้อยลงและส่งผลให้ประสิทธิภาพแยกของแข็งแขวนลอยของถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้นจาก 97 เป็น 99%



รูปที่ 2-19 รูปแบบของถังปฏิบัติการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย
 (ก) ไม่มีการติดตั้งแผ่นกั้นแบบแท่ง (ข) ติดตั้งแผ่นกั้นแบบแท่ง (Bar-type baffles)



รูปที่ 2-20 การแบ่งโซนการไหลภายในถังปฏิบัติการและ Compartment model ของถังปฏิบัติการ



รูปที่ 2-21 ผลการวิเคราะห์เทอร์เซอร์ที่เวลาต่าง ๆ ของถังปฏิบัติการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี แผนการทดลอง และวิธีการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วย การเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่าย การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย การออกแบบถังปฏิริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF tank) ด้วยหลักการ RTD การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิริยาด้วยโปรแกรม CFD และการเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสำหรับแยกสาหร่าย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

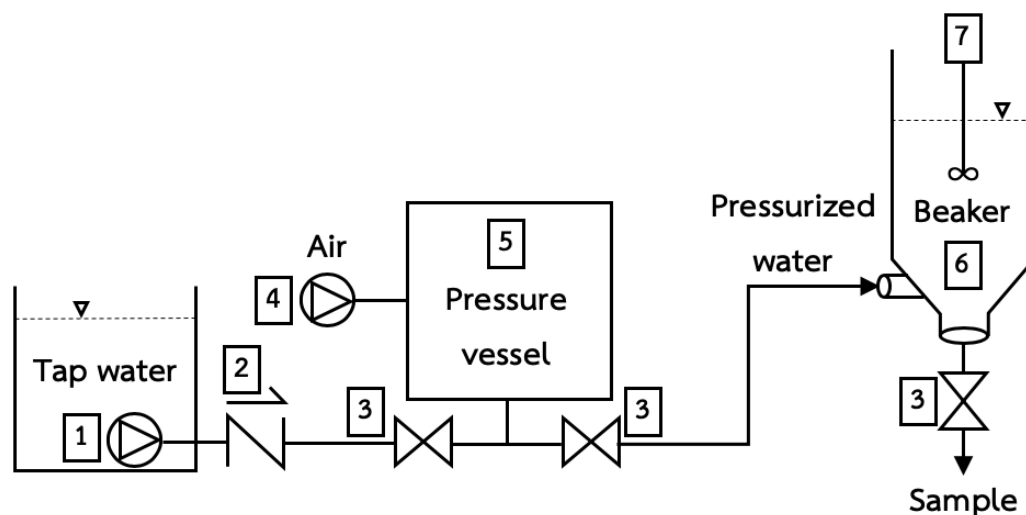
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

3.1.1.1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (Flottatest device)

- 1.) เครื่องสูบน้ำ (Water pump)
- 2.) เช็ควาล์ว (Check valve)
- 3.) เกจวาล์ว (Gate valve)
- 4.) เครื่องสูบอากาศ (Air compressor)
- 5.) ถังอัดความดัน (Pressure vessel)
- 6.) ปีกเกอร์ทรงกระบอกที่สามารถเติมอากาศจากด้านข้างและมีทางออกน้ำสำหรับเก็บตัวอย่างบริเวณด้านล่างของปีกเกอร์
- 7.) เครื่องกวนสาร (Overhead stirrers)

การเดินระบบชุดอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว ใช้เครื่องกวนสารในการกวนสารโคแอกกูแลนท์ เพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน จากนั้นสูบน้ำประปาเข้าสู่ถังอัดความดัน และเติมอากาศเข้าสู่ถังอัดความดันด้วยเครื่องสูบอากาศ ซึ่งทำให้ความดันภายในถังอัดความดันสูงขึ้น ส่งผลให้อากาศละลายในน้ำได้มากขึ้นและปล่อยน้ำอัดความดันเข้าสู่ด้านข้างของปีกเกอร์ทรงกระบอกที่บริเวณด้านล่างซึ่งเป็นทรงกรวย เมื่อน้ำอัดความดันเข้าสู่ปีกเกอร์ทำให้ความดันเปลี่ยนแปลงจากความดันสูงสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อากาศที่ละลายอยู่เกิดจุดอิมัลชันแยกออกจากน้ำในรูปแบบ

ฟองอากาศขนาดเล็ก ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จะจับอนุภาคสาหร่ายในบีกเกอร์และพาลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ โดยบริเวณด้านล่างของบีกเกอร์จะมีวาล์วเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3-1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (Flottatest device)

3.1.1.2 ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

1.) เครื่องสูบน้ำชนิดจุ่มใต้น้ำ (Submersible pump)

2.) เกจวาล์ว

3.) เกจวัดความดัน (Pressure gauge) มหาวิทยาลัย

4.) อุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ (Static mixer) UNIVERSITY

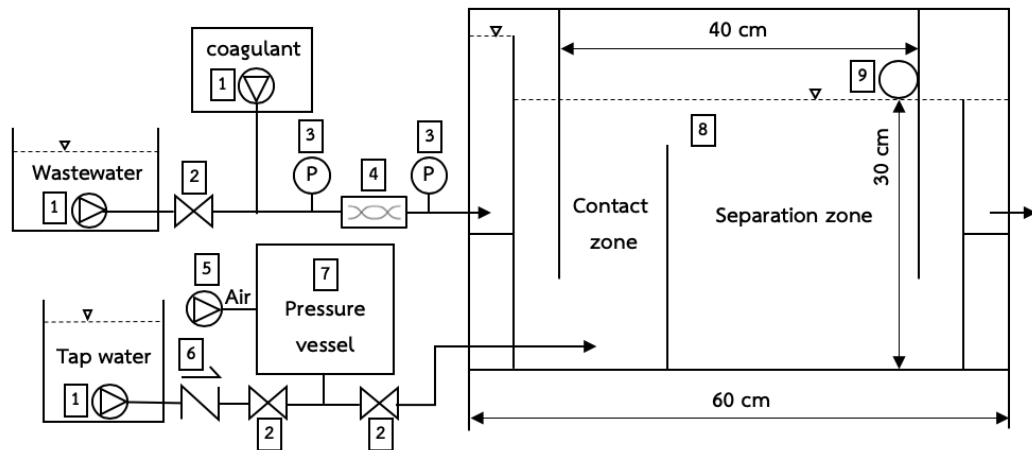
5.) เครื่องสูบอากาศ

6.) เช็ควาล์ว

7.) ถังอัดความดัน

8.) ถังปฏิกิริยา (DAF tank)

9.) ฝายน้ำล้น (Weir)



รูปที่ 3-2 ชุดอุปกรณ์ร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

การเดินระบบชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยสูบน้ำประปาเข้าสู่ถังอัดความดัน จากนั้น เติมอากาศเข้าสู่ถังอัดความดันด้วยเครื่องสูบน้ำอากาศ ซึ่งทำให้ความดันภายในถังอัดความดันสูงขึ้น ส่งผลให้อากาศละลายในน้ำได้มากขึ้น จากนั้นสูบน้ำสังเคราะห์สาหร่ายและผสมกับโคแอกกูแลนต์ผ่านอุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อซึ่งทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน จากนั้น น้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพแล้วจะไหลเข้าสู่ถังปฏิกรณ์และสัมผัสกับน้ำอัดความดันบริเวณโซนสัมผัส (Contact zone) ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงความดันของน้ำที่ความดันสูงสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กที่จะพาอนุภาคสาหร่ายลอยขึ้นสู่ผิวน้ำและเข้าสู่ส่วนแยกตะกอน (Separation zone) ก่อนจะไหลออกผ่านฝายน้ำล้นที่ติดอยู่บริเวณผิวน้ำ ส่วนน้ำใสจะลอดผ่านแผ่นกั้นและไหลออกจากระบบ

3.1.1.3 อุปกรณ์การวัดการกระจายเวลากักในถังปฏิกรณ์ (Residence time distribution, RTD)

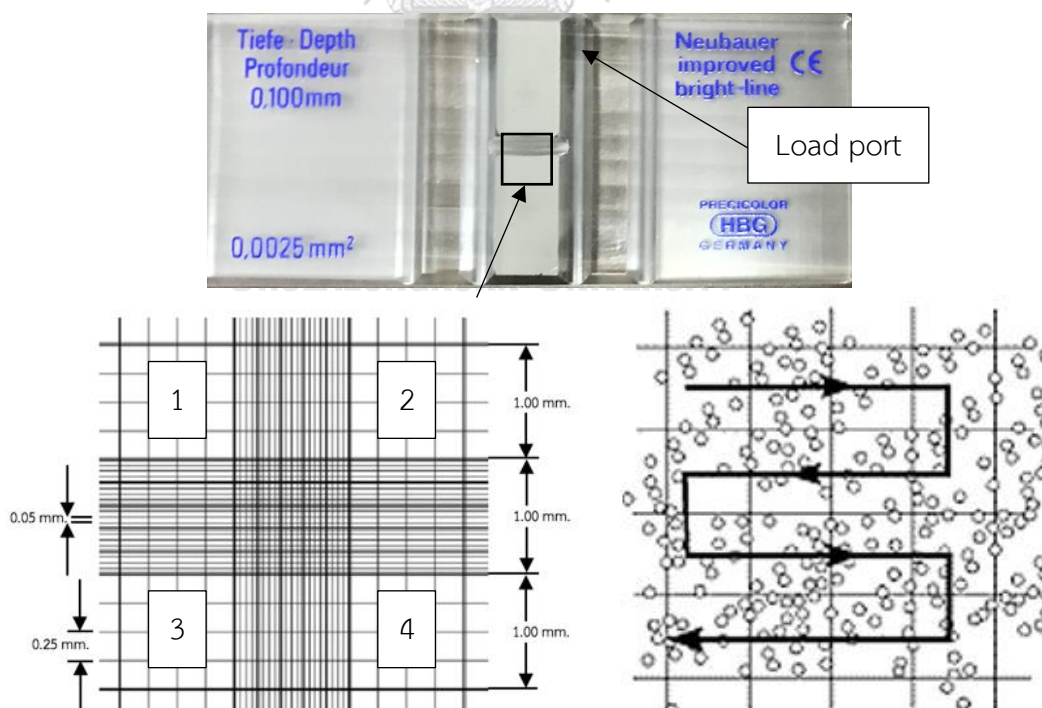
- 1.) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
- 2.) เข็มฉีดยา (Syringe)

3.1.1.4 อุปกรณ์เตรียมน้ำสังเคราะห์สำหรับ

- 1.) ขวดพลาสติกโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PET) ปริมาตร 6 ลิตร
- 2.) เครื่องสูบอากาศ
- 3.) ตัวกรองเมมเบรน
- 4.) สายยาง ข้อต่อ และหัวปรับอัตราการไหลที่ใช้ในการเติมอากาศ
- 5.) หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์
- 6.) หม้อน้ำแช่แข็ง

3.1.1.5 อุปกรณ์นับจำนวนเซลล์สำหรับ

- 1.) Haemocytometer counting chamber (รูปที่ 3-3)
- 2.) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)
- 3.) กล้องถ่ายภาพ NIKON D5100
- 4.) ไมโครปิเปต ขนาด 200 ไมโครลิตร
- 5.) กระจกปิดสไลด์ (Cover glass)



รูปที่ 3-3 Haemocytometer counting chamber

การนับเซลล์สาหร่ายด้วย Haemocytometer counting chamber โดยใช้ไมโครปิเปตหยดน้ำตัวอย่างลงในช่องใส่ตัวอย่าง (Load port) ของสไลด์ Haemocytometer counting chamber ที่มีกระจกปิดสไลด์ปิดอยู่ น้ำตัวอย่างจะกระจายไปทั่วตารางบนสไลด์ ซึ่งเป็นตารางที่มีทั้งหมด 250 ช่อง แต่ละช่องมีพื้นที่ 0.0025 ตารางมิลลิเมตร และมีความลึก 0.1 มิลลิเมตร จากนั้น วางสไลด์ทิ้งไว้ 1 นาที เพื่อให้สาหร่ายตกตะกอนลงสู่บริเวณพื้นสไลด์ แล้วจึงนำสไลด์ไปนับเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 100 เท่า โดยนับจำนวนสาหร่ายในช่องที่ 1 2 3 และ 4 (รูปที่ 3-3) และคำนวณเพื่อหาความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายในหน่วยเซลล์ต่อมิลลิลิตร จากสมการที่ 3-1

$$C = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + N_4}{4} \times 10^4 \quad (3-1)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่าย (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)

N = จำนวนสาหร่ายในแต่ละช่อง (เซลล์)

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 น้ำสังเคราะห์สาหร่าย

งานวิจัยนี้ ใช้สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทีส (*Microcystis aeruginosa*) โดยทำการเพาะเลี้ยงจากหัวเชื้อสาหร่ายสายพันธุ์ *Microcystis aeruginosa* TISTR 8305 ที่สั่งซื้อจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) และใช้อาหารเลี้ยงสาหร่ายสูตร MA (ตารางที่ 3-1) ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย

ตารางที่ 3-1 สูตรอาหารเลี้ยงสาหร่าย MA

สารเคมี	ปริมาณ (กรัมต่อลิตร)
KNO_3	0.10
NaNO_3	0.05
Na_2SO_4	0.04
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.05
$\beta\text{-Na}_2\text{glycerophosphate} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.10
$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.005
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.0005
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.005
ZnCl_2	0.0005
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.005
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.0008
H_3BO_3	0.02
Bicine	0.50

3.1.2.2 น้ำดิบบที่มีการบลูมของสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส

น้ำดิบจริงจากสระมรกตที่มีการบลูมของสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส เพื่อใช้ในการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย เนื่องจากได้ทำการทดลองเก็บตัวอย่างน้ำจากจุดสูบที่ระดับความลึก 3 และ 18 เมตร พบว่า ความเข้มข้นของสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิสใกล้เคียงกันประมาณ 10^3 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ดังนั้นจึงไม่สามารถแก้ปัญหาการปนเปื้อนของสาหร่ายที่เข้าสู่กระบวนการผลิตด้วยการเพิ่มความลึกในการสูบน้ำได้และมีความจำเป็นในการหาระบบบำบัดที่เหมาะสม

3.1.2.3 สารโคแอกกูแลนต์

- 1.) สารส้ม (Alum)
- 2.) โพลีอะลูมินัมคลอไรด์ (PACl)

3.1.2.4 สารปรับพีเอช

- 1.) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl)
- 2.) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

3.1.2.5 สารเทอร์เซอร์

- 1.) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl)

3.2 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงแผนการทดลองในรูปที่ 3-4 โดยมีการทดลองทั้งหมด 6 ส่วน ดังนี้

การทดลองที่ 1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส (*Microcystis aeruginosa*) ศึกษาลักษณะสมบัติและอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย เพื่อใช้เป็นตัวแทนอนุภาคสาหร่ายในการทดลองต่อไป

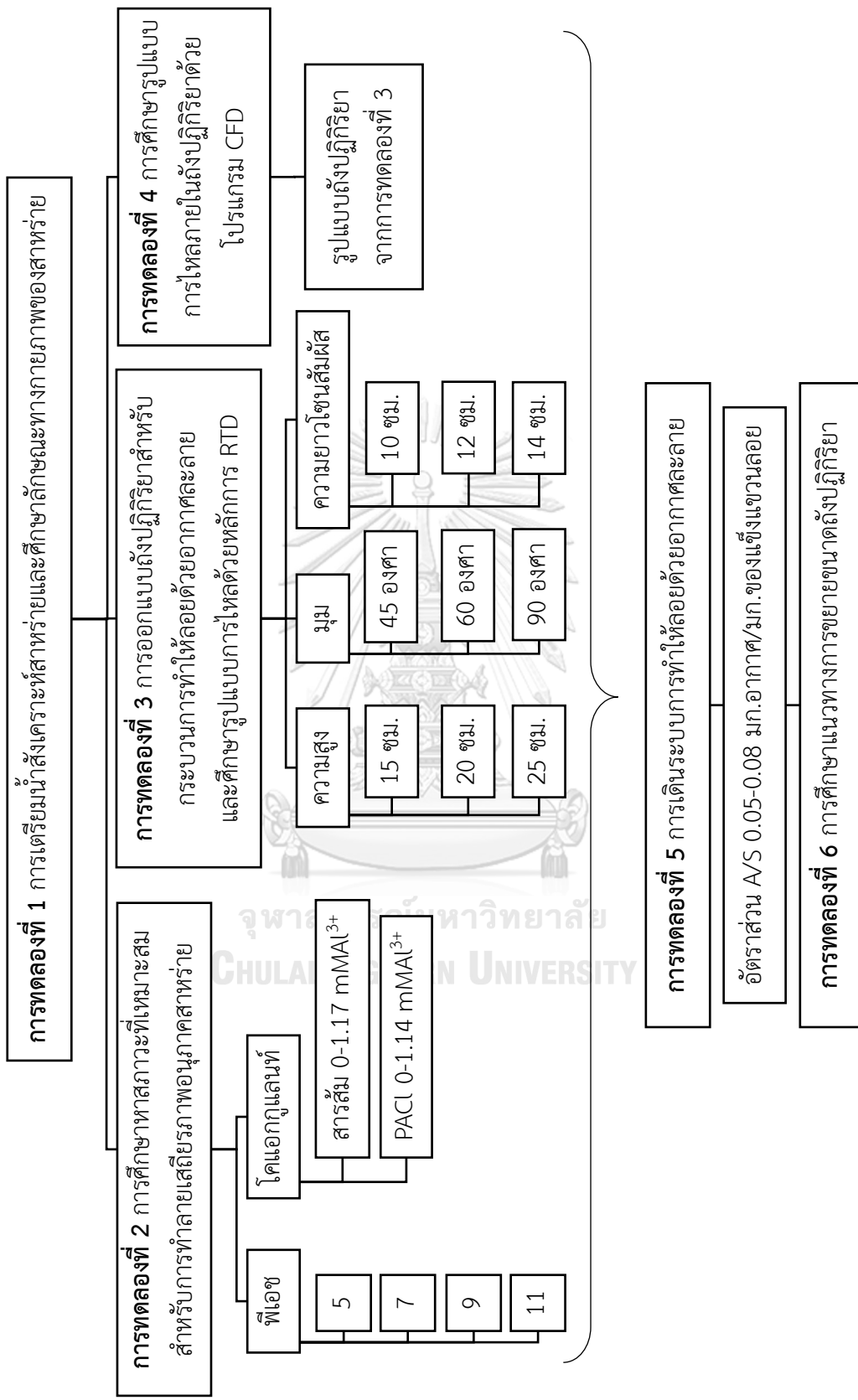
การทดลองที่ 2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิสที่ความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Flottatest) โดยศึกษาผลของพีเอช ปริมาณและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย เพื่อนำไปใช้ในการเดินระบบในการทดลองที่ 5 พิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยการวัดค่า A_{680} และค่าความขุ่น

การทดลองที่ 3 การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF tank) โดยการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์เมื่อเปลี่ยนความยาวของโซนสัมผัสเท่ากับ 10 12 และ 14 เซนติเมตร ความสูงของแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัสและโซนแยกภายในถังปฏิกรณ์ เท่ากับ 15 20 และ 25 เซนติเมตร และมุมของแผ่นกั้นในแนวระนาบ เท่ากับ 45 60 และ 90 องศา โดยใช้หลักการ RTD ทำการทดลองแบบจ่ายครั้งเดียว (Pulse input experiment) ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 250 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เป็นสารเทอร์เซอร์บันทึกค่าการนำไฟฟ้าทุก 5 วินาที ด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) จนค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับค่าเริ่มต้น เพื่อหาระยะเวลากักเฉลี่ยที่แท้จริง (Mean residence time) ของถังปฏิกรณ์

การทดลองที่ 4 การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม CFD เพื่อสอบเทียบกับการศึกษารูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD โดยเลือกรูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 และพิจารณารูปแบบถังปฏิกรณ์จากแนวทางการไหลของน้ำ ความเร็วเกรเดียนท์ และสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในถังปฏิกรณ์ (Volume fraction of air in DAF tank)

การทดลองที่ 5 การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายและรูปแบบถังปฏิกรณ์จากการทดลองข้างต้น ทำการทดลองที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง (Air to Solid ratio, A/S) ต่าง ๆ จากนั้นวัดค่า A_{680} และความขุ่นของน้ำที่ผ่านระบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันภายในเส้นท่อร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

การทดลองที่ 6 การศึกษาแนวทางการขยายขนาด (Scale-up) ถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้รูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 และ 4 เพื่อเป็นแนวทางในการนำถังปฏิกรณ์ไปใช้งาน เมื่ออัตราการไหลน้ำสังเคราะห์สาหร่าย 35 ลิตรต่อนาที ทำการศึกษารูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์ขนาด 350 ลิตร ด้วยโปรแกรม CFD และพิจารณารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์จากแนวทางการไหลของน้ำ ความเร็วเกรเดียนท์ และสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในถังปฏิกรณ์



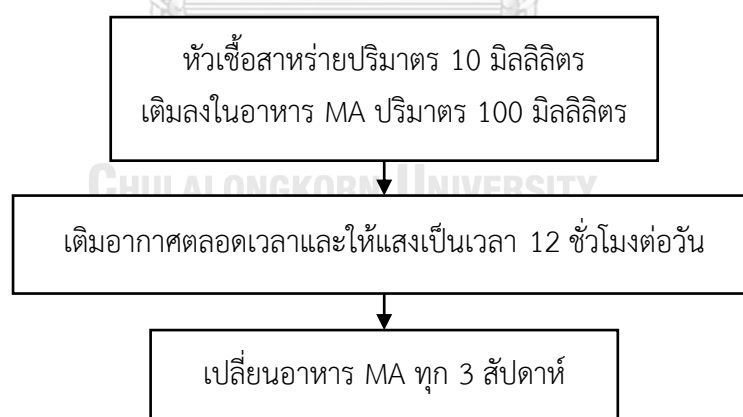
รูปที่ 3-4 แผนการทดลอง

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายและศึกษาลักษณะสมบัติของสาหร่าย

3.3.1.1 การเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่าย

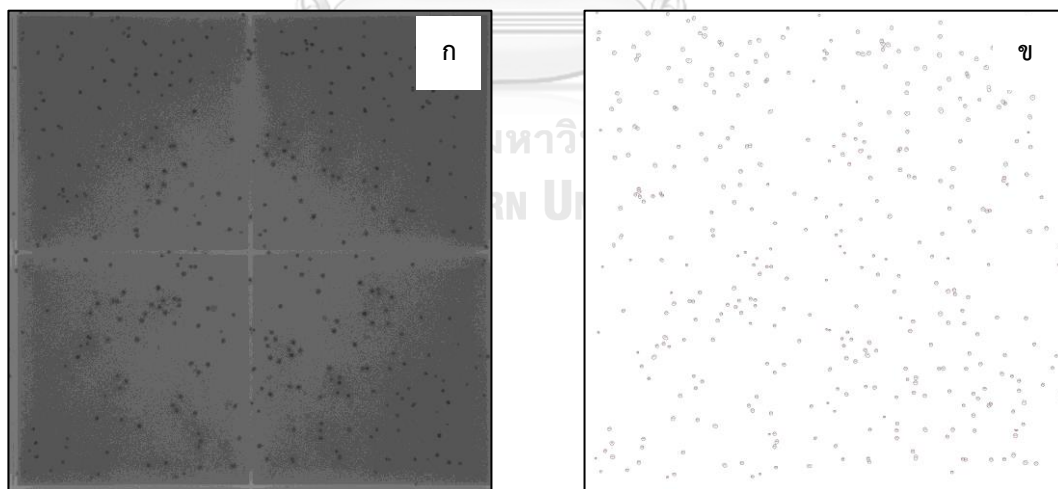
งานวิจัยนี้ใช้สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิสเป็นตัวแทนอนุภาคสาหร่ายในการเตรียมน้ำสังเคราะห์ โดยทำการเพาะเลี้ยงจากหัวเชื้อสาหร่ายสายพันธุ์ *Microcystis aeruginosa* TISTR 8305 ที่สั่งซื้อจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ทำการเพาะเลี้ยงในระบบปิด และใช้อาหารเลี้ยงสาหร่ายสูตร MA ซึ่งเป็นอาหารสำหรับเลี้ยงสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส (ตารางที่ 3-1) อาหารเลี้ยงสาหร่ายที่นำมาใช้จะต้องผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ที่ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที โดยใช้หัวเชื้อสาหร่ายปริมาณ 10 มิลลิลิตร เติมนลงในอาหาร MA ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เพื่อให้สาหร่ายเกิดการแบ่งเซลล์และเพิ่มจำนวน โดยสาหร่ายจะได้รับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นเวลา 12 ชั่วโมงต่อวัน เติมอากาศสะอาดที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน และทำการเปลี่ยนอาหารเลี้ยงสาหร่าย 3 สัปดาห์ สรุปรูปวิธีการเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่าย แสดงในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 ขั้นตอนการเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่าย

3.3.1.2 การศึกษาลักษณะสมบัติและอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของสาหร่ายโดยศึกษาซีตาโพเทนเชียลของสาหร่ายด้วยเครื่องวัดซีตาโพเทนเชียล (Zetasizer) ขนาดของเซลล์สาหร่ายด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Laser particle size distribution analyzer) และรูปร่างของเซลล์สาหร่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง วัดกราฟแสดงการเจริญเติบโต (Growth curve) ของสาหร่ายด้วยการวัดความเข้มข้นของสาหร่ายทุกวัน นาน 56 วัน โดยใช้ Haemocytometer counting chamber และโปรแกรมคอมพิวเตอร์อิมเมจเจ (ImageJ) ในการวิเคราะห์จำนวนสาหร่ายจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงในรูปที่ 3-6 ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่ายจากการนับจำนวนเซลล์ด้วย Haemocytometer counting chamber กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (OD_{680}) ที่วัดด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-vis spectrophotometer) เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ที่ใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายจากการวัดค่า OD_{680} และวัดค่าความขุ่นของสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเครื่องวัดความขุ่น (Turbidity meter)



รูปที่ 3-6 การวิเคราะห์จำนวนสาหร่ายจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์และใช้โปรแกรม ImageJ

(ก) สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิสจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) การนับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วยโปรแกรม ImageJ

3.3.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย

การทดสอบด้วยกระบวนการทำให้ลอย ในอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (Flottatest device) ปรับสภาวะตามการทดลอง กวนด้วยความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที นาน 1 นาที จากนั้นเติมน้ำอัดความดัน (Pressurized water) ที่ความดัน 4 บาร์ และควบคุมอัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง เท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมอากาศต่อมิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย ปล่อยให้เกิดการแยกนาน 3 นาที จากนั้น ทำการเก็บตัวอย่างบริเวณด้านล่างปิเกตอร์ เพื่อนำไปนับจำนวนเซลล์สาหร่ายและวัดความขุ่น พิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากการลดลงของความเข้มข้นสาหร่าย

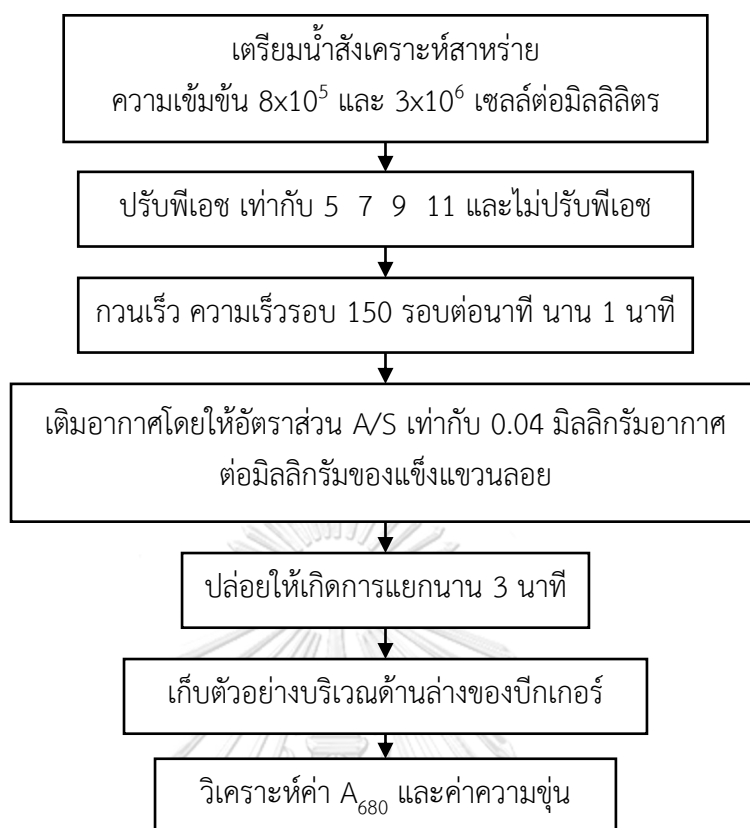
3.3.2.1 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยการปรับพีเอช

การทดสอบหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพสาหร่าย โดยค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลอง คือ 5 7 9 11 และไม่ปรับค่าพีเอช และใช้ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์สาหร่าย 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร สรุปรูปตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาในตารางที่ 3-2 และวิธีการศึกษาค่าพีเอชของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย แสดงในรูปที่ 3-7

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรการศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยการปรับพีเอช

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์สาหร่าย	8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร
ค่าพีเอชของน้ำสังเคราะห์สาหร่าย	5 7 9 11 และไม่ปรับค่าพีเอช
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ความเข้มข้นของสาหร่าย	นับจำนวนสาหร่ายด้วย Haemocytometer counting chamber
ความขุ่น	เครื่องวัดความขุ่น
ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย (%)	$\frac{C_0 - C}{C_0} \times 100$ *
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
ความดัน	4 บาร์
อัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง	0.04 มิลลิกรัมอากาศต่อมิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย

* C_0 คือ ความเข้มข้นของสาหร่ายเริ่มต้นและ C คือ ความเข้มข้นของสาหร่ายที่เหลืออยู่ในน้ำ



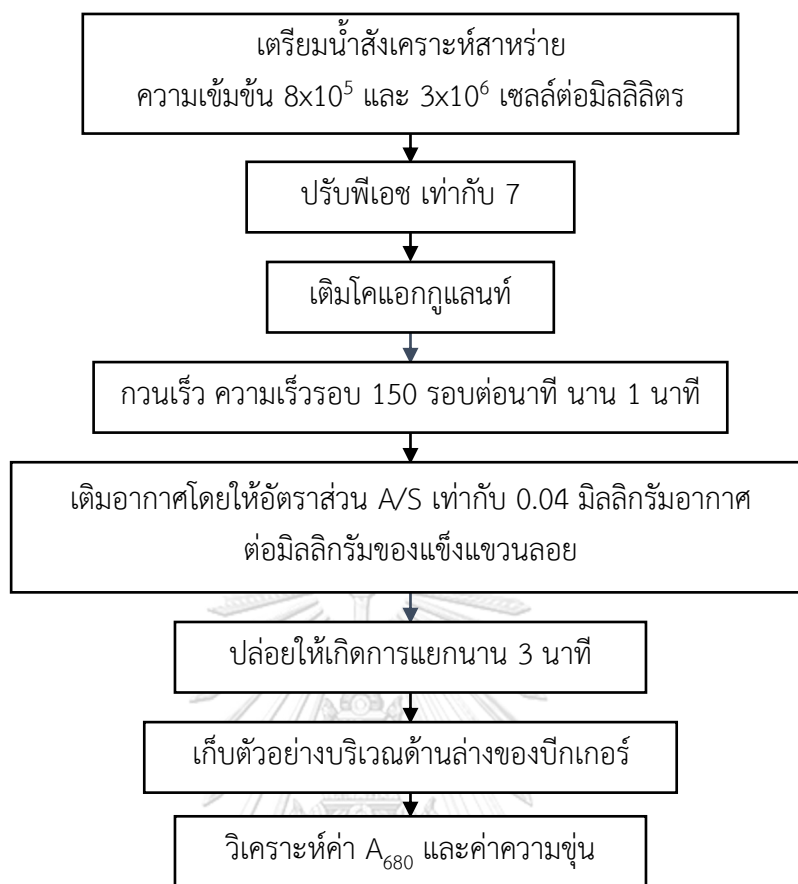
รูปที่ 3-7 ขั้นตอนการศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยการปรับพีเอช

3.3.2.2 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การหาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม โคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ สารส้มความเข้มข้น 0 – 1.17 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม และ PACl ที่ความเข้มข้น 0 – 1.14 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม สรุปตัวแปรในการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์แสดงในตารางที่ 3-3 และวิธีการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพสาหร่าย แสดงในรูปที่ 3-8

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสำหรับด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

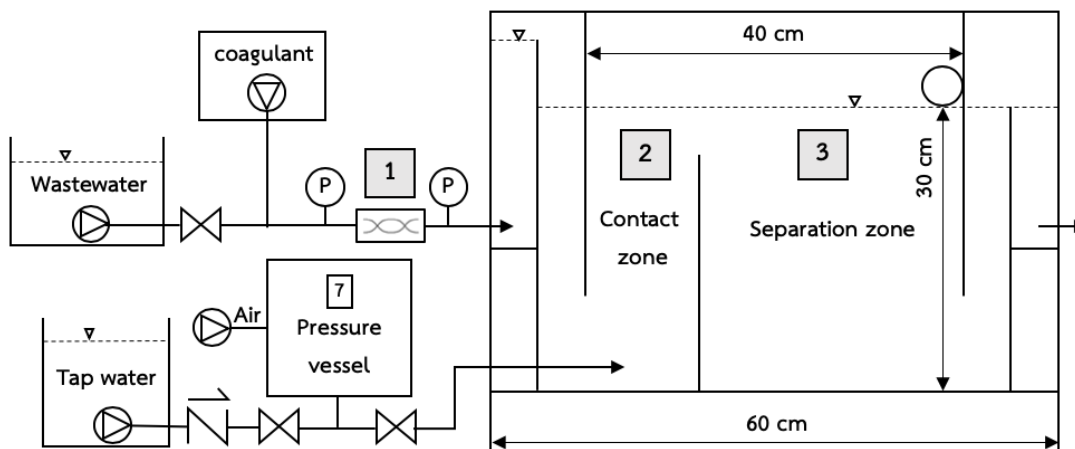
ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์สำหรับชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์	8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร
1.) สารส้ม	0 ถึง 1.17 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม
2.) PACl	0 ถึง 1.14 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ความเข้มข้นของสารสำหรับ	เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง
ความขุ่น	เครื่องวัดความขุ่น
ประสิทธิภาพการกำจัดสารสำหรับ (%)	$\frac{C_0 - C}{C_0} \times 100$
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
ค่าพีเอชของน้ำสังเคราะห์สำหรับ	7
ความดัน	4 บาร์
อัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง	0.04 มิลลิกรัมอากาศต่อมิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย



รูปที่ 3-8 ขั้นตอนการศึกษานิตและความเข้มข้นของสารโคแออกูแลนซ์

3.3.3 การออกแบบถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและศึกษารูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD

ระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ (1) ส่วนกระบวนการโคแออกูแลนซ์ เพื่อทำลายเสถียรภาพของสารร้าย (2) โซนสัมผัส (Contact zone) โดยการเติมอากาศละลายเพื่อสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก (30-100 ไมครอน) และ (3) โซนแยก (Separation zone) เพื่อให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นสัมผัสกับอนุภาคสารร้ายที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว และพาอนุภาคสารร้ายลอยแยกออกจากเฟสของน้ำ



รูปที่ 3-9 ระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

แนวทางการเดินระบบ คือ สูบน้ำสังเคราะห์สำหรับผสมกับโคแอกกูแลนต์ภายในอุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อซึ่งทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน จากนั้นน้ำสังเคราะห์ที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพแล้วจะไหลเข้าสู่ปฏิกิริยา ไหลเข้าสู่โซนสัมผัส โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะพาอนุภาคสารลอยขึ้นสู่ผิวน้ำและเข้าสู่ส่วนแยกตะกอนก่อนจะไหลออกผ่านฝายน้ำล้นที่ติดอยู่บริเวณผิวน้ำ ส่วนน้ำใสจะลอดผ่านแผ่นกั้นและไหลออกจากระบบ โดยรูปแบบของถังลอยตะกอนด้วยอากาศละลาย (DAF tank) ปรับปรุงจาก Radzuan et al. (2016) มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากสามารถศึกษาแนวทางการไหลและสามารถติดตั้งอุปกรณ์สำหรับแยกตะกอนลอยสารได้ง่าย โดยสามารถขยายขนาด (Scale-up) เพื่อสร้างและปรับใช้งานจริงได้ง่าย อีกทั้งสะดวกในการดูแลรักษาและเดินระบบ โดยถังปฏิกิริยาที่ใช้มีขนาด $25 \times 60 \times 40$ ลูกบาศก์เซนติเมตร มีปริมาตรน้ำระหว่างเดินระบบประมาณ 40 ลิตร

รูปที่ 3-9 แสดงระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักได้แก่

1.) กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) โดยการทำให้เกิดการกวนเร็วในเส้นท่อโดยใช้อุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ (Static mixer) ทำให้เกิดความดันลด (ΔP) คำนวณหาค่าความเร็วเกรเดียนต์ (Velocity gradient, G) จากสมการที่ 3-2 ให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 300 วินาที^{-1} (มันซิลป์ ตัณกุลเวศม์, 2542) ซึ่งเป็นค่าความเร็วเกรเดียนต์ที่ทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาค

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \quad (3-2)$$

โดยที่

$$\varepsilon = \frac{\Delta P \times Q}{\rho V}$$

โดยที่ G = ความเร็วเกรเดียนท์ หรือระดับความปั่นป่วน (วินาที⁻¹)

ε = อัตราการกระจายตัวของพลังงานต่อมวล (วัตต์ต่อกิโลกรัม หรือตารางเมตรต่อวินาที³)

ν = ความหนืดจลน์ (ตารางเมตรต่อวินาที)

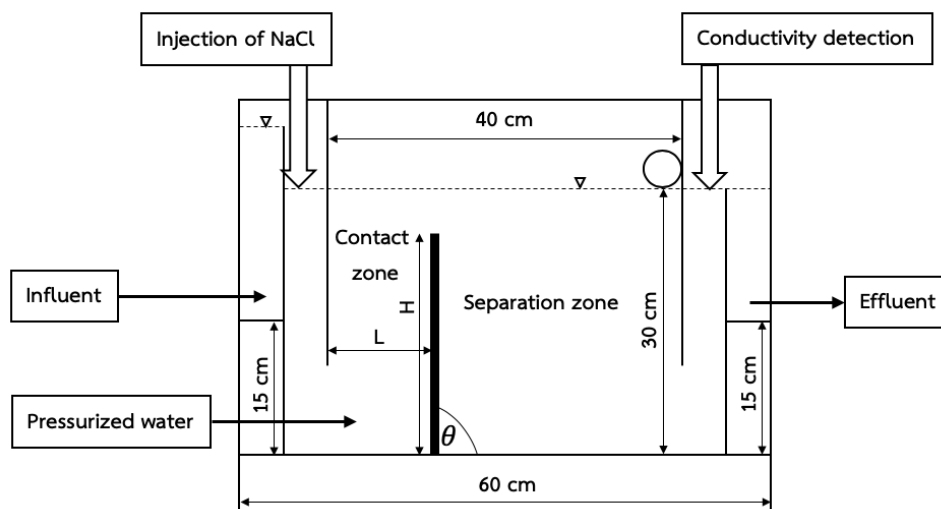
ΔP = ความดันลด (นิวตันต่อตารางเมตร)

Q = อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

V = ปริมาตรน้ำ (ลูกบาศก์เมตร)

- 2.) โซนสัมผัส (Contact zone) เพื่อสัมผัสกับฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดจากการเติมน้ำที่มีความดันสูง (Pressurized water) โดยเมื่อน้ำเข้าสู่ถังลอยตะกอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันจากความดันสูงสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว ทำให้อากาศที่ละลายอยู่เกินจุดอิ่มตัวแยกออกจากน้ำในรูปฟองอากาศขนาดเล็ก ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้จะจับอนุภาคสาหร่ายและพาลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ
- 3.) โซนแยก (Separation zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่อนุภาคสาหร่ายจะถูกแยกออกจากน้ำผ่านฝายน้ำล้นที่อยู่บริเวณผิวน้ำ ส่วนที่เป็นน้ำใสจะลอดผ่านแผ่นกั้นและไหลออกจากระบบ

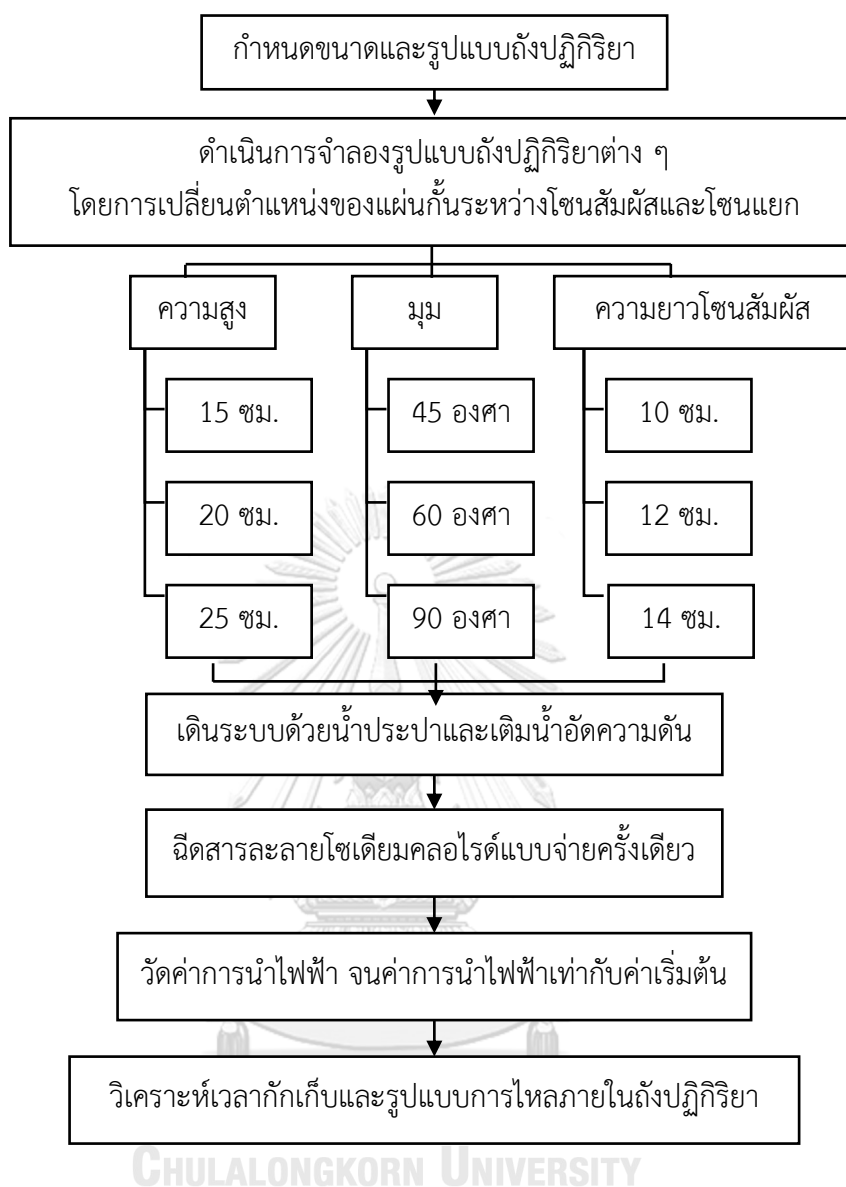


รูปที่ 3-10 ถังลอยตะกอนด้วยอากาศละลาย (DAF tank)

การออกแบบรูปแบบของถังปฏิกริยา โดยการศึกษาการกระจายเวลากักและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วยหลักการ RTD เมื่อมีการปรับรูปแบบของถังปฏิกริยาโดยการเปลี่ยนความสูงของแผ่นกั้น (Baffle) (H) เท่ากับ 15 20 และ 25 เซนติเมตร และมุมของแผ่นกั้น (θ) เท่ากับ 45 60 และ 90 องศา ซึ่งแผ่นกั้นดังกล่าวเป็นแผ่นที่อยู่ระหว่างโซนสัมผัส (Contact zone) และโซนแยก (Separation zone) การปรับเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งจึงส่งผลให้ความยาวของโซนสัมผัส (L) มีการเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ 10 12 และ 14 เซนติเมตร (รูปที่ 3-10) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 250 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เป็นสารเทรเซอร์บันทึกค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ทุก 5 วินาที ด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า จนค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับค่าเริ่มต้น เพื่อหาระยะเวลากักเก็บและรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยา สรุปตัวแปรสำหรับการศึกษา RTD ในตารางที่ 3-4 และขั้นตอนการทดลองในรูปที่ 3-11

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรการศึกษาการกระจายเวลากักและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วย
หลักการ RTD

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
รูปแบบและการติดตั้งแผ่นกั้นภายในถังปฏิกริยา	
1.) ความสูง	15 20 และ 25 เซนติเมตร
2.) มุม	45 60 และ 90 องศา
3.) ความยาวของโซนสัมผัส	10 12 และ 14 เซนติเมตร
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ค่าการนำไฟฟ้า	เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
ขนาดถังปฏิกริยา	0.25×0.60×0.40 ลูกบาศก์เมตร
ปริมาณน้ำ	40 ลิตร
ความดัน	4 บาร์
อัตราการไหลน้ำ	2.5 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลน้ำอัดความดัน	0.5 ลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นสารเทรเซอร์	250 กรัมต่อลิตร
ปริมาณสารเทรเซอร์	25 มิลลิลิตร



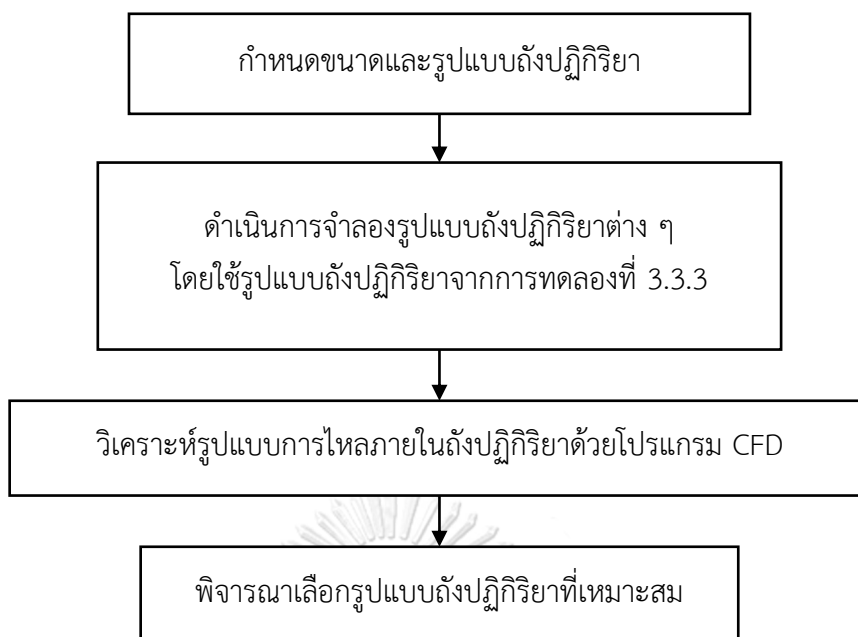
รูปที่ 3-11 ขั้นตอนการศึกษาระยะเวลาเก็บและรูปแบบการไหลภายในขั้วปฏิกิริยา
ด้วยหลักการ RTD

3.3.4 การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม CFD

การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมเพื่อสอบเทียบ (Validate) รูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์จากการศึกษาด้วยหลักการ RTD จากการทดลองที่ 3.3.3 ด้วยโปรแกรม CFD ในการทำนายพฤติกรรมของการไหลของน้ำ โดยพิจารณารูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมจากการแนวทางการไหลของน้ำ สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในถังปฏิกรณ์ (Volume fraction of air in DAF tank) การวิเคราะห์ปริมาตรอากาศแสดงถึงการกระจายตัวของอากาศภายในถังปฏิกรณ์ และความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity gradient, G) ของน้ำที่แสดงถึงการปั่นป่วนของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งรูปแบบการไหลที่เหมาะสมภายในถังปฏิกรณ์ คือโซนสัมผัสควรมีการกระจายตัวของอากาศ หรือความปั่นป่วนสูงเพื่อเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศและอนุภาคสาหร่าย ส่วนโซนแยกควรมีการกระจายตัวของอากาศต่ำ เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนภายในโซนแยกน้อย ซึ่งจะส่งผลให้สาหร่ายถูกแยกและลอยอยู่บริเวณผิวน้ำได้ ตัวแปรการออกแบบถังปฏิกรณ์การทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยใช้ CFD ในตารางที่ 3-5 และสรุปขั้นตอนการทดลองในรูปที่ 3-12

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม CFD

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
รูปแบบถังปฏิกรณ์	จากการทดลองที่ 3.3.3
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
แนวทางการไหลของน้ำ	โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)
สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในถัง	โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)
ค่าความเร็วเกรเดียนท์	โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
ขนาดถังปฏิกรณ์	0.25x0.60x0.40 ลูกบาศก์เมตร
ปริมาณน้ำ	40 ลิตร
ความดัน	4 บาร์
อัตราการไหลน้ำ	2.5 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลน้ำอัดความดัน	0.5 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 3-12 ขั้นตอนการศึกษาแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม CFD

3.3.5 การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ในการแยกสาหร่าย

ทำการเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้รูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมจากผลการศึกษา RTD และ CFD ในการทดลองที่ 3.3.3 และ 3.3.4 ตามลำดับ และเดินระบบด้วยสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่าย จากการทดลองที่ 3.3.2 และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส สรุปลักษณะที่ใช้ในการเดินระบบในตารางที่ 3-6 และวิธีการดำเนินการในรูปที่ 3-13

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรการเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์สาหร่าย	8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร
อัตราส่วนอากาศต่อของแข็ง	0.05 0.06 และ 0.08 มิลลิกรัมอากาศต่อ มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
ความเข้มข้นของสาหร่าย	นับจำนวนสาหร่ายด้วย Haemocytometer counting chamber
ความขุ่น	เครื่องวัดความขุ่น
ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย (%)	$\frac{C_0 - C}{C_0} \times 100$
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
สภาวะที่เหมาะสม	จากการทดลองที่ 3.3.2
รูปแบบถังปฏิกรณ์	จากการทดลองที่ 3.3.3 และ 3.3.4
ขนาดถังปฏิกรณ์	0.25×0.60×0.40 ลูกบาศก์เมตร
ปริมาณน้ำสังเคราะห์สาหร่าย	40 ลิตร
ความดัน	4 บาร์
อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์สาหร่าย	2.5 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลน้ำอัดความดัน	0.5 ลิตรต่อนาที



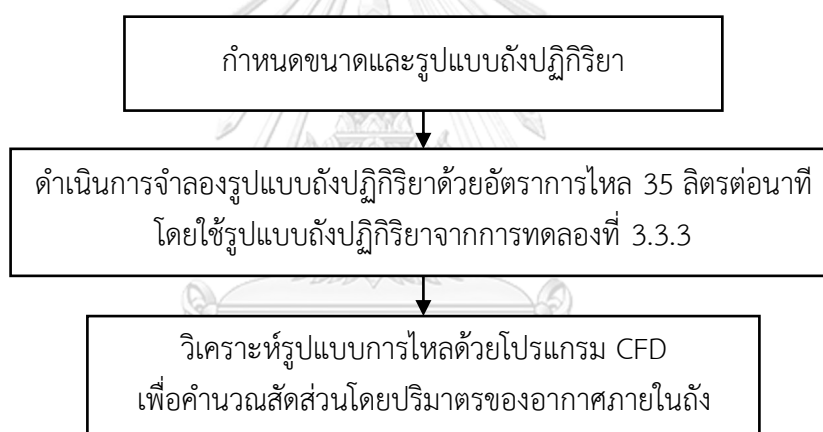
รูปที่ 3-13 การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

3.3.6 การศึกษาแนวทางการขยายขนาดถึงปฏิบัติการ

ศึกษาแนวทางการขยายขนาด (Scale-up) ถึงปฏิบัติการตามทฤษฎี Geometric scale-up โดยใช้รูปแบบถึงปฏิบัติการจากการทดลองที่ 3.3.3 และ 3.3.4 เมื่ออัตราการไหลน้ำ 26 ลิตรต่อนาที ทำการศึกษาแบบการไหลของของไหลภายในถึงปฏิบัติการขนาด 350 ลิตร ด้วยโปรแกรม CFD และพิจารณารูปแบบการไหลภายในถึงปฏิบัติการจากสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในถึงปฏิบัติการ ตัวแปรสำหรับการศึกษาการขยายขนาดถึงปฏิบัติการแสดงในตารางที่ 3-7 และสรุปขั้นตอนการศึกษาแนวทางการขยายขนาดถึงปฏิบัติการในรูปที่ 3-14

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรการศึกษาพลศาสตร์การไหลภายในรูปแบบถังปฏิกรณ์ที่ขยายขนาดด้วยหลักการ Geometric scale-up

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
ขนาดถังปฏิกรณ์	350 ลิตร
ตัวแปรตาม	วิธีการศึกษา
สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในถัง	โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
รูปแบบถังปฏิกรณ์	จากการทดลองที่ 3.3.3
ความดัน	4 บาร์
อัตราการไหลน้ำ	26 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 3-14 ขั้นตอนการศึกษาแนวทางการขยายขนาดถังปฏิกรณ์

จากการทดลองแผนการทดลองและการดำเนินการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ทราบลักษณะทางกายภาพและอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทีส สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ลักษณะของถังปฏิกรณ์และรูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์ สภาวะในการเดินระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อแยกอนุภาคสาหร่าย รวมถึงการขยายขนาดถังปฏิกรณ์ เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างและออกแบบระบบ สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การศึกษาลักษณะสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส

4.1.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของสาหร่าย

การเตรียมน้ำเลี้ยงเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิสด้วยการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการพบว่า สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิสมีรูปร่างเป็นทรงกลม ลักษณะการเจริญเติบโตเป็นเซลล์เดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 4-1 มีขนาดเซลล์ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Laser particle size distribution analyzer) ในช่วง 2.0 – 6.7 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4-2 และขนาดเฉลี่ย ($D [3,2]$) เท่ากับ 4.19 ไมครอน ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ของอนุภาคทรงกลมในเชิงพื้นที่ผิว กล่าวคือ เป็นค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเท่ากัน ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 4-1 และมีค่าซีตาโพเทนเชียล (Zeta potential, Z_p) ที่พีเอช 7 เท่ากับ -14.97 มิลลิโวลต์ โดยค่าซีตาโพเทนเชียลวัดที่พีเอช 7 เนื่องจากเป็นพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทดลองทดสอบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย สรุปลักษณะสมบัติของน้ำสาหร่ายเลี้ยงเคราะห์สายพันธุ์ไมโครซิสทิสในตารางที่ 4-1

$$D[3,2] = \frac{d_v^3}{d_s^2} \quad (4-1)$$

$$d_v = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4-2)$$

$$d_s = \left(\frac{S}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-3)$$

โดย $D [3,2]$ = ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมในเชิงพื้นที่ผิว (เมตร)

d_v = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมในเชิงปริมาตร (เมตร)

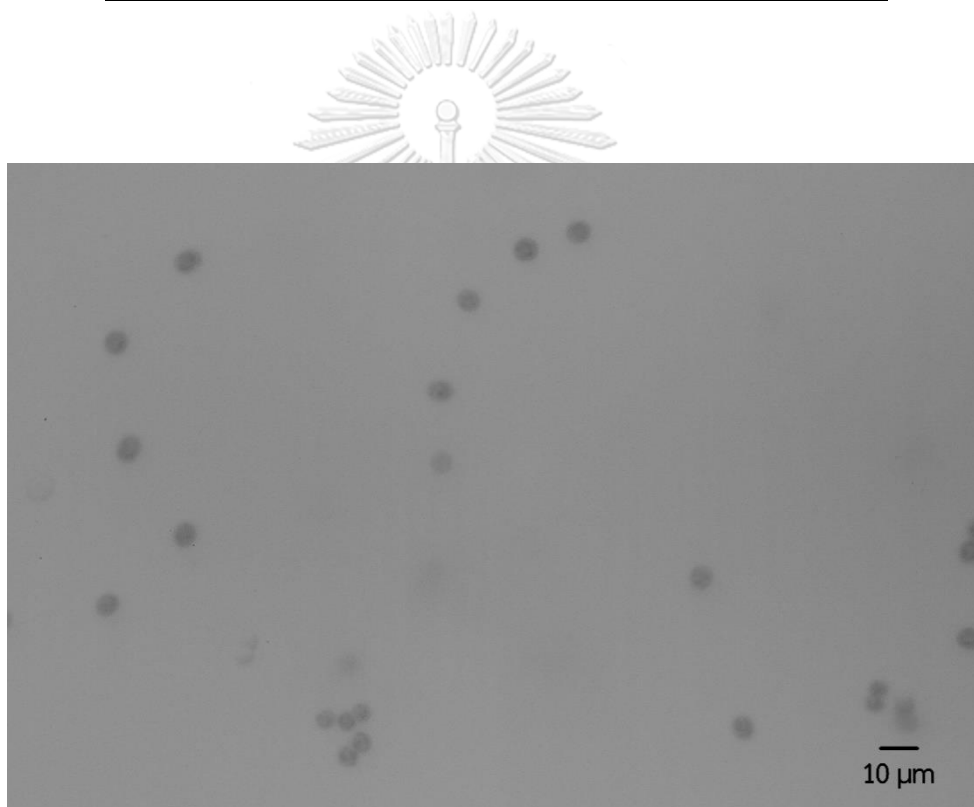
d_s = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมในเชิงพื้นที่ผิว (เมตร)

V = ปริมาตรของอนุภาค (ลูกบาศก์เมตร)

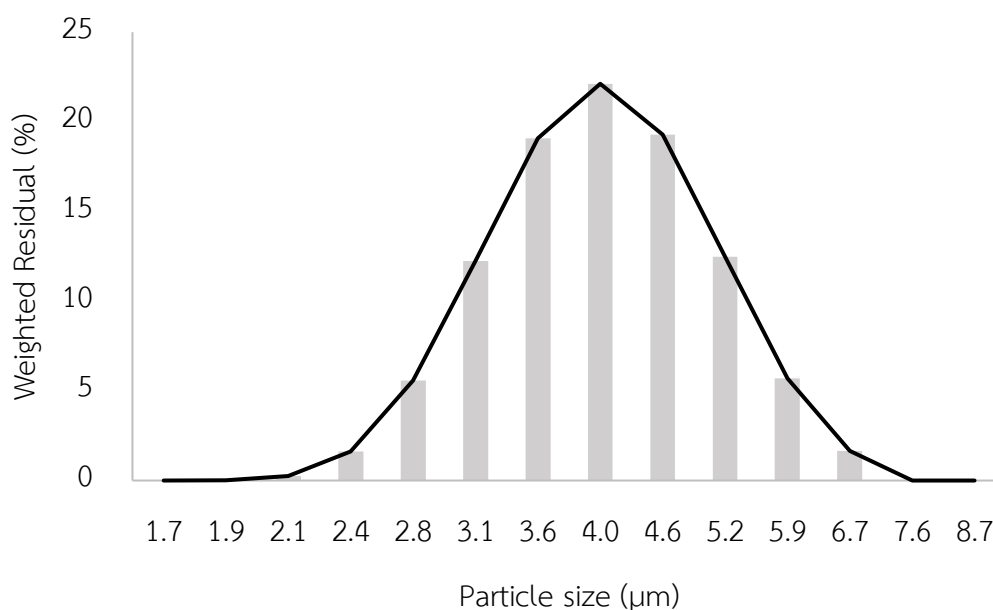
S = พื้นที่ผิวของอนุภาค (ตารางเมตร)

ตารางที่ 4-1 ลักษณะสมบัติของน้ำสังเคราะห์สำหรับสายพันธุ์ไมโครซิสทีสความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร

ลักษณะสมบัติ	ค่าพารามิเตอร์
รูปร่าง	ทรงกลม
ลักษณะการเจริญเติบโต	เซลล์เดี่ยว
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	4.19
ซีตาโพเทนเชียลที่พีเอช 7 (มิลลิโวลต์)	-14.97



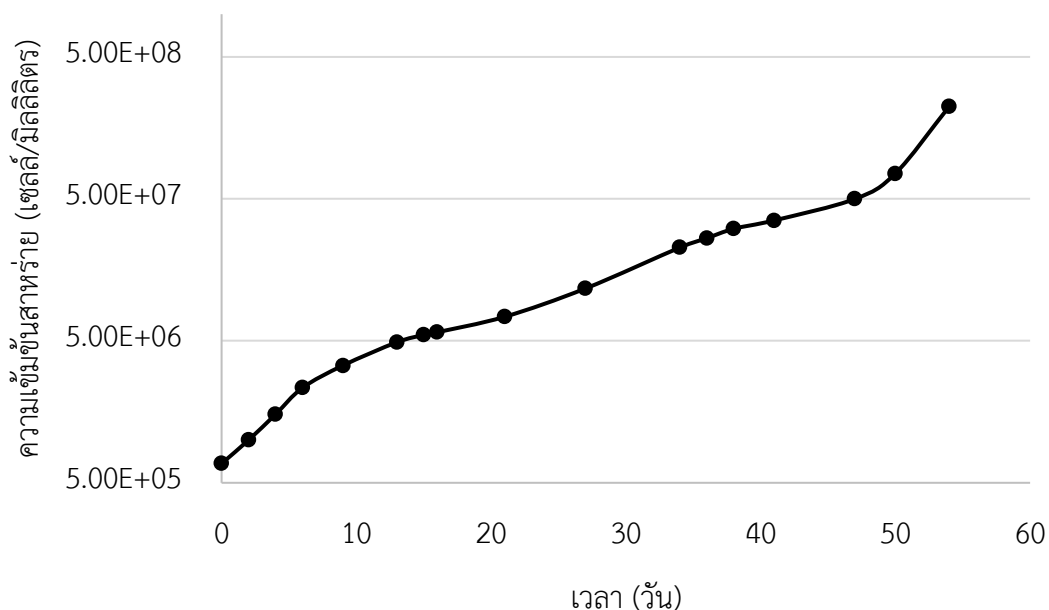
รูปที่ 4-1 สำหรับสายพันธุ์ไมโครซิสทีส กำลังขยาย 400 เท่า



รูปที่ 4-2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเซลล์สำหรับสายพันธุ์ไมโครซิสทีส

4.1.2 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

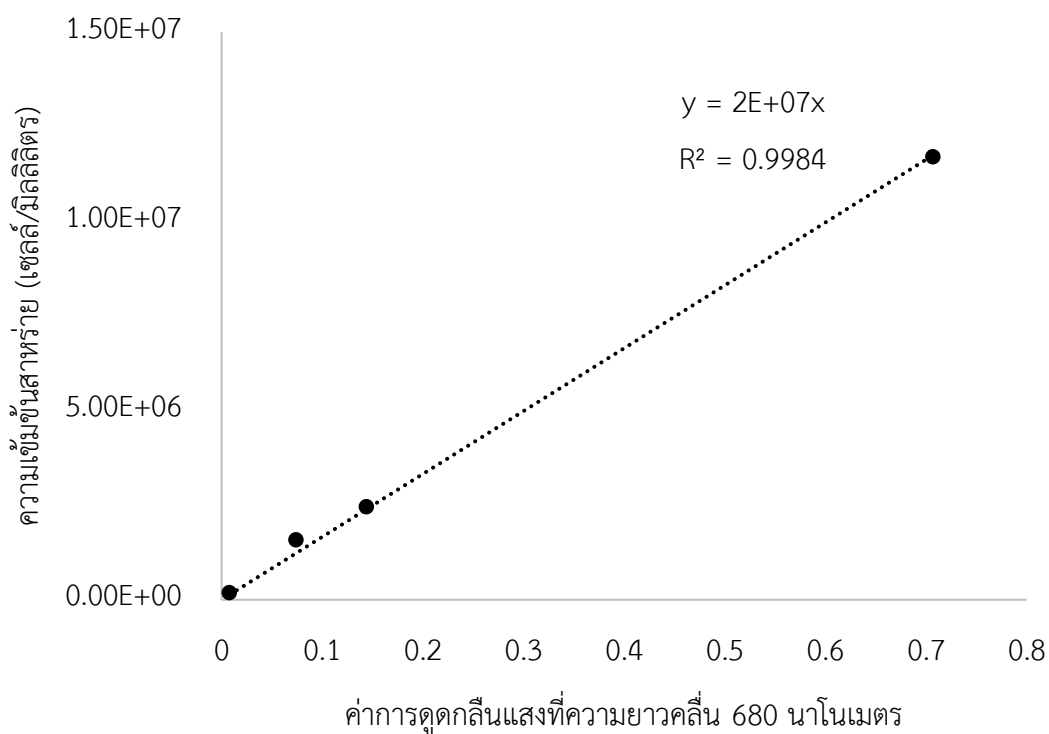
การเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทีสที่เพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการด้วยอาหารเลี้ยงสาหร่ายสูตร MA ซึ่งมีองค์ประกอบดังตารางที่ 3-1 พบว่า สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) ในช่วง 0 – 54 วัน และมีแนวโน้มในการเจริญเติบโตมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4-3 โดยอาหารสูตร MA สามารถเพาะเลี้ยงสาหร่ายให้มีความเข้มข้นสูงสุดได้ถึง 10^9 เซลล์/มิลลิลิตร (Ichimura, 1979) ในงานวิจัยนี้จะใช้สาหร่ายที่เจริญเติบโตในระยะการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่เป็นตัวแทนอนุภาคสาหร่ายในการทดลอง เนื่องจากสาหร่ายที่เจริญเติบโตในช่วงนี้มักพบได้มาก และส่งผลให้แหล่งน้ำมีปัญหาทั้งในด้านของสี กลิ่น และอาจมีสารพิษปนเปื้อน อีกทั้งมีค่าซีตาโพเทนเชียลเป็นลบทำให้มีเสถียรภาพในการแขวนลอยสูงและแยกออกจากน้ำยาก



รูปที่ 4-3 การเจริญเติบโต (Growth curve) ของสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทีส

4.1.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่ายและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (A_{680})

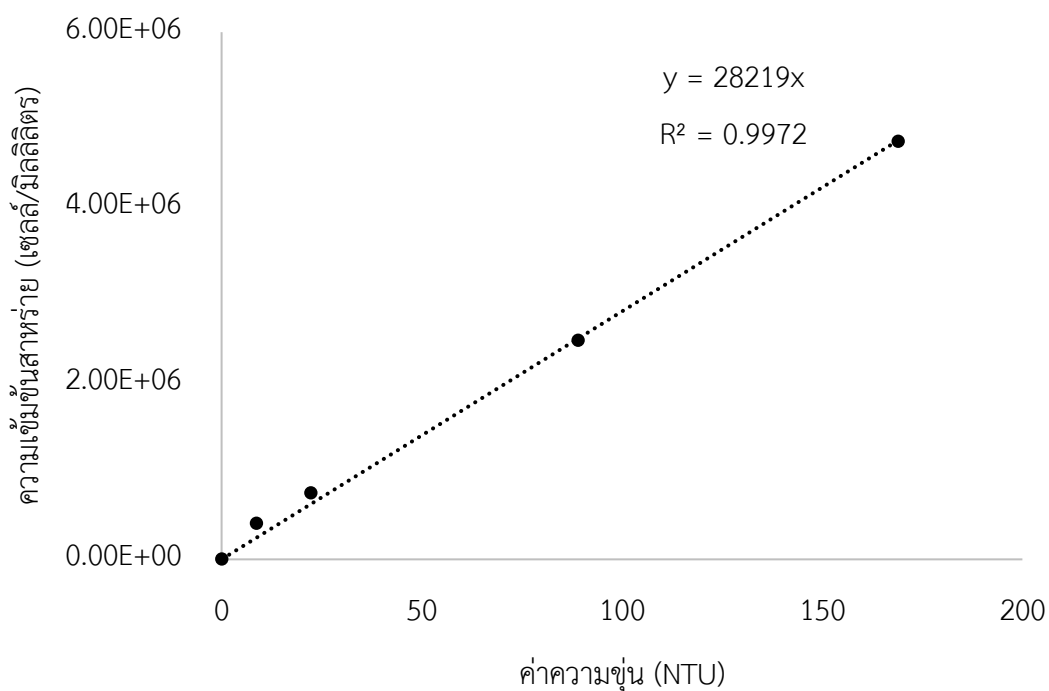
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่ายจากการนับจำนวนเซลล์ด้วย Haemocytometer counting chamber ร่วมกับการใช้โปรแกรมอิมเมจและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (A_{680}) ที่วัดด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-vis spectrophotometer) พบว่า ความเข้มข้นของสาหร่ายและค่า A_{680} มีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function) แสดงในรูปที่ 4-4 ดังสมการ $y = 2 \times 10^7 x$ ($R^2 = 0.9984$) เมื่อ $y =$ ความเข้มข้นสาหร่าย (เซลล์/มิลลิลิตร) และ $x =$ ค่า A_{680} โดยสมการดังกล่าวใช้ในการคำนวณความเข้มข้นสาหร่ายจากการวัดค่า A_{680} จากการทดลอง



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่ายกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (A_{680})

4.1.4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับค่าความขุ่นของสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

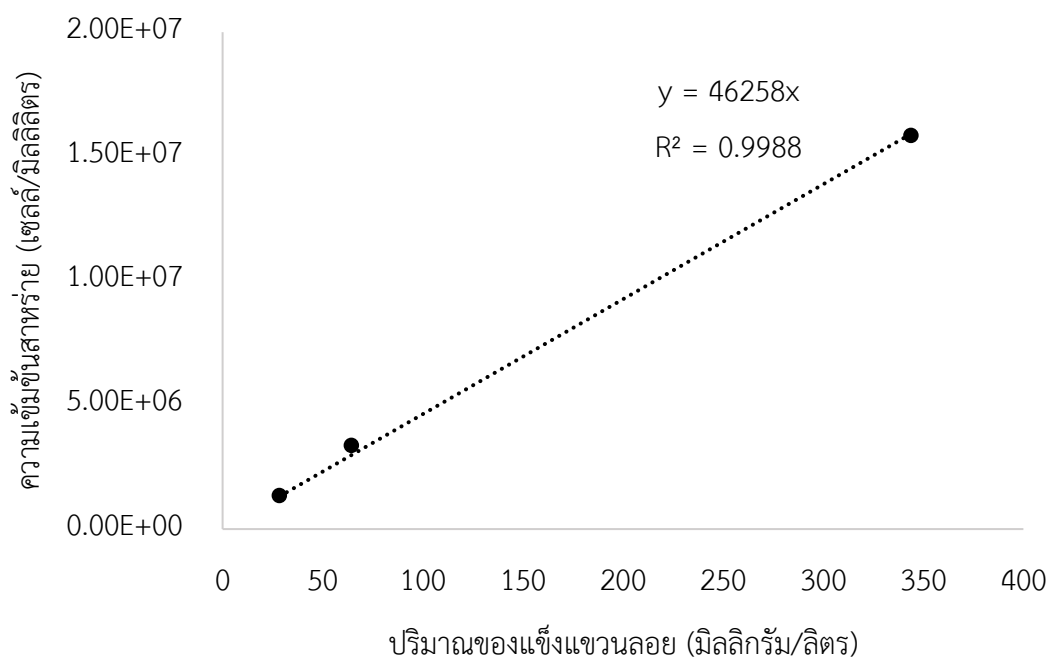
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสาหร่ายและค่าความขุ่นของสาหร่าย ดังแสดงในรูปที่ 4-5 พบว่า มีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ดังสมการ $y = 28219x$ ($R^2 = 0.9972$) เมื่อ $y =$ ความเข้มข้นสาหร่าย (เซลล์/มิลลิลิตร) และ $x =$ ค่าความขุ่น (NTU) จากสมการข้างต้น แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสาหร่ายและค่าความขุ่นของสาหร่ายมีความสัมพันธ์และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้น จึงใช้ทั้งสองพารามิเตอร์นี้ในการชี้วัดเพื่อคำนวณความเข้มข้นของสาหร่ายและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับค่าความขุ่น

4.1.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับปริมาณของแข็งแขวนลอยของสาหร่ายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับปริมาณของแข็งแขวนลอย จากรูปที่ 4-6 พบว่า ความเข้มข้นของสาหร่ายและปริมาณของแข็งแขวนลอย มีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นดังสมการ $y = 46258x$ ($R^2 = 0.9988$) เมื่อ $y =$ ความเข้มข้นสาหร่าย (เซลล์/มิลลิลิตร) และ $x =$ ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร) ดังนั้น จึงใช้สมการดังกล่าวในการคำนวณปริมาณของแข็งแขวนลอยเพื่อใช้ในการหาปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับน้ำสาหร่ายความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับปริมาณของแข็งแขวนลอย

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสาหร่ายกับพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่า A_{680} ค่าความขุ่น และปริมาณของแข็งแขวนลอย พบว่า ความเข้มข้นของสาหร่ายมีความสัมพันธ์กับทั้งสามพารามิเตอร์ มีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น และสามารถคำนวณความเข้มข้นสาหร่ายได้จากทั้งสามพารามิเตอร์ ดังแสดงในสมการที่ 4-4 ถึง 4-6 โดยสมการนี้สามารถใช้ในการคำนวณความเข้มข้นสาหร่ายไม่เกิน 10^7 เซลล์/มิลลิลิตร เท่านั้น

$$\text{ความเข้มข้นของสาหร่าย (เซลล์/มิลลิลิตร)} = 2 \times 10^7 \cdot A_{680} \quad (4-4)$$

$$= 28219 \cdot \text{Turbidity} \quad (4-5)$$

$$= 46258 \cdot \text{SS} \quad (4-6)$$

โดย A_{680} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร

Turbidity = ค่าความขุ่น (NTU)

SS = ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)

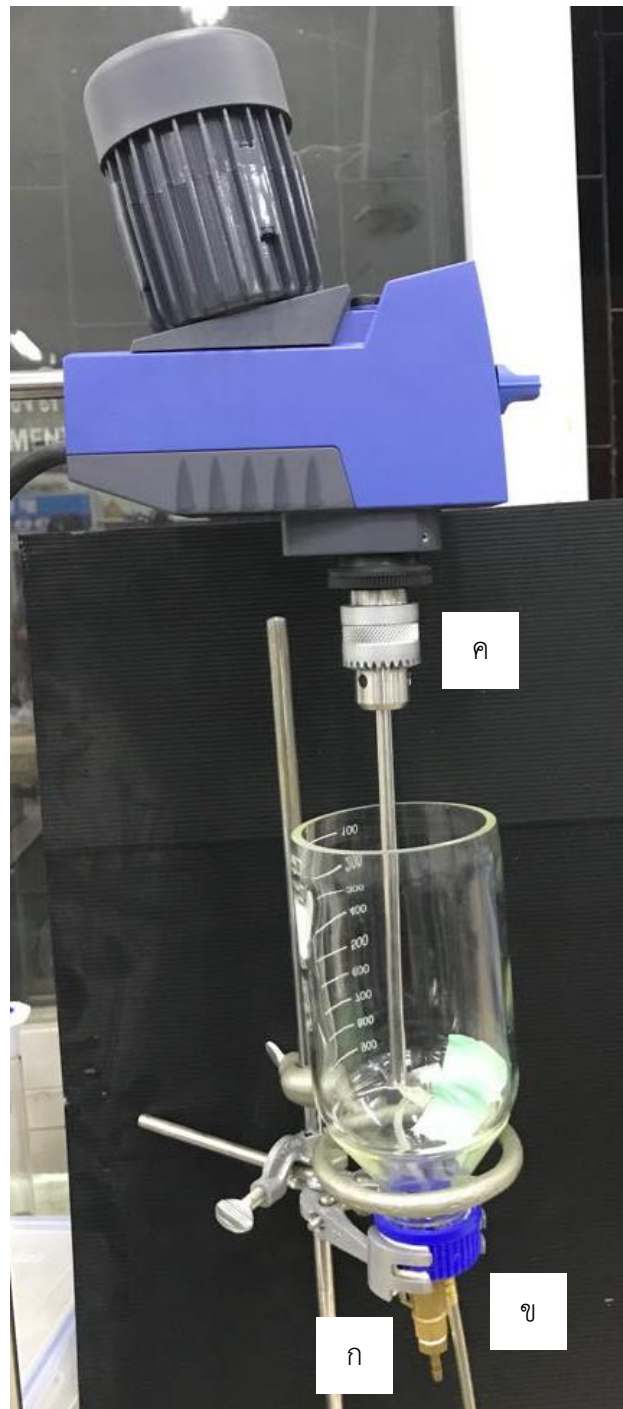
4.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย

การทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ออกจากน้ำ ในการเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เตรียมโดยใช้น้ำประปาในการเจือจางเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการใช้ในการทดลอง จากนั้นทำการทดลองในอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (Flottatest device) โดยทำการปรับสภาวะต่าง ๆ ได้แก่ การปรับพีเอช การเติมสารส้ม และการเติม PACl เพื่อเปรียบเทียบและหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย โดยการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที นาน 1 นาที เพื่อให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน เติมน้ำอัดความดันที่ความดัน 4 บาร์ โดยควบคุมอัตราส่วนอากาศ/ของแข็งแขวนลอย (A/S ratio) เท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมอากาศต่อมิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย ซึ่งอยู่ในช่วงค่าแนะนำสำหรับการเดินระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายของ Metcalf และ Eddy (2008) โดยกำหนดค่าอัตราส่วนอากาศ/ของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 0.04 - 0.06 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย ในทุกการทดลอง และปล่อยให้เกิดการแยกหลังการเติมน้ำอัดความดันนาน 3 นาที เพื่อให้ฟองอากาศพาอนุภาคสาหร่ายลอยขึ้นสู่บริเวณผิวน้ำ จากนั้น ทำการเก็บตัวอย่างบริเวณด้านล่างอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (รูปที่ 4-7) และคำนวณประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายจากสมการที่ 4-7

$$\text{ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (\%)} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (4-7)$$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของสาหร่ายเริ่มต้น (เซลล์/มิลลิลิตร)

C = ความเข้มข้นของสาหร่ายที่เหลืออยู่ในน้ำ (เซลล์/มิลลิลิตร)



รูปที่ 4-7 อุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว
(ก) จุดเก็บตัวอย่าง (ข) จุดเติมน้ำอัดความดัน (ค) เครื่องกวนสาร

เนื่องจากอนุภาคสาหร่ายเป็นอนุภาคที่มีประจุที่ผิวเป็นลบ มีเสถียรภาพ และแขวนลอยในน้ำ ทำให้จำเป็นต้องมีการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายก่อนการแยกสาหร่ายโดยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้คืออุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (Flottatest) ที่มีปริมาตรประมาณ 900 มิลลิลิตร และมีลักษณะการทำงานเป็นแบบเอสบีอาร์ (Sequencing batch reactor, SBR) กล่าวคือ อุปกรณ์จะทำงานเป็นขั้นตอนต่อกัน ได้แก่ การเติมน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ การเติมโคแอกกูแลนต์ การกวนเร็ว การเติมน้ำอัดความดัน และการแยกตัวของอนุภาคขึ้นสู่ผิวน้ำ เมื่ออุปกรณ์ทำงานครบทุกขั้นตอนจึงจะสามารถปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออก ทำให้ไม่สามารถบำบัดน้ำอย่างต่อเนื่องได้

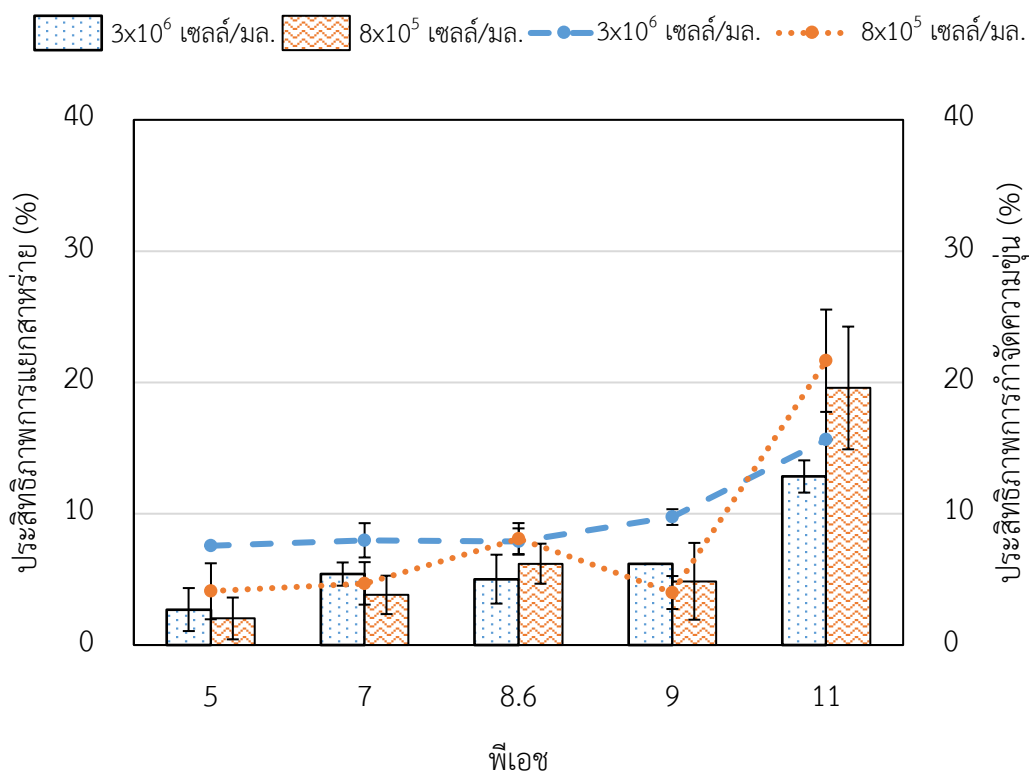
ความเข้มข้นของสาหร่ายส่งผลต่อปริมาณของแก๊สแขวนลอยในน้ำ ดังนั้นการควบคุมอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งเท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย จึงต้องเติมน้ำอัดความดันในปริมาตรที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งตามที่กำหนด ดังนั้น จึงใช้สมการที่ 4-6 ในการคำนวณปริมาณของแก๊สแขวนลอยจากความเข้มข้นของสาหร่าย และใช้ค่าปริมาณของแก๊สแขวนลอยที่ได้ในการหาปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับน้ำสาหร่ายความเข้มข้นต่าง ๆ จากสมการที่ 4-8

$$\frac{A}{S} = \frac{Q_{pw} \cdot Sol_{air} (P \cdot f - 1)}{Q_{ww} \cdot SS} \quad (4-8)$$

- โดย
- Q_{pw} = อัตราการไหลน้ำอัดความดัน (ลิตร/นาท)
 - Q_{ww} = อัตราการไหลน้ำสังเคราะห์สาหร่าย (ลิตร/นาท)
 - P = ความดันของน้ำอัดความดันที่ใช้ในการเดินระบบ (บาร์)
 - SS = ค่าของแก๊สแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)
 - Sol_{air} = Water solubility of air = 21.5 มิลลิกรัมอากาศ/ลิตร ที่อุณหภูมิ 25°C
 - f = Fraction of saturation = 0.6 บาร์⁻¹

4.2.1 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยการปรับพีเอช

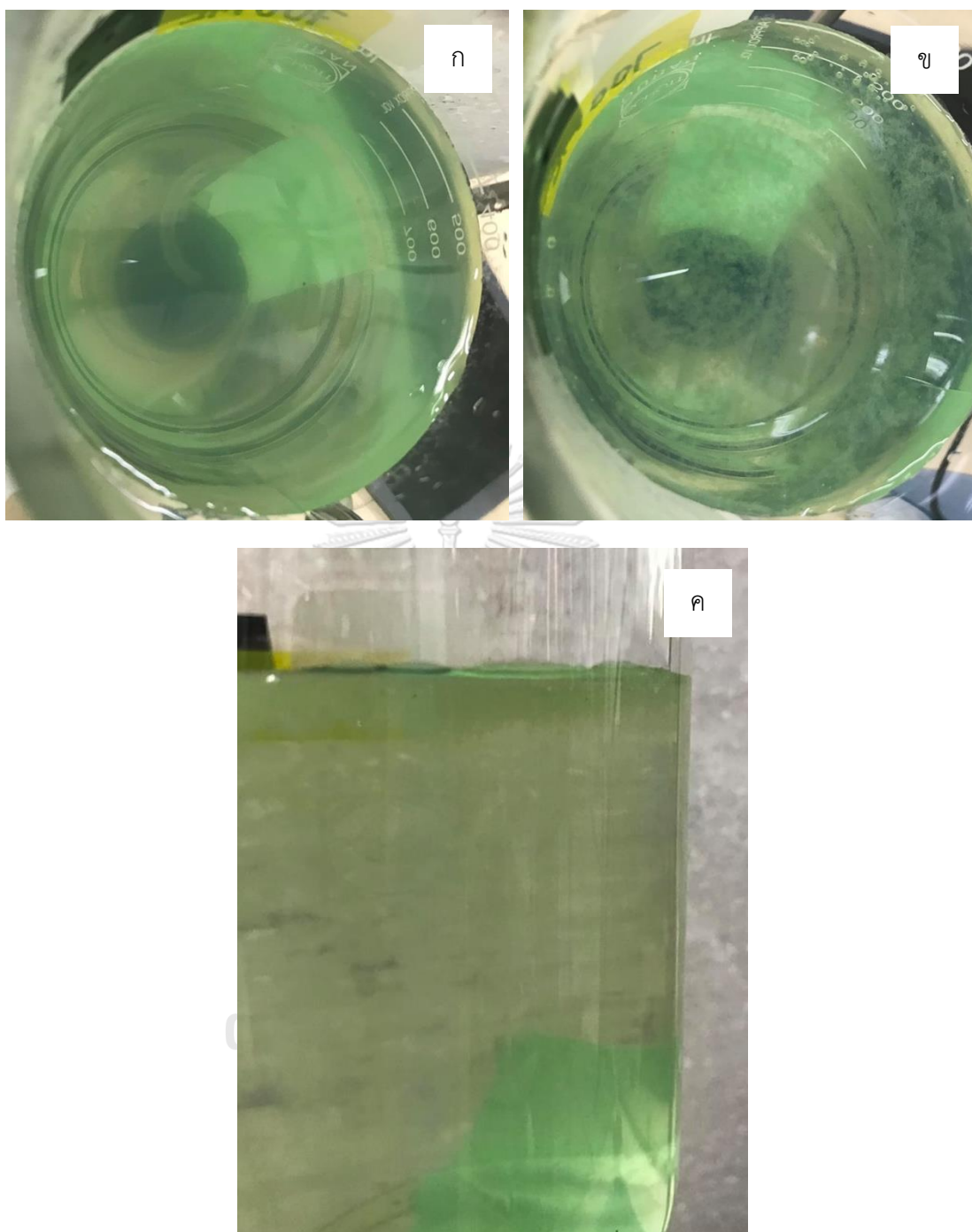
การทดสอบหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลอง คือ 5 7 8.6 9 และ 11 โดยใช้ HCl ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และ NaOH ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ในการปรับพีเอช พบว่า เมื่อพีเอชสูงขึ้น หรือในสถานะเป็นเบส สาหร่ายมีแนวโน้มในการแยกด้วยการทำให้ลอยได้มากกว่าในสถานะที่เป็นกรด ดังแสดงในรูปที่ 4-8 ที่พีเอช 5 ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายทั้งสองความเข้มข้นใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 2.03 ± 1.59 ถึง 2.70 ± 1.64 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่มากขึ้น และในสถานะที่มีค่าพีเอช 8.6 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิส ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของสาหร่ายทั้งสองความเข้มข้นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร สูงกว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร เล็กน้อย



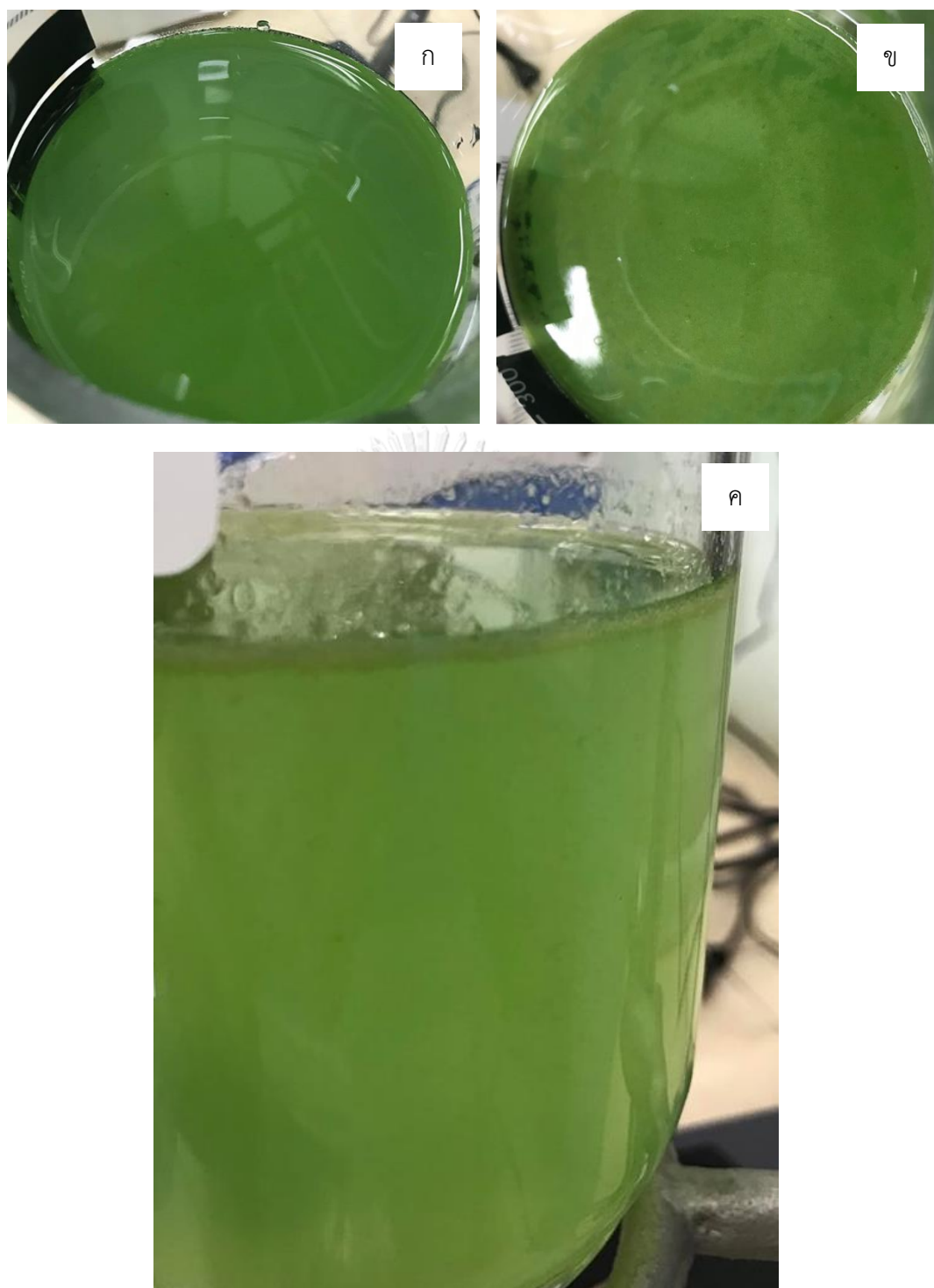
รูปที่ 4-8 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น) ของน้ำสังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 และ 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ

ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ในสภาวะที่ค่าพีเอช 11 สูงสุดถึง 19.58 ± 4.67 และ 12.84 ± 1.23 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากรูปที่ 4-9 และ 4-10 จะเห็นฟลอคของสาหร่ายที่ถูกแยกด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย อยู่บริเวณผิวน้ำอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งไม่พบการเกิดฟลอคที่ลอยขึ้นสู่อากาศแบบนี้ที่พีเอชอื่น ในการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 ที่พีเอช 9 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายใกล้เคียงกับที่สภาวะอื่น แต่ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพทำให้อนุภาคสาหร่ายรวมกันเป็นฟลอคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าความขุ่นเพิ่มสูงขึ้น และแยกออกจากน้ำด้วยการทำให้ลอยได้เพียงเล็กน้อย





รูปที่ 4-9 การแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ด้วยอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (Flottatest) ที่พีเอช 11 (ก) ก่อนทำการทดลอง (ข) หลังทำการทดลอง และ (ค) ชั้นของสาหร่ายที่ลอยตัวอยู่บริเวณผิวน้ำหลังทำการทดลอง



รูปที่ 4-10 การแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ด้วยอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (Flottatest) ที่พีเอช 11 (ก) ก่อนทำการทดลอง (ข) หลังทำการทดลอง และ (ค) ชั้นของสาหร่ายที่ลอยตัวอยู่บริเวณผิวน้ำหลังทำการทดลอง

การปรับพีเอชด้วยการเติม NaOH เมื่อ NaOH ละลายในน้ำจะแตกตัวเป็น Na^+ และ OH^- โดยการเพิ่มขึ้นของ Na^+ ซึ่งเป็นประจุบวกและเป็นประจูดตรงกันข้ามกับอนุภาคสาหร่าย เป็นการเพิ่มจำนวน Counter ion ในชั้นกระจาย ส่งผลให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง ประจุบวกเข้าไปอัดกันแน่นขึ้นบริเวณใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อำนาจของประจุลบไม่สามารถส่งออกไปไกลได้เท่าเดิม แต่โดยทั่วไปไอออนบวกเหล่านี้ มักจะมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ ทำให้ไอออนบวกของโลหะไม่สามารถสัมผัสและดูดติดผิวคอลลอยด์ได้ ไอออนบวกจึงรวมกันหนาแน่นอยู่ในชั้นกระจายและไม่สามารถทำลายประจุลบได้ดีเท่าที่ควร และไม่อาจจะเติมไอออนบวกมากเพียงใด คอลลอยด์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนจากประจุลบเป็นบวกได้ (Charge reversal) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่า ค่าซีตาโพเทนเชียลของอนุภาคสาหร่ายในสภาวะที่พีเอช 11 เปลี่ยนไปจากเดิมเพียงเล็กน้อยและยังคงมีประจุเป็นลบอยู่ โดยที่พีเอช 7 ค่าซีตาโพเทนเชียล เท่ากับ -14.97 ± 1.50 มิลลิโวลต์ เป็น -16.17 ± 1.29 มิลลิโวลต์ และ -17.90 ± 0.96 มิลลิโวลต์ ในน้ำสาหร่ายสังเคราะห์ความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ที่พีเอช 11 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าซีตาโพเทนเชียลของสาหร่ายที่ค่าพีเอช 7 และ 11

ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น (เซลล์/มิลลิลิตร)	พีเอช	ซีตาโพเทนเชียล (มิลลิโวลต์)
3×10^6	7	-14.97 ± 1.50
3×10^6	11	-16.17 ± 1.29
8×10^5	11	-17.90 ± 0.96

ในสภาวะที่น้ำสังเคราะห์สาหร่ายมีค่าพีเอช 11 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดกลไกการเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ โดย OH^- ที่เกิดขึ้นจากการเติม NaOH เมื่อรวมตัวกับแมกนีเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบในอาหารเลี้ยงเลี้ยงสาหร่าย (ตารางที่ 3-1) และละลายอยู่ในน้ำจึงเกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นอออนคอมเพล็กซ์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxo metal complex) สามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ช่วยทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่ายบางส่วนโดยอาศัยหลักการทำลายประจุไฟฟ้า และการเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคสาหร่ายรวมตัวกันจนมีน้ำหนักและขนาดเพิ่มขึ้น เกิด

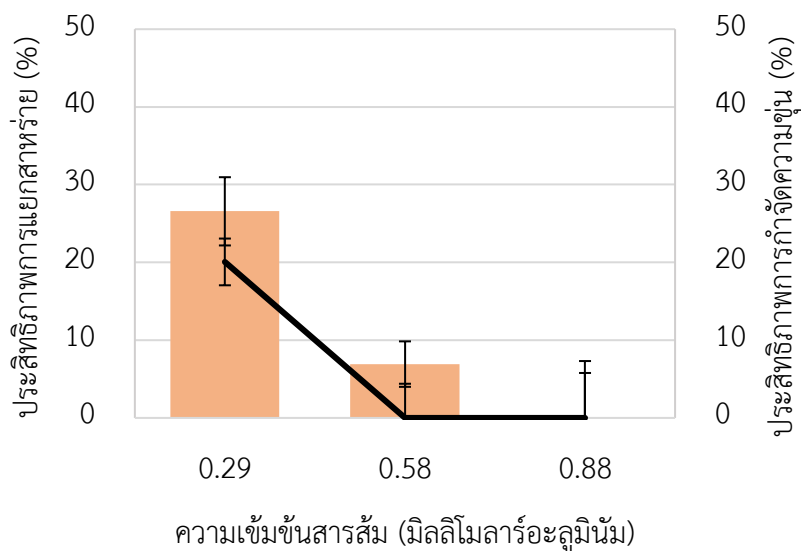
เป็นฟล็อก และถูกแยกออกจากน้ำด้วยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายได้ (Besson และ Guiraud, 2013) โดยทั่วไปกลไกนี้ก็เกิดขึ้นในน้ำได้จากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อละลายในน้ำจะอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิก ซึ่งมีสมบัติเป็นกรด ดังนั้นการที่สาหร่ายใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการเจริญเติบโต ทำให้ปริมาณกรดคาร์บอนิกในน้ำลดลง ส่งผลให้พีเอชเพิ่มขึ้น และเกิดการตกตะกอนของแคลเซียม หรือแมกนีเซียม ส่งผลให้เกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชันดังที่กล่าวข้างต้นและตกตะกอนลงได้ด้วยกลไกทางธรรมชาติ (Uduman และคณะ, 2010)

4.2.2 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

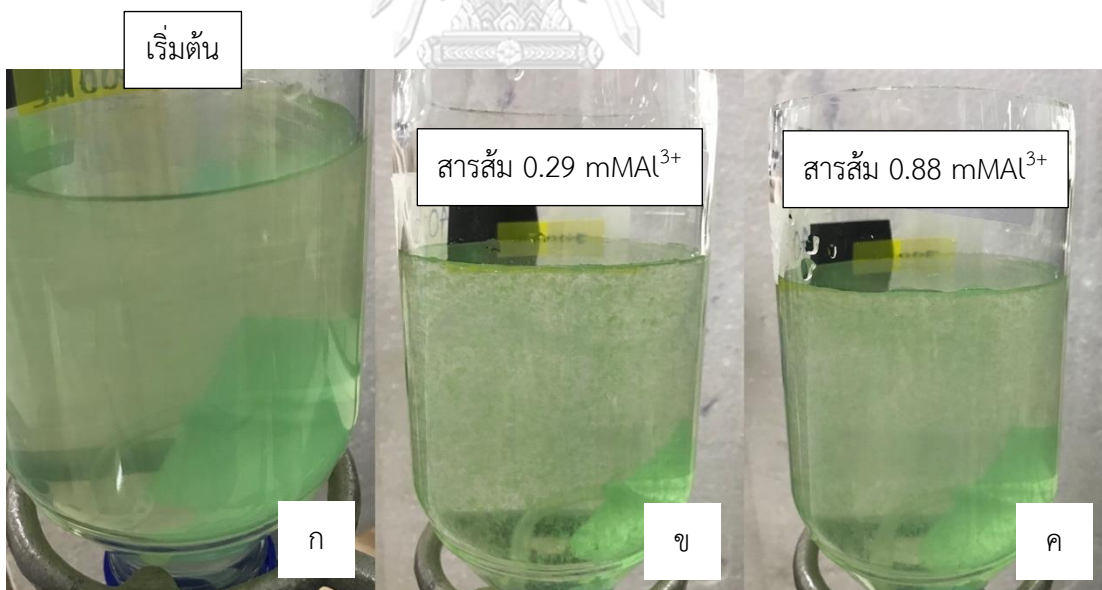
โคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ สารส้มความเข้มข้น 0.06 – 1.17 มิลลิโมลาร์ อะลูมินัม และ PACl ความเข้มข้น 0.06 - 0.80 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม โดยกำหนดพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่สารโคแอกกูแลนต์กลุ่มอะลูมินัมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพ โดยพิจารณาประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่าย การกำจัดความขุ่น ลักษณะฟล็อกที่เกิดขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช

4.2.2.1 การศึกษาการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์

การทดสอบการลอยตัวเพื่อปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร (รูปที่ 4-9) พบว่า การเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 0.29 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกด้วยกระบวนการทำให้ลอยสูงสุดเท่ากับ 26.57 ± 4.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากกลไกการเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์และเมื่อทดสอบโดยการเติมสารส้มในความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายลดลง เนื่องจากการเติมสารส้มนอกจากจะช่วยในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายแล้วยังทำให้เกิดฟล็อกและส่งผลให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4-10 (ก) น้ำสังเคราะห์สาหร่ายเริ่มต้นมีลักษณะเป็นสีเขียว ไม่มีฟล็อก ในขณะที่รูปที่ 4-10 (ข) จะเห็นว่าฟล็อกที่เกิดจากการเติมสารส้ม 0.88 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม มีปริมาณมากกว่าฟล็อกที่เกิดจากการเติมสารส้ม 0.29 มิลลิโมลาร์อะลูมินัมในรูปที่ 4-10 (ค) ดังนั้นเมื่อเติมน้ำอัดความดันปริมาตรเท่าเดิม อากาศจึงไม่เพียงพอสำหรับการแยกสาหร่ายด้วยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

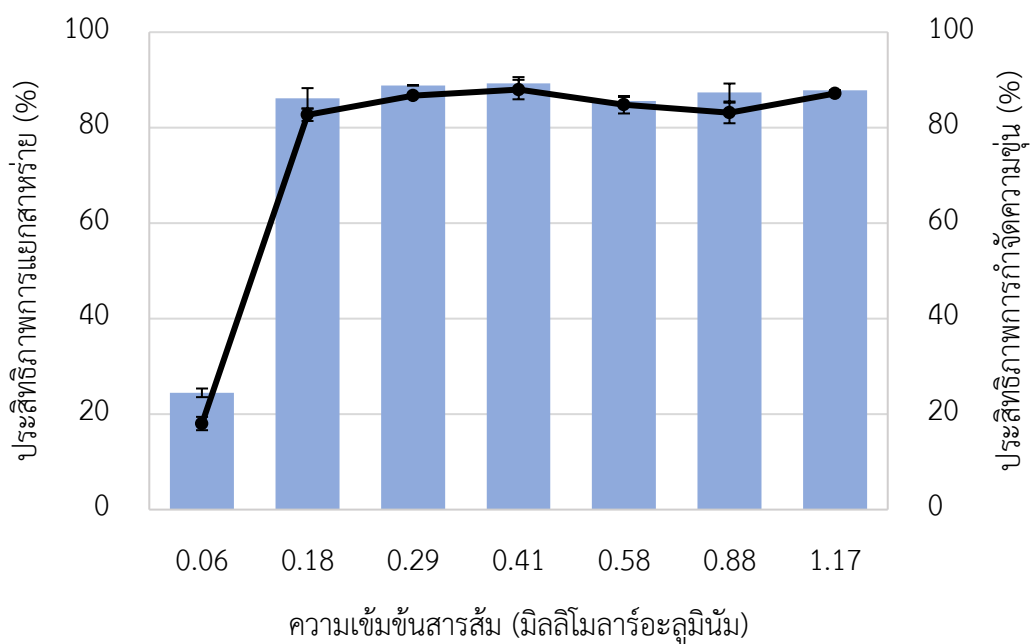


รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น) ในน้ำสังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัวร่วมกับการเติมสารส้ม



รูปที่ 4-10 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (ก) เริ่มต้น (ข) หลังการทำให้ลอยตัวร่วมกับการเติมสารส้ม 0.29 และ (ค) 0.88 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม

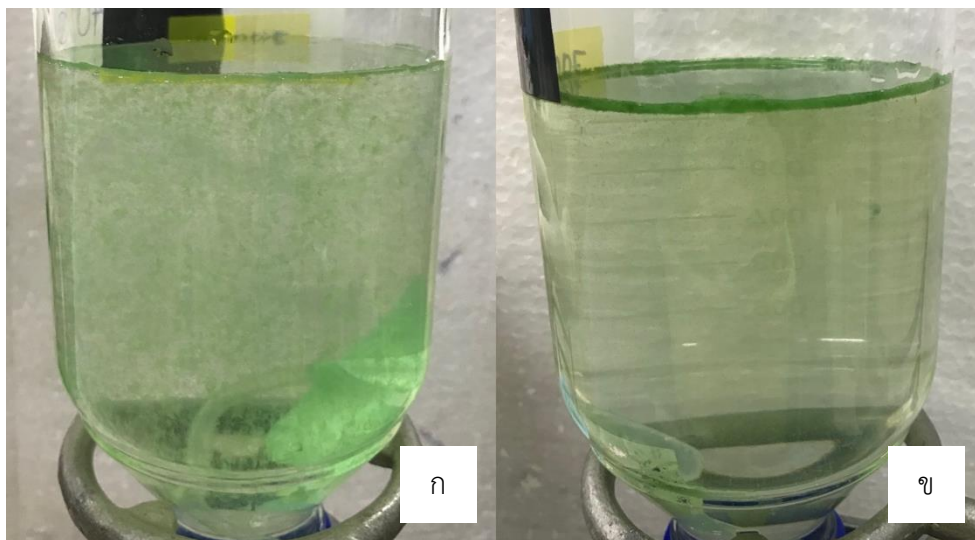
การแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร โดยการเติมสารส้มเพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย แสดงประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายในรูปที่ 4-11 พบว่า การเติมสารส้มความเข้มข้น 0.06 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายเท่ากับ 24.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประสิทธิภาพต่ำอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4-11 (ข) และเมื่อเติมสารส้มในปริมาณที่มากขึ้น ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายก็สูงขึ้นตามไปด้วย โดยการเติมสารส้มที่ความเข้มข้น 0.18 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียมขึ้นไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายสูง อยู่ในช่วง 85.61 ถึง 89.31 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4-11 (ค) ถึง 4-11 (ง) พบว่า ความเข้มข้นสารส้มที่เหมาะสมคือ 0.18 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม เนื่องจากเมื่อเติมสารส้มในปริมาณที่มากขึ้น ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายใกล้เคียงกันหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเกิดจากการทำลายเสถียรภาพของสาหร่ายด้วยกลไกการเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งเกิดจากการสร้างผลึก $Al(OH)_3$ ที่มีลักษณะคล้ายเป็นปุยมหาห่อหุ้มอนุภาคสาหร่าย เกิดเป็นฟล็อก (Sweep flocculation) โดยกลไกแบบนี้เกิดง่ายกว่าการดูดติดและทำลายประจุมาก เนื่องจาก อีออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวก (Al^{3+}) จะกลายเป็นผลึก $Al(OH)_3$ ภายในเวลา 10^{-4} ถึง 1 วินาที ดังนั้น ถ้าสามารถให้อีออนคอมเพล็กซ์ดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ภายในเวลา 10^{-4} ถึง 1 วินาที จะทำให้ไม่มี $Al(OH)_3$ เกิดขึ้น กลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบดูดติดและทำลายประจุ ซึ่งเป็นไปได้ยาก ในทางตรงข้าม ถ้าการดูดติดผิวไม่เกิดขึ้นภายใน 1 วินาที ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งอีออนคอมเพล็กซ์กลายเป็นผลึก ทำให้เกิดเป็นกลไกการเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งเป็นกลไกหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (มันซิลป์ ตันซุลเวศม์, 2542)



รูปที่ 4-11 ประสิทธิภาพการแยกสีย้อม (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น) ในน้ำสังเคราะห์สีย้อมความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว ร่วมกับการเติมสารส้ม



รูปที่ 4-12 ลักษณะน้ำหลักผ่านการแยกสารละลายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (ก) เริ่มต้น (ข) หลังการทำให้ลอยร่วมกับเติมสารส้ม 0.06 (ค) 0.18 (ง) 0.29 (จ) 0.88 และ (ฉ) 1.17 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม

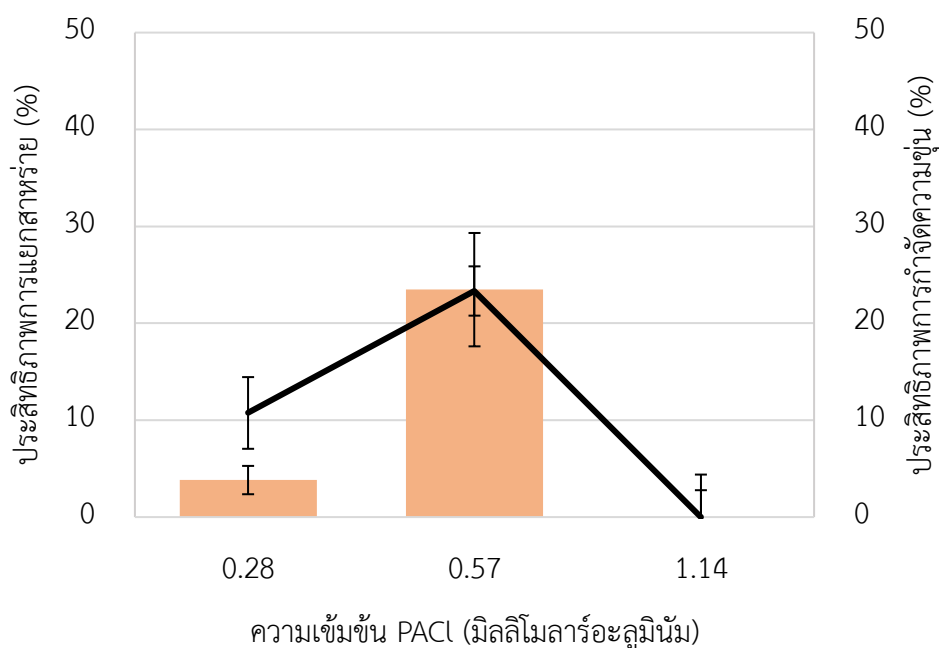


รูปที่ 4-13 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น (ก) 8×10^5 และ (ข) 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัวด้วยการทำให้ลอยร่วมกับการเติมสารส้มความเข้มข้น 0.29 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม

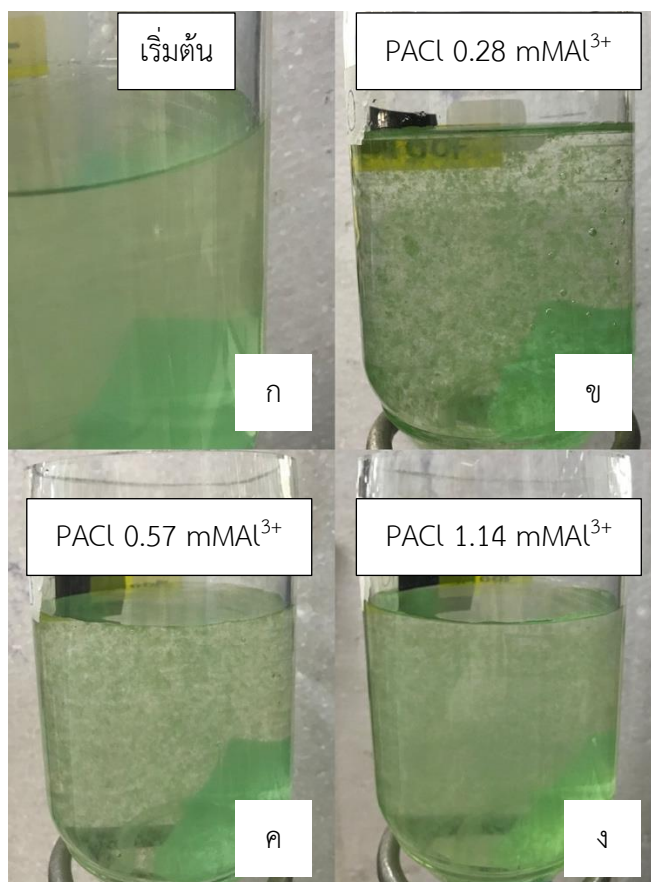
เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการแยกสาหร่ายที่ความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร โดยเติมสารส้มที่ความเข้มข้นเดียวกัน คือ 0.29 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม ดังแสดงในรูปที่ 4-13 (ก) และ 4-13 (ข) ตามลำดับ พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายที่ความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสาหร่ายที่มีความเข้มข้นสูงมีค่าความขุ่นที่มากกว่า ซึ่งหมายถึงการมีเป่าสัมผัสที่มากกว่า จึงมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคมาก ไม่จำเป็นต้องอาศัยเป่าสัมผัสที่มากขึ้นจากการเติมโคแอกกูแลนต์ ดังนั้น กลไกที่ใช้หลักของสารอนินทรีย์ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม (Optimum dosage) จึงแปรผกผันกับความเข้มข้นของสาหร่าย จากผลการทดลอง ความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพของสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร คือ 0.29 และ 0.18 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม ตามลำดับ

4.2.2.2 การศึกษาการใช้ PACl เป็นโคแอกกูแลนต์

จากรูปที่ 4-14 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการเติม PACl เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 0.57 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม ทำให้ประสิทธิภาพในการแยก เท่ากับ 23.47 ± 5.85 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเติม PACl ความเข้มข้น 1.14 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม ทำให้เกิดฟล็อกในปริมาณที่มากขึ้น และสีของฟล็อกที่เกิดขึ้นที่อ่อนลง เนื่องจาก Al^{3+} จากการเติม PACl ที่ห่อหุ้มอนุภาคสาหร่าย ดังแสดงในรูปที่ 4-15 (ข) ถึง 4-15 (ง) จะเห็นว่าฟล็อกที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้นและสีอ่อนลงตามความเข้มข้นของ PACl ที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น การเติมอากาศปริมาณเท่าเดิมทำให้ไม่เพียงพอในการแยกสาหร่ายออกได้ โดยกลไกที่เกิดขึ้นเป็นการเพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์เช่นเดียวกับการเติมสารส้มด้วยผลึก $Al(OH)_3$ เนื่องจาก PACl เป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกันเมื่อละลายในน้ำจะแตกตัวเป็น Al^{3+} เช่นเดียวกับสารส้ม



รูปที่ 4-14 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น) ในน้ำสังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัวร่วมกับการเติม PACl

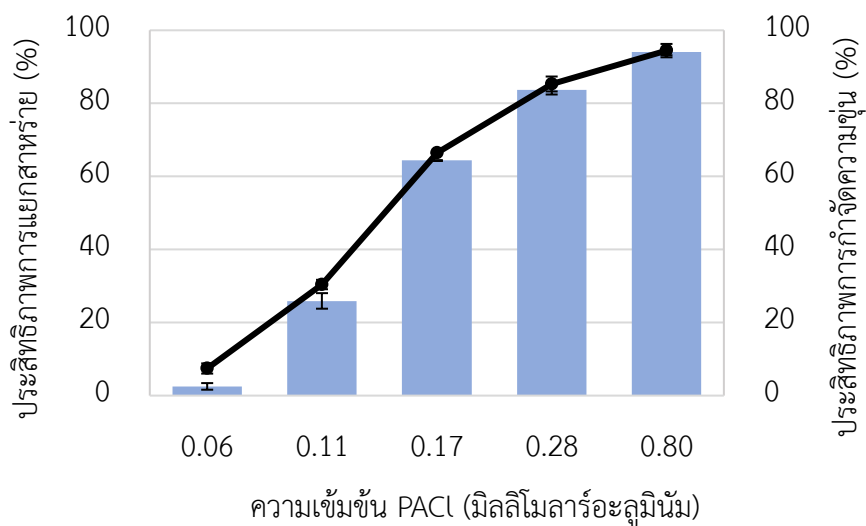


รูปที่ 4-15 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (ก) เริ่มต้น (ข) หลังการทำให้ลอยร่วมกับเติม PACl 0.28 (ค) 0.57 และ (ง) 1.14 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม

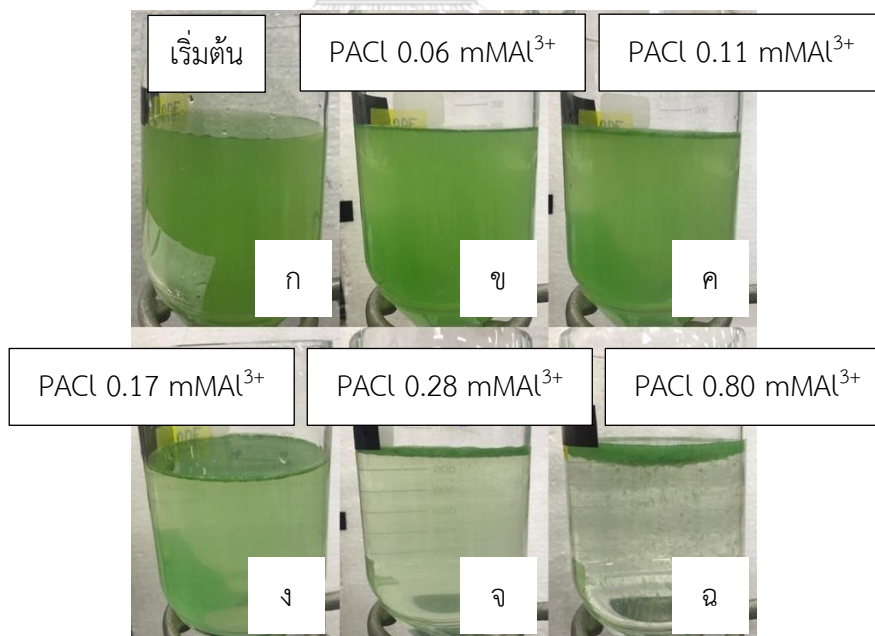
จุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4-16 การศึกษาประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร โดยใช้ PACl เป็นสารโคแอกกูแลนต์เพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย พบว่า เมื่อเติม PACl ความเข้มข้น 0.11 – 0.17 ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ไม่เพียงพอในการทำลายเสถียรภาพสาหร่าย ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4-17 (ข) ถึง 4-17 (ง) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร PACl มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-17 (จ) และ 4-17 (ฉ) โดยที่ความเข้มข้น 0.28 และ 0.80 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่าย เท่ากับ 83.70 ± 0.02 และ 93.98 ± 0.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้น PACl สูงถึง 0.80 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่าย

เพิ่มขึ้นเพียงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ความเข้มข้น PACl ที่เหมาะสมในการทำละลายเสียรภาพ
สาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร คือ 0.28 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม

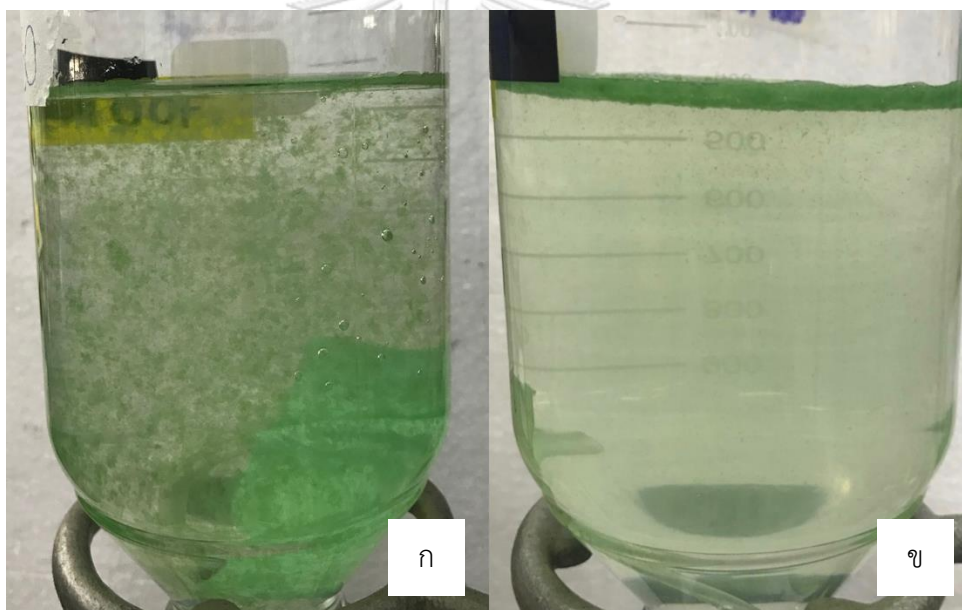


รูปที่ 4-16 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (กราฟแท่ง) และการกำจัดความขุ่น (กราฟเส้น)
ในน้ำสังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว
ร่วมกับการเติม PACl



รูปที่ 4-17 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์
ทดสอบการลอยตัว (ก) เริ่มต้น (ข) หลังการทำให้ลอยร่วมกับเติม PACl 0.06 (ค) 0.11 (ง) 0.17
(จ) 0.28 และ (ฉ) 0.80 มิลลิโมลาร์อะลูมิเนียม

การแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร มีความต้องการสาร PACl ในการทำลายเสถียรภาพน้อยกว่าการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-18 เมื่อเติม PACl ความเข้มข้นเดียวกัน สามารถแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร (รูปที่ 4-18 (ข)) ได้ดีกว่า สาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร (รูปที่ 4-18 (ก)) อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับการใช้สารส้มในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย เนื่องจากกลไกที่เกิดขึ้นเหมือนกัน ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมจึงแปรผกผันกับความเข้มข้นของสาหร่าย ดังที่กล่าวไปข้างต้น



รูปที่ 4-18 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น (ก) 8×10^5 และ (ข) 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ของอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัวด้วยการทำให้ลอยรวมกับการเติม PACl ความเข้มข้น 0.28 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม

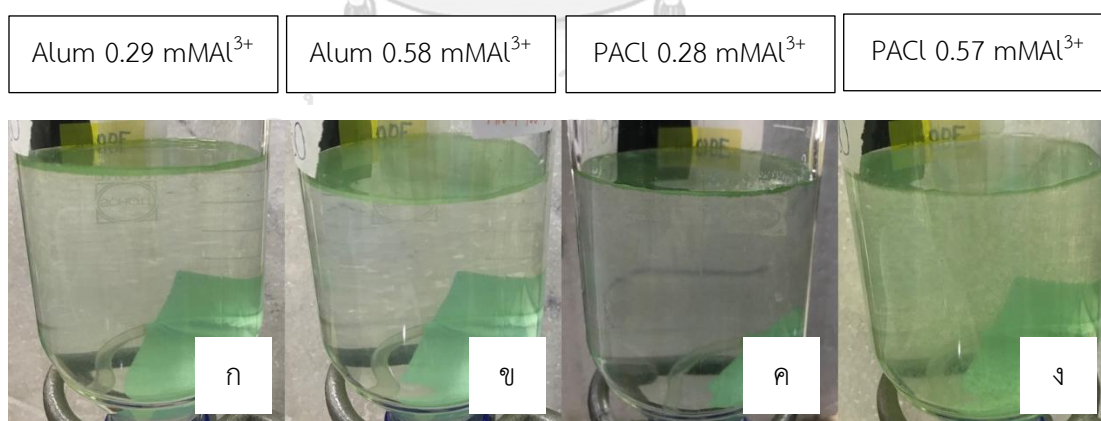
ในขณะที่ความเข้มข้นสาหร่าย 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร พบว่า ต้องเติม PACl ในปริมาณที่มากกว่าสารส้ม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากลักษณะของฟล็อกที่เกิดขึ้นจากการเติม PACl มีความแข็งแรงและตกตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม (Nilsson, 1992;

Packham และ Ratnayaka, 1992) ซึ่งส่งผลให้ฟลอคที่เกิดขึ้นทำให้ลอยยากกว่าฟลอคที่เกิดจากการเติมสารส้ม เมื่อเติมอากาศในปริมาณที่เท่ากัน

การแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร เมื่อเติมโคแอกกูแลนต์ คือ สารส้มและ PACl เพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสูงสุดเท่ากับ 26.57 ± 4.39 และ 23.47 ± 5.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร เนื่องจากที่สาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอยต่ำมาก ทำให้ปริมาตรน้ำอัดความดันที่ต้องใช้ในการแยกสาหร่ายน้อยตามไปด้วย จากตารางที่ 4-3 พบว่า เมื่อเติมโคแอกกูแลนต์ นอกจากจะช่วยให้การทำลายเสถียรภาพสาหร่ายแล้ว ยังทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยเมื่อปรับปริมาตรของน้ำอัดความดันที่เติมตามปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นจากการเติมโคแอกกูแลนต์ที่ไม่ว่าจะเป็นสารส้ม หรือ PACl ตามอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอยที่เหมาะสม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายออกจากน้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้สารส้มความเข้มข้น 0.29 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม และเติมน้ำอัดความดันปริมาตร 50 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายเพิ่มขึ้นจาก 26.57 เป็น 76.43 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับการเติม PACl ความเข้มข้น 0.28 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม เมื่อเติมน้ำอัดความดันปริมาตร 50 มิลลิลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายสูงขึ้นถึง 60.64 เปอร์เซ็นต์ จากเดิมประสิทธิภาพเพียง 3.82 เปอร์เซ็นต์ และเนื่องจากลักษณะของฟลอคที่เกิดขึ้นไม่เหมาะสมกับการแยกด้วยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อใช้ PACl ความเข้มข้น 0.57 โมลาร์ และเพิ่มปริมาตรน้ำอัดความดันจึงไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายสูงขึ้นจากเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4-19

ตารางที่ 4-3 ปริมาณน้ำอัดความดันที่ใช้ในสภาวะการทดลองต่าง ๆ เพื่อให้อัตราส่วนอากาศต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย ในการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร

โคแอกกูแลนต์	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณน้ำอัดความดัน (มิลลิลิตร)	ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (%)
ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์ อะลูมินัม)		
ไม่เติมสารโคแอกกูแลนต์	16	-	-
สารส้ม	0.29	55	10
	0.29	55	50
	0.58	91	10
	0.58	91	80
PACl	0.28	53	10
	0.28	53	50
	0.57	84	10
	0.57	84	80



รูปที่ 4-19 ลักษณะน้ำหลังผ่านการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร หลังการแยกด้วยการทำให้ลอยและปรับอัตราส่วนอากาศต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย โดยเติม (ก) สารส้ม 0.29 (ข) สารส้ม 0.58 (ค) PACl 0.28 และ (ง) 0.57 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม

การแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร เมื่อปรับปริมาตรการเติมน้ำอัดความดันให้เพิ่มขึ้น ตามปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายเปลี่ยนแปลงจากการเดิมที่ใช้การเติมน้ำอัดความดันที่คำนวณด้วยปริมาณของแข็งแขวนลอยเริ่มต้นในน้ำสังเคราะห์สาหร่ายเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4-4 เนื่องจากปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ใช้ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ จึงส่งผลให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ฟล็อกที่เกิดขึ้นเป็นฟล็อกที่มีปริมาณสาหร่ายอยู่มาก และด้วยความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกับน้ำของสาหร่ายนั้นทำให้มีแนวโน้มที่จะลอยอยู่แล้ว เมื่อใช้อากาศในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ประสิทธิภาพการแยกจึงไม่แตกต่างจากเดิมมาก ซึ่งตรงกันข้ามกับการแยกฟล็อกสาหร่ายที่ความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ซึ่งต้องใช้ความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์สูงในการทำลายเสถียรภาพสาหร่าย ส่งผลให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มสูงขึ้นจากค่าเริ่มต้นมาก ฟล็อกที่เกิดขึ้นจึงมีความหนาแน่นที่สูงกว่าฟล็อกที่เกิดจากการเติมโคแอกกูแลนต์เพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ทำให้มีความต้องการอากาศในปริมาณที่มากเพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายได้

ตารางที่ 4-4 ปริมาณน้ำอัดความดันที่ใช้ในสภาวะการทดลองต่าง ๆ เพื่อให้อัตราส่วนอากาศต่อปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 0.04 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย ในการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร

ชนิด	โคแอกกูแลนต์	ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาตรน้ำอัดความดัน (มิลลิลิตร)	ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (%)
	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์ อะลูมินัม)			
	ไม่เติมสารโคแอกกูแลนต์	73	-	-
สารส้ม	0.18	110	50	86.16
	0.18	110	110	82.25
PACl	0.28	134	50	83.70
	0.28	134	100	80.68

ปัจจัยหนึ่งที่ควรพิจารณาในการเลือกสารโคแอกกูแลนต์คือพีเอชของน้ำหลังผ่านกระบวนการแยกด้วยการเติมสารโคแอกกูแลนต์ร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย การใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ส่งผลให้ค่าพีเอชต่ำลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ตะกอนของสารประกอบไฮดรอกไซด์ ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ดังนั้น การใช้ PACL จึงเป็นการลดปัญหาดังกล่าว เนื่องจากไม่ทำให้เกิดไฮโดรเจนไอออน ค่าพีเอชจึงเปลี่ยนแปลงจากเดิมเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในน้ำหลังผ่านกระบวนการแยกด้วยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการเติมสารโคแอกกูแลนต์

ชนิด	โคแอกกูแลนต์		ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (%)	พีเอช
	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์ อะลูมินัม)	ความเข้มข้นสาหร่าย (เซลล์/มิลลิลิตร)		
สารส้ม	0.29	8×10^5	26.57 ± 4.39	6.14 ± 0.02
	0.18	3×10^6	86.16 ± 0.00	6.59 ± 0.02
	0.57	8×10^5	23.47 ± 5.85	6.86 ± 0.06
PACL	0.28	3×10^6	83.70 ± 0.02	6.89 ± 0.01
	0.80	3×10^6	93.98 ± 0.01	6.77 ± 0.08

การทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่าย การกำจัดความขุ่น ลักษณะฟล็อกที่เกิดขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช โคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมที่สุดในการทำลายเสถียรภาพสาหร่าย คือ สารส้ม เนื่องจากประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายและการกำจัดความขุ่นที่สูง ใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์น้อยกว่า PACL และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายไม่สูงมาก ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องการลดลงของพีเอชซึ่งอาจส่งผลต่อระบบของกระบวนการบำบัดน้ำขั้นต่อไป รวมถึงในแหล่งน้ำจริง น้ำมักจะมีสภาพด่าง (Alkalinity) อยู่แล้ว ทำให้มีความสามารถในการรับไฮโดรเจนไอออนที่เป็นผลพลอยได้จากการเติมสารส้ม และทำให้พีเอชไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก อีกทั้งลักษณะของฟล็อกที่

เกิดขึ้นจากการเติมสารส้มมีแนวโน้มในการลอยได้ง่ายกว่าฟlocsที่เกิดจากการเติม PACl และการปรับพีเอช รวมถึง ราคาของสารส้มที่ต่ำกว่า PACl ทำให้มีความคุ้มค่าในการเดินระบบมากกว่า สรุปความเข้มข้นและชนิดของโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมสำหรับน้ำสาหร่ายแต่ละความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ในตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพทำลายเสถียรภาพสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูแลชั่นร่วมกับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายในอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว

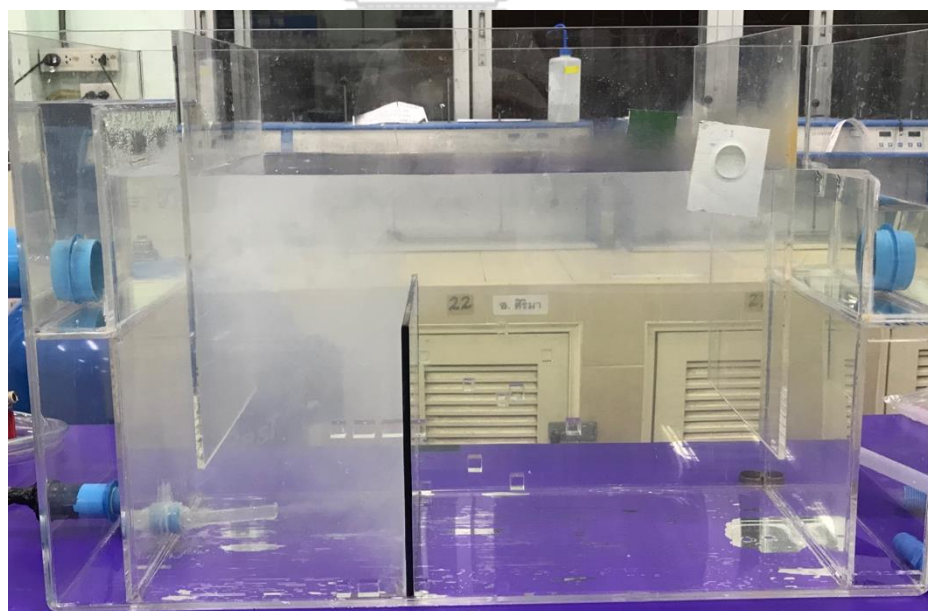
ความเข้มข้นสาหร่าย (เซลล์/มิลลิลิตร)	สถานะในการทำลายเสถียรภาพสาหร่าย	ประสิทธิภาพ การแยกสาหร่าย (%)
8×10^5	พีเอช 11	19.58
	สารส้มความเข้มข้น 0.29 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	76.43
	PACl ความเข้มข้น 0.28 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	60.64
3×10^6	พีเอช 11	12.84
	สารส้มความเข้มข้น 0.18 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	86.16
	PACl ความเข้มข้น 0.28 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม	83.70

เนื่องจากอุปกรณ์ทดสอบการลอยตัว (Flottatest) ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายมีขนาดเล็กและไม่สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้ในการทดลองส่วนถัดไปจึงทำการพัฒนารูปแบบถังปฏิกรณ์การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF tank) ที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง (Continuous flow) และมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถรองรับน้ำในปริมาณที่มากขึ้นและบำบัดได้อย่างต่อเนื่อง โดยออกแบบรูปแบบของถังปฏิกรณ์เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 40 ลิตร และใช้แผ่นกั้น (Baffle) ในการแบ่งแยกระหว่างโซนสัมผัส (Contact zone) และโซนแยก (Separation zone) เพื่อให้ระบบสามารถทำการแยกสาหร่ายได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งแผ่นกั้นนี้จะส่งผลต่อเวลากัก รูปแบบการไหล และความปั่นป่วนของของไหลภายในถัง ดังนั้น ก่อนการใช้งานถังปฏิกรณ์จึงควรทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายเวลากัก (Residence time distribution, RTD) โดยการวิเคราะห์เทรเซอร์ (Tracer) เพื่อประเมินการกระจายเวลากักและรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ รวมถึงการทำนายรูปแบบการไหลด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยในการออกแบบ

รูปแบบของถังปฏิกริยาที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเกิดจุดอับ (Dead zone) หรือการไหลลัด (Bypassing) ของการไหลภายในถังปฏิกริยาที่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกลดลง และใช้โปรแกรม CFD ใช้ในการทวนสอบ (Validate) รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาและระยะเวลาที่กักที่ได้จากการวิเคราะห์ตามหลัก RTD จากนั้นพิจารณาเลือกรูปแบบถังที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

4.3 การออกแบบถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและศึกษารูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD

ถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF tank) ปรับปรุงจาก Radzuan et al. (2016) มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 25×60×40 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีปริมาตรน้ำระหว่างเดินระบบ 40 ลิตร โดยมีแนวทางการเดินระบบคือ น้ำไหลเข้าถังปฏิกริยา จากนั้นเข้าสู่โซนสัมผัส ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการเติมน้ำอัดความดันจะพองอากาศสาหร่ายลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ส่วนน้ำใสจะลอดผ่านแผ่นกั้นและไหลออกจากระบบ

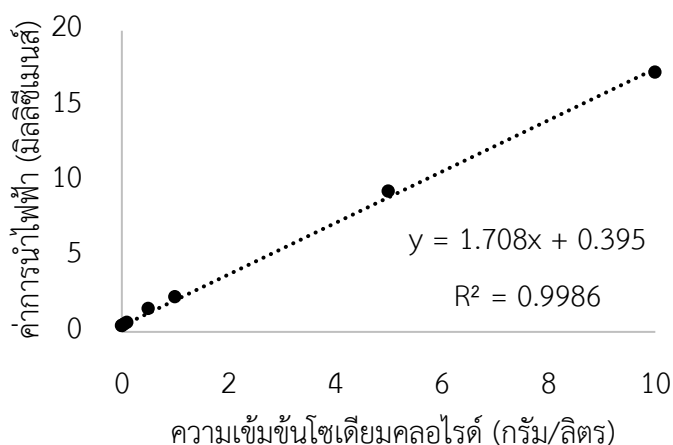


รูปที่ 4-20 ถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF tank) ขณะเดินระบบ

เมื่อทดสอบเดินระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย จากรูปที่ 4-20 สังเกตได้เบื้องต้นว่ารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเป็นไปตามที่ออกแบบคือ เกิดฟองอากาศขนาดเล็กและกระจายตัวทั่วบริเวณโซนสัมผัส รวมถึงมีฟองอากาศอยู่บริเวณผิวน้ำของโซนแยก แต่เนื่องจากรูปแบบการไหลอาจไม่เป็นไปตามสมมติฐาน เช่น การเกิดความปั่นป่วนของน้ำ รูปแบบการไหลที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการเกิดจุดอับ หรือการไหลลัด ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาก็ไม่ตรงกับที่ออกแบบไว้ ดังนั้น จึงทำการทดลองศึกษารูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD เพื่อประเมินรูปแบบการไหลและระยะเวลาที่ภายในถังปฏิกรณ์

4.3.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์และค่าการนำไฟฟ้า

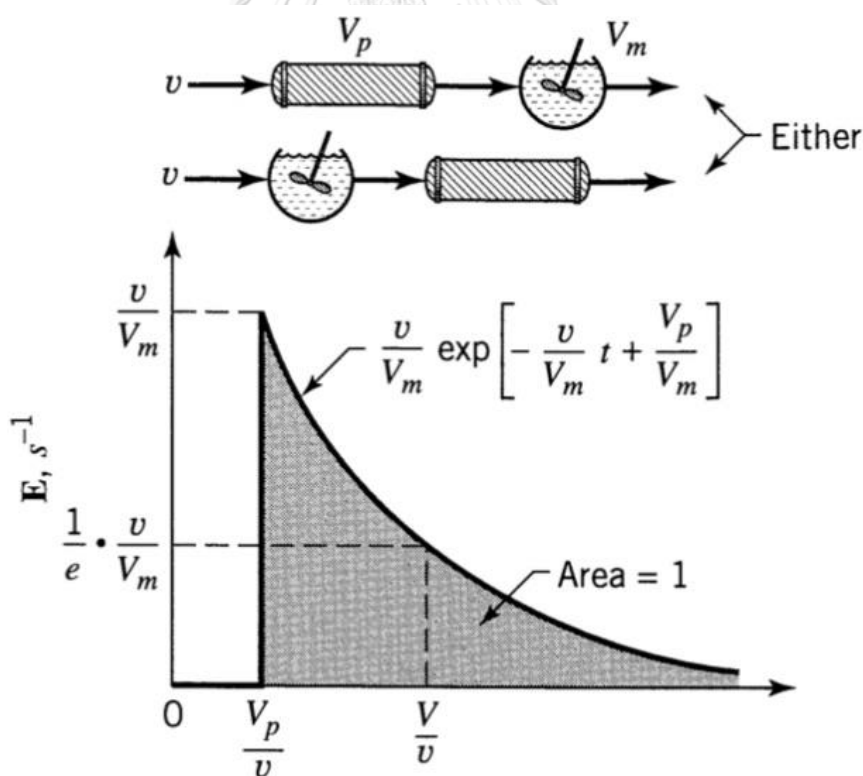
การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยหลักการ RTD ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารเทรเซอร์ โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์กับค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารโซเดียมคลอไรด์มีความสัมพันธ์กันเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น แสดงในรูปที่ 4-21 ดังสมการ $y = 1.708x + 0.395$ ($R^2 = 0.9986$) เมื่อ $y =$ ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนส์) และ $x =$ ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์ (กรัม/ลิตร) โดยสมการดังกล่าวใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์จากการวัดค่าการนำไฟฟ้า ดังนั้น ในการศึกษาการไหลด้วยหลักการ RTD โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารเทรเซอร์ จึงติดตามความเข้มข้นของสารเทรเซอร์จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าในน้ำด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) โดยติดตั้งโพรบ (Probe) บริเวณก่อนฝายน้ำล้นออกจากถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3-10



รูปที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์และค่าการนำไฟฟ้า

4.3.2 การออกแบบถังปฏิริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

ถังปฏิริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายออกแบบโดยการปรับรูปแบบของถังปฏิริยา ด้วยการเปลี่ยนความสูงของแผ่นกั้น (Baffle) (H) เท่ากับ 15 20 และ 25 เซนติเมตร ตำแหน่งการติดตั้งที่ส่งผลต่อความยาวของโซนสัมผัส (L) ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ 10 12 และ 14 เซนติเมตร และมุมของแผ่นกั้น (θ) เท่ากับ 45 60 และ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3-10 โดยพิจารณารูปแบบการไหลภายในถังปฏิริยาและระยะเวลาที่กักจากราฟฟังก์ชันการกระจายเวลากักรวมถึงหารูปแบบถังปฏิริยาที่เกิดจุดอับและการไหลลัดต่ำ ถังปฏิริยาที่ออกแบบควรมีการไหลในลักษณะของถังปฏิริยามีการไหลรูปแบบกวนสมบูรณ์ (โซนสัมผัส) ต่อกับรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาแบบท่อ (โซนแยก) ดังนั้น กราฟฟังก์ชันการกระจายเวลากัก็ได้จากการทดลองจึงควรจะคล้ายกับในรูปที่ 4-22 ซึ่งเป็น Compartment model ของถังปฏิริยามีการไหลรูปแบบกวนสมบูรณ์ต่อกับรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาแบบท่อ หรือมีรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาแบบท่อต่อกับถังปฏิริยามีการไหลรูปแบบกวนสมบูรณ์

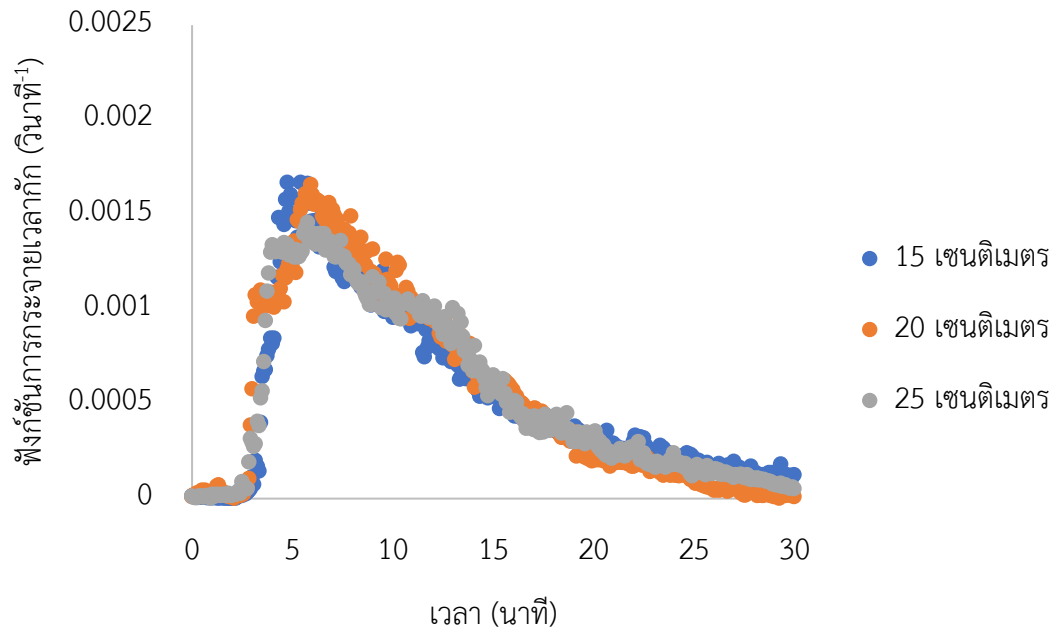


รูปที่ 4-22 Compartment model การไหลในถังปฏิริยาที่มีรูปแบบการไหลในถังปฏิริยาแบบกวนสมบูรณ์ต่อกับแบบท่อ หรือ รูปแบบการไหลในถังปฏิริยาแบบท่อต่อกับแบบกวนสมบูรณ์

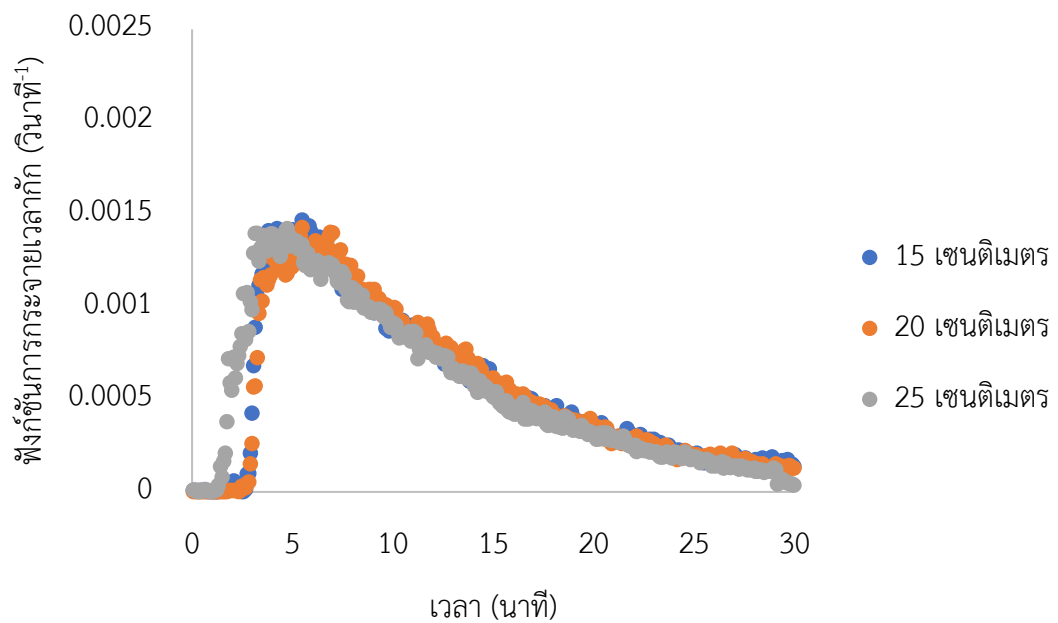
4.3.2.1 การเปลี่ยนความสูงของแผ่นกั้น

เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นโดยกำหนดตำแหน่งความยาวของโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร และมุมของแผ่นกั้น 90 องศา และเปลี่ยนความสูงของแผ่นกั้น พบว่า เมื่อใช้แผ่นกั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร กราฟฟังก์ชันการกระจายเวลากักที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-23 แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาล้ำยกัน ในขณะที่แผ่นกั้นความสูงมากที่สุดคือ 25 เซนติเมตร ค่าสูงสุดของฟังก์ชันการกระจายเวลากักน้อยกว่าที่ความสูงอื่น ๆ ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาแบบท่อ (Plug flow) ลดลง หรือมีรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ (Completely mixed flow) มากกว่าแผ่นกั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ เนื่องจากขณะเดินระบบเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร พบว่าบริเวณโซนสัมผัสสามารถกักพองไว้ได้หนาแน่นกว่าแผ่นกั้นความสูงอื่น

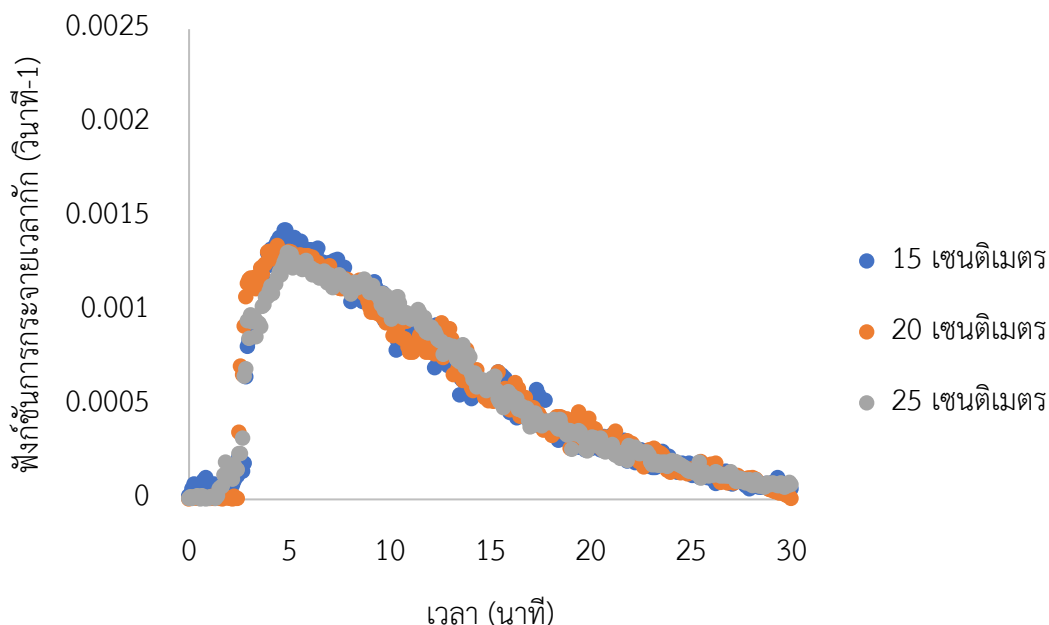
การเปลี่ยนความสูงของแผ่นกั้นทำให้อัตราการระน้ำขาเข้า (Hydraulic loading rate, HLR) โซนแยกเปลี่ยนไป เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 20 และ 25 เซนติเมตร อัตราการระน้ำขาเข้าจะเท่ากับ 4.8, 7.2 และ 14.4 เมตร/ชั่วโมง ตามลำดับ โดยค่าแนะนำการออกแบบถังปฏิกริยากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายของ Edzwald (1995) คือ อัตราการระน้ำขาเข้าควรอยู่ในช่วง 2.5 – 8 เมตร/ชั่วโมง ดังนั้น เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร ค่าสูงเกินกว่าช่วงแนะนำ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกของถังปฏิกริยา



รูปที่ 4-23 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิบัติการเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่ตำแหน่งความยาวของโชน สัมผัส 12 เซนติเมตร มุมของแผ่นกั้น 90 องศา ที่ความสูงของแผ่นกั้นต่าง ๆ



รูปที่ 4-24 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิบัติการเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่ตำแหน่งความยาวของโชน สัมผัส 12 เซนติเมตร มุมของแผ่นกั้น 60 องศา ที่ความสูงของแผ่นกั้นต่าง ๆ

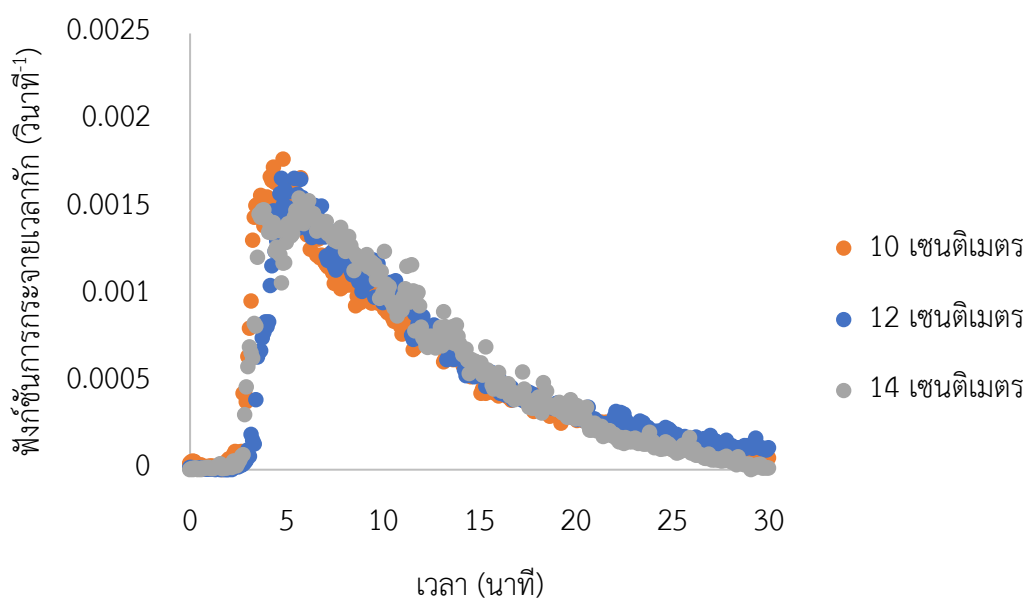


รูปที่ 4-25 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิบัติการเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่ตำแหน่งความยาวของโชนสัมผัส 12 เซนติเมตร มุมของแผ่นกั้น 45 องศา ที่ความสูงของแผ่นกั้นต่าง ๆ

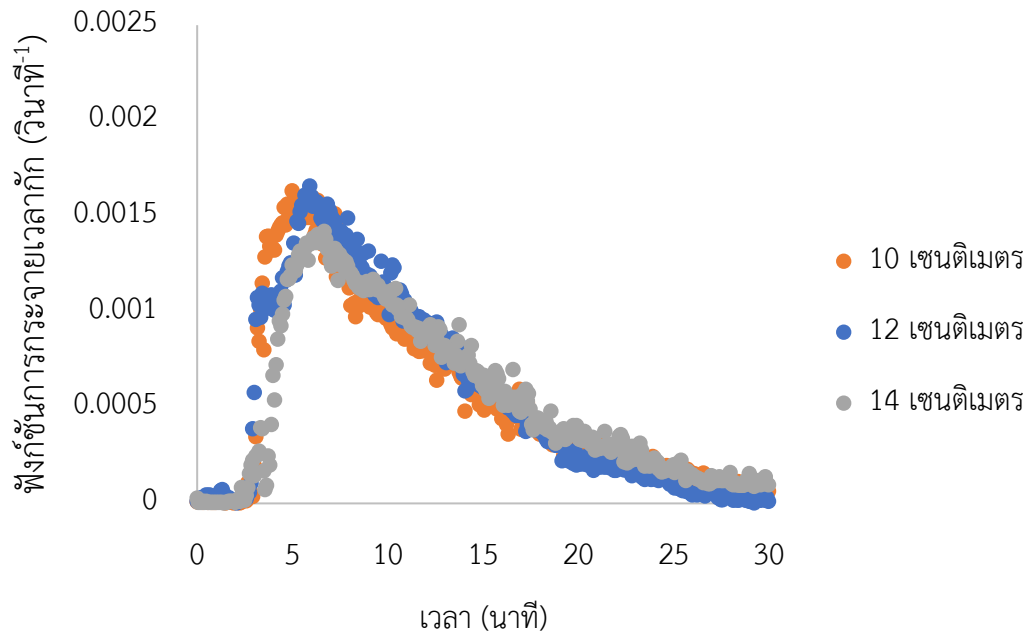
กราฟฟังก์ชันการกระจายเวลากักเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่ตำแหน่งความยาวของโชนสัมผัส 12 เซนติเมตร มุมของแผ่นกั้นเอียง เท่ากับ 45 และ 60 องศา และเปลี่ยนความสูงของแผ่นกั้น พบว่า กราฟที่ได้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนความสูงที่ติดตั้งแผ่นกั้นด้วยมุม 90 องศา กล่าวคือ แผ่นกั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร ลักษณะของกราฟใกล้เคียงกันมาก และแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร รูปแบบการไหลมีลักษณะเป็นการไหลในถังปฏิบัติการแบบกวนสมบูรณ์มากกว่าที่ความสูงอื่น ดังแสดงในรูปที่ 4-24 และ 4-25 โดยเมื่อมุมของการติดตั้งแผ่นกั้นเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลจะมีลักษณะเป็นการไหลในถังปฏิบัติการแบบกวนสมบูรณ์มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจาก การติดตั้งแผ่นกั้นเอียง ปริมาตรโชนสัมผัสในถังปฏิบัติการเพิ่มขึ้น ซึ่งพองขนาดเล็กที่เกิดจากการเติมน้ำอัดความดันส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำในบริเวณโชนสัมผัส

4.3.2.3 การเปลี่ยนความยาวของโซนสัมผัส

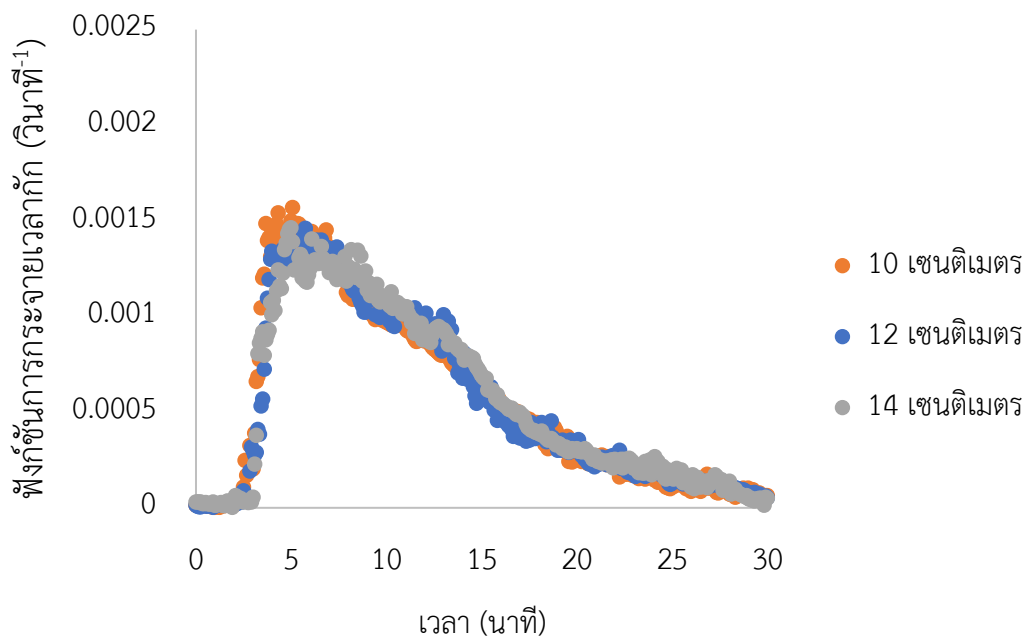
กราฟฟังก์ชันการกระจายเวลาเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 20 และ 25 เซนติเมตร ที่ความยาวโซนสัมผัสต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-26 ถึง 4-28 พบว่า รูปแบบของกราฟไม่ว่าจะเป็นเวลาที่ค่าเริ่มเพิ่มขึ้น ค่าสูงสุด รวมถึงแนวโน้มในการลดลงของค่าฟังก์ชันการกระจายเวลาก็ มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเปลี่ยนความยาวของโซนสัมผัส ไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในถังอย่างชัดเจน



รูปที่ 4-26 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร โดยติดตั้งที่ความยาวโซนสัมผัสต่าง ๆ

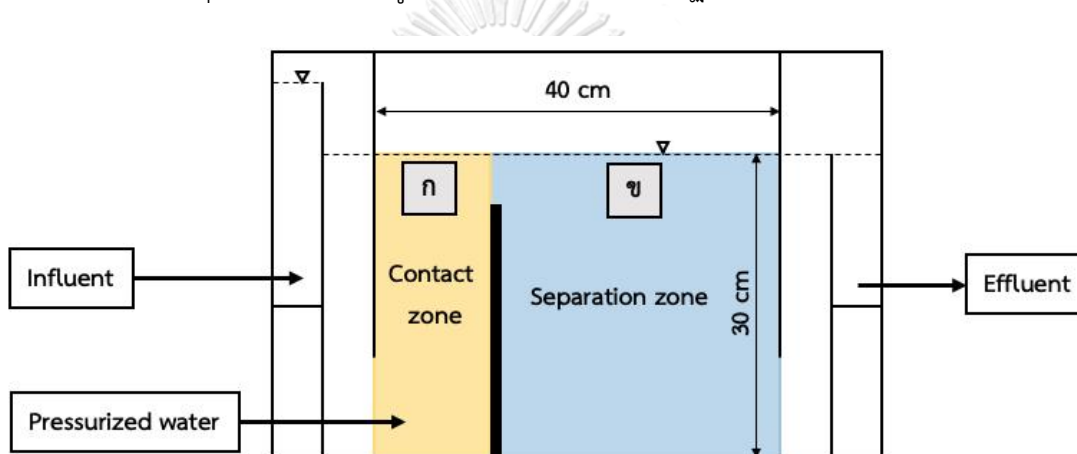


รูปที่ 4-27 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกริยาเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร โดยติดตั้งที่ความยาวไซนส์มีค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4-28 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกริยาเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร โดยติดตั้งที่ความยาวไซนส์มีค่าต่าง ๆ

การเปลี่ยนความยาวของโซนสัมผัสส่งผลให้เวลาในโซนสัมผัสแตกต่างกัน โดยความยาวของโซนสัมผัส 10 12 และ 14 เซนติเมตร เมื่ออัตราไหลน้ำ 3 ลิตร/นาที เวลาในโซนสัมผัสเท่ากับ 2.5 3 และ 3.5 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4-29 ซึ่งเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่ความยาวโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร ส่งผลให้เวลากักของโซนสัมผัสเท่ากับ 3 นาที ซึ่งอยู่ในช่วงค่าแนะนำการออกแบบถึงปฏิบัติการกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายของ Edzwald (1995) คือ ระยะเวลาที่ของโซนสัมผัสควรอยู่ในช่วง 1 - 4 นาที เพื่อให้สามารถแยกด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงใช้ตำแหน่งของการติดตั้งแผ่นกั้นที่ความยาวโซนสัมผัสเท่ากับ 12 เซนติเมตร และพิจารณาผลจากการเปลี่ยนมุมของแผ่นกั้นต่อรูปแบบการไหลภายในถึงปฏิบัติการต่อไป



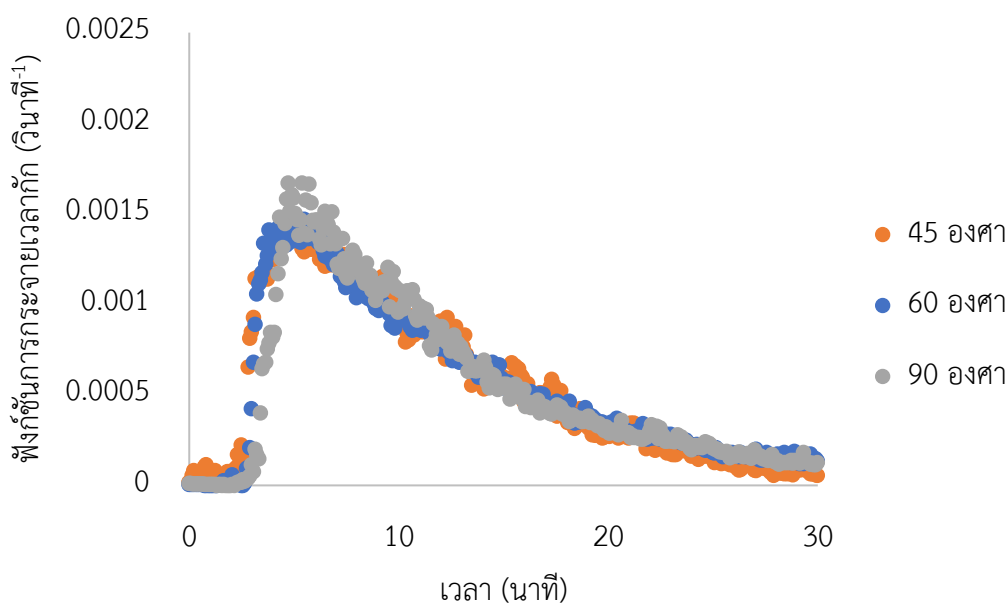
รูปที่ 4-29 ปริมาตรของถังปฏิบัติการที่ใช้ในการคำนวณเวลากักโดย (ก) โซนสัมผัส (ข) โซนแยก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

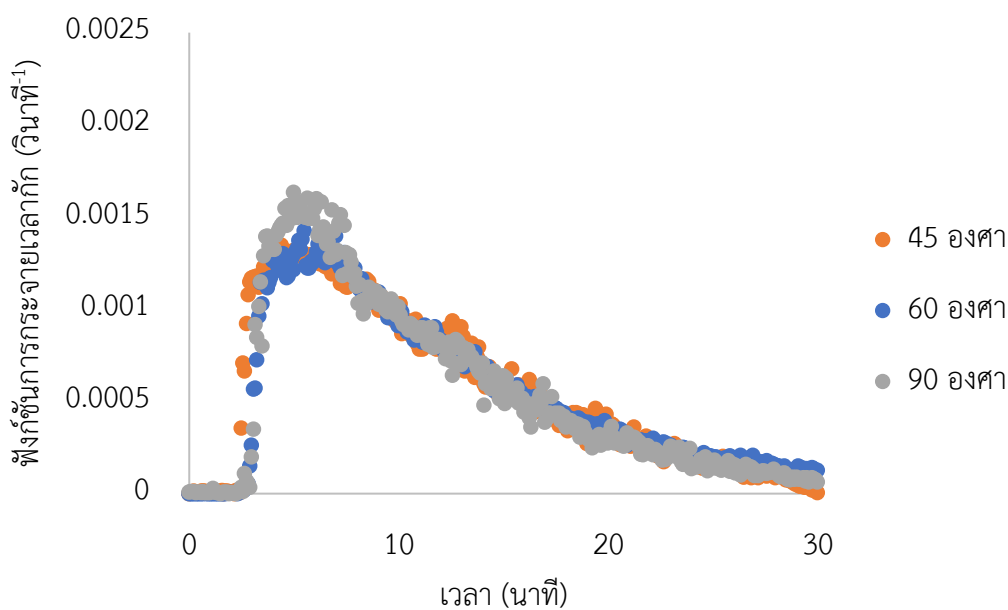
4.3.2.2 การเปลี่ยนมุมของแผ่นกั้น

จากรูปที่ 4-30 ถึง 4-32 กราฟฟังก์ชันการกระจายเวลากักที่ได้เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นทำมุม 45 60 และ 90 องศา ความสูงแผ่นกั้น 15 20 และ 25 เซนติเมตร พบว่า เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นเอียงทำมุม 45 องศา ซึ่งเป็นแผ่นกั้นที่มีความเอียงมากที่สุดและทำให้ปริมาตรของโซนสัมผัสสูงสุด ส่งผลให้ค่าสูงสุดของฟังก์ชันการกระจายเวลากักที่ความสูงแผ่นกั้นต่างกันมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับการติดตั้งแผ่นกั้นด้วยมุม 60 และ 90 องศา ซึ่งมีปริมาตรของโซนสัมผัสต่ำกว่า

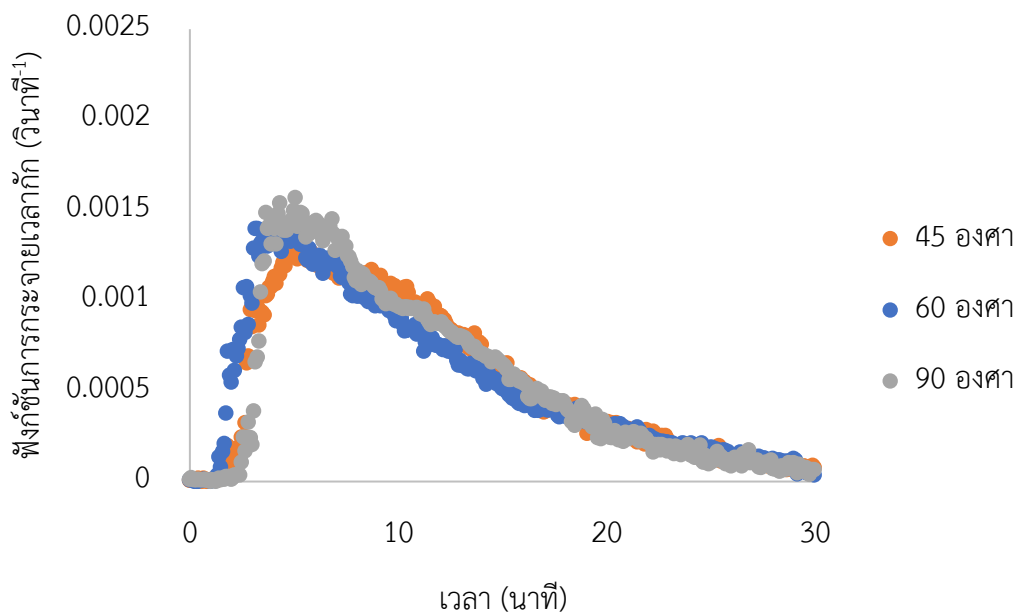
การติดตั้งแผ่นกั้นมุม 90 องศา ส่งผลให้ค่าสูงสุดของฟังก์ชันการกระจายเวลาก็มีแนวโน้มมากกว่าการติดตั้งแผ่นกั้นเอียง เนื่องจากการลดปริมาตรในโซนสัมผัส ส่งผลให้สามารถกักฟองอากาศไว้ภายในโซนสัมผัสได้ดีขึ้น



รูปที่ 4-30 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร ตำแหน่งความยาวของโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร ที่แผ่นกั้นมุมต่าง ๆ



รูปที่ 4-31 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร ตำแหน่งความยาวของโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร ที่แผ่นกั้นมุมต่าง ๆ



รูปที่ 4-32 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร ตำแหน่งความยาวของโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร ที่แผ่นกั้นมุมต่าง ๆ

4.3.3 การวิเคราะห์ผลการกระจายเวลากัก

ผลจากการปรับเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งของแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัส ไม่ว่าจะ เป็นความสูงมุม หรือความยาวของโซนสัมผัส กราฟฟังก์ชันการกระจายเวลากักที่ได้จากการทดลองมีรูปแบบใกล้เคียงกับ Compartment model ดังแสดงในรูปที่ 4-33 ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์มีการไหลรูปแบบกวนผสมต่อการกวนผสมแบบท่อ หรือมีการไหลรูปแบบท่อต่อกับรูปแบบการกวนผสม และมีจุดอับเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ (Octave Levenspiel, 1998) คำนวณปริมาตรของถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลรูปแบบต่าง ๆ ภายในถังปฏิกรณ์ได้จากกราฟโดยใช้สมการที่ 4-9

$$\bar{t}_{obs} = \frac{V_p + V_m}{v} \quad (4-9)$$

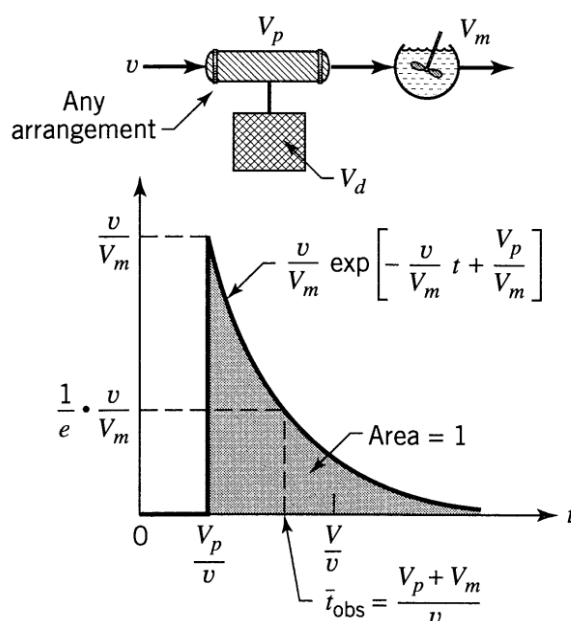
โดย \bar{t}_{obs} = ระยะเวลาที่เฉลี่ย (นาที)

V_p = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบท่อ (ลิตร)

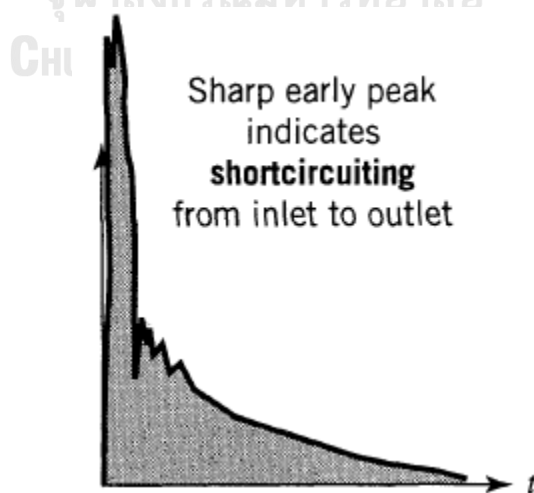
V_m = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบกวนผสม (ลิตร)

v = อัตราการไหลของน้ำ (ลิตรต่อนาที)

จากการคำนวณระยะเวลาที่เคลื่อนภายในถังปฏิกรณ์จากสมการที่ 4-9 พบว่าระยะเวลาที่เคลื่อนน้อยกว่าระยะเวลาที่ออกแบบไว้ เนื่องจากการเกิดจุดอับภายในถังปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงใช้ Compartment model ในรูปที่ 4-34 สำหรับอธิบายรูปแบบการไหลถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลรูปแบบกวนสมบูรณ์ต่อการกวนผสมแบบท่อ หรือมีการไหลรูปแบบท่อต่อกับรูปแบบการกวนสมบูรณ์ที่มีการเกิดจุดอับ



รูปที่ 4-33 Compartment model ถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลรูปแบบกวนสมบูรณ์ต่อการไหลรูปแบบท่อ หรือมีการไหลรูปแบบท่อต่อกับรูปแบบการกวนสมบูรณ์ โดยมีจุดอับเกิดขึ้นภายในถัง



รูปที่ 4-34 การเกิดการไหลลัด (Bypassing หรือ Shortcircuiting) ภายในถังปฏิกรณ์

จากการวิเคราะห์ปริมาตรรูปแบบการไหลดังแสดงในรูปที่ 4-35 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ปริมาตรของการไหลแต่ละรูปแบบที่ได้จากผลการทดลองและจากการคำนวณตามรูปแบบการไหลในอุดมคติตามที่ออกแบบถึงปฏิกิริยา พบว่าการไหลภายในถึงปฏิกิริยาในสภาวะจริงไม่เป็นไปตามอุดมคติ เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความปั่นป่วนภายในถึงปฏิกิริยา สมบัติการถ่ายเทความร้อน การแพร่ เป็นต้น ทำให้ของเหลวบางส่วนไหลออกจากถึงปฏิกิริยาเร็วกว่าระยะเวลาที่ได้ออกแบบไว้ หรือเกิดจุดอับขึ้นภายในถึงปฏิกิริยา

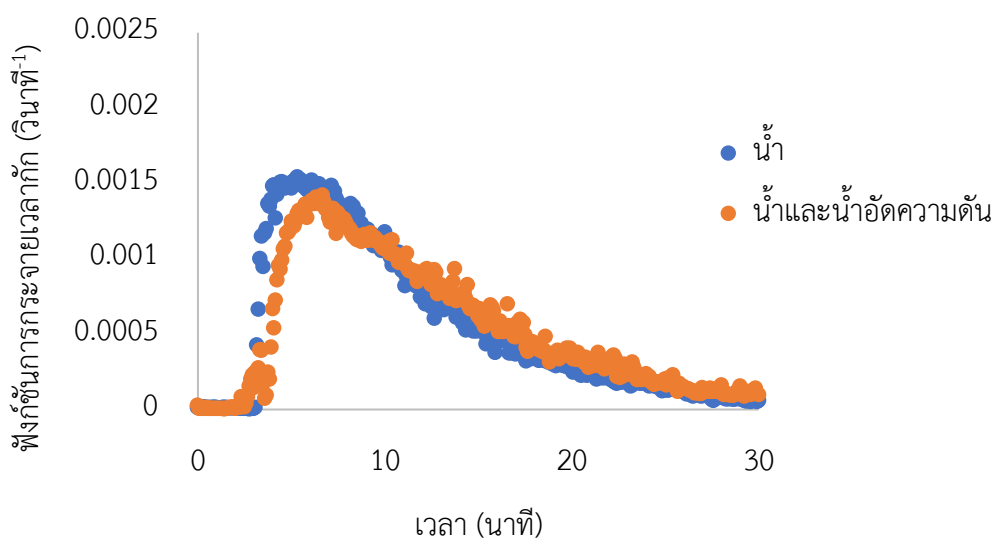
ในการศึกษารูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD เมื่อมีการปรับรูปแบบของถึงปฏิกิริยาด้วยการเปลี่ยนความสูงของแผ่นกั้น มุมของแผ่นกั้น และตำแหน่งการติดตั้งแผ่นกั้นที่ส่งผลต่อความยาวของโซนสัมผัส กราฟฟังก์ชันการกระจายเวลาก็คือที่ได้จากการทดลองมีรูปแบบที่คล้ายกัน กล่าวคือ ไม่ว่าจะติดตั้งแผ่นกั้นแบบใด รูปแบบการไหลภายในถึงปฏิกิริยาจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การไหลแบบกวนสมบูรณ์ 2) การไหลแบบท่อ และ 3) จุดอับ อีกทั้ง ไม่พบรูปแบบของกราฟที่มีลักษณะดังในรูปที่ 4-34 แสดงว่าไม่เกิดการไหลลัดขึ้นภายในถึงปฏิกิริยา โดยจากการทดลองรูปแบบการติดตั้งแผ่นกั้นที่เปลี่ยนไป จะส่งผลต่อปริมาตรของรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน การติดตั้งแผ่นกั้นเอียงทำมุม 45 และ 60 องศา มีแนวโน้มในการเกิดจุดอับมากกว่าการติดตั้งแผ่นกั้นมุม 90 องศา ปริมาตรการไหลรูปแบบกวนสมบูรณ์และแบบท่อในแต่ละการทดลองมีความใกล้เคียงกัน ในขณะที่แผ่นกั้นความยาว 25 เซนติเมตร ติดตั้งแผ่นกั้นเอียงด้วยมุม 45 และ 60 องศา ปริมาตรการไหลรูปแบบกวนสมบูรณ์ต่ำเมื่อเทียบกับการติดตั้งแผ่นกั้นในรูปแบบอื่นซึ่งเป็นผลมาจากการที่ปริมาตรโซนสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีพื้นที่ในการกระจายตัวสูง เกิดความปั่นป่วนน้อยลง ปริมาตรส่วนที่เป็นการไหลแบบกวนสมบูรณ์จึงลดลง ในถึงปฏิกิริยาจึงมีรูปแบบการไหลในถึงปฏิกิริยาแบบท่อเป็นหลัก อีกทั้ง การติดตั้งแผ่นกั้นความยาว 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา ส่งผลให้ปริมาตรการไหลรูปแบบกวนสมบูรณ์ภายในถึงปฏิกิริยาสูงกว่าแผ่นกั้นความยาว 15 และ 20 เซนติเมตร เนื่องจากความสูงของแผ่นกั้นที่เพิ่มขึ้นจะช่วยกักฟองอากาศให้อยู่ภายในโซนสัมผัส

ตารางที่ 4-7 ระยะเวลาที่แก๊สเฉลี่ยของถังปฏิกรณ์เมื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งของแผ่นกั้น

ความสูงแผ่นกั้น (เซนติเมตร)	รูปแบบการติดตั้ง		ระยะเวลาที่แก๊สเฉลี่ย (นาที)	ปริมาตรจุดอับ (ลิตร)
	มุม (องศา)	ความยาวโซนสัมผัส (เซนติเมตร)		
15	45	12	10.98	7.1
	60	12	9.68	11.0
	90	12	11.93	4.2
	90	10	10.94	7.2
	90	14	10.54	8.4
20	45	12	10.91	7.3
	60	12	11.65	5.1
	90	12	10.34	9.0
	90	10	11.06	6.8
	90	14	12.50	2.5
25	45	12	11.30	6.1
	60	12	10.58	8.3
	90	12	11.45	5.6
	90	10	10.84	7.5
	90	14	11.23	6.3

การเกิดจุดอับภายในถังปฏิกรณ์ส่งผลให้ระยะเวลาที่แก๊สเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่าที่ออกแบบ โดยถังปฏิกรณ์การทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีปริมาตร 40 ลิตร เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 3 ลิตร ต่อนาที ระยะเวลาที่แก๊สเฉลี่ยภายในถังควรจะเท่ากับ 13 นาที การคำนวณระยะเวลาที่แก๊สเฉลี่ยจากกราฟ ฟังก์ชันการกระจายเวลาแก๊ส (สมการที่ 2-13) เมื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งของแผ่นกั้น แสดงใน ตารางที่ 4-7 พบว่าระยะเวลาที่แก๊สเฉลี่ยที่คำนวณได้ของการติดตั้งแผ่นกั้นรูปแบบต่าง ๆ มีค่าน้อยกว่า ระยะเวลาที่แก๊สเฉลี่ยจริงของถังปฏิกรณ์ เนื่องจากมีการเกิดจุดอับขึ้นภายในถัง โดยรูปแบบของการติดตั้ง แผ่นกั้นที่ส่งผลให้เกิดจุดอับต่ำสุดคือ การติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร ความยาวของโซน สัมผัส 14 เซนติเมตร ซึ่งทำให้เกิดจุดอับเพียง 2.5 ลิตร หรือคิดเป็น 6.21 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรถัง ปฏิกรณ์

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4-36 เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร ความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร และมุม 90 องศา ด้วยการเดินระบบโดยใช้น้ำเทียบกับการเดินระบบด้วยน้ำร่วมกับการเติมอากาศด้วยน้ำอัดความดัน พบว่า ลักษณะกราฟฟังก์ชันการกระจายเวลาก็ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยเมื่อพิจารณาจากปริมาตรของถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบท่อและแบบกวนสมบรูณ์ ดังแสดงในตารางที่ 4-8 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่เดินระบบด้วยน้ำร่วมกับการเติมน้ำอัดความดัน ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบกวนสมบรูณ์ลดลงส่งผลให้มีปริมาตรของถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบท่อมกขึ้น รวมถึงการเกิดจุดอับลดลงจาก 17.63 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 6.21 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งในการเดินระบบถังปฏิกรณ์การทำให้ลอยด้วยอากาศละลายด้วยการเติมอากาศด้วยน้ำอัดความดัน ฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะพาอนุภาคสาหร่ายลอยขึ้นสู่ผิวน้ำซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายของถังปฏิกรณ์อีกด้วย



รูปที่ 4-36 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักของถังปฏิกรณ์เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร ความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร และมุม 90 องศา

ตารางที่ 4-8 ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลแบบท่อ (Vp) แบบกวนสมบรูณ์ (Vm) และจุดอับเมื่อเดินระบบด้วยน้ำเทียบกับการเดินระบบด้วยน้ำและน้ำอัดความดัน

การเดินระบบ	Vp (ลิตร)	Vm (ลิตร)	ปริมาตรจุดอับ (ลิตร)	จุดอับ (เปอร์เซ็นต์)
น้ำและน้ำอัดความดัน	19.75	17.76	2.49	6.21
น้ำ	16.00	21.97	7.05	17.63

จากการออกแบบถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและศึกษา รูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD พบว่า เมื่อพิจารณาจากระยะเวลากักเฉลี่ย ปริมาตรของการไหล รูปแบบกวนสมบูรณ์ การไหลรูปแบบท่อ และจุดอับ เมื่อปรับเปลี่ยนความสูงของแผ่นกั้น มุมการ ติดตั้งแผ่นกั้น และความยาวของโซนสัมผัสพบว่า การติดตั้งแผ่นกั้นด้วยมุม 90 องศา มีโอกาสเกิดจุด อับต่ำกว่าการติดตั้งแผ่นกั้นมุม 45 และ 60 องศา ส่งผลให้ระยะเวลาที่กักเฉลี่ยของการติดตั้งแผ่นกั้น แผ่นกั้นด้วยมุม 90 องศา ใกล้เคียงกับระยะเวลาที่ออกแบบ ส่วนความยาวของโซนสัมผัสและความสูง ของแผ่นกั้น ทำให้เกิดจุดอับแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย การเกิดจุดอับทำให้ไม่สามารถใช้งานถัง ปฏิกริยาได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และยังทำให้ของเหลวบางส่วนตกค้าง สะสมอยู่ภายในถังปฏิกริยา นานเกินกว่าระยะเวลาที่กัก ซึ่งส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของระบบ อีกทั้ง ถังปฏิกริยาการทำให้ลอย ด้วยอากาศละลายที่ออกแบบ ไม่ว่าจะติดตั้งแผ่นกั้นในรูปแบบใด รูปแบบการไหลภายในถังก็มีความ คล้ายกัน คือ มีทั้งการไหลแบบกวนสมบูรณ์และการไหลแบบท่อ และไม่พบการไหลลัดภายในถัง ปฏิกริยา

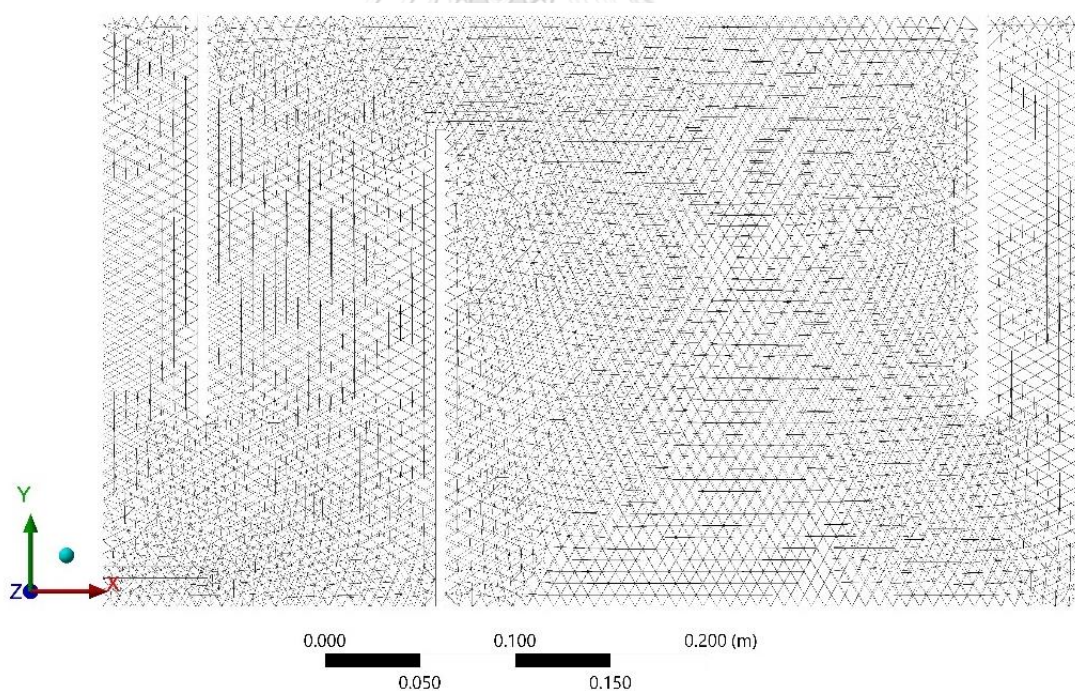
นอกจากการเกิดจุดอับแล้วในการออกแบบถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายแบ่ง ออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ โซนสัมผัสและโซนแยก โดยรูปแบบการไหลที่เหมาะสมภายในถังปฏิกริยา คือ โซนสัมผัสควรมีการกระจายตัวของอากาศ หรือความปั่นป่วนสูงเพื่อเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกัน ระหว่างฟองอากาศและอนุภาคสหาร่าย หรือมีรูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ ส่วน โซนแยกควรมีการกระจายตัวของอากาศต่ำ เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนภายในโซนแยกน้อย หรือมี รูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาแบบท่อ ของเหลวจะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดอย่างสม่ำเสมอและ ต่อเนื่อง ทำให้ไม่เกิดความปั่นป่วนตามแนวการไหล ซึ่งจะส่งผลให้สหาร่ายถูกแยกและลอยอยู่บริเวณ ผิวหน้าได้ ส่วนน้ำที่เป็นผ่านการแยกสหาร่ายแล้วจะไหลออกจากถังปฏิกริยา แต่เนื่องจากข้อจำกัดของ การศึกษาด้วยหลักการ RTD ที่ไม่สามารถบ่งชี้ได้อย่างชัดเจนถึงรูปแบบการไหล การกระจายตัวของ อากาศ และความปั่นป่วนของน้ำในแต่ละโซนภายในถังปฏิกริยา จึงดำเนินการศึกษารูปแบบการไหล ภายในถังปฏิกริยาด้วยโปรแกรม CFD เพื่อสอบเทียบกับการศึกษารูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD รวมถึงบ่งชี้การกระจายตัวของอากาศและความปั่นป่วนของน้ำภายในถังปฏิกริยาอย่างชัดเจน

4.4 การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยาด้วยโปรแกรม CFD

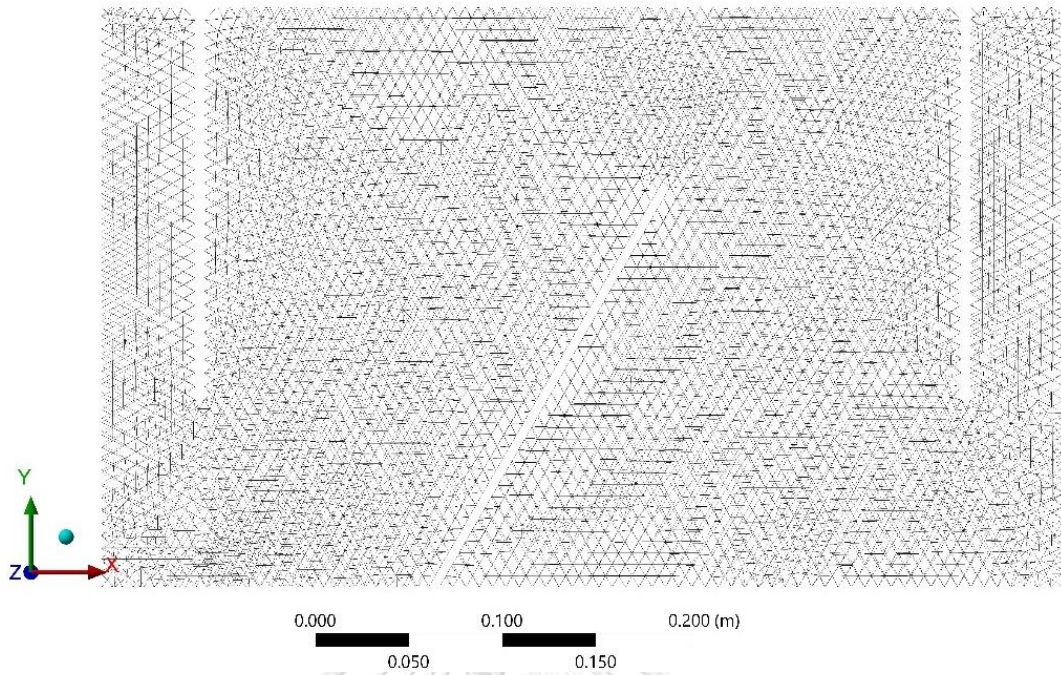
การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกิริยาด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) โดยใช้โปรแกรม ANSYS Student 2019 R1 ซึ่งผลที่ได้ นั้นเป็นค่าประมาณจะใกล้เคียงความจริงมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับการแบ่ง Mesh และการ กำหนดค่าต่าง ๆ ในแบบจำลอง

4.4.1 Mesh

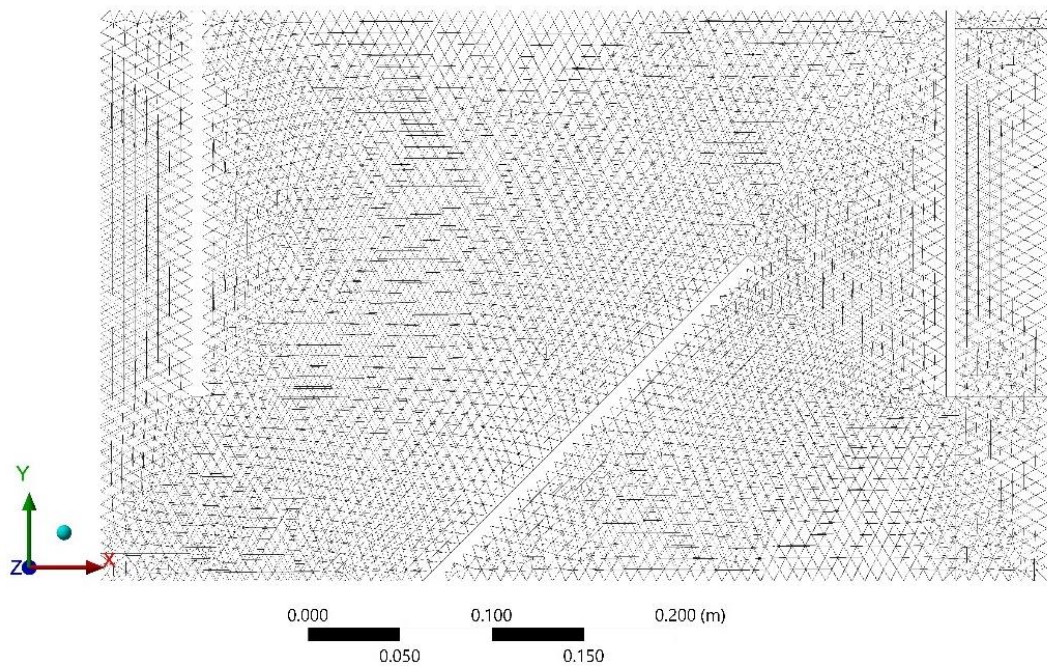
การแบ่ง Mesh ภายในถังปฏิกิริยาเพื่อศึกษารูปแบบการไหล แสดงในรูปที่ 4-36 ถึง 4-38 โดยแต่ละ Mesh มีขนาด 7.25 มิลลิเมตร จำนวน Mesh อยู่ในช่วง 481,861 – 485,531 Elements เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมที่ไม่สามารถทำงานได้ในกรณีที่มีจำนวน Mesh เกิน 512,000 Elements



รูปที่ 4-37 การแบ่ง Mesh ภายในถังปฏิกิริยาที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา



รูปที่ 4-38 การแบ่ง Mesh ภายในถังปฏิกิริยาที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 60 องศา



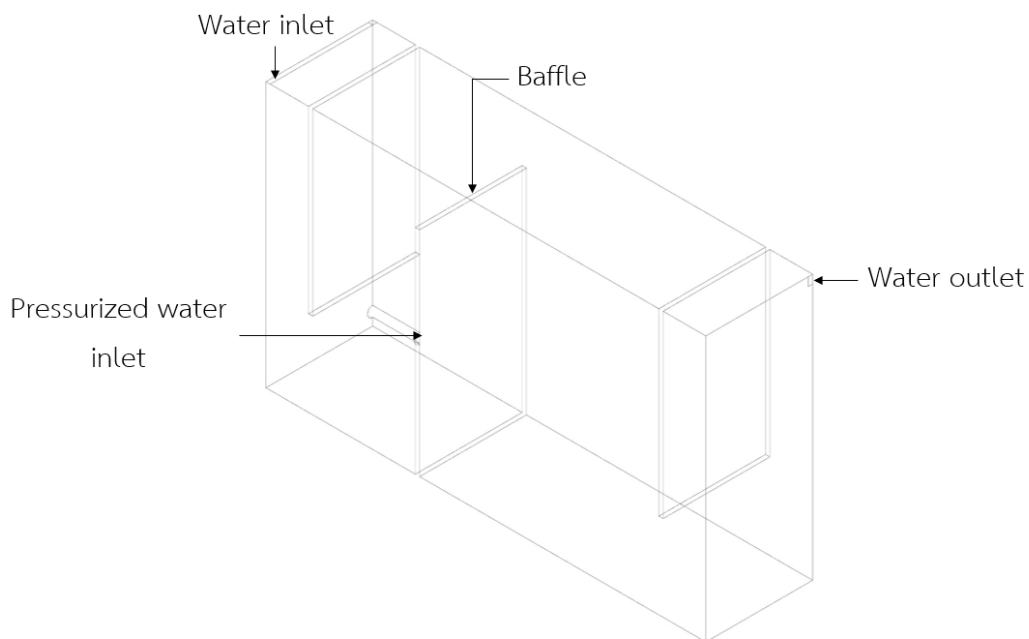
รูปที่ 4-39 การแบ่ง Mesh ภายในถังปฏิกิริยาที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 45 องศา

4.4.2 การตั้งค่าแบบจำลอง

กำหนดตัวแปรและแบบจำลองที่ใช้ในตารางที่ 4-8 ใช้แบบจำลองหลายเฟส (Eulerian) โดยวิธีการศึกษาที่เลือกใช้ปรับปรุงจาก Rodrigues และ Bettga (2018) กำหนดขอบเขตของการไหลในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ทางเข้าน้ำ (Water inlet) ทางเข้าน้ำอัดความดัน (Pressurized water inlet) และทางน้ำออก (Water outlet) ดังแสดงในรูปที่ 4-39 และสภาวะการทำงานของขอบเขตต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 แบบจำลอง (Model) และพารามิเตอร์สำหรับการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม CFD

ข้อมูล	วิธีการศึกษา
แบบจำลองหลายเฟส (Mutiphase model)	Eulerian
แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model)	Realizable k- ϵ
แบบจำลองแรงต้าน (Drag model)	Universal Drag
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity)	9.81 เมตรต่อวินาที ²
แรงตึงผิว (Surface tension)	0.072 นิวตันต่อเมตร
เกรเดียนท์ (Gradient)	Least squares cell based
ความดัน (Pressure)	PRESTO!
โมเมนตัม (Momentum)	First order upwind
อัตราส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction)	First order upwind
พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent kinetic energy)	First order upwind
อัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน (Turbulent dissipation rate)	First order upwind



รูปที่ 4-40 การกำหนดขอบเขต (Boundary) ของถังปฏิกิริยา

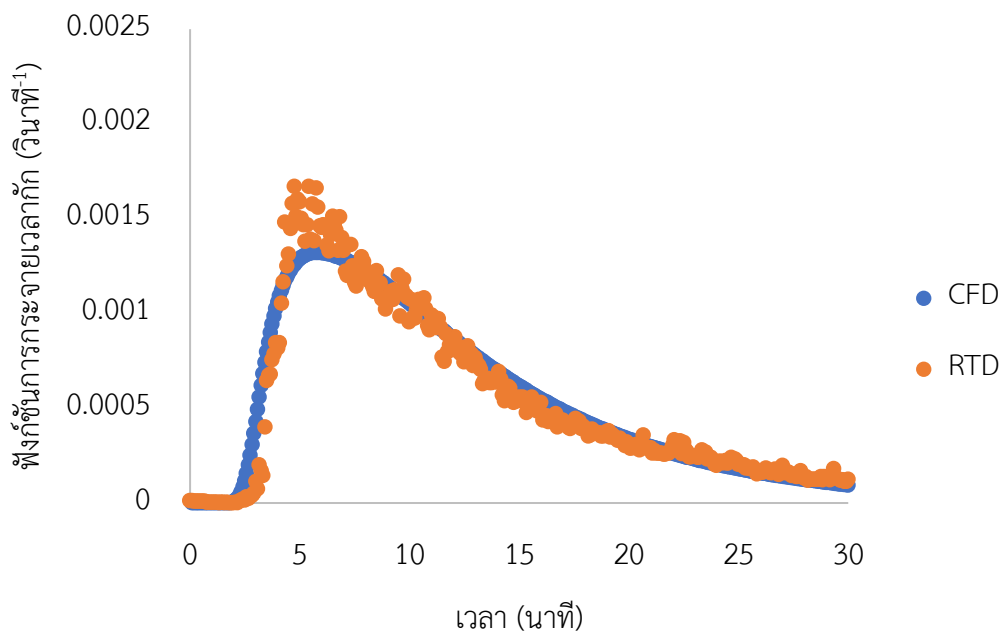
ตารางที่ 4-10 ขอบเขตและสภาวะการทำงานของแบบจำลอง (Operation and boundary conditions)

Variable	Boundary condition	Value
Water inlet	Mass flow inlet	0.019 กิโลกรัม/วินาที
Pressurized water inlet		
- Water	Mass flow inlet	0.0042 กิโลกรัม/วินาที
- Air	Mass flow inlet	3.8×10^{-7} กิโลกรัม/วินาที
- Volume fraction	-	0.06
Water outlet	Outflow	-
Bubble size	-	75 ไมครอน
Walls and Baffles	Wall	-
Surface of DAF tank	Degassing condition	-

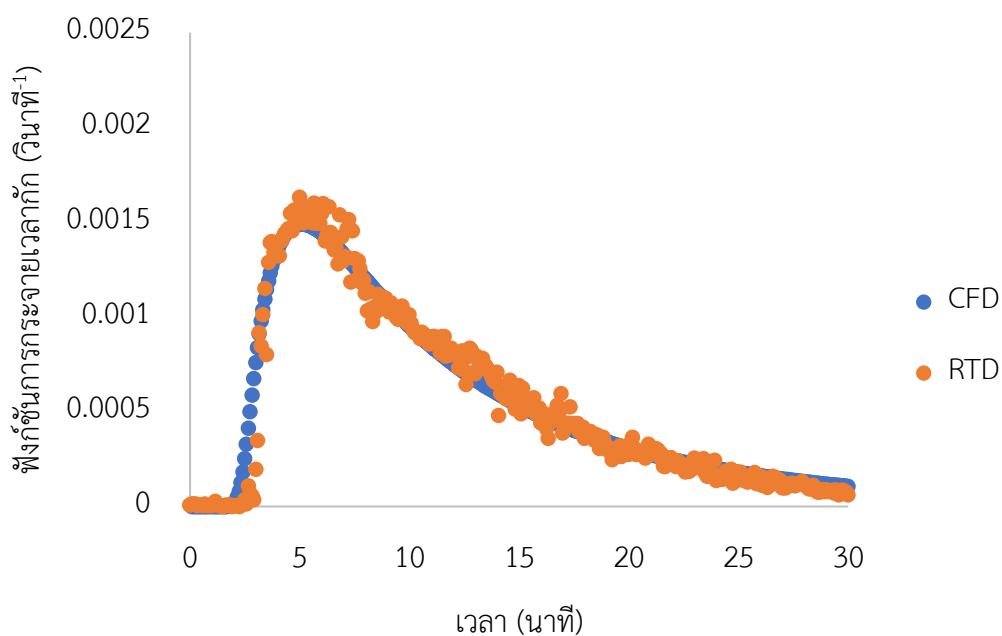
4.4.3 การสอบเทียบรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยหลักการ RTD จากการทดลองและการจำลองด้วยโปรแกรม CFD

การใช้โปรแกรม CFD ในการศึกษาแบบการไหลโดยการจำลอง (Simulation) กราฟฟังก์ชันการกระจายเวลากัก (E curve) เปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยหลักการ RTD โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นสารเทรเซอร์ เพื่อสอบเทียบ (Validate) ผลการศึกษาที่ได้จากการใช้โปรแกรม CFD และจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาการศึกษาฟังก์ชันการกระจายเวลากักและระยะเวลาที่เฉลี่ย

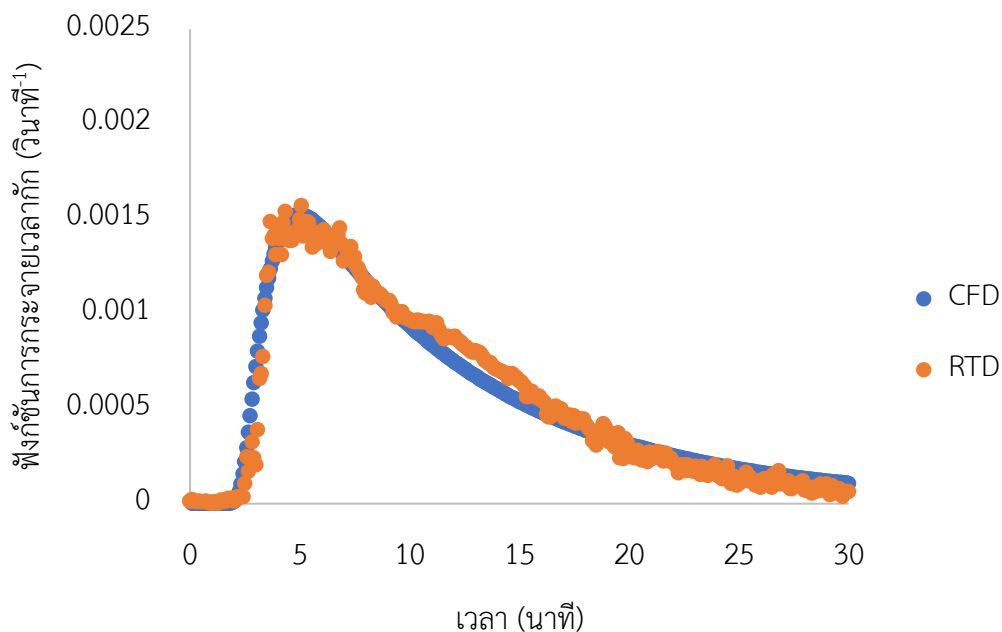
รูปแบบการติดตั้งของแผ่นกั้นที่ใช้ในการสอบเทียบคือ การติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 20 และ 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา และการติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร เอียงทำมุม 45 และ 60 องศาในแนวระนาบ จากรูปที่ 4-40 ถึง 4-44 พบว่าฟังก์ชันการกระจายเวลากักที่ได้จากการทดสอบด้วยหลักการ RTD และจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD มีความใกล้เคียงกันมาก เช่นเดียวกันกับระยะเวลาที่คำนวณจากการทดลอง RTD และระยะเวลาที่จากแบบจำลอง CFD พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ต่ำเพียง 0.34-5.61 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4-10 แสดงว่า ค่าที่ได้จากการจำลองมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองและตัวแปรสำหรับการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม CFD ตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4-8 และ 4-9 ในการศึกษาแนวทางการไหลของน้ำ การกระจายตัวของอากาศ และความปั่นป่วนของน้ำในแต่ละโซนภายในถังปฏิกรณ์



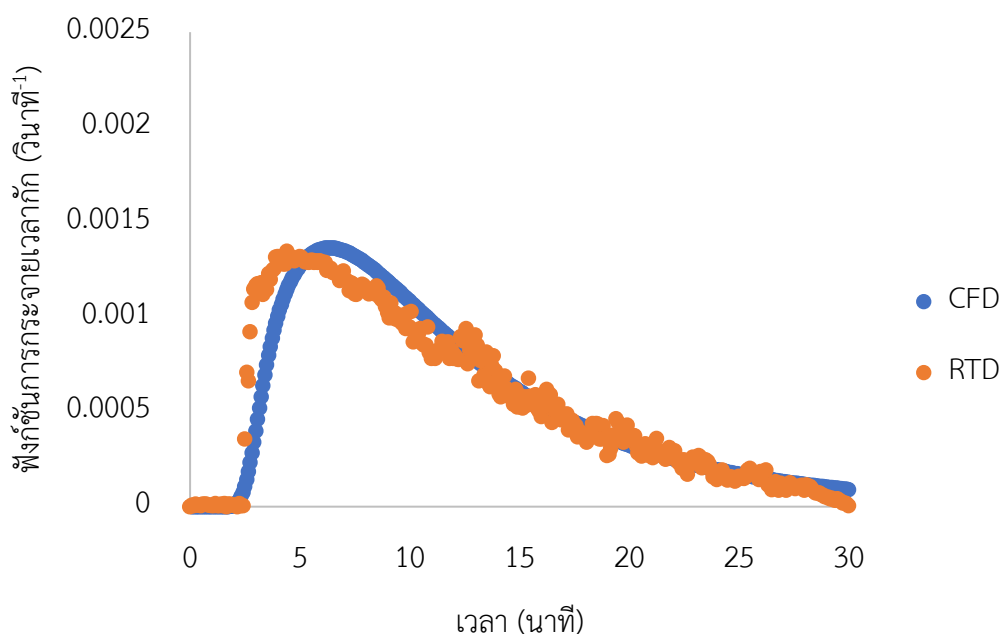
รูปที่ 4-41 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นมุม 90 องศา ความสูง 15 เซนติเมตร



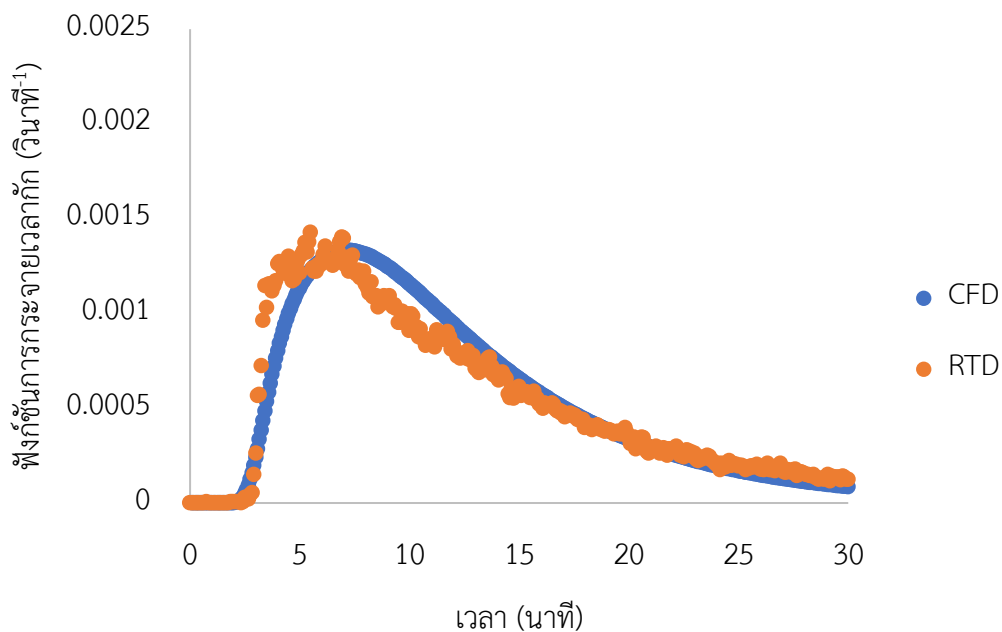
รูปที่ 4-42 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นมุม 90 องศา ความสูง 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4-43 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นมุม 90 องศา ความสูง 25 เซนติเมตร



รูปที่ 4-44 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร เอียงทำมุม 45 องศา



รูปที่ 4-45 ฟังก์ชันการกระจายเวลากักจากการทดลองด้วยหลักการ RTD เทียบกับจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร เอียงทำมุม 60 องศา

ตารางที่ 4-11 เปรียบเทียบระยะเวลาที่เฉลี่ยของถังปฏิกริยาจากการทดลอง RTD และแบบจำลอง CFD เมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งและความสูงของแผ่นกั้น

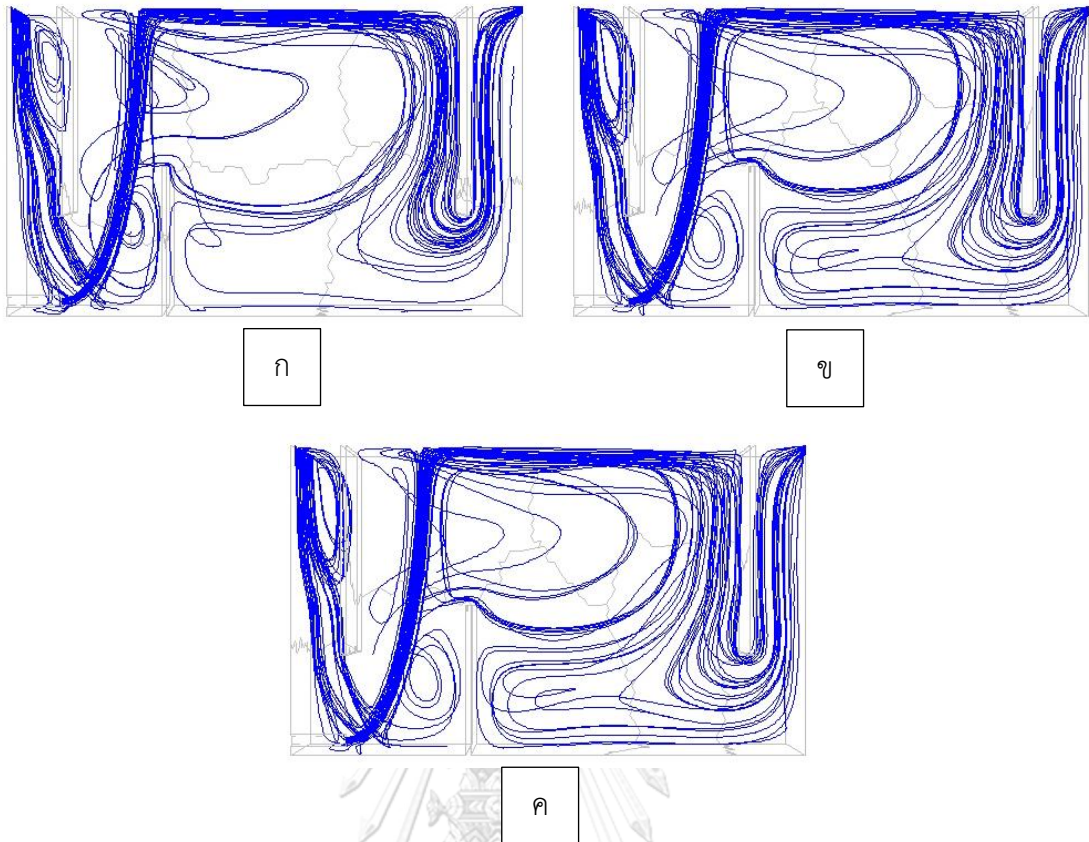
ความสูงแผ่นกั้น (เซนติเมตร)	มุม (องศา)	ระยะเวลาที่เฉลี่ย (นาที)		ความคลาดเคลื่อน (%)
		การทดลอง RTD	แบบจำลอง CFD	
15	90	11.93	11.47	3.86
	45	10.91	11.38	4.31
20	60	11.65	11.69	0.34
	90	10.34	10.92	5.61
25	90	11.45	10.96	4.28

4.4.4 การวิเคราะห์ถึงปฏิกริยาด้วยโปรแกรม CFD

4.4.4.1 แนวทางการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยา

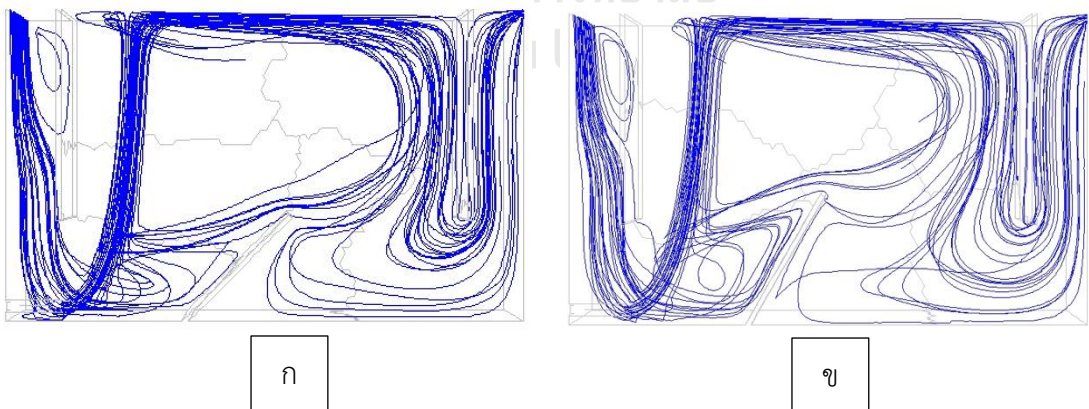
การศึกษาแนวทางการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาจากเส้นสีน้ำเงินจะเห็นว่าแนวทางการไหลหลักของน้ำ คือ น้ำที่เข้ามาจากบริเวณทางเข้าด้านบนไหลผ่านแผ่นกั้นแผ่นแรกเข้าสู่โซนสัมผัสและไหลไปพร้อมกับอากาศที่เกิดจากการเติมน้ำอัดความดันขึ้นสู่บริเวณด้านบนของโซนสัมผัสและไหลเข้าสู่บริเวณผิวหน้าของโซนแยก จากนั้น น้ำจะไหลตามแนวแผ่นกั้นแผ่นสุดท้ายและไหลออกจากถังปฏิกริยาไป และยังมีน้ำบางส่วนที่มีแนวทางการไหลไปในบริเวณอื่นด้วยซึ่งจะขึ้นกับการปรับเปลี่ยนรูปแบบการติดตั้งแผ่นกั้น ส่วนในบริเวณที่เป็นสีขาวคือ เป็นบริเวณที่น้ำไม่ไหลผ่าน หรือเกิดจุดอับขึ้น

เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร และเปลี่ยนการติดตั้งแผ่นกั้นที่ความยาวโซนสัมผัส 10 – 14 เซนติเมตร แสดงในรูปที่ 4-45 พบว่าแนวทางการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยในโซนสัมผัสแนวทางการไหลของน้ำมีความปั่นป่วนมากขึ้นเล็กน้อยตามความยาวโซนสัมผัสที่มากขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อแนวทางการไหลหลักมากนัก ในส่วนของการติดตั้งแผ่นกั้นเอียงทำมุม 45 และ 60 องศา แสดงในรูปที่ 4-46 จะเห็นว่าไม่มีน้ำไหลผ่านบริเวณตรงกลางที่อยู่เหนือแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัสและโซนแยก ซึ่งคาดว่าเป็นบริเวณที่มีการเกิดจุดอับ



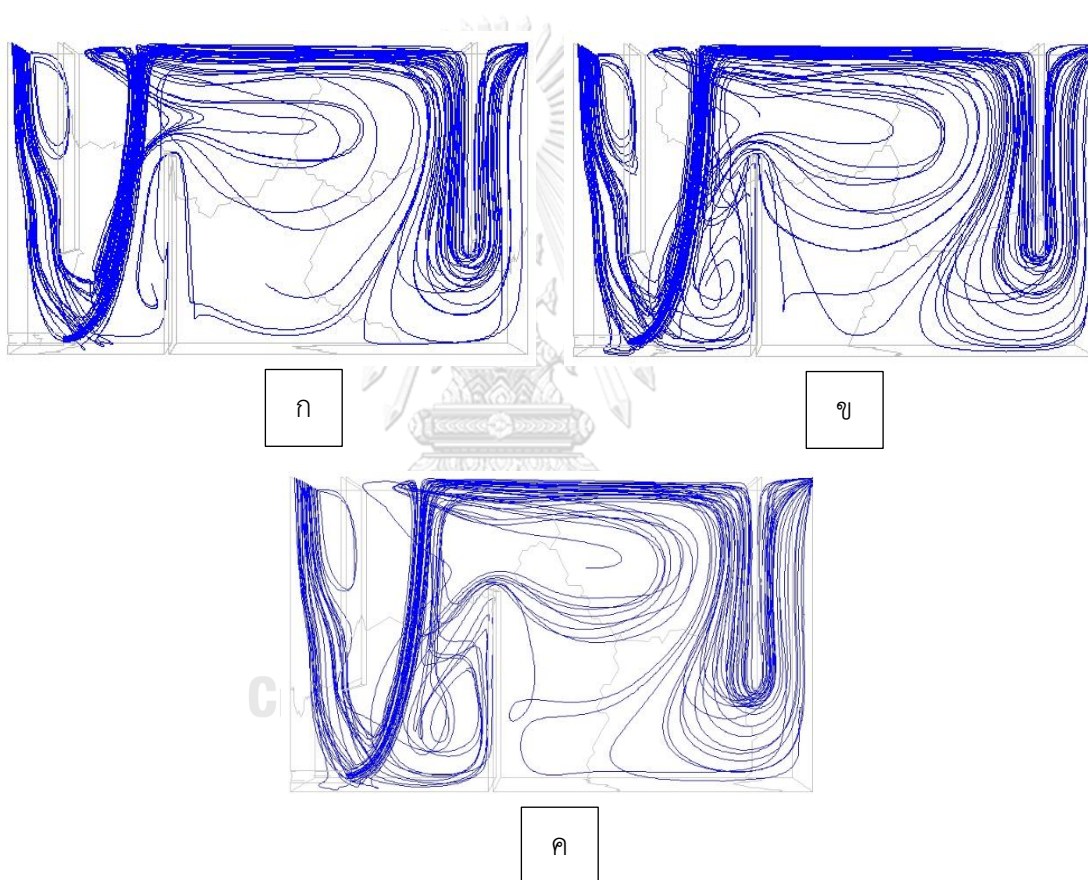
รูปที่ 4-46 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิบัติการที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส (ก) 10 เซนติเมตร (ข) 12 เซนติเมตร และ (ค) 14 เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

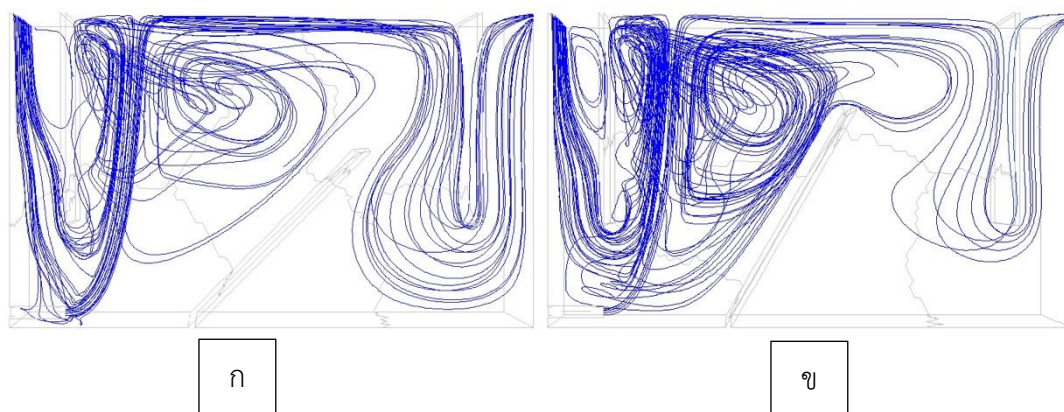


รูปที่ 4-47 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิบัติการที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร ความยาวโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร มุม (ก) 45 องศา และ (ข) 60 องศา

การติดตั้งแผ่นกันความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และเปลี่ยนความยาวของโซนสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 4-47 แนวทางการไหลของน้ำแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อปรับมุมการติดตั้งแผ่นกันเอียงด้วยมุม 45 และ 60 องศา พบว่าแนวทางการไหลของน้ำในโซนสัมผัสมีการกระจายตัวมากกว่าการติดตั้งแผ่นกันมุม 90 องศา โดยในรูปที่ 4-48 (ก) เมื่อติดตั้งแผ่นกันเอียงทำมุม 45 องศา แนวทางการไหลของน้ำมีแนวโน้มกระจายตัวมากกว่าการติดตั้งแผ่นกันเอียงทำมุม 60 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4-48 (ข) แนวทางการไหลของน้ำมีความหนาแน่นอยู่ในโซนสัมผัสมากกว่า



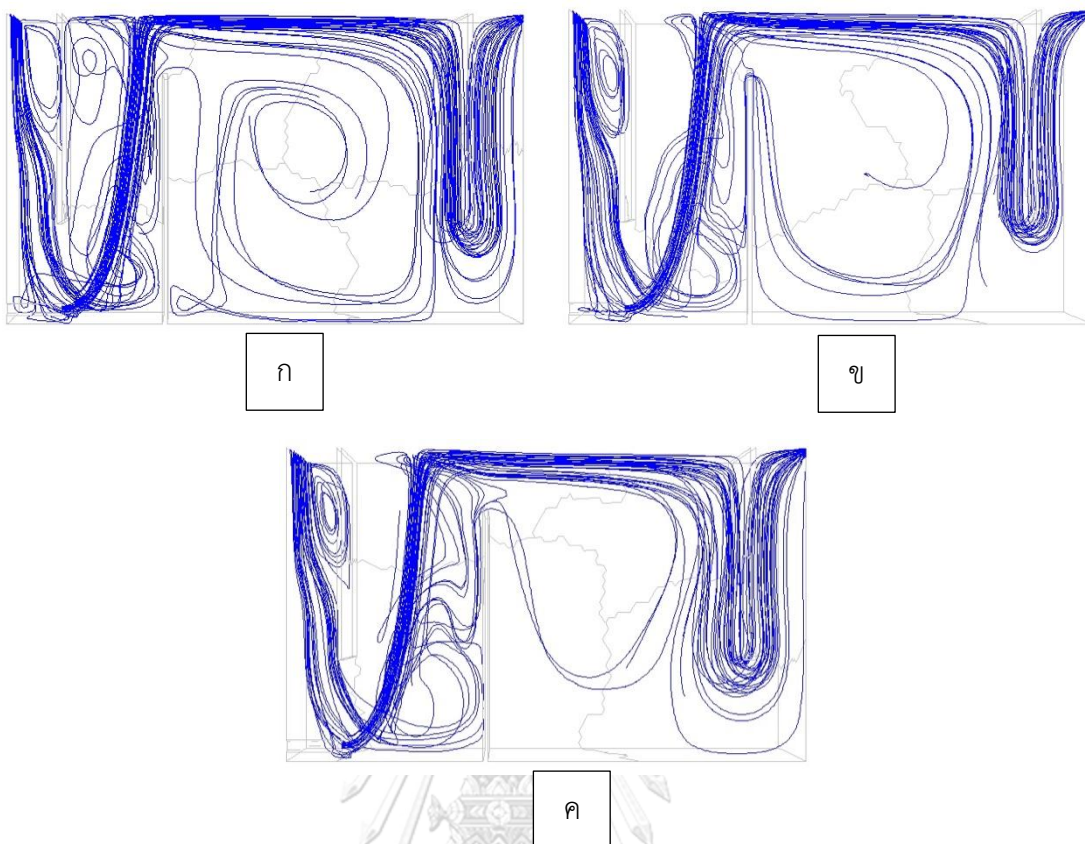
รูปที่ 4-48 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกริยาที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกันความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส (ก) 10 เซนติเมตร (ข) 12 เซนติเมตร และ (ค) 14 เซนติเมตร



รูปที่ 4-49 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร ความยาวโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร มุม (ก) 45 องศา และ (ข) 60 องศา

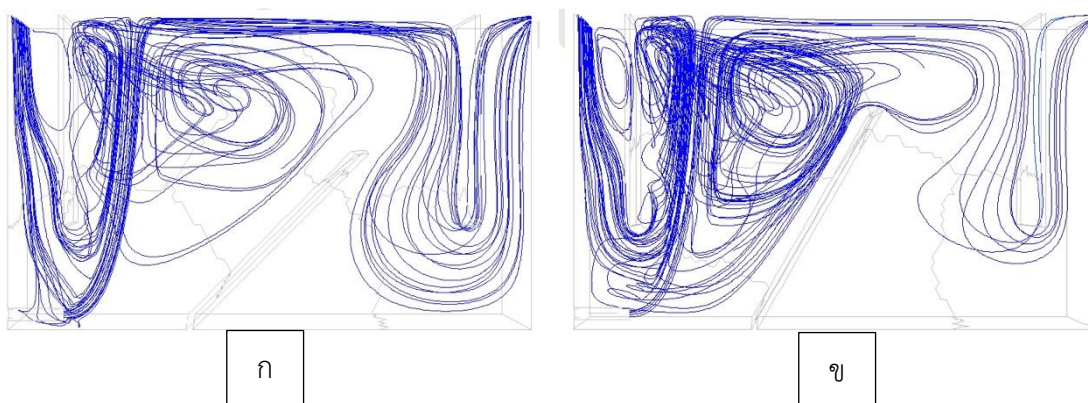
การติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร เมื่อปรับเปลี่ยนความยาวของโซนสัมผัสดังแสดงในรูปที่ 4-49 รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ค่อนข้างคล้ายกัน เช่นเดียวกับการติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร จึงสรุปได้ว่า ความยาวของโซนสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 10 – 14 เซนติเมตร ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อแนวทางการไหลภายในถังปฏิกรณ์ ในขณะที่เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นเอียงทำมุม 45 และ 60 องศา พบว่าแนวทางการไหลค่อนข้างคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-50 โดยเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นที่ทำมุม 45 และ 60 องศา แนวทางการไหลภายในโซนสัมผัสมีแนวโน้มในการกักและแยกกับโซนแยกได้ชัดเจนกว่า ตามลำดับ กล่าวคือ เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นด้วยมุมในแนวระนาบที่มากขึ้น แผ่นกั้นที่ติดตั้งสามารถแยกระหว่างโซนสัมผัสและโซนแยกได้ดีขึ้น

แนวทางการไหลในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งแผ่นกั้นเอียงทำมุม 45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4-46 (ก) 4-48 (ก) และ 4-50 (ก) จะเห็นว่ามีจุดอับเกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัสและโซนแยกอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกันกับการติดตั้งแผ่นกั้นเอียงทำมุม 60 องศา ที่เกิดจุดอับขึ้นในบริเวณเดียวกัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนเมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 และ 25 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-48 (ข) และ 4-50 (ข) ตามลำดับ เนื่องจากแผ่นกั้นที่มีความสูงมากขึ้นช่วยกักแนวทางการไหลของน้ำให้อยู่ภายในโซนสัมผัสมากขึ้น ในขณะที่แผ่นกั้นความสูง 15 เซนติเมตร การเกิดจุดอับบริเวณด้านล่างของแผ่นกั้นลดลง แต่เกิดจุดอับบริเวณตรงกลางเหนือแผ่นกั้นแทน ซึ่งเป็นผลมาจากความสูงของแผ่นกั้น



รูปที่ 4-50 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 มม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส (ก) 10 เซนติเมตร (ข) 12 เซนติเมตร และ (ค) 14 เซนติเมตร

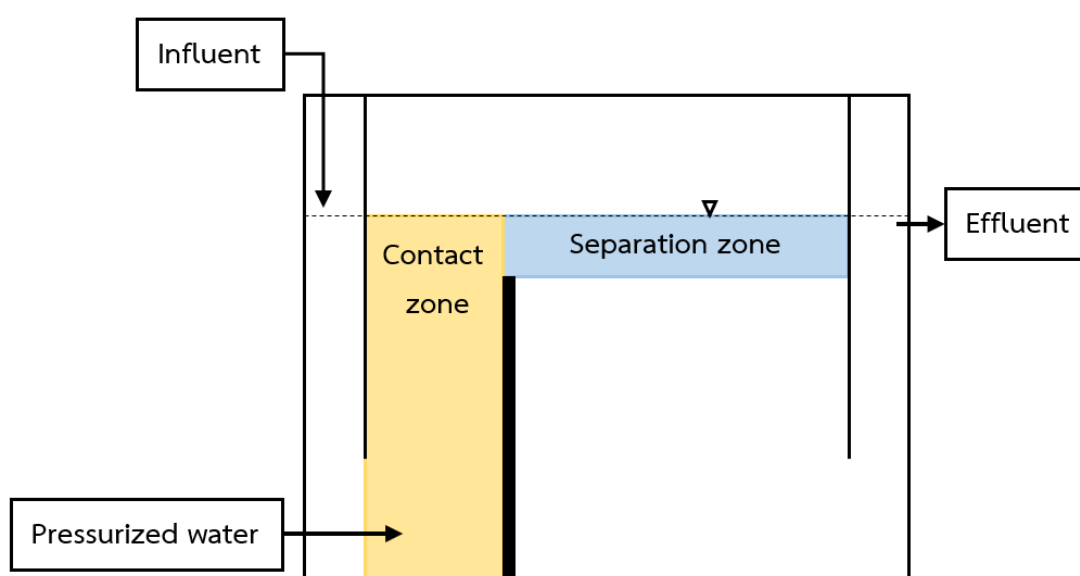
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-51 แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร ความยาวโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร มุม (ก) 45 องศา และ (ข) 60 องศา

4.4.4.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในถังปฏิกรณ์

การศึกษารูปแบบการไหลในโซนสัมผัสและโซนแยกของถังปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม CFD จากการพิจารณาแนวทางการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ จึงกำหนดบริเวณโซนสัมผัสและโซนแยก โดยโซนสัมผัสคือบริเวณหลังแผ่นกั้นแผ่นแรก หรือบริเวณที่น้ำสังเคราะห์สาหร่ายสัมผัสกับน้ำอัดความดันจนถึงก่อนแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัสกับโซนแยก และโซนแยกคือบริเวณผิวน้ำหลังแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัสและโซนแยก ดังในรูปที่ 4-51



รูปที่ 4-52 การกำหนดโซนสัมผัสและโซนแยกภายในถังปฏิกรณ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ความเร็วเกรเดียนท์คำนวณโดยใช้ค่าอัตราการกระจายตัวของพลังงานต่อมวล (Turbulent Dissipation Rate, ϵ) ที่ได้จากโปรแกรม CFD ด้วยสมการที่ 4-10

$$G = \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} \quad (4-10)$$

โดยที่ G = ความเร็วเกรเดียนท์ หรือระดับความปั่นป่วน (วินาที⁻¹)

ϵ = อัตราการกระจายตัวของพลังงานต่อมวล (วัตต์ต่อกิโลกรัม หรือตารางเมตรต่อวินาที³)

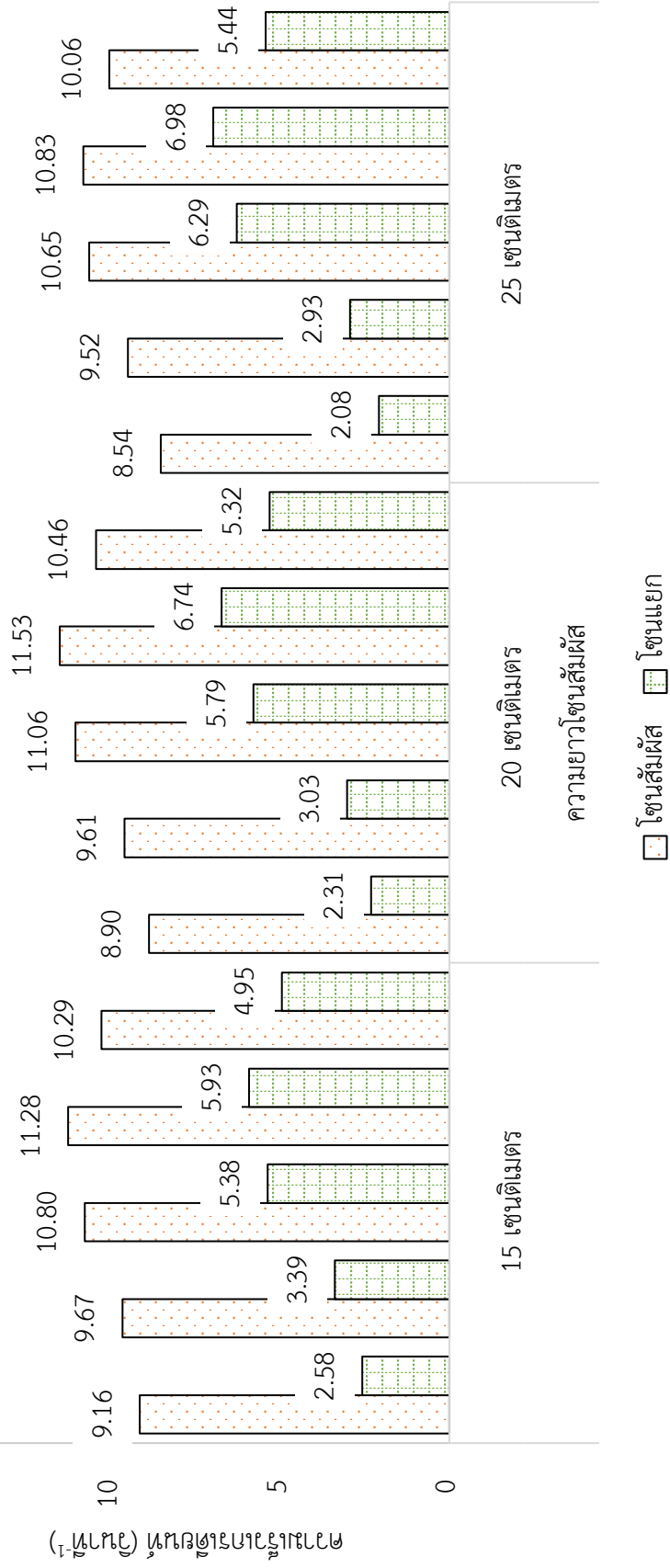
ν = ความหนืดจลน์ (ตารางเมตรต่อวินาที)

จากรูปที่ 4-52 ความเร็วเกรเดียนท์ของโซนสัมผัสและโซนแยกมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยค่าความเร็วเกรเดียนท์ในโซนสัมผัสจะมีค่าสูงกว่าโซนแยกอยู่ในช่วง 8.54 - 11.53 วินาที⁻¹ ในขณะที่ โซนแยกมีค่าอยู่ในช่วง 2.08 - 6.98 วินาที⁻¹ ความเร็วเกรเดียนท์เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่แสดงถึงความปั่นป่วนของน้ำ โดยถ้าความเร็วเกรเดียนท์มาก แสดงว่าน้ำมีความปั่นป่วนสูง การที่ทั้งสองบริเวณมีค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่แตกต่างกัน เป็นผลมาจากการติดตั้งแผ่นกั้นระหว่างโซนสัมผัสและโซนแยก ซึ่งเมื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งของการติดตั้งแผ่นกั้น ส่งผลให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์ต่างกันเพียงเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4-53 พบว่า การติดตั้งแผ่นกั้นมุม 90 องศาสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในโซนสัมผัสมากกว่าการติดตั้งแผ่นกั้นแบบเอียงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่การติดตั้งแผ่นกั้นด้วยมุม 45° 60° และ 90° องศา มีผลต่อสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในโซนแยกเพียงเล็กน้อย ความสูงของแผ่นกั้นก็มีผลต่อสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในโซนสัมผัสเช่นกัน โดยแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มีค่าสูงสุดถึง 0.134 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับแผ่นกั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร ที่ค่าเท่ากับ 0.053 และ 0.062 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงว่าความสูงแผ่นกั้นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถกักอากาศไว้ภายในโซนสัมผัสได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในโซนสัมผัสของแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร ที่ติดตั้งในบริเวณที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลให้ความยาวของโซนสัมผัสเท่ากับ 10, 12 และ 14 เซนติเมตร พบว่า สัดส่วนปริมาตรอากาศในโซนแยก เท่ากับ 0.134, 0.110 และ 0.093 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสัดส่วนปริมาตรอากาศในโซนแยกจะแปรผกผันกับความยาวของโซนสัมผัส เนื่องจากในการเดินระบบด้วยอัตราการไหลน้ำอัดความดันเท่ากัน ปริมาตรอากาศที่เข้าสู่โซนสัมผัสจึงเท่ากัน ในขณะที่เมื่อความยาวของโซนสัมผัสเพิ่มปริมาตรรวมของโซนสัมผัสก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ทำให้สัดส่วนปริมาตรอากาศแปรผกผันกับความยาวของโซนสัมผัส ดังนั้น การติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวของโซนสัมผัส 10 เซนติเมตร จึงมีสัดส่วนปริมาตรอากาศสูงสุดเมื่อเทียบกับการติดตั้งแผ่นกั้นรูปแบบอื่น

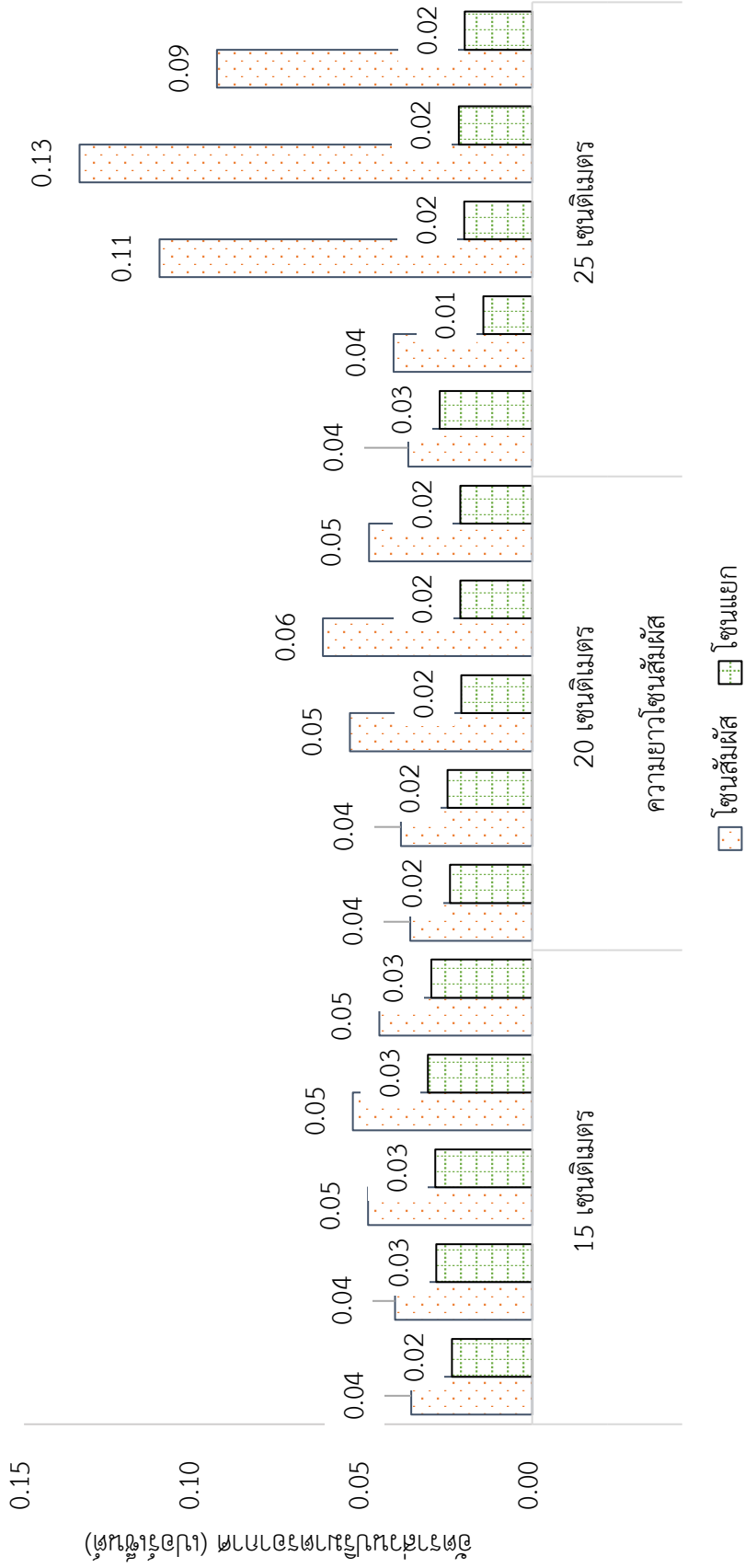
L (ซม.)	12	12	12	10	14	12	12	12	12	12	12	10	14	10	14
θ (องศา)	45	60	90	90	90	45	60	90	90	90	45	60	90	90	90

15



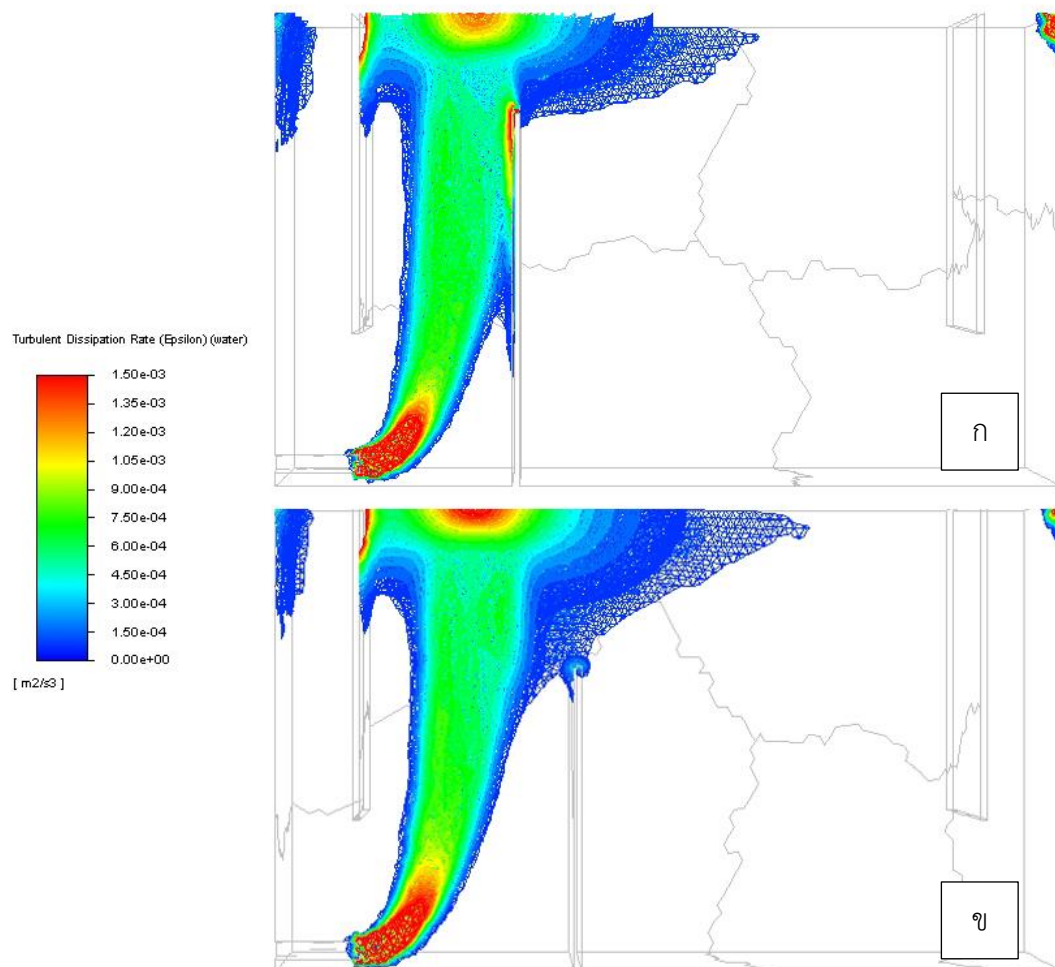
รูปที่ 4-53 ความเร็วการเคลื่อนที่ของโซนสัมผัสและโซนแยกเมื่อปรับเปลี่ยนการติดตั้งแผ่นกัน

L (ซม.)	12	12	12	10	14	12	12	10	14	12	12	10	14
θ (องศา)	45	60	90	90	90	45	60	90	90	45	60	90	90



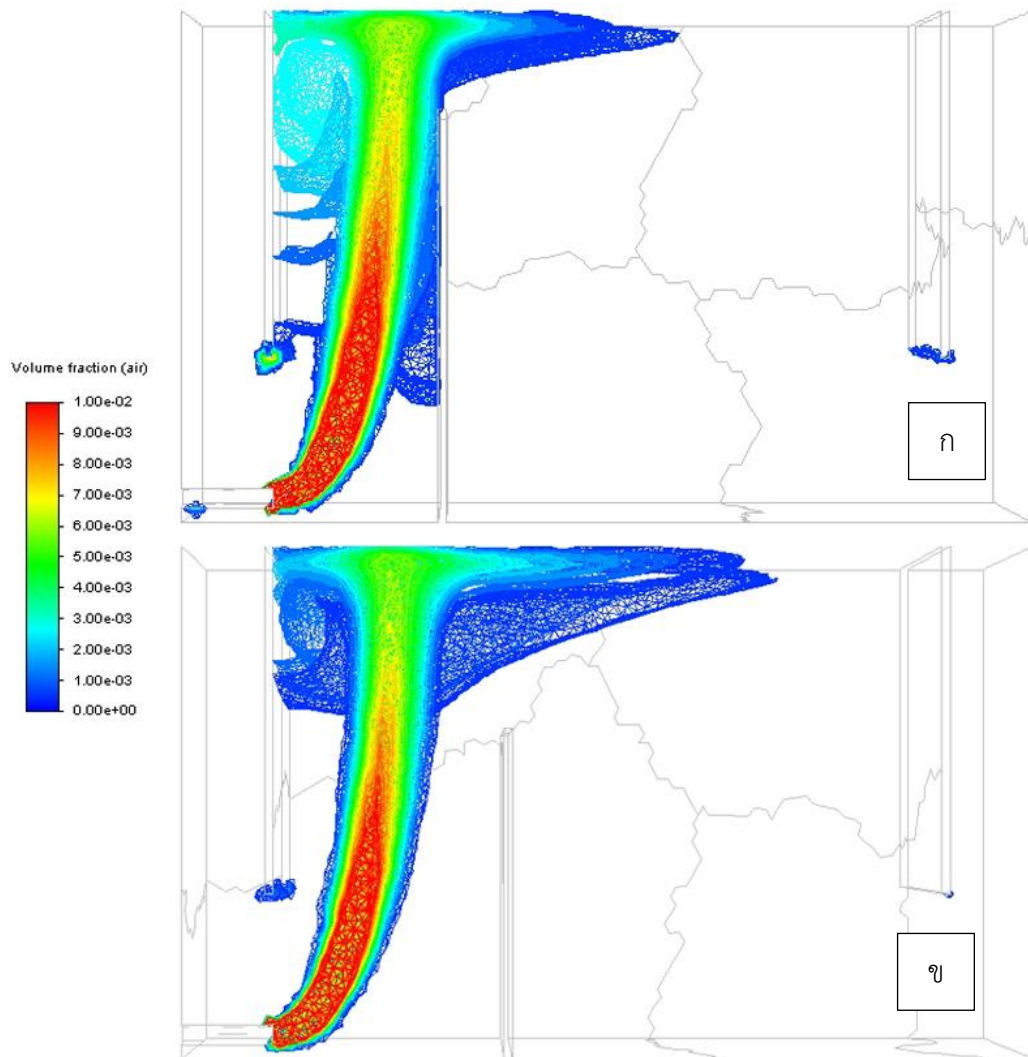
รูปที่ 4-54 สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในโซนสัมผัสและโซนแยกเมื่อปรับเปลี่ยนการติดตั้งแผ่นกัน

จากการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วยโปรแกรม CFD พบว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศและค่าความเร็วเกรเดียนท์มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ จะมีค่าสูงในส่วนของโซนสัมผัส และมีค่าต่ำในโซนแยก ดังแสดงในรูปที่ 4-54 และ 4-55 ความปั่นป่วนในโซนสัมผัสสูงกว่าโซนแยกอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับการออกแบบถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่เหมาะสมคือควรมีสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในโซนสัมผัสสูง เพื่อให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นสัมผัสกับอนุภาคได้อย่างทั่วถึง และเมื่อผ่านโซนสัมผัสเข้าสู่โซนแยกรูปแบบการไหลควรมีความปั่นป่วนน้อยลงเพื่อให้สารแยกออกจากน้ำได้ (Behhin และ Bahrmi, 2012) จากการจำลองรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วยโปรแกรม CFD พบว่าค่าความเร็วเกรเดียนท์และสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในถังปฏิกริยาเมื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งแผ่นกั้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ยกเว้นในกรณีที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในถังปฏิกริยาสูงกว่าการติดตั้งแผ่นกั้นรูปแบบอื่นอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร ส่งผลให้อัตราการระเหยน้ำเข้าสู่โซนแยกสูงกว่าเกณฑ์ที่แนะนำ และจากรูปที่ 4-54 (ก) การติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส 10 เซนติเมตร การกระจายตัวของพลังงานต่อมวลน้ำน้อยกว่าการติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-54 (ข) ในส่วนของสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในถังปฏิกริยาที่มีค่าสูงเนื่องจากปริมาตรของโซนสัมผัสลดลงเนื่องจากความยาวของโซนสัมผัสดังที่กล่าวไปข้างต้น และปริมาตรอากาศบริเวณด้านบนของโซนสัมผัสเมื่อติดตั้งด้วยแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-55 (ข) อากาศสามารถกระจายตัวได้ดีกว่าการติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส 10 เซนติเมตร ในรูปที่ 4-55 (ก) ประกอบกับผลการทดลองด้วยหลักการ RTD จากการทดลองก่อนหน้านี้ที่พบว่าการติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร ส่งผลให้เกิดจุดอับน้อยที่สุดและไม่เกิดการไหลลัดภายในถังปฏิกริยา ดังนั้น การติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวของโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร เป็นการติดตั้งแผ่นกั้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ในการทดลองส่วนถัดไปจึงใช้สภาวะการเติมโคแอกกูแลนท์เพื่อทำลายเสถียรภาพที่เหมาะสมจากการผลทดลองที่ 4.2 และรูปแบบถังปฏิกริยาที่ได้จากการทดลองที่ 4.3 และ 4.4 เพื่อแยกสารห่วยและหาประสิทธิภาพในการแยกสารห่วยด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายของถังปฏิกริยาที่ได้ออกแบบขึ้น



รูปที่ 4-55 แบบจำลองอัตราการกระจายตัวของพลังงานต่อมวลของน้ำในถังปฏิกริยา

- (ก) ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 10 เซนติเมตร
- (ข) ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร



รูปที่ 4-56 แบบจำลองสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในถังปฏิกริยา

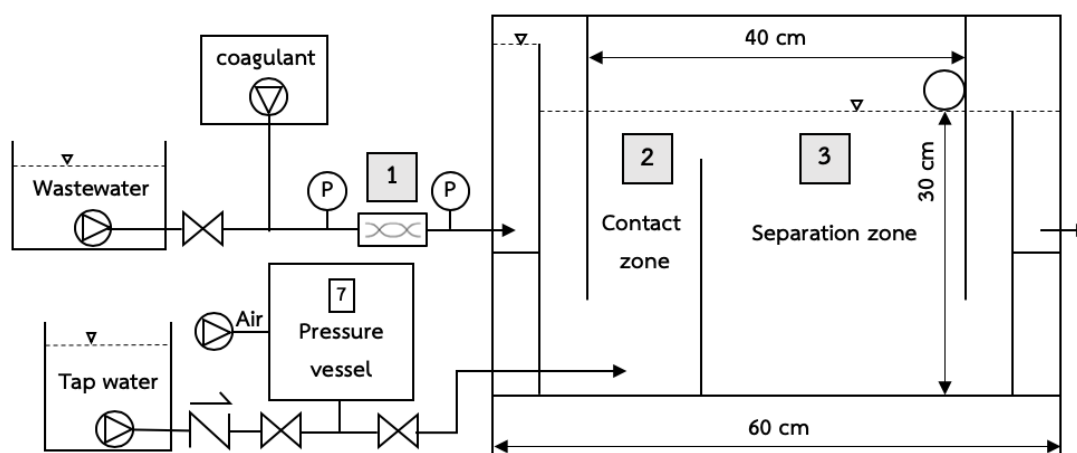
- (ก) ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 10 เซนติเมตร
 (ข) ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร

4.5 การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาในการแยกสาหร่าย

4.5.1 ระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

ระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ (1) ส่วนกระบวนการโคแอกกูเลชัน เพื่อทำลายเสถียรภาพของสาหร่าย (2) โซนสัมผัส เพื่อให้ฟองอากาศขนาดเล็กสัมผัสกับอนุภาคสาหร่าย และ (3) โซนแยก เพื่อให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นสัมผัสกับอนุภาคสาหร่ายที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วและพาอนุภาคสาหร่ายลอยแยกออกจากเฟสของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4-56

แนวทางการเดินระบบ คือ สูบน้ำสังเคราะห์สาหร่ายผสมกับสารส้มภายในอุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อซึ่งทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน จากนั้นน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพแล้วจะไหลเข้าถังปฏิกริยา ไหลเข้าสู่โซนสัมผัส โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะพาอนุภาคสาหร่ายลอยขึ้นสู่อากาศและเข้าสู่ส่วนแยกตะกอน จากนั้นน้ำใสจะลอดผ่านแผ่นกั้นและไหลออกจากระบบ



รูปที่ 4-57 ระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

4.5.2 ระบบสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

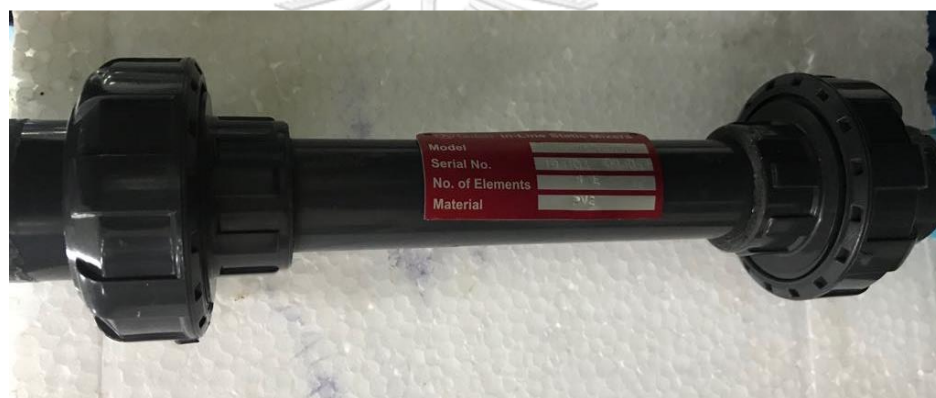
ระบบสร้างฟองขนาดเล็ก โดยการทำให้อากาศละลายในน้ำที่ความดันสูงประมาณ 4 บาร์ โดยการเติมอากาศด้วยเครื่องสูบลมอากาศ (Air compressor) ให้อากาศละลายในน้ำภายในถังอัดความดัน (Pressure vessel) จากนั้นเมื่อปล่อยน้ำที่มีความดันสูง (Pressurized water) เข้าสู่ถังปฏิกิริยา จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันจากความดันสูงสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว ทำให้อากาศที่ละลายอยู่เกินจุดอิ่มตัวแยกออกจากน้ำในรูปฟองอากาศขนาดเล็ก (30-100 ไมครอน) ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะจับกับอนุภาคสารหยาบและพาอนุภาคลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ โดยถังอัดความดันที่ใช้แสดงในรูปที่ 4-57 (ก) มีขนาด 80 ลิตร รองรับความดันได้สูงสุด 8 บาร์ และสามารถปรับอัตราการไหลน้ำอัดความดันได้ต่ำสุด 0.5 ลิตร/นาที เนื่องจากข้อจำกัดของวาล์วที่ใช้ (Diaphragm valve) (รูปที่ 4-57 (ข)) ถ้าปรับอัตราการไหลต่ำมาก ฟองที่สร้างขึ้นจากระบบสร้างฟองจะถูกกั้นอยู่ที่วาล์ว ทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นฟองขนาดใหญ่ (Coalescence) ซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4-58 ระบบสร้างฟองขนาดเล็ก

4.5.3 กระบวนการโคแอกกูเลชันในเส้นท่อ

กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) โดยการทำให้เกิดการกวนเร็วในเส้นท่อโดยใช้ อุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ (Static mixer) ดังแสดงในรูปที่ 4-58 ผลิตจากวัสดุ UPVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร มีจำนวน Element 8 elements ความยาว 215 มิลลิเมตร โดยเมื่อน้ำสังเคราะห์สาหร่ายผสมกับสารส้มภายในอุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อด้วยอัตราการไหลรวม 2.5 ลิตร/นาที่ ทำให้เกิดความดันลด (ΔP) 0.24 บาร์ คิดเป็นค่าความเร็วเกรเดียนท์เท่ากับ $3,693 \text{ วินาที}^{-1}$ จากสมการที่ 3-2 ซึ่งมีค่าไม่ต่ำกว่า 300 วินาที^{-1} (มันซิลป์ ตัณทุลเวศม์, 2542) แสดงว่าเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคสาหร่าย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 4-59 อุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.4 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

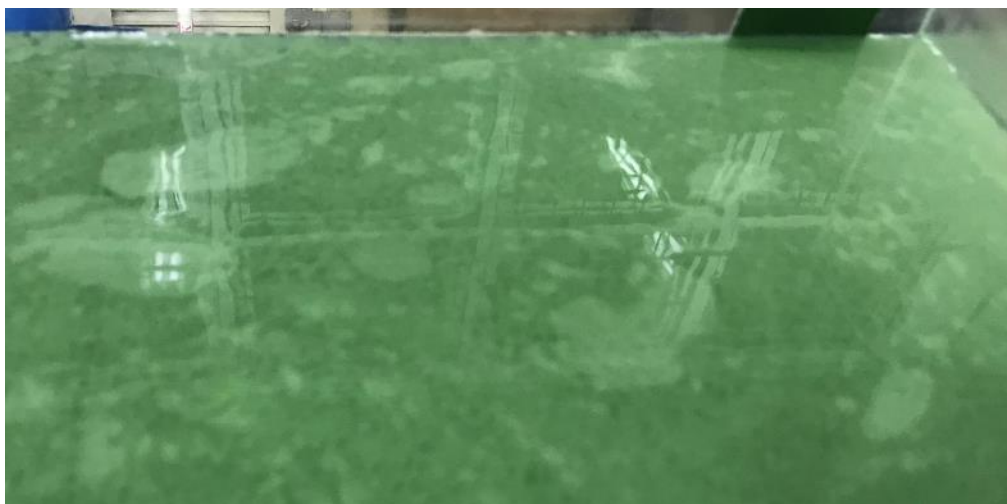
การศึกษากการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร โดยเตรียมน้ำสังเคราะห์สาหร่ายจากการผสมระหว่างน้ำประปากับน้ำสังเคราะห์สาหร่ายเข้มข้น แล้วเข้าสู่กระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อทำลายเสถียรภาพประจุบนพื้นผิวคอลลอยด์โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ และกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย เติกระบบที่อัตราการไหลรวม 3 ลิตรต่อ นาที น้ำอัดความดัน 4 บาร์ เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพในการเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวของโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร และกำหนดสภาวะที่ใช้ในการเดินระบบในตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-12 สภาวะที่ใช้ในการเดินระบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

ความเข้มข้นสาหร่าย (เซลล์/มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสารส้ม (มิลลิโมลาร์อะลูมินัม)	อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย)
8×10^5	0.58	0.06
8×10^5	0.58	0.08
3×10^6	0.29	0.05

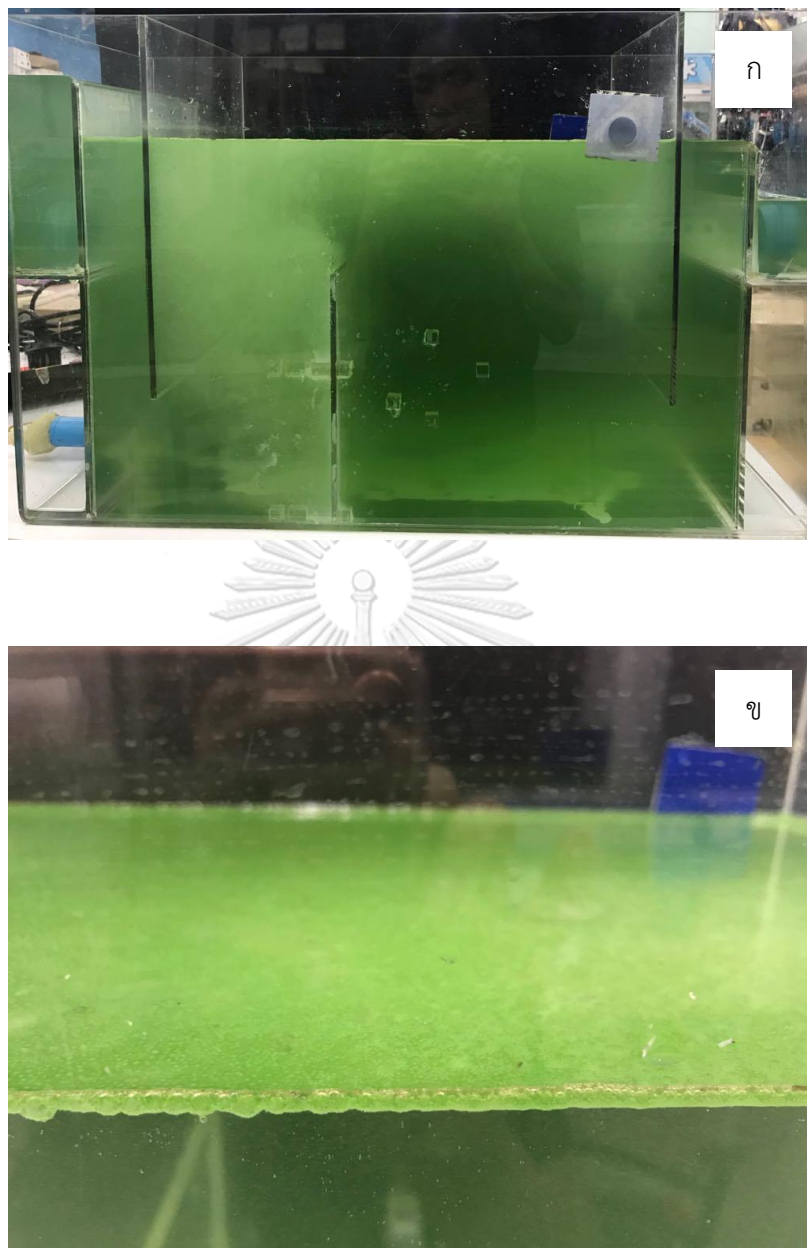
4.5.4.1 ประสิทธิภาพการแยกน้ำสังเคราะห์สาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร

การศึกษากการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ใช้ความเข้มข้นสาหร่าย 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร ร่วมกับการเติมสารส้มความเข้มข้น 0.58 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอย 0.06 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย ดังแสดงในรูปที่ 4-59 พบว่า ความเข้มข้นของสาหร่ายบริเวณด้านบนของส่วนแยกตะกอนในลอยตะกอนสูงสุดถึง 3.67×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร และประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย เท่ากับ 57.14%



รูปที่ 4-60 บริเวณผิวหน้าของถังปฏิกรณ์ขณะแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร
ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายด้วยการเติมอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 0.08 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอยเพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายเท่ากับ 58.11% ซึ่งเพิ่มขึ้นจากการแยกสาหร่ายความเข้มข้นเดียวกันด้วยการเติมอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอย 0.06 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย เพียงเล็กน้อย ดังนั้นการเพิ่มปริมาณอากาศที่ใช้ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกของถังปฏิกรณ์อย่างชัดเจน ในขณะที่ความเข้มข้นของสาหร่ายบริเวณผิวหน้าของส่วนแยกตะกอนสูงขึ้นถึง 2.03×10^7 เซลล์/มิลลิลิตร เนื่องจากปริมาณฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้สาหร่ายถูกพาขึ้นสู่ผิวหน้าเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-60



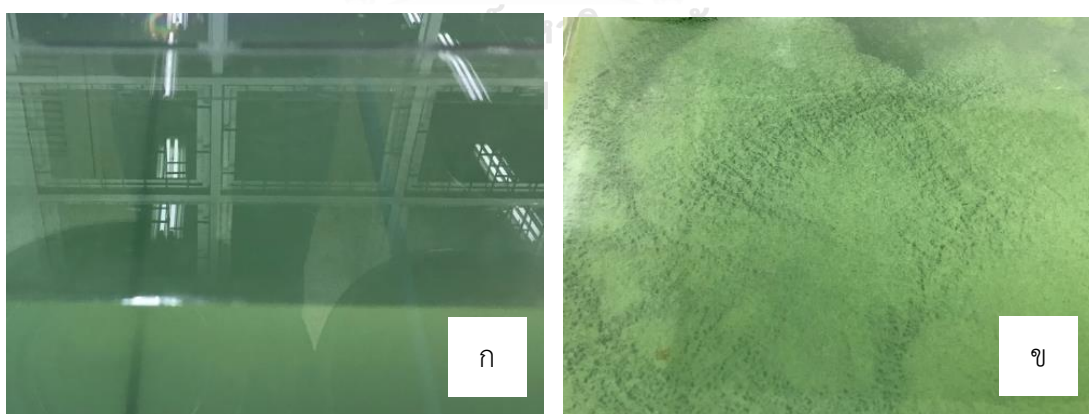
รูปที่ 4-61 ถังปฏิกริยาขณะเดินระบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายด้วยอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอย 0.08 มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย (ก) ด้านข้างของถัง และ (ข) บริเวณผิวน้ำ

4.5.4.2 ประสิทธิภาพการแยกน้ำสังเคราะห์สำหรับความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร

การศึกษาการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยเดินระบบด้วยน้ำสำหรับความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ร่วมกับการเติมสารส้มความเข้มข้น 0.29 มิลลิโมลาร์ อะลูมินัม ดังแสดงในรูปที่ 4-60 พบว่า บริเวณผิวน้ำของโซนแยกความเข้มข้นของสาหร่ายสูงสุดถึง 3.88×10^7 เซลล์/มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-62 (ข) และประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย เท่ากับ 80.22%



รูปที่ 4-62 น้ำสังเคราะห์สำหรับความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร (ก) ก่อน (ข) หลังผ่านกระบวนการแยก และ (ค) บริเวณผิวน้ำของโซนแยก (Separation zone)



รูปที่ 4-63 บริเวณผิวน้ำของถังลอยตะกอน เมื่อเดินระบบเพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร (ก) ก่อน และ (ข) หลังผ่านการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอย

การทดสอบประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยใช้ น้ำดิบจากแหล่งน้ำที่มีการบลูมของสาหร่าย ซึ่งมีสาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทิสเป็นสาหร่ายชนิดเด่น (Dominant species) โดยเก็บน้ำที่ระดับความลึก 3 และ 18 เมตร ผสมกันให้ได้ความเข้มข้นสาหร่าย 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร และเดินระบบร่วมกับการเติมสารส้มความเข้มข้น 0.29 มิลลิโมลาร์ อะลูมินัม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของถังปฏิกริยาระหว่างการใช้น้ำสังเคราะห์สาหร่ายในห้องปฏิบัติการและน้ำดิบจริงที่มีการบลูมของสาหร่ายสายพันธุ์เดียวกัน พบว่า ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย เท่ากับ 75.27% จากรูปที่ 4-63 (ก) บริเวณผิวน้ำเห็นชั้นของสาหร่ายที่ถูกแยกออกมาได้อย่างชัดเจนกว่าการแยกน้ำสังเคราะห์สาหร่ายที่ความเข้มข้นเดียวกัน (รูปที่ 4-62) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงถึง 5.15×10^7 เซลล์/มิลลิลิตร แต่ประสิทธิภาพการแยกของถังปฏิกริยาเมื่อนำน้ำดิบจริงต่ำกว่าการแยกน้ำสังเคราะห์สาหร่าย เนื่องจากในน้ำดิบจริงมีของแข็งแขวนลอยอื่นนอกจากสาหร่ายปนอยู่ด้วย จากรูปที่ 4-63 (ข) จะเห็นว่ามีฟlocs บางส่วนตกตะกอนอยู่บริเวณด้านล่างของโซนแยก ซึ่งคาดว่าเกิดจากสมบัติของน้ำดิบไม่ว่าจะเป็นอนุภาคคอลลอยด์ หรือของแข็งแขวนลอยอื่น ๆ ที่มีแนวโน้มที่จะตกตะกอนได้ เมื่ออนุภาคเหล่านี้ตกตะกอนลงอยู่บริเวณด้านล่างของโซนแยก ทำให้น้ำที่ไหลผ่านด้านล่างพาอนุภาคที่ตกตะกอนบางส่วนขึ้นมาตามกระแสและไหลออกจากระบบ ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาแนวทางการไหลของน้ำจากโปรแกรม CFD ดังแสดงในรูปที่ 4-47 (ค) คือน้ำมีแนวทางการไหลถึงด้านล่างสุดของถังปฏิกริยา ก่อนที่จะผ่านแผ่นกั้นแผ่นสุดท้ายและล้นผ่านฝายกั้นน้ำออกจากถังปฏิกริยา ดังนั้นจึงมีอนุภาคที่ตกอยู่ด้านล่างของถังติดออกไปกับน้ำที่ออกจากถังปฏิกริยาด้วย สรุปประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายโดยเติมอากาศที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอยต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-13 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอยต่าง ๆ

ความเข้มข้นสาหร่าย (เซลล์/มิลลิลิตร)	อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมอากาศ/มิลลิกรัมของแข็งแขวนลอย)	ประสิทธิภาพการ แยกสาหร่าย (%)
8×10^5	0.06	57.14
8×10^5	0.08	58.11
3×10^6	0.05	80.22
3×10^6 (น้ำดิบ)	0.05	75.27



รูปที่ 4-64 ถังลอยตะกอนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายหลังเดินระบบกระบวนการทำให้ลอยโดยใช้
น้ำดิบจริงจากสระมรกตความเข้มข้นสาหร่าย 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร (ก) บริเวณผิวหน้า
และ (ข) บริเวณด้านข้างของถังปฏิกริยา

4.6 การศึกษาแนวทางการขยายขนาดถังปฏิกริยา

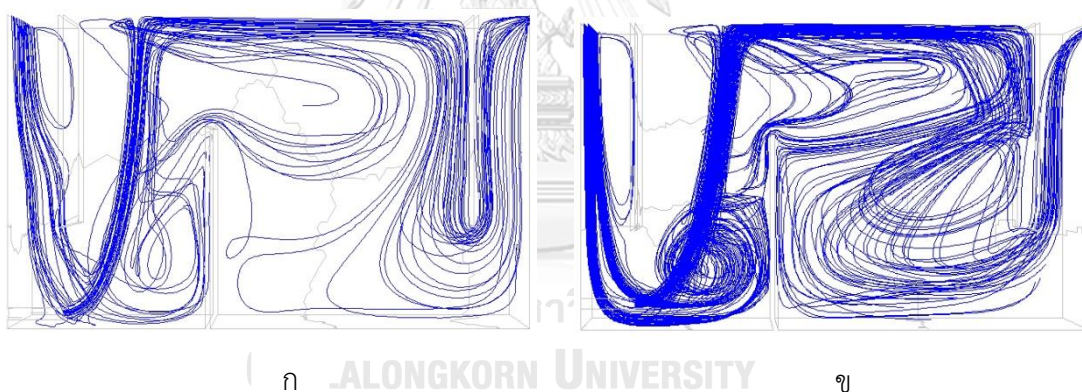
ถังปฏิกริยาการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร ขนาด 40 ลิตร อัตราการไหล 3 ลิตร/นาที ซึ่งเป็นขนาดสำหรับการทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ในการนำระบบไปใช้งานในระดับนำร่อง (Pilot scale) เพื่อให้ระบบสามารถรองรับน้ำในปริมาณที่มากขึ้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ โดยทำการทดลองเพิ่มอัตราการไหลเท่ากับ 26 ลิตร/นาที ส่งผลให้ขนาดของถังปฏิกริยามีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 350 ลิตร เพื่อให้ระยะเวลาพักและแนวทางในการเดินระบบใกล้เคียงกับถังปฏิกริยาที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงใช้โปรแกรม CFD สำหรับศึกษาแนวทางการขยายขนาด (Scale-up) ถังปฏิกริยาตามทฤษฎี Geometric scale-up รวมถึงกำหนดขอบเขตและสภาวะการทำงานของแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4-14 ขอบเขตและสภาวะการทำงานของแบบจำลอง (Operation and boundary conditions) ถังปฏิกริยาขนาด 350 ลิตร

Variable	Boundary condition	Value
Water inlet	Mass flow inlet	0.182 กิโลกรัม/วินาที
Pressurized water inlet		
- Water	Mass flow inlet	0.04 กิโลกรัม/วินาที
- Air	Mass flow inlet	4.3×10^{-6} กิโลกรัม/วินาที
- Volume fraction	-	0.06
Water outlet	Outflow	-
Bubble size	-	75 ไมครอน
Walls and Baffles	Wall	-
Surface of DAF tank	Degassing condition	-

จากรูปที่ 4-64 พบว่า แนวทางการไหลของน้ำในถังปฏิกริยาที่ขยายขนาดขึ้นใกล้เคียงกับแนวทางการไหลภายในถังปฏิกริยาขนาดเดิม ความเร็วเกรเดียนท์และสัดส่วนปริมาตรอากาศในถังปฏิกริยา ดังแสดงในตารางที่ 4-14 พบว่า ในถังปฏิกริยาที่ขยายขนาดขึ้นความเร็วเกรเดียนท์ในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

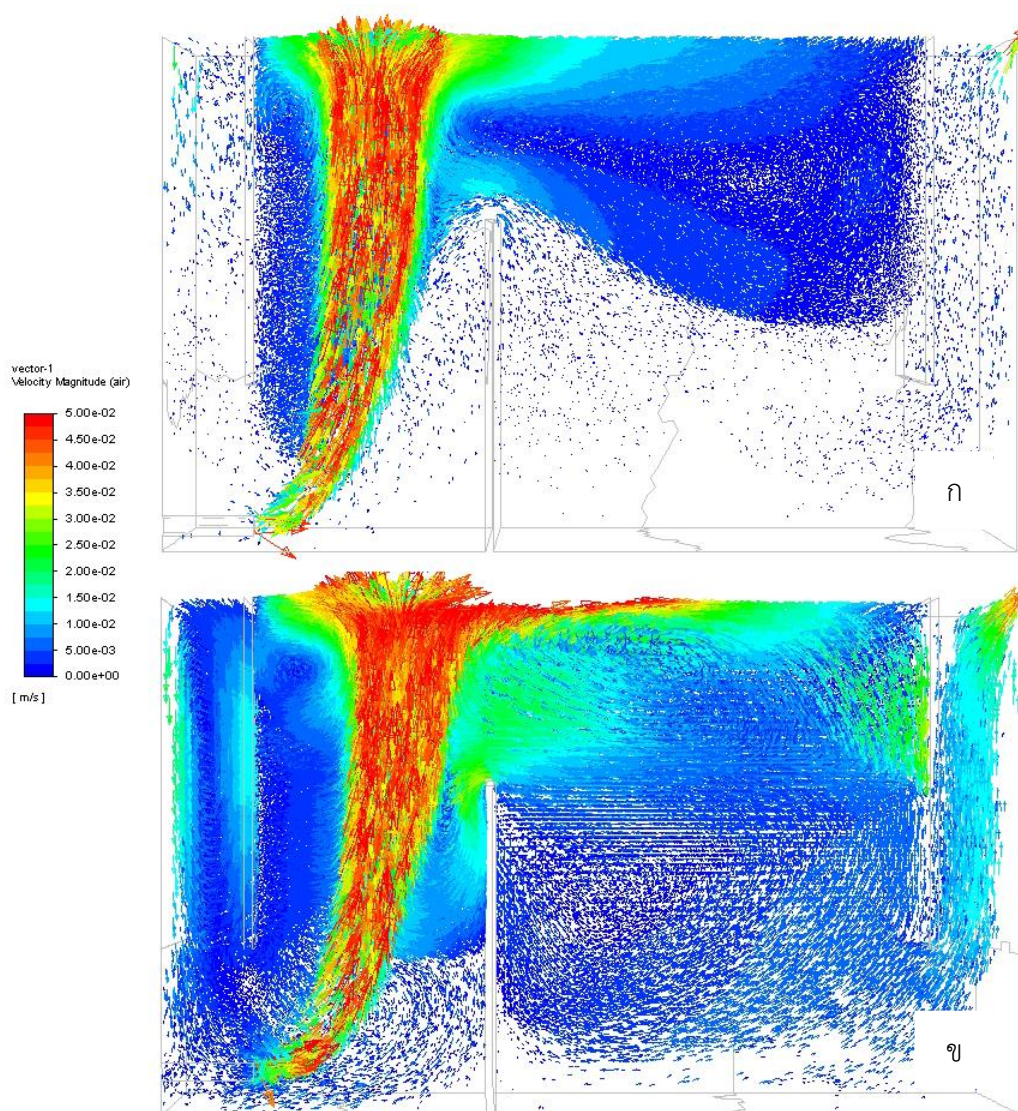
ความเร็วของอากาศในโซนสัมผัสในถังปฏิกริยาที่ขยายขนาดเท่าเดิม เนื่องจากขนาดฟองอากาศที่เท่าเดิม (รูปที่ 4-65) โดยเมื่อขยายขนาดของถังปฏิกริยาแผ่นกั้นภายในถังปฏิกริยาจึงสูงตามไปด้วย ส่งผลให้ระยะเวลาที่ของฟองภายในถังปฏิกริยามากขึ้นและสัดส่วนปริมาตรอากาศในโซนสัมผัสจึงเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ความเร็วของอากาศที่เข้าสู่โซนแยกเพิ่มขึ้น รวมถึงความเร็วเกรเดียนท์ในโซนแยกที่ค่อนข้างต่ำ ฟองลอยได้อย่างอิสระ ทำให้สัดส่วนปริมาตรอากาศในโซนแยกเพิ่มสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4-66 และ 4-67 แบบจำลองอัตราการกระจายตัวของพลังงานต่อมวลของน้ำ หรือความเร็วเกรเดียนท์ และสัดส่วนปริมาตรอากาศในถังปฏิกริยามีค่าเพิ่มขึ้นแต่ยังคงอยู่ในโซนสัมผัสและบริเวณผิวหน้าของโซนแยกเหมือนถังปฏิกริยาขนาดเดิม



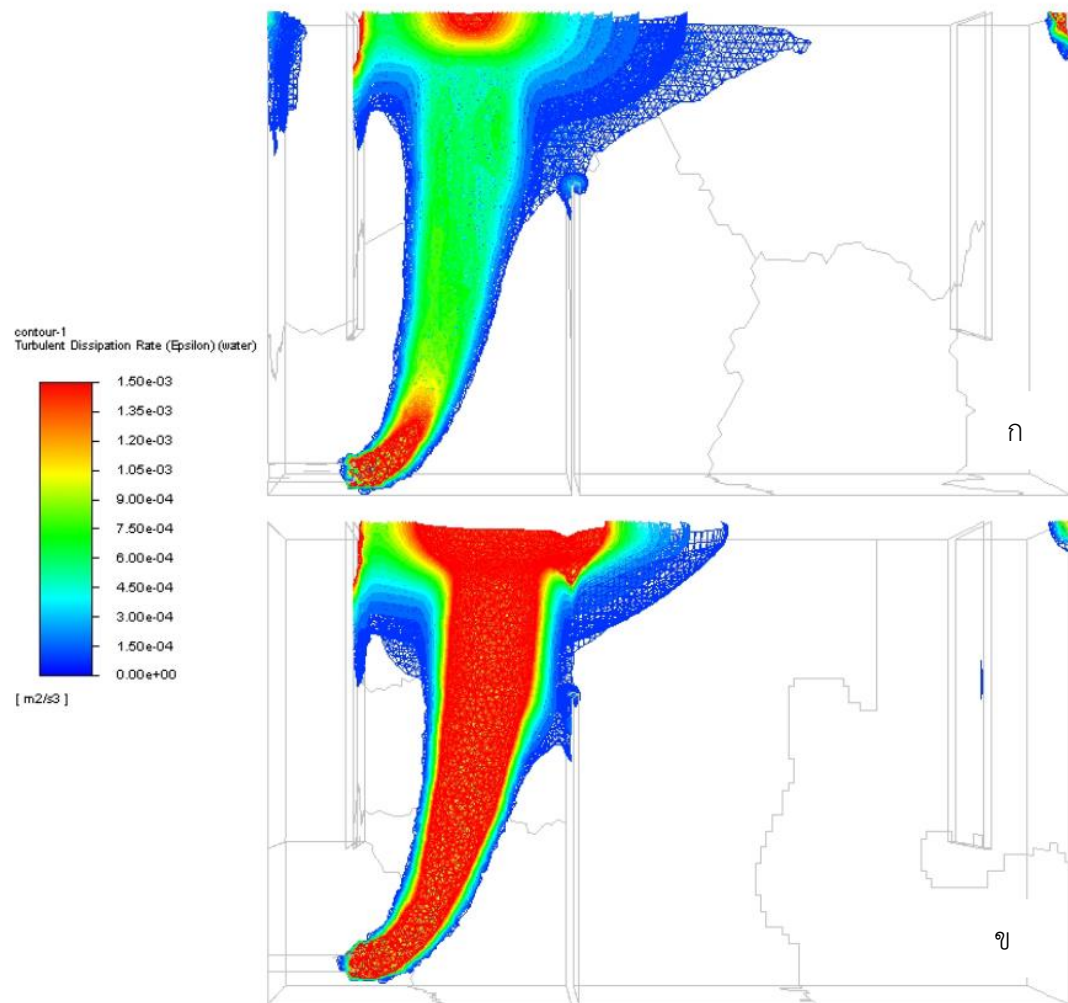
รูปที่ 4-65 แนวทางการไหลในถังปฏิกริยาที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 25 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 10 เซนติเมตร ขนาด (ก) 40 ลิตร และ (ข) 350 ลิตร

ตารางที่ 4-15 ความเร็วกระเดียนท์และสัดส่วนปริมาตรอากาศในถังขนาด 40 และ 350 ลิตร

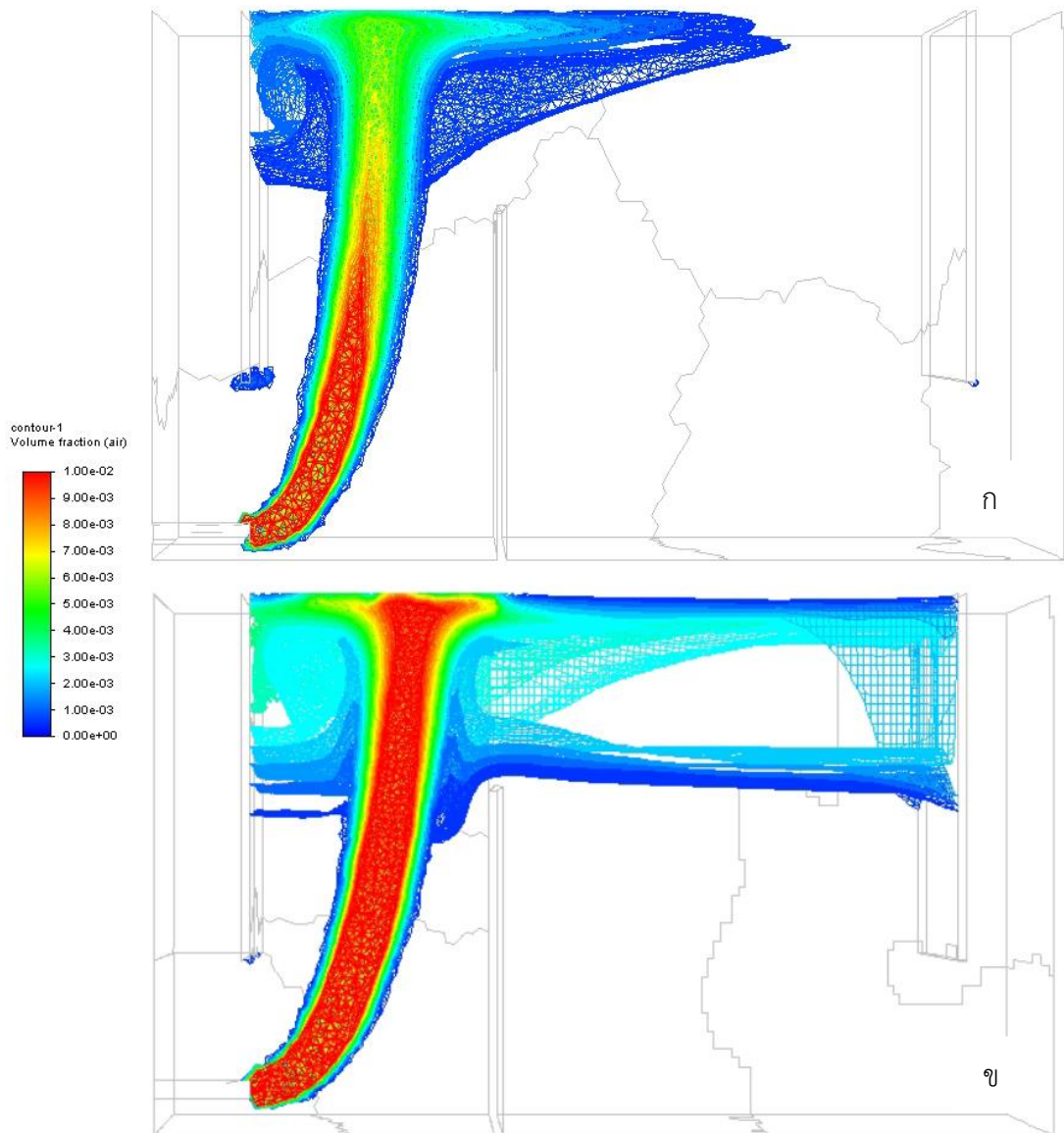
ขนาดถัง (ลิตร)	ความเร็วกระเดียนท์ (วินาที ⁻¹)		สัดส่วนปริมาตรอากาศ (%)	
	โซนสัมผัส	โซนแยก	โซนสัมผัส	โซนแยก
40	10.83	6.98	0.13	0.02
350	16.04	8.45	0.12	0.20



รูปที่ 4-66 ความเร็วของอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร
ถังปฏิกริยาขนาด (ก) 40 ลิตร (ข) 350 ลิตร



รูปที่ 4-67 อัตราการกระจายตัวของพลังงานต่อมวลของน้ำในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร ถึงปฏิกรณ์ขนาด (ก) 40 ลิตร (ข) 350 ลิตร



รูปที่ 4-68 สัดส่วนปริมาตรอากาศในถังปฏิกรณ์ที่จำลองด้วยโปรแกรม CFD ที่ติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา และความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร ถังปฏิกรณ์ขนาด (ก) 40 ลิตร (ข) 350 ลิตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สาหร่ายสายพันธุ์ไมโครซิสทีสรูปร่างเป็นทรงกลม ลักษณะการเจริญเติบโตเป็นเซลล์เดี่ยว ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 4.19 ไมครอน และค่าซีต้าโพเทนเชียล ที่พีเอช 7 เท่ากับ -14.95 มิลลิโวลต์

5.1.2 การทำลายเสถียรภาพที่เหมาะสมที่สุดคือ การเติมโคแอกกูแลนต์ซึ่งฟลอคที่เกิดจากการเติม สารส้มแยกด้วยการทำให้ลอยได้ง่ายกว่าฟลอคที่เกิดจากการเติม PACl และในกรณีที่มีน้ำมีแมกนีเซียม หรือแคลเซียมเป็นองค์ประกอบการปรับพีเอชเท่ากับ 11 ช่วยทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่ายได้ เล็กน้อย โดยสภาวะในการทำละลายเสถียรภาพที่เหมาะสมสำหรับสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 และ 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร คือ - ปรับพีเอช 11

- สารส้มความเข้มข้น 0.29 และ 0.18 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม ตามลำดับ

- PACl ความเข้มข้น 0.28 มิลลิโมลาร์อะลูมินัม

5.1.3 ถึงปฏิกิริยาที่ออกแบบมีรูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ต่อกับแบบท่อจาก การศึกษารูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD และการติดตั้งแผ่นกั้นความสูง 20 เซนติเมตร มุม 90 องศา ความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร เกิดจุดอับต่ำที่สุด

5.1.4 การศึกษาด้วยโปรแกรม CFD จากค่าความเร็วกระแสน้ำพบว่าในโซนสัมผัสมีรูปแบบการไหล ในถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ และในโซนแยกมีรูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยาแบบท่อ โดยการเพิ่มความสูงแผ่นกั้นส่งผลให้สัดส่วนปริมาตรอากาศในโซนสัมผัสเพิ่มขึ้น และความยาวของโซนสัมผัสมีผล ต่อรูปแบบการไหลในถังปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย

5.1.5 ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายอยู่ในช่วง 57.14 - 80.22 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพในการแยกสูงสุดในการแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/ มิลลิลิตร เนื่องจากปริมาณของแข็งแขวนลอยสูงและอัตราส่วนอากาศต่อปริมาณของแข็งแขวนลอย อยู่ในช่วงที่แนะนำในการเดินระบบ และประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายในน้ำดิบจริงต่ำกว่าการแยกน้ำ สาหร่ายสังเคราะห์

5.1.6 แนวทางการไหลและความเร็วเกรเดียนท์ในถังปฏิริยาที่ขยายขนาดขึ้นด้วยโปรแกรม CFD ไกล่เคียงเดิม ยกเว้นสัดส่วนปริมาตรอากาศในโซนแยกของถังปฏิริยาที่เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาแนวทางในการขยายขนาด นอกจากจะเพิ่มปริมาตรของถังปฏิริยาเพื่อให้รองรับ อัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นแล้ว ควรพิจารณาถึงขนาดของระบบสร้างฟองขนาดเล็กด้วย

5.2.2 ควรติดตั้งอุปกรณ์เก็บสสารร้ายที่แยกออกจากน้ำทั้งในส่วนที่ลอยอยู่บนผิวน้ำและส่วนที่อาจ ตกตะกอนที่ก้นถัง โดยไม่รบกวนรูปแบบการไหลและการทำงานของถังปฏิริยาในภาพรวม ซึ่งช่วยในการแก้ปัญหาการเกิดจุดอับภายในถังปฏิริยาและเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมี ประสิทธิภาพ





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก การศึกษาลักษณะสาหร่าย

ตารางที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคสาหร่าย

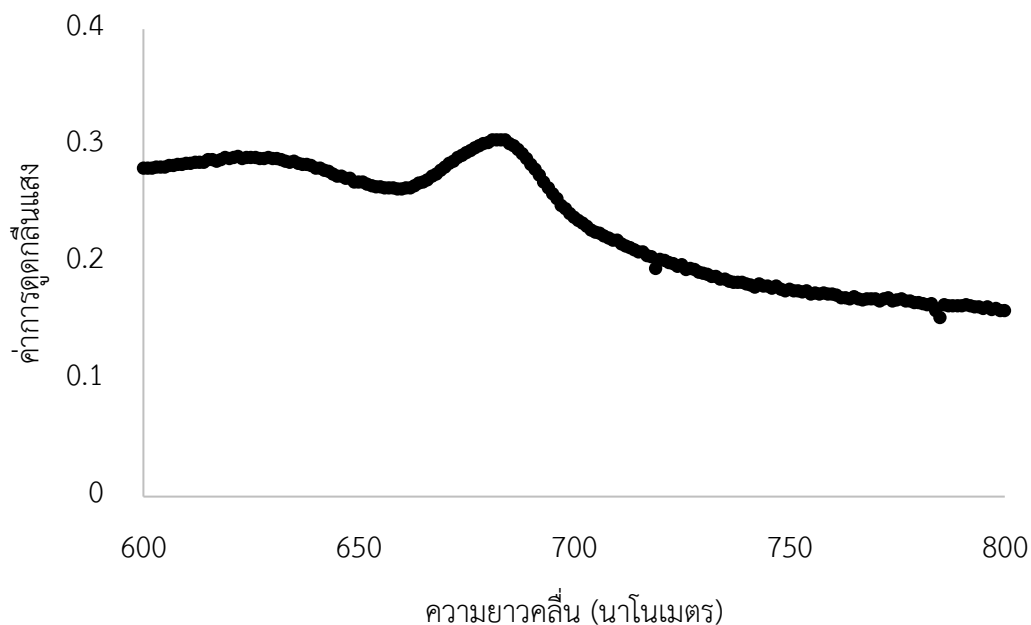
Sample No.	1	2	3	Average
Dx (10)	3.2	3.2	3.22	3.20
Dx (50)	4.3	4.3	4.3	4.3
Dx (90)	5.77	5.77	5.74	5.76
D [4,3]	4.4	4.41	4.4	4.40
D [3,2]	4.19	4.19	4.2	4.19
Laser Obscuration	21.77	21.75	21.75	21.75
Weighted Residual	0.35	0.33	0.31	0.33
1.13	0	0	0	0
1.28	0	0	0	0
1.45	0	0	0	0
1.65	0	0	0	0
1.88	0.01	0.01	0.01	0.01
2.13	0.26	0.26	0.21	0.24
2.42	1.68	1.68	1.51	1.623
2.75	5.66	5.65	5.4	5.57
3.12	12.27	12.26	12.18	12.23
3.55	19	18.99	19.28	19.09
4.03	21.96	21.96	22.45	22.12
4.58	19.18	19.19	19.48	19.28
5.21	12.49	12.49	12.41	12.46
5.92	5.78	5.79	5.53	5.7
6.72	1.71	1.72	1.54	1.65
7.64	0	0	0	0
8.68	0	0	0	0
9.86	0	0	0	0

ตารางที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์ค่าซีตาโพเทนเชียล

ความเข้มข้น สำหรับ (เซลล์/มล.)	พีไอ	T (°C)	ZP (mV)	Mob ($\mu\text{mcm/Vs}$)	Cond (mS/cm)
3×10^6	7	25	-14.2	-1.116	0.77
		25	-14	-1.096	0.798
		25	-16.7	-1.313	0.816
		AVG	-14.967	-1.175	0.795
		SD	1.50444	0.120	0.023
3×10^6	11	25	-14.7	-1.171	4.76
		25	-15.9	-1.269	5.7
		25	-17.5	-1.393	6.11
		25	-14.9	-1.171	4.76
		25	-16.2	-1.269	5.7
		25	-17.8	-1.393	6.11
		AVG	-16.1667	-1.278	5.523
		SD	1.28634	0.100	0.619
8×10^5	11	25	-16.8	-1.318	4.94
		25	-18.3	-1.435	5.18
		25	-18.6	-1.457	5.39
		AVG	-17.9	-1.403	5.170
		SD	0.96436508	0.075	0.225

ตารางที่ ก-3 อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย

Time (day)	A680nm	algae conc. (cells/ml)
0	0.041	6.83E+05
2	0.06	1.00E+06
4	0.091	1.52E+06
6	0.14	2.33E+06
9	0.201	3.35E+06
13	0.293	4.88E+06
15	0.33	5.50E+06
16	0.345	5.75E+06
21	0.443	7.38E+06
27	0.701	1.17E+07
34	1.362	2.27E+07
36	1.585	2.64E+07
38	1.845	3.08E+07
41	2.115	3.53E+07
47	2.996	4.99E+07
50	4.528	7.55E+07
54	13.44	2.24E+08



รูปที่ ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสังเคราะห์สำหรับความเข้มข้น 10^7 เซลล์/มิลลิลิตร ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

ตารางที่ ก-4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร กับความเข้มข้นสำหรับ

Algae concentration (cell/ml)	A680
1.17E+07	0.71
1.58E+06	0.07
1.80E+05	0.01
2.45E+06	0.14

ตารางที่ ก-5 ค่าความขุ่นกับความเข้มข้นสำหรับ

Algae concentration (cells/ml)	Turbid (NTU)
0	0.11
4.76E+06	169
2.49E+06	89.1
7.57E+05	22.3
4.07E+05	8.75

ตารางที่ ก-6 ปริมาณของแข็งแขวนลอยกับความเข้มข้นสาหร่าย

Algae concentration (cells/ml)	SS (mg/L)
1.34E+06	28.4
3.36E+06	64.5
1.58E+07	344

ภาคผนวก ข การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำลายเสถียรภาพอนุภาคสาหร่าย

ตารางที่ ข-1 การปรับพีเอช

pH	algae conc.	efficiency (cells/ml)	SD	efficiency (NTU)	SD
5	8.00E+05	2.03	1.59	4.09	2.13
	3.00E+06	2.70	1.64	7.56	0.00
7	8.00E+05	3.82	1.46	4.69	1.62
	3.00E+06	5.41	0.88	7.98	1.31
8.6	8.00E+05	6.20	1.52	8.08	1.20
	3.00E+06	5.02	1.86	7.91	0.98
9	8.00E+05	4.85	2.93	4	1.26
	3.00E+06	6.18	0.00	9.75	0.60
11	8.00E+05	19.58	4.67	21.65	3.90
	3.00E+06	12.84	1.23	15.64	0.06

ตารางที่ ข-2 การเติมสารส้มเพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มล.

Alum dose (mM)	efficiency (cells/ml)	SD	efficiency (NTU)	SD
0.00	2.81	0.90	7.88	1.40
0.06	24.46	2.13	18.03	1.29
0.18	86.16	0.00	82.69	0.00
0.29	88.86	1.28	86.73	2.04
0.41	89.31	0.82	87.98	1.83
0.58	85.61	1.88	84.80	2.15
0.88	87.36	0.00	83.08	0.00
1.17	87.77	0.00	87.16	0.00

ตารางที่ ข-3 การเติมสารส้มเพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มล.

Alum dose (mM)	efficiency (cells/ml)	SD	efficiency (NTU)	SD
0.00	0.00	0	0.00	0.00
0.29	26.57	4.38	20.06	3.01
0.58	6.92	2.92	0.00	4.39
0.88	0.00	7.31	0.00	5.78

ตารางที่ ข-4 การเติม PACl เพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มล.

PACl dose (mM)	efficiency (cells/ml)	SD	efficiency (NTU)	SD
0.00	2.81	0.01	7.88	0.01
0.06	2.52	0.01	7.42	0.03
0.11	25.92	0.05	30.40	0.05
0.17	64.35	0.03	66.43	0.05
0.28	83.70	0.02	85.30	0.01
0.80	93.98	0.01	94.43	0.02

ตารางที่ ข-5 การเติม PACl เพื่อแยกสาหร่ายความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มล.

PACl dose (mM)	efficiency (cells/ml)	SD	efficiency (NTU)	SD
0.00	2.81	0.01	7.88	0.01
0.06	2.52	0.01	7.42	0.03
0.11	25.92	0.05	30.40	0.05
0.17	64.35	0.03	66.43	0.05
0.28	83.70	0.02	85.30	0.01
0.80	93.98	0.01	94.43	0.02

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product:	Poly Aluminium Chloride	Chemical Formula	$[Al_2(OH)_nCl_{6-n}]_m$
Lot No.	20170806	Manufactured Date	2017-08-06
Packing	25kgs/bag	Quantity:	240mts
Standard	GB15892-2009 and PWA	Date of Issue	Aug.25, 2017
Marks:	GEMON/BKK	Appearance	Light Yellow Powder

Index	Standard	Typical Results
Al_2O_3 (\geq , %)	29.0	30.11
Basicity (\leq , %)	65-85	82.72
PH Value (1% solution)	3.5-5.0	4.24
Sulphate(SO_4^{2-} , \leq , %)	10.0	0.1
Iron(Fe, \leq , %)	0.20	0.009
Ammonium Salt (As N, \leq , mg/kg)	300	100
Mn (\leq , mg/kg)	45.0	22.0
As. (\leq , mg/kg)	3.0	0.39
Pb. (\leq , mg/kg)	15.0	0.41
Cd. (\leq , mg/kg)	3.0	0.10
Hg (\leq , mg/kg)	0.30	0.08
Total Cr(\leq , mg/kg)	15.0	9.20
Water Insoluble(\leq , %)	0.60	0.10

河南爱尔福克化学股份有限公司
HENAN AIERFUKE CHEMICALS CO., LTD.

รูปที่ ข-1 องค์ประกอบของสาร PACl

ภาคผนวก ค การออกแบบถังปฏิกริยาสำหรับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายและศึกษา
รูปแบบการไหลด้วยหลักการ RTD

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมคลอไรด์กับค่าการนำไฟฟ้า

NaCl (g/L)	conductivity (mS)
0	0.395
0.01	0.422
0.05	0.52
0.1	0.641
0.5	1.551
1	2.32
5	9.35
10	17.23

ค.1 การคำนวณความเร็วที่เข้าสู่โซนสัมผัส

ถังปฏิกริยา กว้าง 0.25 เมตร ระดับน้ำ 0.30 เมตร

1) ความสูงแผ่นกั้น 15 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วที่เข้าสู่โซนสัมผัส (เมตร/ชั่วโมง)} &= \frac{0.18 \text{ m}^3/\text{hr}}{(0.3-0.15) \times 0.25 \text{ m}^2} \\ &= 4.8 \text{ เมตร/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

2) ความสูงแผ่นกั้น 20 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วที่เข้าสู่โซนสัมผัส (เมตร/ชั่วโมง)} &= \frac{0.18 \text{ m}^3/\text{hr}}{(0.3-0.2) \times 0.25 \text{ m}^2} \\ &= 7.2 \text{ เมตร/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

3) ความสูงแผ่นกั้น 25 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วที่เข้าสู่โซนสัมผัส (เมตร/ชั่วโมง)} &= \frac{0.18 \text{ m}^3/\text{hr}}{(0.3-0.25) \times 0.25 \text{ m}^2} \\ &= 14.4 \text{ เมตร/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ค.2 การคำนวณระยะเวลาโซนสัมผัส

ถังปฏิกริยา กว้าง 0.25 เมตร สูง 0.30 เมตร

1) ความยาวโซนสัมผัส 10 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{เวลาในโซนสัมผัส} &= \frac{0.10 \times 0.25 \times 0.30 \text{ m}^3}{3 \text{ L/min}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \\ &= 2.5 \text{ นาที} \end{aligned}$$

2) ความยาวโซนสัมผัส 12 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{เวลาในโซนสัมผัส} &= \frac{0.12 \times 0.25 \times 0.30 \text{ m}^3}{3 \text{ L/min}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \\ &= 3 \text{ นาที} \end{aligned}$$

3) ความยาวโซนสัมผัส 14 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{เวลาในโซนสัมผัส} &= \frac{0.14 \times 0.25 \times 0.30 \text{ m}^3}{3 \text{ L/min}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \\ &= 3.5 \text{ นาที} \end{aligned}$$

ตารางที่ ค-2 ปริมาตรรูปแบบการไหลต่าง ๆ

H (cm)	L (cm)	Angle (degree)	Vp (L)	tobs (min)	Vm (L)	Dead zone	dead zone (%)
15	12	45	16.5	10.98	16.4	7.1	17.66
	12	60	16.5	9.68	12.5	11.0	27.42
	12	90	16.3	11.93	19.5	4.2	10.51
	10	90	14.5	10.94	18.3	7.2	17.94
	14	90	17.0	10.54	14.6	8.4	20.98
20	12	45	13.3	10.91	19.5	7.3	18.18
	12	60	16.5	11.65	18.4	5.1	12.63
	12	90	17.8	10.34	13.3	9.0	22.43
	10	90	17.0	11.06	16.2	6.8	17.04
	14	90	19.8	12.50	17.8	2.5	6.21
25	12	45	14.8	11.30	19.1	6.1	15.29
	12	60	14.3	10.58	17.5	8.3	20.66
	12	90	10.0	11.45	24.4	5.6	14.11
	10	90	15.3	10.84	17.3	7.5	18.72
	14	90	15.0	11.23	18.7	6.3	15.75

ภาคผนวก ง การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วย CFD

ตารางที่ ง-1 ปริมาตรอากาศและความเร็วเกรเดียนท์ของโซนสัมผัสและโซนแยกภายในถังปฏิกริยา
เมื่อมีการติดตั้งรูปแบบแผ่นกั้นที่แตกต่างกัน

H (cm)	L (cm)	Angle (degree)	ปริมาตรอากาศ (เปอร์เซ็นต์)		ความเร็วเกรเดียนท์ (วินาที ⁻¹)	
			โซนสัมผัส	โซนแยก	โซนสัมผัส	โซนแยก
15	12	45	0.036	0.024	9.16	2.58
	12	60	0.038	0.027	9.35	3.04
	12	90	0.048	0.029	10.80	5.38
	10	90	0.053	0.031	11.28	5.93
	14	90	0.045	0.030	10.29	4.95
20	12	45	0.036	0.024	8.90	2.31
	12	60	0.039	0.025	9.61	3.03
	12	90	0.054	0.021	11.06	5.79
	10	90	0.062	0.021	11.53	6.75
	14	90	0.062	0.021	11.53	6.75
25	12	45	0.037	0.027	8.54	2.08
	12	60	0.041	0.014	9.52	2.93
	12	90	0.110	0.020	10.65	6.29
	10	90	0.134	0.022	10.83	6.98
	14	90	0.093	0.020	10.06	5.44

ภาคผนวก จ การเดินระบบการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกริยาในการแยกสาหร่าย

จ.1 การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแขวนลอย

ตารางที่ จ-1 สภาวะที่ใช้ในการเดินระบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

Algae conc. (cells/mL)	Alum conc. (mM Al ³⁺)	SS (mg/L)	Q _{pw} (L/min)	A/S (mgAir/mgSS)
8x10 ⁵	0.58	91	0.5	0.06
8x10 ⁵	0.58	91	0.6	0.08
3x10 ⁶	0.29	123	0.5	0.05
3x10 ⁶	0.29	132	0.5	0.05

จากสมการที่ 4-8 คำนวณอัตราส่วน A/S เมื่อกำหนดอัตราการไหลของน้ำอัดความดันเท่ากับ 0.5 ลิตร/นาที่ และกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำรวมเท่ากับ 3 ลิตร/นาที่

$$\frac{A}{S} = \frac{Q_{pw} \cdot Sol_{air} (P \cdot f - 1)}{Q_{ww} \cdot SS} \quad (4-8)$$

โดย Q_{pw} = อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (ลิตร/นาที่)

Q_{ww} = อัตราการไหลของน้ำสังเคราะห์สาหร่าย (ลิตร/นาที่)

P = ความดันของน้ำอัดความดันที่ใช้ในการเดินระบบ (บาร์)

SS = ค่าของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัม/ลิตร)

Sol_{air} = Water solubility of air = 21.5 มิลลิกรัมอากาศ/ลิตร ที่อุณหภูมิ 25°C

f = Fraction of saturation = 0.6 บาร์⁻¹

1) เมื่อใช้น้ำสำหรับสายสังเคราะห์ความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร

$$\frac{A}{S} = \frac{0.5L/min \cdot 21.5mgAir/L(4bar \cdot 0.6bar^{-1} - 1)}{(3 - 0.5)L/min \cdot 91mg/L}$$

$$= 0.06 \text{ mgAir/mgSS}$$

2) เมื่อใช้น้ำสำหรับสายสังเคราะห์ความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร

$$\frac{A}{S} = \frac{0.5L/min \cdot 21.5mgAir/L(4bar \cdot 0.6bar^{-1} - 1)}{(3 - 0.5)L/min \cdot 123mg/L}$$

$$= 0.05 \text{ mgAir/mgSS}$$

3) เมื่อใช้น้ำดิบที่มีการบลูมของสาหร่ายความเข้มข้น 3×10^6 เซลล์/มิลลิลิตร

$$\frac{A}{S} = \frac{0.5L/min \cdot 21.5mgAir/L(4bar \cdot 0.6bar^{-1} - 1)}{(3 - 0.5)L/min \cdot 132mg/L}$$

$$= 0.05 \text{ mgAir/mgSS}$$

4) เมื่อใช้น้ำสำหรับสายสังเคราะห์ความเข้มข้น 8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร และเพิ่มอัตราการไหลของน้ำอัดความดันเท่ากับ 0.6 ลิตร/นาที และกำหนดให้อัตราการไหลน้ำรวมเท่ากับ 3 ลิตร/นาที

$$\frac{A}{S} = \frac{0.6L/min \cdot 21.5mgAir/L(4bar \cdot 0.6bar^{-1} - 1)}{(3 - 0.6)L/min \cdot 91mg/L}$$

$$= 0.08 \text{ mgAir/mgSS}$$

จ.2 การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

ในการคำนวณความเข้มข้นสาหร่ายในน้ำหลังผ่านกระบวนการแยกด้วยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายต้องเทียบกับปัจจัยเจือจาง (Dilution factor, DF) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสาหร่ายที่เหลืออยู่ที่แท้จริงก่อนนำไปใช้ในการคิดประสิทธิภาพการแยก โดยค่าปัจจัยเจือจางคำนวณจากสมการที่ จ-1

$$\text{ปัจจัยเจือจาง (DF)} = \frac{Q_{total}}{Q_{total} - Q_{pw} - Q_{alum}} \quad (\text{จ-1})$$

โดยที่ Q_{total} = อัตราการไหลของน้ำรวม (ลิตร/นาท)
 Q_{pw} = อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (ลิตร/นาท)
 Q_{alum} = อัตราการไหลของสารละลายสารส้ม (ลิตร/นาท)

ใช้สมการที่ 4-7 ในการคำนวณประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย

$$\text{ประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย (\%)} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (\text{4-7})$$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นของสาหร่ายเริ่มต้น (เซลล์/มิลลิลิตร)
 C = ความเข้มข้นของสาหร่ายที่เหลืออยู่ในน้ำ (เซลล์/มิลลิลิตร)

ตารางที่ จ-2 การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

$C_{influent}, C_0$ (cells/ml)	$C_{effluent}$ (cells/ml)	DF	C (cells/ml)	Efficiency (%)
8×10^5	2.33×10^5	1.5	3.49×10^5	57.14
8×10^5	2.19×10^5	1.58	3.41×10^5	58.11
3×10^6	3.99×10^5	1.5	5.98×10^5	80.22
3×10^6 (น้ำดิบ)	4.99×10^5	1.5	7.48×10^5	75.27

1) เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 0.5 ลิตร/นาที อัตราการไหลของสารละลาย สารส้ม 0.5 ลิตร/นาที

$$\begin{aligned} \text{ปัจจัยเจือจาง (DF)} &= \frac{3L/min}{3L/min - 0.5L/min - 0.5L/min} \\ &= 3/2 \\ &= 1.5 \end{aligned}$$

4) เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำอัดความดันเท่ากับ 0.6 ลิตร/นาที อัตราการไหลของ สารละลายสารส้ม 0.5 ลิตร/นาที

$$\begin{aligned} \text{ปัจจัยเจือจาง (DF)} &= \frac{3L/min}{3L/min - 0.6L/min - 0.5L/min} \\ &= 3/1.9 \\ &= 1.58 \end{aligned}$$

บรรณานุกรม

- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และกาญจนาพร ครอบธรรมชาติ. 2535. การใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงย้อม. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และรัฐชา ชัยชนะ. 2557. ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. วิศวกรรมสาร มก. 27(88) (เมษายน - มิถุนายน 2557): 57-67.
- พิสุทธิ เพียรมนกุล. 2557. หน่วยกระบวนการสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิลป์ ตันตุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมประปา. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ยุวดี พิรพรพิศาล. 2556. สาหร่ายน้ำจืดในประเทศไทย. เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศุภพิชญณ์ ชัยภัทรกุล. 2555. การวางแผนและดำเนินการเพื่อแก้ไขสถานการณ์การเกิดปัญหาสาหร่ายสีเขียว Algae bloom ในแหล่งน้ำชุมชนหมู่บ้านเคหะธานี 4 พื้นที่เขตสะพานสูง.
- ศุภพิชญณ์ ชัยภัทรกุล. การวางแผนและดำเนินการเพื่อแก้ไขสถานการณ์การเกิดปัญหาสาหร่ายสีเขียว Algae bloom ในแหล่งน้ำชุมชนหมู่บ้านเคหะธานี 4 พื้นที่เขตสะพานสูง. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา : 203.155.220.238/csc/attachments/article/192/sukha_5506_01.pdf [11 มิถุนายน 2561]
- อนรรักษ์ ปิติรักษ์สกุล. 2543. กรณีศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานพิมพ์ผ้าโดยใช้เครื่องลอยตะกอนแบบละลายอากาศ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 10(3) (กรกฎาคม 2543): 21-29.
- Amaro, H. M., Guedes, A. C., and Malcata, F. X. 2011. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. Applied Energy. 88(10): 3402-3410.

- Amirtharajah, A., and Mills, K. M. 1982. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. Journal - American Water Works Association. 74(4): 210-216.
- Besson, A., and Guiraud, P. 2013. High-pH-induced flocculation–flotation of the hypersaline microalga *Dunaliella salina*. Bioresource Technology. 147: 464-470.
- Bold, H. C., and Wynne, M. J. 1978. Introduction to the algae: structure and reproduction. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Borges, L., Morón-Villarreyes, J. A., D’Oca, M. G. M., and Abreu, P. C. 2011. Effects of flocculants on lipid extraction and fatty acid composition of the microalgae *Nannochloropsis oculata* and *Thalassiosira weissflogii*. Biomass and Bioenergy. 35(10): 4449-4454.
- Chen, C., Zhang, X., Zhu, L., Liu, J., He, W., and Han, H. 2008. Disinfection by-products and their precursors in a water treatment plant in North China: Seasonal changes and fraction analysis. Science of The Total Environment. 397(1-3): 140-147.
- Chen, Y. M., Liu, J. C., and Ju, Y. H. 1998. Flotation removal of algae from water. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 12(1): 49-55.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., and Tchobanoglous, G. 2012. MWH's Water Treatment: Principles and Design. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Edzwald, J. K. 1995. Principles and applications of dissolved air flotation. Water Science and Technology. 31(3-4): 1–23.
- Florida Lakewatch. 2000. A beginner’s guide to water management-Nutrients. Florida: Department of Fisheries and Aquatic Sciences, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Fogler, H. S. 2004. Elements of chemical reaction engineering. New Delhi: Prentice Hall

of India Private Limited.

- Hyerim Hwang. DLVO theory [Online]. 2011. Available from: http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/DLVO_theory [2018, July 8]
- Kaiyao Gu. 2017. Using Coagulation and Dissolved Air Flotation to Treat Algae-Laden Water. Master's Thesis, School of Engineering, University of Guelph, Canada.
- Kostoglou, M., Karapantsios, T. D., and Matis, K. A. 2007. CFD Model for the Design of Large Scale Flotation Tanks for Water and Wastewater Treatment. Industrial & Engineering Chemistry Research. 46(20): 6590–6599
- Kwon, H., Lu, M., Lee, E. Y., and Lee, J. 2014. Harvesting of microalgae using flocculation combined with dissolved air flotation. Biotechnology and Bioprocess Engineering. 19(1): 143-149.
- Laamanen, C. A., Ross, G. M., and Scott, J. A. 2016. Flotation harvesting of microalgae. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 58: 75-86.
- Lam, M. K., and Lee, K. T. 2012. Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. Biotechnology Advances. 30(3): 673-690.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Wastewater engineering: treatment and reuse. Boston: McGraw-Hill.
- Nilson., R. 1992. Residual aluminum concentration in drinking water after treatment with aluminum or iron salts or apatite - Health aspects. Journal of Water Supply. 10(4): 55-64.
- Packham., R. E., and Ralnayaka, D. O. 1992. Water clarification with aluminium coagulants in the UK. Journal of Water Supply. 10(4): 35-48.
- Rodrigues, J. P., and Béttega R. 2018. Evaluation of multiphase CFD models for Dissolved Air Flotation (DAF) process. Colloids and Surfaces A. 539: 116–123.

- Shawwa, A. R., and Smith, D. W. 2000. Dissolved air flotation model for drinking water treatment. Canadian Journal of Civil Engineering. 27(2): 373-382.
- Terashima, M., Iwasaki, M., Yasui, H., Goel, R., Suto, K., and Inoue, C. 2013. Tracer experiment and RTD analysis of DAF separator with bar-type baffles. Water Science and Technology. 67(5): 942-947.
- Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M. K., Forde, G. M., and Hoadley, A. 2010. Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels. Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2(1): 1-15.
- Yilmaz, A. E., Boncukcuoğlu, R., and Kocakerim, M. M. 2007. A quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron-containing solution. Journal of Hazardous Materials. 149(2): 475-481.
- Zhang, X., Hu, Q., Sommerfeld, M., Puruhito, E., and Chen, Y. 2010. Harvesting algal biomass for biofuels using ultrafiltration membranes. Bioresource Technology. 101(14): 5297-5304.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ภาวินี พงศ์พันธ์พฤทธิ์
วัน เดือน ปี เกิด	1 มิถุนายน 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ที่อยู่ปัจจุบัน	16/72 หมู่ 8 ถนนสุขาประชาสรรค์3 ตำบลบางพูด อำเภอปากเกร็ด จังหวัด นนทบุรี 11120



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY