

การวิเคราะห์กลไกการแยกสสารร้ายออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอย
ด้วยอากาศละลาย ทางด้านรูปแบบการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Analysis of algae separation mechanism from liquid phase by dissolved air flotation
process in terms of flow patterns and mathematical model

Mr. Thawatchai Chintateerachai



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์กลไกการแยกสลายออกจากเฟสของเหลว ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ทางด้าน รูปแบบการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
โดย	นายธวัชชัย จินตธีรชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จีระศักดิ์ พิทักษ์อรรมพ)

ธวัชชัย จินตธีรชัย : การวิเคราะห์กลไกการแยกสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ทางด้านรูปแบบการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Analysis of algae separation mechanism from liquid phase by dissolved air flotation process in terms of flow patterns and mathematical model) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร.พิสุทธิ์ เพ็ญมนกุล, 274 หน้า.

กระบวนการทำให้ลอยมีประสิทธิภาพสูงในการแยกอนุภาคขนาดเล็ก และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น การผสมผสานกระบวนการทางเคมี กระบวนการทำให้ลอย และกระบวนการแยกทางกายภาพ เข้าด้วยกัน (Hybrid process) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งาน ในการแยกอนุภาคต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย เช่น สาหร่าย น้ำมัน อนุภาคความขุ่น เป็นต้น ซึ่งรูปแบบการไหลของของไหลในถังปฏิกรณ์มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ปัจจัยทางอุทกพลศาสตร์ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่มีผลต่อรูปแบบการไหลในทอของค่า Dispersion number ($d; D/uL$) ได้แก่ อัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ชนิดของหัวกระจายอากาศ และ อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ด้วยโมเดลทางทฤษฎีแบบ Dispersion model และทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (DOE) ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สารส้มและแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ และความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลกับประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ผลการทดลองบ่งชี้ว่าถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานมีลักษณะเป็นถังปฏิกรณ์แบบทอที่มีการแพร่กระจายของสารมาก อัตราการไหลของน้ำอัดความดันมีผลต่อค่า D/uL ในรูปแบบสมการเชิงเส้น โดยที่ค่า D/uL แปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน ส่วนอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสและอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกมีผลต่อค่า D/uL ในรูปแบบสมการกำลังสอง สำหรับการแยกอนุภาคออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ถ้าใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ จะได้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความขุ่นและเซลล์สาหร่าย 70.9% และ 75% ตามลำดับ ถ้าใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ จะได้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความขุ่นและเซลล์สาหร่าย 73.7% และ 75.6% ตามลำดับ ซึ่งค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่เหมาะสมในการแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายอยู่ในช่วง 0.105-0.107

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2559	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670220121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: MICROALGAE / DISSOLVED AIR FLOTATION PROCESS / HYBRID REACTOR / RESIDENCE TIME DISTRIBUTION / COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

THAWATCHAI CHINTATEERACHAI: Analysis of algae separation mechanism from liquid phase by dissolved air flotation process in terms of flow patterns and mathematical model. ADVISOR: ASST. PROF.CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF.PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 274 pp.

Flotation process is highly effective for small particle separation and it is more widely used. Combination of chemical process, flotation process, and physical separation process (Hybrid process) can be applied for various particle separations such as microalgae oil-emulsion and turbid particle etc. Flow patterns of fluid in reactor have an effect on particle separation efficiency by dissolved air flotation process. This study examined flow patterns of the hybrid reactor, effect of the hydrodynamic parameters of the hybrid reactor on flow pattern in term of dispersion number (d ; D/uL) including Liquid flow rate (Q_L), Pressurized water flow rate (Q_{PW}), Air flow rate in contact zone and separation zone ($Q_{g,1}$ and $Q_{g,2}$), and type of air diffuser (D_1) by dispersion model and Design of Experiments (DOE). Separation efficiency of algae and turbid particle by coagulation combined with DAF which alum and calcium chloride were used as coagulant and relationship between flow pattern and separation efficiency were also investigated in this study. The result showed that flow patterns of the hybrid reactor are Plug flow reactor with large extents of dispersion. Q_{PW} has inversely effect on D/uL and D/uL is function of $Q_{g,1}$ and $Q_{g,2}$ in terms of quadratic equation also. In the part of particle separation by combination of coagulation and DAF, separation efficiency of turbid particle and microalgae with alum addition were 70.9% and 75% respectively but separation efficiency of turbid particle and microalgae with $CaCl_2$ addition were 73.7% and 75.6% respectively. Optimum D/uL value of the hybrid reactor for microalgae and turbid particle separation from liquid phase by DAF is 0.105 to 0.107.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภู่งประเสริฐ อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ร่วม ที่มอบโอกาสในการทำงานวิจัยนี้แก่ข้าพเจ้า ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความคิดเห็นอันมี
ค่าอย่างประเมินไม่ได้ ตลอดการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล อาจารย์ ดร.ดาว
สุวรรณแสง จันเจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ และ ดร.จีระศักดิ์ พิทักษ์
อรรมพ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ดิชม และแก้ไขใ้งานวิจัยนี้มีความถูกต้องและ
สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าอย่าง
มากมาย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ
ข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ดร.ณัฐวิญญ์ ชวลิตพรศิยา และนายกริชชาติ ว่องไวลิขิต ที่ให้คำปรึกษา
และคำแนะนำอันมีค่าแก่ข้าพเจ้าตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้าน

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่ในการศึกษา
และทำวิจัยระดับปริญญาโทมาบัดนี้ของข้าพเจ้า

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฅ
สารบัญตาราง.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 สาทรราย (พันดาว ทองตัน, 2545).....	6
2.2 กระบวนการบำบัดและแยกสาทรราย (พันดาว ทองตัน, 2545).....	14
2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชั่น (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538).....	15
2.4 กระบวนการทำให้ลอย	32
2.5 ประเภทของถังปฏิกริยา (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2558).....	45
2.6 รูปแบบการกระจายตัวของเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD) (Fogler, 2006; Levenspiel, 1999).....	46
2.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) (Chung, 2002).....	50
2.8 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiments) (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551)	51
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	53

บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	72
3.1 แผนการทดลอง	72
3.2 การติดตั้งการทดลอง (Experimental set-up).....	74
3.3 อุปกรณ์และสารเคมี.....	75
3.3.1 อุปกรณ์ 75	
3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	77
3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์.....	77
3.5.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	79
3.5.1.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา.....	79
3.5.1.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่น.....	80
3.5.2 การศึกษาการแยกอนุภาคออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการทางเคมี	80
3.5.2.1 การปรับค่าพีเอช (pH adjustment).....	80
3.5.2.2 กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการทำจาร์เทส (Jar Test)	81
3.5.3 การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยทฤษฎีการกระจายตัวของเวลากัก (Residence time distribution)	82
3.5.4 การแยกอนุภาคออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย 83	
3.5.5 การศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกรณ์ด้วย Computational Fluid Dynamics (CFD) 85	
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	86
4.1 ผลการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์.....	88
4.1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่าย	88
4.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพ	88
4.1.1.2 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (Chlorella sp.).....	89
4.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่น	90

4.2 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทางเคมี	92
4.2.1 ผลการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยการปรับค่าพีเอช.....	92
4.2.2 ผลการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	96
4.2.3 ผลการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน	102
4.3 แนวทางการออกแบบถังปฏิกริยา (Reactor design concept).....	105
4.3.1 อุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ (Static mixer).....	106
4.3.2 ถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน (Hybrid Reactor).....	107
4.4 ผลการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาด้วยทฤษฎีการกระจายตัวของเวลากัก (Residence time distribution).....	110
4.4.1 ผลของอัตราการไหลของของเหลวที่มีต่อรูปแบบการไหล.....	114
4.4.2 ผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่มีต่อรูปแบบการไหล.....	116
4.4.3 ผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสที่มีต่อรูปแบบการไหล.....	118
4.4.4 ผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกที่มีต่อรูปแบบการไหล	120
4.5 การอธิบายรูปแบบการไหลด้วยแบบจำลองทางทฤษฎี.....	124
4.5.1 ผลการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยา.....	126
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน	129
4.6 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วย อากาศละลาย	132
4.6.1 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วย อากาศละลาย.....	133
4.6.1.1 ผลของค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค	133
4.6.1.2 ผลของรูปแบบการไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค	134
4.6.2 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการ โคแอกกูเลชัน ร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	136

4.6.2.1 ผลของค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งและรูปแบบการไหล.....	136
4.6.2.2 ผลของประเภทน้ำเสียสังเคราะห์และชนิดสารโคแอกกูแลนต์	138
4.7 ผลการศึกษาารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วย Computational Fluid Dynamics	140
4.7.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อรูปแบบการไหล	140
4.7.2 ผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสที่มีต่อรูปแบบการไหล.....	143
4.7.3 ผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกที่มีต่อรูปแบบการไหล	145
4.7.4 ผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่มีต่อรูปแบบการไหล.....	148
4.7.5 ผลของรูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่มีต่อ ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	152
4.7.5.1 ผลของอัตราการไหลของของเหลว.....	152
4.7.5.2 ผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน.....	153
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	154
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	154
5.2 ข้อเสนอแนะ	155
รายการอ้างอิง	157
ภาคผนวก.....	162
ภาคผนวก ก วิธีการนับเซลล์สำหรับ่าย	163
ภาคผนวก ข ผลข้อมูลการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาด้วยทฤษฎีการกระจายตัว ของเวลากัก (Residence time distribution).....	167
ภาคผนวก ค ผลข้อมูลการศึกษากการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการ ทางเคมี	243
ภาคผนวก ง ผลข้อมูลการศึกษากการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำ ให้ลอยด้วยอากาศละลาย	248
ภาคผนวก จ ตัวอย่างการคำนวณการออกแบบถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน.....	250

ภาคผนวก ฉ รายละเอียดการคำนวณปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้และปริมาณตะกอนที่
 เกิดขึ้นจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน 254

ภาคผนวก ช Mesh generation ในภาพจำลองของถังปฏิกริยา 258

ภาคผนวก ซ การเลือกแบบจำลองที่ใช้ศึกษารูปแบบการไหลด้วย CFD..... 261

ภาคผนวก ฅ ผล simulation จาก Laminar flow model และ Turbulence flow model 269

ภาคผนวก ญ Systematic method for Scale up 270

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 273



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 โมเดลที่ใช้อธิบาย Electric Double Layer Theory	15
รูปที่ 2-2 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ.....	16
รูปที่ 2-3 ปริมาณสารส้มและค่าพีเอชที่สัมพันธ์กับกลไกที่เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	18
รูปที่ 2-4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวนเร็ว.....	20
รูปที่ 2-5 ถังกวนช้าแบบแผ่นกั้นน้ำ.....	27
รูปที่ 2-6 องค์ประกอบที่ทำให้ลอยประกอบด้วย ส่วนสัมผัส และส่วนแยก	33
รูปที่ 2-7 ส่วนสัมผัสและส่วนแยกในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	34
รูปที่ 2-8 การแยกตัวของอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระ ออกจากวัฏภาคน้ำ	39
รูปที่ 2-9 ไดอะแกรมของถังปฏิกริยาเชิงอุตสาหกรรม	46
รูปที่ 2-10 การวัดรูปแบบการกระจายตัวของเวลากัก	47
รูปที่ 2-11 แบบจำลองต่างๆ ของ Compartment mode.....	49
รูปที่ 2-12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์ไซยาโนแบคทีเรีย.....	55
รูปที่ 2-13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศ ละลาย การกรอง และการตกตะกอน	56
รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของ IOM และ EOM	58
รูปที่ 2-15 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระหว่างการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ อย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตรา 0.5 โมลต่อลิตรต่อนาที	59
รูปที่ 2-16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแยกกับปริมาณการเติมโซเดียม ไฮดรอกไซด์.....	60
รูปที่ 2-17 ความสัมพันธ์ระหว่าง concentration factor กับปริมาณการเติมโซเดียม ไฮดรอกไซด์.....	60

รูปที่ 2-18 การเลือกกระบวนการแยกอนุภาคขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบ	61
รูปที่ 2-19 การเปรียบเทียบค่าซีต้าโพเทนเชียลของสาหร่ายที่ความเข้มข้น 7.4×10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในสารละลายต่างๆ	62
รูปที่ 2-20 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย ที่ความเข้มข้น 7.4×10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตร โดยการเติม CTAB ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	63
รูปที่ 2-21 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันที่ความเข้มข้นของอลูมิเนียมซัลเฟตแตกต่างกัน	64
รูปที่ 2-22 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันที่อัตราการไหลของฟองอากาศแตกต่างกัน	65
รูปที่ 2-23 ค่า a/G ratio ที่อัตราการไหลของฟองอากาศแตกต่างกัน	65
รูปที่ 2-24 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันที่ค่า a/G ratio แตกต่างกัน	66
รูปที่ 2-25 กระบวนการทั่วไปสำหรับแยก และทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงาน	68
รูปที่ 2-26 กราฟการกระจายตัวของเวลากักของระบบจากการทดลองและแบบจำลอง	69
รูปที่ 2-27 แบบจำลองแสดงรูปแบบการไหลในถังทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	70
รูปที่ 2-28 เวกเตอร์แสดงความเร็วของของไหลที่ภาคตัดขวางของถัง (มุมมองด้านข้าง)	70
รูปที่ 3-1 ชุดอุปกรณ์การแยกสาหร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย	75
รูปที่ 3-2 อุปกรณ์นับจำนวนเซลล์สาหร่าย Haemocytometer counting chamber	78
รูปที่ 3-3 ชุดอุปกรณ์และจุดเก็บตัวอย่างสำหรับศึกษาลักษณะการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วย RTD	83

รูปที่ 4-1	แผนผังแสดงความเชื่อมโยงของผลการทดลองในงานวิจัยนี้.....	87
รูปที่ 4-2	รูปร่างของเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา.....	88
รูปที่ 4-3	การกระจายตัวของขนาดเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer).....	88
รูปที่ 4-4	การเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (<i>Chlorella sp.</i>).....	90
รูปที่ 4-5	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเบนโทไนท์ จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer).....	91
รูปที่ 4-6	ไดอะแกรมแสดงกลไกการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการออดีฟลิวคูลูเลชั่น	93
รูปที่ 4-7	รูปร่างน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายหลังจากผ่านกระบวนการออดีฟลิวคูลูเลชั่น (ก) พีเอช 10.5 (ข) พีเอช 11 (ค) พีเอช 12 (ง) พีเอช 13.....	93
รูปที่ 4-8	ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการออดีฟลิวคูลูเลชั่น ที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แตกต่างกัน	94
รูปที่ 4-9	ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชั่น ที่ปริมาณสารส้มแตกต่างกัน.....	96
รูปที่ 4-10	ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้น 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชั่น ที่ปริมาณสารส้มแตกต่างกัน	98
รูปที่ 4-11	ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชั่น ที่ปริมาณสารเคลเซียมคลอไรด์แตกต่างกัน	100
รูปที่ 4-12	ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชั่น ที่ปริมาณสารส้มและเฟอริคคลอไรด์แตกต่างกัน.....	102
รูปที่ 4-13	ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชั่น ที่ปริมาณสารเคลเซียมคลอไรด์แตกต่างกัน	103
รูปที่ 4-14	ชุดอุปกรณ์การแยกสาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชั่นร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย.....	105

รูปที่ 4-15 กราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve) ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ.....	111
รูปที่ 4-16 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของของเหลว 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที.....	114
รูปที่ 4-17 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของของเหลว 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที.....	114
รูปที่ 4-18 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของของเหลว 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที.....	115
รูปที่ 4-19 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของของเหลว 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที กับและอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที.....	115
รูปที่ 4-20 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 0 และ 4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที.....	116
รูปที่ 4-21 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 0 และ 4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 6.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที.....	117
รูปที่ 4-22 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 0 และ 4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 6.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที.....	117
รูปที่ 4-23 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 0 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที.....	118
รูปที่ 4-24 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 0 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที.....	119

รูปที่ 4-25 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 0 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 6.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที.....	119
รูปที่ 4-26 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 0 และ 2.5 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที.....	120
รูปที่ 4-27 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 0 และ 2.5 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที	121
รูปที่ 4-28 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 0 และ 2.5 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที	121
รูปที่ 4-29 สภาวะขอบของระบบ (Boundary condition) ที่ใช้วิเคราะห์รูปแบบการไหลด้วย Dispersion model (Levenspiel, 1999)	124
รูปที่ 4-30 Pareto chart แสดงผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่า D/uL	127
รูปที่ 4-31 ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ 2^{k-1}	128
รูปที่ 4-32 ผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ CCD	130
รูปที่ 4-33 ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ CCD	131
รูปที่ 4-34 Contour plot แสดงผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL	131
รูปที่ 4-35 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแตกต่างกัน	133
รูปที่ 4-36 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่ค่า Dispersion number แตกต่างกัน.....	135

รูปที่ 4-37 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ ที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแตกต่างกัน	136
รูปที่ 4-38 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ ที่ค่า Dispersion number แตกต่างกัน.....	137
รูปที่ 4-39 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายและอนุภาคความขุ่น ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการเติมสารโคแอกกูแลนท์ ที่สภาวะการเดินระบบและรูปแบบการไหลที่เหมาะสม	139
รูปที่ 4-40 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที.....	142
รูปที่ 4-41 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตรต่อนาที.....	142
รูปที่ 4-42 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที	145
รูปที่ 4-43 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที.....	147
รูปที่ 4-44 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที.....	151

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ลักษณะ ขนาด และพื้นที่ผิวของสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ และปริมาณสาร โคแอกกูแลนต์ที่ต้องการ.....	10
ตารางที่ 2-2 แสดงขนาด การอยู่ร่วมกัน รูปร่าง ความหนาแน่น และค่าซีต้าโพเทนเชียลของ เซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2-3 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับ การตกตะกอน	28
ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	35
ตารางที่ 2-5 ปริมาณอากาศละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ณ ความดันอากาศ ต่างๆ.....	35
ตารางที่ 2-6 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน และ การทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย.....	44
ตารางที่ 2-7 ลักษณะสารอินทรีย์ในเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ <i>Microcystis aeruginosa</i> <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Asterionella formosa</i> และ <i>Melosira sp.</i>	53
ตารางที่ 2-8 ลักษณะเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ <i>Microcystis aeruginosa</i> <i>Chlorella</i> <i>vulgaris</i> <i>Asterionella formosa</i> และ <i>Melosira sp.</i>	54
ตารางที่ 2-9 ค่าพารามิเตอร์ EOM และ IOM ของสาหร่ายสายพันธุ์ <i>M.aeruginosa</i> จำนวน 2.01×10^{11} เซลล์ต่อลิตร.....	58
ตารางที่ 2-10 ผลของ NaHCO_3 และอัตราการไหลของอากาศ ที่มีต่อการบำบัดสาหร่าย <i>Scenedesmus quadricauda</i> ความเข้มข้น 7.4×10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตร	64
ตารางที่ 3-1 สูตรอาหารเหลวสำหรับเลี้ยงสาหร่าย N8	79
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรการศึกษาการปรับค่าพีเอช.....	80
ตารางที่ 3-3 ตัวแปรการศึกษาการทำจาร์เทส.....	82
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรศึกษาการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย.....	84

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังกระบวนการอโต้ฟลอคคูเลชันที่ สภาวะที่เหมาะสม.....	95
ตารางที่ 4-2 ปริมาณความเป็นต่างที่ต้องการและตะกอนที่เกิดขึ้น ในการแยกเซลล์สำหรับ ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันที่ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม	99
ตารางที่ 4-3 ประสิทธิภาพและปริมาณที่เหมาะสมในการแยกเซลล์สำหรับออกจากวัฏภาค ของเหลวของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด	101
ตารางที่ 4-4 ประสิทธิภาพและปริมาณที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคความขุ่นออกจาก วัฏภาคของเหลวของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด	104
ตารางที่ 4-5 ค่าความเร็วเกรเดียนท์ เวลาสัมผัส และ Camp number ของ Static mixer ที่อัตราการไหลของของเหลวแตกต่างกัน	106
ตารางที่ 4-6 ค่าความเร็วเกรเดียนท์ เวลาสัมผัส และ Camp number ของส่วนกวนช้าแบบ แผ่นกั้นที่อัตราการไหลของของเหลวแตกต่างกัน	107
ตารางที่ 4-7 เวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศและอนุภาค (นาที่) ที่อัตราการไหลของของเหลว และอัตราการไหลของน้ำอัดความดันแตกต่างกัน.....	108
ตารางที่ 4-8 อัตราน้ำล้นผิวในส่วนแยก (เมตรต่อชั่วโมง) ที่อัตราการไหลของของเหลวและ อัตรา การไหลของน้ำอัดความดันแตกต่างกัน	109
ตารางที่ 4-9 สรุปผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบ ผสมผสาน.....	122
ตารางที่ 4-10 ค่า Dispersion number ($d; D/uL$) ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ	125
ตารางที่ 4-11 ค่าของปัจจัยที่ทำการศึกษในการคัดกรองปัจจัยด้วย DOE แบบ 2^{k-1}	127
ตารางที่ 4-12 ค่าของปัจจัยที่ทำการศึกษด้วย DOE แบบ CCD.....	129
ตารางที่ 4-13 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อรูปแบบ การไหลภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานด้วย CFD.....	141

ตารางที่ 4-14 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการใช้ของอากาศที่ส่วนสัมผัสที่มี
ต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานด้วย CFD 144

ตารางที่ 4-15 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการใช้ของอากาศที่ส่วนแยกที่มี
ต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานด้วย CFD 146

ตารางที่ 4-16 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการใช้ของน้ำอัดความดันที่มีต่อ
รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานด้วย CFD 149



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศต่างๆ ทั่วโลกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากรที่สูงขึ้นและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการน้ำสำหรับการอุปโภคบริโภคเพิ่มขึ้น แหล่งน้ำดิบเพื่อผลิตน้ำประปาจึงไม่เพียงพอ รวมถึงแหล่งน้ำดิบในธรรมชาติมีการปนเปื้อนจากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียชุมชนที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีปริมาณไนเตรทและฟอสฟอรัสละลายอยู่มาก ทำให้เกิดการเจริญเติบโตของสาหร่ายอย่างหนาแน่น (Algae bloom) ก่อให้เกิดปัญหาหกราส กลิ่น และสีอันไม่พึงประสงค์ในแหล่งน้ำธรรมชาติ (Henderson et al., 2008) ในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปจะมีความหนาแน่นสาหร่ายประมาณหลัก 10^2-10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (Sabater, 1995); (ทันดาว ทองตัน, 2545) แต่ถ้าเกิดปรากฏการณ์ Algae bloom ความหนาแน่นสาหร่ายจะสูงถึงหลัก 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ซึ่งแหล่งน้ำดิบที่มีการปนเปื้อนของสาหร่ายเมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปา ทำให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น ความต้องการสารโคแอกกูแลนซ์ที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าสารเคมี การอุดตันของสารกรอง ส่งผลให้ต้องทำการล้างย้อนบ่อยขึ้น และสารพลอยได้ที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง หรือ Disinfection by products (DBPs) จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน เป็นต้น นอกจากนี้สาหร่ายยังเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่ใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อยกว่าพืชชนิดอื่น เช่น ข้าวโพด ปาล์ม (Show et al., 2013)

เซลล์สาหร่ายจัดเป็นอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็ก มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ และมีค่าซีต้าโพเทนเชียลเป็นลบค่อนข้างสูง ทำให้มีเสถียรภาพในการแขวนลอยอยู่ในน้ำ แต่เนื่องจากเซลล์สาหร่ายตามธรรมชาติมีทั้งเซลล์อายุน้อยและอายุมาก ซึ่งส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเซลล์และค่าซีต้าโพเทนเชียล เซลล์สาหร่ายที่มีอายุเพิ่มขึ้นจะมีค่าซีต้าโพเทนเชียลลดลง ทำให้มีแนวโน้มตกตะกอนมากกว่าเซลล์ที่มีอายุน้อยกว่า แต่ก็จำเป็นที่จะต้องใช้เวลาเก็บน้ำนานและถังขนาดใหญ่ เปลือกพื้นที่มากเกินไป นอกจากนี้สาหร่ายบางสายพันธุ์ที่มีแพคเจลลาสามารถเคลื่อนที่หลบหลีกฟล็อก และเคลื่อนที่ผ่านกระบวนการแยกได้ เช่น สาหร่าย *Chlamydomonas* ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกเซลล์ลดลง และสาหร่ายบางสายพันธุ์มีอากาศบรรจุอยู่ในเซลล์ จึงมีความ

หนาแน่นต่ำกว่าสาหร่ายโดยทั่วไป เช่น สาหร่าย *Microcystis aeruginosa* ในทางตรงกันข้าม สาหร่ายจำพวกไดอะตอม มักจะมีผนังหุ้มเซลล์ที่หนาก ส่งผลให้ความหนาแน่นสูง อย่างไรก็ตาม สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถสังเคราะห์แสง และสร้างก๊าซออกซิเจนได้ ส่งผลให้ลดอัตราการตกตะกอนของฟล็อก (Henderson et al., 2008) การแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการใดเพียงกระบวนการหนึ่ง เช่น กระบวนการตกตะกอน จึงมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการพัฒนากระบวนการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากวัฏภาคน้ำจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ เช่น กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process) โดยการเติมสารคลอรีนเพื่อกำจัดเซลล์สาหร่าย แต่เมื่อคลอรีนรวมตัวกับสารอินทรีย์ ซึ่งรวมถึงเซลล์สาหร่ายด้วย ทำให้เกิดสารก่อมะเร็ง (DBPs) จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา กระบวนการทำให้ลอย (Flotation) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้สำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ ซึ่งสาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะทำการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอย เพื่อให้ได้น้ำดิบคุณภาพดีสำหรับผลิตน้ำประปา และเซลล์สาหร่ายที่มีความเข้มข้นสูงสำหรับใช้เป็นพลังงานทางเลือก

สาหร่ายคลอเรลลา (*Chlorella sp.*) เป็นสาหร่ายชนิดหนึ่งในกลุ่มสาหร่ายสีเขียว (Chlorophyta) พบได้ทั่วไปโดยเฉพาะในดิน แม้กระทั่งในขวดตม่น้ำ หรือถังบรรจุน้ำที่ไม่ค่อยได้ล้าง ก็จะมีพบเสมอ และมักจะพบอาศัยอยู่ร่วมกันแบบซิมไบโอซิสกับสัตว์ เช่น พารามีเดียม ไฮดรา และฟองน้ำ เป็นต้น เป็นสาหร่ายที่ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์มาก เนื่องจากมีโปรตีนสูงถึง 50-60% โดยน้ำหนักแห้ง จึงถูกนำมาใช้เป็นอาหารเสริมของคนถ้ามีคุณภาพสูง แต่ถ้ามีคุณภาพพร่องลงไปก็จะนำไปใช้ในอาหารเสริมของสัตว์ รวมถึงการนำคลอเรลลาไปใช้ผลิตน้ำมัน นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถสร้างสารปฏิชีวนะชื่อ คลอเรลลิน (Chlorellin) อีกด้วย (ยูวดี พิรพรพิศาล, 2549)

กระบวนการแยกทางกายภาพเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลว เช่น กระบวนการตกตะกอน กระบวนการกรอง เป็นต้น แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 1 nm ถึง 1 mm ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากอนุภาคมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloids) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดความขุ่นในน้ำ การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจมีการเติมสารเคมี (Coagulant) เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาค การใช้กระบวนการทางเลือกต่างๆ โดยเฉพาะกระบวนการทำให้ลอย (Flotation) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการแยกอนุภาคขนาดเล็ก และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น หรือผสมผสานกระบวนการ

ทางเคมี กระบวนการทำให้ลอย และกระบวนการแยกทางกายภาพ เข้าด้วยกัน (Hybrid process) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งาน ในการแยกอนุภาคต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย เช่น สาหร่าย น้ำมัน อนุภาค ความขุ่น เป็นต้น

รูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาในอุดมคติโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ถังปฏิกริยาแบบท่อ (Plug flow reactor: PFR) และถังปฏิกริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ (Completely mixed reactor: CSTR) แต่การไหลของของไหลภายในถังปฏิกริยาจริงมีความแตกต่างจากอุดมคติ เนื่องจากการไหลลัดวงจรของของไหล (Channeling) การไหลวนของของไหล (Recycling flow) และบริเวณที่ไม่มีการไหล (Stagnant zone) ส่งผลให้โมเลกุลของของไหลมีเส้นทางการไหลที่แตกต่างกันและใช้เวลาในการไหลผ่านถังปฏิกริยาไม่เท่ากัน การกระจายของเวลาที่โมเลกุลของของไหลไหลผ่านถังปฏิกริยาเรียกว่า กระจายตัวของเวลากัก (Residence Time Distribution: RTD) ซึ่งรูปร่างลักษณะของกราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve function) มีความสำคัญในการประยุกต์ใช้แบบจำลองการไหลทางทฤษฎีเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการไหลของถังปฏิกริยา โดยแบบจำลองการไหลที่นิยมนำมาวิเคราะห์รูปแบบการไหล ได้แก่ Compartment model ทำการเปรียบเทียบ E curve ของถังปฏิกริยาจริงกับ E curve ทางทฤษฎี เพื่อหาโมเดลที่เหมาะสมที่สุด Dispersion model ใช้วิเคราะห์หาระดับของการกวนผสม (Degree of mixing) ในเทอมของค่า Dispersion number ($d; D/uL$) ถ้า D/uL มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าถังปฏิกริยามีลักษณะเป็น PFR แต่ถ้า D/uL มีค่าเป็นอนันต์ แสดงว่าเป็น CSTR และ Tank-in-series model ใช้วิเคราะห์หาจำนวนถัง CSTR ที่ต่ออนุกรมกัน (Levenspiel, 1999) โดยที่ความเข้าใจเกี่ยวกับรูปแบบการไหล และ Degree of mixing ในส่วนสัมผัสระหว่างอนุภาคกับฟองอากาศ มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบกระบวนการทำให้ลอย และเลือกสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่ต้องการ (Behin et al., 2012; Valade et al., 2009)

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากระบวนการแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย วิเคราะห์รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาและนำไปปรับปรุงถังให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคดีขึ้น ซึ่งช่วยลดปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้กำจัดความขุ่น และลดปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้น รวมถึง

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคด้วยระบบบำบัดดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย
- 1.2.2 เพื่อศึกษารูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกรณ์สำหรับแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลกับประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่เพิ่มขึ้น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในระดับทดลอง (Pilot scale) การทดลองทั้งหมดดำเนินการที่ อุณหภูมิห้อง โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 สาหร่ายสายพันธุ์ที่ใช้ทำการศึกษา คือ คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) จากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 1.3.2 อนุภาคความขุ่นที่ใช้ทำการศึกษา คือ เบนโทไนท์ จากบริษัท พี.พี.เอ็ม. เคมีคอล จำกัด
- 1.3.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบบำบัดประกอบด้วยส่วนกวนเร็วแบบในเส้นท่อ และถังปฏิกรณ์ซึ่งภายในแบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อยๆ คือ ส่วนกวนช้าแบบแผ่นกั้น ส่วนสัมผัสฟองอากาศน้ำไหลขึ้น ส่วนแยกน้ำกับสาหร่ายโดยน้ำไหลลงด้านล่างส่วนสาหร่ายลอยขึ้นด้านบน
- 1.3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์ อัตราการไหลน้ำอัดความดัน และค่า A/S ratio
- 1.3.5 วิเคราะห์จำนวนเซลล์สาหร่ายโดยใช้ Haemocytometer counting chamber
- 1.3.6 การศึกษาลักษณะทางจลนศาสตร์ของของไหลในถังปฏิกรณ์ด้วย Computational Fluid Dynamics (CFD) ใช้โปรแกรม Ansys Fluent 14.5

- 1.3.7 การศึกษารูปแบบการกระจายตัวของเวลากัก (RTD) ของถังปฏิกรณ์ ใช้โซเดียมคลอไรด์ เป็น tracer และทำการทดลองแบบจ่ายครั้งเดียว (Pulse input experiment)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย

- 1.4.1 เป็นกระบวนการทางเลือกในการแยกสารห่วยออกจากน้ำดิบ ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปา เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีและการอุดตันของสารกรอง
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการแยกสารห่วยออกจากวัฏภาคของเหลว เพื่อนำสารห่วยไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น ผลิตน้ำมัน ผลิตอาหารเสริม เป็นต้น
- 1.4.3 สามารถพัฒนาถังปฏิกรณ์ให้มีรูปแบบการไหลที่เหมาะสมกับกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมากขึ้น และมีประสิทธิภาพในการแยกสารห่วยดีขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาหร่าย (ทันดาว ทองตัน, 2545)

สาหร่ายสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะรูปร่างและขนาดหลากหลายสามารถพบได้ทั้งในน้ำจืด น้ำทะเล น้ำกร่อย น้ำพุร้อน ในดิน หรืออาศัยอยู่บนสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น นอกจากนี้ยังมีสารรงควัตถุ เช่น สารคลอโรฟิลล์เอ สารคลอโรฟิลล์บี และสารแคโรทีน เป็นต้น จึงทำให้สาหร่ายสามารถสร้างอาหารเองได้ มีทั้งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ นอกจากนี้สาหร่ายยังสามารถจำแนกได้หลายรูปแบบ เช่น

2.1.1 การจำแนกสาหร่ายด้วยรงควัตถุในเซลล์ สามารถแบ่งได้เป็น 9 กลุ่ม (Division) ดังนี้

- 1) สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Cyanophyta)
- 2) สาหร่ายสีเขียว (Chlorophyta)
- 3) สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (Chrysophyta)
- 4) Euglenoids (Euglenophyta)
- 5) สาหร่ายไฟ (Charophyta)
- 6) สาหร่ายสีน้ำตาล (Phaeophyta)
- 7) สาหร่ายสีเหลืองแกมน้ำตาล (Pyrrophyta)
- 8) Cryptomanads (Cryptophyta)
- 9) สาหร่ายสีแดง (Rhodophyta)

2.1.2 การจำแนกสาหร่ายชนิดสาหร่ายที่สร้างปัญหาในระบบผลิตน้ำประปา

สาหร่ายนอกจากทำให้เกิดกลิ่นและรสในน้ำแล้ว ยังก่อให้เกิดการอุดตันของระบบกรองน้ำ ส่งผลให้ต้องทำการล้างย้อนถักขึ้น ซึ่งมีอยู่หลักๆ 3 กลุ่ม คือ

- 1) Division Cyanophyta (สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน หรือ Cyanobacteria) จัดเป็นพวกเดียวกับแบคทีเรีย เนื่องจากเป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสเหมือนกัน แต่สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีรงควัตถุจำพวก คลอโรฟิลล์-เอ จึงสามารถ

สังเคราะห์แสงได้ พบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป ส่วนใหญ่พบในน้ำจืด แต่ก็สามารถเจริญเติบโตได้ในน้ำทะเล น้ำกร่อย น้ำพุร้อน หิมะ หรือในทะเลทราย เนื่องจากสาหร่ายชนิดนี้ทนต่อสภาวะความแห้งแล้งได้ดีกว่าสาหร่ายกลุ่มอื่นๆ มีลักษณะที่สำคัญ ดังนี้

1. รงควัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์-เอ แคโรทีนอยด์ ไฟโคบิลิโพรตีน โดยรงควัตถุไม่อยู่ในคลอโรพลาสต์ แต่กระจายเป็นอิสระในไซโตพลาสซึม
2. ผนังเซลล์ 2 ชั้น คล้ายแบคทีเรียชนิดแกรมลบ ด้านนอกของผนังเซลล์มีลักษณะเป็นเมือกใส เรียกว่า Sheath
3. ไม่มีหนวด (Fragella) แต่สามารถเคลื่อนที่แบบเลื่อนไหล (Gliding Movement) และมีการเคลื่อนที่แบบถอยหน้า ถอยหลัง แกว่งซ้ายขวา เป็นคลื่น หรือหมุนเป็นเกลียว
4. การสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ
5. สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้
6. เซลล์สาหร่ายบางชนิดสามารถเปลี่ยนสีได้ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นของแสง ความเข้มของแสงหรือปริมาณธาตุอาหาร
7. อาหารสะสมในเซลล์สาหร่าย คือ แป้งไซยาโนไฟซิน (Cyanophycin Starch) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตในรูปแกรนูล (Granules) กระจายอยู่ในโครโมพลาสซึม

สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหลายชนิดมีการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว (Algae Bloom) ส่งผลให้สัตว์น้ำตาย สร้างกลิ่นเหม็น นอกจากนี้ในเซลล์สาหร่ายบางชนิดมีสารเคมีทำให้น้ำมีกลิ่นและรสชาติเปลี่ยนแปลง เช่น จีออสมิน (Geosmin) และสาร 2-Methylisoborneol (2-MIB) และสาหร่ายบางชนิดยังสร้างสารพิษ (Toxin) เช่น Microcystis และ Anabaena สร้างสารพิษที่มีผลทำลายตับและระบบประสาท ทำให้ผู้รับสารพิษนี้โดยการกินถึงแก่ความตายได้ นอกจากนี้การสัมผัสน้ำที่มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายบางชนิดเหล่านี้จะทำให้เกิดอาการผิวหนังอักเสบ บวม และคันได้ เช่น *Anabaena spp.* *Oscillatoria agardhii*, *O. rubescens*, *Lyngbya majuscula* หรือ *Gloeotrichia echinulata* สามารถกำจัดพิษเหล่านี้ได้ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

นอกจากนี้ยังพบว่า สารปฏิชีวนะบางชนิด เช่น สเตรปโตมัยซิน (Streptomycin) หรือ นีโอไมซิน (Neomycin) สามารถลดการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบางชนิดได้ (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2543)

2) Division Chlorophyta (สาหร่ายสีเขียว หรือ Green Algae) มีลักษณะเซลล์เหมือนพืชชั้นสูง (Eucaryotic Cell) พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ เช่น น้ำจืด น้ำกร่อย น้ำทะเล หรือบนดิน มีลักษณะที่สำคัญ ดังนี้

1. รังควัตถุสีเขียว และมีส่วนประกอบเหมือนพืชชั้นสูง คือ มี คลอโรฟิลล์-เอ คลอโรฟิลล์-บี แคโรทีน และแซนโทฟิลล์ รังควัตถุอยู่ในคลอโรพลาสต์ โดยที่คลอโรพลาสต์มีเยื่อหุ้ม 2 ชั้น มีรูปร่างแตกต่างกัน เช่น รูปถ้วย (Cup-shaped) รูปวงรอบเซลล์ (Girdle-shaped) เป็นตาข่าย (Reticulate) เป็นรูปเกลียว (Spiral) รูปดาว (Stellate) หรือเป็นแถบข้างเซลล์ (Parietal) และมีจำนวน 1 อันขึ้นไป

2. อาจมีหรือไม่มีหนวด ส่วนใหญ่ที่เคลื่อนไหวได้จะพบหนวด ตั้งแต่ 1 เส้น หรือมากกว่า โดยหนวดที่พบไม่มีขน (Tubular Hair) และอาจพบเกล็ด (Scale) บนหนวดได้

3. อาหารสะสมมีทั้งแป้งและไขมัน โดยส่วนมากอยู่ในรูปของแป้ง ประกอบด้วย อะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพกติน (Amylopectin) สร้างจากไพรินอยด์ซึ่งอยู่ภายในคลอโรพลาสต์

4. สืบพันธุ์ได้ทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ

3) Division Chrysophyta (สาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง หรือ Golden-Brown Algae) ซึ่งรวมถึงสาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง (Yellow-green Algae) และสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม (Diatom) เข้าไว้ด้วยกัน มีลักษณะสำคัญ ดังนี้

1. รังควัตถุอยู่ในคลอโรพลาสต์ คือ คลอโรฟิลล์-เอ บางชนิดมีคลอโรฟิลล์-ซี แคโรทีน ได้แก่ เบต้า-แคโรทีน (β -Carotene) และเอบซีลอน-แคโรทีน (ϵ -Carotene) แซนโทฟิลล์ ได้แก่ ฟุโคแซนทิน (Fucoxanthin) ไดอะโตแซนทิน (Diatoxanthin) และไฟโคบิลิโพรตีน โดยปริมาณของแคโรทีนอยด์และแซนโทฟิลล์มีมากกว่าคลอโรฟิลล์ จึงทำให้

สีของคลอโรพลาสต์มีตั้งแต่สีเหลือง เขียวแกมเหลือง เขียวมะกอก เหลืองแกมน้ำตาล น้ำตาลแกมทอง น้ำตาลอ่อน เป็นต้น

2. ผนังเซลล์เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นแผ่น หรืออาจไม่มีผนังเซลล์แต่มีเยื่อหุ้มเซลล์
3. อาหารสะสมอยู่ในรูปแป้ง (Chrysolaminarin หรือ Leucosin) และไขมัน
4. เซลล์มีรูปร่าง กลม รี ทรงกระบอก รูปกระสวย หรือรูปร่างเฉพาะ เช่น ไดอะตอม คือมีลักษณะเป็น 2 ฝาครอบกันพอดี




สำหรับสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม อยู่ใน Class Bacillariophyceae เป็นองค์ประกอบสำคัญของกลุ่มประชากรสาหร่าย พบได้ในน้ำจืดและน้ำเค็ม อยู่เป็นเซลล์เดี่ยวและกลุ่มเซลล์ เซลล์ปกติไม่พบหนวด ผนังเซลล์ของไดอะตอมมีลักษณะพิเศษ ประกอบด้วย ฟรุสตุล (Frustule) ที่เป็นซิลิกาล้อมด้วยสารเมือก (Mucilagenous) ฟรุสตุลมี 2 ฝา คือฝาบน (Epitheca) และฝาล่าง (Hypotheca) และมีวงคาดรอบฝาทั้งสองเรียกว่า Girdle Band อนุกรมวิธานของไดอะตอม จำแนกโดยใช้รูปร่าง จำนวน และตำแหน่งของคลอโรพลาสต์ รวมทั้งรูปร่างของเซลล์ โครงสร้างและลวดลายบนฝา (Striae) ที่มีลวดลายแตกต่างกันมากมาย โดยมี 2 อันดับ (Order) คือ Centric Diatom และ Pennate Diatom กลุ่มของไดอะตอมในระบบนิเวศ แบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

1. Euplanktonic Diatom มักก่อให้เกิดการบลูมในฤดูใบไม้ผลิและฤดูใบไม้ร่วงในทะเลสาบและมหาสมุทรในเขตอบอุ่น และในฤดูร้อนในเขตละติจูดที่สูง
2. Benthic Diatom เป็นสาหร่ายที่จับกับสิ่งที่จมน้ำ และการจับเมือกของไดอะตอมและแบคทีเรีย ทำให้เกิดฟิล์มบางๆ บนพื้นผิวของสิ่งที่จมน้ำ เป็นการเตรียมพื้นผิวให้กับสาหร่ายชนิดอื่นๆ การเกาะกับพื้นผิวอาจใช้ฝาช้างหนึ่งแนบกับพื้นผิว หรือเกาะโดยเมือกเหนียวๆ
3. Meroplanktonic Diatom เป็นแพลงก์ตอนชั่วคราวที่เกาะพื้นผิวอย่างหลวมๆ เมื่อถูกรบกวนจะพัดพากลายเป็นแพลงก์ตอนลอยอิสระในน้ำ







ในระบบผลิตน้ำประปา สาหร่ายที่สร้างกลิ่นและรสซึ่งเป็นปัญหาในการผลิตน้ำ ได้แก่ สกุล *Synura* ผลิตกลิ้นแดงกวาดิบและรสขม สกุล *Dinobryon*, *Uroglenopsis* และ *Peridinium* ผลิตกลิ้นคาวปลาอย่างแรง *Synera* ผลิตกลิ้นอับ หรือสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สกุล *Anabaena*, *Anacystis* และ *Aphanizomenon* ผลิตกลิ้นสกปรกคล้ายเล้าหมู *Gomphosphaeria*, *Cylindrospermum* และ *Rivularia* ผลิตกลิ้นหญ้า *Chlamydomonas*, *Crytomonas* และ *Euglena* ผลิตรสหวาน (อาภารัตน์ มหาพันธ์, 2541) กลุ่มสาหร่ายที่ผลิตเมือก (Slime) เช่น *Palmella*, *Anacystis*, *Rivularia*, *Anabaena* และ *Oscillatoria* เป็นสาเหตุของรสและกลิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีเกิดการย่อยสลายในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic Decomposition)

สาหร่ายที่เป็นสาเหตุของการอุดตันของระบบทราयरกรอง ทำให้ช่วงเวลาของการใช้สารกรองสั้นลง มักเป็นสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม เช่น *Asterionella*, *Fragilaria*, *Tabellaria*, *Aulacoseira* (*Melosira*) และ *Synedra*

ตารางที่ 2-1 ลักษณะ ขนาด และพื้นที่ผิวของสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ และปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ต้องการ (G: Green algae, CB: Cyanobacteria, D: Diatom) (Henderson et al., 2008)

Species	Photo	Cell size (µm)	Surface area (µm ²)	Coagulant demand (ng Al/cell)	Reference
<i>Chlorella</i> (G)		3.5	38	0.0118	Liu et al. (1999)
<i>Microcystis</i> (CB)		5	78.5	0.0103	Drikas et al. (2001)
<i>Chlorella</i> (G)		5.3	88	0.0133	Edzwald and Wingler (1990)

ตารางที่ 2-1 ลักษณะ ขนาด และพื้นที่ผิวของสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ และปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่ต้องการ (G: Green algae, CB: Cyanobacteria, D: Diatom) (Henderson et al., 2008) (ต่อ)

Species	Photo	Cell size (µm)	Surface area (µm ²)	Coagulant demand (ng Al/cell)	Reference
<i>Cyclotella</i> (D)		6.1	117	0.032	Edzwald and Wingler (1990)
<i>Anabaena</i> (CB)		6-7	133	0.027	Jiang et al. (1993)
<i>Asterionella</i> (D)		width 2 length 40	257	0.027	Jiang et al. (1993)
<i>Melosira</i> (D)		Diameter 15-20 Length 30-40	2320	0.475; 1.08	Mouchet et al. (1998); Jun et al. (2001)
<i>Pediastrum</i> (G)		Diameter 65-250 (disc)	2598	0.475	Mouchet et al. (1998)
<i>Synedra</i> (G)		width 4.5-6 length 100-300	3068	1.08	Jun et al. (2001)

จากตารางที่ 2-1 และ 2-2 พบว่าสาหร่ายสายพันธุ์คลอโรเซลลา ซึ่งเลือกใช้ทำการทดลองมีขนาดเซลล์ 3.5 ไมครอน ลักษณะเซลล์เป็นทรงกลม พื้นที่ผิวเซลล์ 38 ตารางไมโครเมตร ความหนาแน่น 1070 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และปริมาณความต้องการสารโคแอกกูแลนท์ 0.0118 นาโนกรัมของอลูมิเนียมต่อเซลล์ ที่ค่าพีเอช 4-8 มีค่าซีดีไอโพเทนเชียล -10 มิลลิโวลต์ และที่ค่าพีเอช 5.41-7.08 มีค่าซีดีไอโพเทนเชียล -14.9 ถึง 19.8 มิลลิโวลต์ (Liu et al., 1999); (Clasen et al., 2000)

ตารางที่ 2-2 แสดงขนาด การอยู่ร่วมกัน รูปร่าง ความหนาแน่น และค่าซีต้าโพเทนเชียลของเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ต่างๆ (Henderson et al., 2008)

Particle	Size (μm)	Colonial	Shape	Density (kg/m^3)	Zeta potential (mV)	Test Condition (pH; test water)	Reference
Microcystis aeruginosa	2-7	Globular	Sphere	<1200	-25 to -30	9.5; maturation pond water	Jameson (1999) Vlaski et al. (1996)
Microcystis	N/A	Globular	Sphere	<1200	-7.5 to -26	6.69-7.94; synthetic test water	Clasen et al. (2000)
Synechocystis minuscula	6	Single cell or microcolonies	Sphere	-	-22.3; -28.5; -32.2	4; 5; 6	Bernhardt et al. (1994)
Synechocystis minuscula	5	Single cell or microcolonies	Sphere	-	-14.9 to -24.8	4.52-7.58; synthetic test water	Clasen et al. (2000)
Chlorella sp.	3.5	Single cell	Sphere	1070	-10 -14.9 to -19.8	4-8; distilled water 5.41-7.08; synthetic test water	Liu et al. (1999) Clasen et al. (2000)
Scenedesmus quadricauda	13.1	Row of 4-16 cells w spinal	Ellipsoid	-	-25 to -35	7-10; distilled water	Phoochinda et al. (2003)

ตารางที่ 2-2 แสดงขนาด การอยู่ร่วมกัน รูปร่าง ความหนาแน่น และค่าซีต้าโพเทนเชียลของเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ต่างๆ (Henderson et al., 2008) (ต่อ)

Particle	Size (μm)	Colonial	Shape	Density (kg/m^3)	Zeta potential (mV)	Test Condition (pH; test water)	Reference
<i>Scenedesmus obliquus</i>	18(d); 25(l) 2-9(d); 6-17(l)	Row of 4-16 cells with spiral	Ellipsoidal	-	-23 to -25 -11.2	7-10; distilled water 7	Chen et al. (1998)
<i>Selenastrum capricornutum</i>	2-3(d); 6-8(l)	Single cell	Crescent shaped	1090	-35	6-10; 10^{-3} NaClO ₄ solution	Huang et al. (1999)
<i>Cyclotella</i> sp.	6.1	Chain	Sphere	1140	-19.8 to -22.3	4-10; reservoir	Edzwald and Wingler (1990)
<i>Stephanodiscus hantzsci</i>	8-20(d); 40(spines)	Chain	Disc shaped	-	-12.4	7	Bernhardt et al. (1994)
<i>Fragilaria crotonensis</i>	2-3(d); 40-150(l)	Cell joined along length	Elongated	-	-18.6	7	Bernhardt et al. (1994)
<i>Nitzschia linearis</i>	35(l)	No	Elongated	-	-30(initial); -35(log); -28 (stationary)	-	Konno (1993)
<i>Syndera acus</i>	4.5-6(d); 100-300(l)	No	Needle	1100	-30 to -40	7.5-7.7	Jun et al. (2001)

2.2 กระบวนการบำบัดและแยกสาหร่าย (ทันดาว ทองตัน, 2545)

การควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่ายแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ การควบคุมน้ำดิบ และ การควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำประปา

2.2.1 การควบคุมน้ำดิบ

- 1) ทางกายภาพ ได้แก่ การใช้ถ่านกัมมันต์ การใช้คลื่นเสียง
- 2) ทางเคมี ได้แก่ การใช้สารเคมีกำจัดสาหร่าย (Algicides) นิยมใช้สารคอปเปอร์ ซัลเฟต หรือโพแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต ควรเลือกสารเคมีที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นในแหล่งน้ำ
- 3) ทางชีวภาพ ได้แก่ การใช้โปรโตซัว แพลงก์ตอน หรือปลากินสาหร่าย
- 4) การควบคุมการปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ตามมาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนและอุตสาหกรรม โดยควบคุมปริมาณธาตุสำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส
- 5) การป้องกันการแบ่งชั้นของน้ำ โดยการเติมอากาศลงในน้ำให้เกิดการผสมกัน ส่งผลให้น้ำเย็นที่อยู่ด้านล่างเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนผิวน้ำ

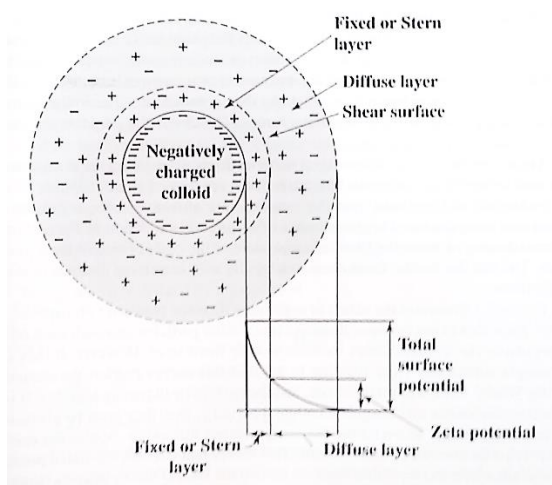
2.2.2 การควบคุมในกระบวนการผลิตน้ำประปา

- 1) ทางกายภาพ
 - ก. การดักสาหร่ายที่ลอยอยู่บนผิวน้ำของถังกรองและถังตกตะกอนออกเนื่องจากสาหร่ายบางชนิดสามารถสร้างฟองได้
 - ข. การสร้างที่บังแสงเพื่อลดปัจจัยในการเจริญเติบโตของสาหร่าย นอกจากนี้ตำแหน่งการตั้งน้ำดิบเข้าสู่ระบบควรอยู่ต่ำกว่าผิวน้ำพอสมควร
- 2) ทางเคมี
 - ก. การปรับค่าพีเอชให้ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย
 - ข. การเติมสารคลอรีนในถังตกตะกอนก่อนเข้าสู่กระบวนการกรองสามารถลดจำนวนสาหร่ายได้มากแต่ก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่งขึ้น Environmental Protection Agency จึงกำหนดค่ามาตรฐานไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาไม่เกิน 100 ไมโครกรัม/ลิตร

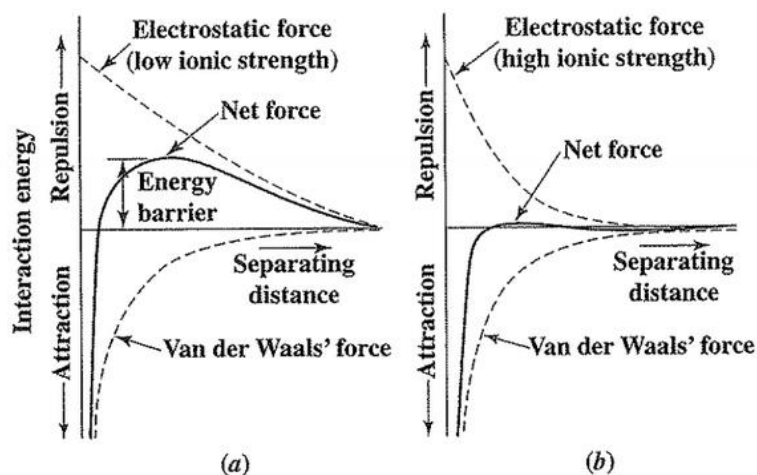
- ค. การเพิ่มสารโคแอกกูแลนต์และการเติมถ่านกัมมันต์ เป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนสูง
- ง. การใช้ขั้วไฟฟ้าจุ่มน้ำก่อนเข้าสู่ถังกรอง สามารถลดปริมาณสารร้ายเสียได้
- จ. ใช้ระบบการกรอง เช่น ไมโครสเตรนเนอร์ เนื่องจากสารร้ายมีขนาดเล็กทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก ต้องใช้น้ำแรงดันสูงและล้างตะแกรงตลอดเวลา ส่วนฟิลเตอร์เป็นวิธีที่ต้นทุนถูกกว่าไมโครสเตรนเนอร์ แต่ถอดตัวย่างและล้างทำความสะอาดยาก

2.3 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดอยู่ในช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร การที่มีขนาดเล็กมากจึงส่งผลให้ไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด อนุภาคคอลลอยด์ที่พบในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมักมีประจุลบ และเป็นอนุภาคที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) สามารถสร้างแรงดึงดูดให้อิออนประจุบวกที่อยู่ในน้ำวิ่งเข้ามาหาได้ ความหนาแน่นของอิออนบวกจะสูงสุดบริเวณที่ติดอยู่กับอนุภาคคอลลอยด์ และลดน้อยลงไปตามระยะห่างจากอนุภาค ศักย์ไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า และคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ ซึ่งเรียกว่า ค่าซีต้าโพเทนเชียล (ดังรูปที่ 2-1) การที่คอลลอยด์มีประจุไฟฟ้าทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาค จึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำไม่รวมตัวกันเป็นฟล็อก ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-1 โมเดลที่ใช้อธิบาย Electric Double Layer Theory (Sawyer et al., 2003)



รูปที่ 2-2 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ (Sawyer et al., 2003)

กระบวนการรวมกลุ่มอนุภาคคอลลอยด์ให้อยู่ในรูปของฟลอค เรียกว่า กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) ขั้นตอนการเกิดโคแอกกูเลชันมี 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

2.3.1 การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ (Destabilization)

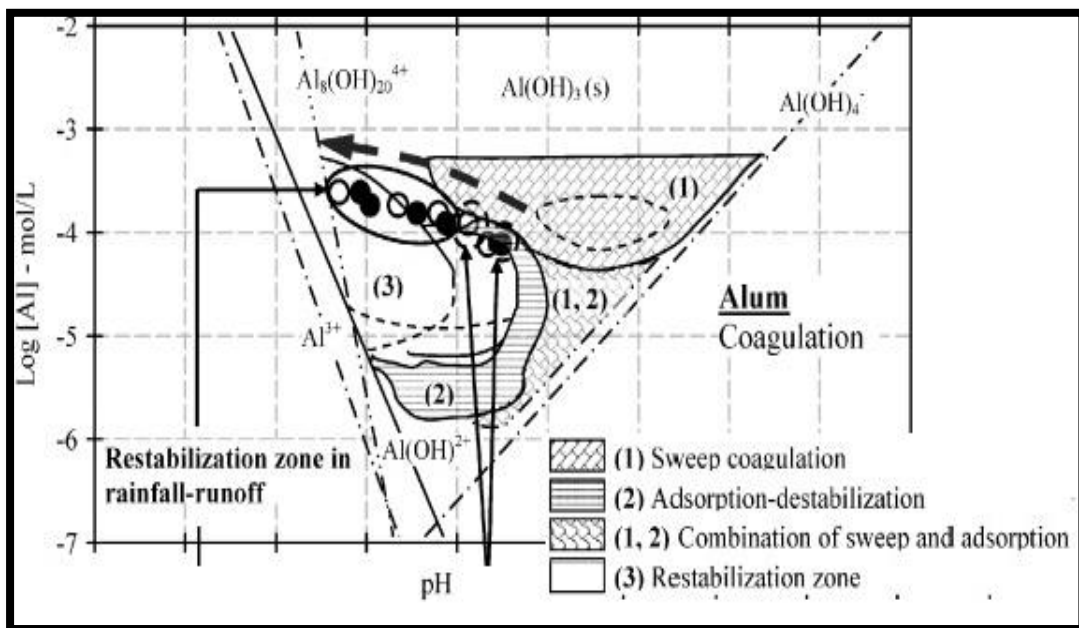
เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักเกิดจากศักย์ไฟฟ้าที่ชักนำโดยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนแรงดูดเป็น van der Waals force ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของอนุภาคขนาดเล็กและโมเลกุล แรงผลักซึ่งมากกว่าแรงดูดทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพและแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ดังนั้นจึงต้องทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์จึงจะเกิดการรวมตัวกลายเป็นฟลอค โดยอาศัยกลไกดังนี้

- 1) การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer) การเพิ่มจำนวนประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาคในชั้นกระจาย เป็นการเพิ่มจำนวน Counter Ion ในชั้นกระจาย ส่งผลให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและศักย์ไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย การที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไปอวก้นอยู่ที่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ทำให้อำนาจของประจุลบของคอลลอยด์ไม่สามารถส่งออกไปไกลเท่าเดิม
- 2) การดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) สารเคมีบางหมู่สามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุตรงข้ามกับของคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในทางลดอำนาจ

ศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ กลไกแบบดูดติดผิวนี้แตกต่างจากกลไกแบบแรก คือ ต้องการอไอออนต่างชนิดน้อยกว่า ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้แปรผันตามปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ นอกจากนี้กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นประจุตรงข้ามได้ ถ้ามีการใช้สารโคแอกกูแลนต์ที่มากเกินไป

- 3) การใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปลงในน้ำในปริมาณที่เพียงพอจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรือจับตัวรวมกับผลึก ซึ่งเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ส่งผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้แปรผันกับความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ เนื่องจากกลไกแบบนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ โคแอกกูแลนต์จึงไม่จำเป็นต้องเกิดขึ้นในขณะที่ซีต้าโพเทนเชียลมีค่าต่ำที่สุด แต่ค่าพีเอชมีบทบาทสำคัญมากต่อกลไกแบบนี้ เพราะมีความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการตกผลึกของสารต่างๆ โคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน
- 4) การใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาค (Polymer Bridging) สารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลบางชนิดและโปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถใช้กำจัดคอลลอยด์ได้ สารเหล่านี้มักมีขนาดโมเลกุลใหญ่มาก ประจุไฟฟ้าอาจเป็นบวก ลบ หรือไม่มีประจุก็ได้ โมเลกุลของสารโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่เสถียรภาพแล้ว (Destabilized Particle) อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ซึ่งเกิดขึ้นได้ทราบเท่าที่มีโพลีเมอร์และตำแหน่งว่างบนพื้นผิวอนุภาค อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่าง จะมีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized Particle)

โคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ สารส้ม (Alum) เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ และหาซื้อได้ง่ายในราคาพอสมควร สารส้มสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ด้วยกลไกหลัก 2 ประการ คือ กลไกแบบตูดติดผิวและทำลายประจุ และกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของสารส้มและค่าพีเอชของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 ปริมาณสารส้มและค่าพีเอชที่สัมพันธ์กับกลไกที่เกิดกระบวนการโคแอกกูแลชั่น (Amirtharaja et al., 1982)

การออกแบบและควบคุมถังกวนเร็ว ต้องการความปั่นป่วนสูงเพื่อผสมสารเคมีกับน้ำให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วพร้อมกันทุกจุด กำหนดให้ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient หรือ G) มากกว่าหรือเท่ากับ 300 วินาที^{-1} และเวลาในการกวนผสม (Detention Time หรือ T) ไม่เกิน 1 นาที สามารถคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการกวนผสมน้ำได้จากสมการของแคมท์และสไตน์

$$G = \left(\frac{P}{\mu \times V}\right)^{0.5} \quad (2-1)$$

โดยที่ G = ความเร็วเกรเดียนท์ หรือความปั่นป่วน (วินาที^{-1})

P	=	พลังงานที่ใช้สร้างความปั่นป่วน (วัตต์)
μ	=	ความหนืดของน้ำ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
V	=	ปริมาตรน้ำในถังกวนเร็ว (ลูกบาศก์เมตร)

คำนวณหาพลังงานที่ใช้ เนื่องจากใช้ใบพัดในการกวนผสม

$$P = \frac{k \times \rho}{g} \times N^3 \times D^5 \quad (2-2)$$

โดยที่	k	=	ค่าคงที่ กรณี 3 ใบพัด $k=1$ กรณี 6 ใบพัด $k=6.3$
	ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	N	=	จำนวนรอบใบพัด ณ ปลายใบพัด (รอบต่อวินาที)
	D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (เมตร)

คำนวณหาเวลาการผสมที่เหมาะสม ด้วยสูตรเอมไพริคัล

$$G \times T_{opt} \times C^{14.6} = 5.9 \times 10^6 \quad (2-3)$$

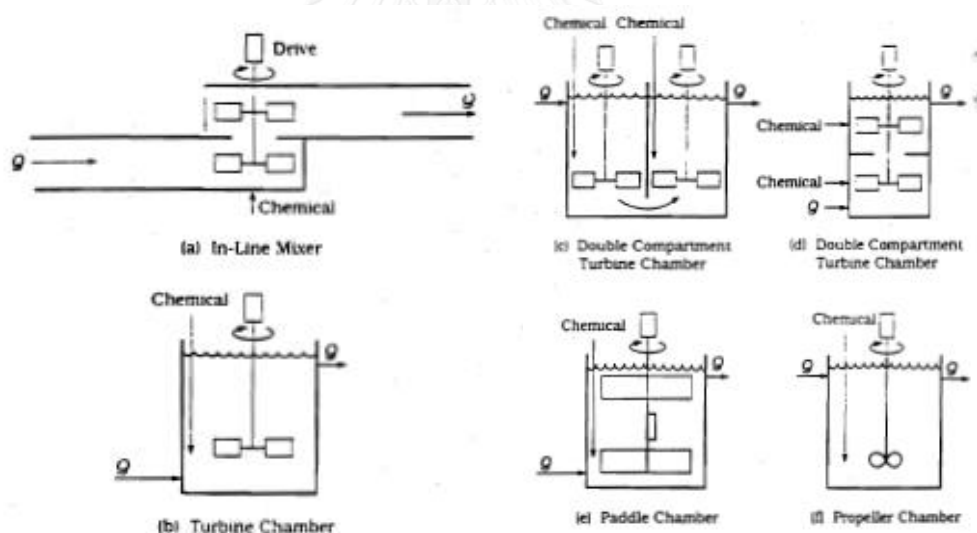
โดยที่	T_{opt}	=	เวลาการผสมที่เหมาะสม (วินาที)
	C	=	ปริมาณสารสั้มที่เหมาะสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

คำนวณหาปริมาตรถังกวนเร็ว

$$V = Q \times T \quad (2-4)$$

โดยที่ V = ปริมาตรถังกวนเร็ว (ลูกบาศก์เมตร)
 Q = อัตราการไหลน้ำเข้าถังกวนเร็ว (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

กรณีใช้เครื่องบดในในท่อ (In-Line Blender) และเครื่องกวนในเส้นท่อ (Static Mixer) เครื่องบดในท่อเป็นเครื่องกวนขนาดเล็กที่สามารถติดตั้งอยู่ในท่อส่งน้ำได้ เครื่องกวนนี้มีรอบหมุนจัดมาก ทำให้มีค่าความเร็วเกรเดียนท์สูงประมาณ 3000-5000 วินาที¹ การกวนผสมระหว่างสารเคมีและน้ำจึงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยต้องการเวลาสัมผัสประมาณ 0.5 วินาทีเท่านั้น เครื่องบดเช่นนี้ต้องการพลังงานประมาณ 0.5 แรงแม้ต่ออัตราการไหล 1 ล้านแกลลอนต่อวัน การสูญเสียเฮดอยู่ในช่วง 1-3 ฟุต สำหรับเครื่องกวนในท่อ ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเลย ชนิดของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการกวนเร็วแสดงดังในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกวนเร็ว (Reynolds et al., 1996)

2.3.2 การกระทบหรือสัมผัสกันของคอลลอยด์ (Transport of colloidal Particles)

การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกัน เรียกว่า ฟล็อกคูเลชัน อนุภาคที่สัมผัสกันแล้วจะต้องเกาะติดกันจนเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อก จึงจะถือว่าเกิดฟล็อกคูเลชัน นอกจากนี้เมื่ออนุภาคเกาะติดกันแล้วไม่ควรหลุดออกจาก

กันหรือหลุดออกให้น้อยที่สุด ถ้าการสัมผัสระหว่างอนุภาคแต่ไม่จับตัวกัน แสดงว่าการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ยังได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร วิธีการสร้างสัมผัสให้กับอนุภาคมีหลายอย่าง ดังนี้

- 1) การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยกลไกการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสัมผัสแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเป็นการเคลื่อนที่แบบอาศัยความร้อน (Thermal motion) การสัมผัสระหว่างอนุภาคต่างๆ ที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนนี้เรียกว่า เพอริไคเนติกฟลอคคูเลชัน (Perikinetic Flocculation) ซึ่งในทางปฏิบัติไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากต้องเสียเวลานานมาก นอกจากนี้การเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลดังกล่าวทำให้สร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1-1.0 ไมครอนเท่านั้น ข้อดีของวิธีสร้างสัมผัสแบบนี้คือที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก สามารถคำนวณหาอัตราการลดจำนวนของคอลลอยด์ได้จากสมการดังนี้

$$J_{pk} = \frac{-4 \times \eta \times k \times T \times N^2}{3 \times \mu} \quad (2-5)$$

โดยที่ J_{pk} = อัตราการลดจำนวนของอนุภาคคอลลอยด์
(ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

η = ประสิทธิภาพในการสัมผัส มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1

k = ค่าคงที่ของ Boltzmann คือ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

N = จำนวนอนุภาคคอลลอยด์ต่อลูกบาศก์เมตร

μ = ความหนืดของน้ำ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการทำให้อนุภาคตกลงเหลือครึ่งหนึ่ง

$$t_{1/2} = \frac{3 \times \mu}{4 \times \eta \times k \times T \times N_0} \quad (2-6)$$

โดยที่ $t_{1/2}$ = เวลาที่ใช้ในการทำให้อนุภาคตกลงเหลือครึ่งหนึ่ง (วินาที)
 N_0 = ความเข้มข้นคอลลอยด์เริ่มต้น (อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร)

การคำนวณหาจำนวนอนุภาคคอลลอยด์

$$N = \frac{N_0}{1 + \left(\frac{t}{t_{1/2}}\right)} \quad (2-7)$$

โดยที่ t = เวลาฟล็อกคูเลชัน (วินาที)
 N = จำนวนคอลลอยด์ที่เวลาใดๆ (อนุภาคต่อลูกบาศก์เมตร)

- 2) ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสัมผัสเกิดขึ้น วิธีปฏิบัติที่นิยมมากที่สุดคือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆ ของน้ำมีอัตราการไหลแตกต่างกันเป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป มิฉะนั้นฟล็อกที่เกิดขึ้นอาจแตกและหลุดออกจากกันได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสเรียกว่า ถังกวนช้า วิธีสร้างสัมผัสแบบนี้คือ ออร์โธไคเนติกฟล็อกคูเลชัน (Orthokinetic Flocculation) เหมาะกับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1.0 ไมครอน และความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถคำนวณหาอัตราการลดจำนวนของคอลลอยด์ได้จากสมการดังนี้

$$J_{ok} = \frac{-2G}{3} \times d^3 \times N^2 \quad (2-8)$$

โดยที่ $J_{ok} =$ อัตราการลดจำนวนของอนุภาคคอลลอยด์
(ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

$d =$ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางคอลลอยด์ (เมตร)

$G =$ ความเร็วเกรเดียนท์ (วินาที⁻¹)

- 3) การสัมผัสระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นเนื่องจากการตกตะกอน (Sedimentation) ที่มีอัตราไม่เท่ากันของอนุภาคต่างๆ ฟล็อกคูเลชันด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อมๆ กับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย อนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกคูเลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในทางปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดังกล่าวอาจเกิดฟล็อกคูเลชันมาแล้วครั้งหนึ่งเมื่อมาถึงถึงตกตะกอนจึงเกิดฟล็อกคูเลชันอีกในขณะที่มีการตกตะกอน
- 4) ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1-1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มิลลิกรัม/ลิตร ฟล็อกคูเลชันอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสแบบออร์โธโคเนติก แต่อาจเกิดขึ้นช้า เนื่องจากโอกาสสัมผัสน้อย วิธีแก้ไขอาจกระทำได้ดังนี้
- 4.1 ใช้เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็วหรือเครื่องกรองแบบ 2 ชั้นกรอง (ทรายและถ่านแอนทราไซต์) ชั้นกรองช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสให้และยังบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่เข้ามาชิดกันด้วย การใช้เครื่องกรองช่วยสร้างฟล็อกคูเลชันเช่นนี้เรียกว่า การกรองสัมผัส (Contact Filtration) แต่เนื่องจากช่องว่างในชั้นกรองมีจำกัด วิธีนี้จึงใช้ได้กับอนุภาคที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร การใช้กรวดขนาดเล็กแทนทรายอาจเพิ่มปริมาตรช่องว่างได้ แต่เป็นการลดพื้นที่ผิวสัมผัส จึงอาจได้ผลดีไม่เท่าชั้นทราย
- 4.2 ใช้อนุภาคที่จับตัวเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคใหม่ ในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ ทำให้ฟล็อกจับตัวเป็นชั้นสลัดจ์ (Sludge blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ผ่านชั้นสลัดจ์ อีกวิธีหนึ่งกระทำได้นำเอาฟล็อกกลับคืนมาผสมกับอนุภาคคอลลอยด์ จากนั้นจึงสร้างสัมผัสแบบ

ออร์โธโคเนติกฟล็อกคูเลชันไปตามปกติ การใช้ถังตกตะกอนแบบโซลิดคอนแทคท์ (Solid contact clarifier) เพื่อกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ ใช้หลักการสร้างสัมผัสดตามแบบที่กล่าวนี้

- 5) การสัมผัสของคอลลอยด์ขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอน และความเข้มข้นต่ำ อาจสร้างสัมผัสดด้วยวิธีการกรองสัมผัสดได้เช่นกัน แต่ขนาดของสารกรองควรมีขนาดใหญ่กว่าทรายกรอง เพื่อเพิ่มปริมาตรช่องว่างสำหรับคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จะส่งผลให้ลดพื้นที่ผิวสัมผัส จึงทำให้ประสิทธิภาพการเกิดฟล็อกต่ำกว่าการใช้ทรายกรอง

ถังกวนช้า (Flocculation tank) มีหน้าที่สร้างโอกาสสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ที่สูญเสียเสถียรภาพ เพื่อให้รวมตัวเป็นฟล็อก การเกิดฟล็อกคูเลชันในถังกวนช้าเป็นแบบออร์โธโคเนติกเสมอ เพื่อให้ฟล็อกคูเลชันเกิดขึ้นได้ผลดีที่สุด เวลารวมตะกอนหรือเวลาสัมผัส (T) ควรมีค่าประมาณ 20-30 นาที การใช้เวลานานกว่านั้นไม่เป็นการประหยัด ระดับความปั่นป่วนที่เหมาะสมคำนวณได้จากสมการ 2-9 ดังนี้

$$(G^*)^{2.8} \times T = K \quad (2-9)$$

โดยที่	G^*	=	ความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสม (วินาที ⁻¹)
			ควรมีค่าระหว่าง 20-50 วินาที ⁻¹
	T	=	เวลากักเก็บน้ำถังกวนช้า (วินาที)
	K	=	ค่าคงที่ ขึ้นกับชนิดและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้

กรณี ใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่ปริมาณไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/ลิตร

$$(G^*)^{2.8} \times T = (44 \times 10^5)/C \quad (2-10)$$

โดยที่	C	=	ความเข้มข้นสารส้ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
--------	---	---	--------------------------------------

ถังกวนช้าแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทใบพัดต่างๆ และประเภทแผ่นกั้นน้ำ (ไม่ต้องใช้เครื่องจักร) กรณีใช้ใบพัดสร้างความปั่นป่วน แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ

- 2 แบบใบพาย (Paddle and Reels) เครื่องกว่นอาจติดตั้งให้หมุนในทิศทางตามน้ำหรือตัดน้ำก็ได้ แขนหมุนอาจอยู่ในแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้ ความเร็วรอบไม่เกิน 2-15 รอบ/นาที โดยมีความเร็วขอบใบพัดประมาณ 1-2 ฟุต/นาที เครื่องกว่นชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอื่นๆ
- 3 แบบเทอร์ไบน์ (Turbine) มีใบพัดที่มีลักษณะเป็นแผ่นจานหมุนซึ่งมีใบพัดขนาดเล็กติดตั้งฉากกับแผ่นจานในแนวรัศมีของจาน แผ่นจานมักติดตั้งฉากกับแกนหมุน ใบเทอร์ไบน์อาจติดตั้งให้หมุนในแนวนอนหรือตั้งก็ได้ ความเร็วรอบของใบเทอร์ไบน์มีค่าอยู่ในช่วง 10-15 รอบ/นาที และความเร็วขอบไม่ควรสูงกว่า 2 ฟุต/นาที สำหรับฟลอคเปราะที่เกิดจากสารส้มหรือสารประกอบเหล็กต่างๆ และไม่เกิน 4 ฟุต/นาที สำหรับฟลอคที่แข็งแรงดังเช่นฟลอคของหินปูนที่เกิดขึ้นในการกำจัดความกระด้าง เครื่องกว่นแบบเทอร์ไบน์ติดตั้งง่าย แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบอื่น และไม่เหมาะกับถังกวนช้าที่ความปั่นป่วนสูงกว่า 40 วินาที⁻¹
- 4 แบบใบพัดเรือ (Propeller) สามารถติดตั้งให้หมุนในแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้ การติดตั้งกระทำได้ง่าย เครื่องที่หมุนในแนวตั้งอาจวางให้อยู่นอกจุดศูนย์กลาง ความเร็วรอบอาจสูงถึง 150 รอบ/นาที ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องความเร็วขอบ สามารถใช้กับถังกวนช้าที่มีความปั่นป่วนสูงถึง 90 วินาที⁻¹ เครื่องกว่นชนิดนี้สามารถสร้างความปั่นป่วนได้สม่ำเสมอและทั่วทั้งถังมากกว่าแบบอื่นๆ

การคำนวณหาพลังงานที่ต้องการใช้ในการกวนผสมได้จากสมการ 2-11 ดังนี้

$$P = 0.5 \times C_D \times A \times \rho \times V^3 \quad (2-11)$$

โดยที่	P	=	พลังงานที่ต้องการใช้ในการกวนผสม (วัตต์)
	C _D	=	สัมประสิทธิ์ความหน่วง (Drag Coefficient)
		=	1.8 สำหรับใบพาย
	V	=	ความเร็วสัมพัทธ์ของใบพัด (เมตรต่อวินาที)
		=	0.75 × ความเร็วขอบใบพัด

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

A = พื้นที่ของใบพัด (ตารางเมตร)

กรณีใช้แผ่นกั้นน้ำ (Baffled Flocculation) การบังคับให้น้ำไหลวนและคดเคี้ยวไปมาด้วยแผ่นกั้นน้ำ สามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำจนเกิดฟล็อกคูเลชันได้ แผ่นกั้นน้ำแบ่งถังกวนเข้าเป็นห้องเล็กๆ จำนวนมากมาย น้ำจะไหลกวนไปตามห้องต่างๆ ทุกห้องอย่างนุ่มนวล ทำให้เกิดการรวมตัวของคอลลอยด์จนกลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่หรือฟล็อก (ดังรูปที่ 2-5) การใช้แผ่นกั้นน้ำช่วยทำให้เกิดการไหลลัดทางน้อยมาก แต่มีข้อเสียคือ ถ้าอัตราการไหลของน้ำมีความแปรปรวนมาก การออกแบบและควบคุมฟล็อกคูเลชันให้ได้ดีจึงเป็นเรื่องยาก โดยหลักปฏิบัติในการออกแบบถังกวนเข้าแบบแผ่นกั้นน้ำมีดังนี้

1. ระยะระหว่างแผ่นกั้นไม่ควรน้อยกว่า 0.45 เมตร เพื่อให้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย
2. ความเร็วการไหลควรอยู่ระหว่าง 0.15-0.45 เมตร/วินาที เพื่อป้องกันไม่ให้ฟล็อกตกตะกอน
3. เวลาพักเก็บน้ำ ควรมีค่าประมาณ 20-50 นาที
4. ระยะห่างระหว่างปลายของแผ่นกั้นและผนังถังมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นที่อยู่ติดกัน ซึ่งไม่น้อยกว่า 0.6 เมตร
5. การสูญเสียเฮดสำหรับทุกๆ การหักเลี้ยว 180° สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$H = 0.163 \times V^2 \quad (2-12)$$

โดยที่ H = การสูญเสียเฮด (เมตร)

V = ความเร็วการไหลน้ำภายในถัง (เมตรต่อวินาที)

6. ความลึกของถังกวนเข้าที่มีการไหลในแนวระนาบต้องไม่ต่ำกว่ากว่า 0.9 เมตร ถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.9 เมตร ให้ใช้ถังกวนเข้าที่มีการไหลแบบขึ้นบน-ลงล่าง

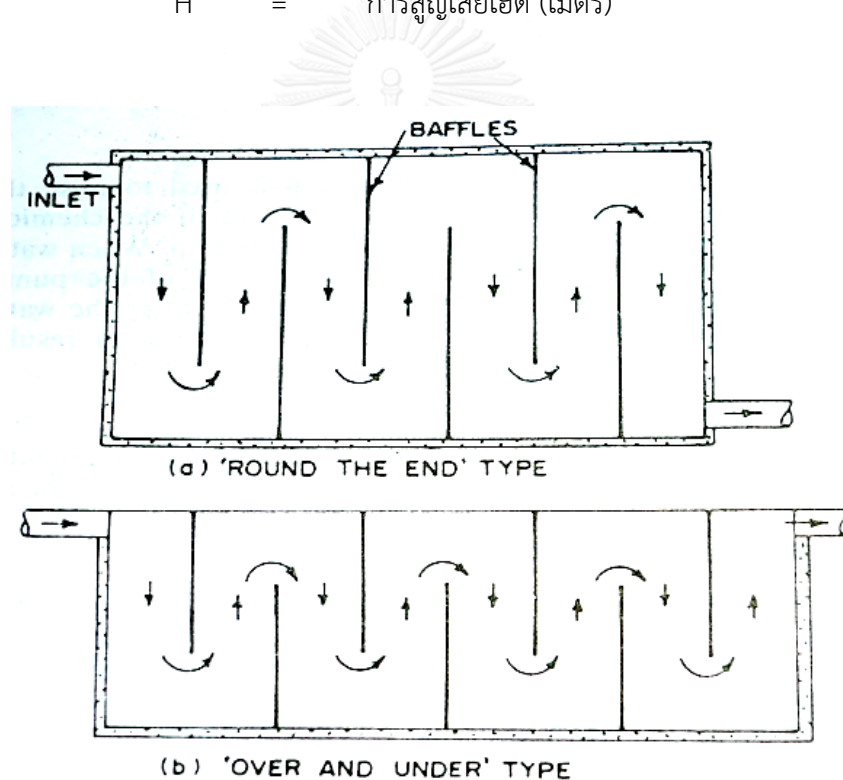
7. ช่องว่างระหว่างด้านบนของแผ่นกั้นจนถึงผิวน้ำ หรือช่องว่างระหว่างด้านล่างของแผ่นกั้น จนถึงก้นถังควรมีระยะประมาณ 1.5 เท่าของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น

การคำนวณความปั่นป่วนของถังกวนช้าแบบแผ่นกั้นน้ำได้จากสมการ 2-13 ดังนี้

$$G = \left(\frac{12.83 \times 10^6 H}{T} \right)^{0.5} \quad (2-13)$$

โดยที่

G	=	ความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสม (วินาที ⁻¹)
T	=	เวลากักเก็บน้ำถังกวนช้า (วินาที)
H	=	การสูญเสียเฮด (เมตร)



รูปที่ 2-5 ถังกวนช้าแบบแผ่นกั้นน้ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

จากตารางที่ 2-3 พบว่าน้ำเสียปนเปื้อนสาหร่าย (*Chlorella sp.*) ที่ความเข้มข้น 6.8×10^5 เซลล์/มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโคแอกกูแลชั่น ซึ่งใช้อลูมิเนียมซัลเฟตและ PAC ที่ 8 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นสารโคแอกกูแลนท์ 80% และ 85% ตามลำดับ (Liu et al., 1999)

ตารางที่ 2-3 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการตกตะกอน

(Jiang et al., 1993); (Mouchet et al., 1998); (Liu et al., 1999); (Drikas et al., 2001)

Algae	Source water	Algae cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	settling time (min)	Removal Efficiency (%)
Cyanobacteria <i>Microcystis aeruginosa</i>	Reservoir water	5x10 ⁵ - 1.5x10 ⁶	7.2	10.3 mg/L as Al (Al ₂ (SO ₄) ₃)	230; 60	25; 14	15	75
	Reservoir water	1.0x10 ⁴ ; 3-3.5 NTU	8	10 mg/L as Fe; 1 mg/L as superfloc C-573	1000; 30	30; 30	60; filtration at 10 m/hr; 200 mm sand bed	98.9
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Growth media	5.8x10 ⁴ ; 6.1 NTU	7.5	5 mg/L as Fe(Fe ₂ (SO ₄) ₃)	300-60	35; 20	60	62
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Growth media	5.8x10 ⁴ ; 6.1 NTU	7.5	5 mg/L as Fe (PFS)	300-60	35; 20	60	81.6
<i>Anabaena flosaqueae</i>	Growth media	2x10 ⁵	7.5	11.2 mg/L as Fe (Fe ₂ (SO ₄) ₃)	300; 120	35; 25	120	74
<i>Anabaena flosaqueae</i>	Growth media	2x10 ⁵	7.5	5.4 mg/L as Al (Al ₂ (SO ₄) ₃)	300; 120	35; 25	120	78
<i>Anabaena flosaqueae</i>	Growth media	2x10 ⁵	7.5	11.2 mg/L as Fe (PFS)	300; 120	35; 25	120	94
<i>Anabaena flosaqueae</i>	Growth media	2x10 ⁵	7.5	5.4 mg/L as Al (PACl)	300; 120	35; 25	120	68

ตารางที่ 2-3 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการตกตะกอน (Jiang et al., 1993); (Mouchet et al., 1998); (Liu et al., 1999); (Drikas et al., 2001) (ต่อ)

Algae	Source	Algae cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	settling time (min)	Removal Efficiency (%)
diatoms								
Asterionella formosa	Growth media	2×10^5	7.5	11.2 mg/L as Fe ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)	300; 120	35; 25	120	63
Asterionella formosa	Growth media	2×10^5	7.5	5.4 mg/L as Al ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)	300; 120	35; 25	120	79
Asterionella formosa	Growth media	2×10^5	7.5	5.4 mg/L as Al (PAC)	300; 120	35; 25	120	68

ตารางที่ 2-3 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการตกตะกอน (Jiang et al., 1993); (Mouchet et al., 1998); (Liu et al., 1999); (Drikas et al., 2001) (ต่อ)

Algae	Source	Algae abundance cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	settling time (min)	Removal Efficiency (%)	Reference
Asterionella formosa	Growth media	2×10^5	7.5	11.2 mg/L as Fe (PFS)	300; 120	35; 25	120	87	Jiang et al. (1993)
Synedra acus/	Reservoir water	1500	6.8	1.62 mg/L as Al ($Al_2(SO_4)_3$)	135; 60	45; 10	30	88	Jun et al. (2001)
Melosira									
Synedra acus	Reservoir media	1040	7	2.16 mg/L as Al (PAC)	135; 60	45; 10	30	76	Jun et al. (2001)
Synedra acus	Reservoir media	760	7	2.16 mg/L as Al (PAHCS)	135; 60	45; 10	30	54	Jun et al. (2001)
Synedra acus	Reservoir media	1040	5.3		135; 60	45; 10	30	74	Jun et al. (2001)
Synedra acus	Reservoir media	1480	6.8		135; 60	45; 10	30	99	Jun et al. (2001)

ตารางที่ 2-3 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับการตกตะกอน (Jiang et al., 1993); (Mouchet et al., 1998); (Liu et al., 1999); (Drikas et al., 2001) (ต่อ)

Algae	Source	Algae abundance cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	settling time (min)	Removal Efficiency (%)	Reference
Chlorophyta									
Chlorella sp.	Deionised water; 0.05 M NaNO ₃	6.8x10 ⁵	8	8 mg/L as Al (Al ₂ (SO ₄) ₃)	100; 120	25; 20	30	80	Liu et al. (1999)
Chlorella sp.	Deionised water; 0.05 M NaNO ₃	6.8x10 ⁵	7	8 mg/L as Al (PAC)	100; 120	25; 20	30	85	Liu et al. (1999)
Mixture									
Spirulina,	Nutrient media	55 NTU	7	5.0 mg/L as chitosan	5 s	60; 30	30	90	Divakaran
oscillatoria, chlorella	and tap water; 14 mg/L as CaCO ₃								and Pillai (2002)
Pediastrum clathratum and Melosira	Seine river water	1-3x10 ⁴	-	9.5 mg/L as Al	-	-	10	70-80	Mouchet and Bonnye (1998)

2.4 กระบวนการทำให้ลอย

กระบวนการทำให้ลอยเป็นกระบวนการแยกของแข็งออกจากของเหลวโดยส่วนใหญ่ใช้กับการแยกสารที่มีความเข้มข้นของแข็งต่ำ แหล่งน้ำที่มีสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย แหล่งน้ำที่มีความขุ่นต่ำ ค่าความเป็นด่างต่ำ หรือแหล่งน้ำที่มีสีเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสามารถแยกด้วยวิธีการตกตะกอนได้ยาก และใช้ เวลาที่เก็บน้ำของกระบวนการทำให้ลอย (Detention time) น้อยกว่ากระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) เนื่องจากสามารถแยกสารแขวนลอยเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำมากกว่าจมตัว จึงแยกออกด้วยกระบวนการทำให้ลอยได้เร็วกว่า แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาด้านความต้องการทางด้านเครื่องจักรกล พลังงาน และบุคลากรผู้เชี่ยวชาญในการเดินระบบมากกว่ากระบวนการตกตะกอน

2.4.1 กระบวนการทำให้ลอยแบ่งตามลักษณะการสร้างฟองแก๊สมือ 3 วิธี ดังนี้

1) Electrolytic Flotation (Barrett, 1975)

กระบวนการทำให้ลอยด้วยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงสร้างฟองอากาศชนิดไฮโดรเจนและออกซิเจน ฟองที่ถูกสร้างจะมีขนาดเล็กมากและอัตราน้ำล้นผิวน้อยกว่า 4 เมตร/ชั่วโมง นิยมใช้กับถัง sludge thickener และโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กขนาด 10-20 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

2) Dispersed-Air Flotation (Sherfold, 1984)

กระบวนการลอยด้วยการทำให้กระจัดกระจายมี 2 ลักษณะ คือ การทำให้ลอยในรูปของโฟม และการทำให้ลอยในรูปของฟอง แต่กระบวนการนี้ไม่เหมาะสมสำหรับน้ำเสีย เพราะทำให้เกิดฟองอากาศที่ขนาดใหญ่และความปั่นป่วนสูง และมีการนำไปใช้ในการแยกสาหร่ายที่มีความเข้มข้นสูง

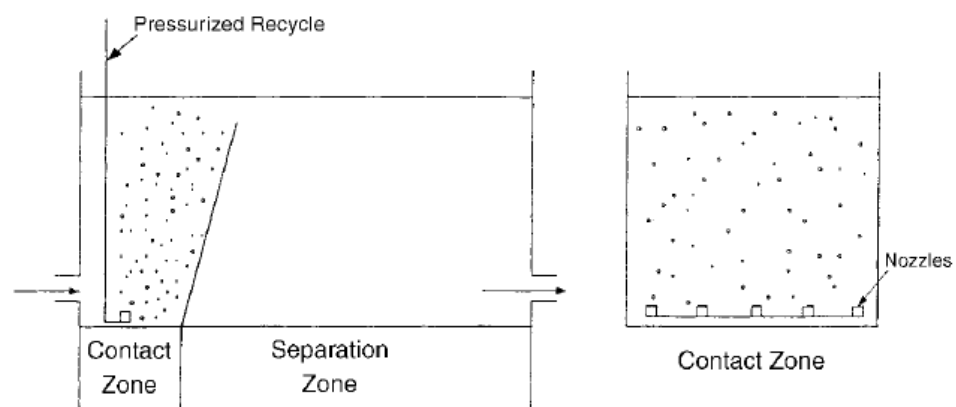
3) Dissolved Air Flotation (DAF) (Barrett, 1975)

กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย สร้างฟองอากาศโดยการอัดอากาศที่ความดันประมาณ 4-5 บรรยากาศ แล้วปล่อยอากาศความดันสูงเข้าสู่ถังน้ำเสีย ทำให้ความดันอากาศ

ลดลงเป็นความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-100 ไมครอน ฟองอากาศจะจับตัวกับอนุภาคแขวนลอยกลายเป็นฟล็อกแล้วลอยตัวขึ้นสู่น้ำ จากนั้นเครื่องกวาดจะทำการกวาดอนุภาคต่างๆ ที่ลอยตัวแยกออกมาไปกำจัดต่อไปส่วนน้ำใสจะออกทางด้านล่างของถัง ระบบนี้เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียเนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงมากในการเดินระบบ เพราะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อทำให้เกิดความดัน

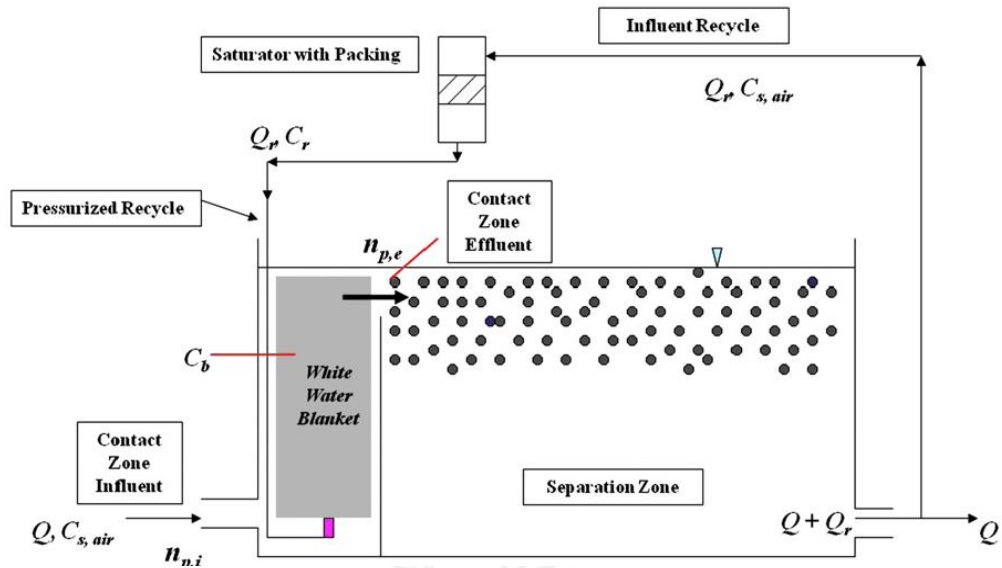
2.4.2 กลไกการทำให้ลอย

กระบวนการทำให้ลอยมักเกิดกลไกแบบยึดติด (Attachment mechanism) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่มีความต่อเนื่องกัน คือ ส่วนสัมผัส (Contact zone) คือ ส่วนที่ฟองอากาศมีการสัมผัสและเกาะติดกับอนุภาคที่ปนเปื้อนอยู่ในวัฏภาคน้ำ และส่วนแยก (Separation zone) คือ ส่วนที่อนุภาคเกาะติดกับฟองอากาศแล้วลอยตัวและแยกออกจากกระแสน้ำ (ดังรูปที่ 2-6 และรูปที่ 2-7) และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ควรให้น้ำเสียก่อนเข้ากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายผ่านการบำบัดขั้นต้นก่อน เช่น กระบวนการโคแอกกูเลชัน



รูปที่ 2-6 องค์ประกอบถังทำให้ลอยประกอบด้วย ส่วนสัมผัส และส่วนแยก

(Edzwald, Malley, et al., 1990)



รูปที่ 2-7 ส่วนสัมผัสและส่วนแยกในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Edzwald, 2010)

1) ส่วนสัมผัส (Contact zone)

ส่วนสัมผัสของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย เป็นส่วนที่ทำให้ฟล็อกของอนุภาคและฟองอากาศมีโอกาสสัมผัสและเกาะติดกัน จากนั้นความหนาแน่นของฟล็อกที่รวมตัวกับฟองอากาศจะมีค่าน้อยลงกว่าน้ำจึงมีแนวโน้มลอยตัวขึ้นเมื่ออยู่ในน้ำ ประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นกับปริมาณอากาศที่เหมาะสมหรือเพียงพอต่อการสัมผัส ซึ่งความสามารถในการละลายของอากาศที่ความดันอากาศต่างๆสามารถคำนวณได้จากกฎของเฮนรี่

$$X = \frac{y \times P}{H} \quad (2-14)$$

โดยที่	X	=	สัดส่วนโมลของอากาศที่ละลายในน้ำ (โมลต่อโมล)
	y	=	สัดส่วนโมลของก๊าซในอากาศ (โมลต่อโมล)
	P	=	ความดันอากาศ (บาร์)
	H	=	ค่าคงที่ของเฮนรี่ (บาร์)

$$C_{\text{air}} = \left(\frac{P \times \% \text{fraction} \times \text{MW}}{K} \right)_{\text{Nitrogen}} + \left(\frac{P \times \% \text{fraction} \times \text{MW}}{K} \right)_{\text{Oxygen}} \quad (2-15)$$

โดยที่	x_A	=	สัดส่วนโมลของอากาศที่ละลายในน้ำ (โมลต่อโมล)
	y_A^*	=	สัดส่วนโมลของก๊าซในอากาศ (โมลต่อโมล)
	P	=	ความดันอากาศ (atm)
	K	=	ค่าคงที่ของเฮนรี (atm)
	C_{air}	=	ค่าความเข้มข้นอากาศ (กรัมต่อลิตร)
	%fraction	=	ค่าสัดส่วนก๊าซต่ออากาศ
	MW	=	มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)

ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

องค์ประกอบ	สัดส่วน (%)	ค่าคงที่ Henry (atm/(mol/L))	ค่าคงที่ Henry (atm·mol _{total} /mol _{gas})	MW (g/mol)	Density (kg/m ³)
N ₂	78.09	1639.34	4.26×10^4	28	1.205
O ₂	20.94	769.23	9.08×10^4	32	

ตารางที่ 2-5 ปริมาณอากาศละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ณ ความดันอากาศต่างๆ

Pressure	(atm)	1	2	3	4	5	6	7	8
Dissolved air (C _r)	(g _{air} /L _{water})	0.022	0.044	0.066	0.088	0.110	0.132	0.154	0.176
Air release	(g _{air} /L _{water})	0.000	0.022	0.044	0.066	0.088	0.110	0.132	0.154
	(L _{air} /L _{water})	0.000	0.018	0.037	0.055	0.073	0.091	0.110	0.128

การคำนวณความเข้มข้นอนุภาคโดยมวลของฟองอากาศที่แขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส
(Mass concentration)

$$C_b = \frac{e \times (C_r - C_{s,air}) \times R - k}{1 + R} \quad (2-16)$$

โดยที่ C_b = ความเข้มข้นโดยมวลของฟองอากาศที่แขวนลอยส่วนสัมผัส
(มิลลิกรัมต่อลิตร)

e = ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ

C_r = ความเข้มข้นอากาศละลายในน้ำที่ออกจากถังอัดความดัน
(มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{s,air}$ = ความเข้มข้นอากาศละลายน้ำที่เข้าส่วนสัมผัส (มิลลิกรัมต่อลิตร)

R = อัตราการรีไซเคิลน้ำ

k = การขาดดุลของอากาศ

กำหนดให้ น้ำที่ผ่านกระบวนการฟลื้อคูล์ลงแล้วอิมตัว ดังนั้น $k = 0$

การคำนวณความเข้มข้นอนุภาคโดยปริมาตรที่แขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส (Volume concentration)

$$\phi_b = \frac{C_b}{\rho_{bm}} \quad (2-17)$$

โดยที่ ϕ_b = ความเข้มข้นโดยปริมาตรที่แขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส

ρ_{bm} = ความหนาแน่นอากาศขึ้น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

การคำนวณจำนวนอนุภาคฟองอากาศแขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส (Number concentration)

$$n_b = \frac{\phi_b}{\pi \times d_b^3 / 6} \quad (2-18)$$

โดยที่ n_b = จำนวนฟองอากาศแขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส (ต่อลูกบาศก์เมตร)

d_b = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศ (เมตร)

การคำนวณขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ (critical bubble diameter)

$$d_{cd} = \frac{4 \times \sigma}{\Delta P} \quad (2-19)$$

โดยที่ d_{cd} = เส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศ (เมตร)

σ = แรงตึงผิวของน้ำ (surface tension) (นิวตันต่อเมตร)

ΔP = ความดันที่ออกจากหัวจ่ายฟองอากาศ (ปาสกาล)

การคำนวณความหนาแน่นของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค

$$\rho_{pb} = \left[\frac{\rho_p \times d_p^3 + N_{ab} \times (\rho_b \times d_b^3)}{d_p^3 + (N_{ab} \times d_b^3)} \right] \quad (2-20)$$

โดยที่ ρ_{pb} = ความหนาแน่นของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค

(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

d_p = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค (เมตร)

N_{ab} = จำนวนฟองอากาศที่ยึดเกาะกับอนุภาค

ρ_b = ความหนาแน่นของฟองอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

d_b = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศ (เมตร)

การคำนวณขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค

$$d_{pb} = [d_p^3 + N_{ab} \times (d_b^3)]^{1/3} \quad (2-21)$$

โดยที่ d_{pb} = เส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค (เมตร)

การคำนวณความเร็วลอยตัวขึ้นของฟองอากาศ (Stokes equation)

$$V_b = \frac{g \times (\rho_w - \rho_b) \times d_b^2}{18 \times \mu_w} \quad (2-22)$$

โดยที่ V_b = ความเร็วลอยขึ้นของฟองอากาศ (เมตรต่อวินาที)

μ_w = ความหนืดของน้ำ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

สำหรับฟองอากาศขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน ที่มีลักษณะกลม และค่าเรย์โนลด์ส์นับเบอ์น้อยกว่า 1 ซึ่งเป็นการไหลแบบลามินาร์รอบฟองอากาศ

การคำนวณความเร็วลอยตัวขึ้นของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค (Modified stokes equation)

$$V_{pb} = \frac{4 \times g \times (\rho_w - \rho_{pb}) \times d_{pb}^2}{3 \times K \times \mu_w} \quad (2-23)$$

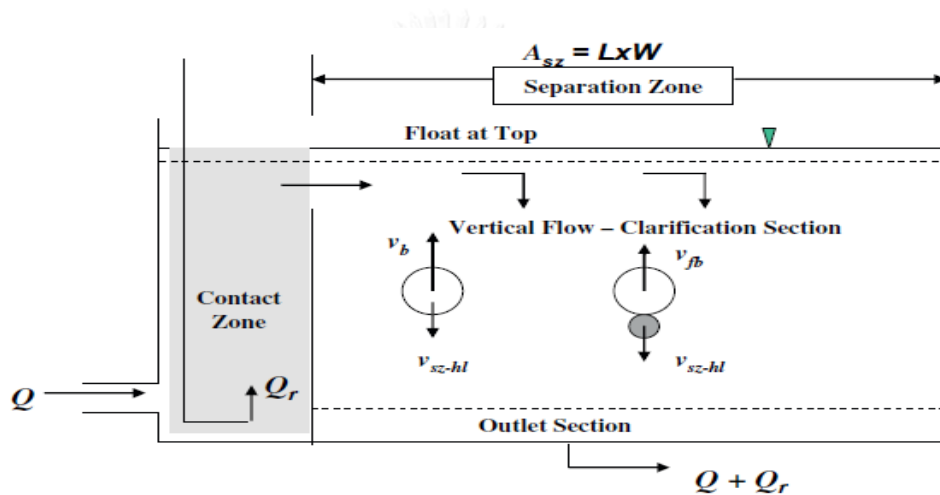
โดยที่ V_{pb} = ความเร็วของฟองอากาศเมื่อรวมตัวกับอนุภาค (เมตรต่อวินาที)

K = ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะของการรวมตัวของอนุภาคและฟองอากาศ

สำหรับ $K = 24$ เมื่ออนุภาคขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับ 40 ไมครอน ยึดเกาะกับฟองอากาศขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่า 100 ไมครอน $K = 45$ เมื่ออนุภาคขนาดใหญ่กว่าฟองอากาศที่ยึดเกาะ

2) ส่วนแยก (Separation zone)

ส่วนแยกเป็นส่วนที่มีหน้าที่ในการแยกอนุภาคฟล็อกที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระออกจากวัฏภาคน้ำ โดยอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระจะสามารถแยกออกจากวัฏภาคน้ำได้ก็ต่อเมื่อมีความเร็วลอยตัวมากกว่าหรือเท่ากับอัตราน้ำล้นผิวของส่วนแยก (V_{hl}) ตามทฤษฎีของ Hazen (ดังรูปที่ 2-8)



รูปที่ 2-8 การแยกตัวของอนุภาคแขวนลอยที่เกาะติดกับฟองอากาศและฟองอากาศอิสระออกจากวัฏภาคน้ำ (Edzwald, 2010)

$$V_b \text{ and } V_{fb} \geq V_{hl} = \frac{Q}{A_{sz}} \quad (2-24)$$

โดยที่ A_{sz} = พื้นที่ผิวส่วนแยก (ตารางเมตร)

Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

2.4.3 โมเดลทางคณิตศาสตร์ใช้อธิบายการชนกันระหว่างอนุภาคและฟองอากาศในส่วนสัมผัส

1) โมเดล Heterogeneous Flocculation-Based (Tambo et al., 1986)

กรณี อนุภาคฟล็อกยึดเกาะกับฟองอากาศขณะชน

$$\frac{dN_{f,i}}{dt} = -k \times N_b \times (\alpha_{f,i} N_{f,i} - \alpha_{f,i-1} N_{f,i-1}) ; i = 1-m_f \quad (2-25)$$

กรณี อนุภาคไม่ยึดเกาะกับฟองอากาศ

$$\frac{dN_{f,0}}{dt} = -k \times N_b \times \alpha_0 \times N_{f,0} \quad ; (i = 0) \quad (2-26)$$

โดยที่	$N_{f,i}$	=	ความเข้มข้นของอนุภาคฟล็อกเมื่อเข้ายึดเกาะกับฟองอากาศ
	$N_{f,0}$	=	ความเข้มข้นของอนุภาคฟล็อกเมื่อไม่มีการยึดเกาะฟองอากาศ
	N_b	=	ความเข้มข้นฟองอากาศ
	α_f	=	ค่าแฟกเตอร์การชนกันแบบยึดเกาะ
	α_0	=	ค่าแฟกเตอร์การชนกันแบบยึดเกาะแต่ปราศจากการยึดเกาะกับฟองอากาศ
	m_f	=	จำนวนมากที่สุดของการยึดเกาะกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค
	k	=	ค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ขึ้นอยู่กับกลไกการเคลื่อนย้ายมวล

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์จลนศาสตร์ขึ้นอยู่กับกลไกการเคลื่อนย้ายมวล (k)

$$k = a \times G \times (d_b + d_f)^3 \quad (2-27)$$

$$G = \left(\frac{\epsilon}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-28)$$

โดยที่ a = ค่าคงที่

G	=	ความเร็วเกรเดียนเฉลี่ย (วินาที ⁻¹)
\mathcal{E}	=	อัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย (จูลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
μ	=	ความหนืดน้ำ (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
d_b	=	เส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศ (เมตร)
d_f	=	เส้นผ่าศูนย์กลางฟลอค (เมตร)

เนื่องจากขนาดของฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการการอัดอากาศด้วยความดันมีขนาดอยู่ในช่วง 10-100 ไมครอน ดังนั้นหากต้องการเพิ่มอัตราการชนกันระหว่างฟองอากาศและฟลอคจึงจำเป็นต้องปรับที่ขนาดของฟลอคแทน

2) โมเดล White Water Collector (Edzwald, 1995)

การลอยตัวขึ้นของฟองอากาศในส่วนสัมผัสมีลักษณะคล้ายการกรอง การชนกันระหว่างอนุภาคและฟองอากาศที่ลอยตัวขึ้น สามารถพิจารณาได้จากการเคลื่อนย้ายมวลของอนุภาคเพื่อสะสมที่ผิวหน้า โดยคำนวณประสิทธิภาพการชนกันของอนุภาคกับฟองอากาศได้ตามสมการ ดังนี้

กรณีการชนกันเนื่องจากการแพร่ (Brownian diffusion)

$$\eta_D = 6.18 \times \left(\frac{T \times k_b}{g \times (\rho_w - \rho_b)} \right)^{2/3} \times \left(\frac{1}{d_p} \right)^{2/3} \times \left(\frac{1}{d_b} \right)^2 \quad (2-29)$$

โดยที่	η_D	=	ประสิทธิภาพการชนกันเนื่องจากการแพร่
	T	=	อุณหภูมิ (เคลวิน)
	d_p	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาค (เมตร)
	d_b	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศ (เมตร)
	ρ_w	=	ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_b = ความหนาแน่นของฟองอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

k_b = ค่าคงที่ของ Boltzmann คือ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

กรณีการชนกันเนื่องจากการขัดขวาง (Interception)

$$\eta_I = \left\{ \left(\frac{d_p}{d_b} \right) + 1 \right\}^2 - \frac{3}{2} \times \left\{ \left(\frac{d_p}{d_b} \right) + 1 \right\} + \frac{1}{2} \times \left\{ \left(\frac{d_p}{d_b} \right) + 1 \right\}^{-1} \quad (2-30)$$

ถ้า $\frac{d_p}{d_b} \ll 1$ สามารถคำนวณประสิทธิภาพการชนกันเนื่องจากการขัดขวางได้ดังสมการ

$$\eta_I = \frac{3}{2} \times \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (2-31)$$

โดยที่ η_I = ประสิทธิภาพการชนกันเนื่องจากการแพร่

กรณีการชนกันเนื่องจากการตกตะกอนของฟลอค

$$\eta_S = \left(\frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w - \rho_p} \right) \times \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \quad (2-32)$$

โดยที่ η_S = ประสิทธิภาพการชนกันเนื่องจากการตกตะกอน

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

การคำนวณประสิทธิภาพรวมของการชนกันระหว่างอนุภาคกับฟองอากาศ

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_S \quad (2-33)$$

การคำนวณประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

$$Eff. = \left(1 - \frac{n_{p,eff}}{n_{p,inf}}\right) \quad (2-34)$$

$$Eff. = \left[1 - \exp\left(\frac{-\frac{3}{2} \times \alpha_{pb} \times \eta_T \times \phi_b \times V_b \times t_{cz}}{d_b}\right)\right] \quad (2-35)$$

โดยที่	Eff.	=	ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค
	α_{pb}	=	ประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างอนุภาคกับฟองอากาศ
	η_T	=	ประสิทธิภาพรวมของการชนกันระหว่างอนุภาคกับฟองอากาศ
	ϕ_b	=	ความเข้มข้นโดยปริมาตรฟองอากาศที่แขวนลอยอยู่ในส่วนสัมผัส (ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร)
	V_b	=	ความเร็วลอยตัวขึ้นของฟองอากาศ (เมตรต่อวินาที)
	t_{cz}	=	เวลากักเก็บในส่วนสัมผัส (วินาที)
	d_b	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟองอากาศ (เมตร)

จากตารางที่ 2-6 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (MDAF) ซึ่งสาหร่ายสีเขียวสายพันธุ์ *Chlorella vulgaris* ที่ความเข้มข้น $1.1-1.3 \times 10^5$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ที่ทำการกวนเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที และกวนช้า 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่อัตราน้ำรีไซเคิล 8% และปริมาณฟอง 4600 ppm เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สารส้มและ PAC เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัด คือ 96.8% และ 97-99% ตามลำดับ

ตารางที่ 2-6 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (Edzwald & Wingler, 1990; Kempeneers et al., 2001; Vlaski et al., 1996)

Algae	Source	Algae abundance cells/mL	pH	Coagulant dose (mg/L)	Rapid mix (rpm; s)	Flocculation (rpm; min)	Flotation/R/bubble concentration (min/ %/ ppm)	Removal Efficiency (%)	Reference
Chlorophyta	water								
Chlorella vulgaris	Reservoir water	1.1-1.3x10 ⁵	5.5	0.5 mg/L as Al (PACU)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	97-99	Edzwald and Wingler (1990)
Chlorella vulgaris	Reservoir water	1.1-1.3x10 ⁵	6.5	1.6 mg/L as Al (Al ₂ (SO ₄))	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	96.8	Edzwald and Wingler (1990)
Diatom									
Cyclotella sp.	Reservoir water	4.7-5.3x10 ⁴	5.5	0.5-1 mg/L as Al ⁺ (PACU)	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	97-99	Edzwald and Wingler (1990)
Cyclotella sp.	Reservoir water	4.7-5.3x10 ⁴	6.5	1.6 mg/L as Al (Al ₂ (SO ₄))	400; 120	30; 5	10; 8; 4600	99.8	Edzwald and Wingler (1990)
Cyanophyta									
Microcystis aeruginosa	Reservoir water	1x10 ⁴ ; 3-3.5 NTU	8	5 mg/L as Fe; 0.5 mg/L Superfloc C-573	1000; 30	10; 8	5; 7; Pressure: 600 kPa; Filtration: 10 m/hr	94.5	Vlaski et al.(1996)

2.5 ประเภทของถังปฏิกริยา (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2558)

ถังปฏิกริยาในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมเชิงอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

- 1) ถังปฏิกริยาแบบทีละเท (Batch reactor) เป็นถังปฏิกริยาที่ไม่มีการไหลเข้าและออกของสาร แต่จะเป็นการเติมสารลงไปแล้วทำปฏิกริยาจนผสมอย่างสมบูรณ์จนทำให้สารกลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำสารออกจากถัง ทำให้ถังปฏิกริยาแบบนี้สูญเสียเวลาในการเติมสารเข้า และนำสารออกจากระบบ มีสมการการออกแบบดังนี้

$$t = \int_{C_{Af}}^{C_{A0}} \frac{dC_A}{-r_A} \quad (2-36)$$

โดยที่ t = เวลาในการทำปฏิกริยา (นาที)

C_{A0} = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร A (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{Af} = ความเข้มข้นสุดท้ายของสาร A (มิลลิกรัมต่อลิตร)

r_A = อัตราการเกิดปฏิกริยาของสาร A (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที)

- 2) ถังปฏิกริยาแบบท่อ (Plug flow reactor) เป็นถังปฏิกริยาที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างสูง สารจะไหลเข้าสู่ถังอย่างต่อเนื่อง โดยสารที่อยู่ในหน้าตัดเดียวกันจะมีความเข้มข้นเท่ากัน และจะมีความเข้มข้นเปลี่ยนไปตามหน้าตัดของถัง มีสมการการออกแบบดังนี้

$$T = \int_{C_{Af}}^{C_{A0}} \frac{dC_A}{-r_A} \quad (2-37)$$

โดยที่ T = เวลาที่กักเก็บในถังปฏิกริยา (นาที)

C_{A0} = ความเข้มข้นขาเข้าของสาร A (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{Af} = ความเข้มข้นขาออกของสาร A (มิลลิกรัมต่อลิตร)

r_A = อัตราการเกิดปฏิกริยาของสาร A (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที)

- 3) ถังปฏิกริยาคววมผสมแบบสมบูรณ (Continuous stirred tank reactor, CSTR) เป็น ถังปฏิกริยาที่มีการไหลเข้าและออกของสารอยู่ตลอดเวลา และภายในถังมีการติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับการคววมผสมแบบสมบูรณ จนทำให้ความเข้มข้นของสารภายในถังเท่ากันจุด รวมถึง เท่ากับน้ำที่ไหลออกจากถังด้วย มีสมการการออกแบบดังนี้

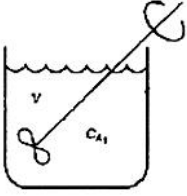
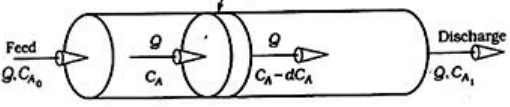
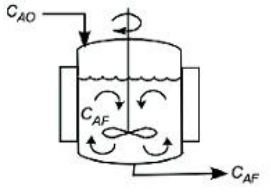
$$T = \frac{C_{A0} - C_{Af}}{-r_{Af}} \quad (2-38)$$

โดยที่ T = เวลาที่เก็บในถังปฏิกริยา (นาที่)

C_{A0} = ความเข้มข้นขาเข้าของสาร A (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_{Af} = ความเข้มข้นขาออกของสาร A (มิลลิกรัมต่อลิตร)

r_{Af} = อัตราการเกิดปฏิกริยาของสาร A ที่ขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตรต่อ นาที่)

		
Batch reactor	Plug flow reactor	CSTR

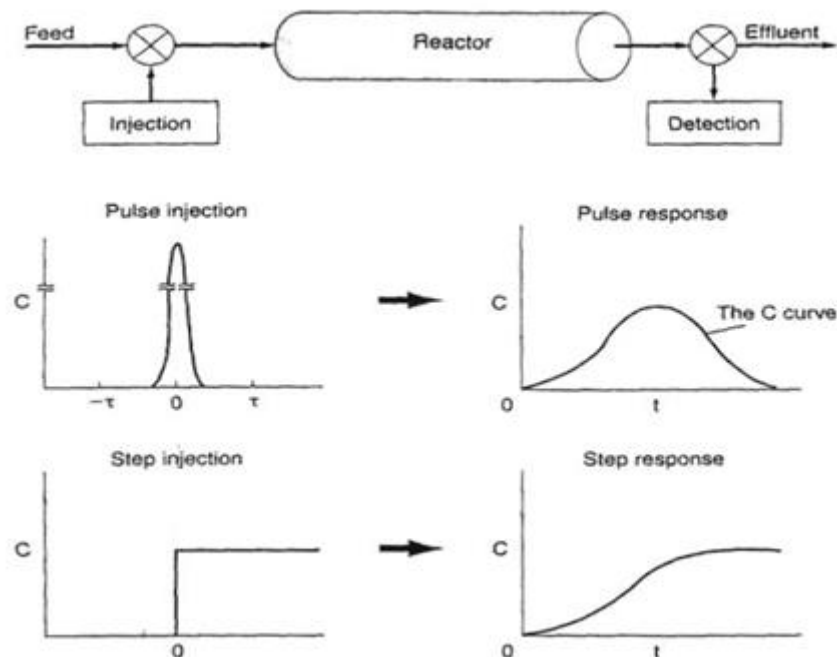
รูปที่ 2-9 ไตอะแกรมของถังปฏิกริยาเชิงอุดมคติ

2.6 รูปแบบการกระจายตัวของเวลากัก (Residence Time Distribution, RTD) (Fogler, 2006; Levenspiel, 1999)

การทำงานภายในถังปฏิกริยาจริงมีความแตกต่างจากถังปฏิกริยาเชิงอุดมคติอย่างมาก การอธิบายลักษณะและสร้างแบบจำลองของถังปฏิกริยาแบบไม่อุดมคติจึงมีความสำคัญใน

การวิเคราะห์การทำงานของถังปฏิกรณ์และทำนายความเข้มข้นของสารที่ออกจากถังปฏิกรณ์ รูปแบบการกระจายตัวของเวลากักเป็นฟังก์ชันที่อธิบายลักษณะการผสมของสารที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ และระยะเวลาที่สารอยู่ภายในถังปฏิกรณ์ การวัดรูปแบบการกระจายตัวของเวลากักทำได้โดยการจ่าย tracer เข้าถังปฏิกรณ์ แล้วทำการวัดความเข้มข้นที่ขาออก ณ เวลาต่างๆ ซึ่งมีวิธีการทดลองอยู่ 2 รูปแบบ (ดังรูปที่ 2-10) คือ

- 1) การทดลองแบบจ่ายครั้งเดียว (Pulse input experiment) เป็นการจ่าย tracer ปริมาณหนึ่งเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ครั้งเดียวแบบทันทีทันใดในเวลาที่ดีที่สุด
- 2) การทดลองแบบจ่ายต่อเนื่อง (Step input experiment) เป็นการจ่าย tracer ความเข้มข้นหนึ่งเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 2-10 การวัดรูปแบบการกระจายตัวของเวลากัก (Levenspiel, 1999)

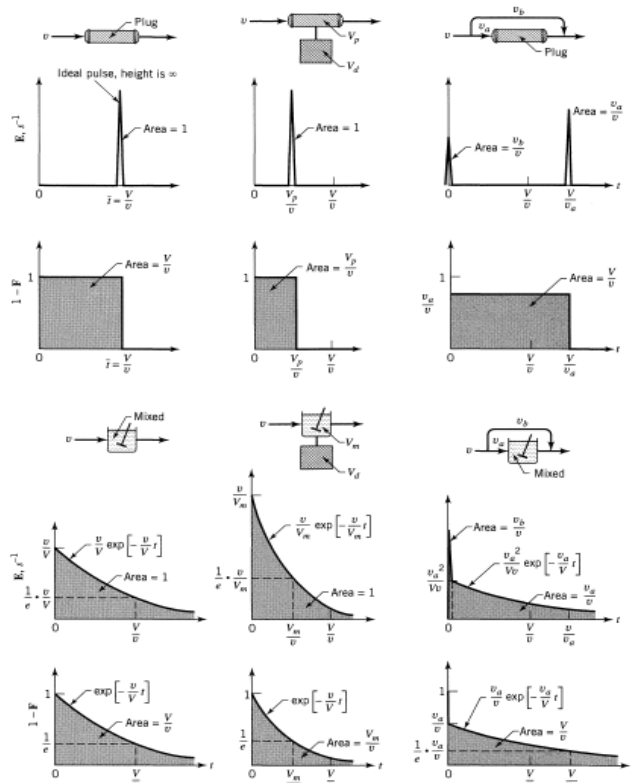
ฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากักเป็นฟังก์ชันแสดงระยะเวลาที่อนุภาคของไหลที่แตกต่างกันใช้ภายในถังปฏิกริยา ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2-39 สำหรับการจ่ายครั้งเดียว และสมการที่ 2-40 สำหรับการจ่ายแบบต่อเนื่อง

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (2-39)$$

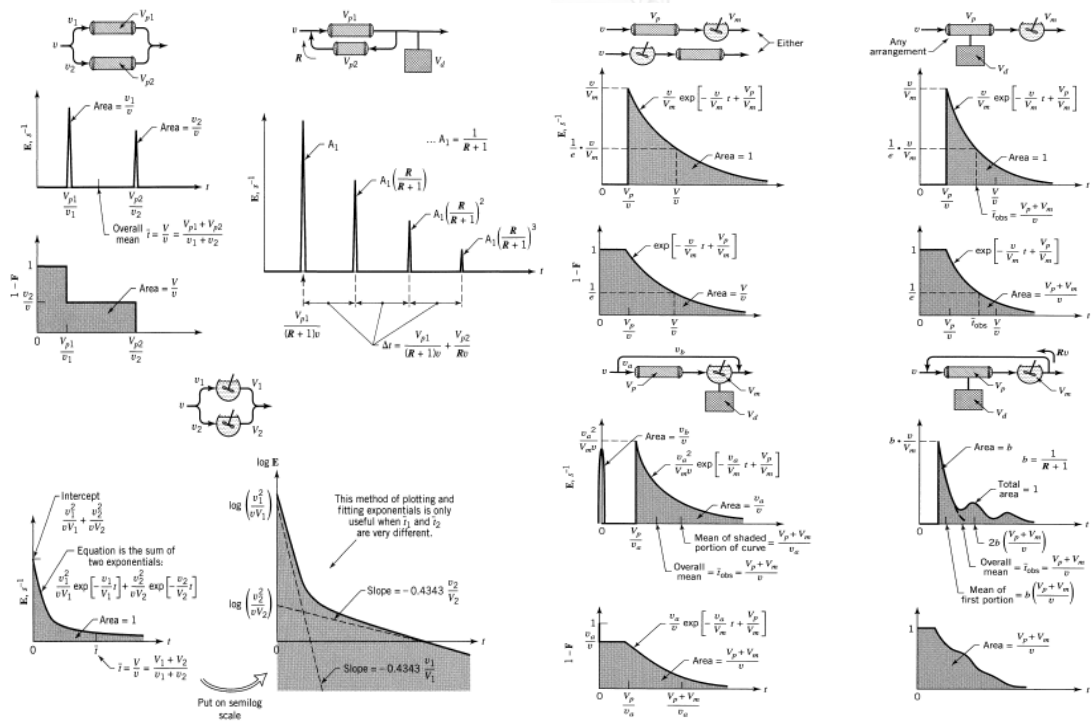
$$E(t) = \frac{d}{dt} \left[\frac{C(t)}{C_0} \right] \quad (2-40)$$

โดยที่	$E(t)$	=	ฟังก์ชันการกระจายของเวลากัก (วินาที ⁻¹)
	$C(t)$	=	ความเข้มข้นของ tracer ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_0	=	ความเข้มข้นขาเข้าของ tracer (มิลลิกรัมต่อลิตร)

การวิเคราะห์รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาจริงจะใช้แบบจำลองที่เรียกว่า Compartment model ซึ่งจะพิจารณาปริมาตรภายในถังและการไหลผ่านถังที่เกิดขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบกราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve) ของถังปฏิกริยาจริงกับกราฟทางทฤษฎี เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดกับถังปฏิกริยาจริง แบบจำลองต่างๆ ของ Compartment model ดังแสดงในรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 แบบจำลองต่างๆ ของ Compartment model (Levenspiel, 1999)



รูปที่ 2-11 แบบจำลองต่างๆ ของ Compartment model (Levenspiel, 1999) (ต่อ)

2.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) (Chung, 2002)

โดยทั่วไปการอธิบายปรากฏการณ์การไหลในระบบทางวิศวกรรมสามารถทำได้ผ่านการวิเคราะห์ (Analytical Fluid Dynamics, AFD) ซึ่งเป็นวิธีการหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของสมการควบคุม (governing equation) ที่เป็นกฎทางฟิสิกส์ได้แก่ กฎอนุรักษ์มวล กฎอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎอนุรักษ์พลังงาน ในทางปฏิบัติมักจะหาข้อมูลที่ทำเป็นสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมผ่านการทดลอง (Experimental Fluid Dynamics, EFD) โดยการสร้างแบบจำลองและทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาวิธีการหาคำตอบโดยประมาณ (approximate solution) ของระบบสมการดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย) ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มาทำนายพลศาสตร์ของของไหล

CFD พัฒนามาจากสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier–Stokes equations) ซึ่งใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของไหลที่มีความหนืด (viscous fluid) โดยมีรูปสมการทั่วไปดังสมการที่ 2-41

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) I \right) + F \quad (2-41)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

u = ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)

t = เวลา (วินาที)

p = ความดันของของไหล (นิวตันต่อตารางเมตร)

μ = ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

∇ = ตัวปฏิบัติการเดล

I = เมตริกซ์เฉพะ

F = แรงภายนอกที่กระทำต่อของไหล (นิวตัน)

การแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์เพื่อหาคำตอบจะกระทำร่วมกับการแก้สมการของความต่อเนื่อง (Continuity equation) ดังสมการที่ 2-42

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2-42)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

u = ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)

t = เวลา (วินาที)

2.8 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiments)

(ประไพศรี สุกข์ศน์ ณ อยุธยา, 2551)

1) การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป

การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปเหมาะสมสำหรับศึกษาผลกระทบตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป สามารถศึกษาได้ทั้งสิ่งที่ส่งผลกระทบหลัก และส่งผลกระทบร่วม การออกแบบการทดลองไม่ซับซ้อน แต่จะส่งผลให้มีจำนวนชุดการทดลองมาก โดยสามารถคำนวณจำนวนชุดการทดลองดังสมการที่ 2-43

$$N = a^k \quad (2-43)$$

โดยที่ N = จำนวนชุดการทดลองทั้งหมด

a = จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา

k = จำนวนปัจจัยที่ทำการศึกษา

2) การทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน

การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วนเหมาะสำหรับออกแบบการทดลองที่ต้องการประหยัดเวลาและเงินทุนในการทำการทดลอง เพราะจะสร้างชุดการทดลองน้อยกว่าแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป แต่จะตีความยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยทั่วไปนิยมใช้ปัจจัยที่ 2 ระดับ สามารถคำนวณจำนวนชุดการทดลองได้ดังสมการที่ 2-44

$$N = 2^{k-p} \quad (2-44)$$

โดยที่ $p = 1, 2$ หรือ 3 ก็ได้แล้วแต่ผู้ออกแบบ

3) การออกแบบแบบ Foldover

การออกแบบการทดลองแบบ Foldover สามารถเพิ่มผลกระทบร่วมเข้าไปในการทดลองเริ่มต้น ทำให้สามารถพิจารณาความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากการทดลองเริ่มต้นเปรียบเทียบกับ การทดลองที่มีการเพิ่มใหม่

4) การออกแบบแบบ Plackett-Burman

การออกแบบแบบ Plackett-Burman ใช้สำหรับการออกแบบที่ต้องการลดจำนวนปัจจัยลงให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลกระทบสำคัญ ซึ่งใช้หลักการของเมตริกซ์ จึงส่งผลให้การออกแบบการทดลองสามารถศึกษาปัจจัยได้พร้อมกันหลายปัจจัย โดยจำนวนปัจจัยที่สามารถศึกษาได้สูงสุดไม่มากกว่าจำนวนชุดการทดลอง (n) แล้วหักลบ 1

5) การทดลองแบบ Box-Behnken

การทดลองแบบ Box-Behnken เป็นการออกแบบที่นิยมใช้สำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณที่มี 3 ระดับ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการทำนาย สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้นและเชิงเส้นกำลังสอง แต่จะส่งผลให้มีจำนวนชุดการทดลองมาก

6) การออกแบบ Central Composite

การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite เหมาะสมสำหรับการศึกษาหรือสร้างสมการทำนายแบบพหุนามกำลังสอง เพราะมีความยืดหยุ่น และมีประสิทธิภาพสูงสุดใน

การออกแบบการทดลอง ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาสร้างสมการทำนายเชิงเส้น โดยการออกแบบวิธีนี้เหมาะสมสำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ แต่สามารถรองรับปัจจัยเชิงคุณภาพได้ แต่ไม่ควรศึกษาเกิน 1 ปัจจัยเพราะจะต้องทำการปรับแผนการทดลองด้วย

7) การทดลองแบบทากูชิ

การออกแบบการทดลองแบบทากูชิเหมาะสำหรับคัดเลือกปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบออกสามารถใช้ศึกษาปัจจัยที่มี 2 และ 3 ระดับได้ โดยอาศัยหลักการของกราฟเชิงเส้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การศึกษาเปรียบเทียบสายพันธุ์สาหร่ายที่แตกต่างในกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอย

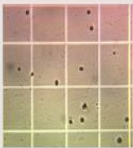
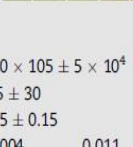
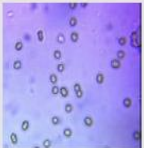
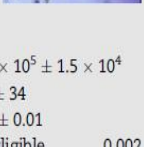


Henderson et al. (2010) ทำการศึกษาเปรียบเทียบสายพันธุ์สาหร่ายที่แตกต่างในกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของสาหร่าย ได้แก่ *Microcystis aeruginosa* (cyanobacteria) *Chlorella vulgaris* (green algae) *Asterionella formosa* และ *Melosira sp.* (diatoms) โดยวิเคราะห์ลักษณะความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายด้วยการนับเซลล์ พื้นที่ผิวของเซลล์ ความหนาแน่นของประจุ และค่าซีต้าโพเทนเชียล

ตารางที่ 2-7 ลักษณะสารอินทรีย์ในเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ *Microcystis aeruginosa* *Chlorella vulgaris* *Asterionella formosa* และ *Melosira sp.*

	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Microcystis aeruginosa</i>	<i>Asterionella formosa</i>	<i>Melosira sp.</i>
AOM (ng cell ⁻¹)	0.0029	0.00095	0.019	0.65
Charge density (meq g ⁻¹)	3.2	0.1	1.0	Neg.
Hydrophobicity (%)	11	30	20	32
Carbohydrate:DOC (mg as glucose mg ⁻¹ as C)	1.1	0.7	1.0	0.8
Trans-/hydrophilic carbohydrates (%)	95	77	90	83
Protein:DOC (mg as Bovine serum albumin mg ⁻¹ as C)	0.40	0.64	0.19	0.16
Protein:carbohydrate (mg mg ⁻¹)	0.4	0.6	0.2	0.2
AOM >30 kDa (%)	62	55	9	30
AOM <1 kDa (%)	30	38	81	53

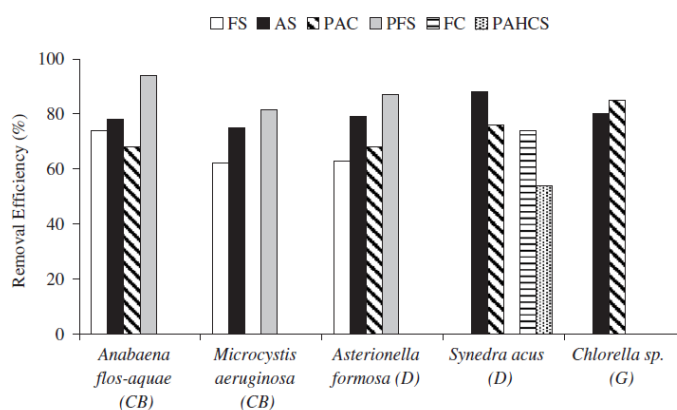
การทดลองใช้อุปกรณ์โมเดลรุ่น DBT6 และใช้สารอลูมิเนียมซิลิเกตเป็นโคแอกกูแลนท์ กวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นปรับพีเอชเป็น 5 สำหรับสาหร่ายสายพันธุ์ *Microcystis aeruginosa* และ *Chlorella vulgaris* ส่วนสาหร่ายชนิดอื่นๆปรับพีเอชเป็น 7 แล้วทำการกวนซ้ำที่ 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยโดยอัดอากาศ ที่ความดัน 450 กิโลปาสคาล อัตราน้ำรีไซเคิล 12% เป็นเวลา 10 นาที

ตารางที่ 2-8 ลักษณะเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ *Microcystis aeruginosa* *Chlorella vulgaris* *Asterionella formosa* และ *Melosira sp.*

	<i>Chlorella vulgaris</i>		<i>Microcystis aeruginosa</i>		<i>Asterionella formosa</i>	<i>Melosira sp.</i>
	pH 5	pH 7	pH 5	pH 7	pH 7	pH 7
Cell images						
Initial cell concentration (cells ml ⁻¹)	$5.0 \times 10^5 \pm 5 \times 10^4$		$6.0 \times 10^5 \pm 1.5 \times 10^4$		$5.0 \times 10^4 \pm 1.2 \times 10^4$	$1.9 \times 10^3 \pm 550$
Surface area (μm ² cell ⁻¹)	55 ± 30		95 ± 34		370 ± 95	5500 ± 845
AOM concentration (mg L ⁻¹ as C)	1.5 ± 0.15		0.6 ± 0.01		1.0 ± 0.2	1.2 ± 0.4
Charge equivalents per cell (including associated AOM) (peq cell ⁻¹)	0.004	0.011	Negligible	0.002	0.062	1.88
% charge contributed by AOM	—	84	—	5	30	Negligible

จากการศึกษาพบว่าสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์มีประจุอยู่ในช่วง 0.002-1.88 peq/cell โดย *M. aeruginosa* มีประจุต่ำสุดและ *Melosira sp.* มีประจุมากที่สุด นอกจากนี้หากค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของประจุในเซลล์สาหร่ายเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนความเข้มข้นของ AOM มีค่าอยู่ในช่วง 0.6-1.5 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับคาร์บอน ผลการวิเคราะห์ประจุที่เกิดจาก AOM เพียงอย่างเดียว คือ 84% 5% และ 30% สำหรับ *C. vulgaris* *M. aeruginosa* และ *A. Formosa* ตามลำดับ เนื่องจากเซลล์สาหร่ายและสารอินทรีย์ในเซลล์มีประจุลบ จำเป็นต้องเติมสารโคแอกกูแลนท์เพื่อกำจัดประจุลบบนเซลล์สาหร่ายให้เป็นกลางทางไฟฟ้าโดยประสิทธิภาพการทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้าขึ้นกับลักษณะของระบบ เมื่อทำการเติมสารโคแอกกูแลนท์อย่างเพียงพอจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดเซลล์สูงถึง 94-99% นอกจากนี้หากสาหร่ายมีมวลโมเลกุลสูง สารอินทรีย์ในเซลล์จะมีปริมาณโปรตีนสูงจะทำหน้าที่เสมือนเป็นสารโพลีเมอร์แอดส่งผลให้ไม่เกิดการกลับมาเสถียรภาพใหม่ในช่วงพีเอช 5 และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในเซลล์สาหร่าย

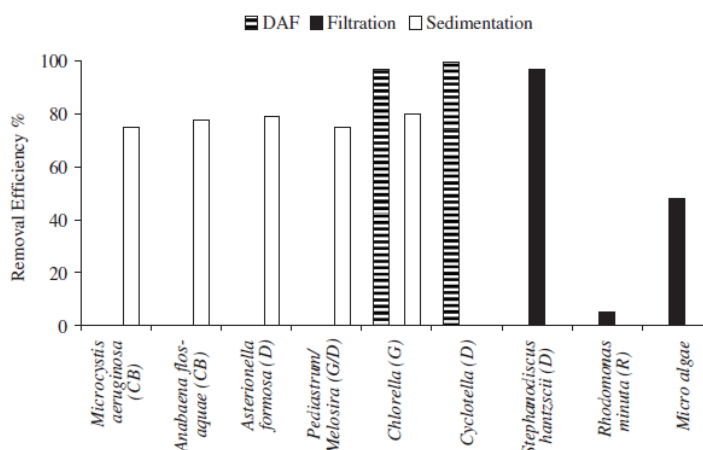
อยู่ในช่วง 46-71% ปริมาณสารอลูมิเนียมที่เหลืออยู่ในระบบต้องเพียงพอสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ภายในเซลล์สาหร่ายอย่างมีประสิทธิภาพ และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของประจุและปริมาณสารโคแอกกูแลนต์สำหรับสาหร่ายทุกสายพันธุ์ที่พีเอช 7 ใช้ในการควบคุมสาหร่ายโดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพและทางเคมี



รูปที่ 2-12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์ไซยาโนแบคทีเรีย

(Jiang et al., 1998); (Drikas et al., 2001) ไดอะตอม (Jiang et al., 1993); (Jun et al., 2001) และสาหร่ายสีเขียว (Liu et al., 1999) ด้วยการตกตะกอนโดยสารโคแอกกูแลนต์ต่างกัน คือ FS (เฟอร์ริกซัลเฟต) AS (อลูมิเนียมซัลเฟต) PAC (โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์) PFS (โพลีเฟอร์ริกซัลเฟต) FC (เฟอร์ริกคลอไรด์) PAHCS (โพลีอลูมิเนียมไฮโดรเจนคลอไรด์ซิลิเกต)

จากรูปที่ 2-12 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมกับการเติมสารโคแอกกูแลนต์ชนิดโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 85% ซึ่งสูงกว่าการใช้อลูมิเนียมซัลเฟตที่มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 80% ทำให้ทราบว่าสารโคแอกกูแลนต์ทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2-13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย การกรอง และการตกตะกอน

จากรูปที่ 2-13 พบว่าสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลาสามารถกำจัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีประสิทธิภาพสูงประมาณ 90% ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าการตกตะกอนประมาณ 20% แต่ไม่ได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกระบวนการกรอง

2.9.2 การศึกษาตัวอย่างจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสนเพื่อวิเคราะห์สาหร่าย

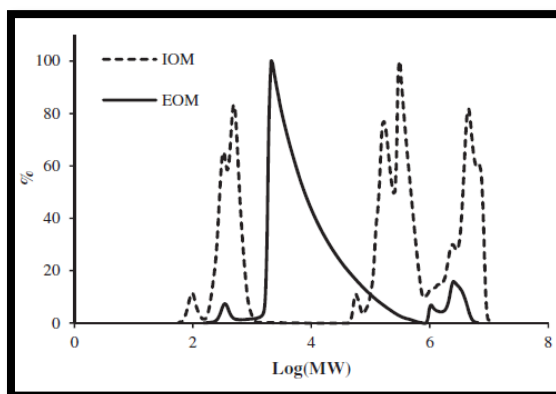
ทันตดาว ทองตัน (2545) ได้ทำการศึกษาน้ำตัวอย่างจากโรงผลิตน้ำประปาสามเสน 5 จุด คือ น้ำดิบ น้ำที่ผ่านการตกตะกอนและการเติมคลอรีนขึ้นต้น น้ำล้างทรายกรอง น้ำที่ผ่านการกรอง และน้ำประปา ช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2544 โดยน้ำดิบมีคุณภาพดังนี้ คือ อุณหภูมิ น้ำดิบเฉลี่ย 29 °C ค่าพีเอชเฉลี่ย 7.28 ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 230 ไมโครซีเมนซ์ต่อเซนติเมตร ความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 104 NTU ค่าการใช้ออกซิเจนเฉลี่ย 4.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าออกซิเจนละลายน้ำ 5.71 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไนเตรทเฉลี่ย 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากงานวิจัยนี้พบว่า สาหร่ายในน้ำดิบมีประมาณ 170 เซลล์ต่อลิตร โดยสาหร่ายที่พบในน้ำดิบมากที่สุดมี 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ ดิวิชั่น Chrysophyta หรือกลุ่มสาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง มีจำนวนมากที่สุดเฉลี่ย 70.90 % ของสาหร่ายทั้งหมดที่พบในน้ำดิบ ดิวิชั่น Cyanophyta พบจำนวนเฉลี่ย 19.93 % ของสาหร่ายทั้งหมดที่พบในน้ำดิบ และดิวิชั่น Chlorophyta พบจำนวนเฉลี่ย

7.33 % ของสาหร่ายทั้งหมดที่พบในน้ำดิบ ซึ่งโรงผลิตน้ำประปาสามแสนสามารถกำจัดสาหร่ายได้ 99.52 % ของสาหร่ายทั้งหมดที่พบในน้ำดิบ โดยสาหร่ายที่สร้างปัญหาให้กับระบบผลิตน้ำประปา คือ สาหร่ายที่อุดตันระบบกรองน้ำด้วยทราย สาหร่ายที่พบมากในน้ำล้างทรายกรองเป็นสาหร่ายในกลุ่ม ไดอะตอม (Chrysophyta) ได้แก่ สกุล *Nitzschia* *Autacoseira* *Navicula* *Cyclotella* *Cymbella* และ *Synedria* เนื่องจากสาหร่ายกลุ่มนี้มีผนังเซลล์เป็นซิลิกาที่ย่อยสลายได้ยาก จึงเข้าไปแทรกตัวตามชั้นทราย ทำให้ระบบกรองน้ำอุดตันเร็วกว่าปกติ สาหร่ายสีเขียว Cyanophyta สร้างปัญหาต่อระบบกรองน้ำเช่นกัน เพราะสาหร่ายกลุ่มนี้มีมักอยู่รวมเป็นกระจุกแน่นและสร้างเมือกที่ผิวหน้าทราย สกุลที่พบมากที่สุดคือ *Oscillatoria* ส่วนสาหร่ายสีเขียว Chlorophyta ที่พบย่อยได้แก่ *Closterium* *Chlorella* และ *Cosmarium*

2.9.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีกายภาพของสารอินทรีย์ของเซลล์สาหร่าย

Li et al. (2012) ได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีกายภาพของสารอินทรีย์ของเซลล์สาหร่าย (Algae Organic Matters, AOM) ประกอบด้วยสารอินทรีย์ภายในเซลล์ (Intracellular Organic Matters, IOM) และสารอินทรีย์ภายนอกเซลล์ (Extracellular Organic Matters, EOM) สารเหล่านี้เป็นต้นเหตุของปัญหาในกระบวนการบำบัดน้ำส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนทที่สูงขึ้น การอุดตันของเมมเบรน ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection by products or DBPs) เกิดกลิ่นและรสอันไม่พึงประสงค์ และสารประกอบอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพเมื่ออยู่ในน้ำดื่ม และหากมวลโมเลกุลของ EOM สูงจะทำหน้าที่เสมือนสาร ฟลอคคูแลนต์ แต่หากมวลโมเลกุลของ EOM น้อยทำให้กลายเป็นสารคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพเนื่องจากมีประจุลบที่พื้นผิวอนุภาค นอกจากนี้ EOM ของสาหร่ายทุกสายพันธุ์ประกอบด้วยสารที่ชอบน้ำเป็นส่วนใหญ่มากกว่า 57% โปรตีน 33% และคาร์โบไฮเดรต 28% การทดลองทำการสกัดจากสาหร่ายสายพันธุ์ *M.aeruginosa* จำนวน 2.01×10^{11} เซลล์ต่อลิตร ที่อยู่ในช่วงการเจริญเติบโตแบบเอกซิปโทแนสเซียล นำไปหมუნเหวี่ยงที่ 10000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำส่วนที่เป็นน้ำไปกรองด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมโครเมตร ทำให้ได้สาร EOM ส่วนเซลล์ที่ถูกแยกนำไปสกัดหา IOM เพื่อประเมินสารประกอบที่ได้จากการฆ่าเชื้อโรค และสารประกอบที่ทำให้เกิดกลิ่นและรส



รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของ IOM และ EOM

จากงานวิจัยนี้พบว่า สารสกัด IOM มีสารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย (DOC) สูงถึง 100.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเป็นพิษของสาหร่าย Microcystin-LR (MC-LR) 506.1 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วนสารสกัด EOM มีสารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย 29.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเป็นพิษของสาหร่าย Microcystin-LR (MC-LR) 141.2 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 ค่าพารามิเตอร์ EOM และ IOM ของสาหร่ายสายพันธุ์ *M.aeruginosa* จำนวน 2.01×10^{11} เซลล์ต่อลิตร

	Dissolved Organic Nitrogen, DON (mg/L)	MC-LR ($\mu\text{g/L}$)	Dissolved Organic Carbon, DOC (mg/L)	Chlorophyll-a (mg/L)	DON/DOC
EOM	NA	141.2	29.7	NA	NA
IOM	23.1	506.1	100.5	3.2	0.23

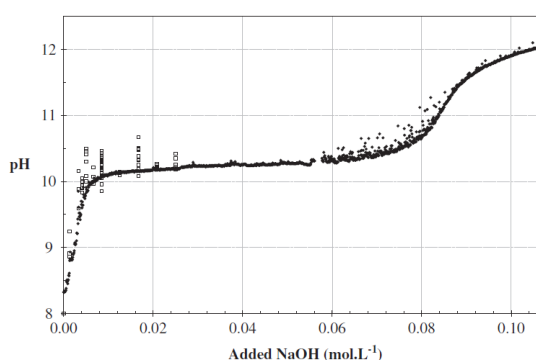
สมบัติความขุ่นและไม่ขุ่นของ EOM และ IOM เมื่อมีสัดส่วนความขุ่นสูง เนื่องจากสารประกอบส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายโปรตีน ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำลดลงใน

กระบวนการโคแอกกูเลชันแบบดั้งเดิม การตกตะกอน การกรอง นอกจากนี้หากส่วนที่ความชอบน้ำเข้าสู่กระบวนการกรองเร็วจะเป็นการเพิ่มสาร N-DBPs ในกระบวนการเติมคลอรีน

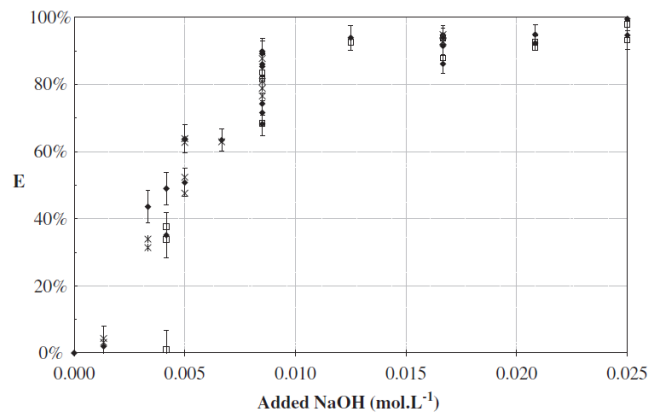
2.9.4 กระบวนการฟล็อกคูเลชันที่เกิดจากค่าพีเอชสูงและการทำให้ลอยของสาหร่ายน้ำเค็ม

Dunaliella salina

Besson et al. (2013) ได้ทำการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของสาหร่ายน้ำเค็ม *Dunaliella salina* ด้วยกระบวนการอโต้ฟล็อกคูเลชัน โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อชักนำให้เกิดกระบวนการทำให้ลอย พบว่าการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เซลล์สาหร่ายถูกทำลายเสถียรภาพและรวมตัวกันเป็นฟล็อก แต่ถ้าเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป เซลล์สาหร่ายจะกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้งและมีลักษณะคล้ายกับเจล ซึ่งกระบวนการทำให้ลอยจะมีประสิทธิภาพเมื่อมีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณน้อยๆ ในช่วงที่ค่าพีเอชของสารละลายเข้าสู่บัฟเฟอร์โซน (ดังรูปที่ 2-15) ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายมีค่ามากกว่า 90 % (ดังรูปที่ 2-16) และ concentration factor มีค่าเท่ากับ 20 (ดังรูปที่ 2-17) ที่ปริมาณการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0085 โมลต่อลิตร นอกจากนี้อัตราการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกและ concentration factor อย่างมีนัยสำคัญ



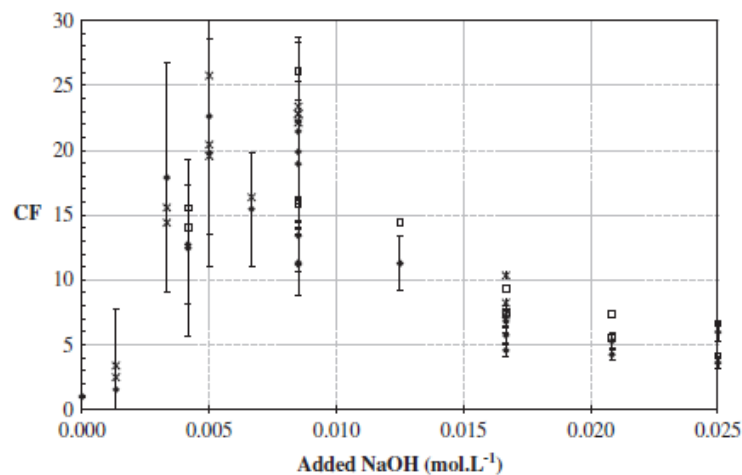
รูปที่ 2-15 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระหว่างการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์
อย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตรา 0.5 โมลต่อลิตรต่อนาที



รูปที่ 2-16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแยกกับปริมาณการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์

(◆ เติม NaOH ครั้งเดียว □ อัตราการเติม NaOH 0.0017 mol/L*min

X อัตราการเติม NaOH $<0.0005 \text{ mol/L*min}$)



รูปที่ 2-17 ความสัมพันธ์ระหว่าง concentration factor กับปริมาณการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์

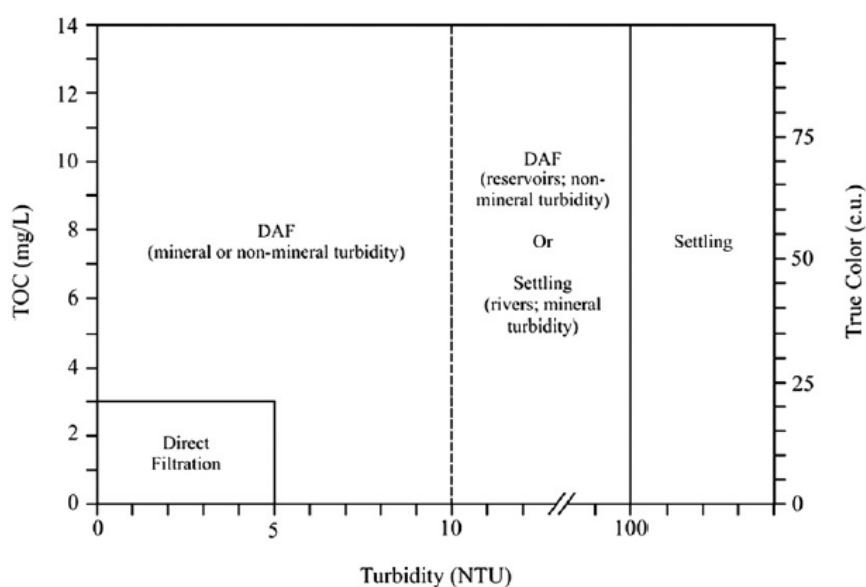
(◆ เติม NaOH ครั้งเดียว □ อัตราการเติม NaOH 0.0017 mol/L*min

X อัตราการเติม NaOH $<0.0005 \text{ mol/L*min}$)

2.9.5 การรวบรวมศึกษากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

Edzwald, J. K. (2010) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ใช้ในการบำบัด
สาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย กับการตกตะกอน เนื่องจากสาหร่าย

หลายชนิด เช่น สาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ไดอะตอม เป็นสาเหตุจุดต้นในสารกรอง ส่งผลให้ต้องทำการล้างย้อนบ่อยขึ้น พบว่ากระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีประสิทธิภาพในการแยกสาหร่ายออกจากวัฏภาคน้ำดีกว่ากระบวนการตกตะกอน โดยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีประสิทธิภาพ 90-99% และกระบวนการตกตะกอนมีประสิทธิภาพ 60-90% ถ้าหากมีกระบวนการบำบัดขั้นต้นอย่างเหมาะสม จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพิ่มขึ้นเป็น 96-99.9% นอกจากนี้หากน้ำเสียมีความเข้มข้นสาหร่ายมาก จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกดีมากกว่าน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสาหร่ายต่ำ



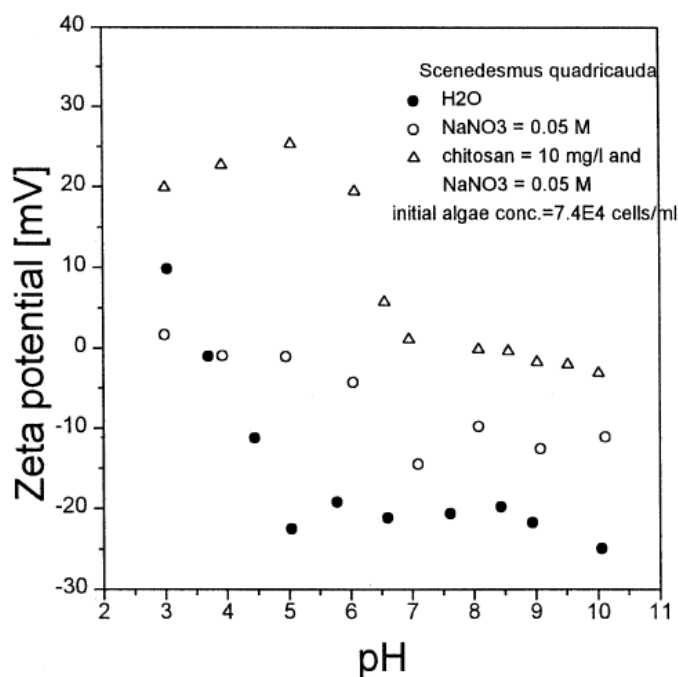
รูปที่ 2-18 การเลือกกระบวนการแยกอนุภาคขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบ (Valade et al., 2009)

จากรูปที่ 2-18 แสดงเกณฑ์การเลือกกระบวนการแยกอนุภาคตามคุณภาพของแหล่งน้ำดิบ โดยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเหมาะกับแหล่งน้ำดิบที่มีความขุ่นจากดินเหนียวหรือโคลน (mineral turbidity) ไม่เกิน 10 NTU และแหล่งน้ำดิบที่มีความขุ่นจากจุลชีพ (non-mineral turbidity) ไม่เกิน 100 NTU ส่วนค่า TOC และสีจริงของน้ำดิบไม่ได้เป็นปัจจัยในการเลือก เนื่องจากกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่มีค่า TOC สูงและต่ำได้ดี

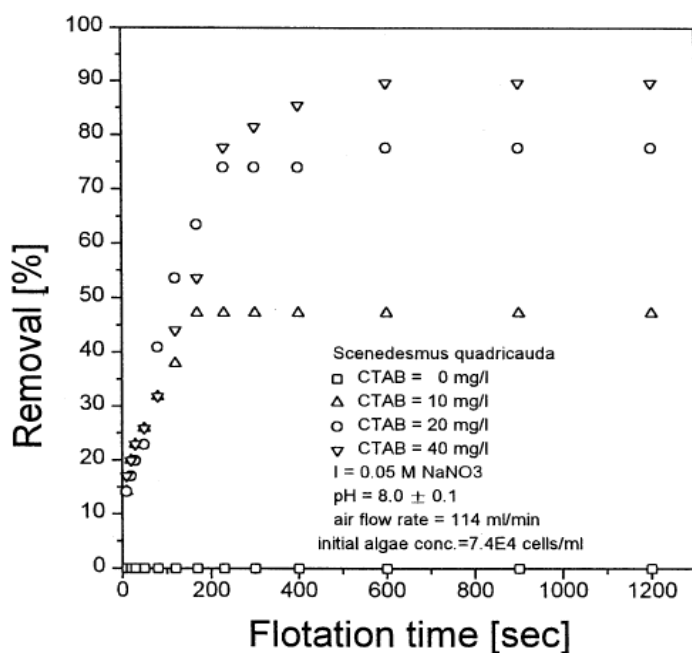
2.9.6 การศึกษากระบวนการกำจัดสาหร่ายจากแหล่งน้ำด้วยการทำให้ลอย

Chen et al. (1998) ได้ทำการศึกษากระบวนการทำให้ลอยแบบ Dispersed-Air เพื่อใช้กำจัดสาหร่าย *Scenedesmus quadricauda* โดยใช้ตัวดักจับ (Collector) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 3 ชนิด คือ

1. N-Cetyl-N-N-N-trimethylammonium bromide (CTAB) ตัวดักจับชนิดประจุบวก
2. Sodium dodecylsulfate (SDS) ตัวดักจับชนิดประจุลบ
3. Triton X-100 ตัวดักจับชนิดไม่มีประจุ



รูปที่ 2-19 การเปรียบเทียบค่าซีต้าโพเทนเชียลของสาหร่ายที่ความเข้มข้น 7.4×10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในสารละลายต่างๆ



รูปที่ 2-20 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย ที่ความเข้มข้น 7.4×10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

โดยการเติม CTAB ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

พบว่า pH เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับกระบวนการกำจัดสาหร่ายด้วยการทำให้ลอย เนื่องจากสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus quadricauda* ในช่วง pH 5-8 ค่าซีต้าโพเทนเชียล จะมีค่าเป็นลบประมาณ 20 (ดังรูปที่ 2-19) ควรใช้ตัวดักจับชนิดประจุบวก N-Cetyl-N-N-N-trimethylammonium bromide (CTAB) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 95% ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่หาก pH สูงกว่า 8 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยก ลดลง ดังนั้นแสดงว่าแรงทางไฟฟ้าที่กระทำระหว่างตัวดักจับ และพื้นผิวเซลล์มีความสำคัญต่อ กระบวนการแยกสาหร่ายเป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2-20

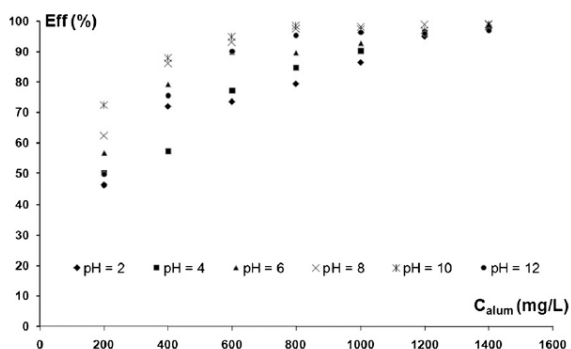
นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นอัลคาไลน์ดี (Alkalinity) และการปรับอัตราการไหลของอากาศไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสาหร่ายสายพันธุ์ *Scenedesmus quadricauda* ดังตารางที่ 2-10

ตารางที่ 2-10 ผลของ NaHCO_3 และอัตราการไหลของอากาศ ที่มีต่อการบำบัดสาหร่าย *Scenedesmus quadricauda* ความเข้มข้น 7.4×10^4 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

NaHCO_3 (mg/L)	Removal (%)	Air flow rate (mL/min)	Removal (%)
0.0	95.0	68	95.0
10.0	95.0	114	95.0
50.0	95.1	206	95.0

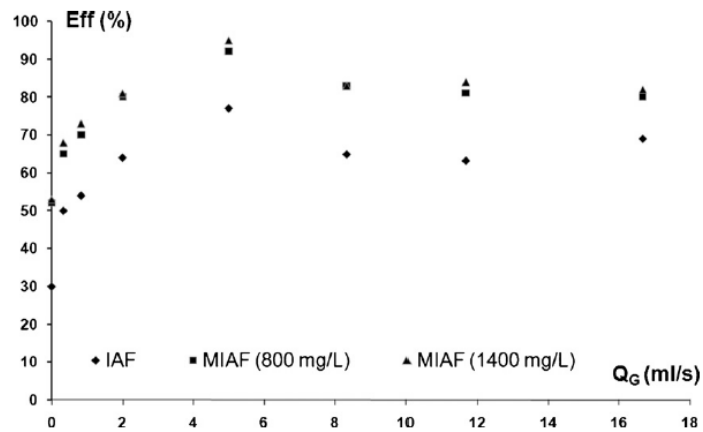
2.9.7 การศึกษาผลของลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและปริมาณสารเคมีที่มีต่อการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยการเป่าฟอง (IAF)

Painmanakul et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ที่มีสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant) 1 มิลลิโมลาร์ ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยการเป่าฟองอากาศร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน (MIAF) ในคอลัมน์ทดสอบการลอยตัว พบว่า กระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงถึง 99% ในช่วงพีเอช 8-10 และความเข้มข้นของอลูมิเนียมซัลเฟต 800-1400 มก./ล. (ดังรูปที่ 2-21)

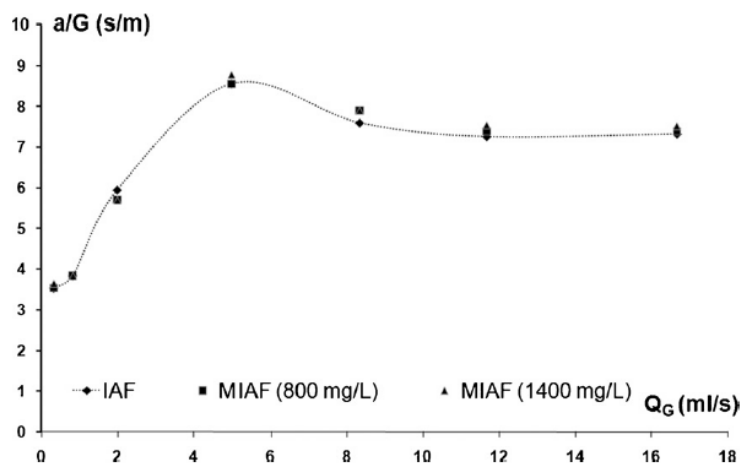


รูปที่ 2-21 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันที่ความเข้มข้นของอลูมิเนียมซัลเฟตแตกต่างกัน

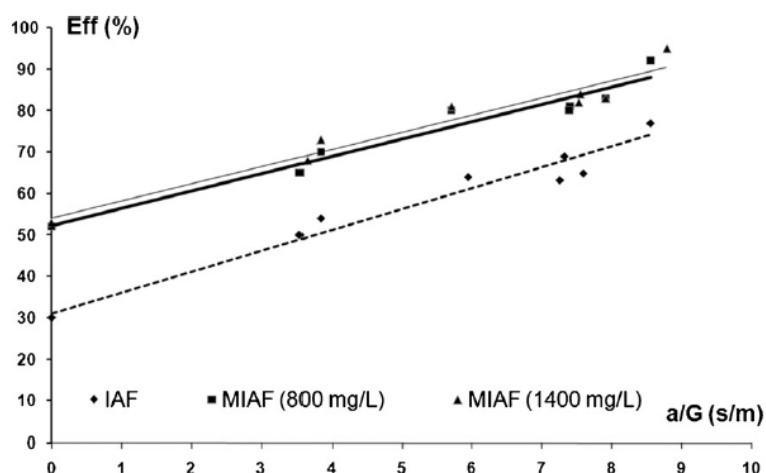
การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการ IAF และ MIAF มีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ อัตราการไหลของฟองอากาศ 5 มิลลิตรต่อวินาที (IAF 80%, MIAF 94-97%) (ดังรูปที่ 2-22) ซึ่งมี ค่าสัดส่วนพื้นที่จำเพาะของฟองอากาศต่อความเร็วเกรเดียนท์ (a/G ratio) สูงสุดด้วย (ดังรูปที่ 2-23) โดยประสิทธิภาพการแยกน้ำมันจะเพิ่มขึ้นเมื่อ a/G ratio มีค่ามากขึ้น (ดังรูปที่ 2-24)



รูปที่ 2-22 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันที่อัตราการไหลของฟองอากาศแตกต่างกัน



รูปที่ 2-23 ค่า a/G ratio ที่อัตราการไหลของฟองอากาศแตกต่างกัน



รูปที่ 2-24 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันที่ค่า a/G ratio ต่างกัน

2.9.8 การศึกษาวิเคราะห์ผลกระบวนการแยก การเก็บเกี่ยวและการนำน้ำออกจากเซลล์สาหร่ายเพื่อนำสาหร่ายมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิง (Bio-fuel)

Kuan et al. (2012) ได้ทำการวิเคราะห์ผลการผลิตเชื้อเพลิงจากเซลล์สาหร่าย ซึ่งใช้พื้นที่ในการเพาะน้อยกว่าการผลิตเชื้อเพลิงทดแทนชนิดอื่นๆ เช่น ถั่วเหลือง ข้าวโพด เป็นต้น สามารถแบ่งกระบวนการออกเป็น ขั้นตอน คือ

- 1) การทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่าย โดยที่ประจุบนพื้นผิว ขนาด และความหนาแน่นมีผลกระทบต่อกระบวนการแยกเซลล์สาหร่ายสามารถกระทำได้หลายวิธี ดังนี้
 - การเติมไอโซนให้ประจุบนพื้นผิวของอนุภาค
 - การเติมเพอร์ริคโลไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ ไม่แนะนำให้ใช้
 - สารอินทรีย์ในเซลล์สาหร่าย (AOM) ประกอบด้วยไฮโดรฟิสิกโพลีแซคคาไรด์ (ชอบน้ำ) และไฮโดรโฟบิกโปรตีน (ไม่ชอบน้ำ) แนะนำให้ปรับพื้นผิวฟองด้วยสารเคมีจำพวกไฮโดรโฟบิกสายยาว และไฮโดรฟิสิกที่มีประจุสูงแทนกระบวนการโคแอกกูเลชั่น

- การเติมโพลีเมอร์จำพวกสารอินทรีย์ เช่น โพลีอเล็กโทรไลต์ และโพลีไฮดรอกซีคอมเพล็กซ์

กระบวนการนี้ จะส่งผลให้เซลล์ถูกทำลายเสถียรภาพและเพิ่มโอกาสการรวมตัวกัน ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากมีฟองอากาศมาขัดเกากับอนุภาคฟล็อกที่เกิดขึ้นทำให้ฟล็อกมีความหนาแน่นลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ฟล็อกลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ นอกจากนี้การเพิ่มน้ำหนักของอนุภาคจะเป็นการเพิ่มความเร็วการตกตะกอนของเซลล์สำหรับซึ่งสามารถนำแรงหนีศูนย์กลางมาประยุกต์ใช้ได้

- 2) กระบวนการแยกเซลล์สำหรับจากตัวกลาง และการเก็บที่ความเข้มข้นสูงกว่า 10% การเลือกกระบวนการแยกขึ้นกับลักษณะของเซลล์สำหรับแต่ละสายพันธุ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- Screening ประสิทธิภาพการแยกของขั้นตอนสกรีนขึ้นอยู่กับ ช่องว่างระหว่างตะแกรง และขนาดเซลล์สำหรับ นิยมใช้ 2 ประเภท คือ

1. Micro straining

2. Vibrating screen

- กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของแข็ง (Thickening) เป็นกระบวนการที่ช่วยลดต้นทุนในการแยกอนุภาค วิธีที่นิยมใช้สำหรับเซลล์สำหรับ คือ

1. กระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชัน

2. การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง

3. กระบวนการทำให้ลอย

4. กระบวนการทำให้ลอย และกระบวนการโคแอกกูเลชัน-ฟล็อกคูเลชันโดยอิทธิพลจากสนามไฟฟ้า

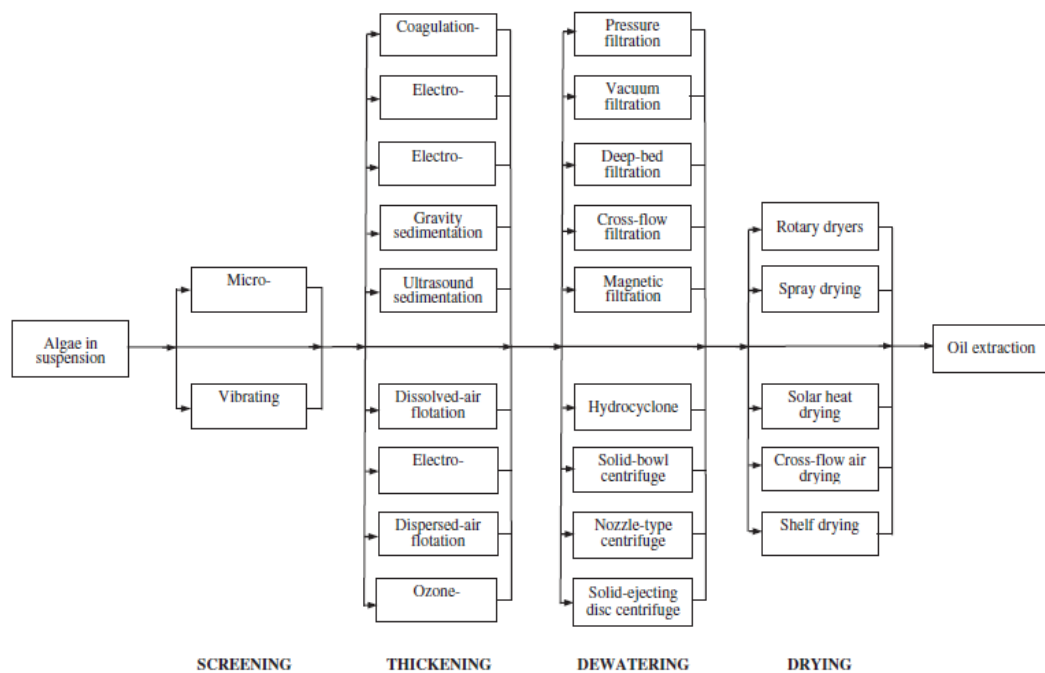
5. กระบวนการอุลตราซาวด์

3) การนำน้ำออกจากเซลล์สาหร่าย (Dewatering)

- การกรอง (Filtration)
- การปั่นเหวี่ยง (Centrifugation)

4) การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้ง (dewatering)

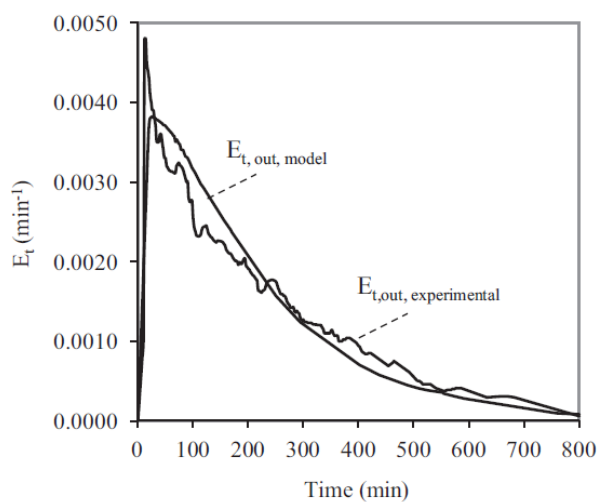
- การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งด้วยการหมุน (Rotary dryer)
- การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งด้วยการสเปรย์ (Spray drying)
- การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar heat drying)
- การทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งด้วยอากาศและสุญญากาศ (Cross-flow air and vacuum shelf drying)



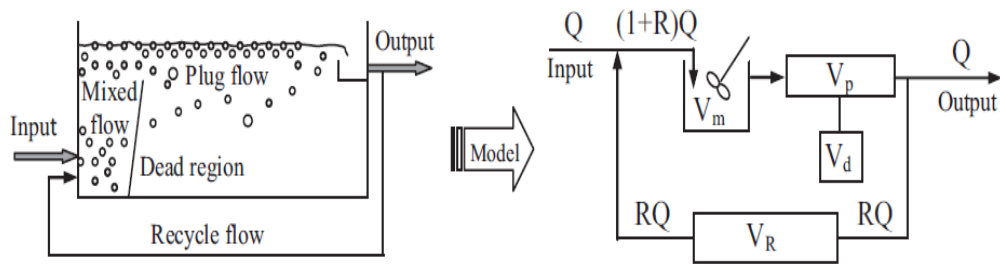
รูปที่ 2-25 กระบวนการทั่วไปสำหรับแยก และทำให้เซลล์สาหร่ายแห้งเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงาน

2.9.9 การสร้างแบบจำลองถึงทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสำหรับแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย

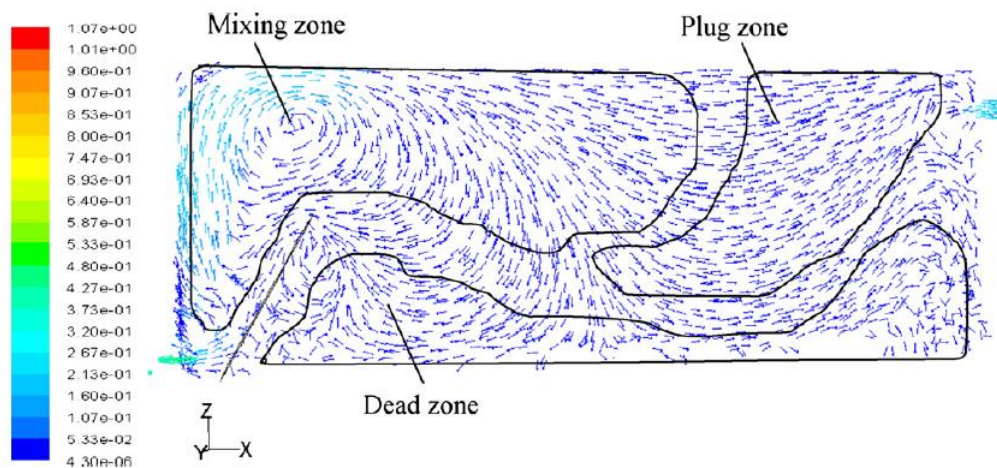
Behin et al. (2012) ได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางอุทกพลศาสตร์ของถังทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ที่สภาวะการเดินระบบดังนี้ อัตราการไหลน้ำเสีย 5 ลบ.ม./ชม. อัตราการไหลน้ำหมุนเวียน 7.2 ลบ.ม./ชม. และ อัตราน้ำล้นผิว 0.81 ม./ชม. โดยการสร้างแบบจำลองรูปแบบการไหลด้วยกราฟการกระจายตัวของเวลากัก (ดังรูปที่ 2-26) พบว่า การไหลของของไหลในส่วนสัมผัสมีลักษณะเป็นถึงปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ (ปริมาตร 22 ลบ.ม.) การไหลของของไหลในส่วนแยกมีลักษณะเป็นถึงปฏิกิริยาแบบท่อ (ปริมาตร 1.22 ลบ.ม.) และภายในถังทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีบริเวณ dead zone ประมาณ 6.78 ลบ.ม. ซึ่งคิดเป็น 22.6 % ของปริมาตรถังทั้งหมด (ดังรูปที่ 2-27 และ 2-28) นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลเข้ามีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาตรของ mixed zone เพิ่มขึ้น แต่ปริมาตรของ plug zone กับ dead zone ลดลง



รูปที่ 2-26 กราฟการกระจายตัวของเวลากักของระบบจากการทดลองและแบบจำลอง



รูปที่ 2-27 แบบจำลองแสดงรูปแบบการไหลในถังทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย



รูปที่ 2-28 เวกเตอร์แสดงความเร็วของของไหลที่ภาคตัดขวางของถัง (มุมมองด้านข้าง)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา เห็นได้ว่าสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์จะมีลักษณะที่แตกต่างกันตามชนิดและสภาวะรอบข้าง เช่น ขนาด ความหนาแน่นเซลล์ ค่าพีเอช และค่าซีต้าโพเทนเชียล ซึ่งเป็นปัจจัยในการเลือกกระบวนการสำหรับบำบัดและแยกเซลล์สาหร่ายให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามเซลล์สาหร่ายส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ ดังนั้นกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF) จึงเป็นที่นิยมในการใช้แยกสาหร่ายออกจากวัฏภาคน้ำ แต่ว่าสาหร่ายทุกสายพันธุ์มีค่าซีต้าโพเทนเชียลเป็นลบ ส่งผลให้กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพียงอย่างเดียวไม่สามารถแยกสาหร่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องมีการทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่ายก่อน โดยสายพันธุ์สาหร่ายที่พบมากในแหล่งน้ำธรรมชาติคือ กลุ่มไดอะตอม หรือสาหร่ายสีน้ำตาลแกมทอง (Chrysophyta) แต่สาหร่ายคลอเรลลาที่มีการเพาะเลี้ยงเพื่อนำไปใช้

ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย มีอัตราการเจริญเติบโตสูง และมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสาหร่ายสายพันธุ์อื่น ทำให้แยกออกจากน้ำได้ยาก เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการแยกสาหร่ายสายพันธุ์โคลอเรลลาออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ภายในถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลของน้ำเสียอย่างต่อเนื่อง เพื่อหาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม เช่น ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ อัตราการไหลของน้ำเสีย อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน และลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ในการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายโคลอเรลลาด้วยกระบวนการอโต้ฟลื้อคูลูเลชัน นอกจากนี้ยังทำการศึกษาพลศาสตร์ของไหลในถังปฏิกรณ์ เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการไหลและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย



บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ส่วน คือ

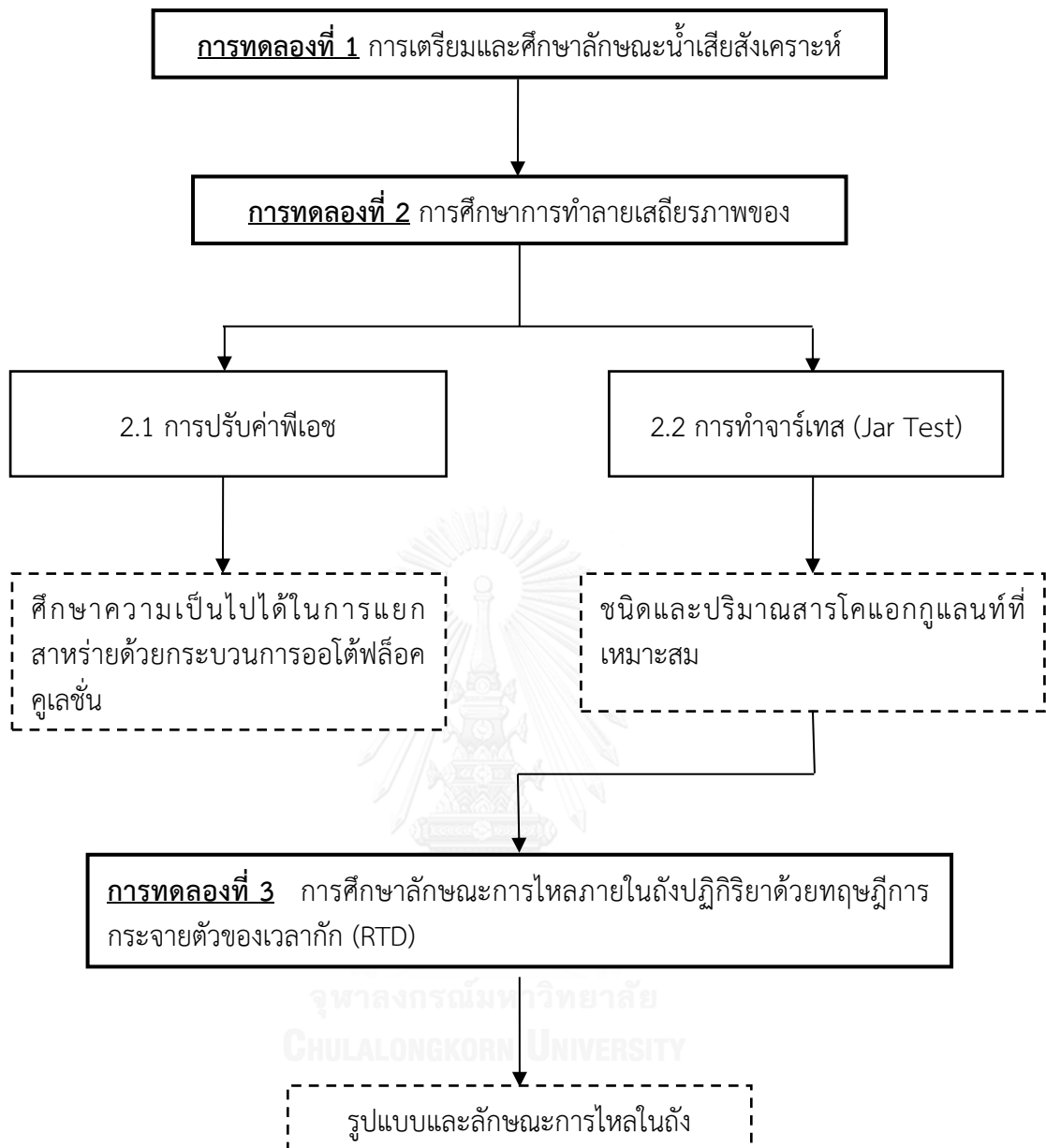
การทดลองที่ 1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับสายพันธุ์โคลิฟอร์มและอนุภาคความขุ่น

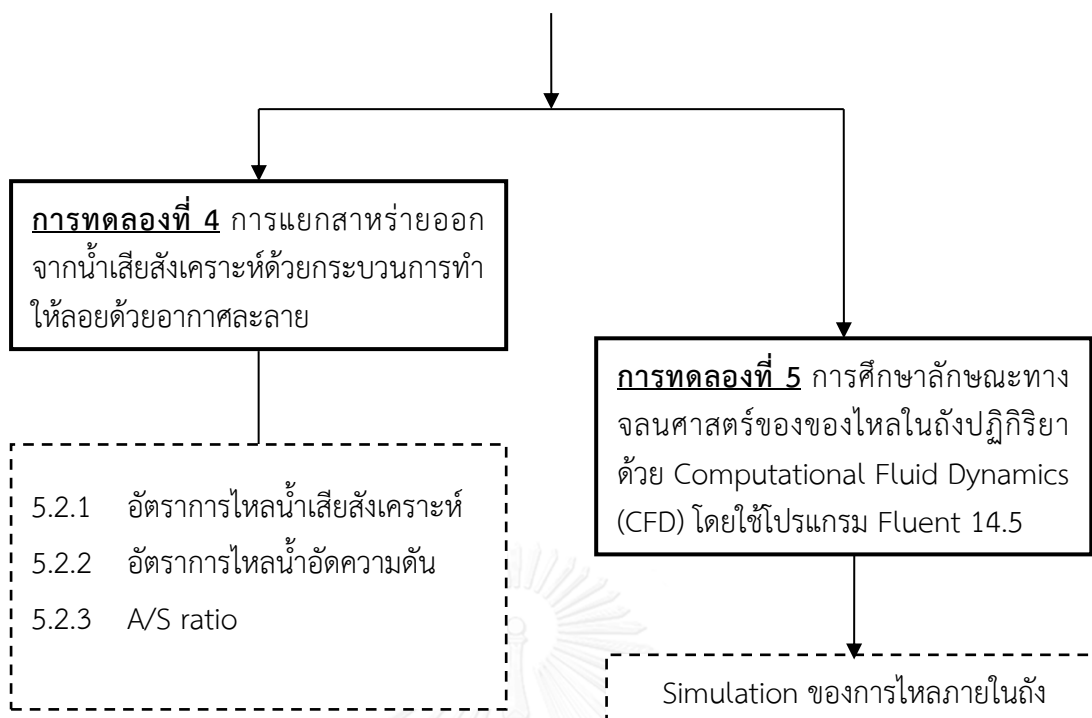
การทดลองที่ 2 การศึกษาการทำลายเสถียรภาพเซลล์สำหรับด้วยการปรับค่าพีเอช (pH adjustment) และการทำลายเสถียรภาพอนุภาคด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารอลูมิเนียมซัลเฟตและแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม

การทดลองที่ 3 การศึกษาลักษณะการไหลภายในถังปฏิกรณ์ด้วยทฤษฎีการกระจายตัวของเวลากัก (Residence time distribution) และนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้น

การทดลองที่ 4 การแยกอนุภาคออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลกับประสิทธิภาพของระบบ

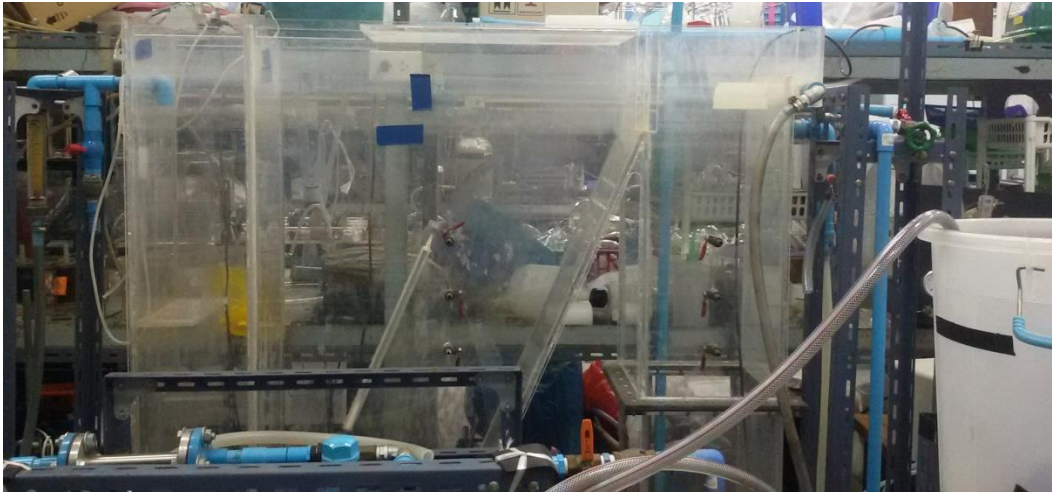
การทดลองที่ 5 การศึกษาลักษณะทางจลนศาสตร์ของของไหลในถังปฏิกรณ์ด้วย Computational Fluid Dynamics (CFD) โดยใช้โปรแกรม Fluent 14.5 เพื่อจำลองรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์



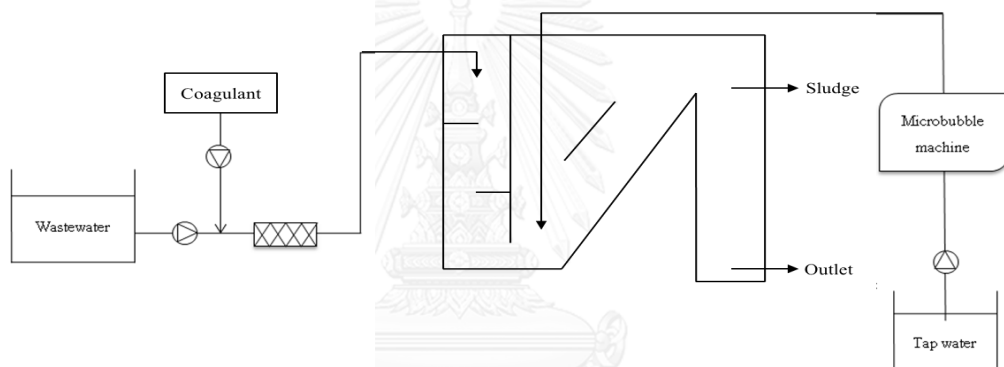


3.2 การติดตั้งการทดลอง (Experimental set-up)

ชุดอุปกรณ์สำหรับใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยท่อสำหรับกวนเร็ว (Inline static mixer) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ความยาว 210 มิลลิเมตร และถังปฏิกริยากว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 1.15 เมตร สูง 1.60 เมตร ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนฟลิตคูล์แบบแผ่นกั้น ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 44 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นกับถัง 10 เซนติเมตร และส่วนทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย พื้นที่ด้านบน 25x70 ตารางเซนติเมตร พื้นที่ด้านล่าง 10x70 ตารางเซนติเมตร มีถังเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และสารโคแอกกูแลนต์สำหรับจ่ายเข้าสู่ถังปฏิกริยาด้วยเครื่องสูบน้ำ และเครื่องสร้างฟองอากาศขนาดเล็กพร้อมหัวจ่ายเข้าสู่ถังปฏิกริยา ซึ่งการติดตั้งชุดอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3-1



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-1 ชุดอุปกรณ์การแยกสารร่ายออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (ก) ชุดอุปกรณ์จริง (ข) ไดอะแกรม

3.3 อุปกรณ์และสารเคมี

3.3.1 อุปกรณ์

- 1) อุปกรณ์การสังเคราะห์น้ำเสียปนเปื้อนสารร่าย
 - 1.1 ขวดพลาสติกใสขนาด 6 ลิตร
 - 1.2 หัวเป่าอากาศ
 - 1.3 สายต่อและข้อต่อหัวกระจายอากาศ

- 1.4 ปุ่มดูดอากาศ
- 1.5 หลอดไฟสำหรับให้แสงสว่าง
- 1.6 เครื่องชั่งดิจิตอลแบบละเอียด
- 2) อุปกรณ์การโคแอกกูเลนซ์
 - 2.1 เครื่องจาร์เทส (Jar Test)
 - 2.2 ปีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 6 อัน
 - 2.3 เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)
- 3) อุปกรณ์การแยกสารด้วยกระบวนการทำให้ลอย
 - 3.1 ถังปฏิกริยาสำหรับการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย
 - 3.2 มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)
 - 3.3 เครื่องสูบน้ำ (Pump) เข้าเครื่องอัดความดัน
 - 3.4 ท่อสำหรับกวนเร็ว (Inline static mixer)
 - 3.5 ถังเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ขนาด 100 ลิตร
 - 3.6 ถังเตรียมนสารโคแอกกูแลนท์ 10 ลิตร
 - 3.7 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)
 - 3.8 วาล์วปรับอัตราการไหลน้ำแบบ needle valve
 - 3.9 เครื่องสูบน้ำ (Pump) สำหรับสูบน้ำเสีย
 - 3.10 เครื่องสูบน้ำ (Pump) สำหรับสูบน้ำสารโคแอกกูแลนท์
 - 3.11 เครื่องอัดความดัน (Pressurized equipment)
- 4) อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ผลการทดลอง
 - 4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
 - 4.2 Haemocytometer counting chamber
 - 4.3 บิวเรตต์ (Burette)
 - 4.4 หลอดหยดสาร
 - 4.5 เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity meter)
 - 4.6 เครื่องวัดค่าความขุ่น (Turbidity meter)
 - 4.7 UV-Visible Spectrophotometer

3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 1) สารส้มหรืออลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)
- 2) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)
- 3) ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- 4) โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4)
- 5) แมกนีเซียมซัลเฟต ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- 6) โพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3)
- 7) แมงกานีสคลอไรด์ ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- 8) คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- 9) ซิงค์ (II) ซัลเฟต ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- 10) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 11) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
- 12) สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)
- 13) อิริโอโครมแบล็คทีอินดิเคเตอร์ (Eriochrome Black T indicator)
- 14) สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ (EDTA standard solution)

3.4 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

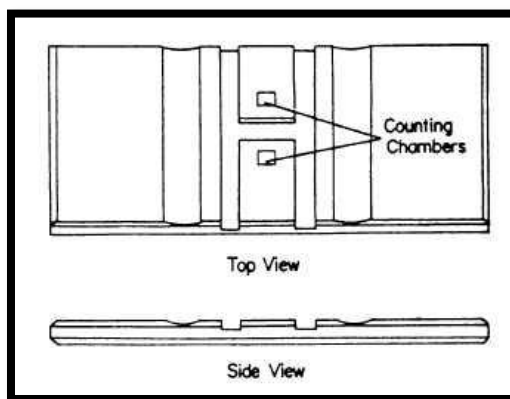
- 1.4.1 ความเข้มข้นเซลล์สำหรับใช้ Haemocytometer counting chamber ในการนับเซลล์ (ดังรูปที่ 3-2) และคำนวณความเข้มข้นเซลล์จากสมการที่ 3-1

สูตรการคำนวณความเข้มข้นเซลล์

$$C = \frac{N}{(n \times A)d} \quad (3-1)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นเซลล์ (เซลล์ต่อมิลลิลิตร)
 N = จำนวนเซลล์สำหรับทำการนับได้ทั้งหมด

- n = จำนวนช่องที่ทำการนับสำหรับ
 A = พื้นที่ต่อ 1 ช่องที่ทำการนับสำหรับ (ตารางมิลลิเมตร)
 d = ความลึกของช่องที่ทำการนับ (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3-2 อุปกรณ์นับจำนวนเซลล์สำหรับ Haemocytometer counting chamber

1.4.2 ประสิทธิภาพการบำบัด คำนวณจากสมการที่ 3-2

สูตรการคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด

$$\%Re = \left(1 - \frac{C_i}{C_0}\right) \times 100 \quad (3-2)$$

- โดยที่
- $\%Re$ = ประสิทธิภาพการบำบัด
 - C_i = ค่าความเข้มข้นของอนุภาคที่เวลาใดๆ
 - C_0 = ค่าความเข้มข้นของอนุภาคที่เวลาเริ่มต้น

1.4.3 ค่าความนำไฟฟ้า วัดด้วย Conductivity meter

1.4.4 ค่าพีเอช วัดด้วย pH meter

1.4.5 ค่าความขุ่น วัดด้วย Turbidity meter

1.4.6 ค่าความกระด้างในน้ำ วิเคราะห์ด้วยวิธี EDTA titrimetric method

1.4.7 ค่าความเป็นด่างในน้ำ วิเคราะห์ด้วยวิธี Titration method

3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

3.5.1.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับสายพันธุ์คลอเรลลา

- 1) เเพาะเลี้ยงสายพันธุ์คลอเรลลา โดยนำหัวเชื้อสายพันธุ์คลอเรลลา ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดพลาสติกใสขนาด 6 ลิตร เติมน้ำกลั่นจน ปริมาตรเป็น 1 ลิตร
- 2) เติมอาหารเลี้ยงสายพันธุ์ N8 (ดังตารางที่ 3-1)
- 3) เติมอากาศและให้แสงตลอดเวลา
- 4) ปรับปริมาตรเป็น 6 ลิตร แล้วเติมอาหารเลี้ยงสายพันธุ์
- 5) เติมอากาศและให้แสงตลอดเวลา และให้อาหารทุกๆ 1 สัปดาห์
- 6) นับเซลล์สายพันธุ์ในแต่ละวัน เพื่อสร้างกราฟแสดงการเจริญเติบโต
- 7) นำสายพันธุ์มาผสมกับน้ำประปาให้ได้ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ต้องการ

ตารางที่ 3-1 สูตรอาหารเหลวสำหรับเลี้ยงสายพันธุ์ N8

สารเคมี	ปริมาณ (มก.)/น้ำ 1000 มล.
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	260.0
K_2HPO_4	740.0
CaCl_2	10.0
Fe EDTA	10.0
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50.0
KNO_3	1000.0
Trace element*	1.0
Trace element*	ปริมาณ (มก.)/น้ำ 1000 มล.
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	3.58
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	12.98
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1.83
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3.20
Distilled water	1000.00

3.5.1.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อุณหภูมิความขุ่น

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อุณหภูมิความขุ่นด้วยการผสมเบนโทไนท์กับน้ำประปา ให้มีความเข้มข้น 0 50 100 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2) วัดค่าความขุ่น และสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าความขุ่นกับความเข้มข้นของ เบนโทไนท์

3.5.2 การศึกษาการแยกอนุภาคออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการทางเคมี

3.5.2.1 การปรับค่าพีเอช (pH adjustment)

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายที่ความเข้มข้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 6 ใบ
- 2) วิเคราะห์ค่าพีเอช และค่าความกระด้างของน้ำเสียสังเคราะห์
- 3) เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอช 10.5 11 12 และ 12.5
- 4) กวนที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที
- 5) เก็บน้ำตัวอย่างแต่ละบีกเกอร์บริเวณต่ำจากผิวน้ำ 2 เซนติเมตร
- 6) วิเคราะห์จำนวนเซลล์สาหร่าย ค่าพีเอช และค่าความกระด้าง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกสาหร่าย

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรการศึกษาการปรับค่าพีเอช

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1. ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น	1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร
2. ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์	10.5 11 12 และ 12.5
ตัวแปรตาม	กระบวนการวิเคราะห์
1. ความเข้มข้นสาหร่าย	นับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วย Haemocytometer counting chamber
2. ค่าพีเอช	pH meter
3. ค่าความกระด้าง	EDTA titrimetric method

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรการศึกษาการปรับค่าพีเอช (ต่อ)

ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์	1 ลิตร
2. อัตราการกวน และระยะเวลากวน	ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที
3. ระยะเวลาตกตะกอน	20 นาที

3.5.2.2 กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยการทำจาร์เทส (Jar Test)

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายที่ความเข้มข้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 12 ใบ
- 2) เติมอลูมิเนียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 50 100 150 200 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละบีกเกอร์ รวม 6 ใบ และเติมแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 50 100 150 200 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละบีกเกอร์ รวม 6 ใบ
- 3) กวนเร็วที่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที กวนช้าที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 20 นาที
- 4) เก็บน้ำตัวอย่างแต่ละบีกเกอร์บริเวณต่ำจากผิวน้ำ 2 เซนติเมตร
- 5) เปลี่ยนความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายเป็น 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่น 50 NTU ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-4
- 6) วิเคราะห์ความเข้มข้นของอนุภาค ค่าพีเอช และค่าความเป็นด่าง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาค หาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมในการโคแอกกูเลชัน

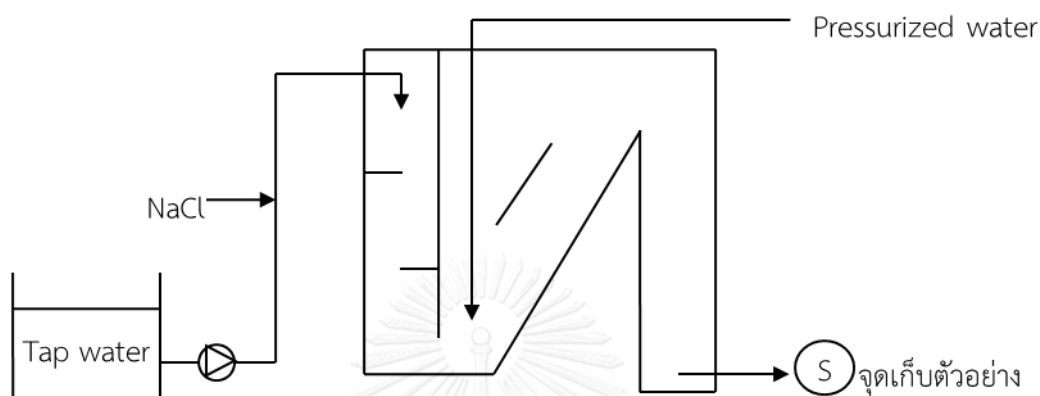
ตารางที่ 3-3 ตัวแปรการศึกษาการทำจารเทส

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1. ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น	1×10^6 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร
2. ความเข้มข้นอนุภาคความขุ่นเริ่มต้น	50 NTU
3. ความเข้มข้นอลูมิเนียมซัลเฟต	50 100 150 200 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์	50 100 150 200 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	กระบวนการวิเคราะห์
1. ความเข้มข้นสาหร่าย	นับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วย Haemocytometer counting chamber
2. ค่าพีเอช	pH meter
3. ค่าความเป็นต่าง	Titration method
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์	1 ลิตร
2. อัตราการกวนเร็ว และระยะเวลากวน	ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที
3. อัตราการกวนช้า และระยะเวลากวน	ความเร็ว 60 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที
4. ระยะเวลาตกตะกอน	20 นาที

3.5.3 การศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วยทฤษฎีการกระจายตัวของเวลากัก (Residence time distribution)

- เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยน้ำประปา ให้มีความเข้มข้น 0 0.05 0.1 0.2 0.5 1 และ 3 กรัมต่อลิตร
- วัดค่าความนำไฟฟ้า และสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์
- เดินระบบด้วยน้ำประปาที่อัตราการไหล 5-10 ลิตร/นาที ทำการจ่ายสารโซเดียมคลอไรด์ เข้าสู่ถังปฏิกริยาด้วยวิธี Pulse input experiment
- เก็บตัวอย่างที่ทางออกของถังปฏิกริยา ทุกๆ 1 นาที (ดังรูปที่ 3-3) จนกว่าสารโซเดียมคลอไรด์จะไหลออกจากถังปฏิกริยาจนหมด

- 5) วัดค่าความนำไฟฟ้า และคำนวณกลับเป็นความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์
- 6) สร้างกราฟฟังก์ชันการกระจายของเวลากักจากปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่เวลาต่างๆ เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการไหลของถังปฏิกริยา



รูปที่ 3-3 ชุดอุปกรณ์และจุดเก็บตัวอย่างสำหรับศึกษาลักษณะการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วย RTD

3.5.4 การแยกอนุภาคออกจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายที่ความเข้มข้น 1×10^3 เซลล์ต่อมิลลิลิตร
- 2) ฉายน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ถังปฏิกริยาด้วยอัตราการไหล 5–8 ลิตรต่อนาที พร้อมกับเติมสารโคแอกกูแลนต์ความเข้มข้นจากการทดลองที่ 3.5.2.2
- 3) ฉายน้ำอัดความดันเข้าสู่ถังปฏิกริยาด้วยอัตราการไหล 1.3-5.2 ลิตรต่อนาที
- 4) เดินระบบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 5 นาที
- 5) เปลี่ยนความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายเป็น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่น 50 NTU ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-4
- 6) วิเคราะห์จำนวนเซลล์สาหร่าย เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายหาอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน ค่า A/S ที่เหมาะสม

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรศึกษาการแยกสาหร่ายด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการทดลอง
1. อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์	5-8 ลิตรต่อนาที
2. อัตราการไหลน้ำอัดความดัน	1.3-5.2 ลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	กระบวนการวิเคราะห์
1. ความเข้มข้นสาหร่าย	นับจำนวนเซลล์สาหร่ายด้วย Haemocytometer counting chamber
2. A/S ratio	คำนวณจากสมการที่ 3-3
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นสารโคแอกกูแลนต์	จากการทดลองที่ 3.5.2.2
2. ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น	จากการทดลองที่ 3.5.2.2

การคำนวณค่าสัดส่วน A/S

$$\frac{A}{S} = \frac{1.3s_a(fP-1)R}{S_aQ} \quad (3-3)$$

โดยที่

A/S = ค่าสัดส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณสารแขวนลอย (มิลลิลิตรอากาศต่อมิลลิกรัมสารแขวนลอย)

s_a = ปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ (มิลลิลิตรต่อลิตร)

S_a = ความเข้มข้นสารแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

f = ค่าประสิทธิภาพที่อากาศละลายสามารถในน้ำได้จริง

P = ค่าความดันอากาศ (atm)

R = ค่าอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (ลิตรต่อนาที)

Q = ค่าอัตราการไหลของน้ำเสีย (ลิตรต่อนาที)

3.5.5 การศึกษารูปแบบการไหลในถังปฏิกริยาด้วย Computational Fluid Dynamics (CFD)

- 1) สร้างภาพจำลอง 3 มิติ ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ด้วยโปรแกรม Ansys Workbench Designmodeler
- 2) สร้าง Mesh ภายในภาพจำลอง เพื่อแบ่งถังปฏิกริยาเป็นส่วนเล็กๆ หลายส่วน
- 3) เลือกแบบจำลองให้เหมาะสมกับลักษณะการไหลจริง เช่น Turbulence flow model และ/หรือ Multiphase flow model เป็นต้น
- 4) ใส่ข้อมูลสภาวะการเดินระบบ เช่น อัตราการไหล ตำแหน่งหัวจ่ายฟองอากาศ ขนาดของฟองอากาศ เป็นต้น
- 5) Simulate รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยา และวิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรม
- 6) เปรียบเทียบผล simulation จากโปรแกรมกับผลการศึกษาด้วยวิธี RTD



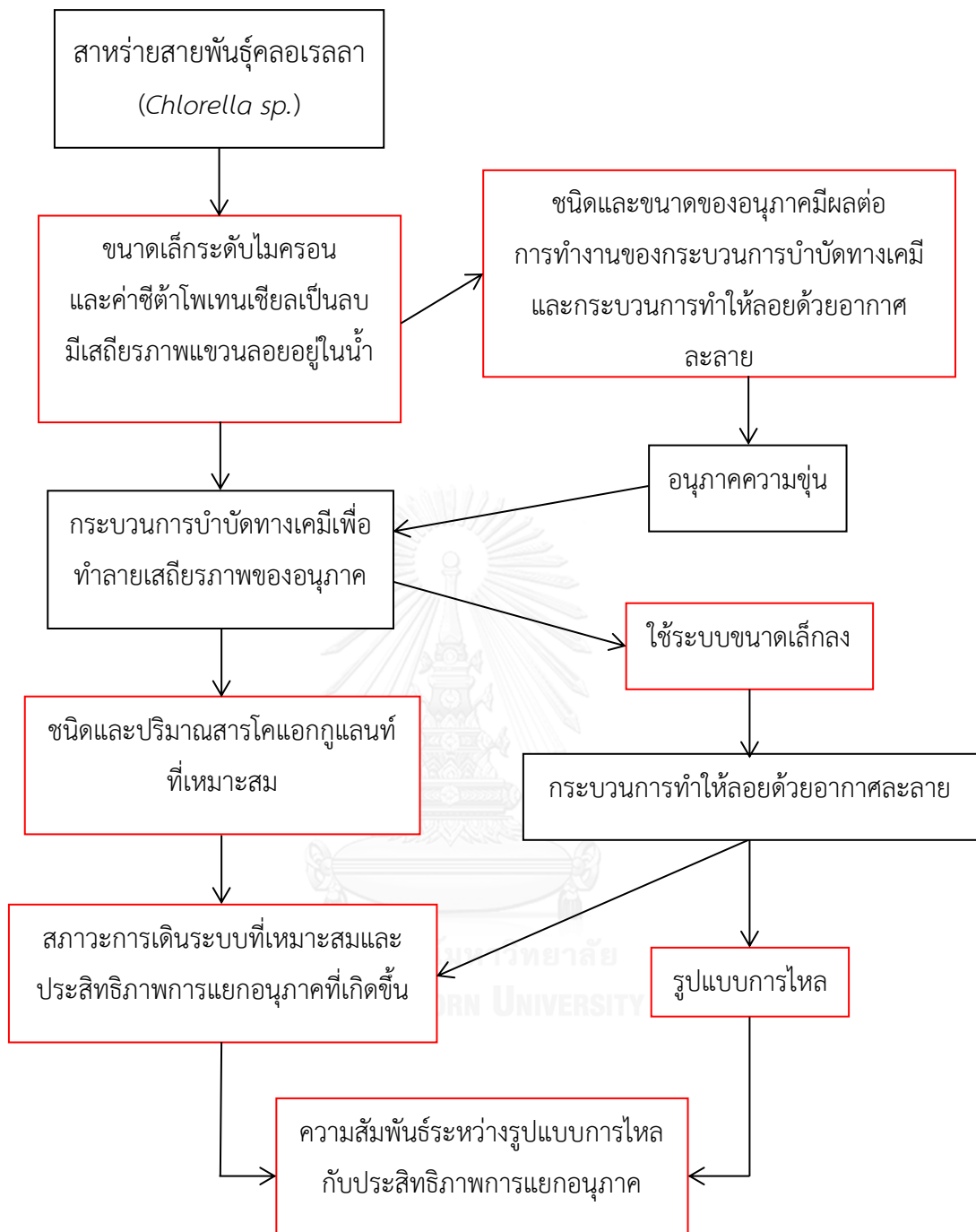
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

สาหร่ายแต่ละสายพันธุ์จะมีลักษณะที่แตกต่างกันตามชนิด และสภาวะรอบข้าง เช่น ขนาด ความหนาแน่นเซลล์ ค่าพีเอช และค่าซีต้าโพเทนเชียล ซึ่งเป็นปัจจัยในการเลือกกระบวนการสำหรับ บำบัดและแยกเซลล์สาหร่ายให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามเซลล์สาหร่ายส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำ ดังนั้นกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย (DAF) จึงเป็นที่นิยมในการใช้แยกสาหร่ายออกจากวัฏภาคน้ำ แต่ว่าสาหร่ายทุกสายพันธุ์มีค่าซีต้าโพเทนเชียลเป็นลบ ส่งผลให้กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพียงอย่างเดียวไม่สามารถแยกสาหร่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องมีการทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่ายก่อน โดยสาหร่ายคลอเรลลามีการเพาะเลี้ยงเพื่อนำไปใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย มีอัตราการเจริญเติบโตสูง และมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสาหร่ายสายพันธุ์อื่น ทำให้แยกออกจากน้ำได้ยาก เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย

กระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสามารถแยกอนุภาคที่มีเสถียรภาพและอนุภาคขนาดเล็กออกจากวัฏภาคของเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคคือรูปแบบการไหลของของเหลวภายในถังปฏิกรณ์และสภาวะในการดำเนินระบบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายและน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่น วิเคราะห์รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย รวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลกับประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน เพื่อหาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการร่วมระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และสามารถอธิบายประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่เกิดขึ้นด้วยรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์



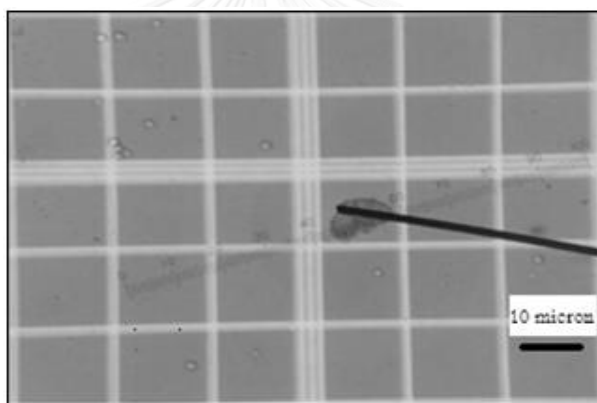
รูปที่ 4-1 แผนผังแสดงความเชื่อมโยงของผลการทดลองในงานวิจัยนี้

4.1 ผลการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์

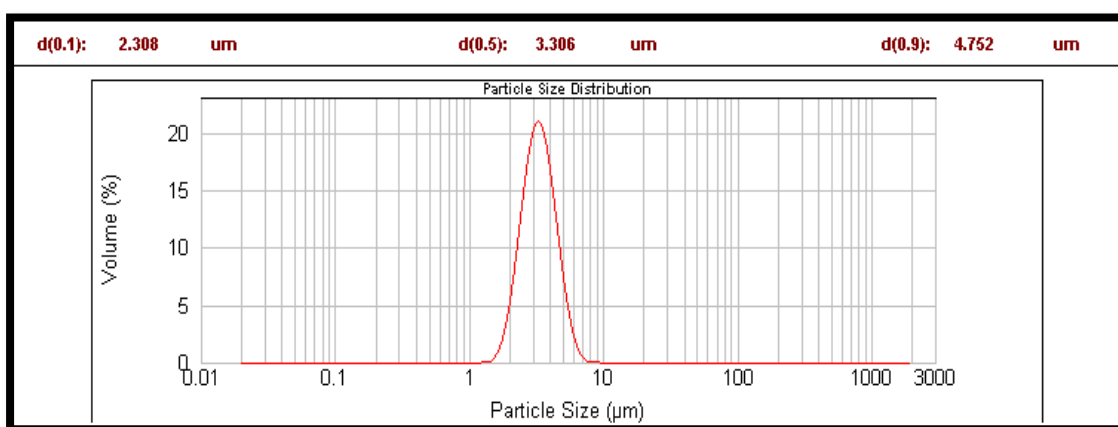
4.1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่าย

4.1.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เตรียมได้จากการผสมน้ำประปากับหัวเชื้อสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ในช่วงการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) ที่มีความเข้มข้นประมาณ 1×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร แล้วเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ จากผลการศึกษาด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและเครื่องวัดขนาดอนุภาคพบว่า เซลล์สาหร่ายคลอเรลลามีรูปร่างเป็นทรงกลมเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 4-2 และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d_{50}) 3.3 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-2 รูปร่างของเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา



รูปที่ 4-3 การกระจายตัวของขนาดเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

เซลล์สาหร่ายคลอเรลลามีค่าความหนาแน่น 1070 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของน้ำ อีกทั้งมีค่าซีตาโพเทนเชียล (Zeta Potential) อยู่ในช่วง -14.9 ถึง -19.8 มิลลิโวลต์ (Clasen et al., 2000) ทำให้เซลล์สาหร่ายสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างมีเสถียรภาพและไม่สามารถแยกออกได้ด้วยวิธีการตกตะกอนทางกายภาพ

4.1.1.2 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella* sp.)

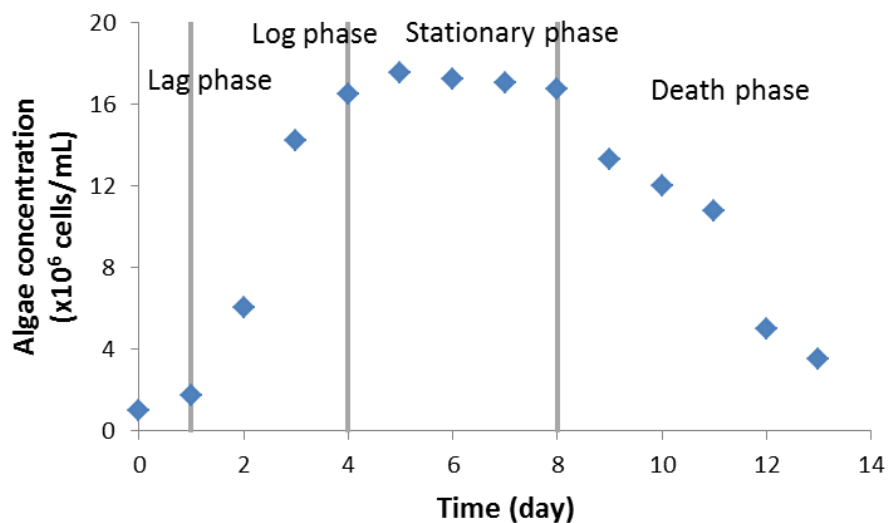
สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella* sp.) สามารถทำการเพาะเลี้ยงได้ด้วยอาหารสูตร N8 โดยให้แสงและอากาศตลอดเวลา จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์สาหร่ายในแต่ละวันพบว่า การเจริญเติบโตของสาหร่ายคลอเรลลาที่เลี้ยงด้วยสูตรอาหาร N8 สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงการเจริญเติบโต ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4-4 คือ

ช่วงที่ 1 ระยะเวลา 0-1 วัน เป็นระยะเวลาการปรับตัว (Lag phase) ของเซลล์สาหร่ายให้เข้ากับสภาพแวดล้อม ในช่วงนี้เซลล์สาหร่ายจะมีการเจริญเติบโตน้อย

ช่วงที่ 2 ระยะเวลา 2-4 วัน เป็นระยะการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) เซลล์สาหร่ายจะมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากมีสารอาหารให้สาหร่ายนำมาใช้ในการสร้างเซลล์อย่างไม่จำกัด

ช่วงที่ 3 ระยะเวลา 5-8 วัน เป็นช่วงการเจริญเติบโตแบบคงที่ (Stationary phase) ในช่วงนี้เซลล์สาหร่ายจะมีความเข้มข้นสูงที่สุดประมาณ 1.7×10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ซึ่งเซลล์สาหร่ายจะแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างมีเสถียรภาพ และช่วงการเจริญเติบโตแบบถดถอย (Decline phase)

ช่วงที่ 4 ระยะเวลาตั้งแต่ 9 วันขึ้นไป สารอาหารที่เซลล์สาหร่ายใช้ในการสร้างเซลล์มีไม่เพียงพอ ทำให้จำนวนเซลล์สาหร่ายลดลงเรื่อยๆ



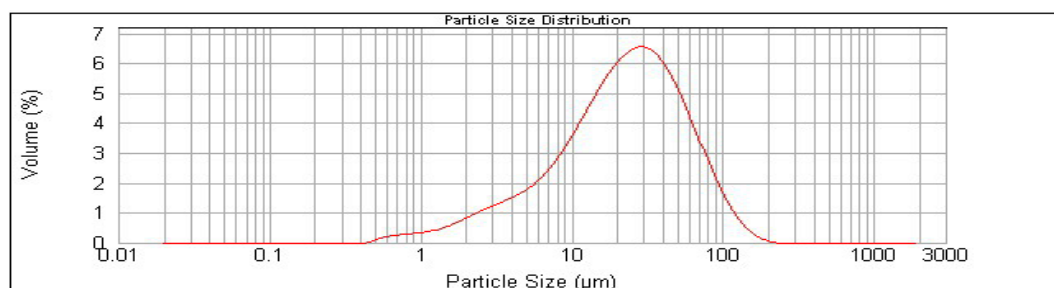
รูปที่ 4-4 การเจริญเติบโตของสาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*)

ในงานวิจัยนี้ เซลล์สาหร่ายสายพันธุ์คลอเรลลา (*Chlorella sp.*) ในช่วงการเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ (Log phase) ถูกนำมาใช้ศึกษาประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย เนื่องจากในช่วงการเจริญเติบโตนี้ เซลล์สาหร่ายมีค่าซีต้าโพเทนเชียลเป็นลบ (Clasen et al., 2000) และขนาดของเซลล์สาหร่ายที่ทำการวัดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคมีค่าเฉลี่ยที่ 3.3 ไมครอน ทำให้เซลล์สาหร่ายแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างมีเสถียรภาพและยากต่อการแยกออกจากน้ำด้วยกระบวนการทางกายภาพ (Henderson et al., 2008)

4.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่น

งานวิจัยนี้เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่นจากการผสมอนุภาคเบนโทไนท์กับน้ำประปาให้มีความขุ่นประมาณ 50 NTU ซึ่งมีค่าความขุ่นใกล้เคียงกับน้ำดิบจากคลองประปาฝั่งตะวันออกที่โรงงานผลิตน้ำสามเสนใช้ผลิตน้ำประปา (พลอยไพลิน ร่มโพธิ์ภักดิ์, 2556) โดยที่ไม่มีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเบนโทไนท์ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) พบว่าขนาดของอนุภาคเบนโทไนท์มีลักษณะการกระจายตัว

แบบเบ้ซ้าย ดังแสดงในรูปที่ 4-5 โดยอนุภาคเบนโทไนท์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) ประมาณ 23 ไมครอน



รูปที่ 4-5 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเบนโทไนท์ จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)

พื้นผิวด้านนอกของอนุภาคเบนโทไนท์มีประจุลบและทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างประจุ (Baik et al., 2010) โดยมีค่าซีต้าโพเทนเชียลประมาณ -34 (Vane et al., 1997) นอกจากนี้ หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลในโครงสร้างของอนุภาคเบนโทไนท์บางส่วนจะมีโมเลกุลของน้ำเกาะอยู่โดยรอบ ส่งผลให้อนุภาคเบนโทไนท์ถูกขวางและไม่สามารถเข้าใกล้กันได้โดยตรง (Means et al., 1963) ดังนั้น เบนโทไนท์จึงมีเสถียรภาพสูงและสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนเช่นเดียวกับสารร่ายคลอเรลลา

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเซลล์สาหร่ายคลอเรลลาและอนุภาคเบนโทไนท์ พบว่า อนุภาคทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า 1 มิลลิเมตร และมีค่าซีต้าโพเทนเชียลเป็นลบ ทำให้กระบวนการแยกทางกายภาพไม่สามารถแยกอนุภาคทั้งสองชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการบำบัดทางเคมีจึงมีความสำคัญในการทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่ายและอนุภาคเบนโทไนท์ก่อนทำการแยกอนุภาคทั้งสองชนิดออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายต่อไป

กลไกการทำงานของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายอาศัยปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคกับฟองอากาศ ซึ่งชนิดและขนาดของอนุภาคที่ต่างกันมีผลต่อการชนกันและติดกันระหว่างอนุภาคกับฟองอากาศ รวมถึงความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคกับฟองอากาศที่รวมกันขึ้นกับ

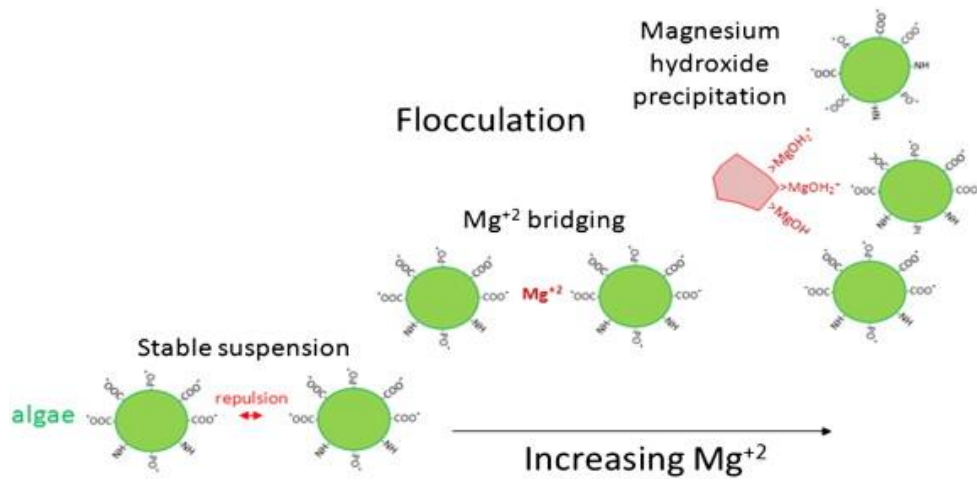
ความหนาแน่นและขนาด (Edzwald, 2010) นอกจากนี้ค่าซีต้าโพเทนเชียลของอนุภาคที่ต่างกัน ยังส่งผลต่อชนิดและปริมาณของสารเคมีที่เลือกใช้ในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษากการแยกเซลล์สำหรับโคลอเรลลาและอนุภาคความขุ่นซึ่งมีขนาดและค่าซีต้าโพเทนเชียลแตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในการแยกอนุภาคทั้งสองชนิด

4.2 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทางเคมี

เนื่องด้วยเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นอยู่รวมกับน้ำในลักษณะคอลลอยด์ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างมีเสถียรภาพและไม่ตกตะกอนในระยะเวลาอันสั้น ทำให้กระบวนการแยกทางกายภาพทั่วไปไม่สามารถแยกอนุภาคเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการเติมสารเคมีทั้งในลักษณะของการปรับค่าพีเอช (pH) และในลักษณะของสารโคแอกกูแลนต์เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาค โดยมีจุดมุ่งหมายให้อนุภาครวมตัวกันและสามารถใช้วิธีการกายภาพในการแยกอนุภาคเหล่านี้ออกจากน้ำได้

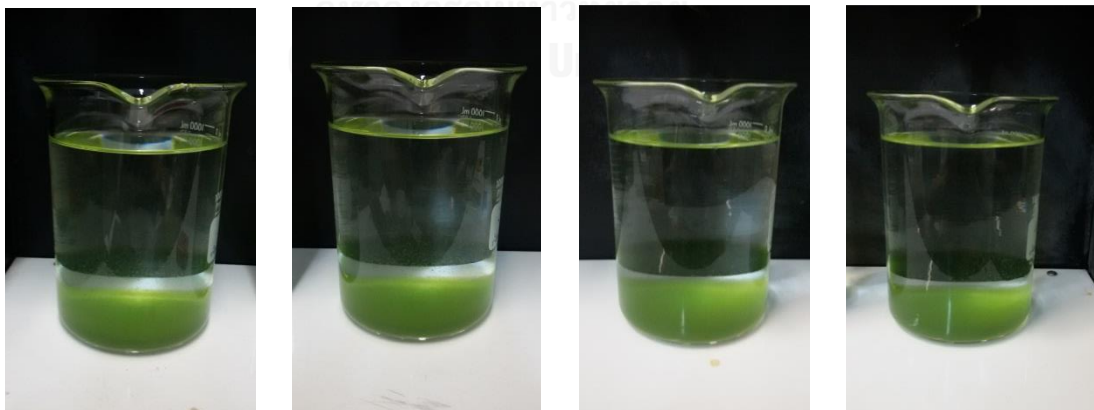
4.2.1 ผลการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยการปรับค่าพีเอช

การศึกษาความเป็นไปได้ในการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้สูงขึ้น ใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงความสามารถของการละลายของโลหะไอออน เมื่อค่าพีเอชเปลี่ยน โดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ตะกอนของเกลือแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เกิดขึ้นในระบบจะส่งผลให้เกิดกระบวนการออตโฟลลอคคูเลชัน (Autoflocculation) ดังแสดงในรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 ไดอะแกรมแสดงกลไกการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการออตโฟลลอคคูเลชัน (Brady et al., 2014)

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนของค่าพีเอชในช่วงตั้งแต่ 10 ขึ้นไป ซึ่งเป็นช่วงค่าพีเอชที่เกิดการตกตะกอนของเกลือแคลเซียมและแมกนีเซียม (Besson et al., 2013) เพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ลักษณะน้ำเสียหลังการบำบัดและประสิทธิภาพการแยกโดยวิธีการปรับพีเอชได้แสดงไว้ในรูปที่ 4-7 และ 4-8 ตามลำดับ



ก

ข

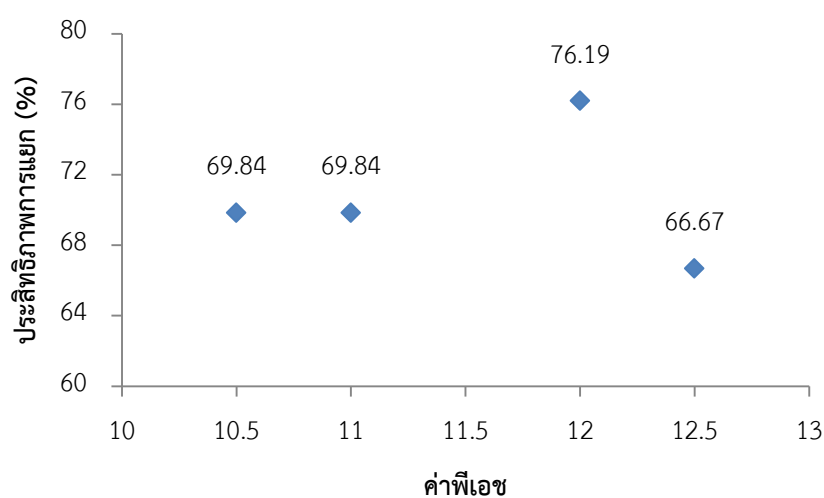
ค

ง

รูปที่ 4-7 รูปน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายหลังจากผ่านกระบวนการออตโฟลลอคคูเลชัน

(ก) พีเอช 10.5 (ข) พีเอช 11 (ค) พีเอช 12 (ง) พีเอช 13

จากรูป 4-7 ที่แสดงลักษณะภายนอกของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายหลังจากผ่านกระบวนการอโด้ฟลือคูล์เซชั่น พบว่า ความใสของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยเมื่อทำการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคออกจากน้ำจากวิธีการปรับค่าพีเอช พบว่า วิธีการนี้สามารถแยกเซลล์สาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวได้มากกว่าร้อยละ 66 โดยที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 12 จะมีประสิทธิภาพการแยกดีสุดที่ร้อยละ 76.2 ดังแสดงในรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-8 ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการอโด้ฟลือคูล์เซชั่นที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แตกต่างกัน

ตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบจากกระบวนการอโด้ฟลือคูล์เซชั่นประกอบด้วย ตะกอนของเกลือแคลเซียมในรูปแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) และตะกอนของเกลือแมกนีเซียมในรูปของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) (Besson et al., 2013) ซึ่งปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการมวลสารของแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออน ดังสมการที่ 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ

$$Ca_3(PO_4)_2 \text{ sludge} = (Ca^{2+}_i - Ca^{2+}_f) \times \frac{51.7}{50} \quad (4-1)$$

$$Mg(OH)_2 \text{ sludge} = (Mg^{2+}_i - Mg^{2+}_f) \times \frac{29.15}{50} \quad (4-2)$$

ทั้งนี้ ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการบำบัดฟล็อกคูเลชันในสภาวะที่มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 12 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-1 โดยทำการวัดปริมาณเซลล์สาหร่ายในเทอมของค่า Optical Density หรือค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 318 นาโนเมตร (OD_{318}) ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ใช้วัดปริมาณสารอินทรีย์ และมีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุด (Sanyano et al., 2013) พบว่า ค่า OD_{318} ลดลง แสดงถึงปริมาณเซลล์สาหร่ายในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงจากกระบวนการบำบัดฟล็อกคูเลชัน ปริมาณแคลเซียมอ็อกไซด์และแมกนีเซียมอ็อกไซด์ในระบบลดลง เนื่องด้วยอ็อกไซด์ทั้งสองชนิดเกิดการตกตะกอนจากการปรับค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นตะกอนของเกลือแคลเซียม โดยมีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบทั้งหมด 38.39 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลลักษณะน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังกระบวนการบำบัดฟล็อกคูเลชันที่สภาวะที่เหมาะสม

Parameter	Initial condition	Final condition
OD_{318}	0.063	0.015
pH	7.99	12
Ca^{2+} (mg/L as $CaCO_3$)	116	80
Mg^{2+} (mg/L as $CaCO_3$)	32	28
Sludge (mg/L)		38.39

น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดฟล็อกคูเลชันมีค่าพีเอชสูงเกินไปที่จะปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ ต้องทำการปรับลดค่าพีเอชของน้ำเสียก่อน ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีมาก นอกจากนี้การประยุกต์ใช้กระบวนการบำบัดฟล็อกคูเลชันจริง ในระบบที่มีการไหลของน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous flow process) ทำได้ยาก เพราะน้ำเสียจริงมีค่าพีเอชไม่คงที่ ทำให้ควบคุมปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้ได้ค่าที่ต้องการได้ยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้

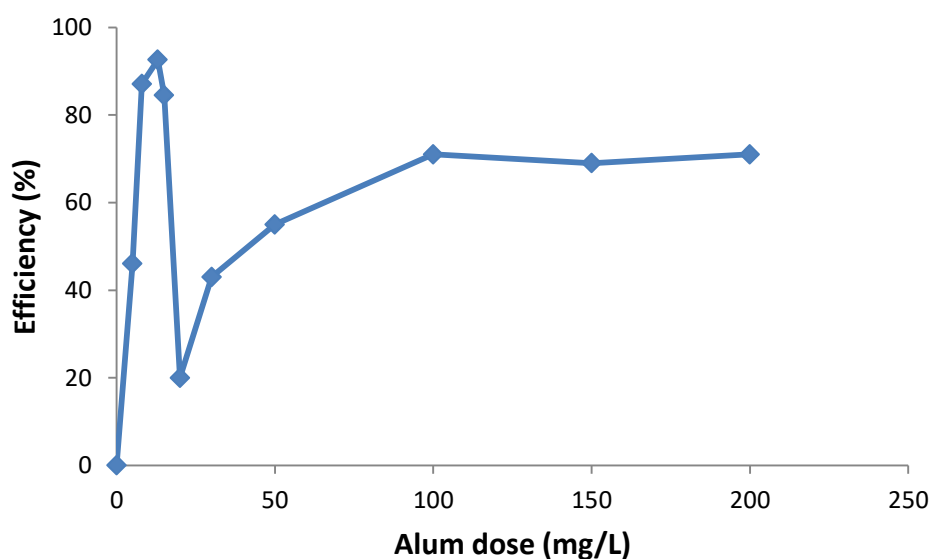
ทำการศึกษาการแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้แยกอนุภาคที่มีเสถียรภาพโดยทั่วไปและแพร่หลาย

4.2.2 ผลการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การศึกษาการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อทำการทดลองหาชนิดของสารโคแอกกูแลนต์และความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการแยกสาหร่ายด้วยวิธีจาร์เทส โดยสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ สารส้มหรืออลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

4.2.2.1 สารโคแอกกูเลชันที่ใช้คืออลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)

ช่วงความเข้มข้นของสารส้มที่ศึกษาในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 0 – 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 4-9 และประสิทธิภาพการแยกสาหร่ายออกจากวัฏภาคน้ำที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-10

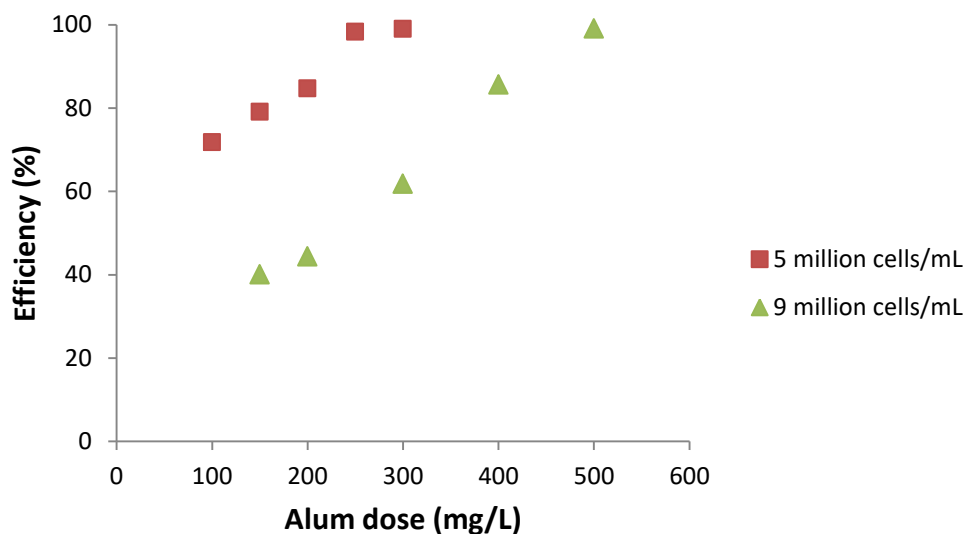


รูปที่ 4-9 ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ปริมาณสารส้มแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-9 แสดงประสิทธิภาพการแยกเซลล์สำหรับความเข้มข้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ปริมาณสารส้มแตกต่างกัน พบว่า การเติมสารส้มความเข้มข้น 0-13 มิลลิกรัมต่อลิตร กลไกการทำลายเสถียรภาพที่เกิดขึ้นเป็นแบบการดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) ซึ่งประสิทธิภาพการแยกเซลล์สำหรับจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารส้ม โดยปริมาตรสารส้มที่เหมาะสมคือ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ประสิทธิภาพ 87.1 %

ความเข้มข้นของสารส้มที่เติมลงไปในช่วง 13-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สำหรับจะลดลง เนื่องจากมีปริมาณอลูมิเนียมไอออนในน้ำเสียมากเกินไป จนทำให้ประจุของเซลล์สำหรับเปลี่ยนเป็นประจุตรงข้าม (Charge Reversal) และเซลล์สำหรับกลับมามีเสถียรภาพแขวนลอยในน้ำอีกครั้ง (Restabilization) แต่เมื่อเติมสารส้มความเข้มข้นสูงกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สำหรับจะเพิ่มขึ้นตามปริมาตรสารส้มที่เติมลงไป เพราะเกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบการใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) แทน โดยปริมาตรสารส้มที่เหมาะสมคือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ประสิทธิภาพ 71 %

เมื่อเปรียบกลไกการทำลายเสถียรภาพทั้ง 2 ประเภท ในการแยกเซลล์สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ออกจากวิฤภาคของเหลวนั้น กลไกที่เหมาะสมคือ การดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization) ซึ่งมีความต้องการปริมาณสารส้มที่น้อยกว่า แต่มีประสิทธิภาพการแยกดีกว่า



รูปที่ 4-10 ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สำหรับความเข้มข้น 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ปริมาณสารส้มแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-10 แสดงประสิทธิภาพการแยกเซลล์สำหรับความเข้มข้น 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ปริมาณสารส้มแตกต่างกัน พบว่า สารส้มที่เติมลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์จะแตกตัวเป็นสารประกอบ Hydroxo complex ของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และซัลเฟตไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำลายความเป็นต่างในน้ำ และตกผลึกในรูปอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำให้เซลล์สำหรับสูญเสียเสถียรภาพ และตกตะกอนแยกออกจากวัฏภาคของเหลว ด้วยกลไกการใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) กลไกทำลายเสถียรภาพแบบนี้ ค่าซีต้าโพเทนเชียลของเซลล์สำหรับจะไม่เป็นศูนย์ (Henderson et al., 2010) ความเป็นต่างที่ถูกใช้ไปและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการสตอยชิโอเมตริก ดังสมการที่ 4-3 ซึ่งรายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ฉ



ความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์สำหรับมีผลต่อปริมาณสารส้มที่ต้องใช้ในการทำลายเสถียรภาพ ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์สำหรับสูง ปริมาณสารส้มที่ต้องการจะสูงตามไปด้วย

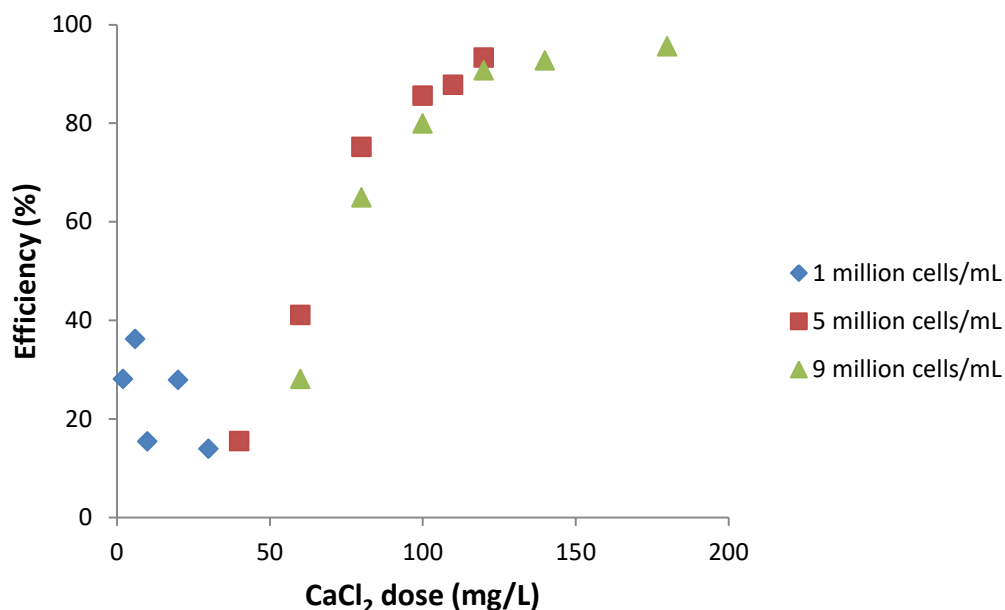
ทั้งนี้ ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมในการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลว ปริมาณความเป็นต่างที่ความต้องการและปริมาณตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 , 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ที่ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม แสดงในตารางที่ 4-2 โดยจะเห็นได้ว่า ปริมาณความเป็นต่างที่ความต้องการนั้นอาจมีค่าสูงถึง 150 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสาหร่าย 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ดังนั้น การแยกสาหร่ายโดยวิธีการโคแอกกูเลชันจึงควรต้องตรวจสอบความเป็นต่างของน้ำดิบก่อนทำการบำบัดด้วยวิธีการนี้

ตารางที่ 4-2 ปริมาณความเป็นต่างที่ความต้องการและตะกอนที่เกิดขึ้น ในการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันที่ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม

Algae concentration (cells/mL)	Alum dose (mg/L)	Alkalinity consumed (mg/L as CaCO ₃)	Al(OH) ₃ sludge (mg/L)	Efficiency (%)
1×10^6	8	4	2.08	87.1
5×10^6	50	22.52	11.71	68.8
9×10^6	300	135.12	70.26	61.8

4.2.2.2 สารโคแอกกูเลชันที่ใช้คือแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂)

การเติมสารแคลเซียมคลอไรด์ในรูปแบบของสารโคแอกกูแลนต์ในงานวิจัยนี้ มีขอบเขตอยู่ในช่วง 0-200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยจากการศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสาหร่ายเช่นเดียวกับสารส้มพบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสาหร่าย 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร นั้น การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคลอไรด์จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการแยกสาหร่ายเพิ่มขึ้น โดยสามารถเพิ่มขึ้นได้สูงถึง 93.3 และ 95.6 % สำหรับความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-11 ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สำหรับความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ปริมาณสารแคลเซียมคลอไรด์แตกต่างกัน

นอกจากนี้ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์สำหรับ 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการแยกสูงสุดสามารถทำได้เท่าเพียงร้อยละ 36.2 ที่ความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ 6 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการทำลายเสถียรภาพด้วยแคลเซียมคลอไรด์เป็นกลไกแบบการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) เพื่อให้เซลล์สำหรับมีศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวเป็นกลางมากขึ้น แต่เนื่องจากจำนวนเซลล์สำหรับที่เป็นเป้าสัมผัสมีน้อยเกินไป โอกาสที่เซลล์สำหรับจะรวมตัวกันใหญ่ขึ้นจึงมีน้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกค่อนข้างต่ำ แต่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์สำหรับ 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร การเติมสารแคลเซียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายเสถียรภาพของเซลล์สำหรับ เนื่องจากมีจำนวนเซลล์สำหรับที่เป็นเป้าสัมผัสมาก โดยปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการแยกเซลล์สำหรับออกจากวัฏภาคของเหลว คือ 80 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับความเข้มข้นสำหรับ 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

ทั้งนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกเซลล์สาหร่ายระหว่างของสารโคแอกกูแลนต์ทั้งสองชนิด จะพบว่า สารส้มมีประสิทธิภาพในการแยกเซลล์สาหร่ายได้ดีในทุกความเข้มข้น ในขณะที่แคลเซียมคลอไรด์สามารถบำบัดได้ดีเฉพาะที่ความเข้มข้นสาหร่ายเริ่มต้น 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารส้มที่ต้องการในการทำลายเสถียรภาพสาหร่ายนั้นมากกว่าการใช้แคลเซียมคลอไรด์ ดังนั้น ปริมาณความเป็นด่างที่ต้องการและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบจะมากตามไปด้วย ทั้งนี้ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการบำบัดของสารส้มและแคลเซียมคลอไรด์สำหรับสาหร่ายคลอเรลลาความเข้มข้น 1×10^6 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร สามารถสรุปรวมได้ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ประสิทธิภาพและปริมาณที่เหมาะสมในการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด

Algae concentration (cells/mL)	Alum		CaCl ₂	
	Optimum dose (mg/L)	Efficiency (%)	Optimum dose (mg/L)	Efficiency (%)
1×10^6	8	87.1	6	36.2
5×10^6	50	68.8	80	75.2
9×10^6	300	61.8	80	64.9

ในการแยกเซลล์สาหร่ายคลอเรลลาความเข้มข้นต่ำกว่า 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ควรเลือกใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ แต่ถ้าความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายคลอเรลลาสูงกว่า 5×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ควรเลือกใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ เพราะมีความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่น้อยกว่า

ชนิดของอนุภาค ขนาด และปริมาณอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ มีผลต่อชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่ต้องการ ดังนั้นการทดลองต่อไปจึงทำการศึกษาการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งมีขนาดและค่าซีดีไอโพนเทียลที่แตกต่างกันจากเซลล์สาหร่ายคลอเรลลา

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม และกลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคที่เกิดขึ้น

4.2.3 ผลการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

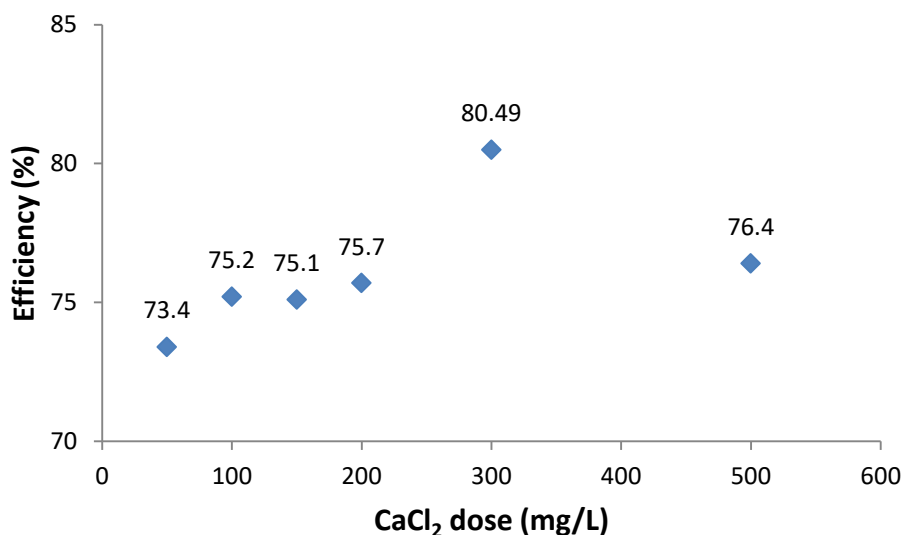
การศึกษาการแยกอนุภาคความขุ่นออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้มหรืออลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) เฟอร์ริคคลอไรด์ (FeCl_3) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นสารโคแอกกูแลนต์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและหาปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม ด้วยการทำการทดสอบในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่อนุภาคความขุ่นความเข้มข้นเริ่มต้น 50 NTU ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4-12 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ปริมาณสารส้มและเฟอร์ริคคลอไรด์แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-12 แสดงประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ปริมาณสารส้มและเฟอร์ริคคลอไรด์แตกต่างกัน พบว่า สารส้มและเฟอร์ริคคลอไรด์มีความสามารถในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นได้เป็นอย่างดี โดยที่การเติมสารส้มและเฟอร์ริคคลอไรด์ ความเข้มข้น 15-40 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดอนุภาคความขุ่นได้มากกว่า 95% ซึ่งปริมาณของ

สารส้มและเพอริคคโลไรด์ที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคความขุ่นออกจากวัฏภาคของเหลวคือ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพการแยกเท่ากับ 95.29% และ 96.97% ตามลำดับ



รูปที่ 4-13 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ปริมาณสารแคลเซียมคลอไรด์แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-13 แสดงประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ปริมาณสารแคลเซียมคลอไรด์แตกต่างกัน พบว่าการเติมสารแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 50-500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นได้เป็นอย่างดี ซึ่งปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคความขุ่นออกจากวัฏภาคของเหลวคือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพการแยกเท่ากับ 73.4%

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคความขุ่นของสารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิด ได้แก่ สารส้ม เพอริคคโลไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ พบว่า สารส้มและเพอริคคโลไรด์มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคความขุ่นดีกว่าแคลเซียมคลอไรด์ และมีความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่น้อยกว่าแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจากอนุภาคความขุ่นที่เป็นเป่าส้มฝัสมิ่จำนวนมาก ทำให้สารส้มและเพอริคคโลไรด์ที่มีกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบการใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) มีความต้องการปริมาณสาร

โคแอกกูแลนท์ที่น้อยกว่าแคลเซียมคลอไรด์ที่มีกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) ทั้งนี้ ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมและประสิทธิภาพที่บำบัดได้ สามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ประสิทธิภาพและปริมาณที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคความขุ่นออกจากวัฏภาคของเหลวของสารโคแอกกูแลนท์แต่ละชนิด

Coagulant	Optimum dose (mg/L)	Efficiency (%)
Alum	15	95.29
FeCl ₃	15	96.97
CaCl ₂	50	73.4

เมื่อเปรียบเทียบผลการแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูแลชั่น พบว่า การแยกเซลล์สาหร่ายต้องการปริมาณสารส้มมากกว่าการแยกอนุภาคความขุ่น เนื่องจากเซลล์สาหร่ายมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคความขุ่นและปริมาณอนุภาคที่เป็นเป้าสัมผัสมีน้อยกว่า ทำให้ต้องการปริมาณสารส้มเพื่อสร้างเป้าสัมผัสให้ฟล็อกรวมตัวกันเป็นผลึกใหญ่ขึ้นและตกตะกอนแยกจากวัฏภาคของเหลวสูงกว่า ยกเว้นที่ความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร เพราะกลไกการทำลายเสถียรภาพที่เกิดขึ้นเป็นแบบกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ ทำให้ต้องการปริมาณสารส้มต่ำกว่าอนุภาคความขุ่น

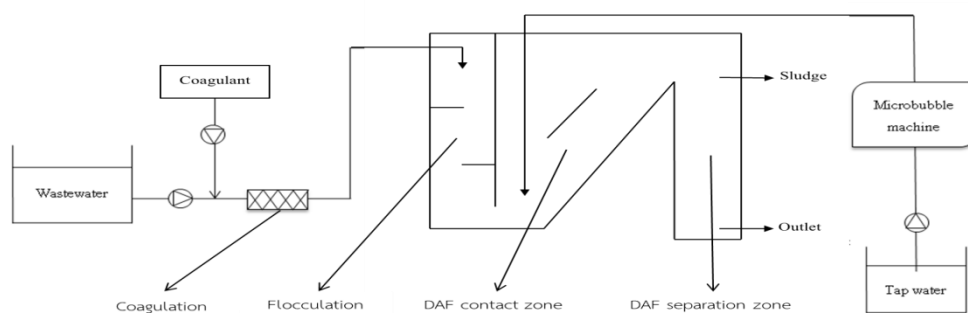
สรุปสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมในการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร คือ สารส้ม แต่ที่ความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 5×10^6 และ 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร สารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมคือแคลเซียมคลอไรด์ ส่วนการแยกอนุภาคความขุ่นความเข้มข้นเริ่มต้น 50 NTU สารส้มและเพอริคคลอไรด์มีปริมาณความต้องการเท่ากัน โดยที่การเติมเพอริคคลอไรด์จะได้ประสิทธิภาพการแยกดีกว่าการเติมสารส้มเล็กน้อย แต่เลือกใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ เพราะปริมาณความต้องการของสารส้มในหน่วยโมลาร์ต่อความขุ่นต่ำกว่าปริมาณความต้องการของเพอริค

คลอไรด์ ทำให้ค่าพีเอชและค่าความความเป็นต่างของน้ำเสียลดลงน้อยกว่า รายละเอียดการคำนวณ ดังแสดงในภาคผนวก ฉ รวมถึงฟล็อกจากสารส้มมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม ดีกว่าฟล็อกจากเฟอร์ริกคลอไรด์ นอกจากนี้สารส้มยังหาได้ง่าย มีราคาถูกและไม่หลงเหลือความเป็นพิษอยู่ในน้ำ (พลอยไพลิน ร่มโพธิ์ภักดิ์, 2556)

การเติมสารโคแอกกูแลนท์เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยการทำจาร์เทสสามารถแยก อนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวได้เป็นอย่างดี แต่เนื่องจากการทำจาร์เทสประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน และการตกตะกอน เสมือนมีถึงปฏิกิริยา 3 ถึง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจการใช้กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายในการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาค ของเหลว เพื่อลดขนาดของระบบให้เล็กลง โดยทำการศึกษาการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่น ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 NTU ซึ่งมีความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนท์น้อย

4.3 แนวทางการออกแบบถังปฏิกรณ์ (Reactor design concept)

ชุดอุปกรณ์การแยกสาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับ กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายประกอบด้วยท่อสำหรับกวนเร็ว (Inline static mixer) และ ถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนฟล็อกคูเลชันแบบแผ่นกั้น และส่วน ทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์ที่รวบรวมการกวนเร็ว การกวนช้า และการทำให้ลอย เข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-14 ชุดอุปกรณ์การแยกสาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

4.3.1 อุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ (Static mixer)

งานวิจัยนี้ใช้ Static mixer ที่ทำจากวัสดุ Stainless steel SUS304 Flange JIS 10K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ความยาว 210 มิลลิเมตร มีจำนวน 6 element ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมอุปกรณ์กวนเร็ว คือ ค่าความเร็วเกรเดียนท์ เวลาสัมผัส และ Camp number (Gxt) รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก จ

ตารางที่ 4-5 ค่าความเร็วเกรเดียนท์ เวลาสัมผัส และ Camp number ของ Static mixer ที่อัตราการไหลของของเหลวแตกต่างกัน

Q (lpm)	V (m/s)	G (s^{-1})	T (s)	Gxt
3	0.157	665.987	1.338	891
4	0.21	986.55	1	987
5	0.262	1342.803	0.802	1077
6	0.315	1727.633	0.667	1152
7	0.367	2162.666	0.572	1237
8	0.42	2633.789	0.5	1317
9	0.472	3121.415	0.445	1389
10	0.525	3662.004	0.4	1465

จากตารางที่ 4-5 แสดงค่าความเร็วเกรเดียนท์ เวลาสัมผัส และ Camp number ของ Static mixer ในช่วงอัตราการไหล 3-10 ลิตรต่อนาที พบว่า Static mixer มีประสิทธิภาพการทำงานดีในทุกสภาวะการเดินระบบ เพราะมีค่าความเร็วเกรเดียนท์สูงกว่า 300 ต่อวินาที และเวลาสัมผัส 1 วินาทีหรือน้อยกว่า เพื่อให้การผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำเสียเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและ

พร้อมกันทุกๆ จุด (มันสิ้น ตัณทุลเวศม์, 2538) และ Camp number ควรมีค่าระหว่าง 350-1700 (Kawamura, 2000)

4.3.2 ถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน (Hybrid Reactor)

ถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อยๆ คือ ส่วนกวนช้าแบบแผ่นกั้น ส่วนสัมผัสฟองอากาศน้ำไหลขึ้น ส่วนแยกน้ำกับอนุภาคโดยน้ำไหลลงด้านล่าง ส่วนอนุภาคลอยขึ้นด้านบน ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานของถังกวนช้าแบบแผ่นกั้นขึ้นอยู่กับค่าความเร็วเกรเดียนท์และเวลาสัมผัส ส่วนประสิทธิภาพการทำงานของถังทำให้ลอยด้วยอากาศละลายขึ้นอยู่กับเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคและอัตราการน้ำล้นผิวในส่วนแยก รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก จ

ตารางที่ 4-6 ค่าความเร็วเกรเดียนท์ เวลาสัมผัส และ Camp number ของส่วนกวนช้าแบบแผ่นกั้นที่อัตราการไหลของของเหลวแตกต่างกัน

Q (lpm)	V (m/s)	H _L (m)	G (s ⁻¹)	t (min)	Gxt
3	0.12	0.004694	5.79	25.5	8859
4	0.16	0.008346	8.915	19.125	10230
5	0.2	0.01304	12.459	15.3	11437
6	0.24	0.018778	16.378	12.75	12529
7	0.28	0.025558	20.638	10.929	13533
8	0.32	0.033382	25.215	9.563	14468
9	0.36	0.04225	30.088	8.5	15345
10	0.4	0.05216	35.24	7.65	16175

จากตารางที่ 4-6 แสดงค่าความเร็วเกรเดียนท์และเวลาสัมผัส ในช่วงอัตราการไหล 3-10 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ออกแบบที่กำหนดให้ความเร็วเกรเดียนท์ควรมีค่าระหว่าง 5-50 ต่อวินาที (Kawamura, 2000) เพื่อป้องกันไม่ให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแตกได้ และเวลาสัมผัสควรมีค่าระหว่าง 5-45 นาที (Fawcett, 1997) เพื่อให้มีเวลาเพียงพอที่ฟล็อกจะรวมตัวกันเป็นผลึกใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนแยกออกจากวัฏภาคของเหลวได้ แสดงว่าส่วนกวนช้าแบบแผ่นกั้นมีประสิทธิภาพการทำงานดีในทุกสภาวะการเดินระบบ

ตารางที่ 4-7 เวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศและอนุภาค (นาที่) ที่อัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของน้ำอัดความดันแตกต่างกัน

Q _L (lpm)	Q _{PW} (lpm)				
	1	2	3	4	5
3	40.31	32.25	26.88	23.04	20.16
4	32.25	26.88	23.04	20.16	17.92
5	26.88	23.04	20.16	17.92	16.13
6	23.04	20.16	17.92	16.13	14.66
7	20.16	17.92	16.13	14.66	13.44
8	17.92	16.13	14.66	13.44	12.4
9	16.13	14.66	13.44	12.4	11.52
10	14.66	13.44	12.4	11.52	10.75

จากตารางที่ 4-7 แสดงเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค ในช่วงอัตราการไหลของของเหลว 3-10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 1-5 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ออกแบบที่กำหนดให้เวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคควรมีค่ามากกว่า 1.5 นาที

(Fawcett, 1997) เพื่อการชนกันและติดกันของฟองอากาศกับอนุภาคจนวนุภาคที่รวมกับฟองอากาศ มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำเสียและสามารถลอยขึ้นไปสู่ผิวน้ำได้

ตารางที่ 4-8 อัตราน้ำล้นผิวในส่วนแยก (เมตรต่อชั่วโมง) ที่อัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของน้ำอัดความดันแตกต่างกัน

Q _L (lpm)	Q _{PW} (lpm)				
	1	2	3	4	5
3	3.84	4.65	5.42	6.16	6.87
4	6.57	7.37	8.15	8.89	9.6
5	9.19	9.99	10.77	11.51	12.22
6	11.7	12.51	13.29	14.03	14.74
7	14.11	14.92	15.7	16.44	17.15
8	16.43	17.23	18.01	18.75	19.46
9	18.65	19.46	20.24	20.98	21.69
10	20.78	21.59	22.37	23.11	23.82

จากตารางที่ 4-8 แสดงอัตราน้ำล้นผิวในส่วนแยก ในช่วงอัตราการไหลของของเหลว 3-10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 1-5 ลิตรต่อนาที ซึ่งอัตราการไหลของของเหลวไม่ควรเกิน 9 ลิตรต่อนาที เนื่องจากเกณฑ์ออกแบบกำหนดให้อัตราน้ำล้นผิวในส่วนแยกควรมีค่าน้อยกว่า 20 เมตรต่อชั่วโมง (Fawcett, 1997)

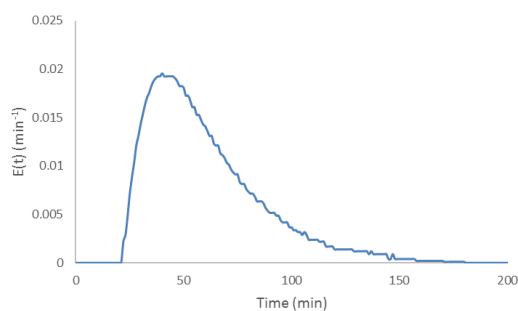
จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของน้ำอัดความดันมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบในส่วนต่างๆ ทั้งกระบวนการโคแอกกูเลชัน กระบวนการ

ฟล็อกคูลेशन และกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ซึ่งอัตราการไหลที่แตกต่างกันยังส่งผลต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาด้วย ดังนั้นการทดลองในส่วนต่อไปจึงทำการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ผลของอัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่มีต่อรูปแบบการไหล รวมถึงอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ชนิดของหัวกระจายอากาศ และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก จากการประยุกต์ใช้กระบวนการทำให้ลอยด้วยการเป่าฟองอากาศ (Induced Air Flotation: IAF) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เติมอากาศให้กับน้ำเสียที่ความดันบรรยากาศ จากการทำงานของเครื่องปั่นกววน หรือการพ่นฟองอากาศโดยตรงจากหัวเติมอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกวนผสมและแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลว และลดระยะเวลาการทำงานของระบบ (Le et al., 2013)

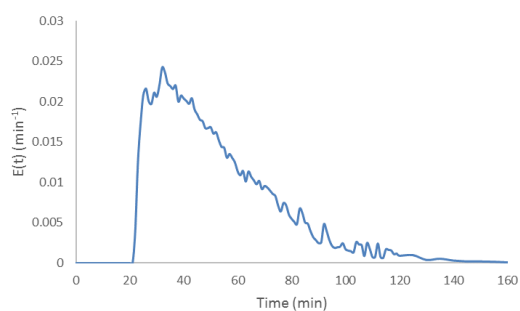
4.4 ผลการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาด้วยทฤษฎีการกระจายตัวของเวลากัก (Residence time distribution)

การศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาด้วยวิธี Pulse input experimental method โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นสารชี้วัด (Tracer) ทำการวัดค่าความนำไฟฟ้าที่ทางน้ำออกจากถังปฏิกริยาที่เวลาต่างๆ เพื่อสร้างกราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve) และหาแบบจำลองทางทฤษฎีที่เหมาะสมในการอธิบายรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยา ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

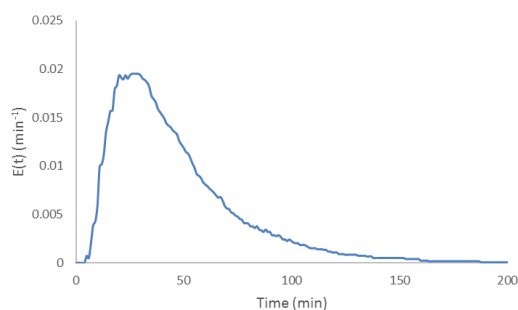
การเลือกแบบจำลองทางทฤษฎีที่นำมาใช้วิเคราะห์และอธิบายรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยามีความสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของกราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve) ซึ่งผลการทดลองหากราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4-10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0-4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0-10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทรายและหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0-2.5 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-15



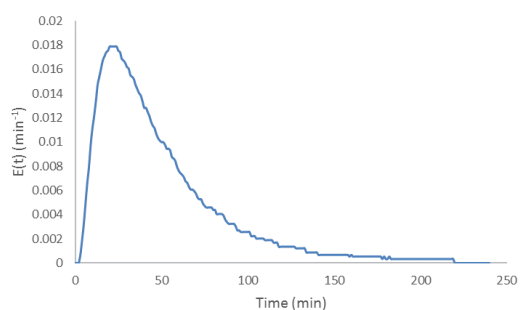
$Q_L = 6.4 \text{ lpm}$, $Q_{PW} = 0 \text{ lpm}$, $Q_{g,1} = 0 \text{ lpm}$,
 $D_1 = \text{Sand}$, $Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm}$



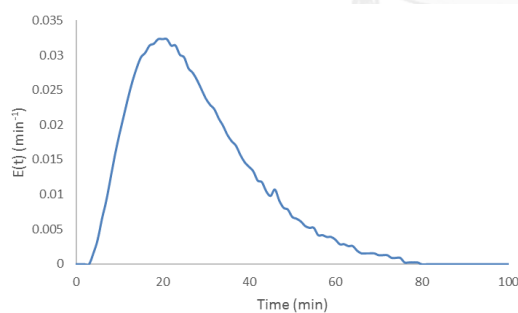
$Q_L = 6.4 \text{ lpm}$, $Q_{PW} = 0 \text{ lpm}$, $Q_{g,1} = 0 \text{ lpm}$,
 $D_1 = \text{Ceramic}$, $Q_{g,2} = 0 \text{ lpm}$



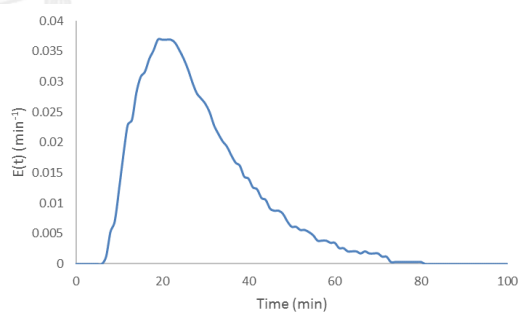
$Q_L = 6.4 \text{ lpm}$, $Q_{PW} = 0 \text{ lpm}$, $Q_{g,1} = 10 \text{ lpm}$,
 $D_1 = \text{Sand}$, $Q_{g,2} = 0 \text{ lpm}$



$Q_L = 6.4 \text{ lpm}$, $Q_{PW} = 0 \text{ lpm}$, $Q_{g,1} = 10 \text{ lpm}$,
 $D_1 = \text{Ceramic}$, $Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm}$

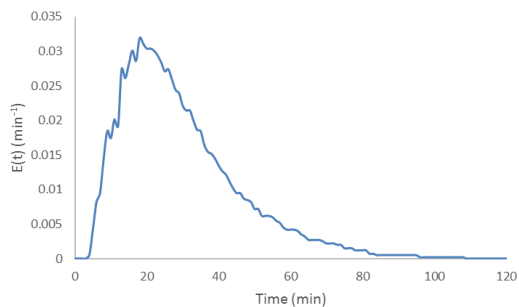
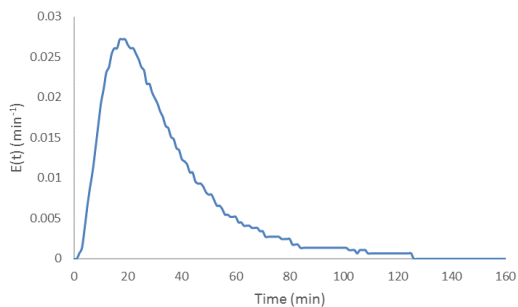


$Q_L = 6.4 \text{ lpm}$, $Q_{PW} = 4 \text{ lpm}$, $Q_{g,1} = 0 \text{ lpm}$,
 $D_1 = \text{Ceramic}$, $Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm}$

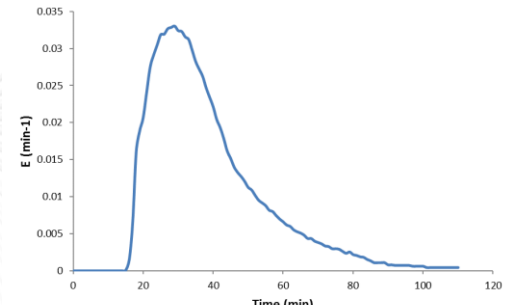
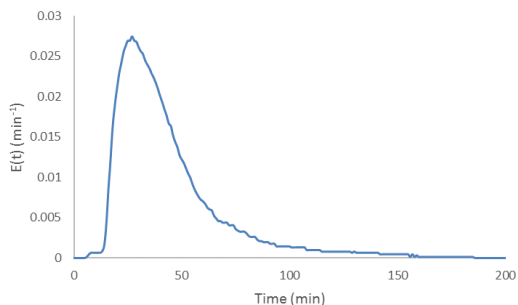


$Q_L = 6.4 \text{ lpm}$, $Q_{PW} = 4 \text{ lpm}$, $Q_{g,1} = 0 \text{ lpm}$,
 $D_1 = \text{Sand}$, $Q_{g,2} = 0 \text{ lpm}$

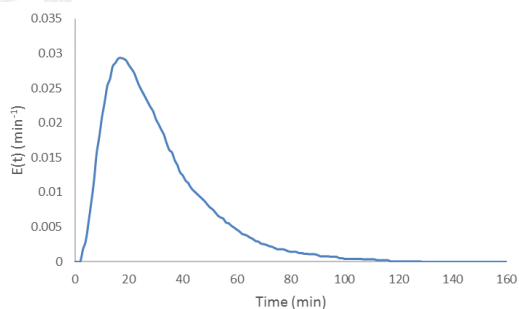
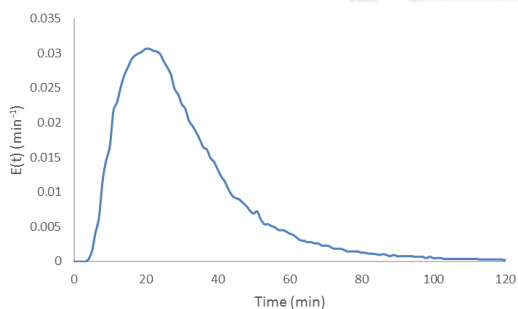
รูปที่ 4-15 กราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve) ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน
 ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ



$Q_L = 6.4 \text{ lpm}, Q_{PW} = 4 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 10 \text{ lpm}, \quad Q_L = 6.4 \text{ lpm}, Q_{PW} = 4 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 10 \text{ lpm},$
 $D_1 = \text{Sand}, Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm} \quad \quad \quad D_1 = \text{Ceramic}, Q_{g,2} = 0 \text{ lpm}$

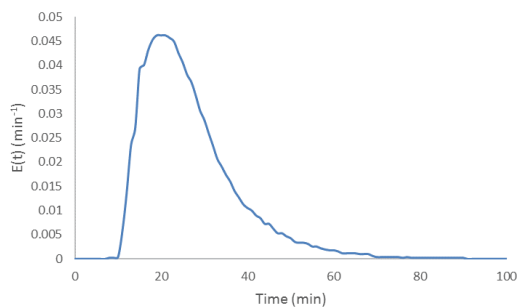
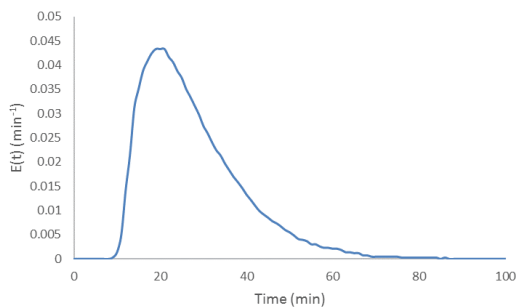


$Q_L = 10 \text{ lpm}, Q_{PW} = 0 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 0 \text{ lpm}, \quad Q_L = 10 \text{ lpm}, Q_{PW} = 0 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 0 \text{ lpm},$
 $D_1 = \text{Ceramic}, Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm} \quad \quad \quad D_1 = \text{Sand}, Q_{g,2} = 0 \text{ lpm}$



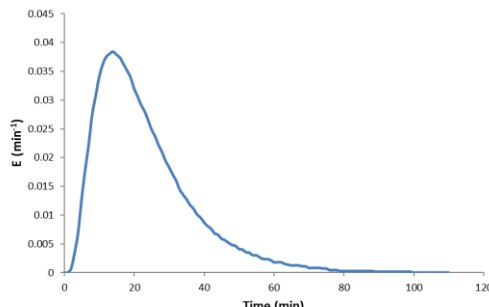
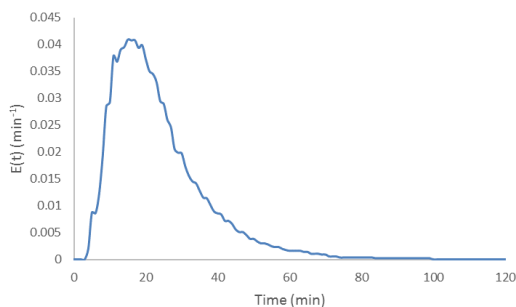
$Q_L = 10 \text{ lpm}, Q_{PW} = 0 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 10 \text{ lpm}, \quad Q_L = 10 \text{ lpm}, Q_{PW} = 0 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 10 \text{ lpm},$
 $D_1 = \text{Ceramic}, Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm} \quad \quad \quad D_1 = \text{Sand}, Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm}$

รูปที่ 4-15 กราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve) ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน
 ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ (ต่อ)



$Q_L = 10 \text{ lpm}, Q_{PW} = 4 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 0 \text{ lpm},$
 $D_1 = \text{Sand}, Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm}$

$Q_L = 10 \text{ lpm}, Q_{PW} = 4 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 0 \text{ lpm},$
 $D_1 = \text{Ceramic}, Q_{g,2} = 0 \text{ lpm}$



$Q_L = 10 \text{ lpm}, Q_{PW} = 4 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 10 \text{ lpm},$
 $D_1 = \text{Sand}, Q_{g,2} = 0 \text{ lpm}$

$Q_L = 10 \text{ lpm}, Q_{PW} = 4 \text{ lpm}, Q_{g,1} = 10 \text{ lpm},$
 $D_1 = \text{Ceramic}, Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm}$

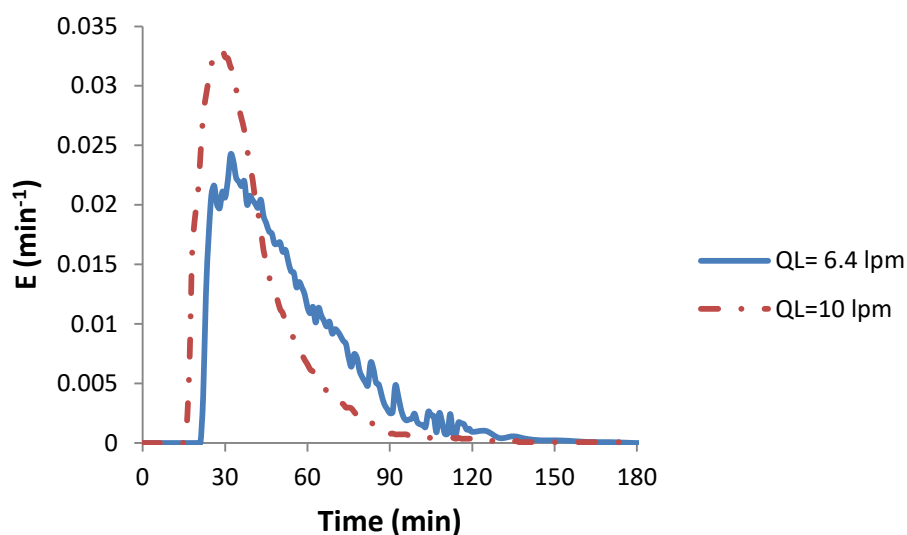
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4-15 กราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve) ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ (ต่อ)

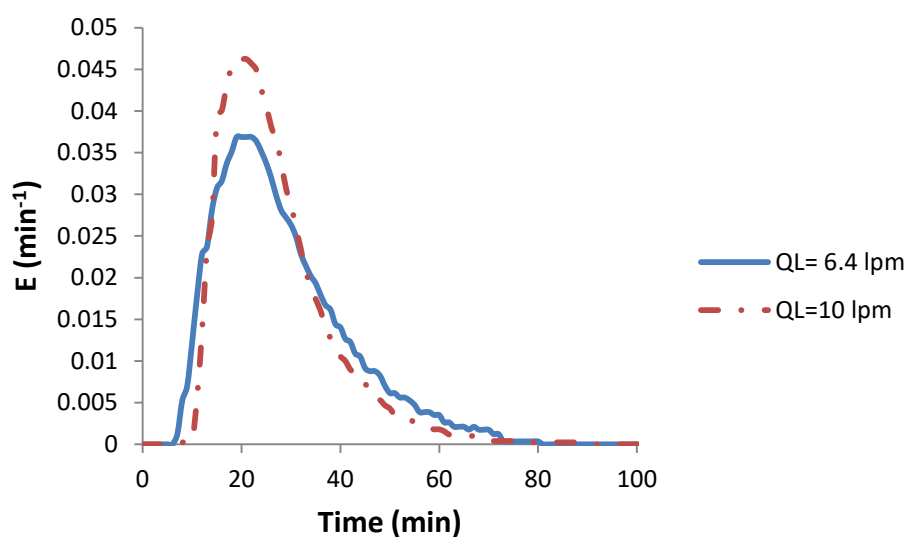
จากรูปที่ 4-15 แสดงกราฟฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลากัก (E curve) ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ พบว่า รูปแบบการไหลของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ในช่วงสภาวะการเดินระบบที่ทำการศึกษา มีลักษณะเป็นถังปฏิกรณ์แบบที่ผสมกับถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมสมบูรณ์ (Levenspiel, 1999) ซึ่งสอดคล้องกับกลไกของกระบวนการฟลื้อคูลชั้นแบบแผ่นกันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอย โดยสามารถอธิบายผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อรูปแบบการไหลดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลของอัตราการไหลของของเหลวที่มีต่อรูปแบบการไหล

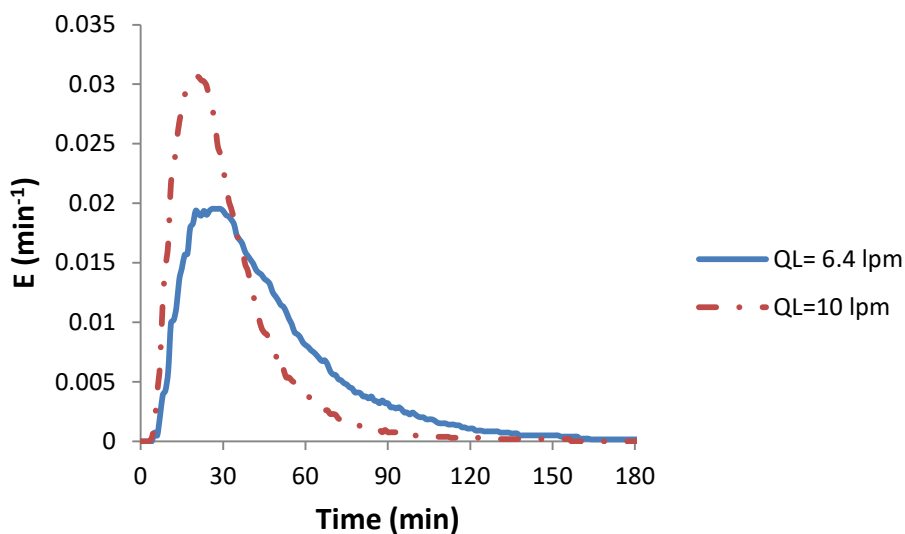
การศึกษาารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของของเหลวแตกต่างกัน ในสภาวะการเดินระบบต่างๆ มีผลการทดลองดังนี้



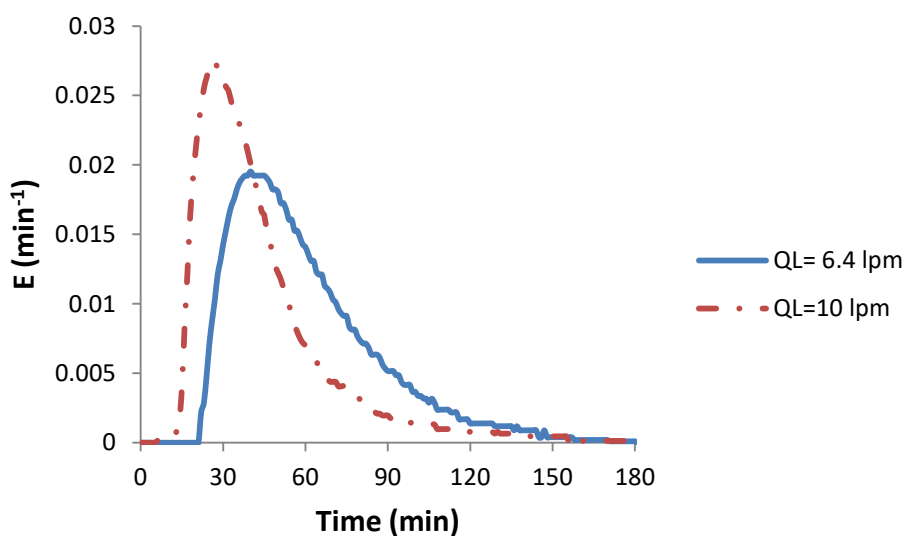
รูปที่ 4-16 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของของเหลว 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4-17 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของของเหลว 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4-18 กราฟ E curve ของถังปฏิบัติการแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของของเหลว 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที



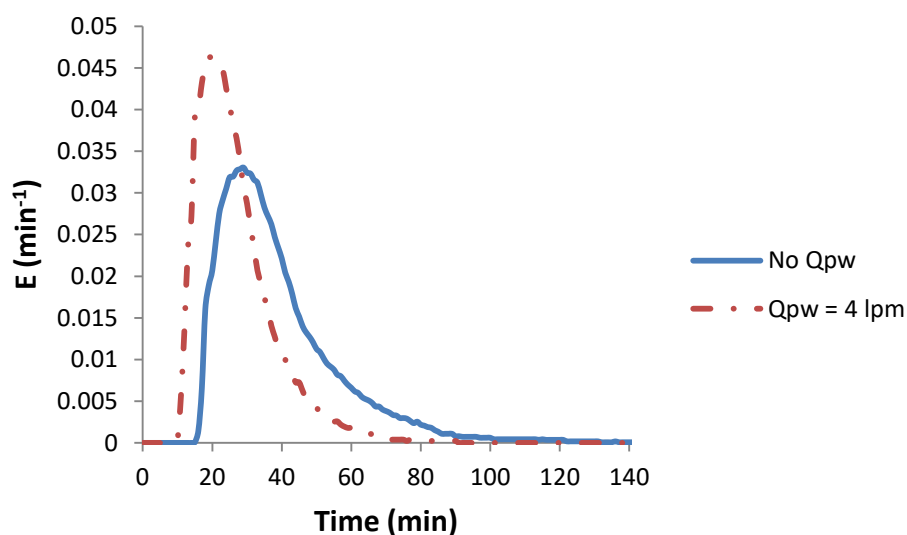
รูปที่ 4-19 กราฟ E curve ของถังปฏิบัติการแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของของเหลว 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที กับและอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-16 4-17 4-18 และ 4-19 แสดงกราฟ E curve ของถังปฏิบัติการแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของของเหลว 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที ในสภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน พบว่า อัตราการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้นทำให้การตรวจวัดสารชีวัดที่ทางออกใช้เวลาสั้นลงและจุดสูงสุด

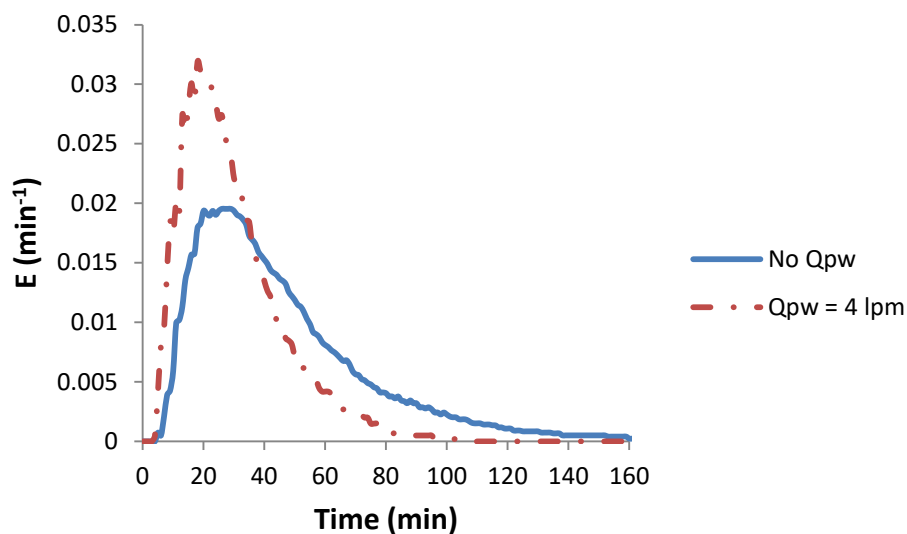
ของกราฟ E curve มีค่ามากขึ้น แสดงว่าอัตราการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ถึงปฏิกิริยาแบบผสมผสานมีปริมาตรส่วนที่มีลักษณะเป็นถึงปฏิกิริยาแบบท่อเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาตรส่วนที่มีลักษณะเป็นถึงปฏิกิริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ลดลง เนื่องจากความเร็วการไหลของของเหลวภายในถึงปฏิกิริยาจะแปรผันตามอัตราการไหลของของเหลว เมื่ออัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของของเหลวจะเคลื่อนที่ผ่านถึงปฏิกิริยาไปในแนวทิศทางการไหลได้เร็วกว่า และลดการแพร่ของอุณหภูมิของของเหลว

4.4.2 ผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่มีต่อรูปแบบการไหล

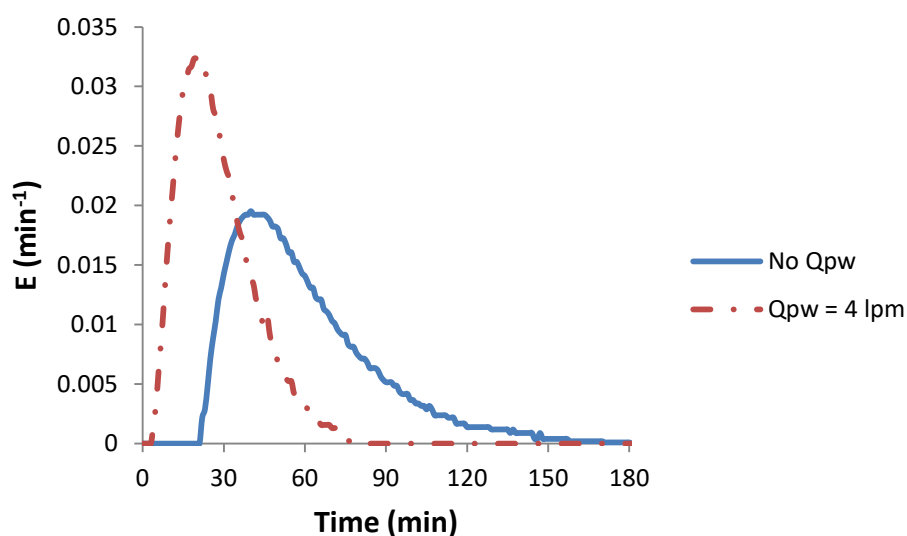
การศึกษารูปแบบการไหลของถึงปฏิกิริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดันแตกต่างกัน ในสภาวะการเดินระบบต่างๆ มีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4-20 กราฟ E curve ของถึงปฏิกิริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 0 และ 4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4-21 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 0 และ 4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 6.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที

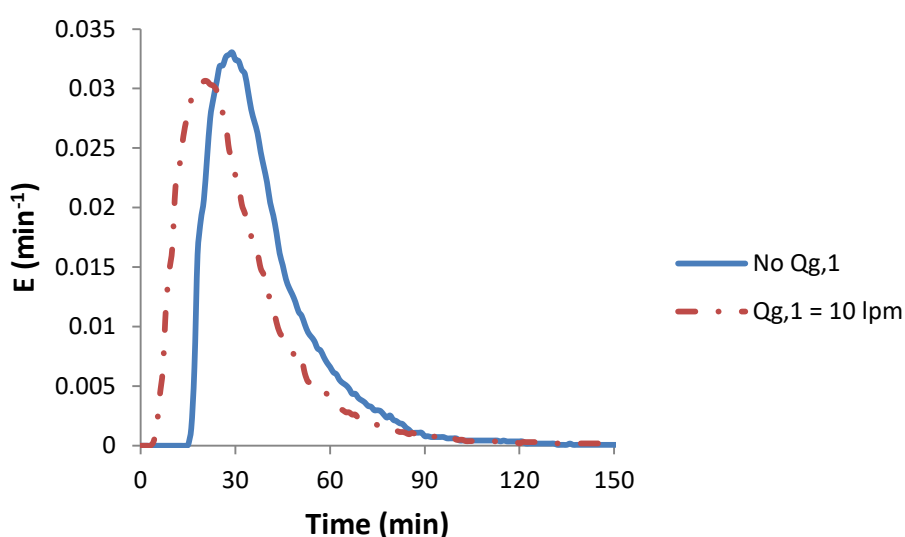


รูปที่ 4-22 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 0 และ 4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 6.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที

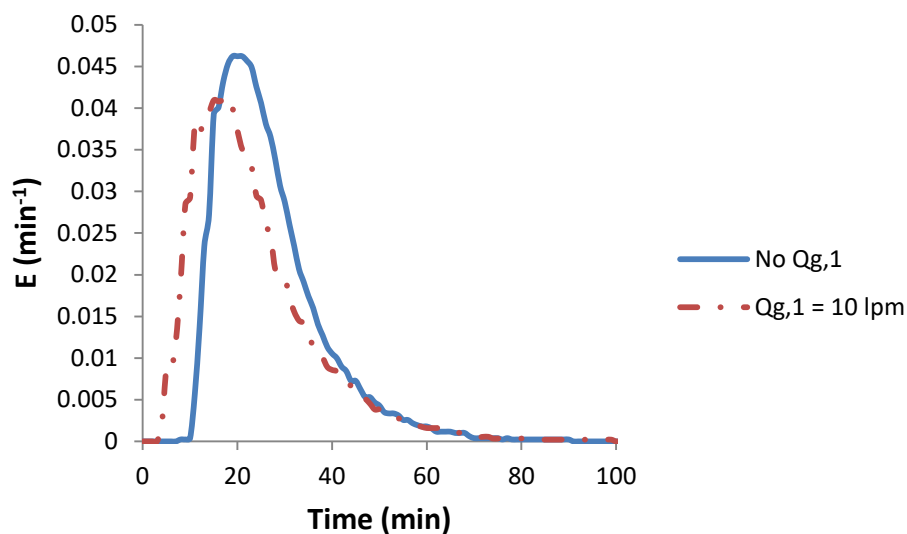
จากรูปที่ 4-20 4-21 และ 4-22 แสดงกราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 0 และ 4 ลิตรต่อนาที ในสภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน พบว่าการป้อนน้ำอัดความดันเข้าไปในถังปฏิกริยา ทำให้ลักษณะของกราฟ E curve มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายผลของอัตราการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำอัดความดันประกอบด้วย 2 วัฏภาค คือ วัฏภาคของเหลวและวัฏภาคอากาศ ในส่วนของวัฏภาคของเหลวจะทำให้ความเร็วการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้น อนุภาคของของเหลวจึงเคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางการไหลได้เร็วกว่า และลดการแพร่ของอนุภาคของของเหลว ในส่วนของวัฏภาคอากาศซึ่งมีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กมากทำให้เกิดการกวนผสมภายในถังปฏิกริยาเพียงเล็กน้อย แสดงว่าผลจากวัฏภาคน้ำมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานมากกว่าวัฏภาคอากาศ ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ถังปฏิกริยาแบบผสมผสานมีปริมาตรส่วนที่มีลักษณะเป็นถังปฏิกริยาแบบท่อเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาตรส่วนที่เป็นถังปฏิกริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์ลดลง

4.4.3 ผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสที่มีต่อรูปแบบการไหล

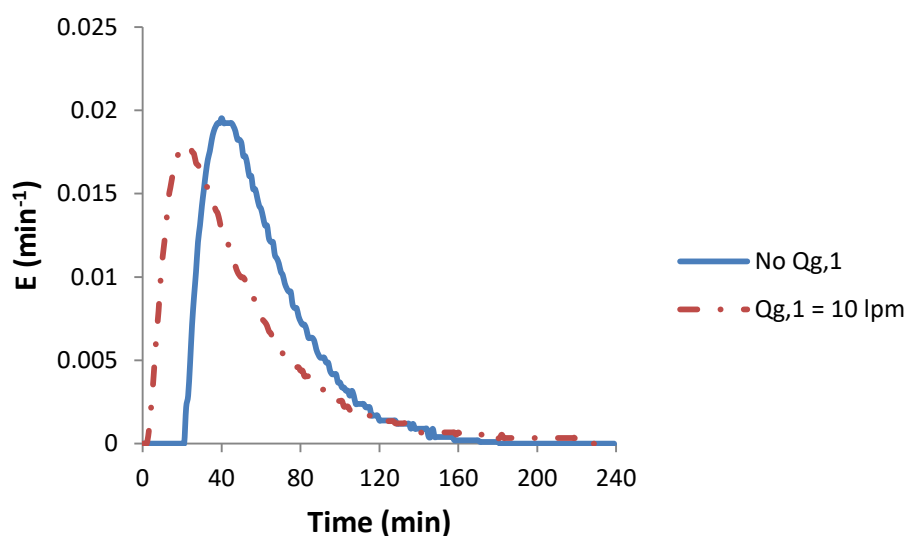
การศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสแตกต่างกัน ในสภาวะการเดินระบบต่างๆ มีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4-23 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 0 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4-24 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 0 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที

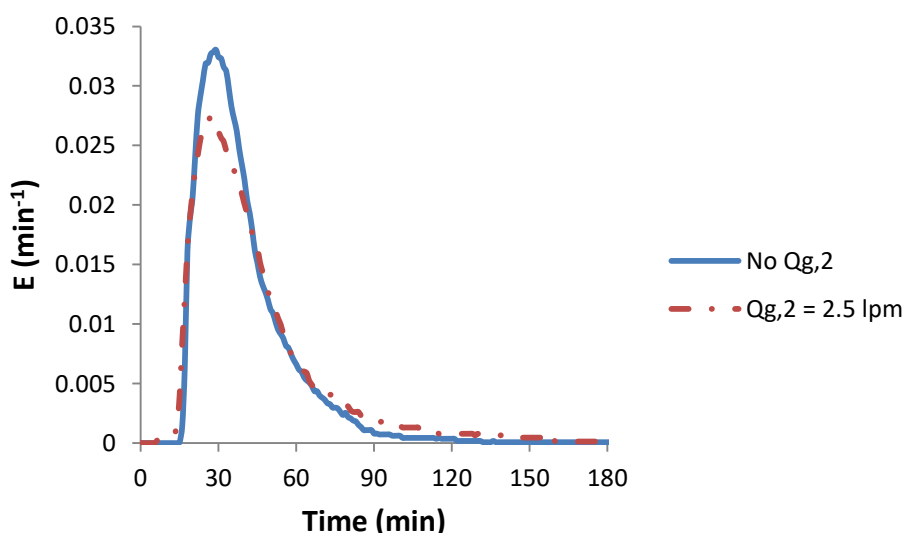


รูปที่ 4-25 กราฟ E curve ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 0 และ 10 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 6.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที

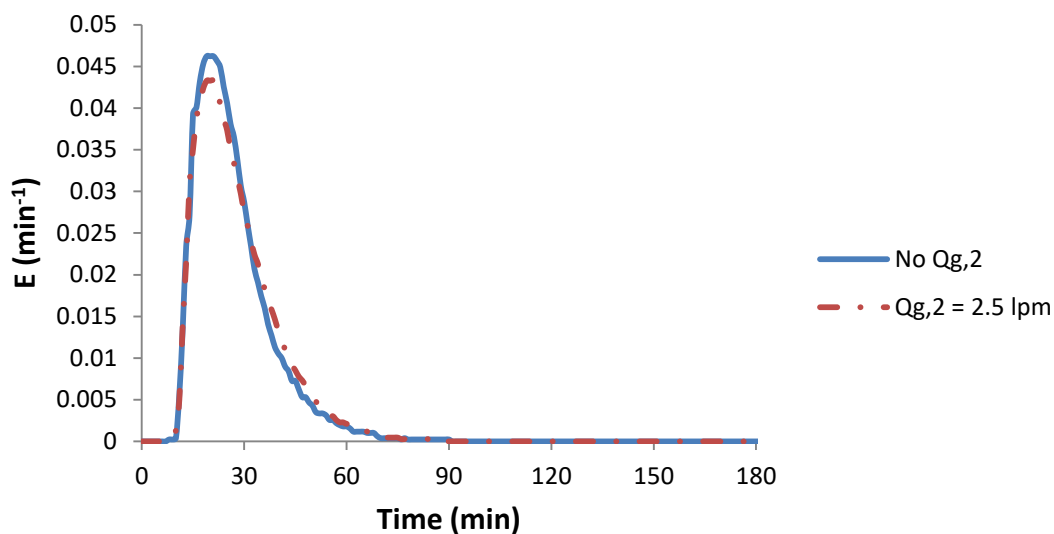
จากรูปที่ 4-23 4-24 และ 4-25 แสดงกราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 0 และ 10 ลิตรต่อนาที ในสภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน พบว่า การเป่าฟองอากาศเข้าไปที่ส่วนสัมผัสของถังปฏิกรณ์ ทำให้จุดสูงสุดของกราฟ E curve ที่มีค่าลดลง และระยะเวลาในการตรวจพบสารชี้วัดที่ทางออกของถังปฏิกรณ์น้อยลง เนื่องด้วยเกิดความปั่นป่วนขึ้นในระบบและทำให้เกิดการกวนผสมมากขึ้นจากฟองอากาศที่เป่าเข้าไป ระยะเวลาเฉลี่ยที่สารชี้วัดอยู่ภายในถังปฏิกรณ์น้อยลงและความเข้มข้นของสารชี้วัดที่ตรวจวัดได้ลดลง แสดงว่าอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานมีปริมาตรส่วนที่มีลักษณะเป็นถังปฏิกรณ์แบบท่อลดลง แต่ปริมาตรส่วนที่มีลักษณะเป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมสมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น สรุปคือถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานมีลักษณะเป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

4.4.4 ผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกที่มีต่อรูปแบบการไหล

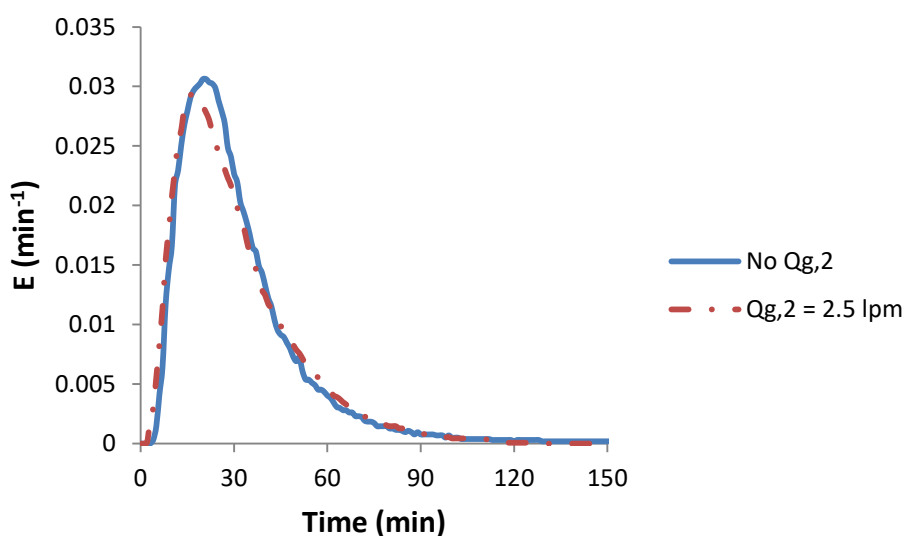
การศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกแตกต่างกัน ในสภาวะการเดินระบบต่างๆ มีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4-26 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 0 และ 2.5 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4-27 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 0 และ 2.5 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4-28 กราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 0 และ 2.5 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของของเหลว 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-26 4-27 และ 4-28 แสดงกราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 0 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ในสภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน

พบว่า การเป่าฟองอากาศเข้าไปที่ส่วนแยกของถังปฏิกริยา ทำให้ลักษณะของกราฟ E curve มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยที่จุดสูงสุดของกราฟ E curve มีค่าลดลง และระยะเวลาที่เกิดจุดสูงสุดของกราฟน้อยลง แสดงว่าถังปฏิกริยาแบบผสมผสานมีปริมาตรส่วนที่มีลักษณะเป็นถังปฏิกริยาแบบท่อลดลง แต่ปริมาตรส่วนที่มีลักษณะเป็นถังปฏิกริยาแบบกวนผสมสมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น

สรุปผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะกราฟ E curve (จุดสูงสุด: E_{max} และเวลาที่จุดสูงสุด: t_p ดังแสดงในภาคผนวก ข) และรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน จากมากไปน้อย คือ อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน อัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 สรุปผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน

ปัจจัย	ระดับของผลกระทบ (Impact level)	สาเหตุ
อัตราการไหลของของเหลว	(มาก)	อัตราการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้น อนุภาคของของเหลวจะเคลื่อนที่ผ่านถังปฏิกริยาไปในแนวทิศทางการไหลได้เร็วกว่า และเกิดการแพร่ย่อยลง ทำให้ค่า E_{max} เพิ่มขึ้น และเวลาที่จุด E_{max} (t_p) ลดลง
อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน	(มากที่สุด)	เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำอัดความดันมีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลเหมือนกับอัตราการไหลของของเหลว แต่สัดส่วนของอัตราการไหลของน้ำอัดความดันต่ออัตราการไหลของของเหลวมีค่าสูง ทำให้ปัจจัยนี้ส่งผลต่อรูปแบบการไหลมากกว่าผลของอัตราการไหลของของเหลว

ตารางที่ 4-9 สรุปผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิบัติการแบบผสมผสาน (ต่อ)

ปัจจัย	ระดับของผลกระทบ (Impact level)	สาเหตุ
อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส	(น้อย)	การเป่าอากาศเข้าไปในส่วนสัมผัสทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นในระบบและเกิดการกวนผสมมากขึ้น แต่ปริมาณของส่วนสัมผัสคิดเป็นสัดส่วนประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรทั้งหมด ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจึงไม่มาก เวลาพักภายในถังมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ปัจจัยนี้จึงส่งผลต่อรูปแบบการไหลน้อยกว่าอัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน
อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก	(น้อยสุด)	สัดส่วนปริมาตรของส่วนแยกต่อปริมาตรทั้งหมดน้อยกว่า 1 ใน 3 ทำให้การเป่าฟองอากาศเข้าไปส่วนแยกมีผลต่อรูปแบบการไหลค่อนข้างน้อย รวมถึงอัตราการไหลของอากาศที่เป่าเข้าไปมีค่าต่ำ ทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นภายในส่วนแยกเพียงเล็กน้อย ปัจจัยนี้จึงมีผลต่อรูปแบบการไหลน้อยที่สุด

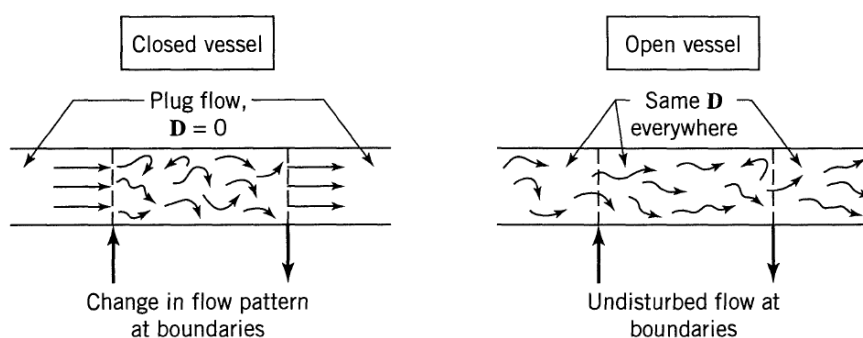
การวิเคราะห์รูปแบบการไหลของถังปฏิบัติการแบบผสมผสานที่เปลี่ยนแปลงไปเพราะปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาวะการเดินระบบ จากกราฟ E curve เป็นการวิเคราะห์ผลทางด้านกายภาพ ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้ ดังนั้นการนำแบบจำลองทางทฤษฎีมาใช้อธิบายรูปแบบการไหลของถังปฏิบัติการแบบผสมผสานที่เกิดขึ้นจะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น สามารถอธิบายผลของปัจจัยต่างๆ และความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลในเชิงสถิติได้ รวมถึงการสร้างสมการทำนายผลการทดลองด้วย

4.5 การอธิบายรูปแบบการไหลด้วยแบบจำลองทางทฤษฎี

การแพร่ (Dispersion) และการกวนผสม (Mixing) เป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบคอลัมน์ทำให้ลอย (Chegeni et al., 2015) ซึ่ง Dispersion model เป็นแบบจำลองทางทฤษฎีที่นิยมนำมาใช้อธิบายระดับของการกวนผสม (Degree of mixing) ที่เกิดขึ้นในส่วนสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคของคอลัมน์ทำให้ลอย (Mills et al., 1992) ในเทอมของค่า Dispersion number (d ; D/uL) ดังนั้น Dispersion model จึงเป็นแบบจำลองทางทฤษฎีที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้วิเคราะห์และอธิบายรูปแบบการไหลของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน

ค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์สามารถหาได้จากรูปร่างลักษณะของกราฟ E curve เวลาที่เฉลี่ย (t_m) และความแปรปรวน (σ^2) ของกราฟ E curve และขอบเขตของระบบ (Boundary condition) โดยเมื่อพิจารณากราฟ E curve ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-9 ซึ่งมีลักษณะไม่สมมาตรนั้น แสดงว่ารูปแบบการไหลของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานมีลักษณะเป็นถังปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการแพร่กระจายของสารมาก (Plug Flow with Large Extents of Dispersion)

ในส่วนของสภาวะขอบของระบบ (Boundary condition) ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานนั้น มีลักษณะเป็น Closed vessel เนื่องจากทางเข้าและทางออกของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานเป็นการไหลภายในเส้นท่อ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลที่สภาวะขอบของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4-29



รูปที่ 4-29 สภาวะขอบของระบบ (Boundary condition) ที่ใช้วิเคราะห์รูปแบบการไหลด้วย Dispersion model (Levenspiel, 1999)

ดังนั้น ค่า D/uL ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน สามารถคำนวณได้จากสมการของ Closed vessel ดังสมการที่ 4-3

$$\frac{\sigma^2}{t_m^2} = 2 \left(\frac{D}{uL} \right) - 2 \left(\frac{D}{uL} \right)^2 (1 - e^{-\frac{uL}{D}}) \quad (4-3)$$

ตารางที่ 4-10 ค่า Dispersion number (d ; D/uL) ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ

Run	Operating condition					D/uL
	Q_L (lpm)	Q_{PW} (lpm)	$Q_{g,1}$ (lpm)	D_1	$Q_{g,2}$ (lpm)	
1	6.4	0	0	Sand	2.5	0.110
2	6.4	0	0	Ceramic	0	0.117
3	6.4	0	10	Sand	0	0.294
4	6.4	0	10	Ceramic	2.5	0.523
5	6.4	4	0	Ceramic	2.5	0.147
6	6.4	4	0	Sand	0	0.122
7	6.4	4	10	Sand	2.5	0.334
8	6.4	4	10	Ceramic	0	0.197
9	10	0	0	Ceramic	2.5	0.220
10	10	0	0	Sand	0	0.152
11	10	0	10	Ceramic	0	0.297
12	10	0	10	Sand	2.5	0.264
13	10	4	0	Sand	2.5	0.098
14	10	4	0	Ceramic	0	0.098
15	10	4	10	Sand	0	0.198
16	10	4	10	Ceramic	2.5	0.241

จากตารางที่ 4-10 พบว่า ถังปฏิกริยาแบบผสมผสานมีลักษณะเป็นถังปฏิกริยาแบบท่อที่มีการแพร่กระจายของสารมาก (Plug Flow with Large Extents of Dispersion) โดยมีค่า D/uL ระหว่าง 0.098 ถึง 0.523 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาจากงานวิจัยของ Shawwa et al. (1998) ที่พบว่าค่า D/uL ในส่วนสัมผัสของคอลัมน์ DAF มีค่ามากกว่า 0.01 งานวิจัยของ Chegeni et al. (2015) พบว่าค่า D/uL ของคอลัมน์ทำให้ลอยมีค่าเท่ากับ 0.32 งานวิจัยของ Mills et al. (1992) พบว่าค่า D/uL ของคอลัมน์ทำให้ลอยมีค่าเท่ากับ 0.61 และงานวิจัยของ Xu et al. (1991) พบว่าค่า D/uL ของคอลัมน์ทำให้ลอยมีค่าระหว่าง 0.03 ถึง 0.58 ซึ่งผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

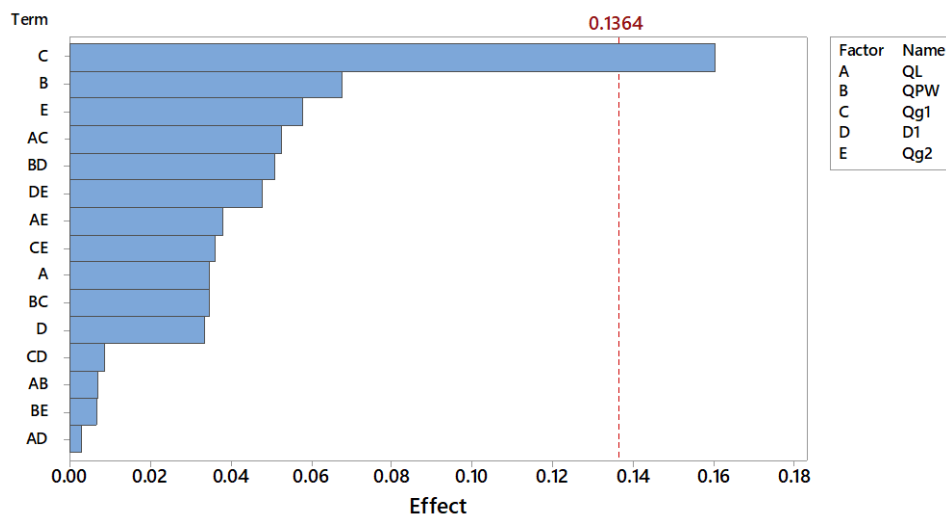
4.5.1 ผลการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยา

การวิเคราะห์รูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานด้วยแบบจำลองทางทฤษฎี Dispersion model พบว่า ถังปฏิกริยาแบบผสมผสานมีลักษณะเป็นถังปฏิกริยาแบบท่อที่มีการแพร่กระจายของสารมาก (Plug Flow with Large Extents of Dispersion) โดยมีค่า D/uL ระหว่าง 0.098 ถึง 0.523 ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่า D/uL ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของเหลว (Q_L) อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) ชนิดของหัวกระจายอากาศ (D_1) และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) แบบ Two level half fractional factorial design (2^{k-1}) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้ในการพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบทั้งหมดว่า ปัจจัยใดให้ผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบมากที่สุด เพื่อลดจำนวนชุดการทดลองและทรัพยากรที่ใช้ในการทดลองสรุปผล (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551) ในการออกแบบการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยในขั้นต้น ดังแสดงในตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ค่าของปัจจัยที่ทำการศึกษาในการคัดกรองปัจจัยด้วย DOE แบบ 2^{k-1}

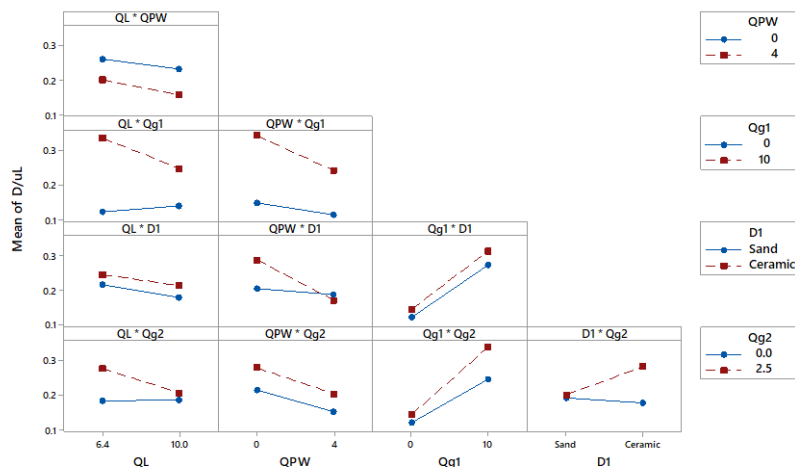
Factor	Low level	High level
Q_L (lpm)	6.4	10
Q_{PW} (lpm)	0	4
$Q_{g,1}$ (lpm)	0	10
D_1	Sand	Ceramic
$Q_{g,2}$ (lpm)	0	2.5

ผลของการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานในเทอมของตัวแปร D/uL พบว่า อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยยะสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากขนาดของผลจากอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสมีค่าเกิน 0.1364 ที่เป็นเส้นอ้างอิงแสดงระดับนัยยะสำคัญของปัจจัยต่อ ค่า D/uL ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนอัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน ชนิดของหัวกระจายอากาศ และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกไม่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยยะสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในรูปที่ 4-30



รูปที่ 4-30 Pareto chart แสดงผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่า D/uL

แต่จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางทฤษฎียังพบว่า อัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก มีผลกระทบร่วมกับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ต่อค่า D/uL ดังแสดงในรูปที่ 4-31



รูปที่ 4-31 ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ 2^{k-1}

ดังนั้นการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของถึงปฏิกิริยาแบบผสมผสานในขั้นต้นด้วยทฤษฎีการออกแบบการทดลองแบบ Two level half fractional factorial design (2^{k-1}) คัดปัจจัยชนิดของหัวกระจายอากาศทิ้ง เพราะเป็นปัจจัยที่ไม่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยยะสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และไม่มีผลกระทบร่วมกับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส (ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยยะสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) ต่อค่า D/uL ทำให้การวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลในเทอมของตัวแปร D/uL ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite design (CCD) จะทำการศึกษาเพียง 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส และ อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก

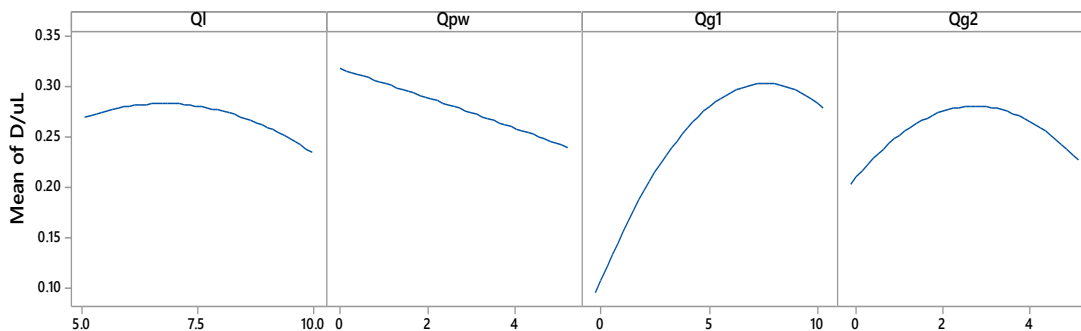
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน

จากผลการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน (ตามผลการทดลองที่ 4.4.2) ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานในเทอมของตัวแปร D/uL จะทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส และ อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ด้วยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite design (CCD) ซึ่งนิยมใช้กันมากในกรณีปัจจัยที่ต้องการศึกษามีจำนวนตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป มีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นมากที่สุดในการศึกษาทั้งสมการกำลังสองและสมการเชิงเส้น (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551) ดังแสดงในตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 ค่าของปัจจัยที่ทำการศึกษด้วย DOE แบบ CCD

Factor	-2	-1	0	+1	+2
Q_L (lpm)	5.2	6.4	7.6	8.8	10
Q_{PW} (lpm)	0	1.3	2.6	4	5.2
$Q_{g,1}$ (lpm)	0	2.5	5	7.5	10
$Q_{g,2}$ (lpm)	0	1.25	2.5	3.75	5

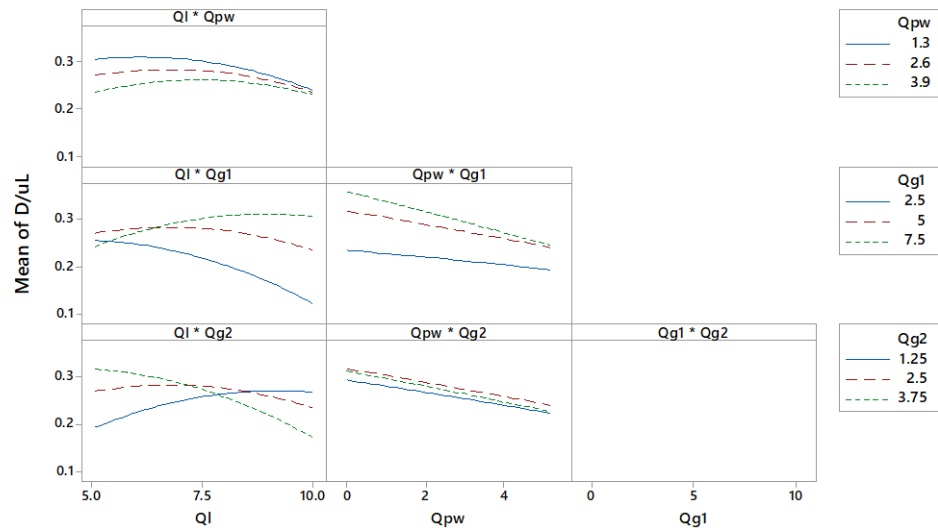
โดยผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหลจากการทดลองแบบ CCD ด้วยโปรแกรม Minitab สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-32 4-33 และ 4-34 ซึ่งแสดงผลกระทบของปัจจัยหลัก ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัย และกราฟ Contour plot ที่แสดงผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL ตามลำดับ



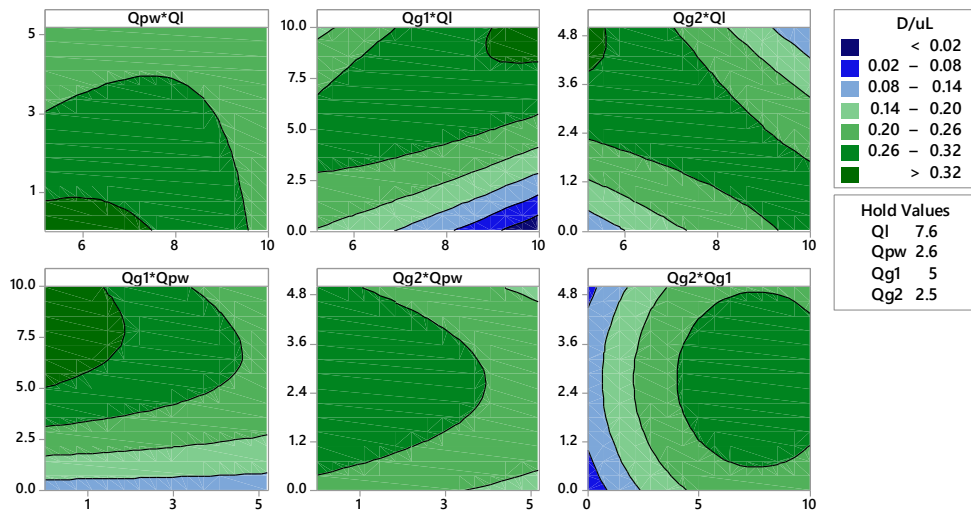
รูปที่ 4-32 ผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ CCD

จากรูปที่ 4-32 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีต่อค่า D/uL พบว่า อัตราการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า D/uL ลดลง เนื่องจากความเร็วการไหลในแนวแกน (u) ของน้ำภายในถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น อัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า D/uL ลดลง ด้วยสาเหตุเช่นเดียวกับผลจากอัตราการไหลของของเหลว คือส่งผลให้ความเร็วการไหลในแนวแกน (u) ของน้ำภายในถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งฟองอากาศที่มากับน้ำอัดความดันมีขนาดเล็กมากทำให้เกิดการกวนผสมเพียงเล็กน้อย ผลจากวัฏภาคน้ำจึงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า D/uL มากกว่าวัฏภาคอากาศ

ส่วนอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสและอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก มีผลต่อค่า D/uL ในรูปแบบสมการกำลังสอง โดยอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสและอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกที่เพิ่มขึ้นทำให้มีความปั่นป่วนภายในถังปฏิกิริยาและเกิดการกวนผสมมากขึ้น ค่า D/uL จึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก มีค่าสูงกว่า 7.5 ลิตรต่อนาที และ 2.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ กลับส่งผลให้ค่า D/uL ลดลง เนื่องจากวัฏภาคน้ำและวัฏภาคอากาศมีทิศทางการไหลที่ขนานกัน เมื่ออัตราการไหลของอากาศสูงเกินไปเสมือนทำให้ความเร็วการไหลในแนวแกนของน้ำ (u) เพิ่มขึ้น ค่า D/uL จึงลดลง



รูปที่ 4-33 ผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL ที่ศึกษาด้วย DOE แบบ CCD



รูปที่ 4-34 Contour plot แสดงผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL

จากรูปที่ 4-33 และ 4-34 แสดงผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยที่มีต่อค่า D/uL พบว่าผลกระทบร่วมของอัตราการไหลของของเหลวกับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส อัตราการไหลของน้ำอัดความดันกับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส และอัตราการไหลของของเหลวกับอัตรา

การไหลของอากาศที่ส่วนแยก มีต่อค่า D/uL ของถึงปฏิกิริยาแบบผสมผสาน แต่ผลกระทบร่วมของ อัตราการไหลของของเหลวกับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน และอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ไม่มีผลต่อค่า D/uL ของถึงปฏิกิริยาแบบผสมผสานในช่วงที่ ทำการศึกษา

สภาวะการเดินระบบของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายขึ้นอยู่กับค่าอัตราการไหล ของของเหลวและอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน ซึ่งจะส่งผลให้เวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับ อนุภาคและค่าอัตราน้ำล้นผิวเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการเดินระบบต่างๆ (ตามผลการทดลองที่ 4.3.2) โดยที่อัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของน้ำอัดความดันยังมีผลต่อรูปแบบ การไหลของถึงปฏิกิริยา แสดงว่า รูปแบบการไหลมีความสัมพันธ์กับสภาวะการเดินระบบ ซึ่งน่าจะ สามารถประยุกต์ใช้รูปแบบการไหลในการอธิบายประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่เกิดขึ้น รวมถึงใช้เป็น ตัวแปรในการออกแบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายได้

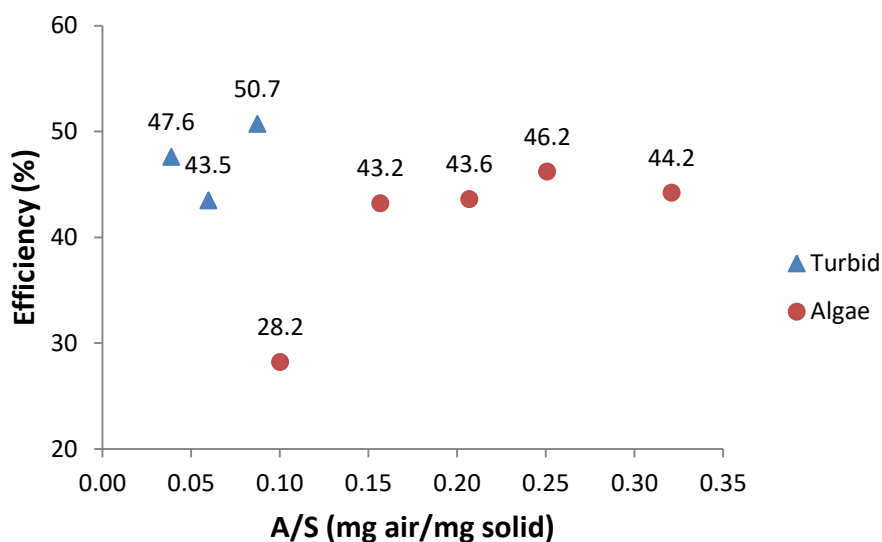
4.6 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วย

อากาศละลาย

กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายต้องการเวลากักน้ำที่น้อยกว่ากระบวนการ ตกตะกอน ทำให้ขนาดของถึงปฏิกิริยามีขนาดเล็กกว่าถึงตกตะกอน การทดลองในส่วนนี้จึง ทำการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วย อากาศละลาย เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบที่อัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์ 5-8 ลิตร ต่อนาที และอัตราการไหลน้ำอัดความดัน 1.3-4 ลิตรต่อนาที (ตามผลการทดลองที่ 4.3) ซึ่งมีผลการ ทดลองดังนี้

4.6.1 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

4.6.1.1 ผลของค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค



รูปที่ 4-35 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแตกต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4-35 แสดงประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแตกต่างกัน พบว่า ในช่วงสภาวะการเดินระบบที่ศึกษา อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งของการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร มีค่าสูงกว่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งของการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่นความเข้มข้นเริ่มต้น 50 NTU เนื่องจากที่ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าว เซลล์สาหร่ายมีปริมาณของแข็งแขวนลอยน้อยกว่าอนุภาคความขุ่น ทำให้มีเป่าสัมผัสที่ฟองอากาศจะเกิดการชนกันและติดกันน้อยกว่า นอกจากนี้เซลล์สาหร่ายที่มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคความขุ่นจะมีความเร็วสุดท้ายช้ากว่า จึงต้องการจำนวนฟองอากาศในการเกาะติดมากกว่า เพื่อเพิ่มความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคและน้ำเสียมากขึ้น แสดงว่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่เป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการออกแบบกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายขึ้นอยู่กับชนิด

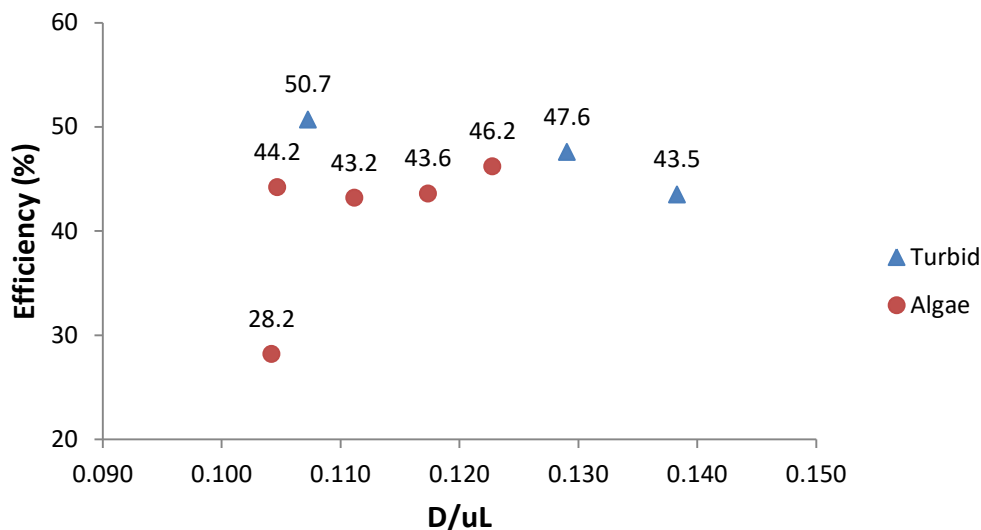
และสมบัติของอนุภาคที่ปนเปื้อนในวัฏภาคของเหลว ซึ่งค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่แนะนำให้ใช้คือ 0.03-0.06 มิลลิกรัมของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง (Metcalf & Eddy et al., 2002)

โดยค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตั้งแต่ 0.15 ถึง 0.35 มิลลิกรัมของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า 43% และค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่นความเข้มข้นเริ่มต้น 50 NTU ตั้งแต่ 0.06 ถึง 0.09 มิลลิกรัมของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า 43%

ค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร สูงกว่าค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งตามเกณฑ์การออกแบบ แสดงว่าสามารถเดินระบบที่ความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมากกว่า 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตรได้ ส่วนค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่นความเข้มข้นเริ่มต้น 50 NTU สอดคล้องกับค่าตามเกณฑ์การออกแบบแล้ว

4.6.1.2 ผลของรูปแบบการไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค

จากผลการทดลองที่ 4.6.1.1 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติของอนุภาคที่ปนเปื้อนในวัฏภาคของเหลว ดังนั้นจึงทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแยกอนุภาคกับรูปแบบการไหลในท่อมของค่า Dispersion number ($d: D/uL$) ที่เปลี่ยนไปตามสภาวะการเดินระบบที่แตกต่างกัน ซึ่งรูปแบบการไหลอาจจะเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ออกแบบและควบคุมประสิทธิภาพของระบบได้



รูปที่ 4-36 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย
ที่ค่า Dispersion number แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-36 แสดงประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายที่ค่า Dispersion number แตกต่างกัน พบว่า การเดินระบบที่ค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานอยู่ในช่วง 0.105-0.123 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่า 43% และค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความเข้มข้นเริ่มต้น 50 NTU คือ 0.107 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 50.7%

ค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่เหมาะสมในการแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความเข้มข้นออกจากวัฏภาคของเหลวอยู่ในช่วง 0.105-0.107 ซึ่งน่าจะเป็นรูปแบบการไหลที่เหมาะสมกับการสร้างโอกาสในการชน (Collision) การสัมผัส (Attachment) และการแยก (Separation) ของอนุภาคขนาดเล็กที่สัมผัสกับฟองอากาศขนาดเล็กภายในระบบ

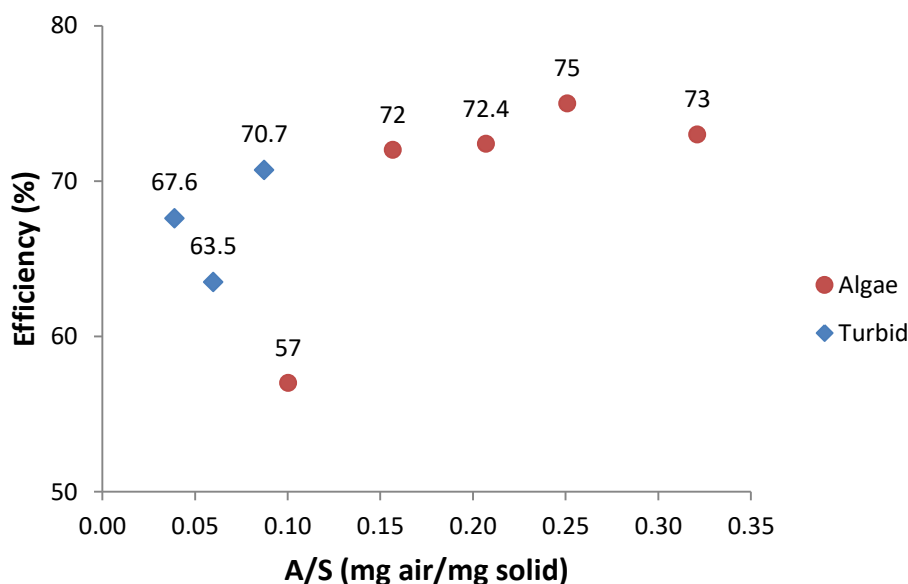
การแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความเข้มข้นออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการแยกแค่ 40-50% ซึ่งมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำในการนำไปใช้บำบัดน้ำดิบหรือน้ำเสียจริง ดังนั้นการทดลองในส่วนต่อไปจึงทำการศึกษา

การแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

4.6.2 ผลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

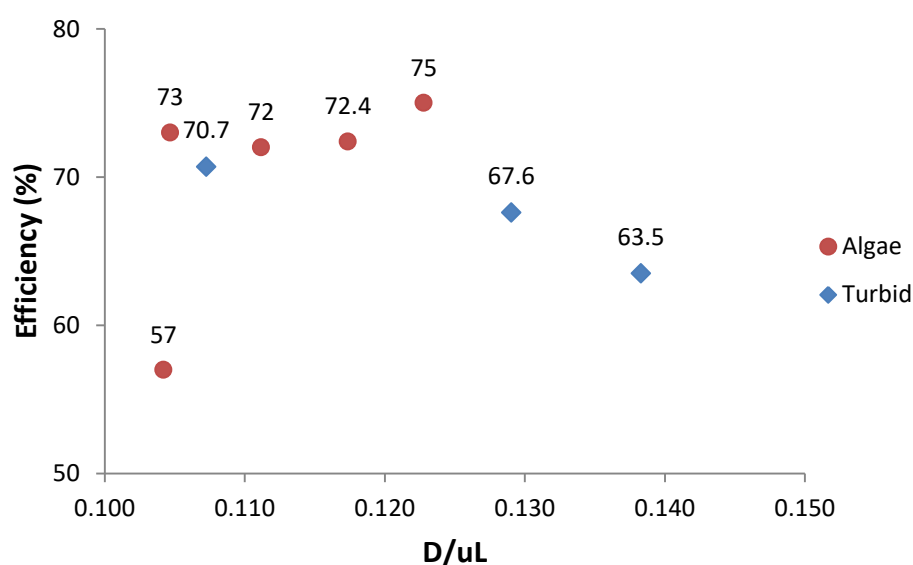
เนื่องจากเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นมีขนาดและลักษณะที่เป็นคอลลอยด์ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างมีเสถียรภาพตามที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ส่งผลให้กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีประสิทธิภาพการแยกไม่สูงมาก การทดลองในส่วนนี้จึงทำการศึกษาการแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยเลือกใช้ปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสม สภาวะการเดินระบบและรูปแบบการไหลเหมาะสมจากผลการทดลองที่ผ่านมา ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

4.6.2.1 ผลของค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งและรูปแบบการไหล



รูปที่ 4-37 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนท์ที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-37 แสดงประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่อัตราส่วนอากาศต่อของแข็งแตกต่างกัน พบว่า ค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตั้งแต่ 0.15 ถึง 0.35 มิลลิกรัมของอากาศต่อมิลลิกรัมของของแข็ง จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 75%



รูปที่ 4-38 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่ค่า Dispersion number แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4-38 แสดงประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตรด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ที่ค่า Dispersion number แตกต่างกัน พบว่า การเดินระบบที่ค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานอยู่ในช่วง 0.105-0.123 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 75%

การเติมสารส้มเพื่อทำลายเสถียรภาพของเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ถึงประมาณ 20-30% โดยที่การเติมสารส้มไม่มีผลต่อค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งและค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่น 50 NTU

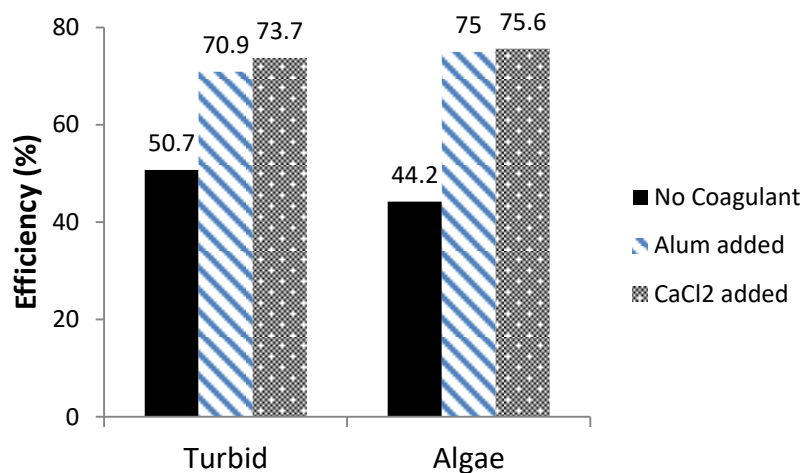
4.6.2.2 ผลของประเภทน้ำเสียสังเคราะห์และชนิดสารโคแอกกูแลนต์

จากผลการทดลองที่ 4.2.2 ความเข้มข้นของเซลล์สาหร่ายมีผลต่อชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม ซึ่งชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ที่ไม่มีผลในการแยกเซลล์สาหร่ายด้วยกระบวนการโคแอกกูแลนต์ร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ที่สภาวะการเดินระบบอัตราการไหลน้ำเสียสังเคราะห์ 5 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที และค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานเท่ากับ 0.105 (สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมจากผลการทดลองที่ 4.6.1) โดยมีประสิทธิภาพการแยกเป็น 73% และ 75.6% สำหรับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และ 5×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่ข้างต้น การเติมสารโคแอกกูแลนต์ไม่ส่งผลให้สภาวะการเดินระบบของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายเปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งการเติมชนิดสารโคแอกกูแลนต์ที่แตกต่างกันมีประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงทำการศึกษาการแยกอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการโคแอกกูแลนต์ร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สภาวะการเดินระบบดังกล่าว เพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการแยกอนุภาคความขุ่นและเซลล์สาหร่าย

จากรูปที่ 4-39 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตรและอนุภาคความขุ่นความเข้มข้นเริ่มต้น 50 NTU ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการเติมสารโคแอกกูแลนต์ ที่สภาวะการเดินระบบและรูปแบบการไหลที่เหมาะสม พบว่า กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายมีประสิทธิภาพในการแยก

อนุภาคความขุ่นดีกว่าการแยกเซลล์สาหร่าย เนื่องจากอนุภาคความขุ่นมีขนาดใหญ่กว่าเซลล์สาหร่าย ทำให้มีพื้นที่ในการชนและสัมผัสกับฟองอากาศมากกว่า



รูปที่ 4-39 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายและอนุภาคความขุ่น ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการเติมสารโคแอกกูแลนต์ ที่สภาวะการเดินระบบและรูปแบบการไหลที่เหมาะสม

การเติมสารส้มและแคลเซียมคลอไรด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคความขุ่น และเซลล์สาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลว โดยที่กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายร่วมกับการเติมสารโคแอกกูแลนต์ทั้ง 2 ชนิดไม่แตกต่างกันในด้านของประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความขุ่น และเซลล์สาหร่าย แต่ต้องทำการพิจารณาปริมาณความเป็นด่างที่ต้องการ ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น และปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ต้องการ ในการนำกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำดิบหรือน้ำเสียจริง

เพื่อให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ รวมถึงกลไกการกวนผสม (Mixing) และการแยก (Separation) ที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะทำให้สามารถออกแบบระบบและเลือกแนวทางการเดินระบบได้อย่างเหมาะสมต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกรณ์ด้วย CFD

4.7 ผลการศึกษารูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาด้วย Computational Fluid Dynamics

การศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานด้วย RTD (ผลการทดลองที่ 4.4 และ 4.5) สามารถวิเคราะห์ผลได้เพียงรูปแบบการไหลของของไหลที่ไหลผ่านถังปฏิกริยาตลอดทั้งถัง มีการไหลลัดวงจรหรือจุดอับภายในถังปฏิกริยาหรือไม่ ดังนั้น CFD จึงมีบทบาทในการศึกษารูปแบบการไหลในแต่ละส่วนของถังปฏิกริยา บริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจรหรือเกิดจุดอับ (ถ้ามี) นอกจากนี้ ผล Simulation จาก CFD ยังสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ ปรับปรุง และพัฒนาถังปฏิกริยาให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการที่ใช้มากยิ่งขึ้น

การทดลองในส่วนนี้จะทำการศึกษาลักษณะการไหลของของไหลและการกวนผสมที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่จำลองด้วย CFD โดยพิจารณาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ซึ่งผล Simulation ที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.7.1 ผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อรูปแบบการไหล

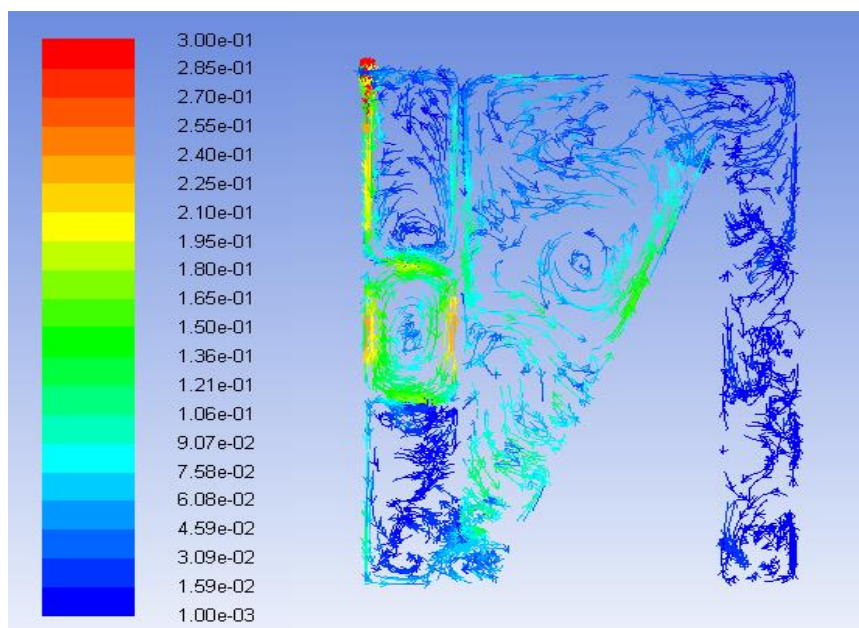
อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน ทำให้ความเร็วการไหลและระยะเวลาพักของน้ำภายในถังปฏิกริยาไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลต่อสภาวะการไหล (flow regime) ของน้ำภายในถังปฏิกริยา โดยที่สภาวะการไหลมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้หน่วยที่เรียกว่า ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number; Re) เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำผ่านพื้นที่ผิวด้านบนของส่วนสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคและการไหลของน้ำผ่านแผ่นกั้นของส่วนฟลอคคูลेशन ที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ จะได้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 63 และ 171 ที่อัตราการไหล 6.4 ลิตรต่อนาที และค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 98 และ 266 ที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 500 แสดงว่าการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข ดังนั้น Laminar model จึงมีความเหมาะสมในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อรูปแบบการไหลด้วย CFD สำหรับ

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อรูปแบบการไหล ดังแสดงในตารางที่ 4-13

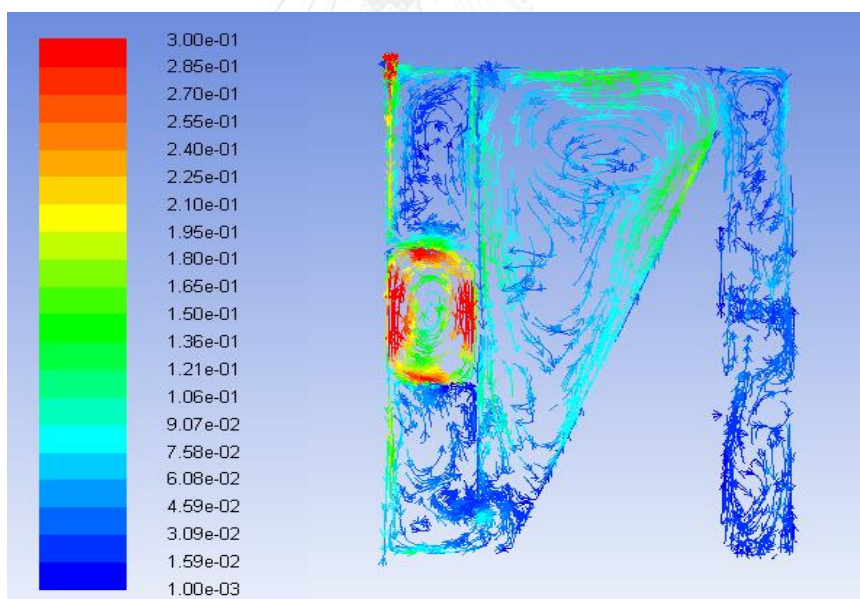
ตารางที่ 4-13 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานด้วย CFD

แบบจำลอง	Laminar model
ลักษณะสมบัติของวัสดุภาคน้ำ	
ความหนาแน่น	997.13 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนืดสัมบูรณ์	0.000891 กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที
สภาวะขอบ (Boundary condition)	
อัตราการไหล	6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที
ความเร็วขาเข้า	0.419 และ 0.655 เมตรต่อวินาที
ขนาดท่อเข้า	1/2 นิ้ว
ความดันขาเข้า	0 ปาสคาล
ความดันขาออก	14355 ปาสคาล

ผลการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-40 และ 4-41 ตามลำดับ



รูปที่ 4-40 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน
ที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4-41 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน
ที่อัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-40 และ 4-41 แสดงเวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 และ 10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่า รูปแบบการไหลของน้ำ

ภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำแตกต่างกันมีลักษณะใกล้เคียงกัน ในส่วนของฟลูอิดคูลเลชันมีการกวนผสมเกิดขึ้นบริเวณระหว่างแผ่นกั้น ซึ่งตามหลักทฤษฎีของฟลูอิดคูลเลชันแบบแผ่นกั้นควรมีลักษณะเป็นการไหลตามกัน อันเนื่องมาจากมีจำนวนแผ่นกั้นน้อยเกินไปและระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นมากเกินไป ในส่วนสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคและส่วนแยก การไหลของน้ำมีลักษณะเป็นการไหลแบบตามกันที่มีการกวนผสมด้วย แต่อัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นจะมีการกวนผสมเกิดขึ้นลดลง เนื่องจากความเร็วการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น อนุภาคของน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านถังปฏิกริยาไปในแนวทิศทางการไหลได้เร็วกว่า และลดการแพร่ของอนุภาคของน้ำ แต่เนื่องจากช่วงของอัตราการไหลของน้ำที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ค่อนข้างแคบ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วการไหลและการกวนผสมเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผล RTD ที่การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำมีผลทำให้ค่า D/uL ของถังปฏิกริยาลดลงน้อยมาก

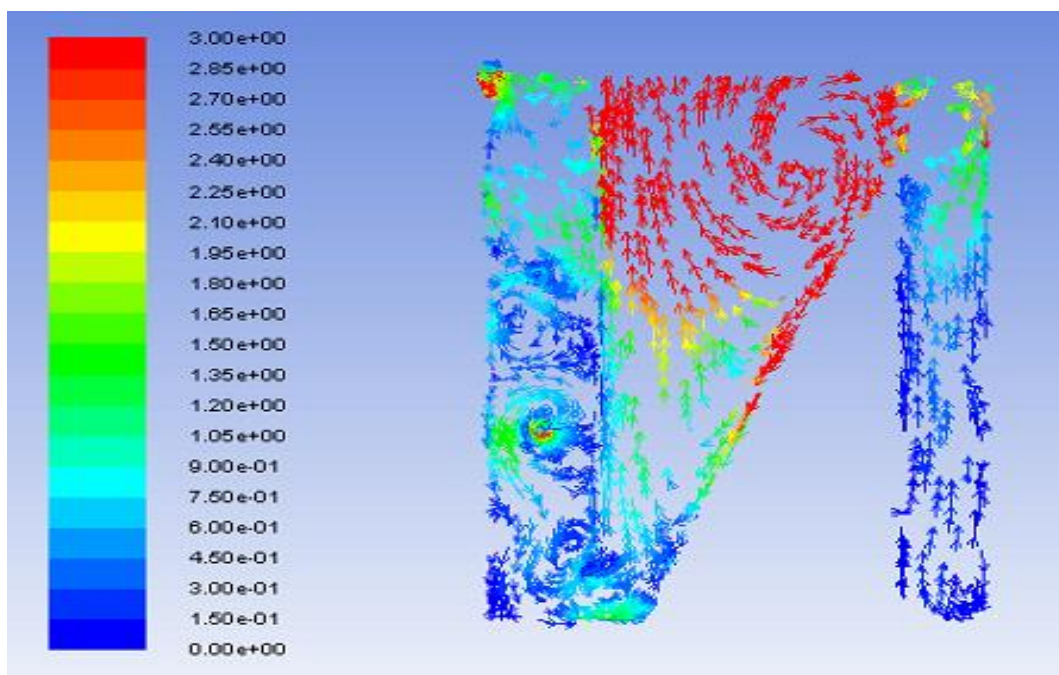
4.7.2 ผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสที่มีต่อรูปแบบการไหล

สภาวะการไหล (flow regime) ของอากาศภายในถังปฏิกริยา ที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อวินาที จะมีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 2156 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1000 แสดงว่าการไหลของอากาศภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow) รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข ดังนั้น Turbulence model จึงมีความเหมาะสมในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อรูปแบบการไหลด้วย CFD โดยเลือกใช้ Turbulence model ชนิด k-epsilon (k- ϵ) ที่นิยมใช้กันมากที่สุดใน CFD แต่ว่าการเป่าฟองอากาศเข้าไปภายในถังปฏิกริยา ทำให้ในระบบมีทั้งหมด 2 วัฏภาค คือ น้ำและอากาศ จึงต้องใช้ Multiphase model ในการศึกษาด้วย โดยเลือกใช้ Multiphase model แบบ Eulerian สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสที่มีต่อรูปแบบการไหล ดังแสดงในตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานด้วย CFD

แบบจำลอง	k- ϵ Turbulence model Eulerian multiphase model
ลักษณะสมบัติของวัฏภาคน้ำ	
ความหนาแน่น	997.13 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนืดสัมบูรณ์	0.000891 กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที
สภาวะขอบ (Boundary condition) ของวัฏภาคน้ำ	
อัตราการไหล	6.4 ลิตรต่อวินาที
ความเร็วขาเข้า	0.419 เมตรต่อวินาที
ขนาดท่อเข้า	1/2 นิ้ว
ความดันขาเข้า	0 ปาสคาล
ความดันขาออก	14355 ปาสคาล
ลักษณะสมบัติของวัฏภาคอากาศ	
ความหนาแน่น	1.177 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนืดสัมบูรณ์	1.846×10^{-5} กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที
สภาวะขอบ (Boundary condition) ของวัฏภาคอากาศ	
อัตราการไหล	10 ลิตรต่อวินาที
ความเร็วของฟองอากาศ	0.385 เมตรต่อวินาที
ขนาดฟองอากาศ	5 มิลลิเมตร
ความดันขาเข้า	32000 ปาสคาล
ความดันขาออก	0 ปาสคาล

ผลการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อวินาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4-42



รูปที่ 4-42 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-40 และ 4-42 แสดงเวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่า การเป่าฟองอากาศเข้าไปในส่วนสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคทำให้ความเร็วการไหลของน้ำในส่วนสัมผัสเพิ่มขึ้น การไหลของน้ำมีลักษณะเป็นการไหลแบบกวนผสมสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และทำให้การกวนผสมในส่วนแยกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผล RTD ที่การเป่าฟองอากาศเข้าไปในส่วนสัมผัสมีผลทำให้ค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ แสดงว่ามีการกวนผสมเกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์สูง

4.7.3 ผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกที่มีต่อรูปแบบการไหล

สภาวะการไหล (flow regime) ของอากาศภายในถังปฏิกรณ์ ที่อัตราการไหล 2.5 ลิตรต่อนาที จะมีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์เท่ากับ 545 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แต่น้อยกว่า 1000 แสดงว่าการไหลของอากาศภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่ส่วนแยกเป็นการไหลระหว่างแบบราบเรียบและแบบ

ปั่นป่วน (Transition flow) รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข ดังนั้น Turbulence model จึงมีความเหมาะสมในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อรูปแบบการไหลด้วย CFD โดยเลือกใช้ Turbulence model ชนิด k-epsilon (k- ϵ) ที่นิยมใช้กันมากที่สุดใน CFD แต่ว่าการเป่าฟองอากาศเข้าไปภายในถังปฏิกรณ์ ทำให้ในระบบมีทั้งหมด 2 วัฏภาค คือ น้ำและอากาศ จึงต้องใช้ Multiphase model ในการศึกษาด้วย โดยเลือกใช้ Multiphase model แบบ Eulerian สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสที่มีต่อรูปแบบการไหล ดังแสดงในตารางที่ 4-15

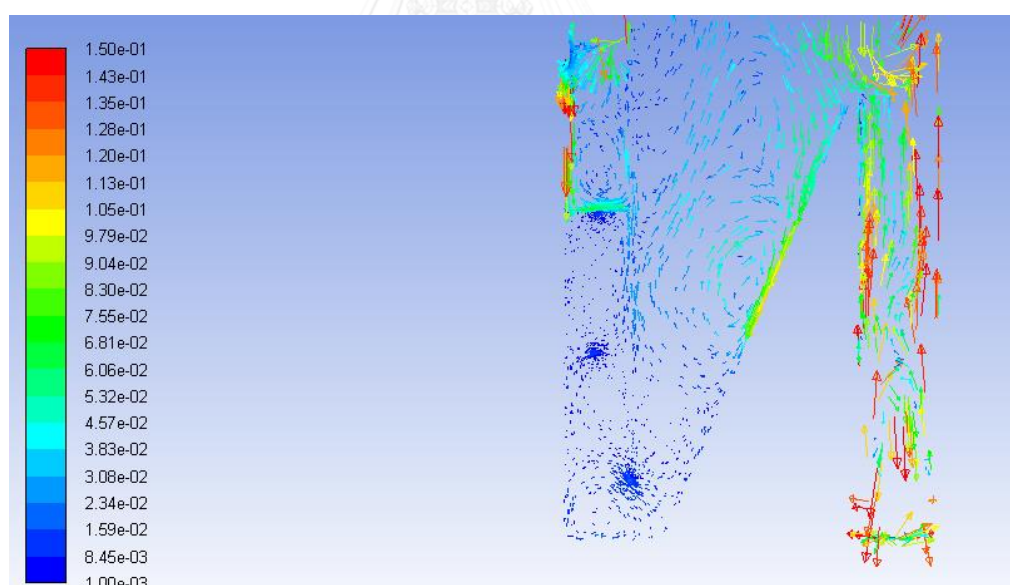
ตารางที่ 4-15 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานด้วย CFD

แบบจำลอง	k- ϵ Turbulence model Eulerian multiphase model
ลักษณะสมบัติของน้ำ	
ความหนาแน่น	997.13 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนืดสัมบูรณ์	0.000891 กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที
สภาวะขอบ (Boundary condition) ของวัฏภาคน้ำ	
อัตราการไหล	6.4 ลิตรต่อนาที
ความเร็วขาเข้า	0.419 เมตรต่อวินาที
ขนาดท่อเข้า	1/2 นิ้ว
ความดันขาเข้า	0 ปาสคาล
ความดันขาออก	14355 ปาสคาล
ลักษณะสมบัติของวัฏภาคอากาศ	
ความหนาแน่น	1.177 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนืดสัมบูรณ์	1.846×10^{-5} กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4-15 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานด้วย CFD (ต่อ)

สภาวะขอบ (Boundary condition) ของวัฏภาคอากาศ	
อัตราการไหล	2.5 ลิตรต่อนาที
ความเร็วของฟองอากาศ	0.2437 เมตรต่อวินาที
ขนาดฟองอากาศ	2 มิลลิเมตร
ความดันขาเข้า	32000 ปาสคาล
ความดันขาออก	0 ปาสคาล

ผลการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-43



รูปที่ 4-43 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4-40 และ 4-43 แสดงเวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่า การเป่าฟองอากาศเข้าไปในส่วนแยกระหว่างน้ำใสกับสไลด์จ์ ซึ่งมีทิศทางการไหลตรงข้ามกับการไหลของน้ำ ทำให้น้ำมีการไหลเวียนภายในส่วนแยกและความเร็วการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น เกิดการกวนผสมในส่วนแยกมากยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผล RTD ที่การเป่าฟองอากาศเข้าไปในส่วนแยกมีผลทำให้ค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากส่วนแยกมีปริมาตรน้อยกว่าส่วนสัมผัสและอัตราการไหลของอากาศที่เป่าเข้าไปต่ำกว่า การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลและค่า D/uL ของถังปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้นจึงน้อยกว่าการเป่าฟองอากาศเข้าไปในส่วนสัมผัส

4.7.4 ผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่มีต่อรูปแบบการไหล

อัตราการไหลของน้ำที่อัดความดันแตกต่างกัน ทำให้ความเร็วการไหลและระยะเวลาพักของน้ำภายในถังปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาการไหลของวัฏภาคน้ำผ่านพื้นที่ผิวด้านบนและพื้นที่ผิวด้านล่างของส่วนสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค ที่มีค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ของถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ จะได้ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 102 และ 177 ที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 500 แสดงว่าการไหลของวัฏภาคน้ำภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

สำหรับสภาวะการไหล (flow regime) ของฟองอากาศขนาดเล็กภายในถังปฏิกรณ์ จะมีค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์เท่ากับ 0.682 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าการไหลของฟองอากาศขนาดเล็กภายในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสานเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) รายละเอียดการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข ดังนั้น Laminar model จึงมีความเหมาะสมในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่มีต่อรูปแบบการไหลด้วย CFD แต่ว่าการเป่าฟองอากาศเข้าไปภายในถังปฏิกรณ์ทำให้ในระบบมีทั้งหมด 2 วัฏภาค คือ น้ำและอากาศ จึงต้องใช้ Multiphase model ในการศึกษา

ด้วย โดยเลือกใช้ Multiphase model แบบ Eulerian สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของ อัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่มีต่อรูปแบบการไหล ดังแสดงในตารางที่ 4-16

ตารางที่ 4-16 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานด้วย CFD

แบบจำลอง	Laminar model Eulerian multiphase model
ลักษณะสมบัติของวัฏภาคน้ำ	
ความหนาแน่น	997.13 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนืดสัมบูรณ์	0.000891 กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที
สภาวะขอบ (Boundary condition) ของวัฏภาคน้ำ	
อัตราการไหลของน้ำ	6.4 ลิตรต่อนาที
ความเร็วขาเข้าของน้ำ	0.419 เมตรต่อวินาที
ขนาดท่อเข้าของน้ำ	1/2 นิ้ว
ความดันขาเข้าของน้ำ	0 ปาสคาล
อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน	4 ลิตรต่อนาที
ความเร็วขาเข้าของน้ำอัดความดัน	0.262 เมตรต่อวินาที
ขนาดท่อเข้าของน้ำอัดความดัน	1/2 นิ้ว
ความดันขาเข้าของน้ำอัดความดัน	20000 ปาสคาล
ความดันขาออก	14355 ปาสคาล
ลักษณะสมบัติของวัฏภาคอากาศ	
ความหนาแน่น	1.177 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนืดสัมบูรณ์	1.846×10^{-5} กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที

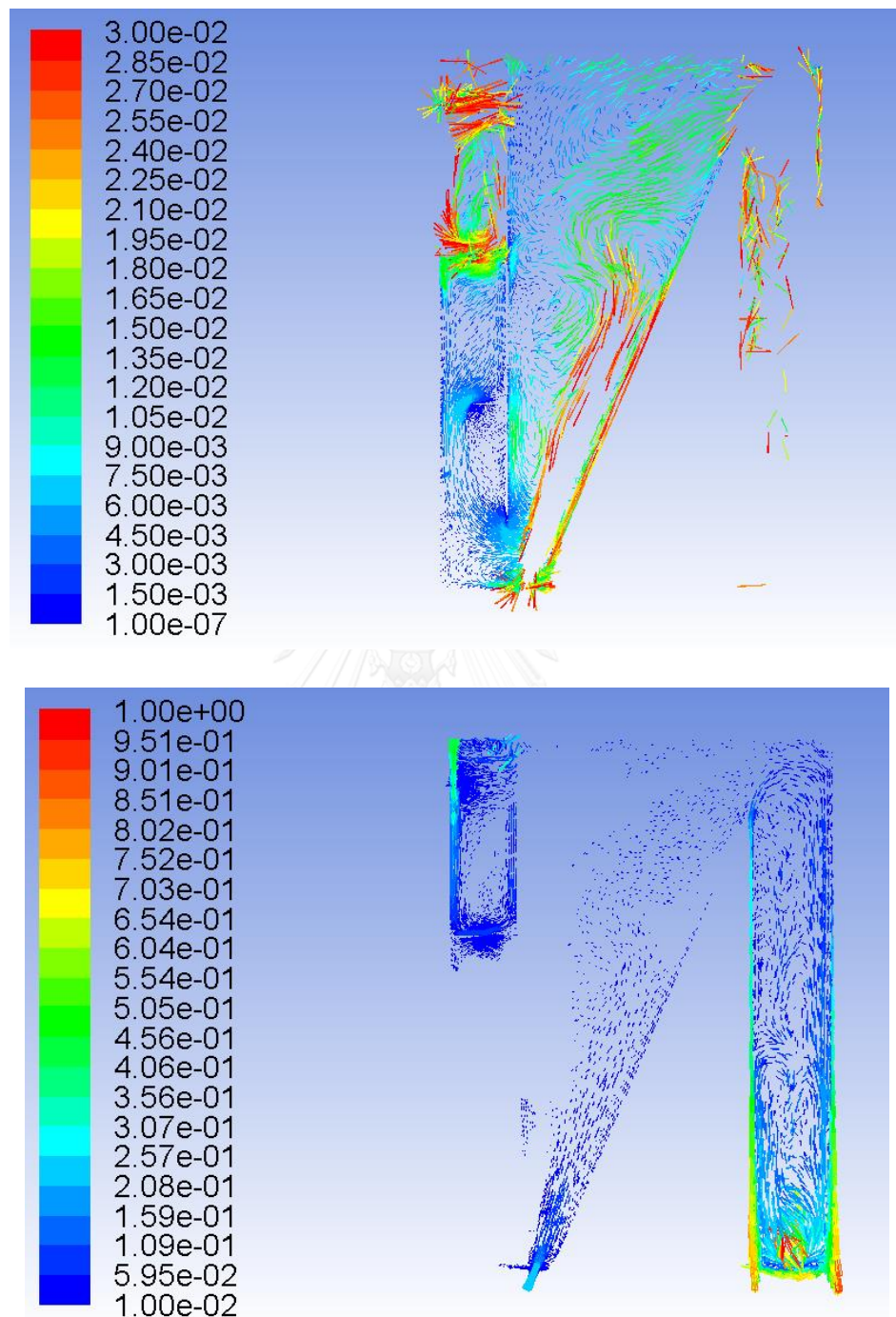
ตารางที่ 4-16 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานด้วย CFD (ต่อ)

สภาวะขอบ (Boundary condition) ของวัฏภาคอากาศ	
ความเร็วของฟองอากาศ	0.0061 เมตรต่อวินาที
ขนาดฟองอากาศ	100 มิลลิเมตร
สัดส่วนของฟองอากาศ (Volume fraction)	0.125
ความดันขาเข้า	20000 ปาสคาล
ความดันขาออก	0 ปาสคาล

ผลการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4-44

จากรูปที่ 4-40 และ 4-44 แสดงเวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่า น้ำอัดความดันที่ป้อนเข้าไปในถังปฏิกริยา ประกอบด้วย 2 วัฏภาค คือ วัฏภาคน้ำและวัฏภาคอากาศ ในส่วนของวัฏภาคน้ำจะทำให้ความเร็วการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น อนุภาคของน้ำจึงเคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางการไหลได้เร็วกว่า และลดการแพร่ของอนุภาคของน้ำ ทำให้การกวนผสมในส่วนสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคเกิดขึ้นลดลง และการไหลของน้ำในส่วนแยกมีลักษณะเป็นการไหลแบบตามกันมากขึ้น แต่บริเวณช่องทางออกของถังปฏิกริยาจะเกิดความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น

ในส่วนของวัฏภาคอากาศซึ่งมีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กมากทำให้เกิดการกวนผสมภายในถังปฏิกริยาเพียงเล็กน้อย แสดงว่าผลจากวัฏภาคน้ำมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานมากกว่าวัฏภาคอากาศ ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่เพิ่มขึ้นส่งผลรูปแบบการไหลเหมือนกับอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น ทำให้การกวนผสมในถังปฏิกริยาลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผล RTD ที่การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำอัดความดันมีผลทำให้ค่า D/uL ของถังปฏิกริยาลดลง



รูปที่ 4-44 เวกเตอร์ความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่อัตราการไหลของน้ำ

6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที

4.7.5 ผลของรูปแบบการไหลของของไหลภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

สภาวะการเดินระบบของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายขึ้นอยู่กับค่าอัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน ซึ่งจะส่งผลให้เวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคและค่าอัตราน้ำล้นผิวเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการเดินระบบต่างๆ (ตามผลการทดลองที่ 4.3.2) โดยที่อัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของน้ำอัดความดันยังมีผลต่อรูปแบบการไหลของถังปฏิกริยา (ตามผลการทดลองที่ 4.4.1 4.4.2 และ 4.5.2)

4.7.5.1 ผลของอัตราการไหลของของเหลว

อัตราการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเร็วการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้น อนุภาคของของเหลวจะเคลื่อนที่ผ่านถังปฏิกริยาไปในแนวทิศทางการไหลได้เร็วกว่า และลดการแพร่ของอนุภาคของของเหลวในส่วนสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคและส่วนแยก ค่า D/uL ของถังปฏิกริยามีค่าลดลง ซึ่งการกวนผสมที่เกิดขึ้นนั้นลดลงมีผลทำให้เกิดการรวมตัวของฟองอากาศขนาดเล็กด้วยกันเองได้น้อยกว่า ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่อัตราการไหลของของเหลวสูงจึงดีกว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่อัตราการไหลของของเหลวต่ำ

การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของของเหลวที่สูงเกินไป จะทำให้อัตราส่วนของอากาศต่อของแข็งมีค่าต่ำ ปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กภายในระบบอาจจะไม่เพียงพอในการรวมตัวกับอนุภาค จนกระทั่งอนุภาคสามารถแยกออกจากวัฏภาคของเหลวได้ ส่งผลให้การแยกอนุภาคมีประสิทธิภาพต่ำ โดยเฉพาะอนุภาคขนาดเล็กที่ต้องการการรวมตัวกับฟองอากาศปริมาณมาก เพื่อลดความหนาแน่นของฟลอคให้น้อยกว่าความหนาแน่นของวัฏภาคของเหลวและลอยตัวสู่ผิวของของเหลวได้ เช่น จุลสาหร่าย (Microalgae) ดังผลการทดลองที่ 4.6.1.1 นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของของเหลว เวลาที่ภายในถังปฏิกริยาจะลดลง อาจทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสและรวมตัวของฟองอากาศกับอนุภาคไม่เพียงพอ ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคจะมีค่าลดลง รวมถึงความปั่นป่วนน้อยเกินไปที่ทำให้ฟองอากาศรวมตัวกับอนุภาคได้ดี เพราะค่า D/uL ของถังปฏิกริยามีค่าต่ำ

4.7.5.2 ผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน

การป้อนน้ำอัดความดันเข้าไปในถังปฏิกริยา ทำให้รูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงคล้ายผลของอัตราการไหลของของเหลวที่เพิ่มขึ้น โดยในส่วนของภูมิภาคของเหลวจะให้ความเร็วการไหลของของเหลวเพิ่มขึ้น อนุภาคของของเหลวจึงเคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางการไหลได้เร็วกว่า และลดการแพร่ของอนุภาคของของเหลว ซึ่งมีผลทำให้โอกาสในการรวมตัวของฟองอากาศขนาดเล็กด้วยกันเองเกิดขึ้นได้น้อยกว่า ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดันสูงจึงดีกว่า ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดันต่ำ แต่เวลาก็กักภายในถังปฏิกริยาจะลดลง อาจทำให้ระยะเวลาในการสัมผัสและรวมตัวของฟองอากาศกับอนุภาคไม่เพียงพอ ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคจะมีค่าลดลง ถ้าอัตราการไหลของภูมิภาคของน้ำอัดความดันสูงเกินไป

ส่วนของภูมิภาคอากาศซึ่งมีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กมากทำให้เกิดการกวนผสมภายในถังปฏิกริยาเพียงเล็กน้อย อัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนของอากาศต่อของแข็งมีค่ามากขึ้น ปริมาณของฟองอากาศขนาดเล็กภายในระบบมีมากขึ้น เป็นการเพิ่มโอกาสในการรวมตัวของฟองอากาศกับอนุภาค โดยเฉพาะอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดันสูงดีกว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่อัตราการไหลของน้ำอัดความดันต่ำ แต่ถึงแม้ว่าฟองอากาศขนาดเล็กภายในระบบจะมีปริมาณมากขนาดไหนก็ตาม ก็ไม่สามารถแยกอนุภาคออกจากภูมิภาคของเหลวได้ทั้งหมด เนื่องจากอนุภาคมีขนาดของพื้นผิวที่จำกัดในการรวมตัวกับฟองอากาศ ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำอัดความดันที่สูงเกินไปจึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่กลับเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายเกินความจำเป็น ดังผลการทดลองที่ 4.6.1.1

ในด้านของรูปแบบการไหล ค่า D/uL ของถังปฏิกริยาแปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน กรณีอัตราการไหลของน้ำอัดความดันต่ำเกินไป คือ ค่า D/uL ของถังปฏิกริยามีค่าสูงมาก แสดงว่าภายในปฏิกริยามีระดับการกวนผสมสูง ทำให้มีโอกาที่ฟองอากาศขนาดเล็กจะชนกันและรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งลดประสิทธิภาพการรวมตัวของฟองอากาศกับอนุภาค ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคจึงลดลง แต่กรณีอัตราการไหลของน้ำอัดความดันสูง คือ ค่า D/uL ของถังปฏิกริยามีค่าต่ำ การแยกอนุภาคมีประสิทธิภาพดี เพราะการกวนผสมที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาเพียงพอต่อการสร้างโอกาสในการรวมตัวของฟองอากาศและอนุภาค

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสาหร่ายและน้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่น การทำลายเสถียรภาพเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นด้วยกระบวนการทางเคมี โดยทำการศึกษากลไกและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม 4 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารส้มหรืออลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) รูปแบบการไหลภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการไหล ประสิทธิภาพการแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นออกจากวัฏภาคของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลกับประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) กระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค โดยการเติมสารส้มสามารถแยกเซลล์สาหร่ายและอนุภาคความขุ่นได้ดีทั้งความเข้มข้นน้ำเสียสูงและต่ำ แต่การเติมแคลเซียมคลอไรด์จะเหมาะกับการแยกอนุภาคที่มีความเข้มข้นสูง เพราะต้องการเป่าสัมผัสมากเพื่อโอกาสในการชนและรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น
- 2) ถังปฏิกริยาแบบผสมผสานมีรูปแบบการไหลเป็นถังปฏิกริยาแบบที่มีการแพร่กระจายของสารมาก (Plug Flow with Large Extents of Dispersion)
- 3) อัตราการไหลของของเหลวและชนิดของหัวกระจายอากาศไม่มีผลต่อค่า D/uL อย่างมีนัยยะสำคัญ อัตราการไหลของน้ำอัดความดันมีผลต่อค่า D/uL ในรูปแบบสมการเชิงเส้น โดยที่ค่า D/uL แปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน ส่วนอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัสและ อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยกมีผลต่อค่า D/uL ในรูปแบบสมการกำลังสอง
- 4) ค่าอัตราส่วนอากาศต่อของแข็งที่เป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติของอนุภาคที่ปนเปื้อนในวัฏภาคของเหลว

- 5) ค่า D/uL ของถึงปฏิกิริยาแบบผสมผสานที่เหมาะสมในการแยกเซลล์สำหรับและอนุภาค ความชุ่มออกจากวิภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายอยู่ในช่วง 0.105-0.107 ซึ่งน่าจะเป็นรูปแบบการไหลที่เหมาะสมกับการสร้างโอกาสในการชน (Collision) การสัมผัส (Attachment) และการแยก (Separation) ของอนุภาคขนาดเล็กที่ สัมผัสกับฟองอากาศขนาดเล็กภายในระบบ
- 6) ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการแยกอนุภาคออกจากวิภาค ของเหลวด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยถ้าใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ จะได้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความชุ่มและ เซลล์สำหรับ 70.9% และ 75% ตามลำดับ ถ้าใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ จะได้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคความชุ่มและเซลล์สำหรับ 73.7% และ 75.6% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษารูปแบบการไหล และการแยกอนุภาคออกจากวิภาคของเหลวด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย มีข้อเสนอแนะเพื่อต่อ ยอดงานวิจัยดังนี้

- 1) ควรทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อกระบวนการออดีฟลอคคูลูชันเพิ่มเติม เช่น ปริมาณ แคลเซียมอออนและแมกนีเซียมอออนในน้ำ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย เป็นต้น
- 2) ควรทำการศึกษาการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคด้วยสารโคแอกกูแลนต์ชนิดอื่น ที่ทำให้ ประสิทธิภาพการแยกดีขึ้น และมีความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ลดลง
- 3) ควรทำการศึกษาการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศ ละลายในการแยกอนุภาคชนิดอื่น เช่น อิมัลชันน้ำมัน หรือสาหร่ายสายพันธุ์อื่น ซึ่งมิ ความเป็นไปได้ว่าชนิดและลักษณะสมบัติของอนุภาคมีผลต่อปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ เหมาะสม กลไกและประสิทธิภาพการแยกของกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย และสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม

- 4) ควรทำการศึกษาคำการประยุกต์ใช้กระบวนการทำให้ลอยด้วยการเป่าฟองอากาศ ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าการเป่าฟองอากาศจะช่วยให้เกิดการกวนผสมที่ดีขึ้นและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของระบบ
- 5) ควรทำการศึกษารูปแบบการไหลและประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลายของถังปฏิกรณ์จริงที่ทำการ Scale down เพื่อเปรียบเทียบผลของขนาดถังปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน
- 6) น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคของแข็ง ซึ่งมีความหนาแน่นและความหนืดแตกต่างกับน้ำ ดังนั้นควรทำการศึกษาลักษณะการไหลของวัฏภาคของแข็งในถังปฏิกรณ์แบบผสมผสาน



รายการอ้างอิง

- Amirtharaja, A. and Mills, K. M. (1982). Rapid-mix design for mechanism of alum coagulation. *American Water Works Association*, 74(4), 210-216.
- Baik, M. H. and Lee, S. Y. (2010). Colloidal stability of bentonite clay considering surface charge properties as a function of pH and ionic strength. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(5), 837-841.
- Barrett, F. (1975). Electroflotation-Development and Application. *Water Pollution Control*, 74, 59.
- Behin, J. and Bahrami, S. (2012). Modeling an industrial dissolved air flotation tank used for separating oil from wastewater. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 59, 1-8.
- Bernhardt, H. and Clasen, J. (1994). Investigations into the flocculation mechanisms of small algal cells. *J. Water Supply Res. Technol.-AQUA*, 43(5), 222-232.
- Besson, A. and Guiraud, P. (2013). High-pH-induced flocculation-flotation of the hypersaline microalga *Dunaliella salina*. *Bioresour Technol*, 147, 464-470.
- Brady, P. V., Pohl, P. I., and Hewson, J. C. (2014). A coordination chemistry model of algal autoflocculation. *Algal Research*, 5, 226-230.
- Chegeni, M. H., Abdollahy, M., and Khalesi, M. R. (2015). Column flotation cell design by drift flux and axial dispersion models. *International Journal of Mineral Processing*, 145, 83-86.
- Chen, Y. M., Liu, J. C., and Ju, Y. (1998). Flotation removal of algae from water. *Colloids Surf. B: Biointerfaces*, 12, 49-55.
- Chung, T. J. (2002). Computational Fluid Dynamics. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Clasen, J., Mischke, U., Drikas, M., and Chow, W. K. (2000). An improved method for detecting electrophoretic mobility of algae during the destabilisation process of flocculation: flocculant demand of different species and the impact of DOC. *Water Supply: Research and Technology*, 49(2), 89-101.

- Drikas, M., Chow, W. K., House, J., and Burch, M. D. (2001). USING COAGULATION, FLOCCULATION AND SETTLING REMOVE TOXIC cyanobacteria. *American Water Works Association*, 93(2), 100-111.
- Edzwald, J. K. (1995). Principles and applications of dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, 31(3), 1-23.
- Edzwald, J. K. (2010). Dissolved air flotation and me. *Water Res*, 44(7), 2077-2106.
- Edzwald, J. K., Malley, J., and Yu, C. (1990). A conceptual model for dissolved air flotation in water treatment. *Water Supply*, 8, 141-150.
- Edzwald, J. K. and Wingler, B. J. (1990). Chemical and physical aspects of dissolved air flotation for the removal of algae. *Aqua*, 39, 24-35.
- Fawcett, N. S. J. (1997). *The Hydraulics of flotation tanks: Computational modelling*. Paper presented at the International Conference on Dissolved Air Flotation, United Kingdom.
- Fogler, H. S. (2006). Element of Chemical Reaction Engineering (4th ed.). United States of America: Pearson Education, Inc.
- Henderson, R. K., Parsons, S. A., and Jefferson, B. (2008). The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae. *Water Res*, 42(8-9), 1827-1845.
- Henderson, R. K., Parsons, S. A., and Jefferson, B. (2010). The impact of differing cell and algogenic organic matter (AOM) characteristics on the coagulation and flotation of algae. *Water Res*, 44(12), 3617-3624.
- Huang, C., Pan, J. R., and Huang, S. (1999). Collision efficiencies of algae and kaolin in depth filter: the effect of surface properties of particles. *Water Res*, 33(5), 1278-1286.
- Jameson, G. J. (1999). Hydrophobicity and floc density in induced-air flotation for water treatment. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 151(1), 269-281.
- Jiang, J. Q. and Graham, N. J. D. (1998). Preliminary evaluation of the performance of new pre-polymerised inorganic coagulants for lowland surface water treatment. *Water Science and Technology*, 37(2), 121-128.

- Jiang, J. Q., Graham, N. J. D., and Harward, C. (1993). Comparison of polyferric sulphate with other coagulants for the removal of algae-derived organic matter. *Water Science and Technology*, 27(11), 221-230.
- Jun, H. B., Lee, Y. J., Lee, B. D., and Knappe, D. R. U. (2001). Effectiveness of coagulants and coagulant aids for the removal of filter clogging *Synedra*. *Water Supply*, 50, 135-148.
- Kawamura, S. (2000). Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities (2nd ed.). United States of America: John Wiley & Son, Inc.
- Kempeneers, S., Van Menxel, F., and Gille, L. (2001). A decade of large scale experience in dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, 43(8), 27-34.
- Konno, H. (1993). Settling and coagulation of slender type diatoms. *Water Science and Technology*, 27(11), 231-240.
- Le, T. V., Imai, T., Higuchi, T., Yamamoto, K., Sekine, M., Doi, R., . . . Wei, J. (2013). Performance of tiny microbubbles enhanced with “normal cyclone bubbles” in separation of fine oil-in-water emulsions. *Chemical Engineering Science*, 94, 1-6.
- Levenspiel, O. (1999). Chemical Reaction Engineering (3rd ed.). United States of America: John Wiley & Son, Inc.
- Li, L., Gao, N., Deng, Y., Yao, J., and Zhang, K. (2012). Characterization of intracellular & extracellular algae organic matters (AOM) of *Microcystis aeruginosa* and formation of AOM-associated disinfection byproducts and odor & taste compounds. *Water Res*, 46(4), 1233-1240.
- Liu, J. C., Chen, Y. M., and Ju, Y. H. (1999). Separation of Algal Cells from Water by Column flotation. *Separation Science and Technology*, 34(11), 2259-2272.
- Means, R. E. and Parcher, J. V. (1963). Physical properties of soils: C.E. Merrill Books.
- Metcalf & Eddy, I., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., and Stensel, H. D. (2002). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th ed.). United States of America: McGraw-Hill.

- Mills, P. J. T. and O'Connor, C. T. (1992). Technical note the use of the axial dispersion model to describe mixing in a flotation column. *Minerals Engineering*, 5, 939-944.
- Mouchet, P. and Bonnelye, V. (1998). Solving algae problems: French expertise and world-wide applications. *Water Services Resource Technology*, 47, 125-141.
- Phoochinda, W. and White, D. A. (2003). Removal of algae using froth flotation. *Environmental Technology*, 24(1), 87-96.
- Sabater, S. (1995). Algae in Urban Drinking Water in N.E. Spain. *Journal of Applied Phycology*, 7, 455-460.
- Sanyano, N., Chetpattananondh, P., and Chongkhong, S. (2013). Coagulation-flocculation of marine *Chlorella* sp. for biodiesel production. *Bioresour Technol*, 147, 471-476.
- Shawwa, A. R. and Smith, D. W. (1998). Hydrodynamic characterization in dissolved air flotation (DAF) contact zone. *Water Science and Technology*, 38(6), 245-252.
- Sherfold, H. L. (1984). Flotation in mineral processing. Netherlands: Martinus Nijhoff.
- Show, K. Y., Lee, D. J., and Chang, J. S. (2013). Algal biomass dehydration. *Bioresour Technol*, 135, 720-729.
- Tambo, N., Matsui, Y., and Fukushi, K. (1986). *A kinetic study of dissolved air flotation*. Paper presented at the World congress of chemical engineering, Japan.
- Valade, M. T., Becker, W. B., and Edzwald, J. K. (2009). Treatment selection guidelines for particle and NOM removal. *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, 58(6), 424-432.
- Vane, L. M. and Zang, G. M. (1997). Effect of aqueous phase properties on clay particle zeta potential and electroosmotic permeability. *J Hazard Mater*, 55, 1-22.
- Vlaski, A., Van, A. N., and Alaerts, G. J. (1996). Optimisation of coagulation conditions for the removal of cyanobacteria by dissolved air flotation or sedimentation. *Aqua*, 45, 253-261.
- Xu, M. and Finch, J. A. (1991). The axial dispersion model in flotation column studies. *Minerals Engineering*, 4, 553-562.

- ทันดาว ทองตัน. (2545). สาหร่ายในกระบวนการผลิตน้ำประปาที่โรงผลิตน้ำประปาสามเสน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์ ท้อป จำกัด.
- พลอยไพลิน ร่มโพธิ์ภักดิ์. (2556). การกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอนสัมผัสแบบหมุนเวียนตะกอน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล. (2558). หน่วยกระบวนการสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันจุลเวศม์. (2538). วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ยุวดี พิรพรพิศาล. (2549). สาหร่ายวิทยา. เชียงใหม่: ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ลัดดา วงศ์รัตน์. (2543). คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรภา ปรีชาวาท. (2556). การแยกสาหร่ายจากเฟสของเหลวด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการทำให้
ลอยด้วยอากาศละลาย กระบวนการโคแอกกูเลชัน และการกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญา
โทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อาภารัตน์ มหาจันทร์. (2541). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสาหร่าย: ศูนย์เก็บรักษาและรวบรวมข้อมูล
จุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.



ภาคผนวก

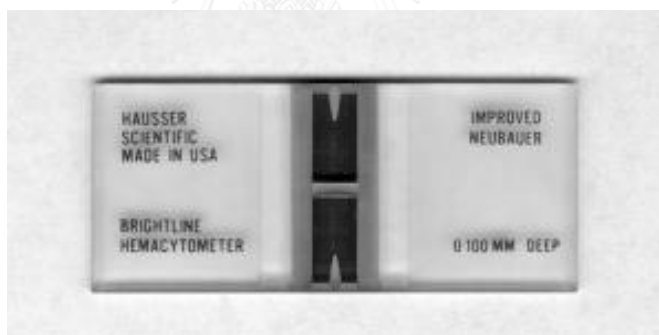
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

วิธีการนับเซลล์สาหร่าย

การวัดความเข้มข้นสาหร่ายโดยวิธีการนับเซลล์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากในการศึกษาเกี่ยวกับการเจริญเติบโตหรือปริมาณสาหร่าย เนื่องด้วยเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว โดยในการนับเซลล์สาหร่ายจะใช้ Haemocytometer counting chamber ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการนับเซลล์เม็ดเลือดแดง จึงสามารถประยุกต์มาใช้ในการนับจำนวนสาหร่ายเซลล์เดียว เช่น *Chlorella vulgaris* ซึ่งมีขนาดเซลล์ใกล้เคียงกับเซลล์เม็ดเลือดแดง

Haemocytometer counting chamber ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด Neubauer improved bright-line ซึ่งทราบขนาดของช่องที่แน่นอน คือ 0.0025 มม.^2 และมีความลึก 0.100 มม. โดยตัวอย่างของ Haemocytometer counting chamber และพื้นที่ตารางสำหรับนับเซลล์สาหร่ายแสดงดังรูปที่ ก-1 และ ก-2



รูปที่ ก-1 Haemocytometer counting chamber

วิธีการใช้ Haemocytometer counting chamber

1. หยดตัวอย่างสาหร่ายที่ต้องการนับจำนวนลงไป 1 หยด ในช่องใส่ตัวอย่าง (Load port) ของ Haemocytometer ที่มีกระจกปิดสไลด์ปิดอยู่ ตัวอย่างสาหร่ายจะกระจายไปทั่วตารางสี่เหลี่ยม
2. วาง Haemocytometer ทิ้งไว้ 1 นาที เพื่อให้เซลล์สาหร่ายจมลงสู่พื้นสไลด์

3. วาง Haemocytometer บนแท่นกล้องจุลทรรศน์ ปรับกล้อง และเริ่มกำลังขยายจากต่ำไปสูง
4. นับเซลล์สำหรับรายบนช่องสี่เหลี่ยมตรงกลาง (25 ช่องใหญ่ ซึ่งภายในมีตารางขนาดเล็กจำนวน 16 ช่อง)

หมายเหตุ : 1) ถ้าจำนวนเซลล์สำหรับรายหนาแน่นสูง อาจสุ่มนับ 5 ช่อง แต่ผลที่ได้ต้องคูณ 5 หรือ สุ่มนับ 10 ช่อง ผลที่ได้ต้องคูณ 2.5

2) ถ้าเซลล์สำหรับรายทับเส้นให้เลือกรับแบบใดแบบหนึ่งต่อไปนี้

- ทับเส้นแนวนบน และเส้นแนวขวาใบนับ (ซ้าย-ล่าง ไม่นับ)
- ทับเส้นแนวล่าง และเส้นแนวซ้ายใบนับ (ขวา-บน ไม่นับ)

5. ทำการนับจำนวนเซลล์สำหรับทั้ง 2 ตาราง (สมมุติทำการนับได้ n และ m เซลล์)

$$\text{ความเข้มข้นสำหรับราย} = \frac{n+mm}{2} \times 10^4 \text{ เซลล์ต่อมิลลิลิตร}$$

หรือคำนวณปริมาณสำหรับรายจากสูตร

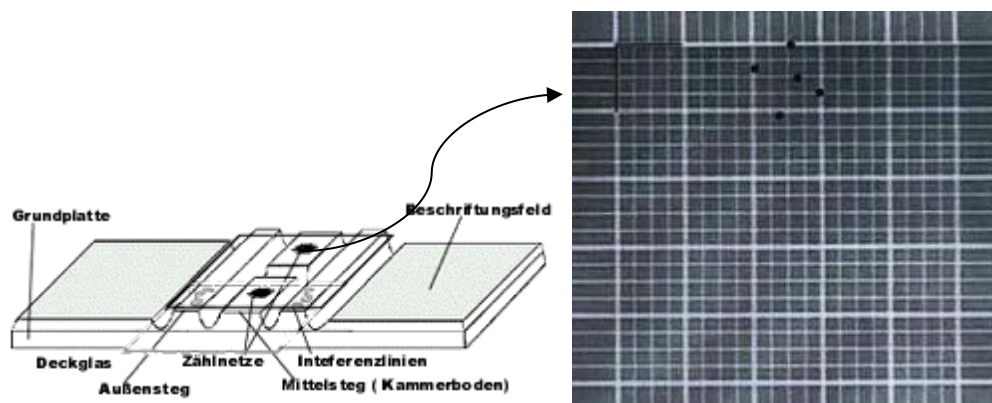
$$\text{ความเข้มข้นสำหรับราย} = \frac{CC \times 1000 \text{ มม.}^3}{AA \times DD \times FF}$$

เมื่อ C = จำนวนสำหรับรายที่นับได้

A = พื้นที่ของ grids 0.04 ตารางมิลลิเมตร

D = ความลึกของพื้นที่ที่นับ 0.1 มิลลิเมตร

F = จำนวนช่องหรือตารางที่นับ



รูปที่ ก-2 พื้นที่ตารางสำหรับนับเซลล์สำหรับย่าย

ตัวอย่างการนับเซลล์สำหรับย่าย

ในตารางเล็กๆ 16 ตารางในตารางใหญ่ หมายเลข 1 นับสาหรัยได้ 50 เซลล์

หมายเลข 2 นับสาหรัยได้ 28 เซลล์

หมายเลข 3 นับสาหรัยได้ 42 เซลล์

หมายเลข 4 นับสาหรัยได้ 71 เซลล์

หมายเลข 5 นับสาหรัยได้ 35 เซลล์

หมายเลข 6 นับสาหรัยได้ 43 เซลล์

หมายเลข 7 นับสาหรัยได้ 54 เซลล์

หมายเลข 8 นับสาหรัยได้ 19 เซลล์

หมายเลข 9 นับสาหรัยได้ 22 เซลล์

ดังนั้น ใน 9 ตารางใหญ่ นับได้ $50 + 28 + 42 + 71 + 35 + 43 + 54 + 19 + 22 = 364$ เซลล์

เนื้อที่ในตารางใหญ่แต่ละตาราง = $16/400$ ตารางมิลลิเมตร

ดังนั้น $9 \times 16/400$ ตารางมิลลิเมตรมีสาหร่าย = 354 เซลล์

ใน 1 ตารางมิลลิเมตรมีสาหร่าย $\frac{364 \times 1 \times 400}{9 \times 16} = \frac{145600}{144} = 1011$ เซลล์

Media มีความลึก = 0.1 มิลลิเมตร

ใน 1×0.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตรมีสาหร่าย = 1011 เซลล์

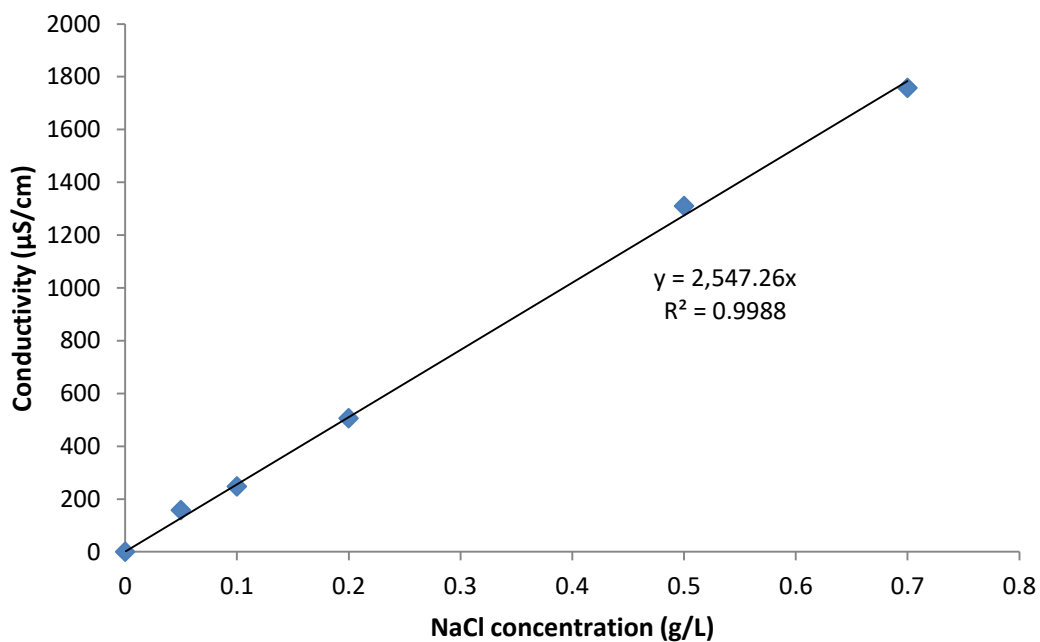
ใน 1 ลูกบาศก์มิลลิเมตรมีสาหร่าย $\frac{1011 \times 1}{1 \times 0.1} = 10110$ เซลล์

ใน 1 มิลลิลิตร (ลบ.ชม.) จะมีสาหร่าย 10110×10^3 เซลล์



ภาคผนวก ข

ผลข้อมูลการศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาด้วยทฤษฎีการกระจายตัว
ของเวลากัก (Residence time distribution)



รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชี้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	453	0	0	0	0	0	0
1	453	0	0	0	0	0	0
2	453	0	0	0	0	0	0
3	453	0	0	0	0	0	0
4	453	0	0	0	0	0	0
5	453	0	0	0	0	0	0
6	453	0	0	0	0	0	0
7	453	0	0	0	0	0	0
8	453	0	0	0	0	0	0
9	453	0	0	0	0	0	0
10	453	0	0	0	0	0	0
11	453	0	0	0	0	0	0
12	453	0	0	0	0	0	0
13	453	0	0	0	0	0	0
14	453	0	0	0	0	0	0
15	453	0	0	0	0	0	0
16	453	0	0	0	0	0	0
17	453	0	0	0	0	0	0
18	453	0	0	0	0	0	0
19	453	0	0	0	0	0	0
20	453	0	0	0	0	0	0
21	453	0	0	0	0	0	0
22	475	22	0.0086367	0.0086367	0.1900081	4.1801779	0.002181
23	482	29	0.0113848	0.0113848	0.26185	6.0225497	0.002875
24	502	49	0.0192364	0.0192364	0.4616725	11.080141	0.004857
25	525	72	0.0282657	0.0282657	0.7066416	17.666041	0.007137
26	542	89	0.0349395	0.0349395	0.9084271	23.619104	0.008822
27	557	104	0.0408282	0.0408282	1.102361	29.763746	0.010309
28	575	122	0.0478946	0.0478946	1.3410488	37.549367	0.012094
29	585	132	0.0518204	0.0518204	1.5027912	43.580946	0.013085
30	597	144	0.0565313	0.0565313	1.69594	50.878199	0.014274
31	607	154	0.0604571	0.0604571	1.8741707	58.099291	0.015266
32	617	164	0.0643829	0.0643829	2.060253	65.928095	0.016257
33	625	172	0.0675235	0.0675235	2.2282767	73.53313	0.01705
34	630	177	0.0694864	0.0694864	2.3625386	80.326311	0.017546

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
35	637	184	0.0722345	0.0722345	2.5282068	88.487237	0.018239
36	642	189	0.0741974	0.0741974	2.6711054	96.159795	0.018735
37	645	192	0.0753751	0.0753751	2.788879	103.18852	0.019033
38	647	194	0.0761603	0.0761603	2.8940901	109.97542	0.019231
39	647	194	0.0761603	0.0761603	2.9702504	115.83977	0.019231
40	650	197	0.077338	0.077338	3.0935201	123.7408	0.019528
41	647	194	0.0761603	0.0761603	3.1225709	128.02541	0.019231
42	647	194	0.0761603	0.0761603	3.1987312	134.34671	0.019231
43	647	194	0.0761603	0.0761603	3.2748915	140.82033	0.019231
44	647	194	0.0761603	0.0761603	3.3510517	147.44628	0.019231
45	647	194	0.0761603	0.0761603	3.427212	154.22454	0.019231
46	645	192	0.0753751	0.0753751	3.467255	159.49373	0.019033
47	642	189	0.0741974	0.0741974	3.4872765	163.902	0.018735
48	637	184	0.0722345	0.0722345	3.467255	166.42824	0.018239
49	637	184	0.0722345	0.0722345	3.5394895	173.43499	0.018239
50	635	182	0.0714493	0.0714493	3.5724661	178.62331	0.018041
51	627	174	0.0683087	0.0683087	3.4837433	177.67091	0.017248
52	627	174	0.0683087	0.0683087	3.552052	184.7067	0.017248
53	622	169	0.0663458	0.0663458	3.5163273	186.36535	0.016753
54	615	162	0.0635977	0.0635977	3.4342784	185.45103	0.016059
55	615	162	0.0635977	0.0635977	3.4978761	192.38319	0.016059
56	607	154	0.0604571	0.0604571	3.3855986	189.59352	0.015266
57	607	154	0.0604571	0.0604571	3.4460558	196.42518	0.015266
58	602	149	0.0584942	0.0584942	3.3926651	196.77457	0.01477
59	597	144	0.0565313	0.0565313	3.3353486	196.78557	0.014274
60	595	142	0.0557462	0.0557462	3.3447705	200.68623	0.014076
61	590	137	0.0537833	0.0537833	3.2807801	200.12759	0.01358
62	585	132	0.0518204	0.0518204	3.212864	199.19757	0.013085
63	585	132	0.0518204	0.0518204	3.2646844	205.67512	0.013085
64	577	124	0.0486798	0.0486798	3.1155045	199.39229	0.012292
65	575	122	0.0478946	0.0478946	3.113149	202.35469	0.012094
66	575	122	0.0478946	0.0478946	3.1610436	208.62888	0.012094
67	567	114	0.044754	0.044754	2.9985161	200.90058	0.011301
68	565	112	0.0439688	0.0439688	2.9898793	203.31179	0.011102
69	562	109	0.0427911	0.0427911	2.9525843	203.72832	0.010805

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
70	557	104	0.0408282	0.0408282	2.8579729	200.0581	0.010309
71	555	102	0.040043	0.040043	2.8430549	201.8569	0.010111
72	550	97	0.0380801	0.0380801	2.7417696	197.40741	0.009615
73	547	94	0.0369024	0.0369024	2.693875	196.65287	0.009318
74	545	92	0.0361172	0.0361172	2.6726757	197.778	0.00912
75	545	92	0.0361172	0.0361172	2.708793	203.15947	0.00912
76	537	84	0.0329766	0.0329766	2.5062224	190.4729	0.008327
77	535	82	0.0321915	0.0321915	2.4787419	190.86312	0.008128
78	535	82	0.0321915	0.0321915	2.5109333	195.8528	0.008128
79	530	77	0.0302286	0.0302286	2.3880562	188.65644	0.007633
80	527	74	0.0290508	0.0290508	2.3240659	185.92527	0.007335
81	525	72	0.0282657	0.0282657	2.2895189	185.45103	0.007137
82	525	72	0.0282657	0.0282657	2.3177846	190.05834	0.007137
83	522	69	0.0270879	0.0270879	2.2482982	186.60875	0.00684
84	517	64	0.025125	0.025125	2.1105031	177.28226	0.006344
85	517	64	0.025125	0.025125	2.1356281	181.52839	0.006344
86	517	64	0.025125	0.025125	2.1607531	185.82477	0.006344
87	515	62	0.0243399	0.0243399	2.1175695	184.22854	0.006146
88	510	57	0.022377	0.022377	1.9691747	173.28738	0.00565
89	507	54	0.0211992	0.0211992	1.8867332	167.91925	0.005353
90	505	52	0.0204141	0.0204141	1.8372683	165.35415	0.005155
91	505	52	0.0204141	0.0204141	1.8576824	169.0491	0.005155
92	505	52	0.0204141	0.0204141	1.8780965	172.78487	0.005155
93	502	49	0.0192364	0.0192364	1.7889811	166.37524	0.004857
94	502	49	0.0192364	0.0192364	1.8082175	169.97244	0.004857
95	497	44	0.0172735	0.0172735	1.6409789	155.893	0.004362
96	495	42	0.0164883	0.0164883	1.5828773	151.95622	0.004163
97	495	42	0.0164883	0.0164883	1.5993656	155.13846	0.004163
98	495	42	0.0164883	0.0164883	1.6158539	158.35368	0.004163
99	490	37	0.0145254	0.0145254	1.4380158	142.36356	0.003668
100	490	37	0.0145254	0.0145254	1.4525412	145.25412	0.003668
101	487	34	0.0133477	0.0133477	1.3481152	136.15964	0.00337
102	487	34	0.0133477	0.0133477	1.3614629	138.86922	0.00337
103	485	32	0.0125625	0.0125625	1.2939394	133.27576	0.003172
104	485	32	0.0125625	0.0125625	1.3065019	135.8762	0.003172

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
105	482	29	0.0113848	0.0113848	1.1954021	125.51722	0.002875
106	485	32	0.0125625	0.0125625	1.3316269	141.15245	0.003172
107	482	29	0.0113848	0.0113848	1.2181717	130.34437	0.002875
108	477	24	0.0094219	0.0094219	1.017564	109.89691	0.002379
109	477	24	0.0094219	0.0094219	1.0269859	111.94146	0.002379
110	477	24	0.0094219	0.0094219	1.0364077	114.00485	0.002379
111	477	24	0.0094219	0.0094219	1.0458296	116.08709	0.002379
112	477	24	0.0094219	0.0094219	1.0552515	118.18817	0.002379
113	475	22	0.0086367	0.0086367	0.9759506	110.28242	0.002181
114	475	22	0.0086367	0.0086367	0.9845874	112.24296	0.002181
115	475	22	0.0086367	0.0086367	0.9932241	114.22077	0.002181
116	470	17	0.0066738	0.0066738	0.7741652	89.803161	0.001685
117	470	17	0.0066738	0.0066738	0.780839	91.358165	0.001685
118	470	17	0.0066738	0.0066738	0.7875129	92.926517	0.001685
119	470	17	0.0066738	0.0066738	0.7941867	94.508217	0.001685
120	467	14	0.0054961	0.0054961	0.6595322	79.143864	0.001388
121	467	14	0.0054961	0.0054961	0.6650283	80.468425	0.001388
122	467	14	0.0054961	0.0054961	0.6705244	81.803978	0.001388
123	467	14	0.0054961	0.0054961	0.6760205	83.150523	0.001388
124	467	14	0.0054961	0.0054961	0.6815166	84.50806	0.001388
125	467	14	0.0054961	0.0054961	0.6870127	85.876589	0.001388
126	467	14	0.0054961	0.0054961	0.6925088	87.25611	0.001388
127	467	14	0.0054961	0.0054961	0.6980049	88.646624	0.001388
128	467	14	0.0054961	0.0054961	0.703501	90.04813	0.001388
129	465	12	0.0047109	0.0047109	0.6077118	78.394824	0.00119
130	465	12	0.0047109	0.0047109	0.6124228	79.614959	0.00119
131	465	12	0.0047109	0.0047109	0.6171337	80.844515	0.00119
132	465	12	0.0047109	0.0047109	0.6218446	82.083494	0.00119
133	465	12	0.0047109	0.0047109	0.6265556	83.331894	0.00119
134	465	12	0.0047109	0.0047109	0.6312665	84.589716	0.00119
135	465	12	0.0047109	0.0047109	0.6359775	85.85696	0.00119
136	462	9	0.0035332	0.0035332	0.4805163	65.350219	0.000892
137	465	12	0.0047109	0.0047109	0.6453994	88.419714	0.00119
138	462	9	0.0035332	0.0035332	0.4875827	67.286418	0.000892
139	462	9	0.0035332	0.0035332	0.4911159	68.265116	0.000892

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
140	462	9	0.0035332	0.0035332	0.4946492	69.250881	0.000892
141	462	9	0.0035332	0.0035332	0.4981824	70.243713	0.000892
142	462	9	0.0035332	0.0035332	0.5017156	71.243611	0.000892
143	462	9	0.0035332	0.0035332	0.5052488	72.250575	0.000892
144	462	9	0.0035332	0.0035332	0.508782	73.264606	0.000892
145	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2276956	33.015868	0.000397
146	457	4	0.0015703	0.0015703	0.229266	33.47283	0.000397
147	462	9	0.0035332	0.0035332	0.5193816	76.349097	0.000892
148	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2324066	34.396175	0.000397
149	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2339769	34.862558	0.000397
150	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2355472	35.332082	0.000397
151	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2371175	35.804747	0.000397
152	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2386878	36.280552	0.000397
153	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2402582	36.759498	0.000397
154	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2418285	37.241585	0.000397
155	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2433988	37.726812	0.000397
156	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2449691	38.21518	0.000397
157	457	4	0.0015703	0.0015703	0.2465394	38.706689	0.000397
158	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1240549	19.600669	0.000198
159	455	2	0.0007852	0.0007852	0.12484	19.849564	0.000198
160	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1256252	20.100029	0.000198
161	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1264103	20.352065	0.000198
162	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1271955	20.60567	0.000198
163	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1279807	20.860847	0.000198
164	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1287658	21.117593	0.000198
165	455	2	0.0007852	0.0007852	0.129551	21.37591	0.000198
166	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1303361	21.635797	0.000198
167	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1311213	21.897254	0.000198
168	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1319064	22.160282	0.000198
169	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1326916	22.42488	0.000198
170	455	2	0.0007852	0.0007852	0.1334768	22.691048	0.000198
171	454	1	0.0003926	0.0003926	0.067131	11.479394	9.91E-05
172	454	1	0.0003926	0.0003926	0.0675235	11.614048	9.91E-05
173	454	1	0.0003926	0.0003926	0.0679161	11.749488	9.91E-05
174	454	1	0.0003926	0.0003926	0.0683087	11.885712	9.91E-05

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซึ้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
175	454	1	0.0003926	0.0003926	0.0687013	12.022722	9.91E-05
176	454	1	0.0003926	0.0003926	0.0690938	12.160518	9.91E-05
177	454	1	0.0003926	0.0003926	0.0694864	12.299098	9.91E-05
178	454	1	0.0003926	0.0003926	0.069879	12.438463	9.91E-05
179	454	1	0.0003926	0.0003926	0.0702716	12.578614	9.91E-05
180	454	1	0.0003926	0.0003926	0.0706642	12.71955	9.91E-05
181	453	0	0	0	0	0	0
182	453	0	0	0	0	0	0
183	453	0	0	0	0	0	0
184	453	0	0	0	0	0	0
185	453	0	0	0	0	0	0
186	453	0	0	0	0	0	0
187	453	0	0	0	0	0	0
188	453	0	0	0	0	0	0
189	453	0	0	0	0	0	0
190	453	0	0	0	0	0	0
				3.9603338	237.65144	17051.522	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซึ้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที

Time	C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0.01436	0.01436	0.315919	6.9502188	0.003922
23	0.0455416	0.0455416	1.0474562	24.091493	0.012437
24	0.0635941	0.0635941	1.5262582	36.630197	0.017367
25	0.0763129	0.0763129	1.9078228	47.695569	0.020841
26	0.0791849	0.0791849	2.0588074	53.528993	0.021625
27	0.0734448	0.0734448	1.98301	53.541271	0.020057
28	0.072214	0.072214	2.021991	56.615747	0.019721
29	0.0773144	0.0773144	2.2421178	65.021417	0.021114
30	0.0755274	0.0755274	2.2658225	67.974674	0.020626
31	0.0808962	0.0808962	2.5077818	77.741236	0.022092
32	0.0887462	0.0887462	2.8398769	90.876059	0.024236
33	0.0866908	0.0866908	2.8607975	94.406316	0.023675
34	0.0816099	0.0816099	2.7747357	94.341013	0.022287
35	0.0803556	0.0803556	2.8124473	98.435655	0.021945
36	0.079014	0.079014	2.8445041	102.40215	0.021578
37	0.0805405	0.0805405	2.9799971	110.25989	0.021995
38	0.0732856	0.0732856	2.7848531	105.82442	0.020014
39	0.0760273	0.0760273	2.965066	115.63757	0.020763
40	0.0746857	0.0746857	2.987428	119.49712	0.020396
41	0.0735734	0.0735734	3.0165103	123.67692	0.020093
42	0.0723231	0.0723231	3.0375694	127.57792	0.019751

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	C(t)	C(t)dt	t·C(t)dt	t ² ·C(t)dt	E(t)
43	0.0748238	0.0748238	3.2174217	138.34913	0.020434
44	0.0697623	0.0697623	3.0695406	135.05979	0.019052
45	0.067565	0.067565	3.0404254	136.81914	0.018452
46	0.065076	0.065076	2.993497	137.70086	0.017772
47	0.0644286	0.0644286	3.0281436	142.32275	0.017595
48	0.0612727	0.0612727	2.9410887	141.17226	0.016733
49	0.0612883	0.0612883	3.0031252	147.15314	0.016738
50	0.0617025	0.0617025	3.0851226	154.25613	0.016851
51	0.0588071	0.0588071	2.9991609	152.95721	0.01606
52	0.0593827	0.0593827	3.0879005	160.57083	0.016217
53	0.0558321	0.0558321	2.9591013	156.83237	0.015247
54	0.0528065	0.0528065	2.8515488	153.98364	0.014421
55	0.0524157	0.0524157	2.8828613	158.55737	0.014314
56	0.0478714	0.0478714	2.6807958	150.12457	0.013073
57	0.0495398	0.0495398	2.823767	160.95472	0.013529
58	0.0477567	0.0477567	2.7698872	160.65346	0.013042
59	0.0456819	0.0456819	2.6952304	159.01859	0.012476
60	0.0417015	0.0417015	2.5020899	150.1254	0.011388
61	0.0399106	0.0399106	2.4345472	148.50738	0.010899
62	0.041859	0.041859	2.5952608	160.90617	0.011432
63	0.0370542	0.0370542	2.334415	147.06815	0.010119
64	0.0416063	0.0416063	2.6628036	170.41943	0.011362
65	0.0392788	0.0392788	2.5531196	165.95278	0.010727
66	0.037622	0.037622	2.4830544	163.88159	0.010274
67	0.0358273	0.0358273	2.4004258	160.82853	0.009784
68	0.0373498	0.0373498	2.5397873	172.70554	0.0102
69	0.0336456	0.0336456	2.3215437	160.18652	0.009188
70	0.0350262	0.0350262	2.4518317	171.62822	0.009565
71	0.0343398	0.0343398	2.4381231	173.10674	0.009378
72	0.0329786	0.0329786	2.3744622	170.96128	0.009006
73	0.03146	0.03146	2.2965782	167.65021	0.008592
74	0.0304858	0.0304858	2.2559461	166.94001	0.008326
75	0.0262254	0.0262254	1.9669025	147.51769	0.007162
76	0.023472	0.023472	1.7838683	135.57399	0.00641
77	0.0273571	0.0273571	2.1064991	162.20043	0.007471

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
78	0.0262449	0.0262449	2.0470985	159.67368	0.007167
79	0.0221108	0.0221108	1.7467557	137.9937	0.006038
80	0.0201858	0.0201858	1.6148622	129.18898	0.005513
81	0.0187974	0.0187974	1.5225877	123.3296	0.005133
82	0.0176812	0.0176812	1.4498587	118.88841	0.004829
83	0.0247262	0.0247262	2.0522735	170.3387	0.006753
84	0.0227972	0.0227972	1.9149679	160.8573	0.006226
85	0.0185329	0.0185329	1.5753007	133.90056	0.005061
86	0.017969	0.017969	1.5453353	132.89884	0.004907
87	0.0146712	0.0146712	1.2763902	111.04594	0.004007
88	0.0119216	0.0119216	1.0491036	92.321119	0.003256
89	0.010541	0.010541	0.9381514	83.495474	0.002879
90	0.0091682	0.0091682	0.8251394	74.262548	0.002504
91	0.0094365	0.0094365	0.8587254	78.14401	0.002577
92	0.0177241	0.0177241	1.6306146	150.01654	0.00484
93	0.0146906	0.0146906	1.3662292	127.05932	0.004012
94	0.0105605	0.0105605	0.9926882	93.312688	0.002884
95	0.0079413	0.0079413	0.7544197	71.669868	0.002169
96	0.0069748	0.0069748	0.6695842	64.280088	0.001905
97	0.0072549	0.0072549	0.7037208	68.260922	0.001981
98	0.007531	0.007531	0.7380356	72.327485	0.002057
99	0.0090535	0.0090535	0.8963003	88.733726	0.002472
100	0.0064343	0.0064343	0.6434285	64.342851	0.001757
101	0.005744	0.005744	0.5801422	58.594365	0.001569
102	0.0054757	0.0054757	0.5585169	56.968722	0.001495
103	0.0049234	0.0049234	0.5071116	52.232495	0.001345
104	0.0096214	0.0096214	1.0006223	104.06472	0.002628
105	0.0085208	0.0085208	0.8946821	93.941616	0.002327
106	0.0082447	0.0082447	0.873934	92.637004	0.002252
107	0.0032823	0.0032823	0.3512035	37.578775	0.000896
108	0.0092189	0.0092189	0.9956389	107.529	0.002518
109	0.0065996	0.0065996	0.7193592	78.41015	0.001802
110	0.002872	0.002872	0.315919	34.751094	0.000784
111	0.002872	0.002872	0.318791	35.385804	0.000784
112	0.008935	0.008935	1.0007159	112.08018	0.00244

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
113	0.002872	0.002872	0.324535	36.672456	0.000784
114	0.0024617	0.0024617	0.2806346	31.992341	0.000672
115	0.0063313	0.0063313	0.7280993	83.731424	0.001729
116	0.0060552	0.0060552	0.7024006	81.478469	0.001654
117	0.0057791	0.0057791	0.6761496	79.109505	0.001578
118	0.0041223	0.0041223	0.486435	57.399326	0.001126
119	0.0044023	0.0044023	0.5238795	62.341655	0.001202
120	0.0034359	0.0120257	1.4430884	173.1706	0.000938
125	0.0037159	0.0185797	2.3224643	290.30804	0.001015
130	0.0015148	0.0075738	0.9845996	127.99795	0.000414
135	0.002067	0.0103351	1.3952323	188.35636	0.000564
140	0.0012425	0.0062127	0.8697813	121.76938	0.000339
145	0.0008284	0.0041418	0.6005633	87.081677	0.000226
150	0.0008284	0.0041418	0.6212724	93.190855	0.000226
155	0.0006903	0.0034515	0.5349845	82.922603	0.000189
160	0.0004142	0.0020709	0.3313453	53.015242	0.000113
165	0.0002761	0.0013806	0.2277999	37.586978	7.54E-05
170	0.0002761	0.0013806	0.2347029	39.899492	7.54E-05
175	0.0001381	0.0006903	0.120803	21.140518	3.77E-05
180	0	0	0	0	0
185	0	0	0	0	0
190	0	0	0	0	0
195	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0
205	0	0	0	0	0
		3.661722	192.74763	12235.053	

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	462	0	0	0	0	0	0
1	462	0	0	0	0	0	0
2	462	0	0	0	0	0	0
3	462	0	0	0	0	0	0
4	462	0	0	0	0	0	0
5	484	22	0.0086367	0.0086367	0.0431837	0.2159183	0.000742
6	477	15	0.0058887	0.0058887	0.0353321	0.2119925	0.000506
7	524	62	0.0243399	0.0243399	0.1703792	1.1926541	0.002092
8	577	115	0.0451465	0.0451465	0.3611724	2.8893792	0.00388
9	589	127	0.0498575	0.0498575	0.4487174	4.038457	0.004285
10	637	175	0.0687013	0.0687013	0.6870127	6.8701271	0.005904
11	757	295	0.1158107	0.1158107	1.2739179	14.013096	0.009953
12	764	302	0.1185588	0.1185588	1.4227052	17.072462	0.010189
13	797	335	0.1315139	0.1315139	1.7096802	22.225843	0.011302
14	864	402	0.1578166	0.1578166	2.2094329	30.93206	0.013563
15	894	432	0.169594	0.169594	2.5439099	38.158649	0.014575
16	927	465	0.1825491	0.1825491	2.9207855	46.732568	0.015688
17	929	467	0.1833342	0.1833342	3.1166822	52.983598	0.015756
18	994	532	0.2088519	0.2088519	3.7593336	67.668004	0.017949
19	1004	542	0.2127777	0.2127777	4.0427754	76.812732	0.018286
20	1036	574	0.2253402	0.2253402	4.5068034	90.136068	0.019366
21	1029	567	0.2225921	0.2225921	4.6744345	98.163124	0.01913
22	1024	562	0.2206292	0.2206292	4.853843	106.78454	0.018961
23	1036	574	0.2253402	0.2253402	5.1828239	119.20495	0.019366
24	1026	564	0.2214144	0.2214144	5.3139452	127.53468	0.019028
25	1036	574	0.2253402	0.2253402	5.6335042	140.83761	0.019366
26	1041	579	0.2273031	0.2273031	5.9098796	153.65687	0.019534
27	1041	579	0.2273031	0.2273031	6.1371827	165.70393	0.019534
28	1041	579	0.2273031	0.2273031	6.3644858	178.2056	0.019534
29	1041	579	0.2273031	0.2273031	6.5917888	191.16188	0.019534
30	1036	574	0.2253402	0.2253402	6.7602051	202.80615	0.019366
31	1026	564	0.2214144	0.2214144	6.8638459	212.77922	0.019028
32	1022	560	0.2198441	0.2198441	7.0350102	225.12033	0.018893
33	1014	552	0.2167034	0.2167034	7.1512135	235.99004	0.018623
34	1002	540	0.2119925	0.2119925	7.2077448	245.06332	0.018219

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
35	974	512	0.2010003	0.2010003	7.0350102	246.22536	0.017274
36	964	502	0.1970745	0.1970745	7.0946821	255.40856	0.016937
37	954	492	0.1931487	0.1931487	7.1465025	264.42059	0.016599
38	934	472	0.1852971	0.1852971	7.0412914	267.56907	0.015924
39	924	462	0.1813714	0.1813714	7.0734829	275.86583	0.015587
40	914	452	0.1774456	0.1774456	7.0978228	283.91291	0.01525
41	904	442	0.1735198	0.1735198	7.1143111	291.68675	0.014912
42	889	427	0.1676311	0.1676311	7.0405063	295.70126	0.014406
43	882	420	0.1648831	0.1648831	7.0899712	304.86876	0.01417
44	877	415	0.1629202	0.1629202	7.1684869	315.41342	0.014001
45	867	405	0.1589944	0.1589944	7.1547467	321.9636	0.013664
46	862	400	0.1570315	0.1570315	7.2234479	332.27861	0.013495
47	854	392	0.1538908	0.1538908	7.2328698	339.94488	0.013225
48	834	372	0.1460393	0.1460393	7.0098851	336.47449	0.012551
49	824	362	0.1421135	0.1421135	6.9635608	341.21448	0.012213
50	814	352	0.1381877	0.1381877	6.909385	345.46925	0.011876
51	802	340	0.1334768	0.1334768	6.8073145	347.17304	0.011471
52	797	335	0.1315139	0.1315139	6.8387208	355.61348	0.011302
53	784	322	0.1264103	0.1264103	6.699748	355.08664	0.010864
54	767	305	0.1197365	0.1197365	6.4657711	349.15164	0.01029
55	754	292	0.114633	0.114633	6.3048138	346.76476	0.009852
56	734	272	0.1067814	0.1067814	5.9797586	334.86648	0.009177
57	729	267	0.1048185	0.1048185	5.9746551	340.55534	0.009008
58	722	260	0.1020705	0.1020705	5.9200867	343.36503	0.008772
59	709	247	0.0969669	0.0969669	5.7210493	337.54191	0.008333
60	702	240	0.0942189	0.0942189	5.6531332	339.18799	0.008097
61	697	235	0.0922256	0.0922256	5.6276156	343.28455	0.007928
62	689	227	0.0891154	0.0891154	5.5251525	342.55946	0.007659
63	684	222	0.0871525	0.0871525	5.4906056	345.90815	0.00749
64	677	215	0.0844044	0.0844044	5.4018828	345.7205	0.007254
65	669	207	0.0812638	0.0812638	5.2821463	343.33951	0.006984
66	662	200	0.0785157	0.0785157	5.1820387	342.01456	0.006748
67	664	202	0.0793009	0.0793009	5.31316	355.98172	0.006815
68	654	192	0.0753751	0.0753751	5.1255074	348.5345	0.006478
69	637	175	0.0687013	0.0687013	4.7403877	327.08675	0.005904

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
70	629	167	0.0655606	0.0655606	4.5892449	321.24714	0.005634
71	627	165	0.0647755	0.0647755	4.5990594	326.53322	0.005567
72	617	155	0.0608497	0.0608497	4.3811782	315.44483	0.005229
73	614	152	0.059672	0.059672	4.3560532	317.99188	0.005128
74	607	145	0.0569239	0.0569239	4.2123694	311.71533	0.004892
75	604	142	0.0557462	0.0557462	4.1809631	313.57223	0.004791
76	597	135	0.0529981	0.0529981	4.0278574	306.11716	0.004555
77	594	132	0.0518204	0.0518204	3.9901698	307.24308	0.004453
78	584	122	0.0478946	0.0478946	3.7357788	291.39075	0.004116
79	584	122	0.0478946	0.0478946	3.7836734	298.9102	0.004116
80	582	120	0.0471094	0.0471094	3.7687554	301.50044	0.004049
81	574	112	0.0439688	0.0439688	3.5614739	288.47939	0.003779
82	574	112	0.0439688	0.0439688	3.6054427	295.6463	0.003779
83	569	107	0.0420059	0.0420059	3.4864914	289.37878	0.00361
84	574	112	0.0439688	0.0439688	3.6933803	310.24395	0.003779
85	564	102	0.040043	0.040043	3.4036573	289.31087	0.003441
86	562	100	0.0392579	0.0392579	3.3761768	290.3512	0.003374
87	557	95	0.037295	0.037295	3.2446629	282.28567	0.003205
88	564	102	0.040043	0.040043	3.5237863	310.0932	0.003441
89	557	95	0.037295	0.037295	3.3192528	295.4135	0.003205
90	557	95	0.037295	0.037295	3.3565478	302.0893	0.003205
91	547	85	0.0333692	0.0333692	3.0365962	276.33025	0.002868
92	547	85	0.0333692	0.0333692	3.0699654	282.43681	0.002868
93	544	82	0.0321915	0.0321915	2.9938051	278.42388	0.002767
94	547	85	0.0333692	0.0333692	3.1367038	294.85015	0.002868
95	542	80	0.0314063	0.0314063	2.9835981	283.44182	0.002699
96	534	72	0.0282657	0.0282657	2.7135039	260.49638	0.002429
97	534	72	0.0282657	0.0282657	2.7417696	265.95165	0.002429
98	529	67	0.0263028	0.0263028	2.5776717	252.61183	0.00226
99	534	72	0.0282657	0.0282657	2.7983009	277.03179	0.002429
100	529	67	0.0263028	0.0263028	2.6302772	263.02772	0.00226
101	524	62	0.0243399	0.0243399	2.4583278	248.2911	0.002092
102	522	60	0.0235547	0.0235547	2.4025816	245.06332	0.002024
103	522	60	0.0235547	0.0235547	2.4261363	249.89204	0.002024
104	517	55	0.0215918	0.0215918	2.2455501	233.53721	0.001856

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
105	517	55	0.0215918	0.0215918	2.2671419	238.0499	0.001856
106	517	55	0.0215918	0.0215918	2.2887338	242.60578	0.001856
107	514	52	0.0204141	0.0204141	2.1843078	233.72094	0.001754
108	509	47	0.0184512	0.0184512	1.9927294	215.21478	0.001586
109	507	45	0.017666	0.017666	1.9255985	209.89023	0.001518
110	507	45	0.017666	0.017666	1.9432645	213.7591	0.001518
111	507	45	0.017666	0.017666	1.9609306	217.66329	0.001518
112	504	42	0.0164883	0.0164883	1.8466902	206.8293	0.001417
113	504	42	0.0164883	0.0164883	1.8631785	210.53917	0.001417
114	504	42	0.0164883	0.0164883	1.8796668	214.28201	0.001417
115	502	40	0.0157031	0.0157031	1.805862	207.67413	0.00135
116	502	40	0.0157031	0.0157031	1.8215651	211.30156	0.00135
117	497	35	0.0137403	0.0137403	1.6076097	188.09034	0.001181
118	497	35	0.0137403	0.0137403	1.62135	191.3193	0.001181
119	494	32	0.0125625	0.0125625	1.4949397	177.89782	0.00108
120	494	32	0.0125625	0.0125625	1.5075022	180.90026	0.00108
121	494	32	0.0125625	0.0125625	1.5200647	183.92783	0.00108
122	489	27	0.0105996	0.0105996	1.2931542	157.76481	0.000911
123	489	27	0.0105996	0.0105996	1.3037538	160.36172	0.000911
124	489	27	0.0105996	0.0105996	1.3143535	162.97983	0.000911
125	487	25	0.0098145	0.0098145	1.2268084	153.35105	0.000843
126	487	25	0.0098145	0.0098145	1.2366229	155.81448	0.000843
127	487	25	0.0098145	0.0098145	1.2464373	158.29754	0.000843
128	487	25	0.0098145	0.0098145	1.2562518	160.80023	0.000843
129	487	25	0.0098145	0.0098145	1.2660663	163.32255	0.000843
130	487	25	0.0098145	0.0098145	1.2758808	165.8645	0.000843
131	484	22	0.0086367	0.0086367	1.1314118	148.21494	0.000742
132	484	22	0.0086367	0.0086367	1.1400485	150.4864	0.000742
133	484	22	0.0086367	0.0086367	1.1486853	152.77514	0.000742
134	484	22	0.0086367	0.0086367	1.157322	155.08115	0.000742
135	482	20	0.0078516	0.0078516	1.0599625	143.09493	0.000675
136	482	20	0.0078516	0.0078516	1.067814	145.22271	0.000675
137	482	20	0.0078516	0.0078516	1.0756656	147.36619	0.000675
138	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8126379	112.14403	0.000506
139	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8185266	113.77519	0.000506

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
140	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8244153	115.41814	0.000506
141	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8303039	117.07285	0.000506
142	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8361926	118.73935	0.000506
143	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8420813	120.41763	0.000506
144	477	15	0.0058887	0.0058887	0.84797	122.10768	0.000506
145	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8538587	123.80951	0.000506
146	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8597473	125.52311	0.000506
147	477	15	0.0058887	0.0058887	0.865636	127.24849	0.000506
148	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8715247	128.98566	0.000506
149	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8774134	130.73459	0.000506
150	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8833021	132.49531	0.000506
151	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8891907	134.2678	0.000506
152	477	15	0.0058887	0.0058887	0.8950794	136.05207	0.000506
153	474	12	0.0047109	0.0047109	0.7207745	110.2785	0.000405
154	474	12	0.0047109	0.0047109	0.7254854	111.72476	0.000405
155	474	12	0.0047109	0.0047109	0.7301964	113.18044	0.000405
156	474	12	0.0047109	0.0047109	0.7349073	114.64554	0.000405
157	474	12	0.0047109	0.0047109	0.7396183	116.12007	0.000405
158	474	12	0.0047109	0.0047109	0.7443292	117.60401	0.000405
159	474	12	0.0047109	0.0047109	0.7490401	119.09738	0.000405
160	469	7	0.0027481	0.0027481	0.4396881	70.350102	0.000236
161	469	7	0.0027481	0.0027481	0.4424362	71.232226	0.000236
162	469	7	0.0027481	0.0027481	0.4451842	72.119846	0.000236
163	469	7	0.0027481	0.0027481	0.4479323	73.012963	0.000236
164	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3219145	52.793983	0.000169
165	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3238774	53.439775	0.000169
166	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3258403	54.089492	0.000169
167	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3278032	54.743136	0.000169
168	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3297661	55.400705	0.000169
169	467	5	0.0019629	0.0019629	0.331729	56.0622	0.000169
170	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3336919	56.727621	0.000169
171	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3356548	57.396968	0.000169
172	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3376177	58.07024	0.000169
173	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3395806	58.747438	0.000169
174	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3415435	59.428562	0.000169

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
175	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3435064	60.113612	0.000169
176	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3454692	60.802588	0.000169
177	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3474321	61.495489	0.000169
178	467	5	0.0019629	0.0019629	0.349395	62.192316	0.000169
179	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3513579	62.893069	0.000169
180	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3533208	63.597748	0.000169
181	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3552837	64.306353	0.000169
182	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3572466	65.018883	0.000169
183	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3592095	65.735339	0.000169
184	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3611724	66.455721	0.000169
185	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3631353	67.180029	0.000169
186	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3650982	67.908262	0.000169
187	467	5	0.0019629	0.0019629	0.3670611	68.640421	0.000169
188	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1476096	27.750603	6.75E-05
189	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1483947	28.046607	6.75E-05
190	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1491799	28.344182	6.75E-05
191	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1499651	28.643327	6.75E-05
192	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1507502	28.944042	6.75E-05
193	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1515354	29.246327	6.75E-05
194	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1523205	29.550183	6.75E-05
195	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1531057	29.855561	6.75E-05
196	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1538908	30.162606	6.75E-05
197	464	2	0.0007852	0.0007852	0.154676	30.471173	6.75E-05
198	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1554612	30.78131	6.75E-05
199	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1562463	31.093018	6.75E-05
200	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1570315	31.406295	6.75E-05
201	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1578166	31.721144	6.75E-05
202	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1586018	32.037562	6.75E-05
203	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1593869	32.355551	6.75E-05
204	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1601721	32.67511	6.75E-05
205	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1609573	32.996239	6.75E-05
206	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1617424	33.318939	6.75E-05
207	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1625276	33.643209	6.75E-05
208	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1633127	33.969049	6.75E-05
209	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1640979	34.29646	6.75E-05

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
210	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1648831	34.625441	6.75E-05
211	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1656682	34.955992	6.75E-05
212	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1664534	35.288114	6.75E-05
213	464	2	0.0007852	0.0007852	0.1672385	35.621805	6.75E-05
214	462	0	0	0	0	0	0
215	462	0	0	0	0	0	0
216	462	0	0	0	0	0	0
217	462	0	0	0	0	0	0
218	462	0	0	0	0	0	0
219	462	0	0	0	0	0	0
220	462	0	0	0	0	0	0
				11.636032	539.61158	35561.325	

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	457	0	0	0	0	0	0
1	457	0	0	0	0	0	0
2	457	0	0	0	0	0	0
3	467	10	0.0039258	0.0039258	0.0117774	0.0353321	0.000674
4	485	28	0.0109922	0.0109922	0.0439688	0.1758753	0.001886
5	505	48	0.0188438	0.0188438	0.0942189	0.4710944	0.003233
6	530	73	0.0286582	0.0286582	0.1719495	1.0316968	0.004917
7	555	98	0.0384727	0.0384727	0.269309	1.8851629	0.006601
8	575	118	0.0463243	0.0463243	0.3705943	2.9647543	0.007948
9	602	145	0.0569239	0.0569239	0.5123152	4.6108367	0.009766
10	622	165	0.0647755	0.0647755	0.6477548	6.4775484	0.011113
11	637	180	0.0706642	0.0706642	0.7773058	8.5503639	0.012124

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
12	655	198	0.0777306	0.0777306	0.932767	11.193204	0.013336
13	675	218	0.0855822	0.0855822	1.112568	14.463384	0.014683
14	685	228	0.0895079	0.0895079	1.2531112	17.543557	0.015357
15	695	238	0.0934337	0.0934337	1.4015059	21.022589	0.01603
16	705	248	0.0973595	0.0973595	1.5577523	24.924036	0.016704
17	710	253	0.0993224	0.0993224	1.688481	28.704176	0.01704
18	715	258	0.1012853	0.1012853	1.8231354	32.816438	0.017377
19	717	260	0.1020705	0.1020705	1.9393387	36.847436	0.017512
20	722	265	0.1040334	0.1040334	2.0806671	41.613341	0.017849
21	722	265	0.1040334	0.1040334	2.1847004	45.878709	0.017849
22	722	265	0.1040334	0.1040334	2.2887338	50.352143	0.017849
23	722	265	0.1040334	0.1040334	2.3927671	55.033644	0.017849
24	722	265	0.1040334	0.1040334	2.4968005	59.923212	0.017849
25	717	260	0.1020705	0.1020705	2.5517615	63.794038	0.017512
26	715	258	0.1012853	0.1012853	2.6334179	68.468865	0.017377
27	707	250	0.0981447	0.0981447	2.6499062	71.547467	0.016838
28	705	248	0.0973595	0.0973595	2.7260664	76.32986	0.016704
29	702	245	0.0961818	0.0961818	2.7892716	80.888877	0.016502
30	697	240	0.0942189	0.0942189	2.8265666	84.796998	0.016165
31	695	238	0.0934337	0.0934337	2.8964456	89.789813	0.01603
32	687	230	0.0902931	0.0902931	2.8893792	92.460134	0.015491
33	685	228	0.0895079	0.0895079	2.9537621	97.474149	0.015357
34	682	225	0.0883302	0.0883302	3.003227	102.10972	0.015155
35	675	218	0.0855822	0.0855822	2.9953754	104.83814	0.014683
36	670	213	0.0836193	0.0836193	3.0102934	108.37056	0.014346
37	665	208	0.0816564	0.0816564	3.0212856	111.78757	0.01401
38	662	205	0.0804786	0.0804786	3.058188	116.21114	0.013808
39	655	198	0.0777306	0.0777306	3.0314927	118.22821	0.013336
40	647	190	0.07459	0.07459	2.9835981	119.34392	0.012797
41	647	190	0.07459	0.07459	3.058188	125.38571	0.012797
42	642	185	0.0726271	0.0726271	3.0503364	128.11413	0.01246
43	637	180	0.0706642	0.0706642	3.0385591	130.65804	0.012124
44	630	173	0.0679161	0.0679161	2.988309	131.4856	0.011652
45	625	168	0.0659532	0.0659532	2.9678949	133.55527	0.011315
46	622	165	0.0647755	0.0647755	2.9796723	137.06492	0.011113

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
47	615	158	0.0620274	0.0620274	2.9152894	137.0186	0.010642
48	610	153	0.0600645	0.0600645	2.8830979	138.3887	0.010305
49	607	150	0.0588868	0.0588868	2.8854534	141.38722	0.010103
50	605	148	0.0581016	0.0581016	2.9050823	145.25412	0.009968
51	605	148	0.0581016	0.0581016	2.963184	151.12238	0.009968
52	602	145	0.0569239	0.0569239	2.9600433	153.92225	0.009766
53	597	140	0.054961	0.054961	2.9129339	154.3855	0.00943
54	597	140	0.054961	0.054961	2.9678949	160.26633	0.00943
55	595	138	0.0541759	0.0541759	2.9796723	163.88198	0.009295
56	587	130	0.0510352	0.0510352	2.8579729	160.04648	0.008756
57	585	128	0.0502501	0.0502501	2.8642541	163.26249	0.008621
58	582	125	0.0490723	0.0490723	2.8461955	165.07934	0.008419
59	575	118	0.0463243	0.0463243	2.7331329	161.25484	0.007948
60	570	113	0.0443614	0.0443614	2.6616835	159.70101	0.007611
61	567	110	0.0431837	0.0431837	2.634203	160.68638	0.007409
62	565	108	0.0423985	0.0423985	2.6287069	162.97983	0.007274
63	562	105	0.0412208	0.0412208	2.5969081	163.60521	0.007072
64	557	100	0.0392579	0.0392579	2.5125036	160.80023	0.006735
65	555	98	0.0384727	0.0384727	2.5007263	162.54721	0.006601
66	550	93	0.0365098	0.0365098	2.409648	159.03677	0.006264
67	547	90	0.0353321	0.0353321	2.3672495	158.60572	0.006062
68	547	90	0.0353321	0.0353321	2.4025816	163.37555	0.006062
69	545	88	0.0345469	0.0345469	2.3837378	164.47791	0.005927
70	542	85	0.0333692	0.0333692	2.3358432	163.50903	0.005725
71	537	80	0.0314063	0.0314063	2.229847	158.31914	0.005388
72	535	78	0.0306211	0.0306211	2.2047219	158.73998	0.005254
73	535	78	0.0306211	0.0306211	2.2353431	163.18004	0.005254
74	530	73	0.0286582	0.0286582	2.1207101	156.93255	0.004917
75	527	70	0.0274805	0.0274805	2.0610381	154.57786	0.004715
76	525	68	0.0266954	0.0266954	2.0288467	154.19235	0.00458
77	525	68	0.0266954	0.0266954	2.055542	158.27674	0.00458
78	525	68	0.0266954	0.0266954	2.0822374	162.41452	0.00458
79	525	68	0.0266954	0.0266954	2.1089327	166.60569	0.00458
80	522	65	0.0255176	0.0255176	2.0414092	163.31274	0.004378
81	522	65	0.0255176	0.0255176	2.0669268	167.42107	0.004378

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
82	517	60	0.0235547	0.0235547	1.9314872	158.38195	0.004041
83	517	60	0.0235547	0.0235547	1.9550419	162.26848	0.004041
84	517	60	0.0235547	0.0235547	1.9785966	166.20212	0.004041
85	517	60	0.0235547	0.0235547	2.0021513	170.18286	0.004041
86	515	58	0.0227696	0.0227696	1.9581825	168.4037	0.003907
87	510	53	0.0208067	0.0208067	1.8101804	157.48569	0.00357
88	507	50	0.0196289	0.0196289	1.7273462	152.00647	0.003368
89	505	48	0.0188438	0.0188438	1.6770962	149.26156	0.003233
90	505	48	0.0188438	0.0188438	1.69594	152.6346	0.003233
91	505	48	0.0188438	0.0188438	1.7147837	156.04532	0.003233
92	505	48	0.0188438	0.0188438	1.7336275	159.49373	0.003233
93	502	45	0.017666	0.017666	1.6429418	152.79359	0.003031
94	497	40	0.0157031	0.0157031	1.4760959	138.75301	0.002694
95	497	40	0.0157031	0.0157031	1.491799	141.72091	0.002694
96	495	38	0.014918	0.014918	1.4321271	137.4842	0.002559
97	495	38	0.014918	0.014918	1.4470451	140.36337	0.002559
98	495	38	0.014918	0.014918	1.4619631	143.27238	0.002559
99	495	38	0.014918	0.014918	1.476881	146.21122	0.002559
100	495	38	0.014918	0.014918	1.491799	149.1799	0.002559
101	495	38	0.014918	0.014918	1.506717	152.17842	0.002559
102	490	33	0.0129551	0.0129551	1.3214199	134.78483	0.002223
103	490	33	0.0129551	0.0129551	1.334375	137.44062	0.002223
104	490	33	0.0129551	0.0129551	1.3473301	140.12233	0.002223
105	487	30	0.0117774	0.0117774	1.2366229	129.8454	0.002021
106	487	30	0.0117774	0.0117774	1.2484002	132.33043	0.002021
107	487	30	0.0117774	0.0117774	1.2601776	134.839	0.002021
108	487	30	0.0117774	0.0117774	1.271955	137.37114	0.002021
109	487	30	0.0117774	0.0117774	1.2837323	139.92682	0.002021
110	485	28	0.0109922	0.0109922	1.2091424	133.00566	0.001886
111	485	28	0.0109922	0.0109922	1.2201346	135.43494	0.001886
112	485	28	0.0109922	0.0109922	1.2311268	137.8862	0.001886
113	485	28	0.0109922	0.0109922	1.242119	140.35945	0.001886
114	485	28	0.0109922	0.0109922	1.2531112	142.85468	0.001886
115	482	25	0.0098145	0.0098145	1.1286637	129.79633	0.001684
116	482	25	0.0098145	0.0098145	1.1384782	132.06347	0.001684

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
117	482	25	0.0098145	0.0098145	1.1482927	134.35024	0.001684
118	477	20	0.0078516	0.0078516	0.9264857	109.32531	0.001347
119	477	20	0.0078516	0.0078516	0.9343373	111.18614	0.001347
120	477	20	0.0078516	0.0078516	0.9421889	113.06266	0.001347
121	477	20	0.0078516	0.0078516	0.9500404	114.95489	0.001347
122	477	20	0.0078516	0.0078516	0.957892	116.86283	0.001347
123	477	20	0.0078516	0.0078516	0.9657436	118.78646	0.001347
124	477	20	0.0078516	0.0078516	0.9735952	120.7258	0.001347
125	477	20	0.0078516	0.0078516	0.9814467	122.68084	0.001347
126	477	20	0.0078516	0.0078516	0.9892983	124.65159	0.001347
127	477	20	0.0078516	0.0078516	0.9971499	126.63803	0.001347
128	475	18	0.0070664	0.0070664	0.9045013	115.77617	0.001212
129	475	18	0.0070664	0.0070664	0.9115677	117.59224	0.001212
130	475	18	0.0070664	0.0070664	0.9186341	119.42244	0.001212
131	475	18	0.0070664	0.0070664	0.9257006	121.26677	0.001212
132	475	18	0.0070664	0.0070664	0.932767	123.12524	0.001212
133	475	18	0.0070664	0.0070664	0.9398334	124.99784	0.001212
134	470	13	0.0051035	0.0051035	0.6838721	91.638859	0.000876
135	470	13	0.0051035	0.0051035	0.6889756	93.011707	0.000876
136	470	13	0.0051035	0.0051035	0.6940791	94.394761	0.000876
137	470	13	0.0051035	0.0051035	0.6991827	95.788023	0.000876
138	470	13	0.0051035	0.0051035	0.7042862	97.191492	0.000876
139	470	13	0.0051035	0.0051035	0.7093897	98.605168	0.000876
140	470	13	0.0051035	0.0051035	0.7144932	100.02905	0.000876
141	467	10	0.0039258	0.0039258	0.553536	78.04857	0.000674
142	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5574617	79.159568	0.000674
143	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5613875	80.278417	0.000674
144	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5653133	81.405118	0.000674
145	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5692391	82.53967	0.000674
146	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5731649	83.682074	0.000674
147	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5770907	84.83233	0.000674
148	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5810165	85.990437	0.000674
149	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5849423	87.156395	0.000674
150	467	10	0.0039258	0.0039258	0.588868	88.330206	0.000674
151	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5927938	89.511868	0.000674

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
152	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5967196	90.701381	0.000674
153	467	10	0.0039258	0.0039258	0.6006454	91.898746	0.000674
154	467	10	0.0039258	0.0039258	0.6045712	93.103963	0.000674
155	467	10	0.0039258	0.0039258	0.608497	94.317031	0.000674
156	467	10	0.0039258	0.0039258	0.6124228	95.537951	0.000674
157	467	10	0.0039258	0.0039258	0.6163485	96.766722	0.000674
158	467	10	0.0039258	0.0039258	0.6202743	98.003345	0.000674
159	465	8	0.0031406	0.0031406	0.4993601	79.398255	0.000539
160	467	10	0.0039258	0.0039258	0.6281259	100.50015	0.000674
161	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5056414	81.408258	0.000539
162	465	8	0.0031406	0.0031406	0.508782	82.422682	0.000539
163	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5119226	83.443386	0.000539
164	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5150632	84.470372	0.000539
165	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5182039	85.503639	0.000539
166	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5213445	86.543188	0.000539
167	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5244851	87.589017	0.000539
168	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5276258	88.641128	0.000539
169	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5307664	89.69952	0.000539
170	465	8	0.0031406	0.0031406	0.533907	90.764194	0.000539
171	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5370477	91.835148	0.000539
172	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5401883	92.912384	0.000539
173	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5433289	93.995901	0.000539
174	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5464695	95.0857	0.000539
175	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5496102	96.18178	0.000539
176	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5527508	97.284141	0.000539
177	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5558914	98.392783	0.000539
178	462	5	0.0019629	0.0019629	0.349395	62.192316	0.000337
179	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5621727	100.62891	0.000539
180	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3533208	63.597748	0.000337
181	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3552837	64.306353	0.000337
182	465	8	0.0031406	0.0031406	0.5715946	104.03021	0.000539
183	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3592095	65.735339	0.000337
184	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3611724	66.455721	0.000337
185	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3631353	67.180029	0.000337
186	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3650982	67.908262	0.000337

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
187	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3670611	68.640421	0.000337
188	462	5	0.0019629	0.0019629	0.369024	69.376507	0.000337
189	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3709869	70.116517	0.000337
190	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3729498	70.860454	0.000337
191	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3749127	71.608316	0.000337
192	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3768755	72.360105	0.000337
193	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3788384	73.115819	0.000337
194	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3808013	73.875458	0.000337
195	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3827642	74.639024	0.000337
196	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3847271	75.406515	0.000337
197	462	5	0.0019629	0.0019629	0.38669	76.177932	0.000337
198	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3886529	76.953275	0.000337
199	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3906158	77.732544	0.000337
200	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3925787	78.515738	0.000337
201	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3945416	79.302859	0.000337
202	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3965045	80.093905	0.000337
203	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3984674	80.888877	0.000337
204	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4004303	81.687774	0.000337
205	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4023932	82.490598	0.000337
206	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4043561	83.297347	0.000337
207	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4063189	84.108022	0.000337
208	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4082818	84.922623	0.000337
209	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4102447	85.741149	0.000337
210	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4122076	86.563602	0.000337
211	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4141705	87.38998	0.000337
212	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4161334	88.220284	0.000337
213	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4180963	89.054513	0.000337
214	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4200592	89.892669	0.000337
215	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4220221	90.73475	0.000337
216	462	5	0.0019629	0.0019629	0.423985	91.580757	0.000337
217	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4259479	92.43069	0.000337
218	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4279108	93.284549	0.000337
219	462	5	0.0019629	0.0019629	0.4298737	94.142333	0.000337
220	457	0	0	0	0	0	0
221	457	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีววัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
222	457	0	0	0	0	0	0
223	457	0	0	0	0	0	0
224	457	0	0	0	0	0	0
225	457	0	0	0	0	0	0
226		0	0	0	0	0	0
227		0	0	0	0	0	0
				5.8286158	289.53503	22720.815	

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีววัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	455	0	0	0	0	0	0
1	455	0	0	0	0	0	0
2	455	0	0	0	0	0	0
3	455	0	0	0	0	0	0
4	467	12	0.0047109	0.0047109	0.0188438	0.0753751	0.001571
5	482	27	0.0105996	0.0105996	0.0529981	0.2649906	0.003534
6	505	50	0.0196289	0.0196289	0.1177736	0.7066416	0.006545
7	525	70	0.0274805	0.0274805	0.1923636	1.3465449	0.009164
8	550	95	0.037295	0.037295	0.2983598	2.3868784	0.012436
9	575	120	0.0471094	0.0471094	0.423985	3.8158649	0.015709
10	597	142	0.0557462	0.0557462	0.5574617	5.5746174	0.018589
11	617	162	0.0635977	0.0635977	0.6995752	7.6953275	0.021207
12	637	182	0.0714493	0.0714493	0.8573919	10.288702	0.023825
13	655	200	0.0785157	0.0785157	1.0207046	13.26916	0.026181
14	670	215	0.0844044	0.0844044	1.1816619	16.543266	0.028145
15	682	227	0.0891154	0.0891154	1.3367304	20.050957	0.029716
16	687	232	0.0910783	0.0910783	1.4572521	23.316034	0.03037

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t·C(t)dt	t ² ·C(t)dt	E(t)
17	695	240	0.0942189	0.0942189	1.6017211	27.229258	0.031418
18	697	242	0.095004	0.095004	1.7100728	30.78131	0.03168
19	702	247	0.0969669	0.0969669	1.8423718	35.005064	0.032334
20	702	247	0.0969669	0.0969669	1.9393387	38.786775	0.032334
21	702	247	0.0969669	0.0969669	2.0363057	42.762419	0.032334
22	695	240	0.0942189	0.0942189	2.0728155	45.601941	0.031418
23	695	240	0.0942189	0.0942189	2.1670344	49.841791	0.031418
24	685	230	0.0902931	0.0902931	2.1670344	52.008825	0.030109
25	682	227	0.0891154	0.0891154	2.2278841	55.697102	0.029716
26	670	215	0.0844044	0.0844044	2.1945149	57.057387	0.028145
27	665	210	0.0824415	0.0824415	2.2259212	60.099872	0.027491
28	657	202	0.0793009	0.0793009	2.2204251	62.171902	0.026443
29	647	192	0.0753751	0.0753751	2.1858782	63.390467	0.025134
30	637	182	0.0714493	0.0714493	2.1434797	64.30439	0.023825
31	630	175	0.0687013	0.0687013	2.1297394	66.021922	0.022909
32	625	170	0.0667384	0.0667384	2.1356281	68.340099	0.022254
33	615	160	0.0628126	0.0628126	2.0728155	68.402911	0.020945
34	607	152	0.059672	0.059672	2.0288467	68.980787	0.019898
35	597	142	0.0557462	0.0557462	1.9511161	68.289064	0.018589
36	590	135	0.0529981	0.0529981	1.9079324	68.685568	0.017672
37	585	130	0.0510352	0.0510352	1.8883035	69.86723	0.017018
38	575	120	0.0471094	0.0471094	1.7901588	68.026036	0.015709
39	567	112	0.0439688	0.0439688	1.7147837	66.876565	0.014662
40	562	107	0.0420059	0.0420059	1.6802368	67.209472	0.014007
41	557	102	0.040043	0.040043	1.6417641	67.312328	0.013353
42	547	92	0.0361172	0.0361172	1.5169241	63.710811	0.012043
43	545	90	0.0353321	0.0353321	1.5192795	65.32902	0.011782
44	535	80	0.0314063	0.0314063	1.381877	60.802588	0.010473
45	530	75	0.0294434	0.0294434	1.3249531	59.622889	0.009818
46	537	82	0.0321915	0.0321915	1.4808068	68.117114	0.010734
47	525	70	0.0274805	0.0274805	1.2915839	60.704443	0.009164
48	517	62	0.0243399	0.0243399	1.1683142	56.079081	0.008116
49	515	60	0.0235547	0.0235547	1.1541814	56.554886	0.007854
50	507	52	0.0204141	0.0204141	1.0207046	51.03523	0.006807
51	505	50	0.0196289	0.0196289	1.0010757	51.054859	0.006545

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
52	502	47	0.0184512	0.0184512	0.9594623	49.892041	0.006153
53	497	42	0.0164883	0.0164883	0.8738802	46.315649	0.005498
54	495	40	0.0157031	0.0157031	0.84797	45.790379	0.005236
55	495	40	0.0157031	0.0157031	0.8636731	47.502022	0.005236
56	487	32	0.0125625	0.0125625	0.703501	39.396057	0.004189
57	487	32	0.0125625	0.0125625	0.7160635	40.815621	0.004189
58	485	30	0.0117774	0.0117774	0.6830869	39.619042	0.003927
59	485	30	0.0117774	0.0117774	0.6948643	40.996993	0.003927
60	482	27	0.0105996	0.0105996	0.6359775	38.158649	0.003534
61	477	22	0.0086367	0.0086367	0.5268406	32.137277	0.00288
62	477	22	0.0086367	0.0086367	0.5354773	33.199595	0.00288
63	475	20	0.0078516	0.0078516	0.4946492	31.162897	0.002618
64	475	20	0.0078516	0.0078516	0.5025007	32.160046	0.002618
65	470	15	0.0058887	0.0058887	0.3827642	24.879675	0.001964
66	467	12	0.0047109	0.0047109	0.3109223	20.520873	0.001571
67	467	12	0.0047109	0.0047109	0.3156333	21.147429	0.001571
68	467	12	0.0047109	0.0047109	0.3203442	21.783406	0.001571
69	467	12	0.0047109	0.0047109	0.3250552	22.428806	0.001571
70	465	10	0.0039258	0.0039258	0.2748051	19.236356	0.001309
71	465	10	0.0039258	0.0039258	0.2787309	19.789892	0.001309
72	465	10	0.0039258	0.0039258	0.2826567	20.351279	0.001309
73	462	7	0.0027481	0.0027481	0.2006077	14.644363	0.000916
74	462	7	0.0027481	0.0027481	0.2033558	15.048326	0.000916
75	462	7	0.0027481	0.0027481	0.2061038	15.457786	0.000916
76	457	2	0.0007852	0.0007852	0.059672	4.5350691	0.000262
77	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0604571	4.6551981	0.000262
78	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0612423	4.7768975	0.000262
79	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0620274	4.9001672	0.000262
80	455	0	0	0	0	0	0
81	455	0	0	0	0	0	0
82	455	0	0	0	0	0	0
83	455	0	0	0	0	0	0
84	455	0	0	0	0	0	0
85	455	0	0	0	0	0	0
86	455	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
87	455	0	0	0	0	0	0
88	455	0	0	0	0	0	0
89	455	0	0	0	0	0	0
90	455	0	0	0	0	0	0
				2.9989086	83.133249	2882.3976	

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	455	0	0	0	0	0	0
1	455	0	0	0	0	0	0
2	455	0	0	0	0	0	0
3	455	0	0	0	0	0	0
4	455	0	0	0	0	0	0
5	455	0	0	0	0	0	0
6	455	0	0	0	0	0	0
7	462	7	0.0027481	0.0027481	0.0192364	0.1346545	0.001229
8	485	30	0.0117774	0.0117774	0.0942189	0.7537511	0.005268
9	495	40	0.0157031	0.0157031	0.1413283	1.271955	0.007024
10	525	70	0.0274805	0.0274805	0.2748051	2.7480508	0.012291
11	557	102	0.040043	0.040043	0.4404733	4.8452062	0.01791
12	585	130	0.0510352	0.0510352	0.6124228	7.3490731	0.022827
13	590	135	0.0529981	0.0529981	0.6889756	8.9566829	0.023705
14	615	160	0.0628126	0.0628126	0.8793763	12.311268	0.028095
15	630	175	0.0687013	0.0687013	1.0305191	15.457786	0.030729
16	635	180	0.0706642	0.0706642	1.1306266	18.090026	0.031607
17	647	192	0.0753751	0.0753751	1.2813769	21.783406	0.033714
18	655	200	0.0785157	0.0785157	1.4132833	25.439099	0.035119

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
19	665	210	0.0824415	0.0824415	1.566389	29.761391	0.036874
20	665	210	0.0824415	0.0824415	1.6488305	32.97661	0.036874
21	665	210	0.0824415	0.0824415	1.731272	36.356713	0.036874
22	665	210	0.0824415	0.0824415	1.8137136	39.901698	0.036874
23	662	207	0.0812638	0.0812638	1.8690672	42.988545	0.036348
24	655	200	0.0785157	0.0785157	1.8843777	45.225065	0.035119
25	647	192	0.0753751	0.0753751	1.8843777	47.109443	0.033714
26	637	182	0.0714493	0.0714493	1.8576824	48.299742	0.031958
27	625	170	0.0667384	0.0667384	1.8019362	48.652277	0.029851
28	615	160	0.0628126	0.0628126	1.7587525	49.245071	0.028095
29	610	155	0.0608497	0.0608497	1.7646412	51.174595	0.027217
30	605	150	0.0588868	0.0588868	1.7666041	52.998123	0.026339
31	597	142	0.0557462	0.0557462	1.7281314	53.572074	0.024934
32	585	130	0.0510352	0.0510352	1.6331274	52.260076	0.022827
33	577	122	0.0478946	0.0478946	1.5805218	52.15722	0.021422
34	570	115	0.0451465	0.0451465	1.5349827	52.189411	0.020193
35	565	110	0.0431837	0.0431837	1.511428	52.899979	0.019315
36	557	102	0.040043	0.040043	1.441549	51.895763	0.01791
37	550	95	0.037295	0.037295	1.3799141	51.056822	0.016681
38	547	92	0.0361172	0.0361172	1.3724551	52.153294	0.016155
39	537	82	0.0321915	0.0321915	1.2554667	48.9632	0.014399
40	535	80	0.0314063	0.0314063	1.2562518	50.250073	0.014047
41	527	72	0.0282657	0.0282657	1.1588923	47.514584	0.012643
42	525	70	0.0274805	0.0274805	1.1541814	48.475617	0.012291
43	517	62	0.0243399	0.0243399	1.0466148	45.004436	0.010887
44	515	60	0.0235547	0.0235547	1.0364077	45.601941	0.010536
45	507	52	0.0204141	0.0204141	0.9186341	41.338536	0.009131
46	505	50	0.0196289	0.0196289	0.902931	41.534826	0.00878
47	505	50	0.0196289	0.0196289	0.9225599	43.360317	0.00878
48	502	47	0.0184512	0.0184512	0.8856575	42.511561	0.008253
49	495	40	0.0157031	0.0157031	0.7694542	37.703258	0.007024
50	490	35	0.0137403	0.0137403	0.6870127	34.350636	0.006146
51	490	35	0.0137403	0.0137403	0.700753	35.738401	0.006146
52	487	32	0.0125625	0.0125625	0.6532509	33.969049	0.005619
53	487	32	0.0125625	0.0125625	0.6658135	35.288114	0.005619

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
54	485	30	0.0117774	0.0117774	0.6359775	34.342784	0.005268
55	482	27	0.0105996	0.0105996	0.5829794	32.063865	0.004741
56	477	22	0.0086367	0.0086367	0.4836569	27.084789	0.003863
57	477	22	0.0086367	0.0086367	0.4922937	28.06074	0.003863
58	477	22	0.0086367	0.0086367	0.5009304	29.053964	0.003863
59	475	20	0.0078516	0.0078516	0.4632429	27.331329	0.003512
60	475	20	0.0078516	0.0078516	0.4710944	28.265666	0.003512
61	470	15	0.0058887	0.0058887	0.3592095	21.911178	0.002634
62	470	15	0.0058887	0.0058887	0.3650982	22.636087	0.002634
63	467	12	0.0047109	0.0047109	0.2967895	18.697738	0.002107
64	467	12	0.0047109	0.0047109	0.3015004	19.296028	0.002107
65	467	12	0.0047109	0.0047109	0.3062114	19.90374	0.002107
66	465	10	0.0039258	0.0039258	0.2591019	17.100728	0.001756
67	467	12	0.0047109	0.0047109	0.3156333	21.147429	0.002107
68	465	10	0.0039258	0.0039258	0.2669535	18.152839	0.001756
69	465	10	0.0039258	0.0039258	0.2708793	18.690672	0.001756
70	465	10	0.0039258	0.0039258	0.2748051	19.236356	0.001756
71	462	7	0.0027481	0.0027481	0.1951116	13.852924	0.001229
72	462	7	0.0027481	0.0027481	0.1978597	14.245896	0.001229
73	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0573165	4.1841037	0.000351
74	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0581016	4.2995218	0.000351
75	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0588868	4.4165103	0.000351
76	457	2	0.0007852	0.0007852	0.059672	4.5350691	0.000351
77	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0604571	4.6551981	0.000351
78	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0612423	4.7768975	0.000351
79	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0620274	4.9001672	0.000351
80	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0628126	5.0250073	0.000351
81	455	0	0	0	0	0	0
82	455	0	0	0	0	0	0
83	455	0	0	0	0	0	0
84	455	0	0	0	0	0	0
85	455	0	0	0	0	0	0
86	455	0	0	0	0	0	0
87	455	0	0	0	0	0	0
				2.2357357	63.070122	2161.4872	

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t·C(t)dt	t ² ·C(t)dt	E(t)
0	457	0	0	0	0	0	0
1	457	0	0	0	0	0	0
2	462	5	0.0019629	0.0019629	0.0039258	0.0078516	0.000686
3	467	10	0.0039258	0.0039258	0.0117774	0.0353321	0.001372
4	485	28	0.0109922	0.0109922	0.0439688	0.1758753	0.003841
5	505	48	0.0188438	0.0188438	0.0942189	0.4710944	0.006585
6	522	65	0.0255176	0.0255176	0.1531057	0.9186341	0.008918
7	537	80	0.0314063	0.0314063	0.2198441	1.5389085	0.010975
8	557	100	0.0392579	0.0392579	0.314063	2.5125036	0.013719
9	577	120	0.0471094	0.0471094	0.423985	3.8158649	0.016463
10	597	140	0.054961	0.054961	0.5496102	5.4961017	0.019207
11	610	153	0.0600645	0.0600645	0.6607099	7.2678093	0.020991
12	625	168	0.0659532	0.0659532	0.7914386	9.4972637	0.023048
13	630	173	0.0679161	0.0679161	0.8829095	11.477823	0.023734
14	642	185	0.0726271	0.0726271	1.0167788	14.234903	0.025381
15	647	190	0.07459	0.07459	1.1188493	16.782739	0.026067
16	647	190	0.07459	0.07459	1.1934392	19.095028	0.026067
17	655	198	0.0777306	0.0777306	1.3214199	22.464138	0.027164
18	655	198	0.0777306	0.0777306	1.3991505	25.184708	0.027164
19	655	198	0.0777306	0.0777306	1.476881	28.06074	0.027164
20	650	193	0.0757677	0.0757677	1.5153538	30.307075	0.026478
21	647	190	0.07459	0.07459	1.566389	32.894169	0.026067
22	647	190	0.07459	0.07459	1.6409789	36.101537	0.026067
23	642	185	0.0726271	0.0726271	1.6704223	38.419714	0.025381
24	637	180	0.0706642	0.0706642	1.69594	40.702559	0.024695
25	630	173	0.0679161	0.0679161	1.6979028	42.447571	0.023734
26	627	170	0.0667384	0.0667384	1.7351978	45.115143	0.023323
27	615	158	0.0620274	0.0620274	1.6747407	45.217999	0.021676
28	615	158	0.0620274	0.0620274	1.7367681	48.629508	0.021676
29	607	150	0.0588868	0.0588868	1.7077173	49.523802	0.020579
30	602	145	0.0569239	0.0569239	1.7077173	51.231519	0.019893
31	597	140	0.054961	0.054961	1.7037915	52.817537	0.019207
32	590	133	0.052213	0.052213	1.6708149	53.466077	0.018247
33	585	128	0.0502501	0.0502501	1.6582524	54.722329	0.017561
34	577	120	0.0471094	0.0471094	1.6017211	54.458516	0.016463

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
35	575	118	0.0463243	0.0463243	1.62135	56.74725	0.016189
36	567	110	0.0431837	0.0431837	1.5546116	55.966018	0.015091
37	565	108	0.0423985	0.0423985	1.5687445	58.043545	0.014817
38	557	100	0.0392579	0.0392579	1.491799	56.688363	0.013719
39	555	98	0.0384727	0.0384727	1.5004358	58.516995	0.013445
40	547	90	0.0353321	0.0353321	1.4132833	56.531332	0.012347
41	545	88	0.0345469	0.0345469	1.4164239	58.073381	0.012073
42	542	85	0.0333692	0.0333692	1.4015059	58.863249	0.011661
43	535	78	0.0306211	0.0306211	1.3167089	56.618484	0.010701
44	535	78	0.0306211	0.0306211	1.3473301	59.282523	0.010701
45	527	70	0.0274805	0.0274805	1.2366229	55.64803	0.009604
46	525	68	0.0266954	0.0266954	1.2279861	56.487363	0.009329
47	525	68	0.0266954	0.0266954	1.2546815	58.970031	0.009329
48	522	65	0.0255176	0.0255176	1.2248455	58.792585	0.008918
49	517	60	0.0235547	0.0235547	1.1541814	56.554886	0.008232
50	515	58	0.0227696	0.0227696	1.1384782	56.92391	0.007957
51	515	58	0.0227696	0.0227696	1.1612478	59.223636	0.007957
52	510	53	0.0208067	0.0208067	1.0819469	56.261238	0.007271
53	505	48	0.0188438	0.0188438	0.9987202	52.93217	0.006585
54	505	48	0.0188438	0.0188438	1.017564	54.948454	0.006585
55	502	45	0.017666	0.017666	0.9716323	53.439775	0.006174
56	497	40	0.0157031	0.0157031	0.8793763	49.245071	0.005488
57	497	40	0.0157031	0.0157031	0.8950794	51.019527	0.005488
58	495	38	0.014918	0.014918	0.8652434	50.184119	0.005213
59	495	38	0.014918	0.014918	0.8801614	51.929524	0.005213
60	495	38	0.014918	0.014918	0.8950794	53.704765	0.005213
61	490	33	0.0129551	0.0129551	0.7902609	48.205915	0.004527
62	490	33	0.0129551	0.0129551	0.803216	49.799392	0.004527
63	487	30	0.0117774	0.0117774	0.7419737	46.744345	0.004116
64	487	30	0.0117774	0.0117774	0.7537511	48.24007	0.004116
65	487	30	0.0117774	0.0117774	0.7655285	49.759349	0.004116
66	485	28	0.0109922	0.0109922	0.7254854	47.882038	0.003841
67	485	28	0.0109922	0.0109922	0.7364776	49.344001	0.003841
68	485	28	0.0109922	0.0109922	0.7474698	50.827948	0.003841
69	482	25	0.0098145	0.0098145	0.6771982	46.726679	0.00343

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
70	482	25	0.0098145	0.0098145	0.6870127	48.09089	0.00343
71	477	20	0.0078516	0.0078516	0.5574617	39.579784	0.002744
72	477	20	0.0078516	0.0078516	0.5653133	40.702559	0.002744
73	477	20	0.0078516	0.0078516	0.5731649	41.841037	0.002744
74	477	20	0.0078516	0.0078516	0.5810165	42.995218	0.002744
75	477	20	0.0078516	0.0078516	0.588868	44.165103	0.002744
76	477	20	0.0078516	0.0078516	0.5967196	45.350691	0.002744
77	475	18	0.0070664	0.0070664	0.5441141	41.896783	0.002469
78	475	18	0.0070664	0.0070664	0.5511805	42.992078	0.002469
79	475	18	0.0070664	0.0070664	0.5582469	44.101505	0.002469
80	475	18	0.0070664	0.0070664	0.5653133	45.225065	0.002469
81	470	13	0.0051035	0.0051035	0.4133854	33.484214	0.001784
82	470	13	0.0051035	0.0051035	0.4184889	34.316089	0.001784
83	470	13	0.0051035	0.0051035	0.4235924	35.15817	0.001784
84	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3297661	27.700353	0.001372
85	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3336919	28.363811	0.001372
86	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3376177	29.03512	0.001372
87	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3415435	29.714281	0.001372
88	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3454692	30.401294	0.001372
89	467	10	0.0039258	0.0039258	0.349395	31.096158	0.001372
90	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3533208	31.798874	0.001372
91	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3572466	32.509442	0.001372
92	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3611724	33.227861	0.001372
93	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3650982	33.954131	0.001372
94	467	10	0.0039258	0.0039258	0.369024	34.688253	0.001372
95	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3729498	35.430227	0.001372
96	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3768755	36.180052	0.001372
97	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3808013	36.937729	0.001372
98	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3847271	37.703258	0.001372
99	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3886529	38.476638	0.001372
100	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3925787	39.257869	0.001372
101	467	10	0.0039258	0.0039258	0.3965045	40.046952	0.001372
102	465	8	0.0031406	0.0031406	0.3203442	32.67511	0.001098
103	465	8	0.0031406	0.0031406	0.3234848	33.318939	0.001098
104	465	8	0.0031406	0.0031406	0.3266255	33.969049	0.001098

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซึ้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
105	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2061038	21.6409	0.000686
106	465	8	0.0031406	0.0031406	0.3329067	35.288114	0.001098
107	465	8	0.0031406	0.0031406	0.3360474	35.957068	0.001098
108	465	8	0.0031406	0.0031406	0.339188	36.632303	0.001098
109	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2139554	23.321137	0.000686
110	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2159183	23.751011	0.000686
111	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2178812	24.18481	0.000686
112	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2198441	24.622536	0.000686
113	462	5	0.0019629	0.0019629	0.221807	25.064187	0.000686
114	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2237699	25.509763	0.000686
115	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2257327	25.959266	0.000686
116	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2276956	26.412694	0.000686
117	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2296585	26.870049	0.000686
118	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2316214	27.331329	0.000686
119	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2335843	27.796534	0.000686
120	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2355472	28.265666	0.000686
121	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2375101	28.738723	0.000686
122	462	5	0.0019629	0.0019629	0.239473	29.215706	0.000686
123	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2414359	29.696615	0.000686
124	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2433988	30.18145	0.000686
125	462	5	0.0019629	0.0019629	0.2453617	30.67021	0.000686
126	457	0	0	0	0	0	0
127	457	0	0	0	0	0	0
128	457	0	0	0	0	0	0
129	457	0	0	0	0	0	0
130	457	0	0	0	0	0	0
				2.8615061	95.165393	4607.713	

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	462	0	0	0	0	0	0
1	462	0	0	0	0	0	0
2	462	0	0	0	0	0	0
3	462	0	0	0	0	0	0
4	467	5	0.0019629	0.0019629	0.0078516	0.0314063	0.000498
5	504	42	0.0164883	0.0164883	0.0824415	0.4122076	0.004185
6	544	82	0.0321915	0.0321915	0.1931487	1.1588923	0.00817
7	557	95	0.037295	0.037295	0.2610648	1.8274538	0.009465
8	607	145	0.0569239	0.0569239	0.4553913	3.6431303	0.014447
9	647	185	0.0726271	0.0726271	0.6536435	5.8827917	0.018432
10	637	175	0.0687013	0.0687013	0.6870127	6.8701271	0.017435
11	664	202	0.0793009	0.0793009	0.8723099	9.5954084	0.020126
12	654	192	0.0753751	0.0753751	0.9045013	10.854016	0.019129
13	737	275	0.1079591	0.1079591	1.4034688	18.245095	0.027399
14	724	262	0.1028556	0.1028556	1.4399786	20.159701	0.026103
15	744	282	0.1107072	0.1107072	1.6606079	24.909118	0.028096
16	764	302	0.1185588	0.1185588	1.8969402	30.351044	0.030089
17	749	287	0.1126701	0.1126701	1.9153914	32.561654	0.028594
18	782	320	0.1256252	0.1256252	2.2612533	40.702559	0.031882
19	774	312	0.1224846	0.1224846	2.3272065	44.216923	0.031085
20	767	305	0.1197365	0.1197365	2.39473	47.8946	0.030388
21	767	305	0.1197365	0.1197365	2.5144665	52.803797	0.030388
22	764	302	0.1185588	0.1185588	2.6082928	57.382442	0.030089
23	757	295	0.1158107	0.1158107	2.6636464	61.263868	0.029391
24	747	285	0.1118849	0.1118849	2.6852383	64.445718	0.028395
25	734	272	0.1067814	0.1067814	2.6695351	66.738378	0.0271
26	737	275	0.1079591	0.1079591	2.8069377	72.980379	0.027399
27	722	260	0.1020705	0.1020705	2.7559024	74.409365	0.025904
28	707	245	0.0961818	0.0961818	2.6930898	75.406515	0.02441
29	702	240	0.0942189	0.0942189	2.7323477	79.238083	0.023912
30	684	222	0.0871525	0.0871525	2.6145741	78.437223	0.022118
31	677	215	0.0844044	0.0844044	2.616537	81.112647	0.021421
32	677	215	0.0844044	0.0844044	2.7009414	86.430125	0.021421
33	662	200	0.0785157	0.0785157	2.5910194	85.503639	0.019926
34	649	187	0.0734122	0.0734122	2.4960153	84.864521	0.018631

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
35	647	185	0.0726271	0.0726271	2.541947	88.968146	0.018432
36	627	165	0.0647755	0.0647755	2.3319174	83.949028	0.016439
37	617	155	0.0608497	0.0608497	2.2514388	83.303236	0.015443
38	614	152	0.059672	0.059672	2.2675345	86.166312	0.015144
39	607	145	0.0569239	0.0569239	2.2200325	86.581268	0.014447
40	597	135	0.0529981	0.0529981	2.1199249	84.796998	0.01345
41	589	127	0.0498575	0.0498575	2.0441573	83.810447	0.012653
42	584	122	0.0478946	0.0478946	2.0115732	84.486075	0.012155
43	574	112	0.0439688	0.0439688	1.890659	81.298336	0.011159
44	564	102	0.040043	0.040043	1.7618932	77.5233	0.010162
45	557	95	0.037295	0.037295	1.6782739	75.522326	0.009465
46	557	95	0.037295	0.037295	1.7155689	78.916169	0.009465
47	549	87	0.0341543	0.0341543	1.6052543	75.446951	0.008668
48	547	85	0.0333692	0.0333692	1.6017211	76.882611	0.008469
49	544	82	0.0321915	0.0321915	1.5773812	77.291678	0.00817
50	534	72	0.0282657	0.0282657	1.4132833	70.664165	0.007173
51	534	72	0.0282657	0.0282657	1.441549	73.518997	0.007173
52	524	62	0.0243399	0.0243399	1.2656737	65.815033	0.006177
53	524	62	0.0243399	0.0243399	1.2900136	68.37072	0.006177
54	524	62	0.0243399	0.0243399	1.3143535	70.975087	0.006177
55	522	60	0.0235547	0.0235547	1.2955097	71.253033	0.005978
56	517	55	0.0215918	0.0215918	1.2091424	67.711973	0.00548
57	514	52	0.0204141	0.0204141	1.1636032	66.325385	0.005181
58	507	45	0.017666	0.017666	1.0246304	59.428562	0.004483
59	504	42	0.0164883	0.0164883	0.97281	57.39579	0.004185
60	504	42	0.0164883	0.0164883	0.9892983	59.357898	0.004185
61	504	42	0.0164883	0.0164883	1.0057866	61.352983	0.004185
62	502	40	0.0157031	0.0157031	0.9735952	60.3629	0.003985
63	497	35	0.0137403	0.0137403	0.865636	54.535069	0.003487
64	494	32	0.0125625	0.0125625	0.8040012	51.456074	0.003188
65	489	27	0.0105996	0.0105996	0.6889756	44.783414	0.00269
66	489	27	0.0105996	0.0105996	0.6995752	46.171965	0.00269
67	489	27	0.0105996	0.0105996	0.7101749	47.581715	0.00269
68	489	27	0.0105996	0.0105996	0.7207745	49.012665	0.00269
69	487	25	0.0098145	0.0098145	0.6771982	46.726679	0.002491

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
70	484	22	0.0086367	0.0086367	0.6045712	42.319983	0.002192
71	484	22	0.0086367	0.0086367	0.6132079	43.537762	0.002192
72	484	22	0.0086367	0.0086367	0.6218446	44.772815	0.002192
73	482	20	0.0078516	0.0078516	0.5731649	41.841037	0.001993
74	482	20	0.0078516	0.0078516	0.5810165	42.995218	0.001993
75	477	15	0.0058887	0.0058887	0.441651	33.123827	0.001494
76	477	15	0.0058887	0.0058887	0.4475397	34.013018	0.001494
77	477	15	0.0058887	0.0058887	0.4534284	34.913986	0.001494
78	474	12	0.0047109	0.0047109	0.3674537	28.661385	0.001196
79	474	12	0.0047109	0.0047109	0.3721646	29.401003	0.001196
80	474	12	0.0047109	0.0047109	0.3768755	30.150044	0.001196
81	474	12	0.0047109	0.0047109	0.3815865	30.908506	0.001196
82	469	7	0.0027481	0.0027481	0.2253402	18.477894	0.000697
83	469	7	0.0027481	0.0027481	0.2280882	18.931322	0.000697
84	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1648831	13.850176	0.000498
85	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1668459	14.181905	0.000498
86	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1688088	14.51756	0.000498
87	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1707717	14.857141	0.000498
88	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1727346	15.200647	0.000498
89	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1746975	15.548079	0.000498
90	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1766604	15.899437	0.000498
91	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1786233	16.254721	0.000498
92	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1805862	16.61393	0.000498
93	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1825491	16.977066	0.000498
94	467	5	0.0019629	0.0019629	0.184512	17.344127	0.000498
95	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1864749	17.715113	0.000498
96	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0753751	7.2360105	0.000199
97	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0761603	7.3875458	0.000199
98	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0769454	7.5406515	0.000199
99	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0777306	7.6953275	0.000199
100	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0785157	7.8515738	0.000199
101	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0793009	8.0093905	0.000199
102	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0800861	8.1687774	0.000199
103	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0808712	8.3297347	0.000199
104	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0816564	8.4922623	0.000199

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 6.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
105	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0824415	8.6563602	0.000199
106	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0832267	8.8220284	0.000199
107	464	2	0.0007852	0.0007852	0.0840118	8.9892669	0.000199
108	464	2	0.0007852	0.0007852	0.084797	9.1580757	0.000199
109	462	0	0	0	0	0	0
110	462	0	0	0	0	0	0
111	462	0	0	0	0	0	0
112	462	0	0	0	0	0	0
113	462	0	0	0	0	0	0
114	462	0	0	0	0	0	0
115	462	0	0	0	0	0	0
				3.9403123	116.14755	4507.4205	

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	457	0	0	0	0	0	0
1	457	0	0	0	0	0	0
2	457	0	0	0	0	0	0
3	457	0	0	0	0	0	0
4	457	0	0	0	0	0	0
5	457	0	0	0	0	0	0
6	459	2	0.0007852	0.0007852	0.0047109	0.0282657	0.000131
7	464	7	0.0027481	0.0027481	0.0192364	0.1346545	0.000458
8	467	10	0.0039258	0.0039258	0.0314063	0.2512504	0.000654
9	467	10	0.0039258	0.0039258	0.0353321	0.3179887	0.000654
10	467	10	0.0039258	0.0039258	0.0392579	0.3925787	0.000654
11	467	10	0.0039258	0.0039258	0.0431837	0.4750202	0.000654

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
12	467	10	0.0039258	0.0039258	0.0471094	0.5653133	0.000654
13	469	12	0.0047109	0.0047109	0.0612423	0.7961496	0.000785
14	479	22	0.0086367	0.0086367	0.1209142	1.6927993	0.001439
15	519	62	0.0243399	0.0243399	0.3650982	5.4764728	0.004055
16	587	130	0.0510352	0.0510352	0.8165637	13.065019	0.008503
17	644	187	0.0734122	0.0734122	1.2480077	21.21613	0.012232
18	707	250	0.0981447	0.0981447	1.7666041	31.798874	0.016353
19	747	290	0.1138478	0.1138478	2.1631086	41.099063	0.018969
20	779	322	0.1264103	0.1264103	2.5282068	50.564136	0.021062
21	807	350	0.1374025	0.1374025	2.8854534	60.594521	0.022894
22	827	370	0.1452541	0.1452541	3.1955906	70.302992	0.024202
23	847	390	0.1531057	0.1531057	3.5214309	80.99291	0.02551
24	859	402	0.1578166	0.1578166	3.7875992	90.902381	0.026295
25	869	412	0.1617424	0.1617424	4.0435605	101.08901	0.026949
26	869	412	0.1617424	0.1617424	4.205303	109.33788	0.026949
27	877	420	0.1648831	0.1648831	4.4518424	120.19974	0.027473
28	869	412	0.1617424	0.1617424	4.5287878	126.80606	0.026949
29	867	410	0.1609573	0.1609573	4.6677607	135.36506	0.026818
30	857	400	0.1570315	0.1570315	4.7109443	141.32833	0.026164
31	849	392	0.1538908	0.1538908	4.7706163	147.8891	0.025641
32	844	387	0.151928	0.151928	4.8616945	155.57422	0.025314
33	832	375	0.147217	0.147217	4.8581613	160.31932	0.024529
34	824	367	0.1440764	0.1440764	4.8985969	166.5523	0.024006
35	817	360	0.1413283	0.1413283	4.9464915	173.1272	0.023548
36	807	350	0.1374025	0.1374025	4.9464915	178.07369	0.022894
37	799	342	0.1342619	0.1342619	4.9676908	183.80456	0.02237
38	789	332	0.1303361	0.1303361	4.9527728	188.20537	0.021716
39	777	320	0.1256252	0.1256252	4.8993821	191.0759	0.020931
40	764	307	0.1205217	0.1205217	4.8208663	192.83465	0.020081
41	752	295	0.1158107	0.1158107	4.7482393	194.67781	0.019296
42	739	282	0.1107072	0.1107072	4.649702	195.28749	0.018446
43	727	270	0.1059962	0.1059962	4.5578386	195.98706	0.017661
44	712	255	0.1001076	0.1001076	4.4047329	193.80825	0.01668
45	707	250	0.0981447	0.0981447	4.4165103	198.74296	0.016353
46	689	232	0.0910783	0.0910783	4.1895998	192.72159	0.015175

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
47	677	220	0.0863673	0.0863673	4.0592637	190.78539	0.01439
48	667	210	0.0824415	0.0824415	3.9571932	189.94527	0.013736
49	652	195	0.0765528	0.0765528	3.7510894	183.80338	0.012755
50	644	187	0.0734122	0.0734122	3.6706108	183.53054	0.012232
51	637	180	0.0706642	0.0706642	3.6038724	183.79749	0.011774
52	627	170	0.0667384	0.0667384	3.4703956	180.46057	0.01112
53	617	160	0.0628126	0.0628126	3.3290673	176.44057	0.010466
54	609	152	0.059672	0.059672	3.2222859	174.00344	0.009942
55	597	140	0.054961	0.054961	3.0228559	166.25708	0.009158
56	587	130	0.0510352	0.0510352	2.8579729	160.04648	0.008503
57	579	122	0.0478946	0.0478946	2.7299922	155.60956	0.00798
58	572	115	0.0451465	0.0451465	2.6184999	151.87299	0.007522
59	567	110	0.0431837	0.0431837	2.5478357	150.32231	0.007195
60	564	107	0.0420059	0.0420059	2.5203552	151.22131	0.006999
61	559	102	0.040043	0.040043	2.4426246	149.0001	0.006672
62	552	95	0.037295	0.037295	2.3122885	143.36189	0.006214
63	549	92	0.0361172	0.0361172	2.2753861	143.34932	0.006018
64	547	90	0.0353321	0.0353321	2.2612533	144.72021	0.005887
65	537	80	0.0314063	0.0314063	2.0414092	132.6916	0.005233
66	532	75	0.0294434	0.0294434	1.9432645	128.25546	0.004906
67	527	70	0.0274805	0.0274805	1.8411941	123.36	0.004579
68	527	70	0.0274805	0.0274805	1.8686746	127.06987	0.004579
69	524	67	0.0263028	0.0263028	1.8148913	125.2275	0.004383
70	524	67	0.0263028	0.0263028	1.8411941	128.88358	0.004383
71	524	67	0.0263028	0.0263028	1.8674968	132.59228	0.004383
72	519	62	0.0243399	0.0243399	1.7524713	126.17793	0.004055
73	519	62	0.0243399	0.0243399	1.7768112	129.70721	0.004055
74	519	62	0.0243399	0.0243399	1.801151	133.28518	0.004055
75	512	55	0.0215918	0.0215918	1.6193871	121.45403	0.003598
76	509	52	0.0204141	0.0204141	1.551471	117.9118	0.003401
77	507	50	0.0196289	0.0196289	1.511428	116.37995	0.003271
78	507	50	0.0196289	0.0196289	1.5310569	119.42244	0.003271
79	507	50	0.0196289	0.0196289	1.5506858	122.50418	0.003271
80	504	47	0.0184512	0.0184512	1.4760959	118.08767	0.003074
81	499	42	0.0164883	0.0164883	1.3355527	108.17977	0.002747

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
82	497	40	0.0157031	0.0157031	1.2876581	105.58797	0.002616
83	497	40	0.0157031	0.0157031	1.3033613	108.17898	0.002616
84	497	40	0.0157031	0.0157031	1.3190644	110.80141	0.002616
85	492	35	0.0137403	0.0137403	1.1679216	99.273337	0.002289
86	489	32	0.0125625	0.0125625	1.0803766	92.912384	0.002093
87	489	32	0.0125625	0.0125625	1.0929391	95.0857	0.002093
88	487	30	0.0117774	0.0117774	1.0364077	91.203882	0.001962
89	487	30	0.0117774	0.0117774	1.0481851	93.288475	0.001962
90	487	30	0.0117774	0.0117774	1.0599625	95.396622	0.001962
91	484	27	0.0105996	0.0105996	0.9645658	87.775492	0.001766
92	484	27	0.0105996	0.0105996	0.9751655	89.715223	0.001766
93	484	27	0.0105996	0.0105996	0.9857651	91.676154	0.001766
94	479	22	0.0086367	0.0086367	0.8118527	76.314157	0.001439
95	479	22	0.0086367	0.0086367	0.8204895	77.946499	0.001439
96	479	22	0.0086367	0.0086367	0.8291262	79.596115	0.001439
97	479	22	0.0086367	0.0086367	0.8377629	81.263004	0.001439
98	479	22	0.0086367	0.0086367	0.8463997	82.947167	0.001439
99	479	22	0.0086367	0.0086367	0.8550364	84.648603	0.001439
100	479	22	0.0086367	0.0086367	0.8636731	86.367312	0.001439
101	477	20	0.0078516	0.0078516	0.793009	80.093905	0.001308
102	477	20	0.0078516	0.0078516	0.8008605	81.687774	0.001308
103	477	20	0.0078516	0.0078516	0.8087121	83.297347	0.001308
104	477	20	0.0078516	0.0078516	0.8165637	84.922623	0.001308
105	477	20	0.0078516	0.0078516	0.8244153	86.563602	0.001308
106	477	20	0.0078516	0.0078516	0.8322668	88.220284	0.001308
107	477	20	0.0078516	0.0078516	0.8401184	89.892669	0.001308
108	472	15	0.0058887	0.0058887	0.6359775	68.685568	0.000981
109	472	15	0.0058887	0.0058887	0.6418662	69.963412	0.000981
110	472	15	0.0058887	0.0058887	0.6477548	71.253033	0.000981
111	472	15	0.0058887	0.0058887	0.6536435	72.554431	0.000981
112	472	15	0.0058887	0.0058887	0.6595322	73.867607	0.000981
113	472	15	0.0058887	0.0058887	0.6654209	75.19256	0.000981
114	472	15	0.0058887	0.0058887	0.6713096	76.52929	0.000981
115	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5417586	62.302238	0.000785
116	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5464695	63.390467	0.000785

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
117	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5511805	64.488117	0.000785
118	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5558914	65.595189	0.000785
119	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5606024	66.711682	0.000785
120	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5653133	67.837598	0.000785
121	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5700243	68.972936	0.000785
122	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5747352	70.117695	0.000785
123	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5794461	71.271876	0.000785
124	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5841571	72.43548	0.000785
125	469	12	0.0047109	0.0047109	0.588868	73.608505	0.000785
126	469	12	0.0047109	0.0047109	0.593579	74.790952	0.000785
127	469	12	0.0047109	0.0047109	0.5982899	75.982821	0.000785
128	469	12	0.0047109	0.0047109	0.6030009	77.184112	0.000785
129	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5064265	65.32902	0.000654
130	469	12	0.0047109	0.0047109	0.6124228	79.614959	0.000785
131	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5142781	67.370429	0.000654
132	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5182039	68.402911	0.000654
133	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5221297	69.443245	0.000654
134	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5260554	70.49143	0.000654
135	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5299812	71.547467	0.000654
136	467	10	0.0039258	0.0039258	0.533907	72.611355	0.000654
137	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5378328	73.683095	0.000654
138	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5417586	74.762686	0.000654
139	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5456844	75.850129	0.000654
140	467	10	0.0039258	0.0039258	0.5496102	76.945424	0.000654
141	467	10	0.0039258	0.0039258	0.553536	78.04857	0.000654
142	464	7	0.0027481	0.0027481	0.3902232	55.411697	0.000458
143	464	7	0.0027481	0.0027481	0.3929713	56.194892	0.000458
144	464	7	0.0027481	0.0027481	0.3957193	56.983582	0.000458
145	464	7	0.0027481	0.0027481	0.3984674	57.777769	0.000458
146	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4012154	58.577452	0.000458
147	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4039635	59.382631	0.000458
148	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4067115	60.193306	0.000458
149	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4094596	61.009477	0.000458
150	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4122076	61.831144	0.000458
151	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4149557	62.658307	0.000458

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
152	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4177037	63.490967	0.000458
153	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4204518	64.329122	0.000458
154	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4231998	65.172774	0.000458
155	464	7	0.0027481	0.0027481	0.4259479	66.021922	0.000458
156	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1224846	19.10759	0.000131
157	464	7	0.0027481	0.0027481	0.431444	67.736705	0.000458
158	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1240549	19.600669	0.000131
159	462	5	0.0019629	0.0019629	0.3121001	49.62391	0.000327
160	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1256252	20.100029	0.000131
161	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1264103	20.352065	0.000131
162	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1271955	20.60567	0.000131
163	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1279807	20.860847	0.000131
164	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1287658	21.117593	0.000131
165	459	2	0.0007852	0.0007852	0.129551	21.37591	0.000131
166	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1303361	21.635797	0.000131
167	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1311213	21.897254	0.000131
168	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1319064	22.160282	0.000131
169	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1326916	22.42488	0.000131
170	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1334768	22.691048	0.000131
171	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1342619	22.958787	0.000131
172	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1350471	23.228096	0.000131
173	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1358322	23.498975	0.000131
174	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1366174	23.771425	0.000131
175	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1374025	24.045445	0.000131
176	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1381877	24.321035	0.000131
177	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1389729	24.598196	0.000131
178	459	2	0.0007852	0.0007852	0.139758	24.876927	0.000131
179	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1405432	25.157228	0.000131
180	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1413283	25.439099	0.000131
181	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1421135	25.722541	0.000131
182	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1428986	26.007553	0.000131
183	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1436838	26.294136	0.000131
184	459	2	0.0007852	0.0007852	0.144469	26.582288	0.000131
185	459	2	0.0007852	0.0007852	0.1452541	26.872011	0.000131
186	457	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชี้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
187	457	0	0	0	0	0	0
188	457	0	0	0	0	0	0
189	457	0	0	0	0	0	0
190	457	0	0	0	0	0	0
191	457	0	0	0	0	0	0
192	457	0	0	0	0	0	0
193	457	0	0	0	0	0	0
194	457	0	0	0	0	0	0
195	457	0	0	0	0	0	0
196	457	0	0	0	0	0	0
197	457	0	0	0	0	0	0
				6.001743	263.66174	15568.384	

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชี้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	466	0	0	0	0	0	0
1	466	0	0	0	0	0	0
2	466	0	0	0	0	0	0
3	466	0	0	0	0	0	0
4	466	0	0	0	0	0	0
5	466	0	0	0	0	0	0
6	466	0	0	0	0	0	0
7	466	0	0	0	0	0	0
8	466	0	0	0	0	0	0
9	466	0	0	0	0	0	0
10	466	0	0	0	0	0	0
11	466	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีววัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
12	466	0	0	0	0	0	0
13	466	0	0	0	0	0	0
14	466	0	0	0	0	0	0
15	468	2	0.0007852	0.0007852	0.0117774	0.1766604	7.27E-05
16	506	40	0.0157031	0.0157031	0.2512504	4.0200058	0.001454
17	646	180	0.0706642	0.0706642	1.2012908	20.421944	0.006542
18	908	442	0.1735198	0.1735198	3.1233561	56.220409	0.016063
19	986	520	0.2041409	0.2041409	3.8786775	73.694872	0.018898
20	1035	569	0.2233773	0.2233773	4.4675455	89.35091	0.020679
21	1130	664	0.2606723	0.2606723	5.4741173	114.95646	0.024131
22	1223	757	0.2971821	0.2971821	6.5380055	143.83612	0.027511
23	1268	802	0.3148481	0.3148481	7.2415066	166.55465	0.029147
24	1305	839	0.3293735	0.3293735	7.9049646	189.71915	0.030491
25	1343	877	0.3442915	0.3442915	8.6072878	215.1822	0.031872
26	1345	879	0.3450767	0.3450767	8.9719934	233.27183	0.031945
27	1365	899	0.3529282	0.3529282	9.5290626	257.28469	0.032672
28	1370	904	0.3548911	0.3548911	9.9369519	278.23465	0.032854
29	1375	909	0.356854	0.356854	10.348767	300.11424	0.033035
30	1358	892	0.3501802	0.3501802	10.505406	315.16217	0.032418
31	1355	889	0.3490025	0.3490025	10.819076	335.39136	0.032308
32	1335	869	0.3411509	0.3411509	10.916828	349.3385	0.031582
33	1325	859	0.3372251	0.3372251	11.128428	367.23813	0.031218
34	1285	819	0.3215219	0.3215219	10.931746	371.67937	0.029765
35	1243	777	0.3050336	0.3050336	10.676178	373.66621	0.028238
36	1215	749	0.2940414	0.2940414	10.585492	381.07771	0.027221
37	1188	722	0.2834418	0.2834418	10.487347	388.03185	0.026239
38	1145	679	0.2665609	0.2665609	10.129315	384.91399	0.024677
39	1110	644	0.2528207	0.2528207	9.860064	384.54025	0.023405
40	1075	609	0.2390804	0.2390804	9.5632169	382.52868	0.022133
41	1028	562	0.2206292	0.2206292	9.0457982	370.87773	0.020424
42	998	532	0.2088519	0.2088519	8.7717783	368.41469	0.019334
43	958	492	0.1931487	0.1931487	8.3053948	357.13198	0.017881
44	911	445	0.1746975	0.1746975	7.6866908	338.2144	0.016172
45	883	417	0.1637053	0.1637053	7.3667392	331.50326	0.015155
46	851	385	0.1511428	0.1511428	6.9525686	319.81816	0.013992

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
47	831	365	0.1432912	0.1432912	6.7346875	316.53031	0.013265
48	816	350	0.1374025	0.1374025	6.595322	316.57546	0.01272
49	798	332	0.1303361	0.1303361	6.3864702	312.93704	0.012066
50	776	310	0.1216994	0.1216994	6.0849697	304.24849	0.011266
51	766	300	0.1177736	0.1177736	6.006454	306.32915	0.010903
52	746	280	0.109922	0.109922	5.7159458	297.22918	0.010176
53	728	262	0.1028556	0.1028556	5.4513477	288.92143	0.009522
54	718	252	0.0989298	0.0989298	5.3422108	288.47939	0.009158
55	708	242	0.095004	0.095004	5.2252224	287.38723	0.008795
56	691	225	0.0883302	0.0883302	4.9464915	277.00353	0.008177
57	686	220	0.0863673	0.0863673	4.9229368	280.6074	0.007995
58	671	205	0.0804786	0.0804786	4.6677607	270.73012	0.00745
59	658	192	0.0753751	0.0753751	4.4471314	262.38075	0.006978
60	648	182	0.0714493	0.0714493	4.2869593	257.21756	0.006614
61	636	170	0.0667384	0.0667384	4.071041	248.3335	0.006178
62	631	165	0.0647755	0.0647755	4.01608	248.99696	0.005997
63	618	152	0.059672	0.059672	3.7593336	236.83801	0.005524
64	611	145	0.0569239	0.0569239	3.6431303	233.16034	0.00527
65	606	140	0.054961	0.054961	3.5724661	232.2103	0.005088
66	598	132	0.0518204	0.0518204	3.4201456	225.72961	0.004797
67	586	120	0.0471094	0.0471094	3.1563327	211.47429	0.004361
68	586	120	0.0471094	0.0471094	3.2034421	217.83406	0.004361
69	576	110	0.0431837	0.0431837	2.9796723	205.59739	0.003998
70	571	105	0.0412208	0.0412208	2.8854534	201.98174	0.003816
71	566	100	0.0392579	0.0392579	2.7873087	197.89892	0.003634
72	558	92	0.0361172	0.0361172	2.6004413	187.23177	0.003344
73	556	90	0.0353321	0.0353321	2.579242	188.28467	0.003271
74	548	82	0.0321915	0.0321915	2.3821675	176.2804	0.00298
75	548	82	0.0321915	0.0321915	2.414359	181.07692	0.00298
76	546	80	0.0314063	0.0314063	2.3868784	181.40276	0.002907
77	538	72	0.0282657	0.0282657	2.1764563	167.58713	0.002617
78	531	65	0.0255176	0.0255176	1.990374	155.24917	0.002362
79	536	70	0.0274805	0.0274805	2.1709602	171.50585	0.002544
80	526	60	0.0235547	0.0235547	1.8843777	150.75022	0.002181
81	523	57	0.022377	0.022377	1.8125358	146.8154	0.002072

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
82	518	52	0.0204141	0.0204141	1.6739555	137.26435	0.00189
83	516	50	0.0196289	0.0196289	1.6292016	135.22373	0.001817
84	508	42	0.0164883	0.0164883	1.3850176	116.34148	0.001526
85	503	37	0.0145254	0.0145254	1.23466	104.9461	0.001345
86	496	30	0.0117774	0.0117774	1.012853	87.10536	0.00109
87	496	30	0.0117774	0.0117774	1.0246304	89.142844	0.00109
88	496	30	0.0117774	0.0117774	1.0364077	91.203882	0.00109
89	496	30	0.0117774	0.0117774	1.0481851	93.288475	0.00109
90	488	22	0.0086367	0.0086367	0.7773058	69.957523	0.0008
91	488	22	0.0086367	0.0086367	0.7859425	71.520771	0.0008
92	486	20	0.0078516	0.0078516	0.7223448	66.455721	0.000727
93	486	20	0.0078516	0.0078516	0.7301964	67.908262	0.000727
94	486	20	0.0078516	0.0078516	0.7380479	69.376507	0.000727
95	486	20	0.0078516	0.0078516	0.7458995	70.860454	0.000727
96	486	20	0.0078516	0.0078516	0.7537511	72.360105	0.000727
97	483	17	0.0066738	0.0066738	0.6473623	62.79414	0.000618
98	483	17	0.0066738	0.0066738	0.6540361	64.095538	0.000618
99	483	17	0.0066738	0.0066738	0.6607099	65.410284	0.000618
100	483	17	0.0066738	0.0066738	0.6673838	66.738378	0.000618
101	478	12	0.0047109	0.0047109	0.4758054	48.056343	0.000436
102	478	12	0.0047109	0.0047109	0.4805163	49.012665	0.000436
103	478	12	0.0047109	0.0047109	0.4852273	49.978408	0.000436
104	478	12	0.0047109	0.0047109	0.4899382	50.953574	0.000436
105	478	12	0.0047109	0.0047109	0.4946492	51.938161	0.000436
106	478	12	0.0047109	0.0047109	0.4993601	52.93217	0.000436
107	478	12	0.0047109	0.0047109	0.504071	53.935601	0.000436
108	478	12	0.0047109	0.0047109	0.508782	54.948454	0.000436
109	478	12	0.0047109	0.0047109	0.5134929	55.970729	0.000436
110	478	12	0.0047109	0.0047109	0.5182039	57.002426	0.000436
111	478	12	0.0047109	0.0047109	0.5229148	58.043545	0.000436
112	478	12	0.0047109	0.0047109	0.5276258	59.094085	0.000436
113	478	12	0.0047109	0.0047109	0.5323367	60.154048	0.000436
114	476	10	0.0039258	0.0039258	0.4475397	51.019527	0.000363
115	478	12	0.0047109	0.0047109	0.5417586	62.302238	0.000436
116	476	10	0.0039258	0.0039258	0.4553913	52.825389	0.000363

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
117	476	10	0.0039258	0.0039258	0.4593171	53.740097	0.000363
118	476	10	0.0039258	0.0039258	0.4632429	54.662657	0.000363
119	476	10	0.0039258	0.0039258	0.4671686	55.593069	0.000363
120	476	10	0.0039258	0.0039258	0.4710944	56.531332	0.000363
121	476	10	0.0039258	0.0039258	0.4750202	57.477446	0.000363
122	471	5	0.0019629	0.0019629	0.239473	29.215706	0.000182
123	471	5	0.0019629	0.0019629	0.2414359	29.696615	0.000182
124	471	5	0.0019629	0.0019629	0.2433988	30.18145	0.000182
125	471	5	0.0019629	0.0019629	0.2453617	30.67021	0.000182
126	471	5	0.0019629	0.0019629	0.2473246	31.162897	0.000182
127	471	5	0.0019629	0.0019629	0.2492875	31.659509	0.000182
128	471	5	0.0019629	0.0019629	0.2512504	32.160046	0.000182
129	471	5	0.0019629	0.0019629	0.2532133	32.66451	0.000182
130	471	5	0.0019629	0.0019629	0.2551762	33.1729	0.000182
131	471	5	0.0019629	0.0019629	0.257139	33.685215	0.000182
132	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1036408	13.680582	7.27E-05
133	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1044259	13.888649	7.27E-05
134	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1052111	14.098286	7.27E-05
135	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1059962	14.309493	7.27E-05
136	471	5	0.0019629	0.0019629	0.2669535	36.305677	0.000182
137	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1075666	14.736619	7.27E-05
138	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1083517	14.952537	7.27E-05
139	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1091369	15.170026	7.27E-05
140	468	2	0.0007852	0.0007852	0.109922	15.389085	7.27E-05
141	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1107072	15.609714	7.27E-05
142	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1114923	15.831914	7.27E-05
143	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1122775	16.055683	7.27E-05
144	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1130627	16.281024	7.27E-05
145	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1138478	16.507934	7.27E-05
146	468	2	0.0007852	0.0007852	0.114633	16.736415	7.27E-05
147	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1154181	16.966466	7.27E-05
148	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1162033	17.198087	7.27E-05
149	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1169885	17.431279	7.27E-05
150	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1177736	17.666041	7.27E-05
151	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1185588	17.902374	7.27E-05

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
152	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1193439	18.140276	7.27E-05
153	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1201291	18.379749	7.27E-05
154	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1209142	18.620793	7.27E-05
155	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1216994	18.863406	7.27E-05
156	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1224846	19.10759	7.27E-05
157	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1232697	19.353344	7.27E-05
158	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1240549	19.600669	7.27E-05
159	468	2	0.0007852	0.0007852	0.12484	19.849564	7.27E-05
160	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1256252	20.100029	7.27E-05
161	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1264103	20.352065	7.27E-05
162	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1271955	20.60567	7.27E-05
163	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1279807	20.860847	7.27E-05
164	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1287658	21.117593	7.27E-05
165	468	2	0.0007852	0.0007852	0.129551	21.37591	7.27E-05
166	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1303361	21.635797	7.27E-05
167	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1311213	21.897254	7.27E-05
168	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1319064	22.160282	7.27E-05
169	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1326916	22.42488	7.27E-05
170	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1334768	22.691048	7.27E-05
171	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1342619	22.958787	7.27E-05
172	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1350471	23.228096	7.27E-05
173	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1358322	23.498975	7.27E-05
174	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1366174	23.771425	7.27E-05
175	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1374025	24.045445	7.27E-05
176	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1381877	24.321035	7.27E-05
177	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1389729	24.598196	7.27E-05
178	468	2	0.0007852	0.0007852	0.139758	24.876927	7.27E-05
179	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1405432	25.157228	7.27E-05
180	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1413283	25.439099	7.27E-05
181	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1421135	25.722541	7.27E-05
182	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1428986	26.007553	7.27E-05
183	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1436838	26.294136	7.27E-05
184	468	2	0.0007852	0.0007852	0.144469	26.582288	7.27E-05
185	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1452541	26.872011	7.27E-05
186	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1460393	27.163305	7.27E-05

ตารางที่ ข-10 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
187	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1468244	27.456169	7.27E-05
188	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1476096	27.750603	7.27E-05
189	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1483947	28.046607	7.27E-05
190	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1491799	28.344182	7.27E-05
191	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1499651	28.643327	7.27E-05
192	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1507502	28.944042	7.27E-05
193	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1515354	29.246327	7.27E-05
194	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1523205	29.550183	7.27E-05
195	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1531057	29.85561	7.27E-05
196	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1538908	30.162606	7.27E-05
197	468	2	0.0007852	0.0007852	0.154676	30.471173	7.27E-05
198	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1554612	30.78131	7.27E-05
199	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1562463	31.093018	7.27E-05
200	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1570315	31.406295	7.27E-05
201	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1578166	31.721144	7.27E-05
202	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1586018	32.037562	7.27E-05
203	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1593869	32.355551	7.27E-05
204	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1601721	32.67511	7.27E-05
205	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1609573	32.996239	7.27E-05
206	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1617424	33.318939	7.27E-05
207	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1625276	33.643209	7.27E-05
208	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1633127	33.969049	7.27E-05
209	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1640979	34.29646	7.27E-05
210	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1648831	34.625441	7.27E-05
211	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1656682	34.955992	7.27E-05
212	468	2	0.0007852	0.0007852	0.1664534	35.288114	7.27E-05
213	466	0	0	0	0	0	0
214	466	0	0	0	0	0	0
215	466	0	0	0	0	0	0
216	466	0	0	0	0	0	0
217	466	0	0	0	0	0	0
218	466	0	0	0	0	0	0
219	466	0	0	0	0	0	0
220	466	0	0	0	0	0	0
				10.802195	429.76806	21495.845	

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	461	0	0	0	0	0	0
1	461	0	0	0	0	0	0
2	461	0	0	0	0	0	0
3	461	0	0	0	0	0	0
4	469	8	0.0031406	0.0031406	0.0125625	0.0502501	0.000307
5	499	38	0.014918	0.014918	0.07459	0.3729498	0.00146
6	569	108	0.0423985	0.0423985	0.254391	1.526346	0.004149
7	629	168	0.0659532	0.0659532	0.4616725	3.2317078	0.006454
8	766	305	0.1197365	0.1197365	0.957892	7.6631361	0.011717
9	841	380	0.1491799	0.1491799	1.3426191	12.083572	0.014598
10	894	433	0.1699866	0.1699866	1.6998657	16.998657	0.016634
11	1026	565	0.221807	0.221807	2.4398766	26.838642	0.021705
12	1058	597	0.2343695	0.2343695	2.8124338	33.749205	0.022934
13	1113	652	0.2559613	0.2559613	3.327497	43.257461	0.025047
14	1158	697	0.2736273	0.2736273	3.8307829	53.63096	0.026776
15	1188	727	0.2854047	0.2854047	4.2810706	64.21606	0.027928
16	1218	757	0.2971821	0.2971821	4.7549131	76.07861	0.029081
17	1233	772	0.3030708	0.3030708	5.1522028	87.587447	0.029657
18	1241	780	0.3062114	0.3062114	5.5118048	99.212487	0.029964
19	1248	787	0.3089594	0.3089594	5.8702292	111.53435	0.030233
20	1258	797	0.3128852	0.3128852	6.2577044	125.15409	0.030617
21	1258	797	0.3128852	0.3128852	6.5705896	137.98238	0.030617
22	1251	790	0.3101372	0.3101372	6.8230177	150.10639	0.030348
23	1248	787	0.3089594	0.3089594	7.1060669	163.43954	0.030233
24	1238	777	0.3050336	0.3050336	7.3208075	175.69938	0.029849
25	1211	750	0.294434	0.294434	7.3608505	184.02126	0.028812
26	1188	727	0.2854047	0.2854047	7.4205224	192.93358	0.027928
27	1161	700	0.2748051	0.2748051	7.4197373	200.33291	0.026891
28	1108	647	0.2539984	0.2539984	7.1119556	199.13476	0.024855
29	1088	627	0.2461468	0.2461468	7.1382584	207.00949	0.024087
30	1051	590	0.2316214	0.2316214	6.9486429	208.45929	0.022665
31	1033	572	0.224555	0.224555	6.9612054	215.79737	0.021974
32	989	528	0.2072815	0.2072815	6.6330096	212.25631	0.020284
33	969	508	0.19943	0.19943	6.5811892	217.17924	0.019515
34	946	485	0.1904007	0.1904007	6.4736226	220.10317	0.018632

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซัลไฟด์ที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
35	919	458	0.179801	0.179801	6.2930364	220.25628	0.017594
36	889	428	0.1680237	0.1680237	6.0488525	217.75869	0.016442
37	881	420	0.1648831	0.1648831	6.1006729	225.7249	0.016135
38	849	388	0.1523205	0.1523205	5.7881802	219.95085	0.014905
39	834	373	0.1464319	0.1464319	5.7108422	222.72285	0.014329
40	806	345	0.1354396	0.1354396	5.417586	216.70344	0.013253
41	779	318	0.12484	0.12484	5.118441	209.85608	0.012216
42	761	300	0.1177736	0.1177736	4.9464915	207.75264	0.011525
43	731	270	0.1059962	0.1059962	4.5578386	195.98706	0.010372
44	709	248	0.0973595	0.0973595	4.2838187	188.48802	0.009527
45	699	238	0.0934337	0.0934337	4.2045178	189.2033	0.009143
46	694	233	0.0914708	0.0914708	4.2076584	193.55229	0.008951
47	681	220	0.0863673	0.0863673	4.0592637	190.78539	0.008451
48	669	208	0.0816564	0.0816564	3.9195057	188.13627	0.00799
49	651	190	0.07459	0.07459	3.6549076	179.09047	0.007299
50	641	180	0.0706642	0.0706642	3.5332082	176.66041	0.006915
51	649	188	0.0738048	0.0738048	3.7640445	191.96627	0.007222
52	619	158	0.0620274	0.0620274	3.2254265	167.72218	0.00607
53	601	140	0.054961	0.054961	2.9129339	154.3855	0.005378
54	601	140	0.054961	0.054961	2.9678949	160.26633	0.005378
55	594	133	0.052213	0.052213	2.8717131	157.94422	0.005109
56	589	128	0.0502501	0.0502501	2.8140041	157.58423	0.004917
57	579	118	0.0463243	0.0463243	2.6404843	150.5076	0.004533
58	579	118	0.0463243	0.0463243	2.6868086	155.8349	0.004533
59	574	113	0.0443614	0.0443614	2.6173221	154.42201	0.004341
60	566	105	0.0412208	0.0412208	2.4732458	148.39475	0.004034
61	561	100	0.0392579	0.0392579	2.39473	146.07853	0.003842
62	551	90	0.0353321	0.0353321	2.1905891	135.81652	0.003457
63	541	80	0.0314063	0.0314063	1.9785966	124.65159	0.003073
64	539	78	0.0306211	0.0306211	1.9597528	125.42418	0.002996
65	534	73	0.0286582	0.0286582	1.8627859	121.08108	0.002804
66	534	73	0.0286582	0.0286582	1.8914441	124.83531	0.002804
67	529	68	0.0266954	0.0266954	1.7885885	119.83543	0.002612
68	529	68	0.0266954	0.0266954	1.8152839	123.4393	0.002612
69	521	60	0.0235547	0.0235547	1.6252758	112.14403	0.002305

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
70	521	60	0.0235547	0.0235547	1.6488305	115.41814	0.002305
71	519	58	0.0227696	0.0227696	1.6166391	114.78137	0.002228
72	511	50	0.0196289	0.0196289	1.4132833	101.7564	0.001921
73	509	48	0.0188438	0.0188438	1.3755957	100.41849	0.001844
74	509	48	0.0188438	0.0188438	1.3944395	103.18852	0.001844
75	506	45	0.017666	0.017666	1.3249531	99.371482	0.001729
76	499	38	0.014918	0.014918	1.1337673	86.166312	0.00146
77	499	38	0.014918	0.014918	1.1486853	88.448765	0.00146
78	499	38	0.014918	0.014918	1.1636032	90.761053	0.00146
79	499	38	0.014918	0.014918	1.1785212	93.103178	0.00146
80	494	33	0.0129551	0.0129551	1.0364077	82.91262	0.001268
81	494	33	0.0129551	0.0129551	1.0493628	84.99839	0.001268
82	491	30	0.0117774	0.0117774	0.9657436	79.190974	0.001152
83	491	30	0.0117774	0.0117774	0.9775209	81.134238	0.001152
84	489	28	0.0109922	0.0109922	0.9233451	77.560987	0.001076
85	486	25	0.0098145	0.0098145	0.8342297	70.909526	0.00096
86	489	28	0.0109922	0.0109922	0.9453295	81.298336	0.001076
87	486	25	0.0098145	0.0098145	0.8538587	74.285703	0.00096
88	481	20	0.0078516	0.0078516	0.6909385	60.802588	0.000768
89	486	25	0.0098145	0.0098145	0.8734876	77.740396	0.00096
90	481	20	0.0078516	0.0078516	0.7066416	63.597748	0.000768
91	481	20	0.0078516	0.0078516	0.7144932	65.018883	0.000768
92	481	20	0.0078516	0.0078516	0.7223448	66.455721	0.000768
93	481	20	0.0078516	0.0078516	0.7301964	67.908262	0.000768
94	481	20	0.0078516	0.0078516	0.7380479	69.376507	0.000768
95	479	18	0.0070664	0.0070664	0.6713096	63.774409	0.000691
96	479	18	0.0070664	0.0070664	0.678376	65.124094	0.000691
97	479	18	0.0070664	0.0070664	0.6854424	66.487913	0.000691
98	474	13	0.0051035	0.0051035	0.5001453	49.014235	0.000499
99	479	18	0.0070664	0.0070664	0.6995752	69.257948	0.000691
100	474	13	0.0051035	0.0051035	0.5103523	51.03523	0.000499
101	474	13	0.0051035	0.0051035	0.5154558	52.061038	0.000499
102	474	13	0.0051035	0.0051035	0.5205593	53.097053	0.000499
103	471	10	0.0039258	0.0039258	0.4043561	41.648673	0.000384
104	471	10	0.0039258	0.0039258	0.4082818	42.461311	0.000384

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
105	471	10	0.0039258	0.0039258	0.4122076	43.281801	0.000384
106	471	10	0.0039258	0.0039258	0.4161334	44.110142	0.000384
107	471	10	0.0039258	0.0039258	0.4200592	44.946334	0.000384
108	471	10	0.0039258	0.0039258	0.423985	45.790379	0.000384
109	471	10	0.0039258	0.0039258	0.4279108	46.642274	0.000384
110	471	10	0.0039258	0.0039258	0.4318366	47.502022	0.000384
111	471	10	0.0039258	0.0039258	0.4357623	48.369621	0.000384
112	471	10	0.0039258	0.0039258	0.4396881	49.245071	0.000384
113	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3548911	40.102699	0.000307
114	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3580318	40.815621	0.000307
115	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3611724	41.534826	0.000307
116	469	8	0.0031406	0.0031406	0.364313	42.260311	0.000307
117	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3674537	42.992078	0.000307
118	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3705943	43.730126	0.000307
119	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3737349	44.474455	0.000307
120	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2355472	28.265666	0.000192
121	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3800162	45.981957	0.000307
122	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3831568	46.74513	0.000307
123	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3862974	47.514584	0.000307
124	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3894381	48.29032	0.000307
125	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3925787	49.072337	0.000307
126	469	8	0.0031406	0.0031406	0.3957193	49.860635	0.000307
127	469	8	0.0031406	0.0031406	0.39886	50.655214	0.000307
128	469	8	0.0031406	0.0031406	0.4020006	51.456074	0.000307
129	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2532133	32.66451	0.000192
130	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2551762	33.1729	0.000192
131	466	5	0.0019629	0.0019629	0.257139	33.685215	0.000192
132	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2591019	34.201456	0.000192
133	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2610648	34.721622	0.000192
134	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2630277	35.245715	0.000192
135	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2649906	35.773733	0.000192
136	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2669535	36.305677	0.000192
137	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2689164	36.841547	0.000192
138	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2708793	37.381343	0.000192
139	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2728422	37.925065	0.000192

ตารางที่ ข-11 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
140	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2748051	38.472712	0.000192
141	466	5	0.0019629	0.0019629	0.276768	39.024285	0.000192
142	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2787309	39.579784	0.000192
143	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2806938	40.139208	0.000192
144	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2826567	40.702559	0.000192
145	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2846196	41.269835	0.000192
146	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2865824	41.841037	0.000192
147	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2885453	42.416165	0.000192
148	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2905082	42.995218	0.000192
149	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2924711	43.578198	0.000192
150	466	5	0.0019629	0.0019629	0.294434	44.165103	0.000192
151	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2963969	44.755934	0.000192
152	466	5	0.0019629	0.0019629	0.2983598	45.350691	0.000192
153	466	5	0.0019629	0.0019629	0.3003227	45.949373	0.000192
154	466	5	0.0019629	0.0019629	0.3022856	46.551981	0.000192
155	466	5	0.0019629	0.0019629	0.3042485	47.158515	0.000192
156	466	5	0.0019629	0.0019629	0.3062114	47.768975	0.000192
157	461	0	0	0	0	0	0
158	461	0	0	0	0	0	0
159	461	0	0	0	0	0	0
160	461	0	0	0	0	0	0
161	461	0	0	0	0	0	0
162	461	0	0	0	0	0	0
163	461	0	0	0	0	0	0
164	461	0	0	0	0	0	0
165	461	0	0	0	0	0	0
166	461	0	0	0	0	0	0
167	461	0	0	0	0	0	0
168	461	0	0	0	0	0	0
169	461	0	0	0	0	0	0
170	461	0	0	0	0	0	0
171	461	0	0	0	0	0	0
172	461	0	0	0	0	0	0
173	461	0	0	0	0	0	0
				10.219216	320.14478	14276.448	

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	455	0	0	0	0	0	0
1	455	0	0	0	0	0	0
2	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0015703	0.0031406	7.32E-05
3	505	50	0.0196289	0.0196289	0.0588868	0.1766604	0.001831
4	537	82	0.0321915	0.0321915	0.1287658	0.5150632	0.003003
5	607	152	0.059672	0.059672	0.2983598	1.491799	0.005567
6	685	230	0.0902931	0.0902931	0.5417586	3.2505516	0.008424
7	767	312	0.1224846	0.1224846	0.8573919	6.001743	0.011427
8	877	422	0.1656682	0.1656682	1.3253457	10.602765	0.015456
9	945	490	0.1923636	0.1923636	1.731272	15.581448	0.017946
10	1022	567	0.2225921	0.2225921	2.2259212	22.259212	0.020766
11	1082	627	0.2461468	0.2461468	2.7076152	29.783768	0.022964
12	1147	692	0.2716645	0.2716645	3.2599735	39.119682	0.025344
13	1174	719	0.2822641	0.2822641	3.669433	47.702629	0.026333
14	1224	769	0.301893	0.301893	4.2265022	59.171031	0.028164
15	1237	782	0.3069965	0.3069965	4.6049481	69.074221	0.02864
16	1254	799	0.3136704	0.3136704	5.018726	80.299616	0.029263
17	1257	802	0.3148481	0.3148481	5.3524179	90.991104	0.029373
18	1254	799	0.3136704	0.3136704	5.6460668	101.6292	0.029263
19	1247	792	0.3109223	0.3109223	5.9075242	112.24296	0.029007
20	1229	774	0.3038559	0.3038559	6.0771182	121.54236	0.028347
21	1214	759	0.2979672	0.2979672	6.2573118	131.40355	0.027798
22	1197	742	0.2912934	0.2912934	6.4084546	140.986	0.027176
23	1169	714	0.2803012	0.2803012	6.4469273	148.27933	0.02615
24	1144	689	0.2704867	0.2704867	6.4916813	155.80035	0.025234
25	1124	669	0.2626351	0.2626351	6.5658786	164.14697	0.024502
26	1104	649	0.2547836	0.2547836	6.6243729	172.23369	0.023769
27	1084	629	0.246932	0.246932	6.6671639	180.01343	0.023037
28	1064	609	0.2390804	0.2390804	6.6942519	187.43905	0.022304
29	1047	592	0.2324066	0.2324066	6.739791	195.45394	0.021682
30	1017	562	0.2206292	0.2206292	6.6188768	198.5663	0.020583
31	997	542	0.2127777	0.2127777	6.5961072	204.47932	0.019851
32	975	520	0.2041409	0.2041409	6.5325094	209.0403	0.019045
33	955	500	0.1962893	0.1962893	6.4775484	213.7591	0.018312
34	922	467	0.1833342	0.1833342	6.2333645	211.93439	0.017104

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
35	895	440	0.1727346	0.1727346	6.0457119	211.59992	0.016115
36	885	430	0.1688088	0.1688088	6.0771182	218.77625	0.015749
37	855	400	0.1570315	0.1570315	5.8101646	214.97609	0.01465
38	835	380	0.1491799	0.1491799	5.6688363	215.41578	0.013917
39	807	352	0.1381877	0.1381877	5.3893203	210.18349	0.012892
40	795	340	0.1334768	0.1334768	5.3390702	213.56281	0.012452
41	775	320	0.1256252	0.1256252	5.1506324	211.17593	0.01172
42	765	310	0.1216994	0.1216994	5.1113746	214.67773	0.011354
43	747	292	0.114633	0.114633	4.9292181	211.95638	0.010694
44	735	280	0.109922	0.109922	4.8365695	212.80906	0.010255
45	725	270	0.1059962	0.1059962	4.7698311	214.6424	0.009889
46	715	260	0.1020705	0.1020705	4.6952412	215.98109	0.009522
47	705	250	0.0981447	0.0981447	4.6127996	216.80158	0.009156
48	695	240	0.0942189	0.0942189	4.5225065	217.08031	0.00879
49	682	227	0.0891154	0.0891154	4.3666528	213.96599	0.008314
50	670	215	0.0844044	0.0844044	4.2202209	211.01105	0.007874
51	662	207	0.0812638	0.0812638	4.1444533	211.36712	0.007581
52	650	195	0.0765528	0.0765528	3.9807479	206.99889	0.007142
53	637	182	0.0714493	0.0714493	3.7868141	200.70115	0.006666
54	630	175	0.0687013	0.0687013	3.7098686	200.33291	0.006409
55	625	170	0.0667384	0.0667384	3.6706108	201.88359	0.006226
56	610	155	0.0608497	0.0608497	3.4075831	190.82465	0.005677
57	607	152	0.059672	0.059672	3.4013018	193.8742	0.005567
58	597	142	0.0557462	0.0557462	3.2332781	187.53013	0.005201
59	590	135	0.0529981	0.0529981	3.1268893	184.48647	0.004944
60	582	127	0.0498575	0.0498575	2.9914496	179.48698	0.004651
61	575	120	0.0471094	0.0471094	2.873676	175.29424	0.004395
62	565	110	0.0431837	0.0431837	2.6773867	165.99797	0.004029
63	562	107	0.0420059	0.0420059	2.646373	166.7215	0.003919
64	557	102	0.040043	0.040043	2.5627537	164.01624	0.003736
65	550	95	0.037295	0.037295	2.4241734	157.57127	0.003479
66	545	90	0.0353321	0.0353321	2.3319174	153.90655	0.003296
67	537	82	0.0321915	0.0321915	2.1568273	144.50743	0.003003
68	535	80	0.0314063	0.0314063	2.1356281	145.22271	0.00293
69	527	72	0.0282657	0.0282657	1.9503309	134.57284	0.002637

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
70	525	70	0.0274805	0.0274805	1.9236356	134.65449	0.002564
71	522	67	0.0263028	0.0263028	1.8674968	132.59228	0.002454
72	517	62	0.0243399	0.0243399	1.7524713	126.17793	0.002271
73	515	60	0.0235547	0.0235547	1.7194947	125.52311	0.002197
74	510	55	0.0215918	0.0215918	1.5977953	118.23685	0.002014
75	505	50	0.0196289	0.0196289	1.4721701	110.41276	0.001831
76	505	50	0.0196289	0.0196289	1.491799	113.37673	0.001831
77	505	50	0.0196289	0.0196289	1.511428	116.37995	0.001831
78	502	47	0.0184512	0.0184512	1.4391935	112.25709	0.001721
79	497	42	0.0164883	0.0164883	1.3025761	102.90351	0.001538
80	495	40	0.0157031	0.0157031	1.2562518	100.50015	0.001465
81	495	40	0.0157031	0.0157031	1.271955	103.02835	0.001465
82	495	40	0.0157031	0.0157031	1.2876581	105.58797	0.001465
83	490	35	0.0137403	0.0137403	1.1404411	94.656611	0.001282
84	490	35	0.0137403	0.0137403	1.1541814	96.951234	0.001282
85	487	32	0.0125625	0.0125625	1.067814	90.764194	0.001172
86	487	32	0.0125625	0.0125625	1.0803766	92.912384	0.001172
87	485	30	0.0117774	0.0117774	1.0246304	89.142844	0.001099
88	485	30	0.0117774	0.0117774	1.0364077	91.203882	0.001099
89	485	30	0.0117774	0.0117774	1.0481851	93.288475	0.001099
90	482	27	0.0105996	0.0105996	0.9539662	85.85696	0.000989
91	477	22	0.0086367	0.0086367	0.7859425	71.520771	0.000806
92	477	22	0.0086367	0.0086367	0.7945793	73.101293	0.000806
93	477	22	0.0086367	0.0086367	0.803216	74.699088	0.000806
94	477	22	0.0086367	0.0086367	0.8118527	76.314157	0.000806
95	475	20	0.0078516	0.0078516	0.7458995	70.860454	0.000732
96	475	20	0.0078516	0.0078516	0.7537511	72.360105	0.000732
97	475	20	0.0078516	0.0078516	0.7616027	73.875458	0.000732
98	470	15	0.0058887	0.0058887	0.5770907	56.554886	0.000549
99	470	15	0.0058887	0.0058887	0.5829794	57.714956	0.000549
100	467	12	0.0047109	0.0047109	0.4710944	47.109443	0.000439
101	467	12	0.0047109	0.0047109	0.4758054	48.056343	0.000439
102	467	12	0.0047109	0.0047109	0.4805163	49.012665	0.000439
103	467	12	0.0047109	0.0047109	0.4852273	49.978408	0.000439
104	467	12	0.0047109	0.0047109	0.4899382	50.953574	0.000439

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
105	467	12	0.0047109	0.0047109	0.4946492	51.938161	0.000439
106	467	12	0.0047109	0.0047109	0.4993601	52.93217	0.000439
107	465	10	0.0039258	0.0039258	0.4200592	44.946334	0.000366
108	465	10	0.0039258	0.0039258	0.423985	45.790379	0.000366
109	465	10	0.0039258	0.0039258	0.4279108	46.642274	0.000366
110	465	10	0.0039258	0.0039258	0.4318366	47.502022	0.000366
111	465	10	0.0039258	0.0039258	0.4357623	48.369621	0.000366
112	462	7	0.0027481	0.0027481	0.3077817	34.47155	0.000256
113	462	7	0.0027481	0.0027481	0.3105297	35.089861	0.000256
114	462	7	0.0027481	0.0027481	0.3132778	35.713669	0.000256
115	462	7	0.0027481	0.0027481	0.3160258	36.342972	0.000256
116	462	7	0.0027481	0.0027481	0.3187739	36.977772	0.000256
117	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0918634	10.748019	7.32E-05
118	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0926486	10.932531	7.32E-05
119	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0934337	11.118614	7.32E-05
120	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0942189	11.306266	7.32E-05
121	457	2	0.0007852	0.0007852	0.095004	11.495489	7.32E-05
122	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0957892	11.686283	7.32E-05
123	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0965744	11.878646	7.32E-05
124	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0973595	12.07258	7.32E-05
125	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0981447	12.268084	7.32E-05
126	457	2	0.0007852	0.0007852	0.0989298	12.465159	7.32E-05
127	457	2	0.0007852	0.0007852	0.099715	12.663803	7.32E-05
128	457	2	0.0007852	0.0007852	0.1005001	12.864019	7.32E-05
129	455	0	0	0	0	0	0
130	455	0	0	0	0	0	0
131	455	0	0	0	0	0	0
132	455	0	0	0	0	0	0
133	455	0	0	0	0	0	0
134	455	0	0	0	0	0	0
135	455	0	0	0	0	0	0
136	455	0	0	0	0	0	0
137	455	0	0	0	0	0	0
138	455	0	0	0	0	0	0
139	455	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข-12 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชี้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 0 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
140	455	0	0	0	0	0	0
141	455	0	0	0	0	0	0
142	455	0	0	0	0	0	0
143	455	0	0	0	0	0	0
144	455	0	0	0	0	0	0
145	455	0	0	0	0	0	0
146	455	0	0	0	0	0	0
147	455	0	0	0	0	0	0
148	455	0	0	0	0	0	0
149	455	0	0	0	0	0	0
				10.718969	327.02472	13881.623	

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชี้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	462	0	0	0	0	0	0
1	462	0	0	0	0	0	0
2	462	0	0	0	0	0	0
3	462	0	0	0	0	0	0
4	462	0	0	0	0	0	0
5	462	0	0	0	0	0	0
6	462	0	0	0	0	0	0
7	462	0	0	0	0	0	0
8	462	0	0	0	0	0	0
9	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0105996	0.0953966	0.000274
10	477	15	0.0058887	0.0058887	0.0588868	0.588868	0.001372
11	517	55	0.0215918	0.0215918	0.2375101	2.6126112	0.005032
12	617	155	0.0608497	0.0608497	0.7301964	8.7623564	0.014181

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
13	697	235	0.092256	0.092256	1.1993279	15.591263	0.0215
14	802	340	0.1334768	0.1334768	1.8686746	26.161444	0.031107
15	845	383	0.1503576	0.1503576	2.2553646	33.830469	0.035041
16	885	423	0.1660608	0.1660608	2.6569726	42.511561	0.038701
17	907	445	0.1746975	0.1746975	2.9698578	50.487583	0.040714
18	925	463	0.1817639	0.1817639	3.2717508	58.891515	0.04236
19	935	473	0.1856897	0.1856897	3.5281047	67.033989	0.043275
20	935	473	0.1856897	0.1856897	3.7137944	74.275889	0.043275
21	935	473	0.1856897	0.1856897	3.8994842	81.889167	0.043275
22	917	455	0.1786233	0.1786233	3.9297127	86.45368	0.041629
23	905	443	0.1739124	0.1739124	3.9999843	91.999639	0.040531
24	885	423	0.1660608	0.1660608	3.9854589	95.651013	0.038701
25	870	408	0.1601721	0.1601721	4.0043027	100.10757	0.037328
26	845	383	0.1503576	0.1503576	3.9092986	101.64176	0.035041
27	827	365	0.1432912	0.1432912	3.868863	104.4593	0.033394
28	807	345	0.1354396	0.1354396	3.7923102	106.18468	0.031565
29	787	325	0.1275881	0.1275881	3.7000542	107.30157	0.029735
30	762	300	0.1177736	0.1177736	3.5332082	105.99625	0.027447
31	745	283	0.1110998	0.1110998	3.4440929	106.76688	0.025892
32	725	263	0.1032482	0.1032482	3.3039423	105.72615	0.024062
33	707	245	0.0961818	0.0961818	3.1739987	104.74196	0.022415
34	695	233	0.0914708	0.0914708	3.1100084	105.74029	0.021317
35	677	215	0.0844044	0.0844044	2.9541547	103.39541	0.019671
36	662	200	0.0785157	0.0785157	2.8265666	101.7564	0.018298
37	647	185	0.0726271	0.0726271	2.6872011	99.426443	0.016926
38	635	173	0.0679161	0.0679161	2.5808123	98.070868	0.015828
39	622	160	0.0628126	0.0628126	2.449691	95.537951	0.014639
40	607	145	0.0569239	0.0569239	2.2769564	91.078257	0.013266
41	595	133	0.052213	0.052213	2.1407316	87.769996	0.012168
42	582	120	0.0471094	0.0471094	1.9785966	83.101058	0.010979
43	570	108	0.0423985	0.0423985	1.8231354	78.394824	0.009881
44	562	100	0.0392579	0.0392579	1.7273462	76.003235	0.009149
45	555	93	0.0365098	0.0365098	1.6429418	73.932382	0.008509
46	547	85	0.0333692	0.0333692	1.5349827	70.609204	0.007777
47	542	80	0.0314063	0.0314063	1.4760959	69.376507	0.007319

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
48	535	73	0.0286582	0.0286582	1.3755957	66.028595	0.006679
49	527	65	0.0255176	0.0255176	1.2503631	61.267794	0.005947
50	522	60	0.0235547	0.0235547	1.1777361	58.886804	0.005489
51	515	53	0.0208067	0.0208067	1.0611402	54.11815	0.004849
52	507	45	0.017666	0.017666	0.9186341	47.768975	0.004117
53	505	43	0.0168809	0.0168809	0.8946868	47.418403	0.003934
54	502	40	0.0157031	0.0157031	0.84797	45.790379	0.00366
55	495	33	0.0129551	0.0129551	0.7125303	39.189168	0.003019
56	495	33	0.0129551	0.0129551	0.7254854	40.627184	0.003019
57	490	28	0.0109922	0.0109922	0.6265556	35.713669	0.002562
58	487	25	0.0098145	0.0098145	0.5692391	33.015868	0.002287
59	487	25	0.0098145	0.0098145	0.5790536	34.164161	0.002287
60	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5417586	32.505516	0.002104
61	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5507879	33.598062	0.002104
62	482	20	0.0078516	0.0078516	0.4867976	30.18145	0.00183
63	477	15	0.0058887	0.0058887	0.3709869	23.372172	0.001372
64	477	15	0.0058887	0.0058887	0.3768755	24.120035	0.001372
65	475	13	0.0051035	0.0051035	0.331729	21.562385	0.001189
66	475	13	0.0051035	0.0051035	0.3368325	22.230946	0.001189
67	470	8	0.0031406	0.0031406	0.2104222	14.098286	0.000732
68	470	8	0.0031406	0.0031406	0.2135628	14.522271	0.000732
69	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1354396	9.3453358	0.000457
70	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1374025	9.618178	0.000457
71	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1393654	9.8949459	0.000457
72	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1413283	10.17564	0.000457
73	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1432912	10.460259	0.000457
74	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1452541	10.748805	0.000457
75	467	5	0.0019629	0.0019629	0.147217	11.041276	0.000457
76	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0895079	6.8026036	0.000274
77	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0906857	6.9827972	0.000274
78	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0918634	7.1653463	0.000274
79	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0930412	7.3502509	0.000274
80	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0942189	7.5375109	0.000274
81	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0953966	7.7271264	0.000274
82	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0965744	7.9190974	0.000274

ตารางที่ ข-13 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซีวีดีที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
83	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0977521	8.1134238	0.000274
84	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0989298	8.3101058	0.000274
85	462	0	0	0	0	0	0
86	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1012853	8.710536	0.000274
87	462	0	0	0	0	0	0
88	462	0	0	0	0	0	0
89	462	0	0	0	0	0	0
90	462	0	0	0	0	0	0
91	462	0	0	0	0	0	0
92	462	0	0	0	0	0	0
93	462	0	0	0	0	0	0
94	462	0	0	0	0	0	0
95	462	0	0	0	0	0	0
96	462	0	0	0	0	0	0
97	462	0	0	0	0	0	0
98	462	0	0	0	0	0	0
99	462	0	0	0	0	0	0
100	462	0	0	0	0	0	0
				4.2908851	118.35227	3842.0389	

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซีวีดีที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	462	0	0	0	0	0	0
1	462	0	0	0	0	0	0
2	462	0	0	0	0	0	0
3	462	0	0	0	0	0	0
4	462	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
5	462	0	0	0	0	0	0
6	462	0	0	0	0	0	0
7	462	0	0	0	0	0	0
8	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0094219	0.0753751	0.000234
9	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0105996	0.0953966	0.000234
10	467	5	0.0019629	0.0019629	0.0196289	0.1962893	0.00039
11	535	73	0.0286582	0.0286582	0.3152407	3.4676476	0.005699
12	637	175	0.0687013	0.0687013	0.8244153	9.892983	0.013662
13	762	300	0.1177736	0.1177736	1.5310569	19.90374	0.023421
14	810	348	0.1366174	0.1366174	1.9126434	26.777007	0.027168
15	965	503	0.1974671	0.1974671	2.9620062	44.430094	0.039269
16	975	513	0.2013929	0.2013929	3.2222859	51.556575	0.04005
17	1015	553	0.217096	0.217096	3.6906323	62.740749	0.043173
18	1042	580	0.2276956	0.2276956	4.0985215	73.773388	0.045281
19	1054	592	0.2324066	0.2324066	4.4157251	83.898778	0.046218
20	1054	592	0.2324066	0.2324066	4.6481317	92.962634	0.046218
21	1054	592	0.2324066	0.2324066	4.8805383	102.4913	0.046218
22	1047	585	0.2296585	0.2296585	5.0524878	111.15473	0.045671
23	1037	575	0.2257327	0.2257327	5.1918532	119.41262	0.04489
24	1007	545	0.2139554	0.2139554	5.1349293	123.2383	0.042548
25	982	520	0.2041409	0.2041409	5.103523	127.58808	0.040596
26	950	488	0.1915784	0.1915784	4.9810384	129.507	0.038098
27	930	468	0.1837268	0.1837268	4.9606244	133.93686	0.036537
28	895	433	0.1699866	0.1699866	4.7596241	133.26947	0.033804
29	855	393	0.1542834	0.1542834	4.4742194	129.75236	0.030682
30	830	368	0.144469	0.144469	4.3340688	130.02206	0.02873
31	795	333	0.1307287	0.1307287	4.0525898	125.63029	0.025997
32	762	300	0.1177736	0.1177736	3.7687554	120.60017	0.023421
33	727	265	0.1040334	0.1040334	3.4331007	113.29232	0.020689
34	707	245	0.0961818	0.0961818	3.2701805	111.18614	0.019127
35	685	223	0.087545	0.087545	3.0640767	107.24268	0.01741
36	667	205	0.0804786	0.0804786	2.8972307	104.30031	0.016004
37	642	180	0.0706642	0.0706642	2.6145741	96.739241	0.014053
38	625	163	0.0639903	0.0639903	2.4316324	92.402032	0.012725
39	607	145	0.0569239	0.0569239	2.2200325	86.581268	0.01132

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
40	597	135	0.0529981	0.0529981	2.1199249	84.796998	0.010539
41	590	128	0.0502501	0.0502501	2.060253	84.470372	0.009993
42	577	115	0.0451465	0.0451465	1.8961551	79.638514	0.008978
43	570	108	0.0423985	0.0423985	1.8231354	78.394824	0.008432
44	555	93	0.0365098	0.0365098	1.606432	70.683008	0.007261
45	555	93	0.0365098	0.0365098	1.6429418	73.932382	0.007261
46	542	80	0.0314063	0.0314063	1.4446896	66.455721	0.006246
47	530	68	0.0266954	0.0266954	1.2546815	58.970031	0.005309
48	530	68	0.0266954	0.0266954	1.2813769	61.506089	0.005309
49	522	60	0.0235547	0.0235547	1.1541814	56.554886	0.004684
50	517	55	0.0215918	0.0215918	1.0795914	53.97957	0.004294
51	507	45	0.017666	0.017666	0.9009681	45.949373	0.003513
52	505	43	0.0168809	0.0168809	0.877806	45.64591	0.003357
53	505	43	0.0168809	0.0168809	0.8946868	47.418403	0.003357
54	502	40	0.0157031	0.0157031	0.84797	45.790379	0.003123
55	495	33	0.0129551	0.0129551	0.7125303	39.189168	0.002576
56	495	33	0.0129551	0.0129551	0.7254854	40.627184	0.002576
57	490	28	0.0109922	0.0109922	0.6265556	35.713669	0.002186
58	487	25	0.0098145	0.0098145	0.5692391	33.015868	0.001952
59	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5327293	31.431028	0.001796
60	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5417586	32.505516	0.001796
61	482	20	0.0078516	0.0078516	0.478946	29.215706	0.001561
62	477	15	0.0058887	0.0058887	0.3650982	22.636087	0.001171
63	477	15	0.0058887	0.0058887	0.3709869	23.372172	0.001171
64	477	15	0.0058887	0.0058887	0.3768755	24.120035	0.001171
65	477	15	0.0058887	0.0058887	0.3827642	24.879675	0.001171
66	475	13	0.0051035	0.0051035	0.3368325	22.230946	0.001015
67	475	13	0.0051035	0.0051035	0.341936	22.909715	0.001015
68	475	13	0.0051035	0.0051035	0.3470396	23.59869	0.001015
69	470	8	0.0031406	0.0031406	0.2167034	14.952537	0.000625
70	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1374025	9.618178	0.00039
71	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1393654	9.8949459	0.00039
72	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1413283	10.17564	0.00039
73	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1432912	10.460259	0.00039
74	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1452541	10.748805	0.00039

ตารางที่ ข-14 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 0 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 0 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
75	467	5	0.0019629	0.0019629	0.147217	11.041276	0.00039
76	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0895079	6.8026036	0.000234
77	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1511428	11.637995	0.00039
78	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0918634	7.1653463	0.000234
79	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0930412	7.3502509	0.000234
80	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0942189	7.5375109	0.000234
81	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0953966	7.7271264	0.000234
82	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0965744	7.9190974	0.000234
83	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0977521	8.1134238	0.000234
84	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0989298	8.3101058	0.000234
85	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1001076	8.5091432	0.000234
86	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1012853	8.710536	0.000234
87	465	3	0.0011777	0.0011777	0.102463	8.9142844	0.000234
88	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1036408	9.1203882	0.000234
89	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1048185	9.3288475	0.000234
90	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1059962	9.5396622	0.000234
91	462	0	0	0	0	0	0
92	462	0	0	0	0	0	0
93	462	0	0	0	0	0	0
94	462	0	0	0	0	0	0
95	462	0	0	0	0	0	0
96	462	0	0	0	0	0	0
97	462	0	0	0	0	0	0
98	462	0	0	0	0	0	0
99	462	0	0	0	0	0	0
100	462	0	0	0	0	0	0
				5.0285405	134.47626	4231.3278	

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซั้วัดที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	462	0	0	0	0	0	0
1	462	0	0	0	0	0	0
2	462	0	0	0	0	0	0
3	462	0	0	0	0	0	0
4	490	28	0.0109922	0.0109922	0.0439688	0.1758753	0.001952
5	587	125	0.0490723	0.0490723	0.2453617	1.2268084	0.008716
6	585	123	0.0482872	0.0482872	0.2897231	1.7383384	0.008577
7	635	173	0.0679161	0.0679161	0.4754128	3.3278896	0.012063
8	737	275	0.1079591	0.1079591	0.8636731	6.909385	0.019176
9	870	408	0.1601721	0.1601721	1.441549	12.973941	0.02845
10	882	420	0.1648831	0.1648831	1.6488305	16.488305	0.029287
11	1005	543	0.2131702	0.2131702	2.3448725	25.793598	0.037863
12	990	528	0.2072815	0.2072815	2.4873786	29.848543	0.036818
13	1022	560	0.2198441	0.2198441	2.8579729	37.153647	0.039049
14	1029	567	0.2225921	0.2225921	3.1162897	43.628055	0.039537
15	1049	587	0.2304437	0.2304437	3.4566554	51.849831	0.040932
16	1047	585	0.2296585	0.2296585	3.6745366	58.792585	0.040792
17	1047	585	0.2296585	0.2296585	3.9041951	66.371317	0.040792
18	1027	565	0.221807	0.221807	3.9925253	71.865455	0.039398
19	1034	572	0.224555	0.224555	4.2665452	81.064359	0.039886
20	997	535	0.2100296	0.2100296	4.200592	84.01184	0.037306
21	965	503	0.1974671	0.1974671	4.1468087	87.082983	0.035074
22	957	495	0.1943265	0.1943265	4.275182	94.054003	0.034516
23	935	473	0.1856897	0.1856897	4.2708636	98.229863	0.032982
24	885	423	0.1660608	0.1660608	3.9854589	95.651013	0.029496
25	877	415	0.1629202	0.1629202	4.0730039	101.8251	0.028938
26	835	373	0.1464319	0.1464319	3.8072282	98.987932	0.026009
27	815	353	0.1385803	0.1385803	3.7416675	101.02502	0.024615
28	757	295	0.1158107	0.1158107	3.2427	90.7956	0.02057
29	747	285	0.1118849	0.1118849	3.2446629	94.095224	0.019873
30	745	283	0.1110998	0.1110998	3.3329931	99.989793	0.019734
31	710	248	0.0973595	0.0973595	3.018145	93.562495	0.017293
32	685	223	0.087545	0.087545	2.8014415	89.64613	0.01555
33	670	208	0.0816564	0.0816564	2.6946601	88.923785	0.014504
34	665	203	0.0796935	0.0796935	2.7095781	92.125657	0.014155

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
35	645	183	0.0718419	0.0718419	2.5144665	88.006328	0.012761
36	627	165	0.0647755	0.0647755	2.3319174	83.949028	0.011505
37	625	163	0.0639903	0.0639903	2.3676421	87.602757	0.011366
38	607	145	0.0569239	0.0569239	2.1631086	82.198127	0.010111
39	590	128	0.0502501	0.0502501	1.9597528	76.43036	0.008925
40	585	123	0.0482872	0.0482872	1.9314872	77.259487	0.008577
41	582	120	0.0471094	0.0471094	1.9314872	79.190974	0.008368
42	565	103	0.0404356	0.0404356	1.6982954	71.328408	0.007182
43	565	103	0.0404356	0.0404356	1.738731	74.765434	0.007182
44	557	95	0.037295	0.037295	1.6409789	72.203073	0.006624
45	542	80	0.0314063	0.0314063	1.4132833	63.597748	0.005578
46	535	73	0.0286582	0.0286582	1.3182792	60.640845	0.00509
47	535	73	0.0286582	0.0286582	1.3469375	63.306062	0.00509
48	527	65	0.0255176	0.0255176	1.2248455	58.792585	0.004532
49	517	55	0.0215918	0.0215918	1.0579996	51.841979	0.003835
50	517	55	0.0215918	0.0215918	1.0795914	53.97957	0.003835
51	510	48	0.0188438	0.0188438	0.9610326	49.012665	0.003347
52	505	43	0.0168809	0.0168809	0.877806	45.64591	0.002998
53	505	43	0.0168809	0.0168809	0.8946868	47.418403	0.002998
54	502	40	0.0157031	0.0157031	0.84797	45.790379	0.002789
55	497	35	0.0137403	0.0137403	0.755714	41.564269	0.002441
56	495	33	0.0129551	0.0129551	0.7254854	40.627184	0.002301
57	495	33	0.0129551	0.0129551	0.7384405	42.09111	0.002301
58	490	28	0.0109922	0.0109922	0.6375478	36.977772	0.001952
59	487	25	0.0098145	0.0098145	0.5790536	34.164161	0.001743
60	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5417586	32.505516	0.001604
61	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5507879	33.598062	0.001604
62	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5598172	34.708667	0.001604
63	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5688465	35.837331	0.001604
64	482	20	0.0078516	0.0078516	0.5025007	32.160046	0.001395
65	482	20	0.0078516	0.0078516	0.5103523	33.1729	0.001395
66	477	15	0.0058887	0.0058887	0.3886529	25.651092	0.001046
67	477	15	0.0058887	0.0058887	0.3945416	26.434286	0.001046
68	477	15	0.0058887	0.0058887	0.4004303	27.229258	0.001046
69	475	13	0.0051035	0.0051035	0.3521431	24.297873	0.000906

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซีวีดีที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
70	475	13	0.0051035	0.0051035	0.3572466	25.007263	0.000906
71	470	8	0.0031406	0.0031406	0.2229847	15.831914	0.000558
72	470	8	0.0031406	0.0031406	0.2261253	16.281024	0.000558
73	470	8	0.0031406	0.0031406	0.229266	16.736415	0.000558
74	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1452541	10.748805	0.000349
75	467	5	0.0019629	0.0019629	0.147217	11.041276	0.000349
76	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1491799	11.337673	0.000349
77	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1511428	11.637995	0.000349
78	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1531057	11.942244	0.000349
79	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1550686	12.250418	0.000349
80	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1570315	12.562518	0.000349
81	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1589944	12.878544	0.000349
82	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1609573	13.198496	0.000349
83	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1629202	13.522373	0.000349
84	465	3	0.0011777	0.0011777	0.0989298	8.3101058	0.000209
85	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1001076	8.5091432	0.000209
86	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1012853	8.710536	0.000209
87	465	3	0.0011777	0.0011777	0.102463	8.9142844	0.000209
88	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1036408	9.1203882	0.000209
89	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1048185	9.3288475	0.000209
90	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1059962	9.5396622	0.000209
91	465	3	0.0011777	0.0011777	0.107174	9.7528325	0.000209
92	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1083517	9.9683582	0.000209
93	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1095295	10.186239	0.000209
94	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1107072	10.406476	0.000209
95	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1118849	10.629068	0.000209
96	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1130627	10.854016	0.000209
97	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1142404	11.081319	0.000209
98	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1154181	11.310977	0.000209
99	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1165959	11.542991	0.000209
100	462	0	0	0	0	0	0
101	462	0	0	0	0	0	0
102	462	0	0	0	0	0	0
103	462	0	0	0	0	0	0
104	462	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ข-15 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซีวีตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวทราย และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
105	462	0	0	0	0	0	0
106	462	0	0	0	0	0	0
107	462	0	0	0	0	0	0
108	462	0	0	0	0	0	0
109	462	0	0	0	0	0	0
110	462	0	0	0	0	0	0
				5.629971	132.46155	4106.3362	

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารซีวีตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
0	462	0	0	0	0	0	0
1	462	0	0	0	0	0	0
2	475	13	0.0051035	0.0051035	0.010207	0.0204141	0.000713
3	525	63	0.0247325	0.0247325	0.0741974	0.2225921	0.003453
4	590	128	0.0502501	0.0502501	0.2010003	0.8040012	0.007016
5	695	233	0.0914708	0.0914708	0.4573542	2.2867709	0.012771
6	787	325	0.1275881	0.1275881	0.7655285	4.5931707	0.017813
7	867	405	0.1589944	0.1589944	1.1129606	7.7907242	0.022198
8	962	500	0.1962893	0.1962893	1.5703148	12.562518	0.027405
9	1022	560	0.2198441	0.2198441	1.9785966	17.807369	0.030693
10	1082	620	0.2433988	0.2433988	2.4339879	24.339879	0.033982
11	1122	660	0.2591019	0.2591019	2.8501213	31.351334	0.036174
12	1147	685	0.2689164	0.2689164	3.2269969	38.723962	0.037545
13	1157	695	0.2728422	0.2728422	3.5469485	46.11033	0.038093
14	1164	702	0.2755902	0.2755902	3.8582634	54.015687	0.038476
15	1154	692	0.2716645	0.2716645	4.0749668	61.124502	0.037928
16	1144	682	0.2677387	0.2677387	4.2838187	68.541099	0.03738

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
17	1124	662	0.2598871	0.2598871	4.4180806	75.10737	0.036284
18	1104	642	0.2520355	0.2520355	4.5366394	81.659509	0.035188
19	1082	620	0.2433988	0.2433988	4.624577	87.866963	0.033982
20	1047	585	0.2296585	0.2296585	4.5931707	91.863414	0.032064
21	1022	560	0.2198441	0.2198441	4.6167254	96.951234	0.030693
22	995	533	0.2092444	0.2092444	4.6033777	101.27431	0.029213
23	975	513	0.2013929	0.2013929	4.632036	106.53683	0.028117
24	947	485	0.1904007	0.1904007	4.569616	109.67078	0.026583
25	917	455	0.1786233	0.1786233	4.4655826	111.63957	0.024938
26	895	433	0.1699866	0.1699866	4.4196509	114.91092	0.023733
27	867	405	0.1589944	0.1589944	4.292848	115.9069	0.022198
28	845	383	0.1503576	0.1503576	4.2100139	117.88039	0.020992
29	817	355	0.1393654	0.1393654	4.0415976	117.20633	0.019457
30	797	335	0.1315139	0.1315139	3.9454159	118.36248	0.018361
31	775	313	0.1228771	0.1228771	3.8091911	118.08492	0.017155
32	755	293	0.1150256	0.1150256	3.6808178	117.78617	0.016059
33	727	265	0.1040334	0.1040334	3.4331007	113.29232	0.014525
34	710	248	0.0973595	0.0973595	3.3102235	112.5476	0.013593
35	695	233	0.0914708	0.0914708	3.2014792	112.05177	0.012771
36	677	215	0.0844044	0.0844044	3.0385591	109.38813	0.011784
37	665	203	0.0796935	0.0796935	2.9486586	109.10037	0.011126
38	647	185	0.0726271	0.0726271	2.7598282	104.87347	0.01014
39	637	175	0.0687013	0.0687013	2.6793496	104.49463	0.009592
40	622	160	0.0628126	0.0628126	2.5125036	100.50015	0.00877
41	610	148	0.0581016	0.0581016	2.3821675	97.668868	0.008112
42	602	140	0.054961	0.054961	2.3083627	96.951234	0.007673
43	587	125	0.0490723	0.0490723	2.1101105	90.73475	0.006851
44	582	120	0.0471094	0.0471094	2.0728155	91.203882	0.006577
45	570	108	0.0423985	0.0423985	1.9079324	85.85696	0.005919
46	565	103	0.0404356	0.0404356	1.8600378	85.561741	0.005645
47	557	95	0.037295	0.037295	1.7528639	82.384601	0.005207
48	550	88	0.0345469	0.0345469	1.6582524	79.596115	0.004823
49	547	85	0.0333692	0.0333692	1.6350903	80.119422	0.004659
50	537	75	0.0294434	0.0294434	1.4721701	73.608505	0.004111
51	535	73	0.0286582	0.0286582	1.4615705	74.540094	0.004001

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
52	527	65	0.0255176	0.0255176	1.326916	68.999631	0.003563
53	525	63	0.0247325	0.0247325	1.3108203	69.473473	0.003453
54	517	55	0.0215918	0.0215918	1.1659587	62.961771	0.003015
55	517	55	0.0215918	0.0215918	1.1875505	65.31528	0.003015
56	510	48	0.0188438	0.0188438	1.0552515	59.094085	0.002631
57	505	43	0.0168809	0.0168809	0.9622104	54.845991	0.002357
58	505	43	0.0168809	0.0168809	0.9790913	56.787293	0.002357
59	502	40	0.0157031	0.0157031	0.9264857	54.662657	0.002192
60	495	33	0.0129551	0.0129551	0.7773058	46.638349	0.001809
61	495	33	0.0129551	0.0129551	0.7902609	48.205915	0.001809
62	495	33	0.0129551	0.0129551	0.803216	49.799392	0.001809
63	490	28	0.0109922	0.0109922	0.6925088	43.628055	0.001535
64	487	25	0.0098145	0.0098145	0.6281259	40.200058	0.00137
65	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5869051	38.148834	0.001261
66	485	23	0.0090293	0.0090293	0.5959345	39.331674	0.001261
67	485	23	0.0090293	0.0090293	0.6049638	40.532572	0.001261
68	482	20	0.0078516	0.0078516	0.533907	36.305677	0.001096
69	482	20	0.0078516	0.0078516	0.5417586	37.381343	0.001096
70	477	15	0.0058887	0.0058887	0.4122076	28.854534	0.000822
71	477	15	0.0058887	0.0058887	0.4180963	29.684838	0.000822
72	477	15	0.0058887	0.0058887	0.423985	30.526919	0.000822
73	477	15	0.0058887	0.0058887	0.4298737	31.380778	0.000822
74	475	13	0.0051035	0.0051035	0.3776607	27.946892	0.000713
75	475	13	0.0051035	0.0051035	0.3827642	28.707317	0.000713
76	470	8	0.0031406	0.0031406	0.2386878	18.140276	0.000438
77	470	8	0.0031406	0.0031406	0.2418285	18.620793	0.000438
78	470	8	0.0031406	0.0031406	0.2449691	19.10759	0.000438
79	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1550686	12.250418	0.000274
80	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1570315	12.562518	0.000274
81	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1589944	12.878544	0.000274
82	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1609573	13.198496	0.000274
83	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1629202	13.522373	0.000274
84	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1648831	13.850176	0.000274
85	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1668459	14.181905	0.000274
86	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1688088	14.51756	0.000274

ตารางที่ ข-16 ข้อมูลดิบการวัดความเข้มข้นของสารชีวิตที่เวลาต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของของเหลว (Q_L) 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q_{PW}) 4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ($Q_{g,1}$) 10 ลิตรต่อนาที หัวกระจายอากาศ (D_1) ชนิดหัวเซรามิก และอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ($Q_{g,2}$) 2.5 ลิตรต่อนาที (ต่อ)

Time	Cond.		C(t)	C(t)dt	t-C(t)dt	t ² -C(t)dt	E(t)
87	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1707717	14.857141	0.000274
88	467	5	0.0019629	0.0019629	0.1727346	15.200647	0.000274
89	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1048185	9.3288475	0.000164
90	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1059962	9.5396622	0.000164
91	465	3	0.0011777	0.0011777	0.107174	9.7528325	0.000164
92	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1083517	9.9683582	0.000164
93	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1095295	10.186239	0.000164
94	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1107072	10.406476	0.000164
95	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1118849	10.629068	0.000164
96	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1130627	10.854016	0.000164
97	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1142404	11.081319	0.000164
98	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1154181	11.310977	0.000164
99	465	3	0.0011777	0.0011777	0.1165959	11.542991	0.000164
100	462	0	0	0	0	0	0
101	462	0	0	0	0	0	0
102	462	0	0	0	0	0	0
103	462	0	0	0	0	0	0
104	462	0	0	0	0	0	0
105	462	0	0	0	0	0	0
106	462	0	0	0	0	0	0
107	462	0	0	0	0	0	0
108	462	0	0	0	0	0	0
109	462	0	0	0	0	0	0
110	462	0	0	0	0	0	0
				7.1625982	165.90572	5254.3796	

ตารางที่ ข-17 สรุปผลการเปลี่ยนแปลง E curve ของอัตราการไหลของของเหลว ที่สภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน

Operating condition				E_{\max} (min^{-1})	ΔE_{\max}	t_p (min)	Δt_p
Q_L (lpm)	Q_{PW} (lpm)	$Q_{g,1}$ (lpm)	$Q_{g,2}$ (lpm)				
6.4	0	0	0	0.024236	0.008799	32	-3
10	0	0	0	0.033035		29	
6.4	4	0	0	0.036874	0.009343	19	0
10	4	0	0	0.046218		19	
6.4	0	10	0	0.019534	0.011083	26	-6
10	0	10	0	0.030617		20	
6.4	0	0	2.5	0.019528	0.007944	40	-13
10	0	0	2.5	0.027473		27	

ตารางที่ ข-18 สรุปผลการเปลี่ยนแปลง E curve ของอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน ที่สภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน

Operating condition				E_{\max} (min^{-1})	ΔE_{\max}	t_p (min)	Δt_p
Q_L (lpm)	Q_{PW} (lpm)	$Q_{g,1}$ (lpm)	$Q_{g,2}$ (lpm)				
10	0	0	0	0.033035	0.013182	29	-10
10	4	0	0	0.046218		19	
6.4	0	10	0	0.019534	0.012348	26	-8
6.4	4	10	0	0.031882		18	
6.4	0	0	2.5	0.019528	0.012806	40	-21
6.4	4	0	2.5	0.032334		19	

ตารางที่ ข-19 สรุปผลการเปลี่ยนแปลง E curve ของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส ที่สภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน

Operating condition				E_{\max} (min^{-1})	ΔE_{\max}	t_p (min)	Δt_p
Q_L (lpm)	Q_{PW} (lpm)	$Q_{g,1}$ (lpm)	$Q_{g,2}$ (lpm)				
10	0	0	0	0.033035	-0.00242	29	-9
10	0	10	0	0.030617		20	
10	4	10	0	0.046218	-0.00529	19	-4
10	4	10	2.5	0.040932		15	
6.4	0	0	2.5	0.019528	-0.00168	40	-20
6.4	0	10	2.5	0.017849		20	

ตารางที่ ข-20 สรุปผลการเปลี่ยนแปลง E curve ของอัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก ที่สภาวะการเดินระบบแตกต่างกัน

Operating condition				E_{\max} (min^{-1})	ΔE_{\max}	t_p (min)	Δt_p
Q_L (lpm)	Q_{PW} (lpm)	$Q_{g,1}$ (lpm)	$Q_{g,2}$ (lpm)				
10	0	0	0	0.033035	-0.00556	29	-2
10	0	0	2.5	0.027473		27	
10	4	0	0	0.046218	-0.00294	19	0
10	4	0	2.5	0.043275		19	
10	0	10	0	0.030617	-0.00124	20	-3
10	0	10	2.5	0.029373		17	

ภาคผนวก ค

ผลข้อมูลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวิภูภาคของเหลวด้วยกระบวนการทางเคมี

ตารางที่ ค-1 ผลการแยกเซลล์สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยการปรับค่าพีเอช

Initial condition		Final condition		Efficiency (%)
pH	OD ₃₁₈	pH	OD ₃₁₈	
7.99	0.063	10.5	0.019	69.84
		11	0.019	69.84
		12	0.015	76.19
		12.5	0.021	66.67

ตารางที่ ค-2 ผลการแยกเซลล์สำหรับความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์

Alum dose (mg/L)	Efficiency (%)
5	46.1
8	87.1
13	92.6
15	84.5
20	20
30	43
50	55
100	71
150	69
200	71

ตารางที่ ค-3 ผลการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 5×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการ
โคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์

Alum dose (mg/L)	Efficiency (%)
50	68.8
100	71.8
150	79.1
200	84.7
250	98.3
300	99

ตารางที่ ค-4 ผลการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการ
โคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์

Alum dose (mg/L)	Efficiency (%)
100	31.7
150	40.1
200	44.4
300	61.8
400	85.6
500	99.1

ตารางที่ ค-5 ผลการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการ
โคแอกกูเลชัน โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์

CaCl ₂ dose (mg/L)	Efficiency (%)
2	28.1
6	36.2
10	15.4
20	27.9
30	13.9
40	15.5

ตารางที่ ค-6 ผลการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 5×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการ
โคแอกกูเลชัน โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์

CaCl ₂ dose (mg/L)	Efficiency (%)
40	15.5
60	41.1
80	75.2
100	85.6
110	87.8
120	93.3

ตารางที่ ค-7 ผลการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์

CaCl ₂ dose (mg/L)	Efficiency (%)
60	28.1
80	64.9
100	79.9
120	90.7
140	92.7
180	95.6

ตารางที่ ค-8 ผลการแยกอนุภาคความขุ่น 50 NTU ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารโคแอกกูแลนต์แตกต่างกัน

Coagulant	Dose (mg/L)	Efficiency (%)
Alum	15	95.29
	20	97.74
	25	97.78
	30	97.11
	35	96.97
	40	95.72
FeCl ₃	15	96.97
	20	97.66
	25	97.27
	30	97.25
	35	96.97
	40	95.52

ตารางที่ ค-8 ผลการแยกอนุภาคความขุ่น 50 NTU ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารโคแอกกูแลนต์แตกต่างกัน (ต่อ)

Coagulant	Dose (mg/L)	Efficiency (%)
CaCl ₂	50	73.4
	100	75.2
	150	75.1
	200	75.7
	300	80.49
	500	76.4



ภาคผนวก ง

ผลข้อมูลการศึกษาการแยกอนุภาคออกจากวิภูภาคของเหลวด้วยกระบวนการทำให้
ลอยด้วยอากาศละลาย

ตารางที่ ง-1 ผลการศึกษาการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วย
กระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

Q_L (lpm)	Q_{PW} (lpm)	A/S	D/uL	Efficiency (%)
3.5	4	0.100333	0.085279	28.4
6.4	1.6	0.156771	0.104206	43.1
5	4	0.206938	0.104681	43.6
6.4	2.5	0.250833	0.111175	46.5
6.4	3.3	0.321067	0.11737	44.2

ตารางที่ ง-2 ผลการศึกษาการแยกเซลล์สาหร่ายความเข้มข้นเริ่มต้น 1×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วย
กระบวนการกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สารส้มเป็น
โคแอกกูแลนต์

Q_L (lpm)	Q_{PW} (lpm)	A/S	D/uL	Efficiency (%)
3.5	4	0.100333	0.085279	57
6.4	1.6	0.156771	0.104206	72
5	4	0.206938	0.104681	72.4
6.4	2.5	0.250833	0.111175	75
6.4	3.3	0.321067	0.11737	73

ตารางที่ ง-3 ผลการแยกอนุภาคความขุ่น 50 NTU ด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย

Q_L (lpm)	Q_{PW} (lpm)	A/S	D/uL	Efficiency (%)
5.2	4	0.087373	0.107268	50.7
7.6	2.6	0.038858	0.129049	47.6
7.6	4	0.059782	0.138312	43.5

ตารางที่ ง-4 ผลการแยกอนุภาคความขุ่น 50 NTU ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันร่วมกับกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย โดยใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์

Q_L (lpm)	Q_{PW} (lpm)	A/S	D/uL	Efficiency (%)
5.2	4	0.087373	0.107268	70.9
7.6	2.6	0.038858	0.129049	67.3
7.6	4	0.059782	0.138312	63.5

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างการคำนวณการออกแบบถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน

1. ตัวอย่างการคำนวณอุปกรณ์กวนเร็วในเส้นท่อ (Static mixer)

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลาง Static mixer (D)} = 3/4 \text{ นิ้ว} = 0.01905 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความยาว Static mixer (L)} = 210 \text{ มิลลิเมตร} = 0.21 \text{ เมตร}$$

$$\text{จำนวน Element (E)} = 6$$

$$\text{ความหนาแน่นของของเหลว (\rho)} = 997 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ความหนืดของของเหลว (\mu)} = 0.000895 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของของเหลว (Q)} = 3 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

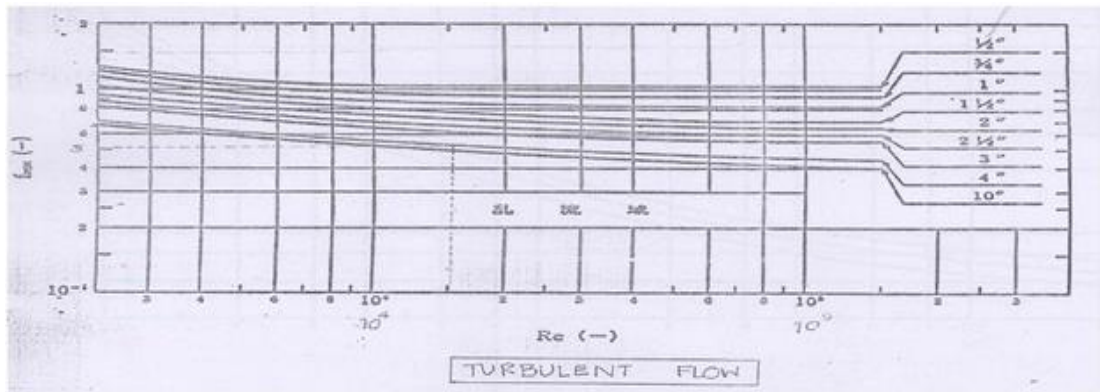
$$\begin{aligned} \text{ความเร็วการไหลใน Static mixer (V)} &= \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \\ &= \frac{3}{\frac{\pi}{4}(0.01905)^2 \times 1000 \times 60} \\ &= 0.157 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\text{เวลาสัมผัสใน Static mixer (T)} = \frac{L}{V} = \frac{0.21}{0.157}$$

$$= 1.338 \text{ วินาที}$$

$$\text{ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{997 \times 0.157 \times 0.01905}{0.000895}$$

$$= 3332$$



รูปที่ จ-1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f_{NSM}) ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ต่างๆ

จากรูปที่ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f_{NSM}) = 1.2

ความดันลด (ΔP) = $0.3061 \rho g f_{NSM} V^2 E$
 = $0.3061 \times 997 \times 9.80665 \times 1.2 (0.157)^2 \times 6$
 = 531.142 ปาสคาล

ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G) = $\sqrt{\frac{\Delta P}{\mu t}}$ = $\sqrt{\frac{531.142}{0.000895 \times 1.338}}$
 = 665.987 ต่อวินาที

ค่า Camp number (Gxt) = 891

2. ตัวอย่างการคำนวณส่วนกวนช้าแบบแผ่นกั้น

ความยาวของส่วนกวนช้า (L) = 0.2 เมตร

ความกว้างของส่วนกวนช้า (W) = 0.25 เมตร

ความลึกน้ำ (D) = 1.53 เมตร

ช่องว่างบริเวณที่มีแผ่นกั้น

กว้าง	=	0.1 เมตร
ยาว	=	0.25 เมตร
จำนวนแผ่นกั้น (N)	=	2
ความหนาแน่นของของเหลว (ρ)	=	997 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ความหนืดของของเหลว (μ)	=	0.000895 กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที
อัตราการไหลของของเหลว (Q)	=	3 ลิตรต่อนาที
ความเร็วการไหลผ่านแผ่นกั้น (v)	=	$\frac{Q}{A} = \frac{3}{0.25 \times 0.1 \times 1000 \times 60}$
	=	0.12 เมตรต่อวินาที
เวลาสัมผัสในส่วนกวนซ้ำ (T)	=	$\frac{V}{Q} = \frac{L \times W \times D}{Q}$
	=	$\frac{0.2 \times 0.25 \times 1.53 \times 1000}{3}$
	=	25.5 นาที
Head loss (H_L)	=	$0.163V^2N$
	=	$0.163 \times (0.12)^2 \times 2$
	=	0.004694 เมตร
ค่าความเร็วเกรเดียนท์ (G)	=	$\sqrt{\frac{\rho g H_L}{\mu t}}$
	=	$\sqrt{\frac{997 \times 9.81 \times 0.004694}{0.000895 \times 25.5 \times 60}}$
	=	5.79 ต่อวินาที
ค่า Camp number ($G \times t$)	=	$5.79 \times 25.55 \times 60$
	=	8859

3. ตัวอย่างการคำนวณส่วนสัมพัทธ์ระหว่างฟองอากาศและอนุภาค

$$\text{ความยาวด้านบนของส่วนสัมพัทธ์ (L}_T\text{)} = 0.7 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความยาวด้านล่างของส่วนสัมพัทธ์ (L}_B\text{)} = 0.1 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความกว้างของส่วนกวนช้า (W)} = 0.25 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความลึกน้ำ (D)} = 1.53 \text{ เมตร}$$

$$\text{อัตราการไหลของของเหลว (Q}_L\text{)} = 3 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q}_{PW}\text{)} = 1 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของส่วนสัมพัทธ์ (V)} &= \frac{1}{2} \times 1.53 \times (0.7 + 0.1) \times 0.25 \\ &= 0.16125 \text{ ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เวลาสัมพัทธ์ (T)} &= \frac{V}{Q_T} = \frac{0.16125 \times 1000}{3+1} \\ &= 40.31 \text{ นาที} \end{aligned}$$

4. ตัวอย่างการคำนวณส่วนแยก

$$\text{ความยาวของส่วนแยก (L)} = 0.25 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความกว้างของส่วนแยก (W)} = 0.25 \text{ เมตร}$$

$$\text{อัตราการไหลของของเหลว (Q}_L\text{)} = 3 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q}_{PW}\text{)} = 1 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของส่วนสัมพัทธ์ (A)} &= L \times W = 0.25 \times 0.25 \\ &= 0.0625 \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราน้ำล้นผิว (OFR)} &= \frac{Q_T}{A} = \frac{(3+1) \times 60}{0.0625 \times 1000} \\ &= 3.84 \text{ เมตรต่อชั่วโมง} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ฉ

รายละเอียดการคำนวณปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้และปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจาก
กระบวนการโคแอกกูเลชัน

ฉ-1 การคำนวณปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้และปริมาณที่เกิดขึ้นจากการแยกเซลล์สาหร่าย

สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากวัฏภาคของเหลวคือสารส้ม ซึ่งปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้ไปและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบการใช้ฟล็อกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) สามารถคำนวณได้จากสมการสตอยชิโอเมตริกของสารส้ม ดังสมการที่ ฉ-1



- ที่ความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 5×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม = 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้} &= \frac{3 \times 2 \times MW_{Alk.} \times Alum \text{ dose}}{MW_{Alum}} \times \frac{Eq-wt. CaCO_3}{Eq-wt. Alk.} \\ &= \frac{3 \times 2 \times 61 \times 50}{666.1} \times \frac{50}{61} \\ &= 22.52 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน (mg/L as CaCO}_3\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น} &= \frac{2 \times MW_{Al(OH)_3} \times Alum \text{ dose}}{MW_{Alum}} \\ &= \frac{2 \times 78 \times 50}{666.1} \\ &= 11.71 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

- ที่ความเข้มข้นเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 9×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม = 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้} &= \frac{3 \times 2 \times MW_{Alk.} \times Alum \text{ dose}}{MW_{Alum}} \times \frac{Eq-wt. CaCO_3}{Eq-wt. Alk.} \\ &= \frac{3 \times 2 \times 61 \times 300}{666.1} \times \frac{50}{61} \\ &= 135.12 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน (mg/L as CaCO}_3\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น} &= \frac{2 \times MW_{Al(OH)_3} \times Alum \text{ dose}}{MW_{Alum}} \\ &= \frac{2 \times 78 \times 300}{666.1} \\ &= 70.26 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

ฉ-2 การคำนวณปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้และปริมาณที่เกิดขึ้นจากการแยกอนุภาคความขุ่น

สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการแยกอนุภาคความขุ่นออกจากภูมิภาคของเหลวคือสารส้มและเฟอริคคลอไรด์ โดยที่น้ำเสียสังเคราะห์อนุภาคความขุ่นมีค่าความขุ่นเริ่มต้น 50 NTU

- ใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์

ปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้ไปและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบการใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) สามารถคำนวณได้จากสมการสตอยชิโอเมตริกของสารส้ม ดังสมการที่ ฉ-1

ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม = 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ปริมาณสารส้มต่อความขุ่น} = \frac{\text{Alum dose}}{MW_{Alum} \times \text{Turbidity}} = \frac{15}{666.1 \times 50}$$

$$= 4.5 \times 10^{-4} \text{ มิลลิโมลาร์ต่อเอ็นทียู (mM/NTU)}$$

$$\text{ปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้} = \frac{3 \times 2 \times MW_{Alk.} \times \text{Alum dose}}{MW_{Alum}} \times \frac{Eq-wt. CaCO_3}{Eq-wt. Alk.}$$

$$= \frac{3 \times 2 \times 61 \times 15}{666.1} \times \frac{50}{61}$$

$$= 6.76 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน (mg/L as CaCO}_3\text{)}$$

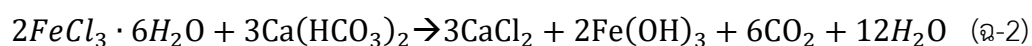
$$\text{ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น} = \frac{2 \times MW_{Al(OH)_3} \times \text{Alum dose}}{MW_{Alum}}$$

$$= \frac{2 \times 78 \times 15}{666.1}$$

$$= 3.51 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

- ใช้เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนซ์

ปริมาณความเป็นต่างที่ถูกใช้ไปและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากกลไกการทำลายเสถียรภาพแบบการใช้ฟล็อกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (Sweep coagulation) สามารถคำนวณได้จากสมการสโตยซิโอมेटริกของเฟอร์ริกคลอไรด์ ดังสมการที่ ฉ-2



ปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์ที่เหมาะสม = 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ปริมาณเฟอริคคลอไรด์ต่อความขุ่น} = \frac{FeCl_3 \text{ dose}}{MW_{FeCl_3} \times Turbidity} = \frac{15}{270.3 \times 50}$$

$$= 1.1 \times 10^{-3} \text{ มิลลิโมลาร์ต่อเอ็นทียู (mM/NTU)}$$

$$\text{ปริมาณความเป็นด่างที่ถูกใช้} = \frac{3 \times 2 \times MW_{Alk.} \times FeCl_3 \text{ dose}}{2 \times MW_{FeCl_3}} \times \frac{Eq-wt. CaCO_3}{Eq-wt. Alk.}$$

$$= \frac{3 \times 2 \times 61 \times 15}{2 \times 270.3} \times \frac{50}{61}$$

$$= 8.32 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน (mg/L as CaCO}_3\text{)}$$

$$\text{ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น} = \frac{2 \times MW_{Fe(OH)_3} \times FeCl_3 \text{ dose}}{2 \times MW_{FeCl_3}}$$

$$= \frac{2 \times 106.7 \times 15}{2 \times 270.3}$$

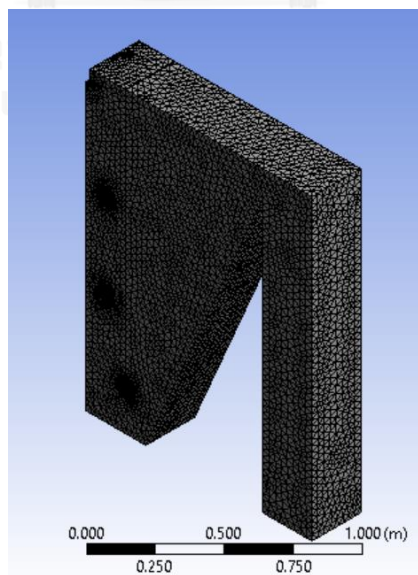
$$= 5.92 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

ภาคผนวก ข

Mesh generation ในภาพจำลองของถังปฏิกริยา

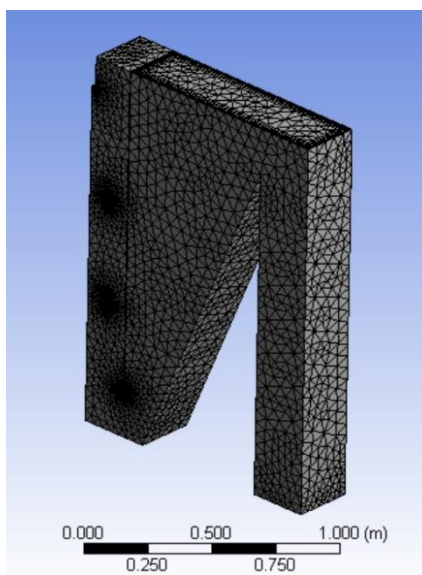
สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ควบคุมการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนมักจะไม่เป็นไปตามคำตอบที่วิเคราะห์ออกมาได้ ยกเว้นในกรณีที่การไหลไม่มีความซับซ้อน ดังนั้นการวิเคราะห์การไหลของของไหลโดยทั่วไป โดเมนการไหล (Flow domains) จะถูกแบ่งออกเป็นโดเมนย่อย (Subdomains) ที่มีขนาดเล็กลง และทำการแก้สมการควบคุม (Governing equations) ภายในแต่ละส่วนของโดเมน ซึ่งแต่ละส่วนของโดเมนเรียกว่า element หรือ cell และกลุ่ม elements ทั้งหมดเรียกว่า mesh

ในงานวิจัยนี้เลือกสร้างภาพจำลองของถังปฏิกริยาแบบ 3 มิติ และ meshing เป็นรูปทรง tetrahedral (รูปทรงที่มีพื้นผิว 10 ด้าน) ซึ่งเป็นรูปทรงที่มีขนาดเล็กที่สุด จะได้ mesh ที่มีจำนวน element มากที่สุด ทำให้ผลการวิเคราะห์การไหลที่มีความแม่นยำสูงกว่า โดยใช้ฟังก์ชัน proximity&curvature ที่เน้น meshing บริเวณทางเข้า ทางออก และมีสิ่งกีดขวางการไหลของของไหล ดังแสดงในรูปที่ ข-1 ข-2 และ ข-3



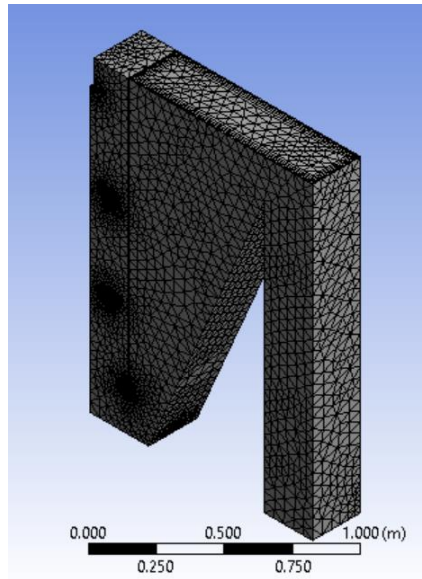
รูปที่ ข-1 Mesh ภาพจำลองของถังปฏิกริยา ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำ

จากรูปที่ ซ-1 แสดง Mesh ภาพจำลองของถังปฏิกริยา ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งมีจำนวน 143720 nodes และ 496379 elements



รูปที่ ซ-2 Mesh ภาพจำลองของถังปฏิกริยา ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ ซ-2 แสดง Mesh ภาพจำลองของถังปฏิกริยา ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งมีจำนวน 125072 nodes และ 443998 elements



รูปที่ ช-3 Mesh ภาพจำลองของถังปฏิกริยา ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน

จากรูปที่ ช-3 แสดง Mesh ภาพจำลองของถังปฏิกริยา ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน ซึ่งมีจำนวน 133461 nodes และ 471340 elements

ภาคผนวก ข

การเลือกแบบจำลองที่ใช้ศึกษารูปแบบการไหลด้วย CFD

แบบจำลองที่ใช้ศึกษารูปแบบการไหลของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานด้วย CFD จะพิจารณาจากสภาวะการไหล (flow regime) ของของไหลภายในถังปฏิกริยา และจำนวนวัฏภาคที่มีในระบบ โดยที่สภาวะการไหลมีความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number; Re) ซึ่งสภาวะการไหลของของไหลที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ มีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

1. อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที

บริเวณของถังปฏิกริยาแบบผสมผสานที่มีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่ำที่สุดและสูงที่สุด คือการไหลของน้ำผ่านพื้นที่ผิวด้านบนของส่วนสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาคและการไหลของน้ำผ่านแผ่นกั้นของส่วนฟลอคคูลेशन ตามลำดับ

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำ } (\rho) = 997 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ความหนืดของน้ำ } (\mu) = 0.000895 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของน้ำ } (Q) = 6.4 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

- การไหลของน้ำผ่านพื้นที่ด้านบนของส่วนสัมผัส

$$\text{ความยาวด้านบนของส่วนสัมผัส } (L_T) = 0.7 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความกว้างของส่วนกวนช้า } (W) = 0.25 \text{ เมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วการไหลของน้ำ } (v) &= \frac{Q}{A} = \frac{6.4}{0.7 \times 0.25 \times 1000 \times 60} \\ &= 0.00061 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{รัศมีทางชลศาสตร์ (R)} &= \frac{A}{P} = \frac{0.7 \times 0.25}{2(0.7+0.25)} \\
 &= 0.0921 \text{ เมตร} \\
 \text{ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)} &= \frac{\rho VR}{\mu} = \frac{997 \times 0.00061 \times 0.0921}{0.000895} \\
 &= 63
 \end{aligned}$$

- การไหลของน้ำผ่านแผ่นกั้น

ช่องว่างบริเวณที่มีแผ่นกั้น

$$\begin{aligned}
 \text{กว้าง} &= 0.1 \text{ เมตร} \\
 \text{ยาว} &= 0.25 \text{ เมตร} \\
 \text{ความเร็วการไหลผ่านแผ่นกั้น (v)} &= \frac{Q}{A} = \frac{6.4}{0.25 \times 0.1 \times 1000 \times 60} \\
 &= 0.004267 \text{ เมตรต่อวินาที} \\
 \text{รัศมีทางชลศาสตร์ (R)} &= \frac{A}{P} = \frac{0.1 \times 0.25}{2(0.1+0.25)} \\
 &= 0.0357 \text{ เมตร} \\
 \text{ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)} &= \frac{\rho VR}{\mu} = \frac{997 \times 0.004267 \times 0.0357}{0.000895} \\
 &= 171
 \end{aligned}$$

ที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในถังปฏิกริยาจะมีค่าระหว่าง 63 ถึง 171 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 500 แสดงว่าการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสานเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

2. อัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตรต่อนาที

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำ } (\rho) = 997 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ความหนืดของน้ำ } (\mu) = 0.000895 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของน้ำ (Q)} = 10 \text{ ลิตรต่อวินาที}$$

- การไหลของน้ำผ่านพื้นที่ด้านบนของส่วนสัมผัส

$$\text{ความยาวด้านบนของส่วนสัมผัส (L_T)} = 0.7 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความกว้างของส่วนกวนช้า (W)} = 0.25 \text{ เมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วการไหลของน้ำ (v)} &= \frac{Q}{A} = \frac{6.4}{0.7 \times 0.25 \times 1000 \times 60} \\ &= 0.000952 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีทางชลศาสตร์ (R)} &= \frac{A}{P} = \frac{0.7 \times 0.25}{2(0.7 + 0.25)} \\ &= 0.0921 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re)} &= \frac{\rho VR}{\mu} = \frac{997 \times 0.000952 \times 0.0921}{0.000895} \\ &= 98 \end{aligned}$$

- การไหลของน้ำผ่านแผ่นกั้น

ช่องว่างบริเวณที่มีแผ่นกั้น

$$\text{กว้าง} = 0.1 \text{ เมตร}$$

$$\text{ยาว} = 0.25 \text{ เมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วการไหลผ่านแผ่นกั้น (v)} &= \frac{Q}{A} = \frac{6.4}{0.25 \times 0.1 \times 1000 \times 60} \\ &= 0.006667 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีทางชลศาสตร์ (R)} &= \frac{A}{P} = \frac{0.1 \times 0.25}{2(0.1 + 0.25)} \\ &= 0.0357 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re)} &= \frac{\rho VR}{\mu} = \frac{997 \times 0.006667 \times 0.0357}{0.000895} \\ &= 266 \end{aligned}$$

ที่อัตราการไหลของน้ำ 10 ลิตรต่อนาที ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ภายในถังปฏิริยาจะมีค่าระหว่าง 98 และ 266 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 500 แสดงว่าการไหลของน้ำภายในถังปฏิริยาแบบผสมผสานเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

3. อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำ } (\rho_w) = 997 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ความหนาแน่นของฟองอากาศ } (\rho_B) = 1.177 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ความหนืดของน้ำ } (\mu) = 0.000895 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของอากาศ } (Q_g) = 10 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$\text{ขนาดของฟองอากาศ } (D_B) = 5 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วสุดท้ายของฟองอากาศ } (U_T) &= \sqrt{\frac{4\Delta\rho g D_B}{3C_D \rho_w \mu}} \\ &= \sqrt{\frac{4 \times (997 - 1.177) \times 9.81 \times 5}{3 \times 0.44 \times 997 \times 0.000895 \times 1000}} \\ &= 0.3853 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ } (Re) &= \frac{\rho_w U_T D_B}{\mu} = \frac{997 \times 0.3853 \times 5}{0.000895 \times 1000} \\ &= 2156 \end{aligned}$$

ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนสัมผัส 10 ลิตรต่อนาที ฟองอากาศมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 2156 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1000 แสดงว่าการไหลของฟองอากาศภายในส่วนสัมผัสของถังปฏิริยาแบบผสมผสานเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow)

4. อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำ } (\rho_w) = 997 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ความหนาแน่นของฟองอากาศ } (\rho_B) = 1.177 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ความหนืดของน้ำ } (\mu) = 0.000895 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของอากาศ } (Q) = 2.5 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$\text{ขนาดของฟองอากาศ } (D_B) = 2 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{ความเร็วสุดท้ายของฟองอากาศ } (U_T) = \sqrt{\frac{4\Delta\rho g D_B}{3C_D \rho_w \mu}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times (997 - 1.177) \times 9.81 \times 2}{3 \times 0.44 \times 997 \times 0.000895 \times 1000}}$$

$$= 0.2437 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$\text{ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ } (Re) = \frac{\rho_w U_T D_B}{\mu} = \frac{997 \times 0.2437 \times 2}{0.000895 \times 1000}$$

$$= 545$$

ที่อัตราการไหลของอากาศที่ส่วนแยก 2.5 ลิตรต่อนาที ฟองอากาศมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 545 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1000 แสดงว่าการไหลของฟองอากาศภายในส่วนแยกของถังปฏิบัติการแบบผสมผสานเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow)

5. อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที

$$\text{ความหนาแน่นของน้ำ } (\rho) = 997 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ความหนืดของน้ำ } (\mu) = 0.000895 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของน้ำ } (Q) = 6.4 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$\text{อัตราการไหลของน้ำอัดความดัน (Q}_{PW}\text{)} = 4 \text{ ลิตรต่อวินาที}$$

- การไหลของน้ำผ่านพื้นที่ด้านบนของส่วนสัมผัส

$$\text{ความยาวด้านบนของส่วนสัมผัส (L}_T\text{)} = 0.7 \text{ เมตร}$$

$$\text{ความกว้างของส่วนกวนช้า (W)} = 0.25 \text{ เมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วการไหลของน้ำ (v)} &= \frac{Q_T}{A} = \frac{6.4+4}{0.7 \times 0.25 \times 1000 \times 60} \\ &= 0.00099 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีทางชลศาสตร์ (R)} &= \frac{A}{P} = \frac{0.7 \times 0.25}{2(0.7+0.25)} \\ &= 0.0921 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ (Re)} &= \frac{\rho VR}{\mu} = \frac{997 \times 0.00099 \times 0.0921}{0.000895} \\ &= 102 \end{aligned}$$

- การไหลของน้ำผ่านแผ่นกั้น

ช่องว่างบริเวณที่มีแผ่นกั้น

$$\text{กว้าง} = 0.1 \text{ เมตร}$$

$$\text{ยาว} = 0.25 \text{ เมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วการไหลผ่านแผ่นกั้น (v)} &= \frac{Q}{A} = \frac{6.4}{0.25 \times 0.1 \times 1000 \times 60} \\ &= 0.004267 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{รัศมีทางชลศาสตร์ (R)} &= \frac{A}{P} = \frac{0.1 \times 0.25}{2(0.1+0.25)} \\ &= 0.0357 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ (Re)} &= \frac{\rho VR}{\mu} = \frac{997 \times 0.004267 \times 0.0357}{0.000895} \\ &= 171 \end{aligned}$$

- การไหลของฟองอากาศขนาดเล็ก

$$\begin{aligned}
 \text{ความหนาแน่นของน้ำ } (\rho_w) &= 997 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{ความหนาแน่นของฟองอากาศ } (\rho_B) &= 1.177 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{ความหนืดของน้ำ } (\mu) &= 0.000895 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที} \\
 \text{ขนาดของฟองอากาศ } (D_B) &= 100 \text{ มิลลิเมตร} \\
 \text{ความเร็วสุดท้ายของฟองอากาศ } (U_T) &= \frac{\Delta \rho g D_B^2}{18\mu} \\
 &= \frac{(997 - 1.177) \times 9.81 \times (100 \times 10^{-6})^2}{18 \times 0.000895} \\
 &= 0.006092 \text{ เมตรต่อวินาที} \\
 \text{ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)} &= \frac{\rho_w U_T D_B}{\mu} = \frac{997 \times 0.006092 \times 100}{0.000895 \times 10^6} \\
 &= 0.682
 \end{aligned}$$

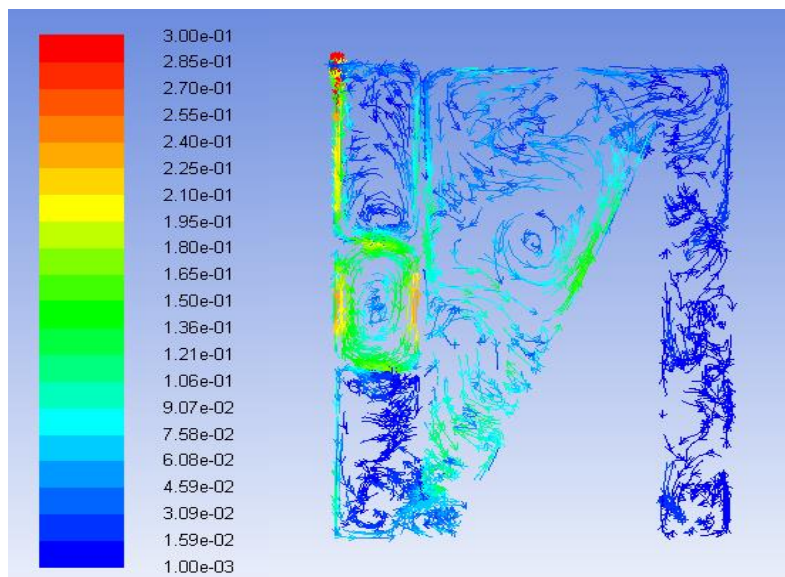
ที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที กับอัตราการไหลของน้ำอัดความดัน 4 ลิตรต่อนาที ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของวัฏภาคน้ำอยู่ในช่วง 102 ถึง 177 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 500 แสดงว่าการไหลของวัฏภาคน้ำภายในถังปฏิกิริยาแบบผสมผสานเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ส่วนฟองอากาศขนาดเล็กมีค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 0.682 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าการไหลของฟองอากาศขนาดเล็กภายในถังปฏิกิริยาแบบผสมผสานเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ดังนั้นการไหลของของไหลทั้งหมดภายในถังปฏิกิริยาแบบผสมผสานมีลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow)

ตารางที่ ซ-1 สรุปสภาวะการเดินระบบและแบบจำลองที่เลือกใช้

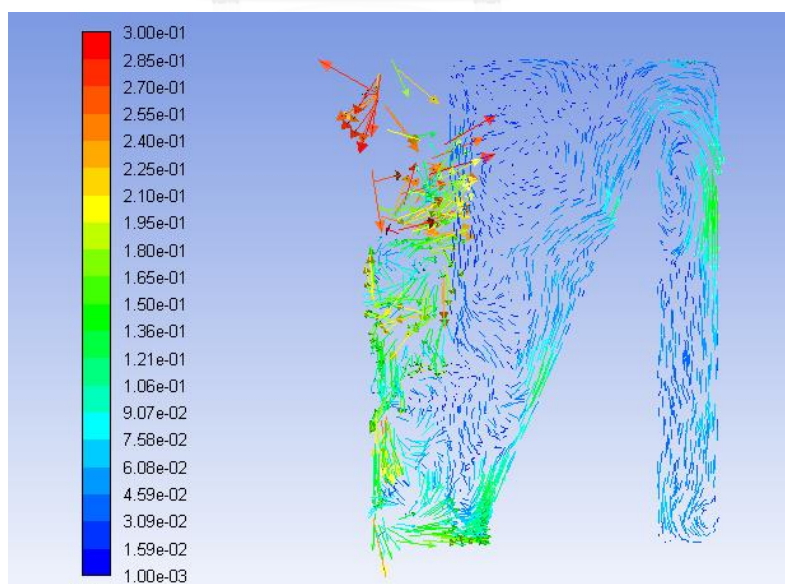
Operating condition	Re	Flow model
$Q_L = 6.4 \text{ lpm}$	63-171	Laminar flow
$Q_L = 10 \text{ lpm}$	98-266	Laminar flow
$Q_{g,1} = 10 \text{ lpm}$	2156	Turbulence flow
$Q_{g,2} = 2.5 \text{ lpm}$	545	Turbulence flow
$Q_L = 6.4 \text{ lpm}$ $Q_{PW} = 4 \text{ lpm}$	102-277	Laminar flow

ภาคผนวก ฅ

ผล simulation จาก Laminar flow model และ Turbulence flow model



รูปที่ ฅ-1 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน
ที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที Laminar flow model



รูปที่ ฅ-2 เวกเตอร์แสดงความเร็วการไหลของน้ำภายในถังปฏิกริยาแบบผสมผสาน
ที่อัตราการไหลของน้ำ 6.4 ลิตรต่อนาที Turbulent flow model

ภาคผนวก ญ

Systematic method for Scale up

Scale up เป็นทฤษฎีที่ว่าด้วยการออกแบบกระบวนการ (Process) ในยูนิตที่มีสเกลใหญ่ขึ้น จากข้อมูลของยูนิตเดิมที่มีอยู่ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ (Product) ปริมาณมากขึ้น โดย Systematic method เป็นวิธีที่นิยมใช้กับการออกแบบยูนิตที่ใช้กระบวนการใหม่ มีการเพิ่มเติมกระบวนการในระบบ และมีการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ เพื่อลดความความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในการขยายสเกลของระบบ

แนวคิดสำคัญของ Systematic method คือการออกแบบให้ได้กระบวนการที่มีจุดประสงค์เหมือนกัน โดยกลไกของกระบวนการเหมือนกัน และสร้างผลิตภัณฑ์เหมือนกัน ในยูนิตทั้งสองสเกล (Process similarity) และอุปกรณ์ที่ใช้มีรูปร่างทางเรขาคณิตคล้ายกัน (Geometric similarity) สิ่งที่ต้องพิจารณาในการทำ Scale up ประกอบด้วย สิ่งที่ทำให้เกิดการดำเนินงานตามกระบวนการที่ต้องการในระบบ (Worker) และขนาดหรือปริมาตรของระบบที่เกิดกระบวนการ (Job) ซึ่งอัตราส่วนของ worker ต่อ job จะต้องมีค่าคงที่

ถึงปฏิบัติการแบบผสมผสานแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนกวนซ้ำแบบแผ่นกัน ส่วนสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค ส่วนแยกน้ำกับอนุภาค ซึ่งแต่ละส่วนก็มี worker แตกต่างกัน ดังนั้น จะต้องทำ Scale up ของแต่ละส่วน

- ส่วนกวนซ้ำแบบแผ่นกัน

กระบวนการคือ การสร้างความปั่นป่วนให้ฟลอครวมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น

Worker คือ ค่า Camp number ($G \times t$)

Job คือ ปริมาตรของส่วนกวนซ้ำ

ความยาวของส่วนทวนซ้ำ (L)	=	0.2 เมตร
ความกว้างของส่วนทวนซ้ำ (W)	=	0.25 เมตร
ความลึกน้ำ (D)	=	1.53 เมตร
ช่องว่างบริเวณที่มีแผ่นกั้น		
กว้าง (W _B)	=	0.1 เมตร
ยาว (L _B)	=	0.25 เมตร

ดังนั้น $W = 1.25L$ $D = 7.65L$ $W_B = 0.5L$ และ $L_B = 1.25L$

$$\frac{\text{Worker}}{\text{Job}} = \frac{G \times t}{V} = \text{Constant}$$

$$\frac{G_1 \times t_1}{V_1} = \frac{G_2 \times t_2}{V_2}$$

จาก $G = \sqrt{\frac{\rho g H_L}{\mu t}}$ จะได้ว่า

$$\frac{\sqrt{\frac{H_{L,1}}{t_1}}}{Q_1} = \frac{\sqrt{\frac{H_{L,2}}{t_2}}}{Q_2}$$

จาก $H_L = 0.163V^2N$ จะได้ว่า

$$\frac{V_1}{Q_1 \sqrt{t_1}} = \frac{V_2}{Q_2 \sqrt{t_2}}$$

จาก $V = \frac{Q}{A_B}$ และ $A_B \propto L^2$ จะได้ว่า

$$\frac{1}{L_1^2 \sqrt{t_1}} = \frac{1}{L_2^2 \sqrt{t_2}}$$

$$\sqrt{\frac{t_2}{t_1}} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2$$

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^4$$

จากสมการข้างต้นสรุปได้ว่าเวลากักของส่วนกววนซ้ำมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของขนาดถัง แต่ว่าตามหลักการออกแบบถังกววนซ้ำนั้น เวลากักเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบด้วย (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) ซึ่งมีการกำหนดค่าในช่วงที่แน่นอน ไม่ขึ้นกับขนาดถัง แสดงว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวขัดแย้งกับทฤษฎีการออกแบบ ดังนั้น การทำ Scale up ถึงปฏิบัติการแบบผสมผสาน ไม่สามารถใช้วิธี Systematic method ได้



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธวัชชัย จินตธีรชัย เกิดเมื่อวันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556

การเผยแพร่งานวิจัยได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 15 ระหว่างวันที่ 11-13 พฤษภาคม 2559 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ และนำเสนอผลงานในหัวข้อ “การวิเคราะห์ถึงปฏิกิริยาแบบผสมผสานในด้านรูปแบบการไหลและการแยกอนุภาคออกจากเฟสของเหลว”

