

การประยุกต์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร  
รวมของระบบ อากาศ-น้ำ ในถังกวนรัททอนเทอร์ไบน์คู่แบบไม่มาตรฐาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TO PREDICT OVERALL  
VOLUMETRIC OXYGEN TRANSFER COEFFICIENT OF AIR-WATER SYSTEM IN NON-  
STANDARD DUAL RUSHTON TURBINE STIRRED TANK



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

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University



กรทรรศน์ สติตริก : การประยุกต์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบ อากาศ-น้ำ ในถังกวนรชทอนเทอร์ไบน์คู่แบบไม่มาตรฐาน. ( APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TO PREDICT OVERALL VOLUMETRIC OXYGEN TRANSFER COEFFICIENT OF AIR-WATER SYSTEM IN NON-STANDARD DUAL RUSHTON TURBINE STIRRED TANK ) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธารวัช, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.กริษาติ ว่องไวลิขิต

กระบวนการหมักเป็นกระบวนการที่พบได้มากในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนที่มีการป้อนออกซิเจนเข้าสู่ระบบเพื่อให้เซลล์ในระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการขยายขนาดของถังหมักนั้น นอกจากจะต้องคำนึงถึงสถานะ well mixed แล้ว อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนภายในระบบ เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง ในการทดลองขยายขนาดโดยการกำหนดอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนคงที่ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพแย่งลง อย่างไรก็ตาม ในการขยายขนาดดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของระยะระหว่างใบปั่นกวน และความสูงของของไหลทำงานที่ใช้ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรที่เกิดขึ้นภายในถังกวนระบบน้ำ-อากาศที่ติดตั้งใบปั่นกวนแบบรชทอนเทอร์ไบน์คู่ โดยใช้พลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการทำนายพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยใช้แบบจำลอง Eulerian และแบบจำลองความปั่นป่วน k- $\epsilon$  ร่วมกับสมการ population balance ผลการสอบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบ จากแบบจำลองกับผลการทดลอง พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกัน และมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 ผลการทำแบบจำลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างใบปั่นกวนจะไม่ส่งผลต่อลักษณะการไหลของวัฏภาคน้ำ และอากาศภายในระบบ จะไม่ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรภายในระบบเปลี่ยนแปลง ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความสูงของของไหลในระบบ พบว่าไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ภายในระบบ แต่เนื่องจากระดับของใบปั่นกวนไม่เปลี่ยนแปลงตามความสูงน้ำที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระบบที่มีความสูงของน้ำอยู่ใกล้กับใบปั่นกวนมีแนวโน้มของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบสูงกว่า นอกจากนี้ที่ระดับความสูงของน้ำใกล้กับใบปั่นกวนมาก ๆ จะส่งผลให้ลักษณะการไหลที่เกิดจากใบปั่นกวนเปลี่ยนไป ทำให้กำลังที่ใช้มีค่าลดน้อยลงด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....



# # 6170108421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: CFD, fermenter, mass transfer coefficient

Kornratad Satitrueng : APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TO PREDICT OVERALL VOLUMETRIC OXYGEN TRANSFER COEFFICIENT OF AIR-WATER SYSTEM IN NON-STANDARD DUAL RUSHTON TURBINE STIRRED TANK . Advisor: Asst. Prof. APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng. Co-advisor: KRITCHART WONGWAILIKHIT, Ph.D.

The fermentation process is commonly found in the industry. This process generally uses a stirred tank reactor with oxygen continuously flow for feeding organism cells inside the fermenter. For Scaling-up, a fermenter is designed to well mix condition. Also, sufficient oxygen for the cells is important. The experiment shows that scaling-up fermenter with constant oxygen transfer rate is not achieved, the product has more impurity due to the oxygen transfer rate get worst. However, the fermenter configuration, impeller clearance and working fluid height, are changed, which may cause dissimilar hydrodynamics in the fermenter. This project aims to evaluate CFD simulation to predict the overall volumetric oxygen transfer coefficient of air-water system in non-standard dual Rushton turbine stirred tank reactor. Multiphase Eulerian model and k-epsilon turbulent model were used with population balance equation to illustrate gas-liquid hydrodynamics in the vessel. The model results are compared to the overall volumetric oxygen transfer coefficient obtained from the experiment within 10% error. The model shows that an impeller clearance has no effect on the overall oxygen transfer coefficient if it develops the same liquid flow pattern and gas flow regime. The difference in height of working fluid does not affect the local volumetric oxygen transfer coefficient. Nevertheless, the level of impellers in the tank does not change with liquid height result in a large volumetric oxygen transfer coefficient in the lower zone compared to the upper impeller zone. The system with lower liquid height, especially near the impeller, tends to have a greater overall volumetric oxygen transfer coefficient. Moreover, Impellers draw less power when the liquid height is close to the upper impeller.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธารวัช ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่สร้างแรงบันดาลใจให้ผู้วิจัย สนใจในการทำแบบจำลองพลศาสตร์การไหลเชิงคมนาทำให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้นมา เป็นผู้ที่ยคอยช่วยเหลือ และสนับสนุนตลอดการทำวิจัย รวมถึงให้โอกาสผู้วิจัยได้ไปเรียนรู้นอกสถานที่เพื่อส่งสมประสบการณ์ในการทำงานเป็นวิศวกรเคมีในบริษัทชั้นนำของประเทศ

ขอขอบคุณ ศ.ดร. วรงค์ ปวรอาจารย์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง รศ.ดร. สุนันท์ ลิ้มตระกูล และ ดร. พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร ที่ให้เกียรติมาเป็นกรรมการในการสอบ วิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ และเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต

ขอขอบคุณ ดร. กริชชาติ ว่องไวลิขิต, พี่บิว, พี่เต๋ล ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการใช้แบบจำลอง รวมถึงคอยสอน และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนการศึกษาในการศึกษาต่อระดับปริญญาโทของผู้ทำวิจัย

กรทรรศน์ สติตรีภ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความสำคัญและความเป็นมา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและบททบทวนวรรณกรรม.....	6
2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1. องค์ประกอบของกังหัน.....	6
2.1.1.1. รูปทรงของกังหัน.....	6
2.1.1.2. รูปแบบการไหลในกังหัน.....	6
2.1.1.2.1. การไหลแบบ Axial Flow.....	6
2.1.1.2.2. การไหลแบบ Radial Flow.....	7
2.1.1.2.3. การไหลแบบ Tangential Flow.....	7
2.1.1.2.4. รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊ส.....	8
2.1.1.3. กังหันมาตรฐาน.....	10

2.1.2. ค่า Reynolds number สำหรับถังกวน .....	10
2.1.3. พลังงานที่ใช้ในถังกวน .....	11
2.1.4. การถ่ายโอนมวลภายในถังกวน .....	11
2.1.5. สมการที่ใช้ในการอธิบายการไหล.....	13
2.1.5.1. สมการอนุรักษ์มวล.....	13
2.1.5.2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม.....	13
2.1.5.3. สมการอธิบายการไหลแบบราบเรียบ.....	16
2.1.5.4. สมการอธิบายการไหลแบบปั่นป่วน.....	16
2.1.6. แบบจำลองความปั่นป่วน.....	18
2.1.6.1. แบบจำลอง k- $\epsilon$ .....	18
2.1.7. แบบจำลอง Population Balance .....	20
2.1.7.1. แบบจำลองการรวมของฟองอากาศ (Bubble Aggregation Model).....	22
2.1.7.2. แบบจำลองการแตกของฟองอากาศ (Bubble Breakage Model).....	23
2.1.8. แบบจำลองการหมุนของใบปั่นกวน .....	25
2.1.8.1. การไหลในกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ (Flow in Moving Reference Frame) ..	25
2.1.8.2. การคำนวณ time step เพื่อใช้ในการจำลองการหมุนของใบปั่นกวน.....	26
2.2. บททบทวนวรรณกรรม.....	28
2.2.1. ผลของแบบจำลองการหมุนของใบกวน.....	28
2.2.2. ผลของแบบจำลองความปั่นป่วน.....	28
2.2.3. การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรภายในถังกวน .....	29
2.2.3.1. การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรจากแบบจำลอง .....	32
2.2.4. พลังงานที่ใช้ภายในถังกวนแบบป้อนอากาศ.....	36
บทที่ 3 การทำวิจัย .....	38

3.1. แผนการดำเนินงาน .....	38
3.1.1. แผนการทำแบบจำลอง .....	38
3.1.2. แผนการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร .....	40
3.1.3. แผนการสอบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ .....	41
3.2. ขั้นตอนการทำวิจัย .....	42
3.2.1. กระบวนการก่อนคำนวณ .....	42
3.2.1.1. การวาดรูปสามมิติ .....	42
3.2.1.2. การพิจารณาปริมาตรของระบบ .....	42
3.2.1.3. การสร้างปริมาตรควบคุม .....	42
3.2.1.3.1. กระบวนการ Sweep (Sweep Method) .....	43
3.2.2. การคำนวณ .....	43
3.2.2.1. คุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในแบบจำลอง .....	43
3.2.2.2. การกำหนดแบบจำลอง Population balance .....	44
3.2.2.3. เงื่อนไขขอบเขต .....	45
3.2.2.4. Discretization Scheme และอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณ .....	46
3.2.2.5. ค่าเริ่มต้น .....	47
3.2.2.6. การหยุดการคำนวณ .....	47
3.2.3. กระบวนการหลังการคำนวณ .....	48
3.2.3.1. การแสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรของระบบ .....	48
3.2.3.2. การแสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ .....	48
บทที่ 4 ผลการจำลองการไหลของถังกวนสารสองวัฏภาคน้ำ-อากาศ และการสอบเทียบผลการทดลอง .....	50
4.1. ผลการทดลอง .....	50

4.1.1. การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร .....	50
4.1.2. รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สในถังกวน .....	51
4.2. ผลการสร้างปริมาตรควบคุม และการสอบเทียบแบบจำลองการไหลของถังกวน .....	53
4.2.1. รูปร่างและขนาดของถังกวน .....	53
4.2.2. ผลการสร้างปริมาตรควบคุม .....	55
4.2.3. การสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง .....	60
4.2.3.1. การสอบเทียบรูปแบบการไหล .....	60
4.2.3.1.1. ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลในระบบวัฏภาคน้ำ .....	60
4.2.3.1.2. ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลในระบบวัฏภาคน้ำ-อากาศ... ..	62
4.2.3.2. การสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร .....	70
4.3. ผลการจำลองการไหล และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในถังกวนที่มี ความเร็วการปั่นกวน และอัตราการป้อนอากาศต่างกัน .....	72
4.3.1. การเปรียบเทียบอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน .....	72
4.3.2. การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตร .....	79
4.3.3. การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร .....	90
4.4. ผลการจำลองการไหล และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในถังกวนที่มี ระยะระหว่างใบปั่นกวนต่างกัน .....	101
4.4.1. การเปรียบเทียบอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน .....	101
4.4.2. การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตร .....	106
4.4.3. การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร .....	116
4.5. ผลจำลองการไหล และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในถังกวนที่มีระดับ ความสูงของน้ำในระบบต่างกัน .....	126
4.5.1. การเปรียบเทียบอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน .....	126
4.5.2. การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตร .....	132
4.5.3. การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร .....	142

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการ และข้อเสนอแนะ .....	152
5.1. สรุปผลการดำเนินการ.....	152
5.2. ข้อเสนอแนะ .....	154
ภาคผนวก .....	155
6.1. ภาคผนวก ก ผลการสร้างปริมาตรควบคุม .....	155
6.2. ภาคผนวก ข การคำนวณขยายขนาดเบื้องต้น .....	157
6.3. ภาคผนวก ค การสอบเทียบขนาดฟองอากาศจากแบบจำลองกับผลการทดลอง .....	159
บรรณานุกรม.....	161
ประวัติผู้เขียน.....	167



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ความสำคัญและความเป็นมา

ในอุตสาหกรรมหมักนิยมใช้ถังกวนเป็นเครื่องปฏิกรณ์ในการดำเนินการ และมีการป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบผ่านตัวกระจายอากาศ (Sparger) หรือตัวป้อนอากาศรูปแบบต่าง ๆ เพื่อรักษาปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในของไหลทำงาน และทำให้เซลล์ภายในถังหมักทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการออกแบบถังหมัก นอกจากจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทั่วไปของถังกวน เช่น well mixed condition อีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือความสามารถในการถ่ายโอนออกซิเจนภายในถังหมัก ซึ่งส่งผลต่อการทำงานของเซลล์ และส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ โดยเฉพาะในระบบที่ออกซิเจนละลายลงไปของเหลวได้ยาก อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนต้องเพียงพอต่ออัตราการใช้ออกซิเจนของเซลล์ในทุก ๆ บริเวณ นั่นหมายถึงรูปแบบการไหลของแก๊สเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบ ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนออกซิเจนภายในถังกวนได้แก่ ความเร็วในการปั่นกวน ชนิดและจำนวนของใบปั่นกวน และอัตราการไหลของแก๊ส ได้ถูกวิเคราะห์และเสนอในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนในความสัมพันธ์ของกำลังต่อปริมาตร และอัตราการป้อนอากาศต่อพื้นที่หน้าตัด (Van't Riet 1979) ดังสมการ 1.1

$$k_L a = A \left( \frac{P}{V} \right)^\alpha u_G^\beta \cdot \mu_a^{-\delta}$$

สมการ 1.1

โดย  $P/V$  คือ กำลังที่ของเหลวได้รับต่อปริมาตรของเหลว

$u_G$  คือ อัตราการไหลของแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัด

$\mu_a$  คือ ความหนืดปรากฏ

$A, \alpha, \beta,$  และ  $\delta$  คือ ค่าคงที่

อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ในรูปแบบดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นจากระบบหนึ่ง ซึ่งเมื่อนำไปใช้กับระบบที่แตกต่างกัน เช่น ขนาดของถังต่างกัน ชนิดของใบปั่นกวนต่างกัน หรือสภาวะการดำเนินการต่างกัน ความสัมพันธ์อาจไม่สามารถทำนายผลของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนได้ ในกรณีเช่นนี้ส่งผลให้ต้องทำการทดลองเพื่อพัฒนาความสัมพันธ์ขึ้นเฉพาะสำหรับแต่ละระบบ เนื่องจากในกระบวนการหมักนั้น ใช้เวลานานในการดำเนินการต่อหนึ่งรอบ การทำการทดลองเพื่อสร้าง



ความสัมพันธ์ดังกล่าวให้ครอบคลุมช่วงการดำเนินการต่าง ๆ อาจทำได้ยาก และสิ้นเปลืองทรัพยากร ในกรณีที่สารตั้งต้นสำหรับใช้หมักมีมูลค่าสูง อีกวิธีหนึ่งในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน ออกซิเจนเชิงปริมาตรคือใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรภายในระบบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน ซึ่งจะเป็นการลด จำนวนการทำการทดลอง และหาขอบเขตการดำเนินการที่เหมาะสม

การคำนวณ CFD เป็นการแก้สมการปรากฏการณ์การถ่ายโอน (Transport Phenomena) โดยการสร้างปริมาตรควบคุม (Control Volume) ของระบบที่สนใจ และแบ่งเป็นปริมาตรควบคุม เล็ก ๆ เพื่อแก้สมการปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในแต่ละปริมาตรควบคุมนั้น เนื่องจากการไหลที่เกิดขึ้น ภายในถังกวนมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) การแก้สมการ Navier-Stokes เพื่อทำนายการไหลโดยวิธี Direct Numerical Simulation (DNS) มีความซับซ้อน และใช้เวลาในการ คำนวณนาน รวมถึงความละเอียดของปริมาตรควบคุมต้องสูงในระดับหนึ่งด้วย วิธีการดังกล่าวจึงไม่ เหมาะสำหรับใช้ทำนายผลเพื่อนำไปใช้ต่อ วิธีที่มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ และใช้เวลาในการ คำนวณน้อยกว่าคือการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน โดยการไหลจะถูกพิจารณาให้อยู่ในสองรูปแบบ คือ ความเร็วเฉลี่ย (Mean Velocity) และความเร็วปั่นป่วน (Fluctuation) โดยแบบจำลองความ ปั่นป่วนที่นิยมใช้ในแบบจำลอง CFD คือแบบจำลองกลุ่ม Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนในรูปของความเครียด โดยจะทำนายความเครียด เมื่อพิจารณา ให้ความปั่นป่วนเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic) แบบจำลองในกลุ่ม RANS ที่นิยมใช้ในแบบจำลอง ถังกวนคือ แบบจำลองกลุ่ม k-epsilon (Amer, Feng, and Ramsey 2019) และเนื่องจากในถัง หมัก ระบบประกอบไปด้วยสองวัฏภาคคือวัฏภาคของเหลว และวัฏภาคแก๊ส ซึ่งการกระจายตัวของ แก๊สในถังกวนเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องทำนาย เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร สิ่ง ที่มีความสำคัญในการทำนายผลการกระจายตัวของวัฏภาคแก๊ส คือ ขนาดของฟองที่เกิดขึ้นภายใน ระบบ ในการทำแบบจำลองของถังหมัก มีทั้งการพิจารณาที่ขนาดฟองคงที่ (Elqotbi et al. 2013), (Devi and Kumar 2017) ซึ่งสามารถช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณผลได้ แต่ส่งผลให้ค่าพื้นที่ ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งเป็นค่าที่มีความสำคัญต่อการคำนวณความสามารถในการ ถ่ายโอนมวลภายในระบบคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง (Wang and Wang 2007), (Amer, Feng, and Ramsey 2019) อีกหนึ่งวิธีการทำนายวัฏภาคแก๊ส คือการพิจารณาขนาดฟองไม่คงที่ โดยการคำนวณการกระจายของฟอง แบบจำลองที่นิยมใช้ในการทำนายคือ Population Balance Model (PBM) ซึ่งเป็นการทำนายปรากฏการณ์การรวม และการแตกของฟองที่เกิดขึ้นภายใน

ระบบ การแก้สมการของแบบจำลอง PBM มีกระบวนการแก้สมการออกเป็น 2 รูปแบบ คือ Method of class (discrete method) และ Method of moment

ในการขยายขนาดของถังกวน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันจะพิจารณาจากตัวแปรที่ต้องการคงไว้ ในกรณีของถังหมัก ปัจจัยที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการขยายขนาดคืออัตราการถ่ายโอนออกซิเจนภายในระบบ ดังสมการ 1.2

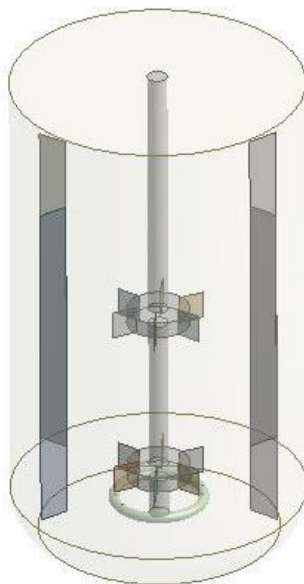
$$N_{O_2} = k_L a (C_L^* - C_L) \quad \text{สมการ 1.2}$$

โดย	$N_{O_2}$	คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจน
	$k_L a$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร
	$C_L^*$	คือ ค่าการละลายออกซิเจนอิ่มตัวในของเหลว
	$C_L$	คือ ความเข้มข้นออกซิเจนที่ละลายในของเหลว

การออกแบบขยายขนาดให้อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนคงที่ สำหรับระบบที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้ ตัวแปรที่กำหนดอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร เนื่องจากในระบบถังหมัก ปริมาตรออกซิเจนที่ละลายอยู่ในของเหลวซึ่งวัดได้จาก Dissolved Oxygen Probe มีค่าต่ำกว่าปริมาณที่เซลล์ต้องการในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ผลของผลต่างความเข้มข้นจึงพิจารณาเป็นคงที่ ดังนั้นเมื่อพิจารณาร่วมกับสมการ 1.1 การขยายขนาดเพื่อควบคุมให้การถ่ายโอนออกซิเจนคงที่จึงขึ้นอยู่กับกำลังต่อปริมาตรภายในระบบ ที่อัตราการป้อนแก๊สต่อหน้าตัดคงที่ อย่างไรก็ตาม จากการทำการขยายขนาดตามที่กล่าวข้างต้น พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักมีคุณภาพไม่เหมือนกัน โดยการวัดปริมาณเอทานอลของผลิตภัณฑ์ พบว่าที่การดำเนินการขยายขนาด ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้น 30% ทำให้ไม่สามารถใช้รูปแบบทั่วไปในการขยายขนาดระบบดังกล่าวได้

## 1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สร้างแบบจำลองพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบ อากาศ-น้ำ ในถังกวนรัททอนเทอร์ไบน์คู่แบบไม่มาตรฐาน แสดงดัง รูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ถังกวนอ้างอิงในการทำแบบจำลอง

### 1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้โปรแกรม CFD ที่ประกอบด้วยคำสั่ง และแบบจำลองที่พร้อมใช้งานโดยโปรแกรม Ansys Fluent 2019 R3 เพื่อใช้แก้สมการการไหล และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวม
2. เปรียบเทียบค่าแรงบิดจากการปั่นกวนที่คำนวณได้จากการทำแบบจำลองกับค่าที่คำนวณได้จากการทดลอง
3. เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของถังกวนที่สภาวะคงตัวที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับผลจากการทำการทดลองที่อัตราการหมุน 300, 400, และ 500 รอบต่อนาที อัตราป้อนอากาศคงที่ที่ 0.5 VVm และที่อัตราการหมุนคงที่ 400 รอบต่อนาที อัตราการป้อนอากาศ 0.5, 1.0, และ 1.5 VVm ตามลำดับ โดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงานปริมาตร 5.11 ลิตร
4. ศึกษาการไหล และการกระจายตัวของภูมิภาคแก๊สภายในถังกวนที่ติดตั้งใบปั่นกวน Dual Rushton Turbine และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรที่สภาวะคงตัวในสภาวะการดำเนินการที่อัตราการหมุน 300, 400, และ 500 รอบต่อนาที อัตราป้อนอากาศคงที่ที่ 0.5 VVm และที่อัตราการหมุนคงที่ 400 รอบต่อนาที อัตราการป้อนอากาศ 0.5, 1.0, และ 1.5 VVm ตามลำดับ โดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงานปริมาตร 5.11 ลิตร และอุณหภูมิคงที่ 35 องศาเซลเซียส

5. เปรียบเทียบพลศาสตร์ และผลที่เกิดขึ้นภายในถังกวนจากการเปลี่ยนระยะระหว่างใบพัด และความสูงของของน้ำ ตามสัดส่วนจริงในการทดลองขยายขนาด ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรที่สภาวะคงตัวในแต่ละบริเวณที่เทียบเท่ากัน ที่สภาวะการดำเนินการที่มีกำลังต่อปริมาตรเท่ากัน

#### 1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรของระบบถังกวนที่มีลักษณะเดียวกับถังหมัก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากตัวแปรหนึ่ง โดยสามารถใช้องค์ความรู้จากงานวิจัยนี้ช่วยในการออกแบบสภาวะการดำเนินการ และปรับปรุงการดำเนินการในถังกวนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและบททบทวนวรรณกรรม

#### 2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1. องค์ประกอบของถังกวน

##### 2.1.1.1. รูปทรงของถังกวน

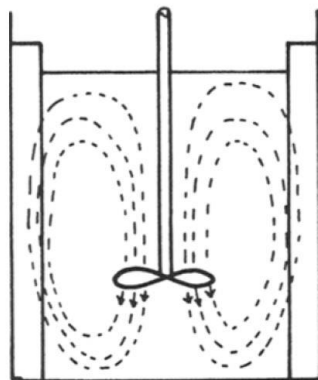
รูปทรงของถังกวนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผสมของถังกวน โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นก้นโค้ง เช่น Ellipsoidal, Tori-Spherical มากกว่าก้นแบน (Flat Cylindrical) ซึ่งขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่ใช้ สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับการผสมสารมักออกแบบเป็นก้นโค้ง เพื่อป้องกันการเกิด Dead spot หรือ Dead zone ขึ้นภายในถังกวนที่บริเวณมุมของถังสำหรับก้นแบน

##### 2.1.1.2. รูปแบบการไหลในถังกวน

รูปแบบการไหลในถังกวนขึ้นกับลักษณะของใบพัดที่ติดตั้งภายในถังกวน รวมถึงขนาด และลักษณะรูปร่างของถังกวน คุณสมบัติของสารภายในถัง ฯลฯ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ การไหลแบบ Axial flow, Radial flow, และ Tangential flow นอกจากนี้ สำหรับการผสมสารสองวัฏภาค แก๊ส-ของเหลว ต้องคำนึงถึงรูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊ส (Gas Flow pattern) ภายในระบบด้วย

##### 2.1.1.2.1. การไหลแบบ Axial Flow

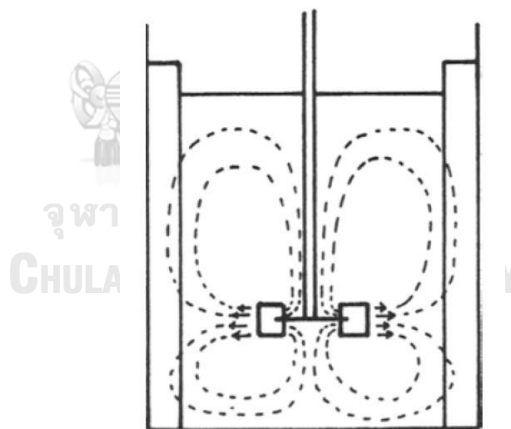
การไหลแบบ Axial Flow เป็นการไหลตามแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเหมาะสำหรับการปั่นกวนที่ต้องการการผสมแบบ บน-สู่-ล่าง เช่น ถังกวนที่มีเม็ดของแข็งปนอยู่ในระบบ เกิดขึ้นจากใบพัดชนิด Pitched blade turbine และ Marine propeller เป็นต้น โดยลักษณะของใบพัดจะทำมุมน้อยกว่า 90 องศา กับแนวการหมุน



รูปที่ 2.1 ลักษณะการไหลแบบ Axial Flow (Edwards, Baker, and Godfrey 1992)

#### 2.1.1.2.2. การไหลแบบ Radial Flow

การไหลแบบ Radial Flow เป็นการไหลที่เกิดขึ้นในแนวราบตามแนวรัศมีของถังกวน โดยจะไหลออกจากใบพัดเข้าสู่ผนัง และแบ่งเป็นสองสาย สายหนึ่งไหลขึ้น และอีกสายหนึ่งไหลลงตามแนวผนังของถังกวน เกิดเป็นการไหลแบบหมุนวนแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยการไหลลักษณะนี้เกิดจากใบกวนชนิด Rushton turbine ซึ่งมีใบพัดวางตัวตั้งฉากกับทิศทางการหมุน



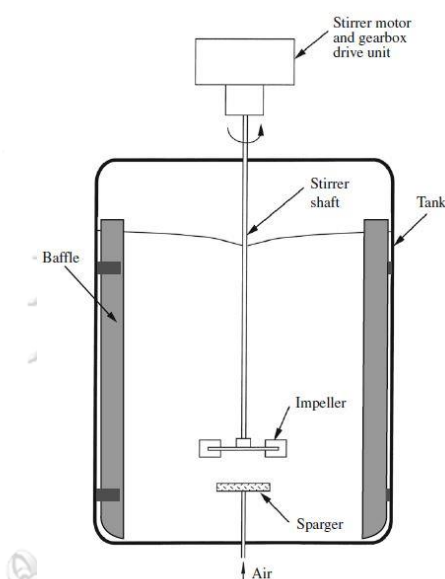
รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลแบบ Radial Flow (1992)

#### 2.1.1.2.3. การไหลแบบ Tangential Flow

การไหลแบบ Tangential flow หรือ Rotational Flow เป็นลักษณะการหมุนวนรอบ ๆ แกนใบพัดหรือตามแนวสัมผัสตามแรงเหวี่ยงของใบพัด ซึ่งเป็นการหมุนที่ส่งผลให้เกิด Vortex ทำให้ประสิทธิภาพการผสมภายในถังกวนลดลง สามารถป้องกันได้โดยการติด Baffle

#### 2.1.1.2.4. รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊ส

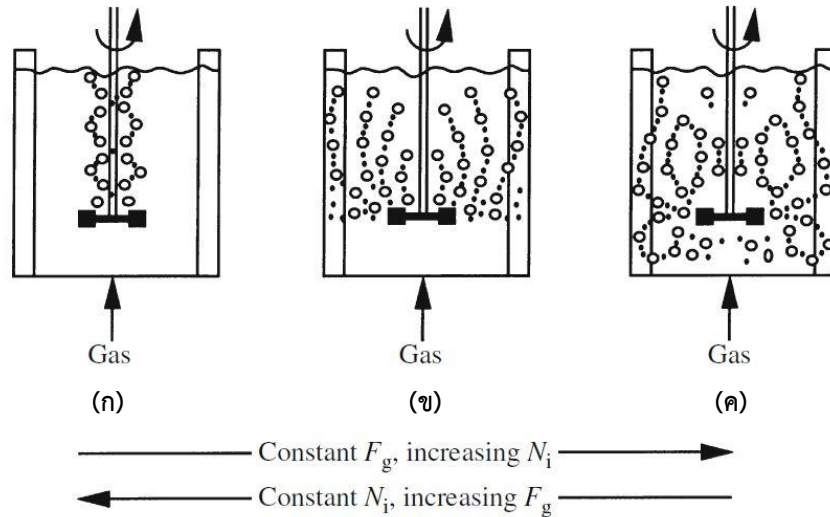
ในถังกวนที่มีการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ รูปแบบการไหลของอากาศภายในถังกวนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญกับระบบ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการถ่ายโอนออกซิเจนภายในถังกวน สำหรับกระบวนการหมักซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยทั่วไป ถังกวนมีการป้อนอากาศผ่านตัวป้อนอากาศ หรือตัวกระจายอากาศ (Sparger) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่างของใบพัด ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของถังกวนที่มีการป้อนอากาศ (Doran 2012)

รูปแบบการไหลของแก๊สภายในถังกวน แตกต่างกันไปตามชนิดของใบพัดที่ติดตั้ง สำหรับใบปั่นกวนชนิด Rushton Turbine สามารถจำแนกรูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบการปั่นกวน,  $N$ ; และอัตราการป้อนอากาศ,  $F_g$  โดยรูปที่ 2.4(ก) เป็นลักษณะการไหลแบบ Flooding คือแรงลอยตัวมีอิทธิพลต่อวัฏภาคแก๊สมาก ทำให้แก๊สลอยตัวขึ้นในแนวตั้งที่บริเวณแกนหมุนของใบปั่นกวน เกิดขึ้นในการดำเนินการที่มีอัตราการป้อนอากาศสูง และอัตราการปั่นกวนต่ำ หากเพิ่มอัตราการปั่นกวน หรือลดอัตราการป้อนอากาศลง รูปแบบการไหลของแก๊สจะเริ่มเปลี่ยนเป็นแบบ Loading ดังรูปที่ 2.4(ข) วัฏภาคแก๊สเริ่มถูกพาออกจากแกนหมุนและกระจายไปด้านข้างของถังกวน และหากเพิ่มอัตราการปั่นกวน หรือลดอัตราการป้อนอากาศลง จะทำให้รูปแบบการไหลภายในถังกวนเป็นแบบ Complete gas disperse ดังรูปที่ 2.4(ค) กล่าวคือ

วิฤภาคแก๊สของเหลวพาไปทั่วทั้งถังถึงกวน เป็นรูปแบบที่ต้องการให้เกิดในการดำเนินการมากที่สุด เนื่องจากทำให้ทุก ๆ บริเวณภายในถังกวนสัมผัสกับแก๊ส การถ่ายโอนมวลมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 2.4 รูปแบบการไหลของแก๊สในถังกวน (Doran 2012)

ความสัมพันธ์ของรูปแบบการไหลของแก๊สภายในระบบถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่าง Impeller Froude number ( $Fr$ ) สมการ 2.1, Gas Flow number ( $Fl_g$ ) สมการ 2.2 และอัตราส่วนของขนาดใบปั่นกวนต่อขนาดถังกวน ( $D/T$ )

$$Fr = \frac{ND^2}{g}$$

สมการ 2.1

$$Fl_g = \frac{F_g}{ND^3}$$

สมการ 2.2

โดยความสัมพันธ์สำหรับจำแนกรูปแบบการไหลของแก๊สจะเป็นเส้นแบ่งขอบเขตของรูปแบบการไหล โดยสมการ 2.3 แบ่งระหว่างช่วง Flooding และ Loading และสมการ 2.4 แบ่งระหว่างช่วง Loading และ Complete gas disperse (Doran 2012)

$$Fl_g = 30 \left( \frac{D}{T} \right)^{3.5} Fr$$

สมการ 2.3

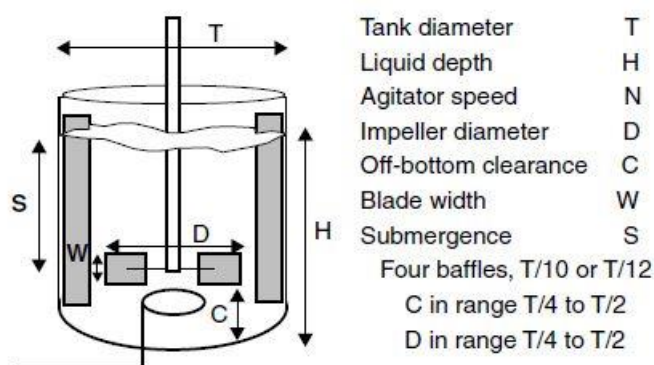
$$Fl_g = 0.2 \left( \frac{D}{T} \right)^{0.5} Fr^{0.5}$$

สมการ 2.4



### 2.1.1.3. ถังกวนมาตรฐาน

ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน สมการความสัมพันธ์ต่าง ๆ มักใช้ลักษณะอ้างอิงของสัดส่วนขนาดถังกวนแบบเดียวกัน ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ หรืออัตราส่วนของขนาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในถังกวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวนนั้น ตัวอย่างของถังกวนมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รูปทรงของถังกวนมาตรฐาน (Middleton and Smith 2003)

### 2.1.2. ค่า Reynolds number สำหรับถังกวน

สภาวะการไหลภายในถังกวน ถูกกำหนดโดยค่า Reynolds number ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติ ที่แสดงถึงอัตราส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงหนืด (Viscous force) ภายในระบบ โดยส่วนมากนิยมใช้ค่า Impeller Reynolds Number แสดงดังสมการ 2.5 เป็นตัวกำหนดสภาวะในถังกวนว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ หรือการไหลแบบปั่นป่วน

$$Re = \frac{\rho_L D_a^2 N}{\mu_L}$$

สมการ 2.5

โดย	Re	ค่า Reynolds number
	$\rho_L$	ความหนาแน่นของเหลว (kg/m <sup>3</sup> )
	$D_a$	เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (m)
	N	ความเร็วรอบการปั่นกวน (s <sup>-1</sup> )
	$\mu_L$	ความหนืดของของเหลว (Pa.s)

### 2.1.3. พลังงานที่ใช้ในถังกวน

ในการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ภายในถังกวน วัตจากพลังงานที่ใบพัดใช้ในการปั่นกวนที่ความเร็วรอบที่กำหนด ซึ่งสัมพันธ์กับแรงบิดที่ใช้ในการหมุนที่ความเร็วรอบนั้น ๆ แสดงดังสมการ 2.6

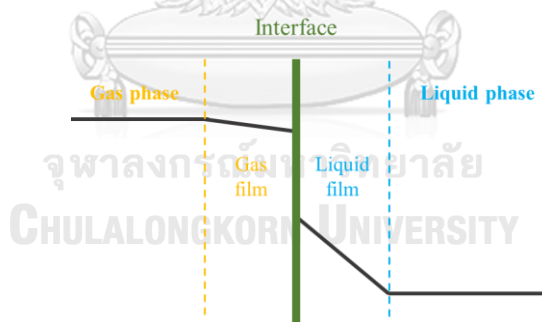
$$P = Torque \times N \quad \text{สมการ 2.6}$$

การใช้ CFD สามารถคำนวณค่าแรงบิดของใบพัดที่ถูกกระทำโดยของไหลได้จากการแก้สมการการถ่ายโอนร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน โดยแรงบิดจะถูกคำนวณตามสมการ 2.7 ซึ่งเป็นการคำนวณแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนใบปั่นกวนจากแรงต้านของของไหล เรียกว่า Viscous force โดย  $\tau_{xy}$  จะถูกคำนวณจากสมการการถ่ายโอน

$$Torque = \int r \times -\tau_{xy} dA_{Impeller} \quad \text{สมการ 2.7}$$

### 2.1.4. การถ่ายโอนมวลภายในถังกวน

การพิจารณาการถ่ายโอนมวลข้ามวัฏภาคในระบบ อ้างอิงจากทฤษฎี Two-film (Whitman 1923) โดยกำหนดให้วัฏภาคแก๊สละลายเข้าสู่วัฏภาคของเหลวผ่านชั้นฟิล์มแต่ละวัฏภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นผ่านชั้นฟิล์ม

พิจารณาการถ่ายเทมวลข้ามชั้นฟิล์ม สมมติให้อัตราการถ่ายเทเท่ากันในชั้นฟิล์มของแต่ละวัฏภาค จะได้ดังสมการ 2.8 (Doran 2013)

$$N_{AG} = k_G a(C_{AG} - C_{AGi}) = k_L a(C_{ALi} - C_{AL}) = N_{AL} \quad \text{สมการ 2.8}$$

โดย	$N_{Ap}$	คือ อัตราการถ่ายเทสาร A ในชั้นฟิล์มของวัฏภาค p
	$k_p$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของวัฏภาค p
	$C_{Ap}$	คือ ความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาค p
	$C_{Api}$	คือ ความเข้มข้นของสาร A ที่รอยต่อระหว่างวัฏภาคของวัฏภาค p

ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม ความเข้มข้นของสารอยู่ในสภาวะสมดุล เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.9 โดยที่  $m$  คือค่าคงที่สมดุลของสารในวัฏภาคของเหลว ในระบบนี้คือค่าการละลายของวัฏภาคแก๊สในวัฏภาคของเหลว

$$C_{ALi} = \frac{C_{AGi}}{m} = C_{AL}^* \quad \text{สมการ 2.9}$$

จากสมการ 2.8 และ สมการ 2.9 จะได้

$$N_A = \frac{1}{\left(\frac{1}{mk_G a} + \frac{1}{k_L a}\right)} \times (C_{AL}^* - C_{AL}) = K_L a(C_{AL}^* - C_{AL}) \quad \text{สมการ 2.10}$$

โดย  $K_L$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลวัฏภาคของเหลว

โดยทั่วไปสำหรับคู่สารที่ละลายลงวัฏภาคของเหลวได้ยาก เช่น ออกซิเจนกับน้ำ ความต้านทานการถ่ายเทมวลของชั้นฟิล์มวัฏภาคแก๊สมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับฝั่งของเหลว สมการ 2.10 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$N_A = k_L a(C_{AL}^* - C_{AL}) \quad \text{สมการ 2.11}$$

สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร ใช้ความสัมพันธ์จากสมการ 2.11 ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนความเข้มข้นต่อเวลา เมื่ออินทิเกรตที่สองเวลาใด ๆ จะได้ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรดังสมการ 2.12

$$\int_{C_{AL1}}^{C_{AL2}} \frac{dC}{(C_{AL}^* - C_{AL})} = \int_{t_1}^{t_2} (k_L a) dt$$

$$k_L a = \frac{-1}{(t_2 - t_1)} \ln \left( \frac{C_{AL}^* - C_{AL2}}{C_{AL}^* - C_{AL1}} \right) \quad \text{สมการ 2.12}$$

โดยการทำการทดลองวัดค่าออกซิเจนที่ละลายอยู่ในวัฏภาคของเหลวเทียบกับเวลา วิเคราะห์ร่วมกับสมการ 2.12 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร วิธีการดังกล่าวนี้เรียกว่า Dynamic method

## 2.1.5. สมการที่ใช้ในการอธิบายการไหล

### 2.1.5.1. สมการอนุรักษ์มวล

สมการสมดุลมวลรอบปริมาตรควบคุม ถูกอธิบายโดยสมการ continuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \vec{v}) \quad \text{สมการ 2.13}$$

### 2.1.5.2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมแสดงดังสมการ 2.14 ใช้ในการอธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมต่อปริมาตร,  $\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v})$ , ที่ถูกถ่ายโอนโดยการพา,  $-\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v})$ , และการถ่ายโอนในระดับโมเลกุล,  $-\nabla \cdot \vec{\tau}$ , รวมถึงแรงจากภายนอกที่กระทำต่อของไหลในระบบ,  $\rho \vec{g} + \sum_{q=1}^n (\overline{R_{pq}})$  เนื่องจากระบบที่พิจารณาของไหลในระบบมากกว่าหนึ่งวัฏภาค ในการคำนวณการถ่ายเทโมเมนตัม จะคิดการถ่ายเทของแต่ละวัฏภาคโดยการคำนวณร่วมกับสัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคนั้น ๆ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho \vec{v}) = & -\nabla \cdot (\alpha_p \rho \vec{v} \vec{v}) - \alpha_p \nabla p - \nabla \cdot \vec{\tau} \\ & + \alpha_p \rho \vec{g} + \sum_{q=1}^n (\overline{R_{pq}}) \end{aligned} \quad \text{สมการ 2.14}$$

การถ่ายโอนโมเมนตัมในระดับโมเลกุลคือ ผลรวมการเปลี่ยนแปลงความดัน และการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือน ซึ่งแรงเฉือนเกิดจากความหนืดของระบบ ซึ่งถูกอธิบายด้วยกฎของ Newton's law of viscosity ดังสมการ 2.15 บนสมมติฐานของไหลในระบบประพติดัวเป็นของไหลนิวโตเนียน

$$\vec{\tau} = -\alpha_p \mu (\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) + \left( \frac{2}{3} \mu - \kappa \right) (\nabla \cdot \vec{v}) \vec{\delta} \quad \text{สมการ 2.15}$$

โดยที่

$$\vec{\delta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

สำหรับการพิจารณาแรงภายนอกที่กระทำกับของไหลภายในระบบ ในงานวิจัยนี้พิจารณาแรงลากที่เกิดขึ้นระหว่างภูมิภาคของของไหลด้วย ซึ่งเป็นอีกหนึ่งตัวแปรสำคัญสำหรับการถ่ายโอนโมเมนตัมระหว่างภูมิภาค สำหรับระบบที่เป็นของไหลกับของไหล โดยแรงลากแสดงดังสมการ 2.16

$$\vec{R}_{pq} = K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad \text{สมการ 2.16}$$

โดย  $\vec{R}_{pq}$  คือ แรงลากระหว่างภูมิภาค

$K_{pq}$  คือ สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างภูมิภาค

$\vec{v}_i$  คือ ความเร็วของภูมิภาค  $i$  (ในที่นี้คือ น้ำ หรือ อากาศ)

สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างภูมิภาคของระบบที่เป็นของไหลกับของไหลจะสมมติให้ภูมิภาครองมีลักษณะเป็นเม็ดกระจายตัวอยู่ในภูมิภาคหลัก ในงานวิจัยนี้คือฟองอากาศกระจายตัวอยู่ในน้ำ สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังสมการ 2.17

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p} \quad \text{สมการ 2.17}$$

โดยที่  $\tau_p$  คือ Particulate Relaxation Time ถูกคำนวณจากสมการ 2.18

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad \text{สมการ 2.18}$$

โดย  $d_p$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดฟอง

โดยค่า  $f$  คือ สมการแรงลากซึ่งถูกอธิบายในแบบจำลองที่ต่างกันสำหรับระบบที่ต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้ซึ่งระบบเป็นถึงกวนของไหล 2 ชนิด สมการ 2.19 เป็นแบบจำลองแรงลากที่ถูกเสนอโดย (Schiller and Naumann 1935) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกนิยมใช้โดยทั่วไปในระบบนี้ (Kaiser, Eibl, and Eibl 2011), (Rathore, Sharma, and Persad 2012), และ (Sarkar et al. 2016)

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad \text{สมการ 2.19}$$

จากสมการข้างต้น จะเห็นว่าแรงลากสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์แรงลาก,  $C_D$ , และค่า Reynolds number โดยค่าทั้งสองในแบบจำลองคำนวณจากสมการ 2.20 และ สมการ 2.21 ตามลำดับ

$$C_{Sphere} = \begin{cases} 24(1 + 0.15Re^{0.687})/Re, & Re \leq 1000 \\ 0.44 & , \quad Re > 1000 \end{cases} \quad \text{สมการ 2.20}$$

$$Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_p}{\mu_q} \quad \text{สมการ 2.21}$$

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองแรงลากข้างต้นเหมาะสำหรับอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมแข็ง สำหรับพองอากาศที่มีขนาดมากกว่า 1-3 มิลลิเมตร รูปทรงของพองอากาศจะเกิดการบิดเบี้ยว ไม่เป็นลักษณะทรงกลมแข็ง (Gimbun et al. 2016), (Zhang, Zhang, and Fan 2009) ซึ่งส่งผลให้แรงลากที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น (Ishii and Zuber 1979) ได้นำเสนอแบบจำลองแรงลากสำหรับพองที่มีรูปทรงไม่เป็นทรงกลม โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงลากของรูปทรงดังกล่าว จะไม่ขึ้นกับค่า Reynolds number แต่จะขึ้นกับรูปร่าง โดยพิจารณาความสัมพันธ์กับค่า Eotvos Number,  $E_o$ , ซึ่งแสดงสัดส่วนของแรงโน้มถ่วงต่อแรงตึงผิว แสดงดังสมการ 2.22

$$E_o = \frac{g \Delta \rho d_p^2}{\sigma} \quad \text{สมการ 2.22}$$

สำหรับรูปทรงของพองอากาศที่ไม่เป็นทรงกลม พิจารณาเป็นสองลักษณะ คือ รูปทรงรี (Ellipsoidal), และรูปทรงฝาหัวกลม (Spherical cap) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงลากดังสมการ 2.23 และ สมการ 2.24 ตามลำดับ

$$C_{Eclipse} = \frac{2}{3} \sqrt{E_o} \quad \text{สมการ 2.23}$$

$$C_{cap} = \frac{8}{3} \quad \text{สมการ 2.24}$$

และพิจารณาแรงลากที่เกิดขึ้นกับระบบตามสมการ 2.25

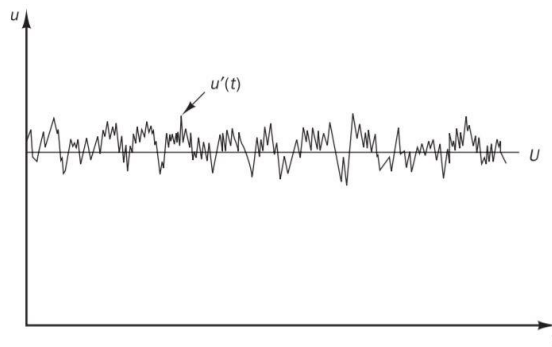
$$C_D = \begin{cases} C_{Sphere}, & \text{if } C_{Sphere} \geq C_{Ellipse} \\ \min(C_{Ellipse}, C_{Cap}), & \text{if } C_{Sphere} < C_{Ellipse} \end{cases} \quad \text{สมการ 2.25}$$

### 2.1.5.3. สมการอธิบายการไหลแบบราบเรียบ

เมื่อพิจารณาการไหลที่สภาวะราบเรียบ ซึ่งของไหลมีลักษณะไหลเป็นชั้นเรียงตัวกัน ที่สภาวะคงตัว, Steady State, และเงื่อนไขขอบเขตไม่เปลี่ยนแปลง สามารถอธิบายความเร็วของของไหลได้จากสมการ Navier-Stokes แสดงดังสมการ 2.26 โดยมีสมมติฐานความหนาแน่นของไหลในระบบคงที่ และ ความหนืดของไหลคงที่, Isotropic Viscosity

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla P - \mu[\nabla^2 \vec{v}] + \rho \vec{g} \quad \text{สมการ 2.26}$$

### 2.1.5.4. สมการอธิบายการไหลแบบปั่นป่วน



รูปที่ 2.7 ความเร็วที่วัดได้ในแต่ละเวลาขณะเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Versteeg and Malalasekera 2007)

การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของการไหลตลอดเวลา ส่งผลให้ความเร็วที่วัดได้ในแต่ละเวลาอาจมีค่าไม่เท่ากันที่ตำแหน่งเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.7 เมื่อพิจารณาความเร็วที่เวลาใด ๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเร็วเฉลี่ยเวลา (Time-averaged velocity) และ ความเร็วปั่นป่วน (Fluctuating velocity) ได้ดังสมการ 2.27

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v} + \mathbf{v}'(t) \quad \text{สมการ 2.27}$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกาลไหลได้ดังสมการ 2.28

$$\varphi(t) = \varphi + \varphi'(t)$$

สมการ 2.28

โดยที่  $\varphi$  คือ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหล

รูปแบบของสมการ 2.28 เรียกว่า Reynolds Decomposition ใช้สำหรับอธิบายความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในการไหล เมื่อพิจารณาระบบที่เป็นสามมิติ ความปั่นป่วนจะเกิดขึ้นในทุกทิศทาง เมื่อกระจายตัวแปรให้อยู่ในรูปของ Reynolds Decomposition จากสมการ Navier-Stokes สามารถเขียนสมการการถ่ายโอนโมเมนตัมในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ดังสมการ 2.29

พิจารณาเฉพาะแกน-x จะได้

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{\partial}{\partial t} v_x + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right] \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} - \mu \left[ \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \rho g_x \\ + \left[ \frac{\partial(-\rho \bar{v}'_x \bar{v}'_x)}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \bar{v}'_x \bar{v}'_y)}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \bar{v}'_x \bar{v}'_z)}{\partial z} \right] \end{aligned}$$

สมการ 2.29

จากสมการ 2.29 มีพจน์ที่เพิ่มเติมขึ้นจากสมการ Navier-Stokes คือพจน์ของความเครียด เรียกว่า Reynolds Stress โดยพจน์นี้สามารถพิจารณาได้จากความเครียดที่กระทำต่อของไหล ตามสมมติฐานของ Boussinesq ว่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากความปั่นป่วนสามารถอธิบายด้วยความเร็วเฉลี่ย ซึ่งอยู่ในรูปเดียวกันกับกฎของ Newton's law of viscosity ดังสมการ 2.30

$$\tau_{ij} = -\rho \bar{v}'_i \bar{v}'_j = \mu_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

สมการ 2.30

โดย  $\mu_t$  คือ ความหนืดที่สภาวะปั่นป่วน (Turbulent viscosity) ซึ่งถูกอธิบายโดยค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและการกระจายตัวพลังงานในแบบจำลองความปั่นป่วน

การพิจารณาจากหน่วยของอัตราส่วนระหว่างความหนืดความปั่นป่วนเทียบกับความหนาแน่นของสาร หรือความหนืดไดนามิกซึ่งมีหน่วยเป็น  $m^2/s$  ดังสมการ 2.31



$$v_t = \frac{\mu_t}{\rho} \left[ \text{m}^2/\text{s} \right] \quad \text{สมการ 2.31}$$

และเมื่อวิเคราะห์ตัวแปรไร้หน่วย พบว่าความหนืดไดนามิกสามารถอธิบายได้ด้วยขนาดความเร็ว (Velocity scale) และขนาดความยาว (Length Scale) โดยตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรที่ใช้ อธิบายลักษณะการไหลที่เกิดในสภาวะปั่นป่วน หรือ Eddy ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวเชื่อมโยงระหว่างความเร็วเฉลี่ยต่อเวลากับความหนืดปั่นป่วน

$$v_t = C\nu l \quad \text{สมการ 2.32}$$

หรือ

$$\mu_t = C\rho\nu l \quad \text{สมการ 2.33}$$

## 2.1.6. แบบจำลองความปั่นป่วน

### 2.1.6.1. แบบจำลอง k- $\epsilon$

การคูณความเร็วในแต่ละแกนเข้าไปในสมการ Reynolds Average Navier-Stokes สามารถเขียนสมการการถ่ายโอนโมเมนตัมได้ดังสมการ 2.34

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{v}) &= \nabla \cdot \left( -\overline{P'v'} + 2\mu \overline{v's'_{ij}} - \frac{1}{2}\rho \overline{v'_i v'_i v'_j} \right) \\ &\quad - 2\mu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} - \rho \overline{v'_i v'_j} \cdot S_{ij} \end{aligned} \quad \text{สมการ 2.34}$$

โดย  $S_{ii} = \frac{\partial v_i}{\partial x_i}$  สมการ 2.35

$$s'_{ii} = \frac{\partial v'_i}{\partial x_i} \quad \text{สมการ 2.36}$$

$$S_{ii} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{สมการ 2.37}$$

$$s'_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{สมการ 2.38}$$

การกระจายตัวของพลังงานของพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วน สามารถพิจารณาให้เป็นการกระจายตัวของพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วนได้ดังสมการ 2.39

$$\epsilon = \frac{2\overline{\mu s'_{ij} \cdot s'_{ij}}}{\rho} = 2\nu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} \quad \text{สมการ 2.39}$$

โดยตัวแปร  $k$  และ  $\epsilon$  เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณความหนืดความปั่นป่วน ซึ่งแบบจำลองที่นิยมถูกใช้ในการทำนายการไหลแบบปั่นป่วนในระบบต่าง ๆ คือแบบจำลอง  $k-\epsilon$  ซึ่งเป็นการแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปร  $k$  และ  $\epsilon$  เพื่อใช้แก้สมการ Reynolds Average Navier-Stokes โดยพื้นฐานแบบจำลอง  $k-\epsilon$  คือการอธิบาย velocity scale และ length scale โดยใช้ค่า  $k-\epsilon$  (Launder 1972) โดยทั้งสองตัวแปรถูกอธิบายไว้ดังนี้

$$\nu = k^{1/2} \quad \text{สมการ 2.40}$$

$$\ell = \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad \text{สมการ 2.41}$$

จากสมการ 2.32 จะได้ความสัมพันธ์ของความหนืดปั่นป่วนได้ดังสมการ 2.42

$$\mu_t = C\rho\nu\ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{สมการ 2.42}$$

แบบจำลอง standard  $k-\epsilon$  ใช้ 2 สมการการถ่ายโอนพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วน และการกระจายพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วน ( $k$  และ  $\epsilon$ ) ดังสมการ 2.43 และ สมการ 2.44 ตามลำดับ

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{v}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) - 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ji} - \rho\epsilon \quad \text{สมการ 2.43}$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\epsilon \vec{v}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) - C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ji} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad \text{สมการ 2.44}$$

โดยค่าคงที่ในสมการเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง และไร้นหน่วย มีดังนี้

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\epsilon = 1.30 \quad C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

### 2.1.7. แบบจำลอง Population Balance

ขนาดของฟองอากาศที่กระจายตัวอยู่ภายในระบบ เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากในการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเชิง ในการคำนวณ CFD สำหรับทำนายผลของฟองนิยมใช้แบบจำลอง Population Balance Model (PBM) (Amer, Feng, and Ramsey 2019), (Sarkar et al. 2016), และ (Ranganathan and Sivaraman 2011) เพื่อทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแบบจำลอง PBM จะทำการคำนวณความหนาแน่นของจำนวนฟองอากาศ (Bubble Number Density, BND) ภายในระบบ โดยมีวิธีคำนวณ 2 วิธี คือ Method of Class และ Method of Moment ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Method of Class ซึ่งพิจารณาฟองอากาศออกเป็นกลุ่ม ๆ ตามขนาดของฟองอากาศภายในระบบ ทั้งหมด  $n$  กลุ่ม ขึ้นกับการกำหนดเริ่มต้น สมการการถ่ายโอนของแบบจำลอง PBM แสดงดังสมการ 2.45 (ANSYS 2016) กำหนดให้ไม่มีการเกิดใหม่ของฟองอากาศในระบบ

$$\frac{\partial(\rho_G n_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_G \mathbf{u}_{G,i} n_i) = \rho_G (B_{ag,i} - D_{ag,i} + B_{br,i} - D_{br,i}) \quad \text{สมการ 2.45}$$

โดย  $n_i$  คือ จำนวนของฟองอากาศในกลุ่มขนาดฟองอากาศ  $d_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )

$\mathbf{u}_{G,i}$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของฟองอากาศในกลุ่มขนาดฟองอากาศ  $d_i$

$B_{ag,i}$  คือ อัตราการเกิดของฟองอากาศในกลุ่มขนาดฟองอากาศ  $d_i$  เนื่องจากการรวมตัว

$D_{ag,i}$  คือ อัตราการตายของฟองอากาศในกลุ่มขนาดฟองอากาศ  $d_i$  เนื่องจากการรวมตัว

$B_{br,i}$  คือ อัตราการเกิดของฟองอากาศในกลุ่มขนาดฟองอากาศ  $d_i$  เนื่องจากการแตก

$D_{br,i}$  คือ อัตราการตายของฟองอากาศในกลุ่มขนาดฟองอากาศ  $d_i$  เนื่องจากการแตก

ขนาดของฟองอากาศที่เป็นตัวแทนของระบบในการพิจารณาพลศาสตร์ระหว่างวัฏภาคใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย Sauter (Sauter mean diameter) ดังสมการ 2.46

$$d_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad \text{สมการ 2.46}$$

นอกจากนี้ จำนวนของฟองอากาศในกลุ่มขนาดฟองอากาศ  $i$  ( $n_i$ ) สามารถเขียนอยู่ในรูปของสัดส่วนโดยปริมาตรของฟองอากาศในกลุ่มขนาดฟองอากาศ  $i$  ( $\alpha_i$ ) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาผลได้มากกว่า ดังแสดงในสมการ 2.47 โดย  $V_i$  คือปริมาตรเดี่ยวของฟองอากาศกลุ่ม  $i$

$$\alpha_i = n_i V_i \quad \text{สมการ 2.47}$$

และกำหนด  $f_i$  คือสัดส่วนโดยปริมาตรของฟองอากาศในกลุ่มขนาดฟองอากาศ  $i$  ต่อสัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคแก๊สในระบบ ดังสมการ 2.48

$$f_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_G} \quad \text{สมการ 2.48}$$

$$\text{โดยที่ } \sum_i f_i = 1$$

เมื่อนำสมการ 2.47 และสมการ 2.48 แทนค่าในสมการ 2.46 จะได้ดังสมการ 2.49

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_G f_i \alpha_G)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_G \mathbf{u}_{G,i} f_i \alpha_G) \\ = \rho_G V_i (B_{ag,i} - D_{ag,i} + B_{br,i} - D_{br,i}) \end{aligned} \quad \text{สมการ 2.49}$$

$B_{ag,i}$ ,  $D_{ag,i}$ ,  $B_{br,i}$ , และ  $D_{br,i}$  อธิบายโดยแบบจำลองการทำนายปรากฏการณ์การรวมและการแตกของฟองในระบบ ซึ่งถูกนำเสนอไว้หลายแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม แต่ละแบบจำลองไม่มีความเหมาะสมสำหรับระบบใดระบบหนึ่งโดยเฉพาะ รวมถึงผลการใช้แบบจำลองการรวมคู่กับแบบจำลองการแตกของฟองสามารถส่งผลให้การทำนายแตกต่างกันได้ ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้แบบจำลองการรวมที่ถูกรับรองโดย (Luo 1993) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกที่นิยมใช้ (Rathore, Sharma, and Persad 2012), (Sarkar et al. 2016) และแบบจำลองการแตกที่ถูกรับรองโดย (Lehr, Millies, and Mewes 2002) ซึ่งสามารถทำนายได้ดีเมื่อใช้คู่กับแบบจำลองการรวมข้างต้น (Mawson 2012), (Syed et al. 2017)

### 2.1.7.1. แบบจำลองการรวมของฟองอากาศ (Bubble Aggregation Model)

แบบจำลองการรวมของฟองอากาศ โดยทั่วไปนิยามตามสมการ 2.50 มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และในบางกรณีถูกนิยามด้วยผลคูณของความถี่ของการชนกันของสองอนุภาคที่มีปริมาตร  $V$  และ  $V'$  กับประสิทธิภาพของการรวม หรือความน่าจะเป็นที่อนุภาคปริมาตร  $V$  จะรวมกับอนุภาคปริมาตร  $V'$

$$\Omega_{ag} = F_A a(V, V') \quad \text{สมการ 2.50}$$

อัตราการเกิดของอนุภาคปริมาตร  $V$  เนื่องจากการรวมนิยามได้ดังสมการ 2.51 โดยพิจารณาปรากฏการณ์ที่อนุภาคปริมาตร  $V-V'$  รวมกับอนุภาคปริมาตร  $V'$  และเกิดเป็นอนุภาคปริมาตร  $V$

$$B_{ag} = \frac{1}{2} \int_0^V a(V - V', V') n(V - V') n(V') dnV' \quad \text{สมการ 2.51}$$

อัตราการตายของอนุภาคปริมาตร  $V$  เนื่องจากการรวมนิยามดังสมการ 2.52

$$D_{ag} = \int_0^\infty a(V, V') n(V) n(V') dnV' \quad \text{สมการ 2.52}$$

แบบจำลองการรวมของ (Luo 1993) นิยามจากอัตราการเพิ่มของปริมาตรของอนุภาคที่เป็นผลมาจากการชนกันของคู่อนุภาคปริมาตร  $V_i$  และ  $V_j$

$$\Omega_{ag}(V_i, V_j) = \omega_{ag}(V_i, V_j) P_{ag}(V_i, V_j) \left[ m^3 / \text{sec} \right] \quad \text{สมการ 2.53}$$

โดย  $\omega_{ag}(V_i, V_j)$  คือ ความถี่ของการชน

$P_{ag}(V_i, V_j)$  คือ ความน่าจะเป็นที่อนุภาคจะรวมกันจากการชน

ความถี่ของการชนของคู่อนุภาค นิยามตามสมการ 2.54 โดย  $\bar{u}_{ij}$  คือความเร็วคุณลักษณะของการชนของคู่อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_i$  และ  $d_j$  ดังสมการ 2.55 โดย  $\bar{u}_i$  คำนวณจากการกระจายตัวของพลังงานของพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วนดังสมการ 2.56

$$\omega_{ag}(V_i, V_j) = \frac{\pi}{4} (d_i + d_j)^2 \bar{u}_{ij} \quad \text{สมการ 2.54}$$

$$\bar{u}_{ij} = (\bar{u}_i^2 + \bar{u}_j^2)^{0.5} \quad \text{สมการ 2.55}$$

$$\bar{u}_i = 1.43(\varepsilon d_i)^{1/3} \quad \text{สมการ 2.56}$$

ความน่าจะเป็นที่อนุภาคจะรวมกันจากการชนนิยามดังสมการ 2.57

$$P_{ag}(V_i, V_j) = \left\{ -c_1 \frac{[0.75(1 + x_{ij}^2)(1 + x_{ij}^3)]^{0.5}}{(\rho_2/\rho_1)^{0.5}(1 + x_{ij})^3} We_{ij}^{0.5} \right\} \quad \text{สมการ 2.57}$$

โดย  $c_1$  คือ constant of order unity

$$x_{ij} = d_i/d_j$$

$\rho_1, \rho_2$  คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคหลัก และวัฏภาครองตามลำดับ

$$We_{ij} = \frac{\rho_l d_i (\bar{u}_{ij})^2}{\sigma}$$

### 2.1.7.2. แบบจำลองการแตกของฟองอากาศ (Bubble Breakage Model)

แบบจำลองการแตก นิยามดังสมการ 2.58

$$\Omega_{br} = F_B g(V') \beta(V|V') \quad \text{สมการ 2.58}$$

โดย  $g(V')$  คือ ความถี่ของการแตกของอนุภาคปริมาตร  $V'$

$\beta(V|V')$  คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function, PDF) ของอนุภาคที่แตกจากปริมาตร  $V'$  เป็นปริมาตร  $V$  ( $1/m^3$ )

อัตราการเกิดของอนุภาคปริมาตร  $V$  เนื่องจากการแตกแสดงดังสมการ 2.59

$$B_{br} = \int_{\Omega_v} p g(V') \beta(V|V') n(V') dV' \quad \text{สมการ 2.59}$$

โดย  $g(V') n(V') dV'$  คืออนุภาคปริมาตร  $V'$  แตกต่อหน่วยเวลา ทำให้เกิดอนุภาคจำนวน  $p g(V') n(V') dV'$  อนุภาค  $p$  จำนวนของอนุภาคลูกที่เกิดขึ้นต่ออนุภาคตั้งต้น และสัดส่วน  $\beta(V|V') dV$  แสดงอนุภาคปริมาตร  $V$

อัตราการตายของอนุภาคปริมาตร  $V$  เนื่องจากการแตกแสดงดังสมการ 2.60

$$D_{br} = g(V)n(V) \quad \text{สมการ 2.60}$$

แบบจำลองการแตกของ (Lehr, Millies, and Mewes 2002) พิจารณาความถี่ของการแตก และฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการแตกของอนุภาค รูปแบบทั่วไปของอัตราการแตกต่อหน่วยปริมาตร นิยามตามสมการ 2.61

$$\Omega_{br}(V, V') = \Omega_B(V')\eta(V|V') [1/m^3/sec] \quad \text{สมการ 2.61}$$

โดย อนุภาคเริ่มต้นมีปริมาตร  $V'$  และอนุภาคลูกมีปริมาตร  $V$ ,  $\Omega_B(V')$  คือความถี่ของการแตก, และ  $\eta(V|V')$  คือฟังก์ชันการแจกแจงแบบปกติของอนุภาคลูก สำหรับแบบจำลองนี้พิจารณาการแตกแบบ binary ส่งผลให้ค่า  $(V|V') = 0.5$

รูปแบบทั่วไปของแบบจำลองการแตกพิจารณาจากขนาดของ eddies  $\lambda$  ปะทะกับอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$  ปริมาตร  $V$  และอินทิกรัลรอบขนาด eddy ไร้หน่วย  $\xi = \lambda/d$

$$\Omega_{br}(V, V') = K \int_{\xi_{min}}^1 \frac{(1-\xi)^2}{\xi^n} \exp(-b\xi^m) d\xi \quad \text{สมการ 2.62}$$

โดย  $K = 1.19\varepsilon^{-1/3}d^{-7/3}\sigma\rho^{-1}f^{-1/3} [1/m^3/sec]$

$$n = 13/3$$

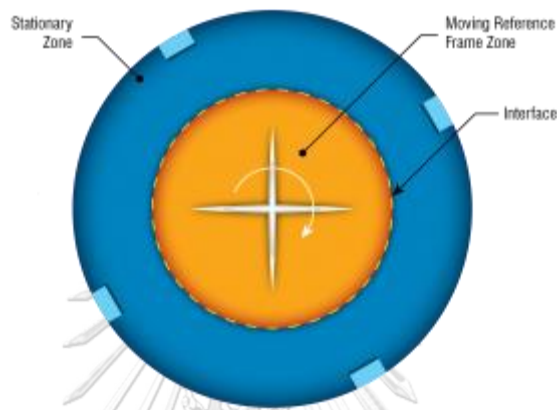
$$b = 2We_{crit}\sigma\rho^{-1}\varepsilon^{-2/3}d^{-5/3}f^{-1/3}$$

$$m = -2/3$$

## 2.1.8. แบบจำลองการหมุนของใบปั่นกววน

### 2.1.8.1. การไหลในกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ (Flow in Moving Reference Frame)

การไหลภายในถังกวนเกิดขึ้นจากการหมุนของใบปั่นกววน ในการจำลองการหมุนภายในถังกวน ระบบถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เกิดการหมุน (Rotational Domain) และส่วนที่อยู่นิ่ง (Stational Domain) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การแบ่งโดเมนในระบบการไหลในกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ (Patel 2014)

โดยการคำนวณส่วนที่เกิดการหมุน คำนวณโดยใช้ความเร็วสัมพัทธ์ เมื่อพิจารณาที่การหมุนด้วยความเร็วคงที่ แสดงดังสมการ 2.63

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{u}_r \quad \text{สมการ 2.63}$$

โดยที่  $\vec{v}_r$  คือ ความเร็วสัมพัทธ์ หรือความเร็วเทียบกับกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่

$\vec{v}$  คือ ความเร็วสุทธิ หรือความเร็วเทียบกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

$\vec{u}_r$  คือ ความเร็วของกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่

สำหรับความเร็วกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากการหมุนนั้น เป็นผลคูณเวกเตอร์ระหว่างเวกเตอร์ของความเร็วเชิงมุม กับเวกเตอร์ระยะทางจากจุดอ้างอิงการหมุนถึงตำแหน่งใด ๆ ของปริมาตรควบคุม

$$\vec{u}_r = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad \text{สมการ 2.64}$$



พจน์ของความเร็วในสมการอนุรักษ์มวล และสมการอนุรักษ์โมเมนตัมถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความเร็วมวลที่สัมพันธ์กับสมการ 2.65 และ สมการ 2.66

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \vec{v}_r) \quad \text{สมการ 2.65}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}_r) = -[\nabla \cdot \rho \vec{v}_r \vec{v}_r] - \rho(\vec{\omega} + \vec{r}) - \nabla P - \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{F} \quad \text{สมการ 2.66}$$

ที่ตำแหน่งรอยต่อ (Interface) ระหว่างกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และกรอบอ้างอิงเคลื่อนที่ การคำนวณความเร็วต้องใช้ความเร็วจากทั้งสองกรอบอ้างอิง ซึ่งที่รอยต่อ ความเร็วจะอยู่ในรูปของความเร็วมวล การจำลองการไหลโดยการแบ่งระบบเป็นสองส่วน และใช้การคำนวณในแต่ละกรอบอ้างอิง วิธีข้างต้นนี้เรียกว่า Multiple Reference Frame (MRF) วิธีดังกล่าวนี้ประมาณการไหลรอบใบป้อนให้เสมือนอยู่ในสถานะคงตัว (Steady state approximation) เหมาะสำหรับการไหลที่มีผลกระทบของระบบที่หยุดนิ่งไม่ส่งผลต่อระบบ หรือส่งผลน้อย

### 2.1.8.2. การคำนวณ time step เพื่อใช้ในการจำลองการหมุนของใบป้อนกวน

สำหรับการคำนวณเวลาต่อรอบการคำนวณ (time step) ในการจำลองการหมุน เพื่อสร้างเสถียรภาพในการคำนวณ ค่าที่ส่งต่อในแต่ละรอบเวลา ควรส่งต่อจากปริมาตรควบคุมหนึ่งสู่ปริมาตรควบคุมที่ติดกัน ไม่ควรส่งต่อข้ามปริมาตรควบคุม กล่าวคือระยะที่หมุนได้ในหนึ่งรอบเวลา ไม่ควรมีขนาดเกินขนาดของปริมาตรควบคุม โดยการคำนวณเวลาต่อหนึ่งรอบแสดงดังสมการ 2.67

$$CFL = \frac{u_t \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad \text{สมการ 2.67}$$

โดย CFL คือ ค่า Courant Number

$u_t$  คือ ความเร็วของปริมาตรควบคุมเคลื่อนที่

$\Delta t$  คือ ขนาดของ Time step

$\Delta x$  คือ ขนาดของปริมาตรควบคุม

เมื่อพิจารณาการหมุนในถังกวน ความเร็วของปริมาตรควบคุมสามารถคำนวณได้ในรูปแบบเดียวกับการคำนวณความเร็วปลายของใบกวน (Impeller tip speed) จากสมการ 2.67 จะได้

$$CFL = \frac{(\pi \frac{N}{60} D) \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

สมการ 2.68

โดยค่า CFL ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-0.7 เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณจากการส่งผ่านข้อมูลระหว่างสองปริมาตรควบคุมใด ๆ (Delafosse et al. 2008), (Murthy and Joshi 2008), และ (Malik et al. 2016)



## 2.2. บทบาททวนวรรณกรรม

### 2.2.1. ผลของแบบจำลองการหมุนของใบกวน

สำหรับการจำลองการหมุนของใบปั่นกวนภายในถังกวนสมารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ Impeller Boundary condition (IBC), Multiple Reference Frame (MRF), และวิธี Sliding Mesh โดยหากเลือกใช้การจำลองการหมุนด้วย IBC เป็นการนำค่าจากการทดลองมาใช้เพื่อทำนายการไหล ซึ่งวิธีดังกล่าว หากระบบมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปแตกต่างการทดลอง ผลของการทำนายความเร็วจากการคำนวณอาจมีการคลาดเคลื่อนได้ง่าย ส่วนวิธีการจำลองการหมุนด้วย MRF และ Sliding Mesh ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าจากการทดลอง โดยวิธีดังกล่าวเป็นการคำนวณจากรูปร่างของใบพัดร่วมกับสมการการไหล และแบบจำลองความปั่นป่วนในกรณีที่มีการไหลมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Brucato et al. 1998) ทำการเปรียบเทียบผลของการคำนวณความเร็วภายในถังกวนจากการใช้แบบจำลอง IBC, MRF, และ Sliding mesh ของใบพัดชนิด Rushton Turbine โดยไม่คำนึงถึงความหนาของใบพัดและ Baffle โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\epsilon$  ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า ความเร็วที่คำนวณได้จากวิธี Sliding Mesh ให้ความแม่นยำสูงสุดเมื่อเทียบกับอีก 2 วิธีข้างต้น แต่ใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุดเช่นกัน นอกจากนี้ (Micale et al. 1999) ทำการเปรียบเทียบความเร็วของถังกวนที่มีใบปั่นกวนมากกว่า 1 ใบ ซึ่งส่งผลให้ระบบการไหลในถังกวนมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยการศึกษาถังกวนที่ติดตั้งใบปั่นกวน Dual Rushton Turbine ที่ระยะห่างระหว่างใบพัดต่างกันโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\epsilon$  พบว่าการจำลองการหมุนโดยวิธี Sliding mesh ให้ผลการคำนวณความเร็วใกล้เคียงกับผลจากการวัดความเร็วในถังด้วยวิธี LDV มากที่สุด เมื่อเทียบกับอีกสองวิธี สำหรับทุกระยะห่างระหว่างใบพัด อย่างไรก็ตาม การจำลองการหมุนโดยวิธี MRF ให้ผลการคำนวณอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่า

### 2.2.2. ผลของแบบจำลองความปั่นป่วน

ลักษณะการไหลปั่นป่วนนั้น โดยส่วนมากพิจารณาจากค่า Reynolds number ที่มีค่ามากกว่า 10,000 โดยแบบจำลองความปั่นป่วนสำหรับทำนายความปั่นป่วนในระบบ ถูกพัฒนาขึ้นในหลายรูปแบบ บนสมมติฐานต่าง ๆ แบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมถูกนำมาใช้คือแบบจำลองในกลุ่ม RANS (Reynold Average Navier-Stoke) โดยการพิจารณาความเร็วปั่นป่วน (Fluctuation velocity) ให้อยู่ในรูปของความเครียด หรือ Reynolds Stress แบบจำลองความปั่นป่วนกลุ่มนี้ประกอบด้วยกลุ่มย่อยซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับเงื่อนไขขอบเขต และสมมติฐานในการคำนวณ

(Delafosse et al. 2008) ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณจาก CFD กับค่าที่วัดได้จากวิธี PIV โดยใช้แบบจำลองกลุ่ม RANS และ LES (Large Eddy Simulation) โดยถึงกวางที่ติดตั้งใบพัดชนิด Rushton Turbine ผลของความเร็วที่คำนวณได้จากแบบจำลองทั้งสองแบบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับผลการเปรียบเทียบของ (Murthy and Joshi 2008), (Li, Bao, and Gao 2011), และ (Joshi et al. 2011; Launder 1972) นอกจากนี้ (Singh, Fletcher, and Nijdam 2011) ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน  $k-\epsilon$ , SST, SSG-RSM, และ SAS-SST โดย SSG-RSM และ SAS-SST เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ประยุกต์หลักการขงแบบจำลอง LES ร่วมกับการใช้ Wall function เพื่อลดระยะเวลาที่ใช้คำนวณ พบว่า ผลการเปรียบเทียบความเร็วที่คำนวณได้จากแบบจำลองแต่ละแบบจำลอง ให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากวิธี LDV

ในการวิเคราะห์ตัวแปรของการไหลสภาวะปั่นป่วน ในที่นี้พิจารณาที่ค่า Turbulent kinetic energy,  $k$  และค่า Turbulent dissipation rate,  $\epsilon$  ซึ่งแบบจำลอง  $k-\epsilon$  คำนวณโดยมีสมมติฐานให้ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในระบบเกิดขึ้นเหมือนกันทุกทิศทาง เรียกว่า Isotropic ซึ่งต่างกับแบบจำลอง Reynolds Stress model รวมถึงแบบจำลอง LES โดย (Li, Bao, and Gao 2011) และ (Taghavi et al. 2011) ทำการเปรียบเทียบผลของความเร็ว และพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วน และการกระจายพลังงานภายในถึงกวางติดตั้งใบพัดชนิด Rushton turbine กับผลจากการวัดด้วยวิธี LDV พบว่าการคำนวณบนสมมติฐาน Isotropic สามารถคำนวณความเร็วในระบบได้สอดคล้องกับการทดลอง แต่ค่าพลังงานจลน์ที่เกิดจากความปั่นป่วน และการกระจายพลังงานคำนวณได้ค่าต่ำกว่าค่าจากการทดลอง โดยพบว่าแบบจำลอง LES ซึ่งแก้สมการการไหล Eddy ที่เกิดจากความปั่นป่วนโดยตรงร่วมกับสมการรองสำหรับสมการ Navier-Stokes สามารถคำนวณค่าทั้งสองดังกล่าวออกมาได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า จากข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าระบบการไหลที่เกิดขึ้นในถึงกวางมีลักษณะเป็น Anisotropic อย่างไรก็ตาม การใช้แบบจำลอง RSM หรือ LES ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าแบบจำลองที่อยู่บนสมมติฐาน Isotropic ซึ่งผลการคำนวณจากแบบจำลองที่มีสมมติฐานข้างต้นสามารถทำนายผลออกมาอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับค่าที่วัดจาก LDV และใช้เวลาในการคำนวณที่เหมาะสม

### 2.2.3. การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรภายในถึงกวาง

โดยทั่วไปสำหรับการออกแบบการดำเนินการ การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรสามารถทำได้สองวิธี คือใช้ Empirical Correlation เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์

การถ่ายโอนมวล,  $k_L$  และพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร,  $a$  หรือทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์สำหรับระบบที่สนใจ อย่างไรก็ตาม ในการทำการทดลองไม่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรแยกกันได้ ดังนั้นสมการการทำนายค่าการถ่ายโอนในถังกวนจากการทดลอง นิยมเสนอในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร (Doran 2013)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในถังกวนขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น คุณสมบัติของสารในระบบ, พลศาสตร์การไหลภายในระบบ, ขนาดของฟองที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ ค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ, ความเร็วของน้ำในแต่ละบริเวณ ฯลฯ โดยทั่วไปแล้วมักถูกนำเสนอในรูปแบบของความสัมพันธ์กับค่ากำลังต่อปริมาตร ( $P/V$ ) และอัตราการไหลของแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัด ( $u_G$ ) สำหรับในบางงานที่สารทำงานเป็นของไหลประเภท Non-Newtonian จะมีผลของความหนืดของของไหล ( $\mu_a$ ) ทำงานร่วมในการวิเคราะห์ด้วย ดังสมการ 2.69

$$k_L a = A \left( \frac{P}{V} \right)^\alpha u_G^\beta \cdot \mu_a^{-\delta} \quad \text{สมการ 2.69}$$

โดยที่  $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , และ  $\delta$  เป็นค่าคงที่สำหรับระบบใด ๆ ค่าของ  $\alpha$  และ  $\beta$  มักอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 1.0 ขึ้นกับรูปทรง และชนิดของสารในระบบ ค่าคงที่  $\delta$  สำหรับของไหลนิวโตเนียนมีค่าเป็น 0

Autors	System	$N$	$P/V$	$V_s$	$\mu_a$	Volume (L)	Stirrer Type
Yagi and Yoshida (1975)	Water + glycerol	2.2	0.8	0.3	-0.4	12	6FBT
	CMC / PANa		0.8	0.3			
Figueiredo and Calderbank (1979)	Water	-	0.6	0.8	-	600	FBT
Van't Riet (1979)	Water	-	0.4	0.5	-	2-2600	Any
Nishikawa et al. (1981)	Water Millet /CMC	2.4	0.8	0.33	-0.5	2.7-170	FBT & FBP
		2.4					
Chandrasekharan and Calderbank (1981)	Water	-	0.55	$0.55 \cdot D^{-1/2}$		50-1430	FBT
Davies et al. (1985)			0.8	0.45		20-180	6FBT
Kawase and Moo-Young (1988)			1.0	0.5			
Ogut and Hatch (1988)		0.9		0.7		100	6FBP
		0.5		0.5	-0.4		
Linek et al. (1991)	Water		0.65	0.4		20	6FBT
			1.1				
Pedersen et al. (1994)	Water+xanthan	2.7	-	0.5-0.7	-	15	Two-6FBT
Gagnon et al. (1998)			0.6-0.8	0.5		22	6FBT
Arjunwadkar et al. (1998)	Water + electrolytes / CMC		0.68	0.4-0.58		5	FBT & PBT
Vasconcelos et al. (2000)	Water		0.62	0.49		5	Two-6FBT
Garcia-Ochoa and Gomez (1998, 2001)	Water/Water+xanthan	2.0	0.6	0.5-0.67	-0.67	2-25	1,2-FBT, CBT, FBP, CBP, PBP
					-1*		
Puthli et al. (2005)	Water+electrolytes./CMC		0.57-0.98	0.53	-0.84	2	1,2-FBT, FBP, PBP

รูปที่ 2.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกนำเสนอสำหรับสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในระบบต่าง ๆ (Garcia-Ochoa and Gomez 2009)

Researchers	Correlation Proposed
Calderbank (1958) van't Riet (1979)	$k_L a = 0.026 (P/V_D)^{0.4} (V_D)^{0.5}$
Smith et al. (1977)	$k_L a = 0.01 (P/V_D)^{0.475} (V_D)^{0.4}$
Smith and Warmoeskerken (1985)	BLC regime: $k_L a = 1.1 \times 10^{-7} (F_D)^{0.6} (Re_N)^{1.1} (N)$ ALC regime: $k_L a = 1.6 \times 10^{-7} (F_D)^{0.42} (Re_N)^{1.02} (N)$
Linek et al. (1987)	$k_L a = 4.95 \times 10^{-3} (P/V_D)^{0.593} (V_D)^{0.4}$
Hickman (1988)	For $T = 0.60$ m $k_L a = 0.043 (P/V_D)^{0.4} (V_D)^{0.57}$ For $T = 2$ m $k_L a = 0.027 (P/V_D)^{0.54} (V_D)^{0.68}$
Smith (1991)	$k_L a = 1.25 \times 10^{-4} (D/T)^{2.8}$ $(Fr)^{0.6} (Re_N)^{0.7}$ $(F_D)^{0.45} (D/g)^{-0.5}$
Whitton and Nienow (1993)	$k_L a = 0.57 (P/m)^{0.4} (V_D)^{0.55}$
Zhu et al. (2001)	$k_L a = 0.031 (P/V_D)^{0.4} (V_D)^{0.5}$

(ก)

Authors	Dimensionless equation
Perez and Sandall (1974)	$\frac{k_L a D_L^2}{D_L} = 21.2 \cdot \left(\frac{\rho N T^2}{\mu_a}\right)^{1.11} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho D_L}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{V_s T}{\sigma}\right)^{0.45} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_a}\right)^{0.69}$
Yagi and Yoshida (1975)	$\frac{k_L a D_L^2}{D_L} = 0.06 \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho D_L}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{T^2 N \rho}{\mu_a}\right)^{1.5} \cdot \left(\frac{\mu_a V_s}{\sigma}\right)^{0.6} \cdot \left(\frac{N^2 T}{g}\right)^{0.19} \cdot \left(\frac{N T}{V_s}\right)^{0.32}$
Nishikawa et al. (1981)	$\frac{k_L a D_L^2}{D_L} = 0.368 \cdot \left(\frac{\rho N T^2}{\mu}\right)^{1.38} \cdot \left(\frac{\mu}{\rho D_L}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu V_s}{\sigma}\right)^{0.5}$ $\left(\frac{N^2 T}{g}\right)^{0.367} \cdot \left(\frac{N T}{V_s}\right)^{0.167} \cdot \left(\frac{T}{D}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{P/V}{\rho N^3 T^5}\right)^{0.75}$
Costa et al. (1982)	$\frac{k_L a D_L^2}{D_L} = 8.38 \cdot \left(\frac{\rho N^2 T^2}{k}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{k}{\rho N^{1-n} D_L}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho N^2 T^3}{\sigma}\right)^{0.43}$ $\left[1 + 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\rho N^2 T^3}{\sigma}\right)\right] \cdot \left(\frac{N T}{V_s}\right)^{-0.4} \cdot \left(\frac{T}{D}\right)$
Albal et al. (1983)	$\frac{k_L a D_L^2}{D_L} = 1.41 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho D_L}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{T^2 N \rho}{\mu_a}\right)^{0.67} \cdot \left(\frac{\rho N^2 T^3}{\sigma}\right)^{1.29}$
Schlüter and Deckwer (1992)	$k_L a \left(\frac{V}{g^2}\right)^{1/3} = C \cdot \left[\frac{P/V}{\rho (V/g^4)^{1/3}}\right]^{0.62} \cdot \left[\frac{Q}{V} \cdot \left(\frac{V}{g^2}\right)^{1/3}\right]^{0.23}$

(ข)

รูปที่ 2.10 สมการที่ถูกลำเสนอทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร

(a) (Yawalkar et al. 2008), (b) (Garcia-Ochoa and Gomez 2009)

งานวิจัยที่นำเสนอความสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในรูปแบบตามสมการ 2.69 แสดงดังรูปที่ 2.9 อย่างไรก็ตามในหลายงานวิจัยพยายามนำเสนอความสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ เช่น Froude number ( $N^2 D/g$ ), Reynolds number, Sherwood number ( $k_L a D^2/D_{AB}$ ), Schmidt number ( $\mu_a/\rho D_{AB}$ ) ดังรูปที่ 2.10 เป็นต้น หรือในบางงานวิจัยวิเคราะห์ร่วมกับสัดส่วนของความเร็รรอบต่อความเร็รรอบที่ทำให้เกิดรูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สเป็น Complete Gas

Disperse ( $N_{CD}$ ) (Yawalkar et al. 2008) อย่างไรก็ตาม รูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการ 2.69 ถูกนิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากค่ากำลังต่อปริมาตรที่ของไหลได้รับเป็นตัวแปรหนึ่งสำหรับใช้วิเคราะห์การขยายขนาดของกระบวนการ ซึ่งสามารถใช้ความสัมพันธ์นี้เพื่อทำนายผลได้ง่าย

### 2.2.3.1. การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรจากแบบจำลอง

การทำแบบจำลองเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร จะวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรแยกกัน โดยพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง PBM ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.7 และทำนายค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรจากสมการ 2.70

$$a = \frac{6\varepsilon_G}{d_{32}} \quad \text{สมการ 2.70}$$

ในส่วนของการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในแบบจำลอง CFD นิยมใช้แบบจำลองจากวิธี Higbie's penetration (Higbie 1935) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในรูปความสัมพันธ์ค่า Turbulent dissipation rate,  $\varepsilon_L$  ร่วมกับการวิเคราะห์ Kolmogorov's length scale จะได้ดังสมการ 2.71

$$k_L = \frac{2}{\sqrt{\pi}} D_L^{0.5} \left( \frac{\rho_L \varepsilon_L}{\mu_L} \right)^{0.25} \quad \text{สมการ 2.71}$$

โดย  $D_L$  คือค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ ( $2.93 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )

แบบจำลองต่อมาคือแบบจำลองแบบ Eddy cell model ซึ่งเป็นการพิจารณาบนสมมติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนขึ้นกับอัตราการเกิดใหม่ของพื้นผิวจากการที่ฟองเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก small scale turbulent eddies (Kawase, Halard, and Moo-Young 1992) ร่วมกับการวิเคราะห์ Kolmogorov's length scale ได้ดังสมการ 2.72 โดยที่  $C_1$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.54 (Laakkonen et al. 2007)

$$k_L = C_1 D_L^{0.5} \left( \frac{\rho_L \varepsilon_L}{\mu_L} \right)^{0.25} \quad \text{สมการ 2.72}$$

(Calderbank 1958) นำเสนอความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนขึ้นกับขนาดของฟองเฉลี่ย และความเร็วสัมพัทธ์ของของเหลวกับฟอง (Slip velocity) ดังสมการ 2.73

$$k_L = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{D_L u_{slip}}{d_b} \right)^{0.5} \quad \text{สมการ 2.73}$$

(Alves et al. 2002) ได้นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนในความสัมพันธ์ของ bubble rigidity และพิจารณาที่สภาวะการไหลแบบราบเรียบได้ความสัมพันธ์ดังสมการ 2.74

$$k_L = 0.6 \left( \frac{u_{slip}}{d_b} \right)^{0.5} D_L^{2/3} \nu_L^{-1/6} \quad \text{สมการ 2.74}$$

ตัวอย่างการใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ 2.71 ถึงสมการ 2.74 ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนภายในระบบถังกวนแสดงดังตาราง 2.1 (Ranganathan and Sivaraman 2011) และ (Devi and Kumar 2017) ได้ทำการเปรียบเทียบการใช้ความสัมพันธ์ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนตามสมการ 2.71-สมการ 2.74 พบว่าแบบจำลองของ Eddy cell หรือสมการ 2.72 สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะใช้การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนด้วยแบบจำลองนี้



ตาราง 2.1 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนที่ได้จากการคำนวณ CFD กับผลการทดลอง

Author	T mm.	D mm.	Impeller	Element	Speed RPM	Aeration	Impeller Approach	Model	Drag model	$k_L$ Correlation	Gas phase Approach	$D_B$ mm.	$(k_L)_{SIM}$ $10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$	$(k_L)_{EXP}$ $10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$
(Gimbun, Rielly, and Nagy 2009)	260	86	RT	225k	700	0.7 W/m	MRF	k- $\epsilon$	Ishii and Zuber	Penetration	PBM QMOM	3.5	0.023 <sup>(a)</sup>	0.024 <sup>(a)</sup>
(Ranganathan and Sivaraman 2011)	292	98.7	DRT	200k	450	10 LPM	MRF	k- $\epsilon$	Schiller and Naumann with Brucato drag model	Penetration Slip velocity Eddy model	PBM MUSIG PBM MUSIG PBM MUSIG		0.986 0.275 0.341	0.319 0.319 0.319
(Rathore, Sharma, and Persad 2012)	125	76	PBT	850k	600	0.6 LPM	MRF	k- $\epsilon$	Schiller and Naumann with UDF $Re_p$	Penetration	PBM MUSIG	3	0.0174 <sup>(a)</sup>	0.0169 <sup>(a)</sup>
(Elqotbi et al. 2013)	185	62	RT	326k	300	1.3 W/m	MRF	k- $\epsilon$	Schiller and Naumann	Modified Eddy model	Fixed	2		0.017 <sup>(a)</sup>

ตาราง 2.1 (ต่อ) การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนที่ได้จากการคำนวณ CFD กับผลการทดลอง

Author	T mm.	D mm.	Impeller	Element	Speed RPM	Aeration	Impeller Approach	Model	Drag model	$k_L$ Correlation	Gas phase Approach	$D_B$ mm.	$(k_L)_{SIM}$ $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$(k_L)_{EXP}$ $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
(Sarkar et al. 2016)	600	200	RT	1.24m	50-300	2-6 W/m	MRF	k- $\epsilon$	Schiller and Naumann	Penetration	PBM MUSIG	4.82		$R^2 > 95\%$
(Devi and Kumar 2017)	292	97.3	DRT		450	0.0025 m/s	MRF	k- $\epsilon$	Schiller and Naumann	Penetration	Fixed	2	1.574	0.319
										Eddy model	Fixed	2	0.558	0.319
										Slip velocity	Fixed	2	2.411	0.319
										Rigidity	Fixed	2	0.457	0.319
(Amer, Feng, and Ramsey 2019)	380	228	PBT	1.48m	50-150	0.02-0.1 W/m	MRF	k- $\epsilon$	Schiller and Naumann	Penetration	PBM MUSIG	0.88		$R^2 = 0.8896$

RT=Rushton Turbine, PBT=Pitch Blade Turbine, DRT=Dual Rushton Turbine, and (a) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร( $s^{-1}$ )

#### 2.2.4. พลังงานที่ใช้ภายในถังกวนแบบป้อนอากาศ

จากสมการ 2.69 กำลังต่อปริมาตรภายในถังกวนเป็นตัวแปรที่ถูกพิจารณาเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในระบบ และมักใช้เพื่อเป็นหนึ่งในเงื่อนไขในการขยายขนาดของถังหมัก อย่างไรก็ตาม กำลังของถังกวนขึ้นกับคุณสมบัติของสารภายในระบบ สภาวะการดำเนินการ และ รูปร่างและขนาดของถังหมักรวมถึงจำนวนและชนิดของใบพัด นอกจากนี้ สำหรับระบบที่มีการป้อนแก๊ส รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สยังส่งผลต่อกำลังของระบบด้วย (Taghavi et al. 2011)

สำหรับถังกวนหลายใบพัดที่มีสารหนึ่งวัฏภาค ระยะห่างระหว่างกันถึงถึงใบพัดใบล่าง ระยะระหว่างใบพัด และระยะจากผิวของสารถึงใบพัดใบบนสุดจะส่งผลต่อกำลังที่ใช้ในถังกวน โดยสัดส่วนระยะของใบพัดที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้รูปแบบการไหลต่างกัน สำหรับถังกวนที่ติดตั้งใบปั่นกวน Dual Rushton Turbine จะสร้างรูปแบบการไหลแบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ Diverging flow, Merging flow, และ Parallel flow (Rutherford et al. 1996) ซึ่งทำให้กำลังแตกต่างกันในแต่ละรูปแบบการไหล ในระบบที่ระยะจากผิวของสารถึงใบพัดใบบนสุดมีค่าน้อยจนทำให้อากาศวนเข้าสู่ระบบจะทำให้กำลังที่ใช้ลดลง อย่างไรก็ตาม ความสูงของของเหลวไม่ส่งผลต่อกำลังที่ใช้ในถังกวน ในกรณีที่ไม่มีอากาศวนเข้าสู่ระบบ (Armenante and Chang 1998)

สำหรับถังกวนหลายใบพัดที่มีสารสองวัฏภาคระบบน้ำ และอากาศ จะใช้กำลังน้อยกว่าระบบที่มีของเหลวเพียงสารเดียว นอกจากนี้ รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สส่งผลต่อกำลังที่ใช้ในแนวโน้มที่ต่างกันไปขึ้นกับสัดส่วนของถัง และสภาวะการดำเนินการ (Hudcova, Machon, and Nienow 1989) รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.1.2.4 การทำนายรูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สในถังที่มีหลายใบพัดสำหรับใบล่างสุดสามารถใช้สมการ 2.3 และสมการ 2.4 ในการทำนายเป็นเกณฑ์เบื้องต้นได้ ส่วนใบพัดใบอื่น ๆ จะใช้ความเร็วรอบการหมุนที่ต่ำกว่าเพื่อให้เกิดลักษณะการไหลของวัฏภาคแก๊สแบบเดียวกัน การทำนายกำลังที่เกิดขึ้นในถังกวนสารสองวัฏภาคน้ำ และอากาศ ได้ถูกนำเสนอในหลายความสัมพันธ์ โดยจะอยู่ในรูปของสัดส่วนกำลังที่ใช้เมื่อมีการป้อนอากาศต่อกำลังที่ใช้ในการปั่นกวนของเหลวเพียง ซึ่งมีความเหมาะสมแตกต่างกันไปตามระบบ และขอบเขตการดำเนินการ ตัวอย่างความสัมพันธ์แสดงดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ตัวอย่างความสัมพันธ์ทำนายกำลังที่ใช้ในถังกวนแบบป้อนอากาศ (Fitschen et al. 2019)

Correlation		Remark
$\frac{P_G}{P_0} = 1 - 12.6Fl_G, Fl_G < 0.035$	สมการ 2.75	$Fl_G = \frac{q_G}{nD^3}$
$\frac{P_G}{P_0} = 0.62 - 1.85Fl_G, Fl_G > 0.035$	สมการ 2.76	
$\log\left(\frac{P_G}{P_0}\right) = -192\left(\frac{D}{T}\right)^{4.38} \left(\frac{\rho D^2 n}{\eta}\right)^{0.115} Fr^{1.96\left(\frac{D}{T}\right)} Fl_G$	สมการ 2.77	
$\frac{P_G}{P_0} = 0.497Fl_G^{-0.38} \left(\frac{\rho D^3 n^2}{\sigma}\right)^{-0.18}$	สมการ 2.78	
$\frac{P_G}{P_0} = 0.0312Fr^{-0.16} Re^{0.064} Fl_G^{-0.38} \left(\frac{D}{T}\right)^{0.8}$	สมการ 2.79	$V \leq 30 m^3,$ $1.8 \leq D/T \leq 3.7$
$\frac{P_G}{P_0} = 0.1 \left(\frac{q_G}{nV}\right)^{-0.25} \left(\frac{n^2 D^4}{gwV^{2/3}}\right)^{-0.2}$	สมการ 2.80	$V \leq 51 m^3,$ $u_G \leq 0.053 m s^{-1}$
$P_G = 1.224 \left(\frac{P_0^2 n D^3}{q_G^{0.56}}\right)^{0.432}$	สมการ 2.81	Dual Rushton turbine system

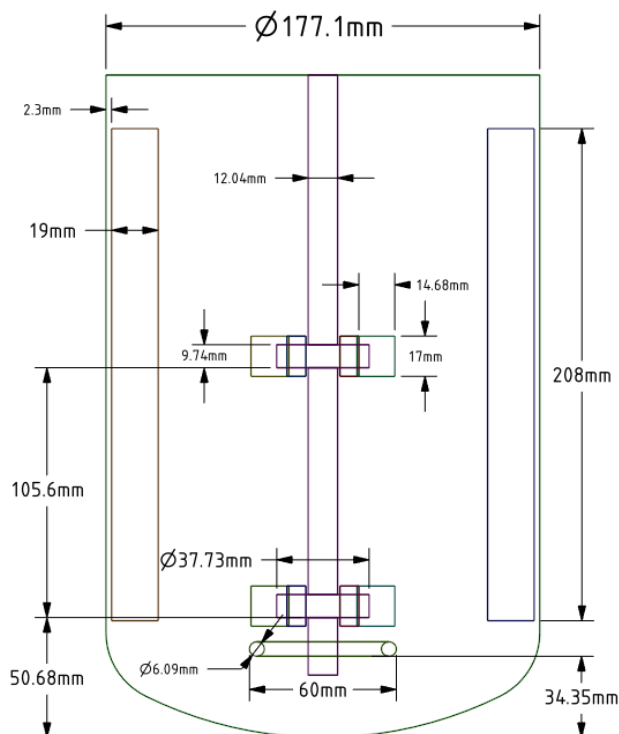
## บทที่ 3

### การทำวิจัย

#### 3.1. แผนการดำเนินงาน

##### 3.1.1. แผนการทำแบบจำลอง

การทำแบบจำลอง แบ่งออกเป็นสองส่วน คือแบบจำลองห้บการสอบเทียบค่ากับผลการทดลอง และแบบจำลองสำหรับศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนภายในถังกวน ประกอบด้วยระยะห่างระหว่างใบปั่นกวน และระดับความสูงของวัฏภาคน้ำ ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนภายในระบบ ซึ่งเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงในการขยายขนาดจริงจากการทดลอง ขนาดของถังกวนสำหรับสอบเทียบแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยใบพัดชนิดรัศมี 2 ใบพัด, ตัวกระจายอากาศ, และบัพเฟิล 4 ใบแบบไม่สมมาตร และสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนภายในถังกวน กรณีศึกษาของแบบจำลองแสดงดังตาราง 3.1 แผนการทำกรณีศึกษาของแบบจำลองถังกวน



รูปที่ 3.1 ขนาดถังกวนที่ใช้ในการทำแบบจำลอง

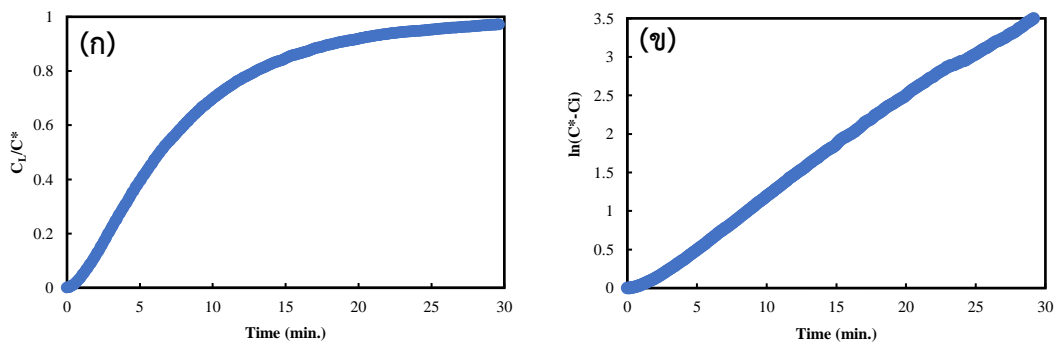
ตาราง 3.1 แผนการทำกรณีสึกษาของแบบจำลองกึ่งวาน

Operating conditions						
Case	No.	Volume Liter	Agitator speed RPM	Aeration rate LPM	Parameter Study mm.	Remark
Validation	V1	5.11	300	2.55	-	
	V2	5.11	400	2.55	-	
	V3	5.11	500	2.55	-	
	V4	5.11	400	5.11	-	
	V5	5.11	400	7.66	-	
Changing Impeller spacing	S1	5.11	400	7.66	105.6	S:D=1.8, case V5
	S2	5.11	400	7.66	94.0	S:D=1.6
	S3	5.11	400	7.66	88.1	S:D=1.5
	S4	5.11	400	7.66	58.7	S:D=1.0
Changing Liquid height	H1	3.75	363	7.66	160	H:T=0.9
	H2	5.11	400	7.66	216	H:T=1.2, case S2
	H3	6.30	430	7.66	264	H:T=1.5
	H4	7.59	459	7.66	317	H:T=1.8

### 3.1.2. แผนการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร ใช้วิธี Dynamic method โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

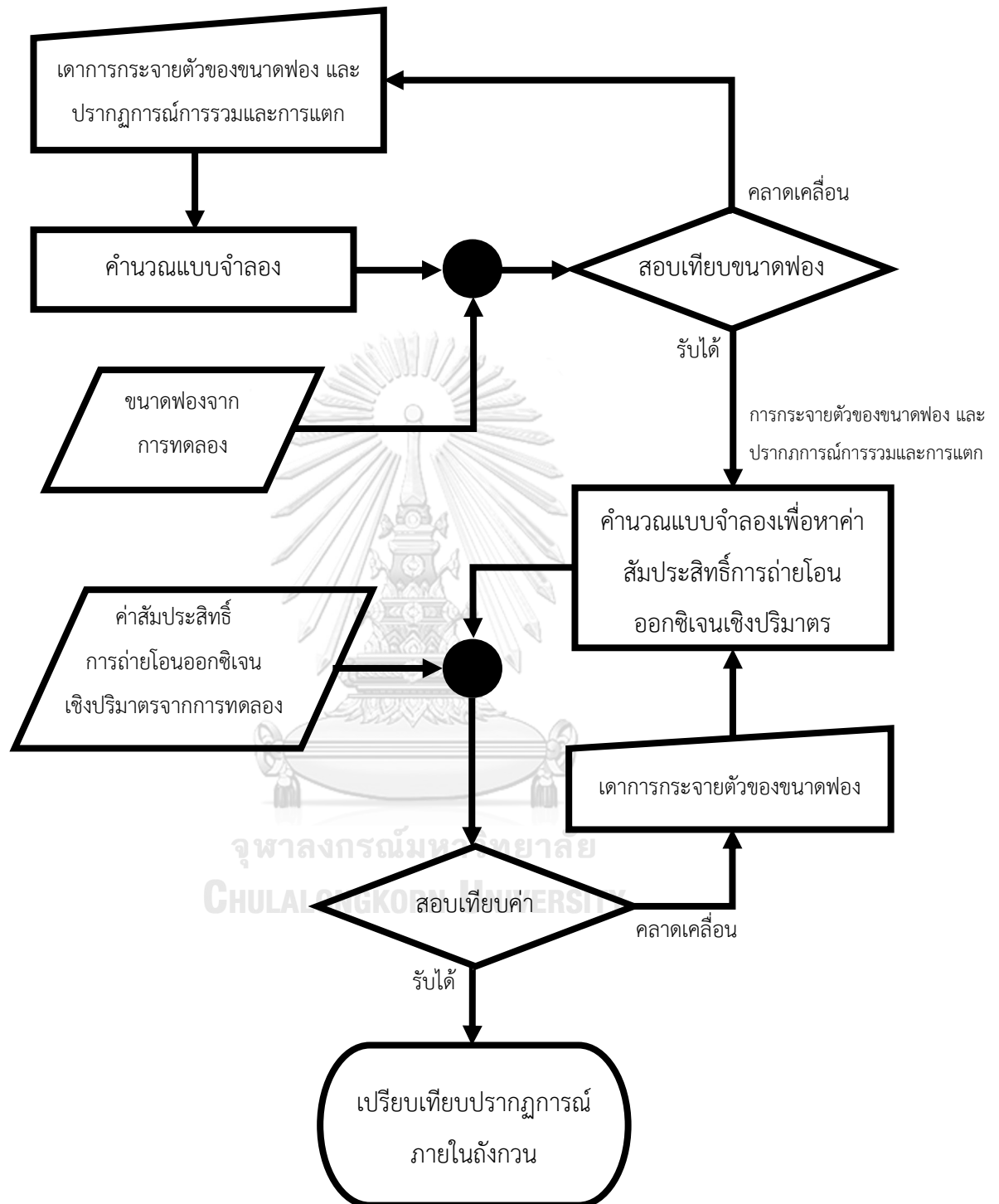
1. ป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ กระทั่งค่าการละลายของออกซิเจนลดลงจนคงที่ กำหนดให้ค่าดังกล่าวเป็นค่า 0% Oxygen Saturation
2. ป้อนออกซิเจนเข้าสู่ระบบ วัดค่าออกซิเจนที่ละลายอยู่ในของเหลวทุก ๆ 5 วินาที จนกระทั่งมีค่าคงที่ กำหนดให้เป็นค่า 100% Oxygen Saturation การเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 3.2 (ก)
3. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนในของเหลวด้วยสมการ 2.12 โดยการสร้างกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(C_{AL}^* - C_{AL})$  กับเวลา จะได้ของกราฟดังแสดงในรูปที่ 3.2(ข) โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรจะมีค่าเท่ากับความชันในช่วงที่เป็นเส้นตรงของกราฟ



รูปที่ 3.2 ผลการวัดโดยวิธี Dynamic method (ก) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนที่

ละลายในของเหลวต่อเวลา (ข) ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

### 3.1.3. แผนการสอบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ





### 3.2. ขั้นตอนการทำวิจัย

สำหรับการสร้างแบบจำลองการไหลด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre-processing), การคำนวณ (Processing), กระบวนการหลังการคำนวณ (Post-processing) ซึ่งกระบวนการทั้งหมดทำในโปรแกรม Ansys 2019 R3 มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1. กระบวนการก่อนคำนวณ

##### 3.2.1.1. การวาดรูปสามมิติ

ในการคำนวณ CFD จำเป็นต้องกำหนดรูปร่างของระบบที่เราต้องการศึกษา ซึ่งส่งผลต่อเงื่อนไขขอบเขต และลักษณะการไหล

##### 3.2.1.2. การพิจารณาปริมาตรของระบบ

ในการวาดรูป 3 มิติเพื่อใช้ในการคำนวณนั้น รูป 3 มิติดังกล่าวต้องเป็นตัวแทนเฉพาะส่วนที่เราต้องการศึกษา ในงานวิจัยนี้สนใจที่การไหล และการกระจายตัวของสารในแต่ละภูมิภาคที่เกิดจากการหมุนของใบปั่นกวภายในถังกวน ดังนั้นปริมาตรของระบบที่ศึกษาคือของไหลภายในถังกวน โดยกำหนดให้ใบปั่นกว, แกนหมุน, ตัวกระจายอากาศ, และอุปกรณ์อื่น ๆ ภายในถังกวนที่เป็นของแข็งพิจารณาเป็นขอบเขตกำแพง (Wall boundary) ในการคำนวณ และเนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ หรือการหมุนขึ้นในระบบ แบบจำลองจึงต้องแบ่งระบบออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เกิดการหมุน (Rotating domain) ซึ่งเป็นส่วนที่ครอบคลุมบริเวณใบปั่นกวทั้งหมด โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนที่เกิดการหมุนอยู่กึ่งกลางระหว่างระยะของใบพัดถึง Baffle มีความสูงไม่เกินสองเท่าของความกว้างของใบพัด (Coroneo et al. 2011) และส่วนที่หยุดนิ่ง (Stational domain) ซึ่งประกอบไปด้วย แกนหมุน, Baffle, ตัวกระจายอากาศ และอุปกรณ์อื่น ๆ ในถังกวน

##### 3.2.1.3. การสร้างปริมาตรควบคุม

การสร้างปริมาตรควบคุม ในงานวิจัยนี้สร้างโดยโปรแกรม Ansys Meshing 2019 R3 ซึ่งเป็นการแบ่งปริมาตรที่พิจารณาทั้งหมดออกเป็นปริมาตรควบคุมส่วนย่อย (Mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณการถ่ายเทฟลักซ์จากปริมาตรควบคุมหนึ่งสู่ปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดกัน ในกรณีของการไหลเน้นการศึกษาการถ่ายเทฟลักซ์โมเมนตัม และอินทิเกรตคำนวณขนาด และทิศทางของความเร็ว (Versteeg and Malalasekera 2007) โดยวิธีการสร้างปริมาตรควบคุม แบ่งออกเป็นสองวิธี คือ Structured mesh เป็นการสร้างปริมาตรควบคุมเป็นรูปร่างทรงสี่เหลี่ยม (Hexahedral) และ

Unstructured mesh สร้างปริมาตรควบคุมเป็นรูปร่างพีระมิดฐานสามเหลี่ยม หรือทรงสี่หน้า (Tetrahedral) และเป็นปริซึมในบางบริเวณที่เป็นกำแพง

### 3.2.1.3.1. กระบวนการ Sweep (Sweep Method)

กระบวนการ Sweep เป็นกระบวนการหนึ่งในการสร้างปริมาตรควบคุมในโปรแกรม Ansys Meshing สำหรับการสร้างปริมาตรควบคุมให้เป็นทรงสี่เหลี่ยม โดยมีเงื่อนไขในการสร้างคือ รูปทรงใด ๆ ต้องสามารถสร้างปริมาตรควบคุมที่มีหน้าตัดของรูปทรงนั้นเป็นรูปแบบเดียวกันในแนวใดแนวหนึ่งตลอดทั้งรูปทรง ยกตัวอย่าง ในกรณีของถังกั้นแบน ระบบสามารถสร้างปริมาตรควบคุมที่ฐานของถังกั้นตามความสูงของถังขึ้นไปได้จนถึงด้านบนของถัง อย่างไรก็ตาม ในส่วนที่เกิดการหมุนหน้าตัดของปริมาตรควบคุมมีลักษณะไม่เหมือนกับหน้าตัดกั้นถัง ดังนั้น ในระบบที่รูปทรงมีความซับซ้อน จำเป็นต้องแบ่งรูปทรงออกเป็นหลายส่วน เพื่อสร้างปริมาตรควบคุมด้วยวิธีการนี้ แต่ในบริเวณที่รูปทรงมีความซับซ้อนมาก ๆ เช่นบริเวณใบปั่นกวน กระบวนการ sweep ทำได้ยาก ดังนั้น ในการสร้างปริมาตรควบคุมของงานวิจัยนี้ พิจารณาการสร้างปริมาตรควบคุมโดยกระบวนการ Sweep เพื่อสร้างปริมาตรควบคุมรูปทรงสี่เหลี่ยม ส่วนที่ไม่สามารถใช้กระบวนการ Sweep ได้จะพิจารณาสร้างปริมาตรควบคุมเป็นทรงสี่หน้า หรือปริซึมตามความซับซ้อนของรูปทรงนั้น ๆ

### 3.2.2. การคำนวณ

ขั้นตอนการคำนวณ เป็นการตั้งค่าในโปรแกรม Ansys Fluent 2019 R3 และการดำเนินการถูกดำเนินการด้วยวิธี Multiple Reference Frame รายละเอียดการตั้งค่ามีดังต่อไปนี้

#### 3.2.2.1. คุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในแบบจำลอง

ในระบบที่พิจารณา ประกอบไปด้วย น้ำ และอากาศ โดยมีคุณสมบัติแสดงดังตาราง 3.2

ตาราง 3.2 คุณสมบัติของไหลที่ใช้ในแบบจำลอง

ของไหล	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	ความหนืด (Pa.s)	แรงตึงผิว (N/m)
น้ำ	994	$7.2\text{e-}4$	0.0704
อากาศ	1.146	$1.9\text{e-}5$	

### 3.2.2.2. การกำหนดแบบจำลอง Population balance

การใช้แบบจำลอง Population balance แบบ Method of class ในการอธิบายปรากฏการณ์การรวม และการแตกของฟอง จำเป็นต้องกำหนดตัวแทนของขนาดฟองทั้งหมดภายในระบบ โดยการกำหนดขนาดฟองเล็กที่สุดภายในระบบ ( $d_{b,i=0}$ ) อัตราการขยายของปริมาตร ( $k$ ) และจำนวนกลุ่มของฟองที่มีภายในระบบ ( $i=1, 2, \dots, n$ ) มีความสัมพันธ์ดังสมการ 3.1

$$d_{b,i+1}^3 = 2^k \cdot d_{b,i}^3 \quad \text{สมการ 3.1}$$

โดยทั่วไปในระบบถังกวนที่มีการป้อนอากาศ ขนาดของฟองอากาศเฉลี่ยภายในระบบควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 4 มิลลิเมตร (Doran 2013) อย่างไรก็ตาม จากการทดลองวัด และเปรียบเทียบของขนาดฟองเริ่มต้นที่ออกจากตัวกระจายอากาศ พบว่ามีขนาดเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนอากาศ ดังสมการ 3.2 (Jamialahmadi et al. 2001) พบว่ามีขนาดฟองที่เกิดขึ้นใหญ่กว่า 4 มิลลิเมตร ดังนั้นในการกำหนดขนาดฟองในระบบ จึงต้องสร้างให้มีขนาดครอบคลุมขนาดฟองที่เกิดขึ้นทั้งหมดภายในระบบ โดยขนาดฟองที่ใช้ แสดงดังตาราง 3.3 กำหนด  $F_A$ , และ  $F_B$  จากสมการ 2.50 และสมการ 2.58 เป็น 0.7, และ 1.0 ตามลำดับ

$$\frac{d_{b,0}}{d_o} = \left[ \frac{5.0}{BD_o^{1.08}} + \frac{9.261Fr^{0.36}}{Ga^{0.39}} + 2.147Fr^{0.51} \right]^{1/3} \quad \text{สมการ 3.2}$$

โดย  $d_{b,0}$  คือ ขนาดฟองเริ่มต้นที่ออกจากตัวกระจายอากาศ

$d_o$  คือ ขนาดรูขาออกของตัวกระจายอากาศ

$BD_o$  คือ Bond number  $\left( \frac{g\rho_L d_o^2}{\sigma} \right)$

$Fr$  คือ Froude number  $\left( \frac{u_{r0}^2}{gd_o} \right)$

$Ga$  คือ Galileo number  $\left( \frac{g\rho_L^2 d_o^3}{\mu_L^2} \right)$

ตาราง 3.3 ขนาดฟองที่พิจารณาภายในแบบจำลอง PBM

Bin	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$d_i$ (mm.)	0.50	0.66	0.87	1.15	1.52	2.00	2.64	3.48	4.59	6.06	8.00	10.56	13.93

### 3.2.2.3. เงื่อนไขขอบเขต

ตาราง 3.4 รายละเอียดเงื่อนไขขอบเขตภายในระบบ

ขอบเขตกำแพงภายในระบบ	รายละเอียด
พื้นผิวรูตัวกระจายอากาศ	ขอบเขตทางเข้า (Mass Flow Inlet) เป็นทางเข้าของอากาศเข้าสู่ระบบ มีความเร็วเท่ากับความเร็วต่อหน้าตัดรูตัวกระจายอากาศที่อัตราป้อนอากาศนั้น ๆ
ผนังด้านบนถึงกวน	ขอบเขตทางออก (Pressure outlet) เป็นทางออกของอากาศ และมีอากาศไหลกลับได้
ผนังของถึงกวน	ขอบเขตกำแพงหยุดนิ่ง (Stationary wall) และไม่มีการลื่นไถล (No-slip condition)
แกนหมุน	ขอบเขตกำแพงเคลื่อนที่ (Moving wall) มีความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วรอบการปั่นกวน
Baffle	ขอบเขตกำแพงหยุดนิ่ง (Stationary wall) และไม่มีการลื่นไถล (No-slip condition)
ใบปั่นกวน	ขอบเขตกำแพงเคลื่อนที่ (Moving wall) มีความเร็วเชิงมุมเท่ากับความเร็วรอบการปั่นกวน

### 3.2.2.4. Discretization Scheme และอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณ

เนื่องจากแบบจำลอง CFD เป็นการคำนวณการถ่ายโอนในแต่ละปริมาตรควบคุม ดังนั้นกระบวนการคำนวณปริมาณการถ่ายโอนของตัวแปรใด ๆ หรือกระบวนการคำนวณฟลักซ์จึงเป็นอีกหนึ่งสิ่งที่มีผลกระทบต่อความเสถียร และความแม่นยำของแบบจำลอง Discretization Scheme เป็นรูปแบบการคำนวณปริมาตรฟลักซ์ที่ถ่ายโอนผ่านพื้นผิวของปริมาตรควบคุมใด ๆ แบ่งได้เป็นสองประเภท คือ first order upwind ซึ่งเป็นการเฉลี่ยค่าระหว่างสองปริมาตรควบคุมที่ติดกันเพื่อคำนวณฟลักซ์ที่ถ่ายโอนผ่านพื้นผิวสัมผัสที่ติดกัน และ higher order upwind จะเป็นการเฉลี่ยค่าโดยน้ำหนักระหว่างสองปริมาตรควบคุมที่ติดกันเพื่อคำนวณฟลักซ์ที่ถ่ายโอนผ่านพื้นผิวสัมผัสที่ติดกัน (Coroneo et al. 2011) ทำการศึกษาผลของ Discretization Scheme ต่อผลการคำนวณ พบว่าการใช้ higher order upwind ทำให้ผลการคำนวณแบบจำลองเกิดการคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบ first order upwind แต่ใช้เวลาในการคำนวณนานกว่า จากการทดลองเปรียบเทียบผลของการใช้ Discretization Scheme พบว่าการใช้ higher order upwind ในการคำนวณผลของฟลักซ์โมเมนตัม และสัดส่วนโดยปริมาตร เพียงพอที่จะทำให้ผลการทำแบบจำลองมีค่าเทียบเท่ากับการใช้ higher order upwind ทุกตัวแปร Discretization Scheme และอัลกอริทึมสำหรับใช้งานวิจัยนี้ แสดงดังตาราง 3.5

ตาราง 3.5 Discretization Scheme และอัลกอริทึมที่ใช้ในแบบจำลอง

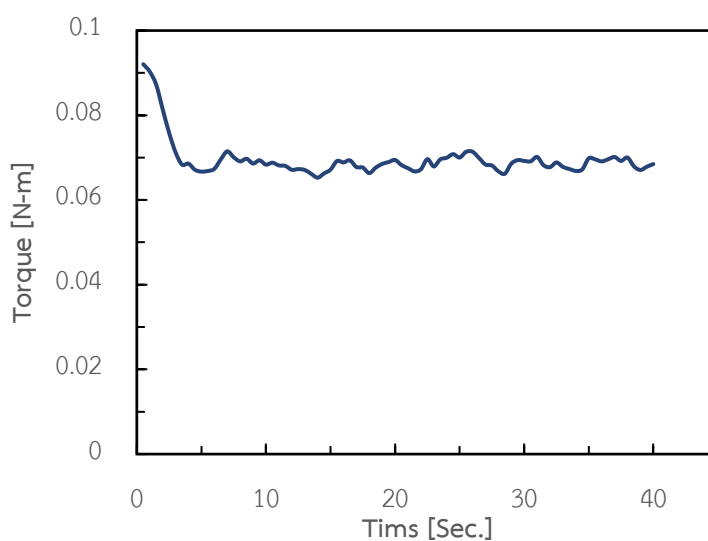
PV coupling Scheme	PC-SIMPLE
Spatial Discretization	
Gradient	Green Gauss Node Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second Order Upwind
Volume Fraction	Modified HRIC
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
air Bin	First Order Upwind

### 3.2.2.5. ค่าเริ่มต้น

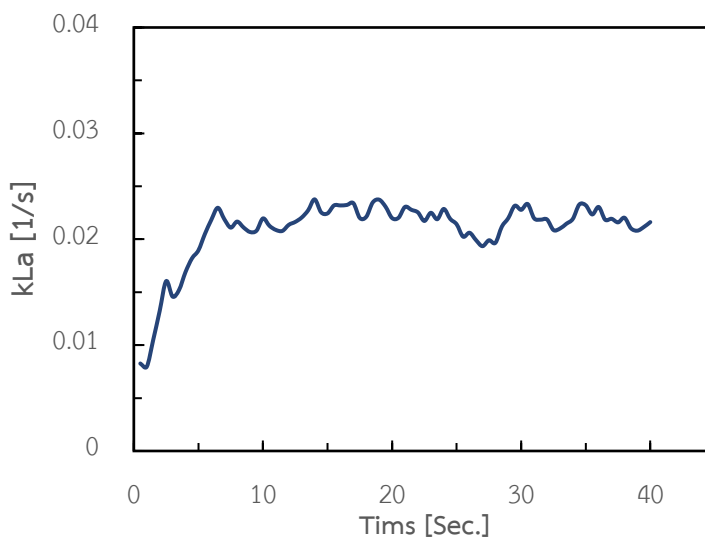
ในการคำนวณการหมุน ค่าเริ่มต้นถูกกำหนดด้วยวิธี Hybrid initialize ซึ่งเป็นการคำนวณผลลัพธ์เบื้องต้นตามค่าเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดก่อนการเริ่มคำนวณจริงจำนวน  $n$  รอบตามที่กำหนด ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามเงื่อนไขขอบเขต อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเร็วเริ่มต้นของวัตถุภาคแก๊สมีค่าสูงเกินค่าผลลัพธ์สุดท้าย ภายหลังจากการทำ Hybrid initialized จึงต้องปรับค่าความเร็วของวัตถุภาคแก๊สให้มีค่าเป็น 0

### 3.2.2.6. การหยุดการคำนวณ

ในการหยุดการคำนวณ พิจารณาจากค่าของแรงบิด และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร ต้องมีแนวโน้มคงที่ หรือแกว่งจากค่ากลางอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ค่าที่สนใจเริ่มมีแนวโน้มคงที่ที่ 15 วินาทีของการคำนวณ อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ค่าคงที่อาจมีค่าต่างกันในแต่ละแบบจำลอง



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงแรงบิดของใบพัดต่อเวลา



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมต่อเวลา

### 3.2.3. กระบวนการหลังการคำนวณ

#### 3.2.3.1. การแสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรของระบบ

ในการแสดงผลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมที่คำนวณได้จากการทำแบบจำลองเพื่อสอบเทียบกับค่าจากการทดลอง จะใช้ค่าเฉลี่ยเชิงปริมาตรจากส่วนที่ทั้งสองภูมิภาคกระจายอยู่ด้วยกัน คำนวณได้ดังสมการ 3.3 นอกจากนี้ ตัวแปรอื่นที่ต้องการศึกษาจะใช้วิธีเดียวกันนี้ ในการนำเสนอผลการคำนวณ ประกอบไปด้วย พื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตร และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{1}{V} \int k_L a \, dV = \sum (k_L a)_i |V_i|$$

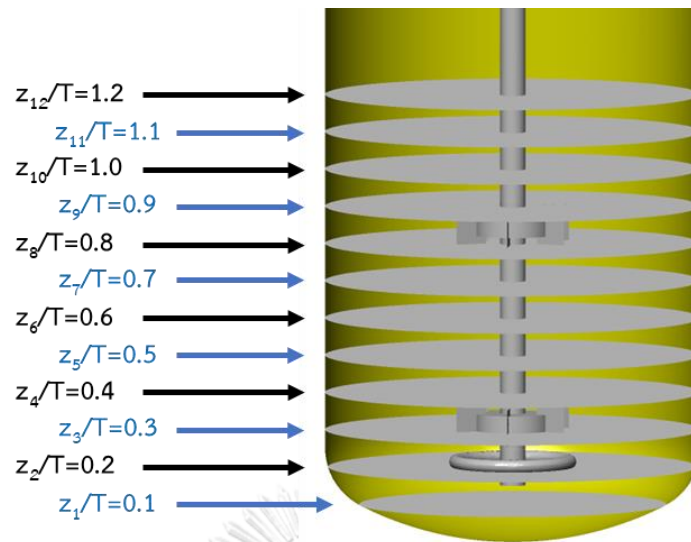
สมการ 3.3

#### 3.2.3.2. การแสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่

การแสดงผลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองเพื่อศึกษาพลศาสตร์ภายในระบบของถังกวน จะใช้ค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่ดังสมการ 3.4 ที่ระดับความสูง และระยะห่างตามแนวรัศมีดังในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ โดยจะใช้กระบวนการดังกล่าวนี้ในการคำนวณค่าเฉพาะที่ของตัวแปรที่ต้องการศึกษาด้วย

$$\frac{1}{A} \int k_L a \, dA = \sum (k_L a)_i |A_i|$$

สมการ 3.4



รูปที่ 3.5 พื้นที่สำหรับใช้คำนวณค่าเฉลี่ยตามระดับความสูง



รูปที่ 3.6 ระยะตามแนวรัศมีสำหรับคำนวณค่าเฉลี่ยเฉพาะที่



## บทที่ 4

### ผลการจำลองการไหลของถังกวนสารสองวัฏภาคน้ำ-อากาศ และการสอบเทียบกับการทดลอง

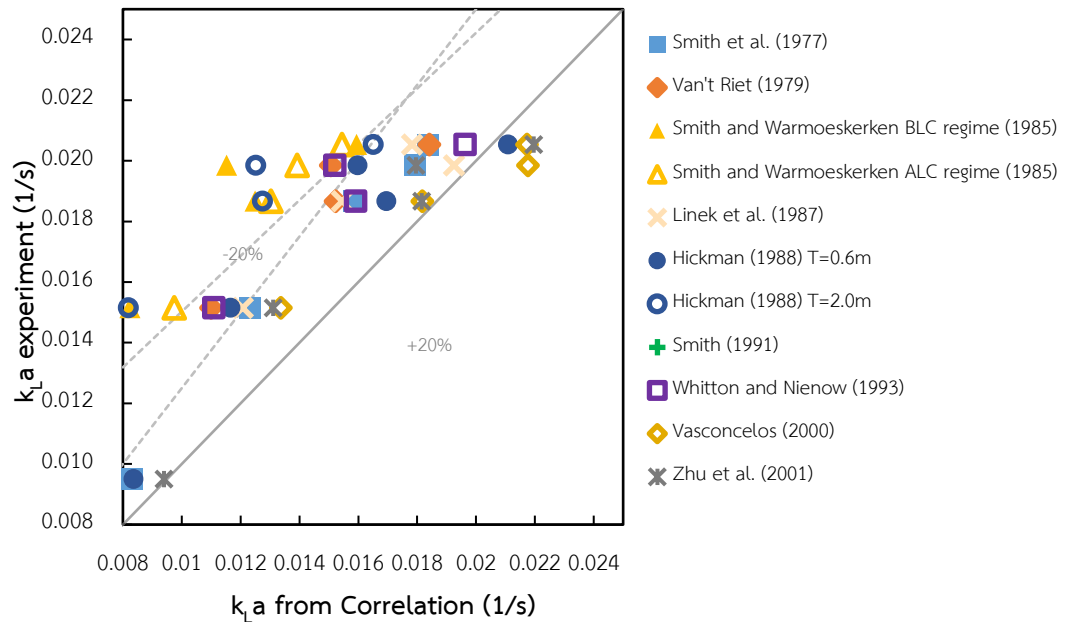
#### 4.1. ผลการทดลอง

##### 4.1.1. การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร

ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรของระบบ แสดงดังตาราง 4.1 โดยมีเงื่อนไขในการดำเนินการตามกรณีศึกษา V1 ถึง V5 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของผลการทดลองนั้นเป็นไปตามทฤษฎีตั้งสมการ 2.69 อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองดังกล่าว เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ถูกนำเสนอมาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนมากเกินกว่ายอมรับได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 หากนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการขยายขนาด อาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นในการเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างใบปั่นกวน และความสูงของน้ำในระบบ จำเป็นสร้างแบบจำลองขึ้นเพื่อให้มีความเหมาะสมกับระบบของถังกวนที่ใช้ เพื่อลดโอกาสการเกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทำแบบจำลอง

ตาราง 4.1 ผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร

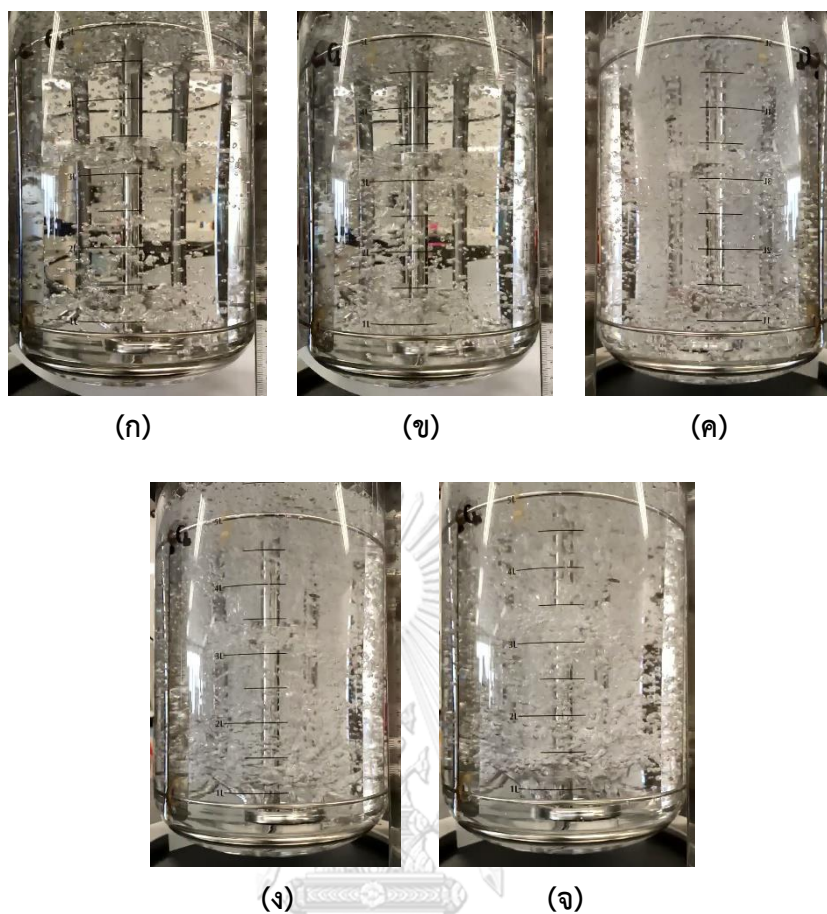
Case	No.	Overall volumetric mass transfer coefficient (1/s)	SD (1/s)
Validation	V1	0.0090	0.0017
	V2	0.0155	0.0016
	V3	0.0199	0.0011
	V4	0.0196	0.0016
	V5	0.0217	0.0051



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากการทดลองกับค่าจากแบบจำลอง

#### 4.1.2. รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สในถังกวน

รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สที่สังเกตได้จากการดำเนินการตามกรณีศึกษา V1 ถึง V5 แสดงดังรูปที่ 4.2 (ก)-(จ) ตามลำดับ พบว่า เมื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขการจำแนกรูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สตามสมการ 2.3 และสมการ 2.4 แสดงดังตาราง 4.2 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำนายสภาวะการไหลที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากในถังกวนที่ประกอบด้วยใบปั่นกวนมากกว่า 1 ใบ ความเร็วในการปั่นกวนของใบพัดอื่นจะมีค่าน้อยกว่าใบปั่นกวนใบล่าง เพื่อให้เกิดรูปแบบการไหลลักษณะเดียวกัน (Taghavi et al. 2011) ดังนั้น ที่สภาวะการดำเนินการดังกล่าว ความเร็วในการปั่นกวนมีค่ามากกว่าความเร็วปั่นกวนขั้นต่ำของใบปั่นกวนใบล่างสุดที่ทำให้เกิดรูปแบบการไหลแบบ Loading Regime จึงสามารถใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในการทำนายผลได้



รูปที่ 4.2 รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สที่สังเกตได้จากการทดลอง  
(ก) กรณี V1, (ข) กรณี V2, (ค) กรณี V3, (ง) กรณี V4, (จ) กรณี V5

ตาราง 4.2 รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเทียบกับรูปแบบการไหลจากสมการ 2.3 และสมการ 2.4

กรณีศึกษา	Fr	$Fl_G$	รูปแบบการไหลจากความสัมพันธ์	รูปแบบการไหลที่สังเกตได้
V1	0.149	0.042	Loading	Loading
V2	0.265	0.032	Loading	Loading
V3	0.415	0.025	Complete gas disperses	Complete gas disperses
V4	0.265	0.063	Loading	Loading
V5	0.265	0.095	Loading	Loading

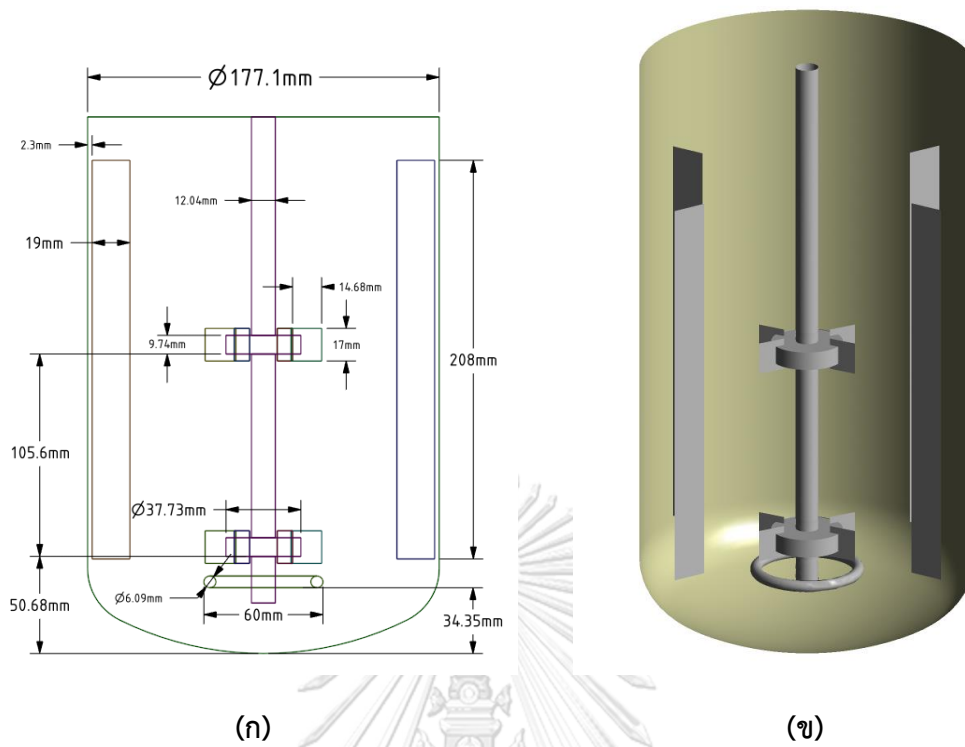
## 4.2. ผลการสร้างปริมาตรควบคุม และการสอบเทียบแบบจำลองการไหลของกังวน

### 4.2.1. รูปร่างและขนาดของกังวน

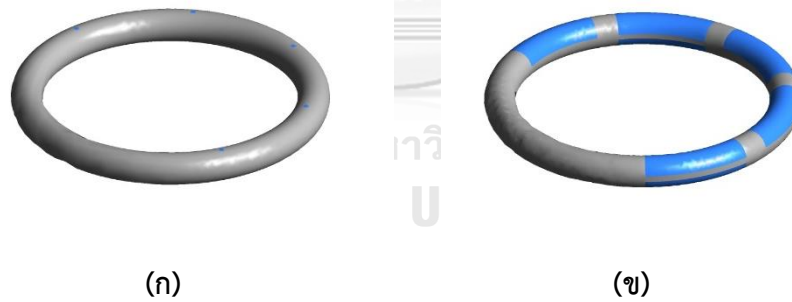
กังวนต้นแบบที่ใช้ในการทดลองนั้น เป็นกังวนสำหรับกระบวนการหมัก ดังนั้น ภายในกังวน นอกจากอุปกรณ์ทั่วไป จำพวก ใบพัด, บัฟเฟิล, และ ตัวกระจายอากาศ แล้ว ยังมีการติดตั้ง เครื่องมือวัดต่าง ๆ อยู่ภายในด้วย เช่น เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในวัฏภาคของเหลว, เครื่องวัดค่า pH, ท่อสำหรับเก็บตัวอย่าง เป็นต้น

เพื่อลดความซับซ้อนในการทำแบบจำลอง รูปทรงกังวนของกังวนจะไม่พิจารณาอุปกรณ์ หรือเครื่องมือวัดอื่น ๆ ในแบบจำลองด้วย ผลของการพิจารณาพลศาสตร์ของกังวนที่มีการติดตั้ง เครื่องมือวัด และแบบไม่ติดตั้งเครื่องมือวัดได้ถูกศึกษาไว้แล้วโดย (Dendee 2018) โดยผลของการ ติดตั้งเครื่องมือวัด ทำให้ค่าแรงบิดของใบพัดมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้งเครื่องมือวัดเล็กน้อย และ ทำให้ความเร็วภายในระบบลดลง เนื่องจากมีการขัดขวางของเครื่องมือวัด อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีค่าน้อยมาก จึงสามารถละเลยได้ว่าไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ รูปร่าง และขนาด ของกังวนสำหรับแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.3

เนื่องจากข้อจำกัดทางทรัพยากร และเงื่อนไขของโปรแกรม Ansys Fluent 2019 R3 จำเป็นต้องมีการปรับปรุงรูปทรงของตัวกระจายอากาศโดยการเปลี่ยนรูปร่างของรูขาออกจากรูป วงกลมเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่ผิวขาออกมากขึ้น และมีความเร็วขาเข้าของอากาศลดลง ดังรูปที่ 4.4 เพื่อให้สามารถทำแบบจำลองการไหลได้ภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว และเพื่อให้การ คำนวณพลศาสตร์การไหลบริเวณใกล้กับบริเวณรูของตัวกระจายอากาศ ซึ่งเป็นเงื่อนไขขอบเขตขาเข้า ของการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ ให้มีความเหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงพลศาสตร์ภายในปริมาตร ควบคุมตามค่า CFL ในสมการ 2.68 โดยผลของการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของตัวกระจายอากาศกับผล การทำแบบจำลองถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.2



รูปที่ 4.3 (ก) ขนาดของถังกวน และ (ข) รูปทรงของถังกวนที่ถูกสร้างเพื่อใช้ในแบบจำลอง



รูปที่ 4.4 (ก) ตัวกระจายอากาศดั้งเดิม และ (ข) ตัวกระจายอากาศที่ปรับปรุง

#### 4.2.2. ผลการสร้างปริมาตรควบคุม

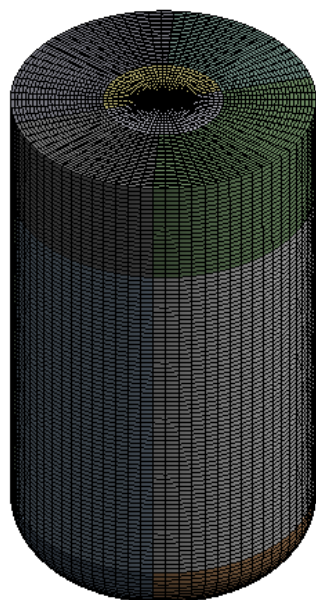
การคำนวณพลศาสตร์การไหลเป็นการใช้วิธี Finite Volume เพื่อแก้สมการ Navier-Stoke และสมการของแบบจำลองอื่น ๆ ภายในระบบ การสร้างปริมาตรควบคุม (Control Volume, Mesh) เป็นการแบ่งปริมาตรของระบบที่สนใจออกเป็นส่วนย่อย ๆ และอินทิเกรตสมการที่เกี่ยวข้องภายในปริมาตรควบคุมหนึ่ง ๆ นั้น ในการทำแบบจำลอง CFD ขนาดของปริมาตรควบคุมเป็นหนึ่งในตัวแปรที่จำเป็นต้องศึกษาก่อนจะนำไปใช้เพื่อทำนายระบบที่สนใจ เนื่องจากหากปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้นไม่มีคุณภาพ หรือมีขนาดที่ละเอียดไม่เพียงพอ จะส่งผลให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ควรจะเป็น การเปรียบเทียบความละเอียดของปริมาตรควบคุมจึงจำเป็นต้องศึกษาเพื่อทดสอบว่าผลการจำลองการไหลนั้น ไม่ขึ้นกับความละเอียดของปริมาตรควบคุมแล้ว โดยในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาที่ตัวแปร ค่าแรงบิดของใบพัด, ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน, ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตร, และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร โดยค่าที่นำมาศึกษาจะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยโดยปริมาตรภายในถังกวน การปรับปริมาตรควบคุมแสดงดัง จากตัวอย่างของปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ารูปแบบของปริมาตรควบคุมแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบ คือ ทรงสี่เหลี่ยม (Structured Mesh) และรูปทรงอื่น (Unstructured Mesh) เช่นรูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยม หรือ ฐานสี่เหลี่ยม โดยการสร้างปริมาตรควบคุมนั้นถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่เกิดการหมุน และส่วนที่หยุดนิ่ง ในส่วนที่เกิดการหมุน หรือบริเวณใบพัด รูปทรงมีความซับซ้อน ปริมาตรควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นจะมีลักษณะเป็นแบบ Unstructured Mesh ในส่วนหยุดนิ่ง ซึ่งประกอบด้วยบริเวณรอบนอกถัง บัพเฟิล หรือบริเวณแกนหมุน ซึ่งรูปทรงไม่มีความซับซ้อน จะสร้างปริมาตรควบคุมแบบ Structured Mesh ยกเว้นบริเวณตัวกระจายอากาศ ซึ่งรูปทรงมีความซับซ้อน จะสร้างปริมาตรควบคุมเป็นแบบ Unstructured Mesh นอกจากนี้ ปริมาตรควบคุมแบบ Structured Mesh มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความเร็ว และความแม่นยำในการคำนวณมากกว่าด้วย (Marshall and Bakker 2003)

ตาราง 4.3 โดยการปรับขนาดที่บริเวณพื้นผิวส่วนสำคัญที่มักส่งผลกระทบต่อระบบอย่างมีนัยยะสำคัญ ได้แก่ บริเวณ ใบพัด, บัฟเฟิล, ตัวกระจายอากาศ, และผนังของถังกวน และการปรับขนาดใหญ่ที่สุดในระบบ ตัวอย่างของปริมาตรควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.5

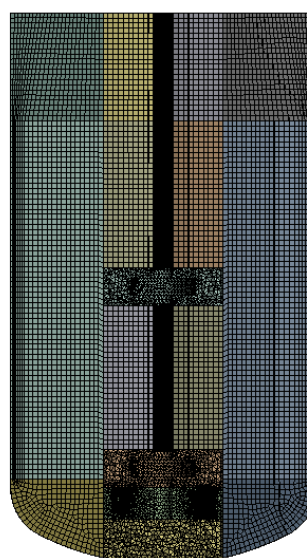
จากตัวอย่างของปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ารูปแบบของปริมาตรควบคุมแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบ คือทรงสี่เหลี่ยม (Structured Mesh) และรูปทรงอื่น (Unstructured Mesh) เช่นรูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยม หรือ ฐานสี่เหลี่ยม โดยการสร้างปริมาตรควบคุมนั้นถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่เกิดการหมุน และส่วนที่หยุดนิ่ง ในส่วนที่เกิดการหมุนหรือบริเวณใบพัด รูปทรงมีความซับซ้อน ปริมาตรควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นจะมีลักษณะเป็นแบบ Unstructured Mesh ในส่วนหยุดนิ่ง ซึ่งประกอบด้วยบริเวณรอบนอกถัง บัฟเฟิล หรือบริเวณแกนหมุน ซึ่งรูปทรงไม่มีความซับซ้อน จะสร้างปริมาตรควบคุมแบบ Structured Mesh ยกเว้นบริเวณตัวกระจายอากาศ ซึ่งรูปทรงมีความซับซ้อน จะสร้างปริมาตรควบคุมเป็นแบบ Unstructured Mesh นอกจากนี้ ปริมาตรควบคุมแบบ Structured Mesh มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความเร็ว และความแม่นยำในการคำนวณมากกว่าด้วย (Marshall and Bakker 2003)

ตาราง 4.3 การกำหนดขนาดการสร้งปริมาตรควบคุมของถังกวน

ตำแหน่งที่ปรับปริมาตรควบคุม	ขนาด (มิลลิเมตร) และจำนวนปริมาตรควบคุมทั้งหมด				
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรก ที่ติดกับใบพัด	2	2	2	2	2
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรก ที่ติดกับ Baffle	5	4	3	2.5	2
ขนาดของปริมาตรควบคุมบริเวณ รูขาออกตัวกระจายอากาศ	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรก ที่ติดกับผนังของถังปั่นกวน	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของปริมาตรควบคุม	5	4	3	2.5	2
จำนวนของปริมาตรควบคุม ( $\times 10^3$ )	267	478	832	1129	1653



(ก)

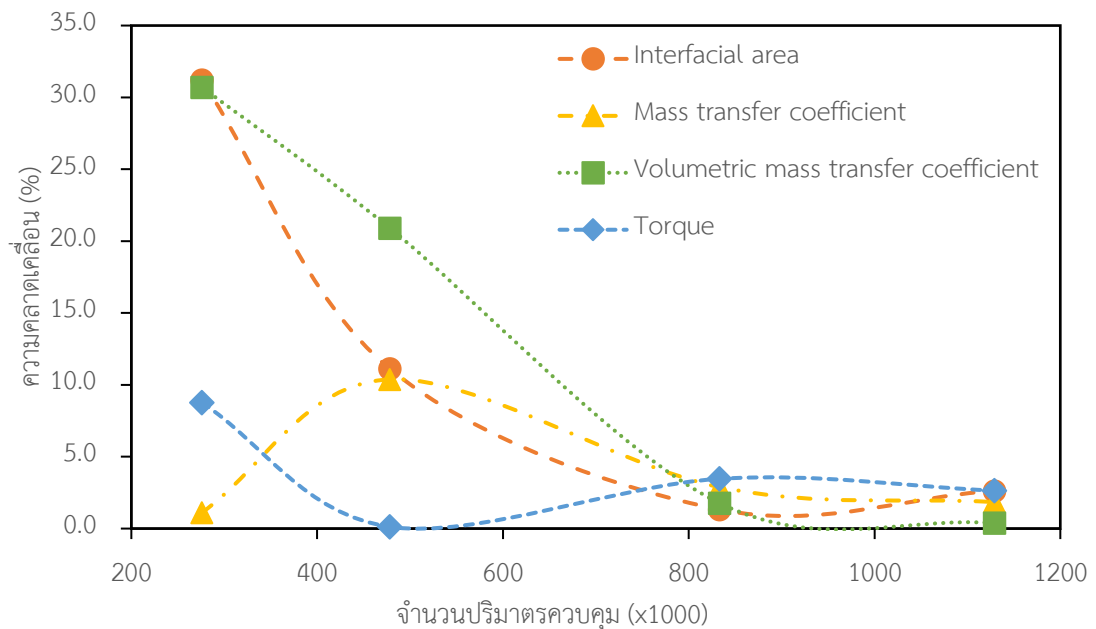


(ข)

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้น จำนวนปริมาตรควบคุมทั้งหมด 831691



การศึกษาความผลกระทบของความละเอียดของปริมาตรควบคุมใช้สภาวะการดำเนินการตามเงื่อนไขในกรณี V1 (300 RPM, 2.55LPM) ในตาราง 3.1 โดยกำหนดให้ขนาดฟองของอากาศภายในระบบคงที่ที่ 0.2 มิลลิเมตร และใช้ Spatial Discretization เป็น First order ทั้งหมด ผลการศึกษาผลกระทบของความละเอียดของปริมาตรควบคุมต่อตัวแปรที่ต้องการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยค่าต่าง ๆ ถูกนำเสนอในรูปแบบของความคลาดเคลื่อนของค่าเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากความละเอียดถัดไป จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับจำนวนปริมาตรควบคุมจนถึง 832k เป็นต้นไป มีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะใช้การกำหนดค่าสำหรับการสร้างปริมาตรควบคุมตามขนาดของแบบจำลองที่มีปริมาตรควบคุม 832k เป็นตัวแทนของระบบ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของความละเอียดของปริมาตรควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ต้องการศึกษา

เนื่องจากปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้นมีจำนวนทั้งหมด 832k ซึ่งเกินข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีข้อจำกัดอยู่ที่ 512k ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงรูปทรงเพื่อลดจำนวนปริมาตรควบคุมไม่ให้เกินข้อจำกัด โดยการปรับปรุงรูปทรงของตัวกระจายอากาศ การเปลี่ยนแปลงรูปทรงตัวกระจายอากาศนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรควบคุมทั้งระบบน้อยมาก เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของปริมาตรควบคุมแค่บริเวณของรูขาออกของอากาศที่พื้นผิวตัวกระจายอากาศเท่านั้น โดยการกำหนดค่าสำหรับการสร้างปริมาตรควบคุมแสดงดังตาราง 4.4 และจากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวกระจายอากาศต่อตัวแปรที่ต้องการศึกษา แสดงดังตาราง 4.5 จะเห็นได้ว่า ค่าที่คำนวณได้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้รูปทรง และปริมาตรควบคุมดังกล่าวเป็นตัวแทนของระบบในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลสำหรับงานวิจัยนี้ได้ นอกจากนี้ การกำหนดขนาดปริมาตรควบคุมดังกล่าว จะถูกใช้ในการสร้างปริมาตรควบคุมสำหรับกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดภายในถังกวนอีกด้วย

ตาราง 4.4 การกำหนดขนาดการก่อสร้างปริมาตรควบคุมของถังกวนที่มีการปรับปรุงตัวกระจายอากาศ

ตำแหน่งที่ปรับปริมาตรควบคุม	ขนาด (มิลลิเมตร)	
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับใบพัด	2	2
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับ Baffle	3	3
ขนาดของปริมาตรควบคุมบริเวณรูขาออกตัวกระจายอากาศ	1	0.1
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับผนังของถังปั่นกวน	0.77	0.77
ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของปริมาตรควบคุม	3	3
จำนวนของปริมาตรควบคุม ( $\times 10^3$ )	480	832

ตาราง 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงตัวกระจายอากาศต่อตัวแปรที่ต้องการศึกษา

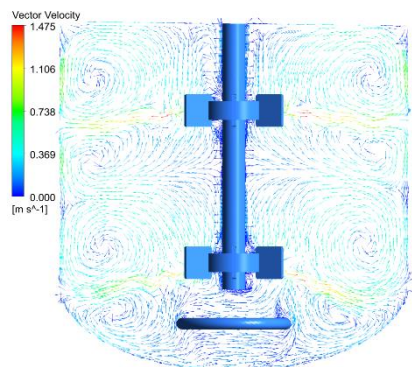
เงื่อนไขการดำเนินการ	รูปทรง	ค่าพื้นที่	ค่าสัมประสิทธิ์	ค่าสัมประสิทธิ์	แรงบิด
		ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตร	การถ่ายโอนออกซิเจน	การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร	
		$m^2/m^3$	$m/s$	$1/s$	$N\cdot m$
การดำเนินการทดสอบที่ 1	ตัวกระจายอากาศดั้งเดิม	59.85	$2.65 \times 10^{-4}$	0.0174	0.041
	ตัวกระจายอากาศปรับปรุง	59.53	$2.73 \times 10^{-4}$	0.0174	0.042
	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	-0.5	3.0	0.0	2.9
การดำเนินการทดสอบที่ 2	ตัวกระจายอากาศดั้งเดิม	78.46	$2.65 \times 10^{-4}$	0.0252	0.030
	ตัวกระจายอากาศปรับปรุง	77.95	$2.35 \times 10^{-4}$	0.0244	0.033
	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	-0.7	-11.6	-3.0	10.3

### 4.2.3. การสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง

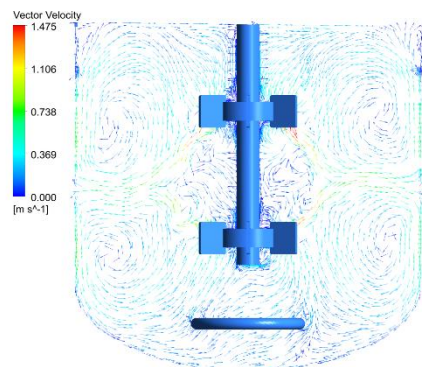
#### 4.2.3.1. การสอบเทียบรูปแบบการไหล

##### 4.2.3.1.1. ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลในระบบวิศวกรรมน้ำ

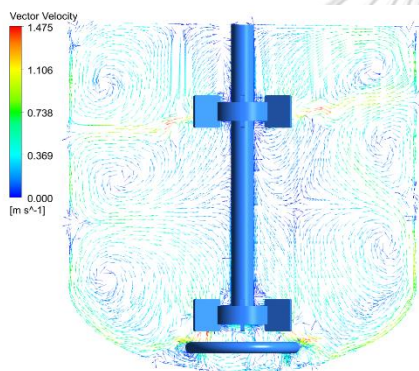
สำหรับใบป้อนกวนรัทเทอร์ฟอร์ดไบน์ จะสร้างรูปแบบการไหลแบบ Radial Flow เป็นหลัก สำหรับระบบที่ประกอบไปด้วยใบป้อนกวนมากกว่า 1 ใบ รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างใบพัด ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ Parallel flow, Merging flow, และ Diverging flow ดังรูปที่ 4.7(ก) - (ค) ตามลำดับ โดยรูปแบบการไหลที่จะเปลี่ยนไปตามระยะระหว่างใบป้อนกวน (Rutherford et al. 1996) ได้ทำการศึกษาเงื่อนไขของระยะระหว่างใบป้อนกวนที่ทำให้เกิดรูปแบบการไหลทั้งสามรูปแบบ อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขดังกล่าวนั้น ถูกพัฒนาขึ้นในระบบถังกวนที่มีลักษณะฐานเป็นแบบก้นเรียบ (Flat Bottom) ซึ่งอาจส่งผลให้การเปรียบเทียบรูปแบบการไหลกับถังกวนที่มีลักษณะฐานต่างกันมีความคลาดเคลื่อนได้ Dendee, 2018 ได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลจากการเปลี่ยนระยะระหว่างใบพัดของถังกวนที่มีการติดตั้งใบป้อนกวนแบบรัทเทอร์ฟอร์ดไบน์คู่ และลักษณะของถังกวนรูปแบบคล้ายกับถังกวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยระยะที่ถูกศึกษาเพื่อทำให้เกิดการไหลในลักษณะต่าง ๆ เปรียบเทียบกับลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากการทำแบบจำลองของลักษณะถังกวนที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังตาราง 4.6 โดยระยะ C1, C2, C3, และ T แทนระยะห่างระหว่างใบป้อนกวนใบล่างสุดกับก้นถัง, ระยะระหว่างสองใบป้อนกวน, ระยะระหว่างใบป้อนกวนใบบนถึงพื้นผิวน้ำ, และเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน ตามลำดับ จากรูปที่ 4.7(ง) รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นเริ่มมีลักษณะเป็นแบบ Parallel flow แต่รอบการหมุนของใบป้อนกวนใบล่างสุดยังไม่แยกออกอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาที่ค่า Power number จะเห็นได้ว่า ค่าที่คำนวณได้อยู่ระหว่างค่า Power number ของลักษณะการไหลแบบ Diverging flow และ Parallel flow ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของรูปแบบการไหลที่เป็นเสมือนช่วงการเปลี่ยนรูปแบบการไหลจาก Diverging flow เป็นแบบ Parallel flow ซึ่งเหตุการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากขนาดที่ต่างกันของลักษณะก้นถังกวน ความเร็วรอบที่ต่างกัน และความสูงของของเหลวที่ต่างกัน (Mahmoudi S.M. 1992)



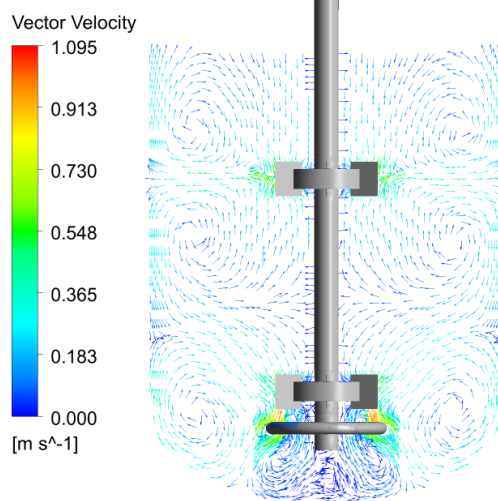
(ก)



(ข)



(ค) ภาลลกรณัฒมหาวิทยาลัย



(ง)

รูปที่ 4.7 รูปแบบการไหลของถังกวนระบบบริษัททอนเทอร์ไบน์คู่

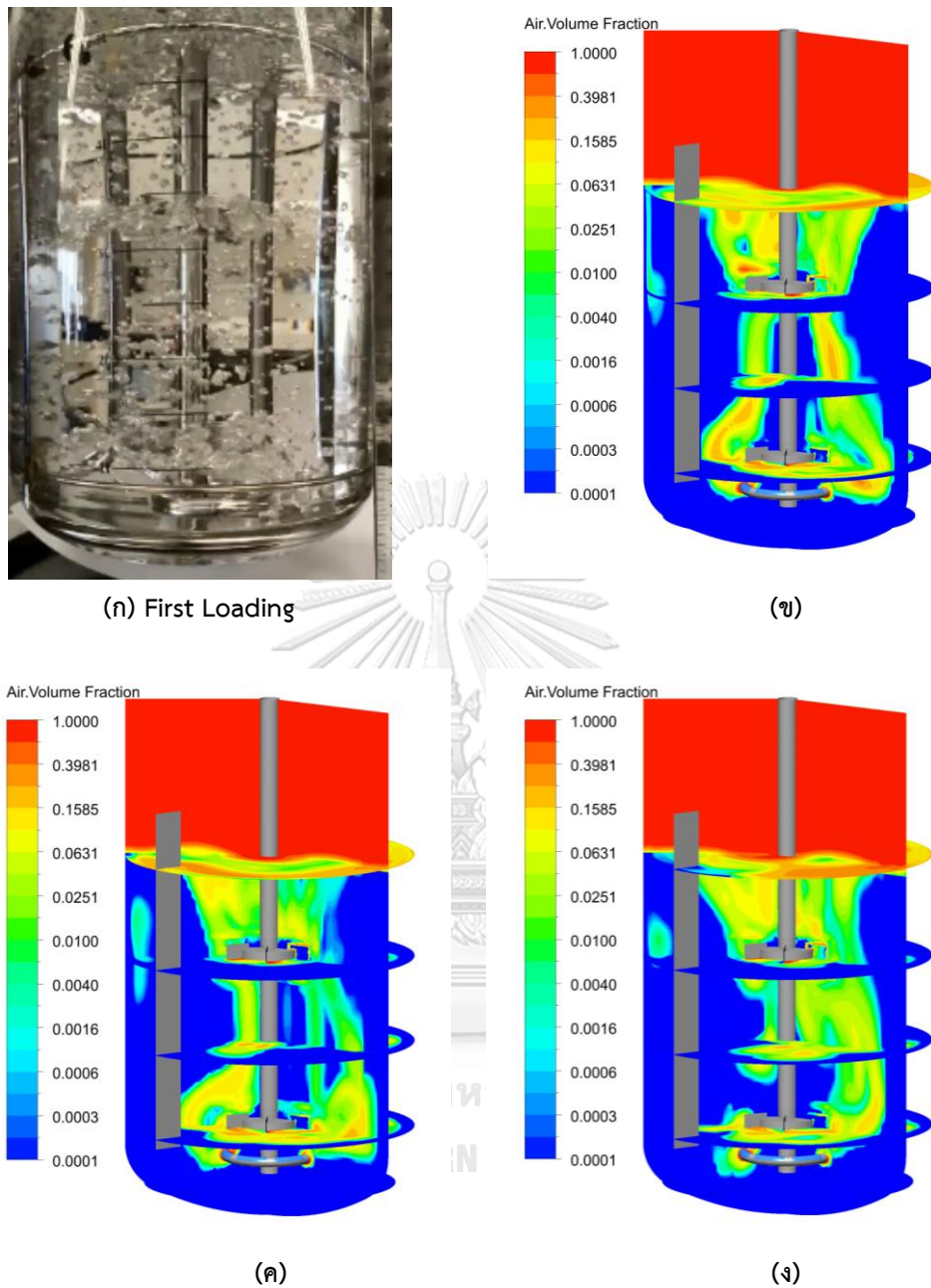
(ก) Parallel flow, (ข) Merging flow, (ค) Diverging flow (Dendee 2018), (ง) ถังกวนของงานวิจัยนี้

ตาราง 4.6 รูปแบบการไหล และค่า Power number ในถึงกวนที่มีระยะระหว่างใบปั่นกวนต่างกัน

ระยะห่างระหว่างใบปั่นกวน	รูปแบบการไหล	ค่า Power Number	อ้างอิง
$C1/T = 0.313, C2/T = 0.437$	Parallel flow	10.17	(Dendee 2018)
$C1/T = 0.387, C2/T = 0.362$	Merging flow	7.88	(Dendee 2018)
$C1/T = 0.150, C2/T = 0.585$	Diverging flow	8.61	(Dendee 2018)
$C1/T = 0.315, C2/T = 0.596$	Diverging flow	9.77	ถึงกวนของงานวิจัยนี้

#### 4.2.3.1.2. ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลในระบบวัฏภาคน้ำ-อากาศ

รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สที่ได้จากการทำแบบจำลอง เปรียบเทียบกับรูปแบบการไหลที่สังเกตได้จากการทดลองที่กรณีศึกษา V1 ถึง V5 แสดงดังรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.12 ตามลำดับ โดยการพิจารณาคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในระบบที่เวลาต่าง ๆ กัน พบว่าลักษณะการไหลที่คำนวณได้จากแบบจำลองสามารถแสดงลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจริงในการทดลองได้เป็นอย่างดี จากรูปที่ 4.8 การกระจายตัวของวัฏภาคแก๊สมีลักษณะเริ่มกระจายออก แต่ยังไม่ทั่วทั้งถึงกวน ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า First Loading คือ วัฏภาคแก๊สเริ่มกระจายตัวออกจากบริเวณแกนหมุน ต่อมา จากรูปที่ 4.9, รูปที่ 4.11, และรูปที่ 4.12 การกระจายตัวของวัฏภาคแก๊สมีลักษณะเป็นแบบ Second Loading กล่าวคือ ใบปั่นกวนสามารถกระจายวัฏภาคแก๊สออกไปได้ทั่วทั้งถึงกวน แต่ยังไม่เกิดการวนกลับมาที่บริเวณก้นถึง ซึ่งแบบจำลองสามารถทำนายลักษณะการกระจายได้ตามรูปแบบที่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง และจากรูปที่ 4.10 ที่สภาวะการดำเนินการนี้ เกิดรูปแบบการกระจายตัวของวัฏภาคแก๊สแบบ Complete Gas Disperses ซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่ต้องการให้เกิดมากที่สุด เนื่องจากสามารถกระจายแก๊สไปได้ทั่วทั้งถึง รวมถึงบริเวณก้นถึงด้วย เนื่องจากความเร็วของน้ำมีค่ามากพอที่จะทำให้แก๊สเกิดการหมุนเวียนขึ้นภายในระบบ ซึ่งแบบจำลองสามารถทำนายการหมุนเวียนของแก๊สที่เกิดขึ้นในระบบได้ ดังแสดงในรูป รูปที่ 4.10(ข)-(ง) จะเห็นว่าภาพคอนทัวร์ที่บริเวณก้นถึงมีแก๊สกระจายตัวอยู่เช่นกัน



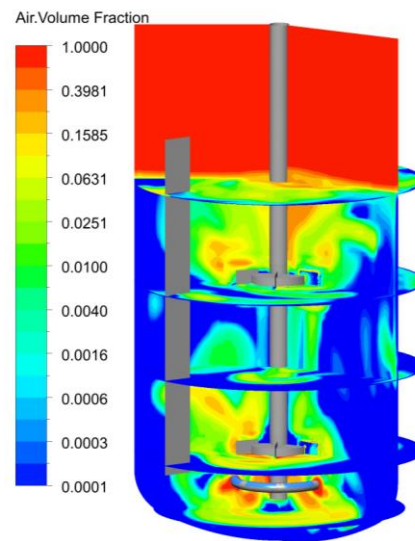
รูปที่ 4.8 รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สที่สภาวะการดำเนินการ V1 (300RPM, 2.55 LPM)

(ก) สังเกตจากการทดลอง, (ข)-(ง) ภาพคอมพิวเตอร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

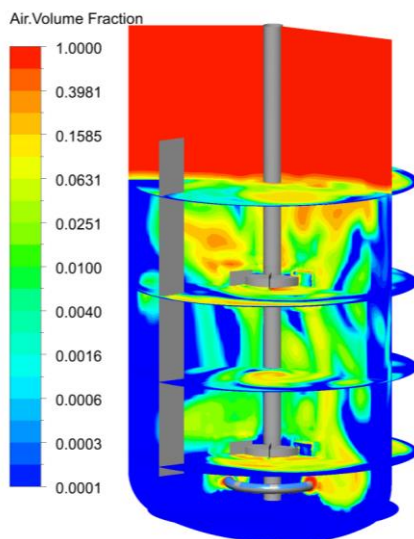




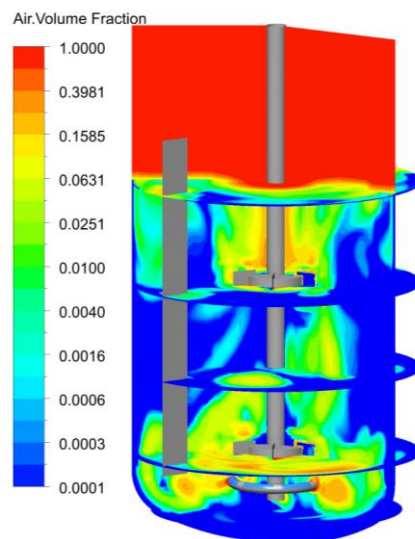
(ก) Second Loading



(ข)



(ค)



(ง)

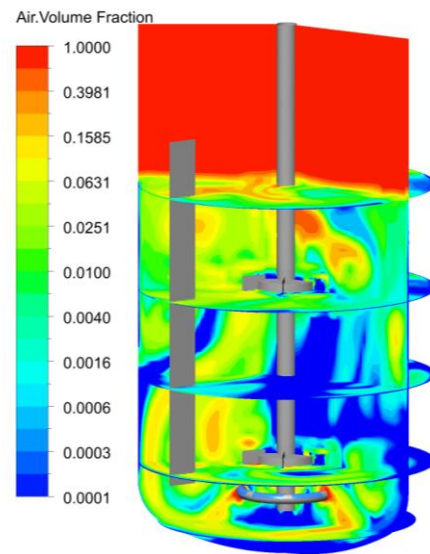
รูปที่ 4.9 รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สที่สภาวะการดำเนินการ V2 (400RPM, 2.55 LPM);

(ก) สังเกตจากการทดลอง, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

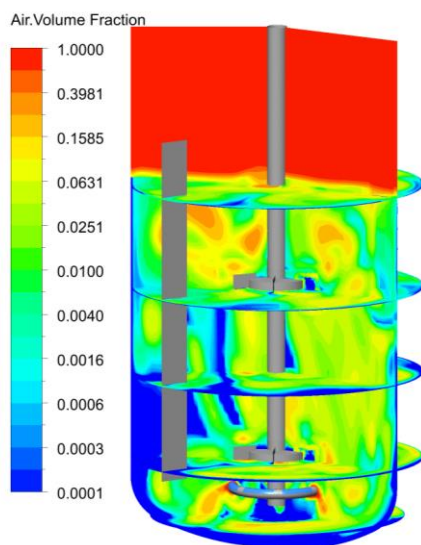




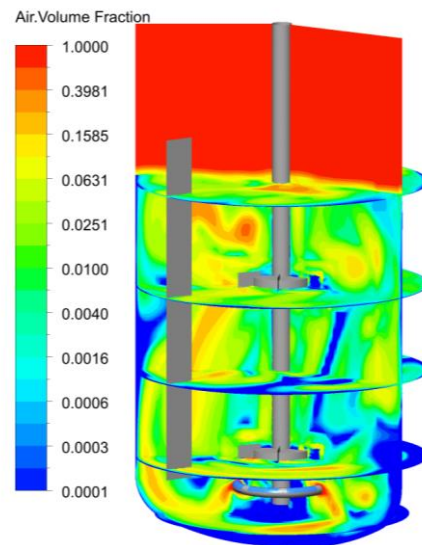
(ก) Completely Gas Disperse



(ข)



(ค)



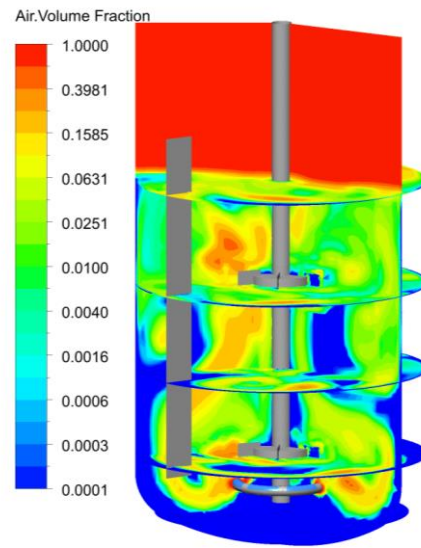
(ง)

รูปที่ 4.10 รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สที่สภาวะการดำเนินการ V3 (500RPM, 2.55 LPM)

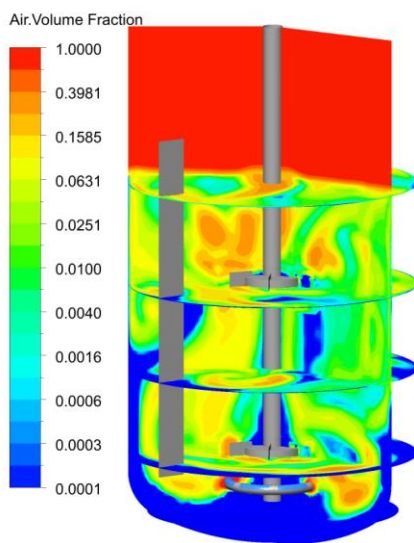
(ก) สังเกตจากการทดลอง, (ข)-(ง) ภาพคอมพิวเตอร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



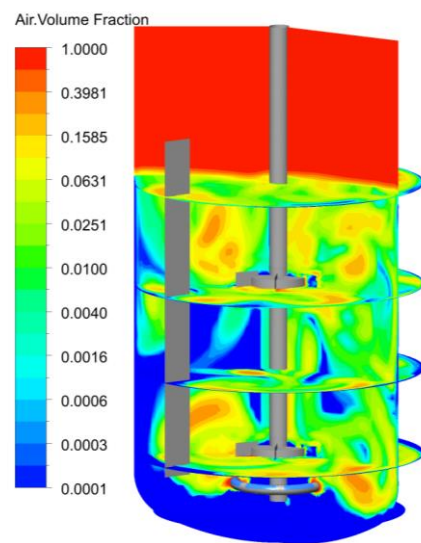
(ก) Second Loading



(ข)



(ค)



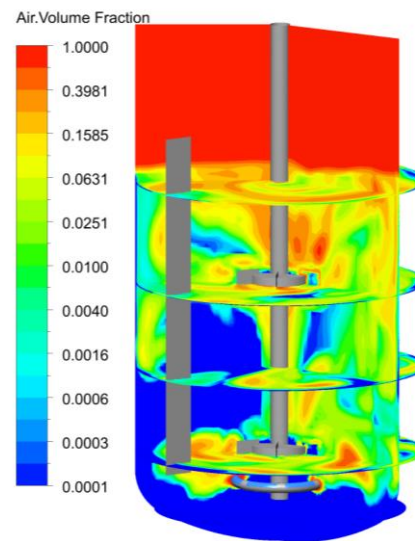
(ง)

รูปที่ 4.11 รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สที่สภาวะการดำเนินการ V4 (400RPM, 5.11 LPM)

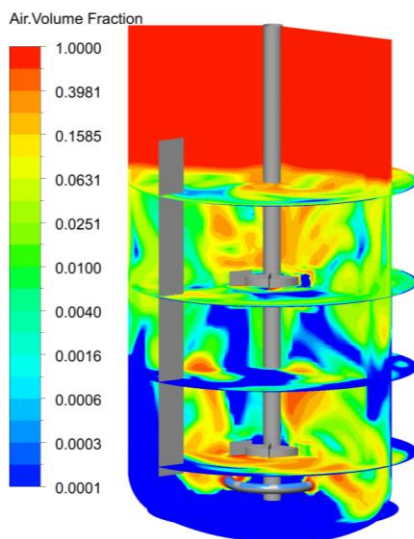
(ก) สังกะยจากการทดลอง, (ข)-(ง) ภาพคอมพิวเตอร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



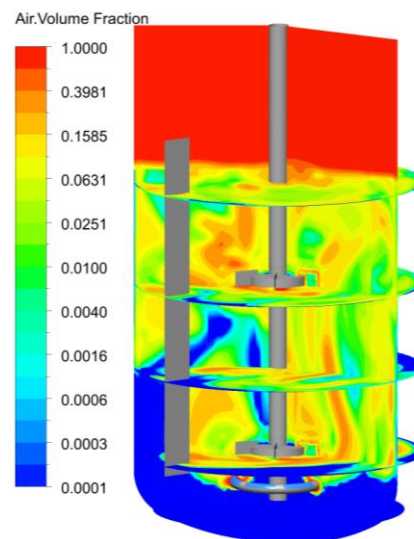
(ก) Second Loading



(ข)



(ค)



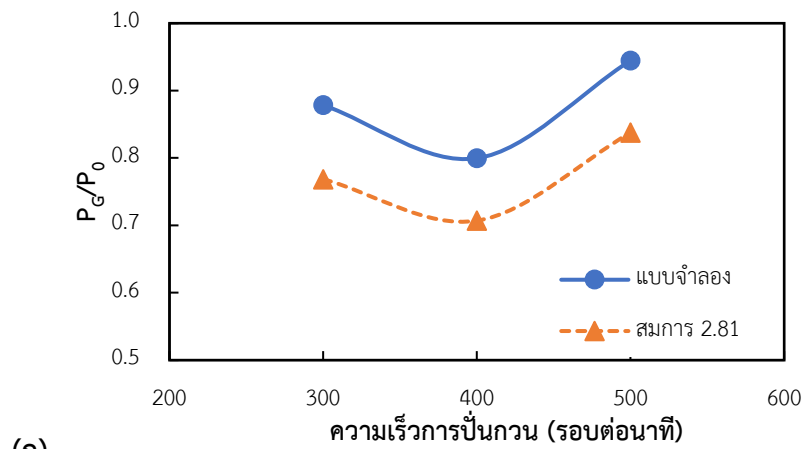
(ง)

รูปที่ 4.12 รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สที่สภาวะการดำเนินการ V5 (400RPM, 7.66 LPM)

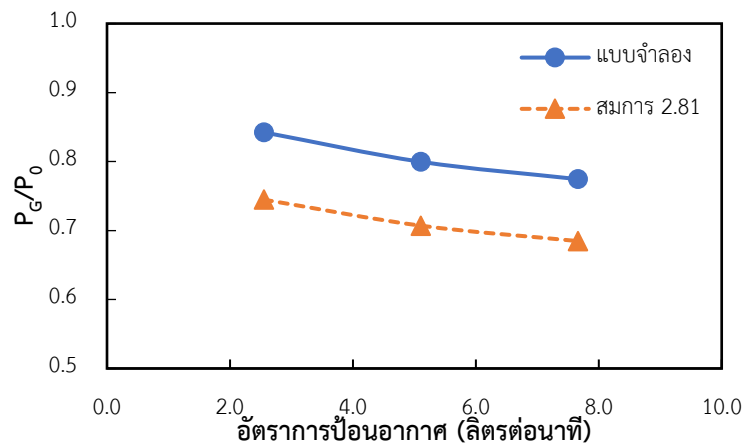
(ก) สังเกตจากการทดลอง, (ข)-(ง) ภาพคอมพิวเตอร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

นอกจากความสามารถในการทำนายรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นแล้ว ค่ากำลังที่ใช้ในถังกวนแบบป้อนอากาศเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ต้องพิจารณา เนื่องจากระบบเป็นแบบไม่มาตรฐาน ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ถูกลำเสนอจากงานวิจัยจากตาราง 2.2 อาจไม่สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำ แต่สามารถใช้เพื่อดูเป็นแนวโน้มของอัตราส่วนของกำลังที่มีการป้อนอากาศต่อกำลังที่ไม่มีการป้อนอากาศได้ โดยความสัมพันธ์ที่มีระบบใกล้เคียงกับงานวิจัยมากที่สุดคือความสัมพันธ์ในสมการ 2.81 ซึ่งเป็นระบบที่ติดตั้งรatchetบนค้อนคู่เหมือนกับถังในงานวิจัย โดยจากรูปที่ 4.13 ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง มีแนวโน้มเดียวกันกับค่าที่คำนวณความสัมพันธ์ดังกล่าว ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองในการศึกษากำลังที่ใช้ในถังกวน และพิจารณาความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรของระบบ





(ก)



(ข)

รูปที่ 4.13 อัตราส่วนกำลังที่มีการป้อนอากาศต่อกำลังที่ไม่มีการป้อนอากาศ ( $P_G/P_0$ ) ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่ถูกลำเสนอสำหรับถังกวนที่มีระบบใกล้เคียงกัน; (ก) ผลของการเปลี่ยนความเร็วการปั่นกวน, (ข) ผลของการเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศ

#### 4.2.3.2. การสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร

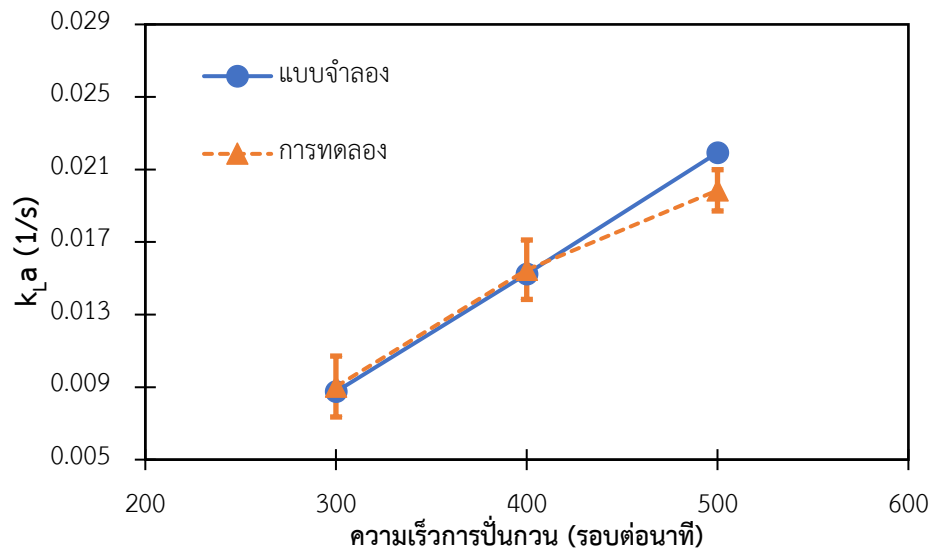
รูปที่ 4.14 แสดงการสอบเทียบผลการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรจากแบบจำลองการไหล กับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่า แบบจำลองการไหลที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรของระบบได้ โดยที่มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองน้อยกว่า 10%

ในการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างใบปั่นกววน และความสูงของของเหลวที่ใช้ในระบบ ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรภายในระบบ จะใช้ค่าจากความสัมพันธ์ในสมการ 4.1 เป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบแนวโน้มของผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบของถังกวน โดยสมการ 4.1 พัฒนาขึ้นในรูปของสมการ 2.69 จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรจากการทดลอง กำลังที่คำนวณได้จากแบบจำลอง และอัตราการไหลแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัดถังกวน ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรแสดงดังตาราง 4.7

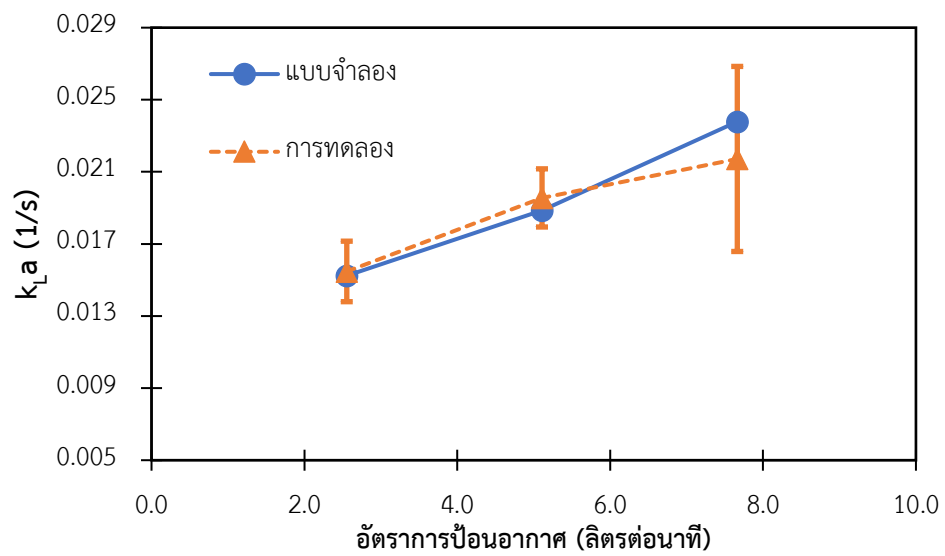
$$k_L a = 9.96 \times 10^{-3} \left( \frac{P_G}{V} \right)^{0.543} u_G^{0.446} \quad \text{สมการ 4.1}$$

ตาราง 4.7 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรที่คำนวณได้จากการทดลอง แบบจำลอง และจากสมการ 4.1

กำลังต่อปริมาตร W/m <sup>3</sup>	อัตราการไหลแก๊สต่อ พื้นที่หน้าตัด mm/sec.	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร		
		การทดลอง	แบบจำลอง	สมการ 4.1
164.8	1.74	0.0090	0.0088	0.0094
347.4	1.74	0.0155	0.0152	0.0141
703.6	1.74	0.0199	0.0202	0.0206
365.9	3.49	0.0196	0.0190	0.0197
311.0	5.23	0.0217	0.0238	0.0216



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 ผลการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรที่คำนวณได้จากแบบจำลอง กับผลการทดลอง; (ก) ผลการสอบเทียบที่ความเร็วการปั่นกวนต่างกัน (ข) ผลการสอบเทียบที่อัตราการป้อนอากาศต่างกัน

#### 4.3. ผลการจำลองการไหล และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในถังกวนที่มี ความเร็วการปั่นกวน และอัตราการป้อนอากาศต่างกัน

จากในหัวข้อ 4.2.3 แบบจำลองที่สร้างขึ้น สามารถทำนายผลของค่าเฉลี่ยเชิงปริมาตรรวมของระบบได้ ดังนั้นในส่วนต่อไปนี้จะใช้แบบจำลองที่คำนวณได้ศึกษาพลศาสตร์ภายในของระบบถังกวนที่สภาวะการดำเนินการกรณี V1 ถึง V5 เนื่องจากการทำแบบจำลอง CFD ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรจะถูกพิจารณาจากผลคูณของสองตัวแปร คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนซึ่งขึ้นกับอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนภายในระบบ และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งขึ้นกับพลศาสตร์ของวัฏภาคแก๊ส ได้แก่ ฟองอากาศ และสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาค่าเฉพาะที่ของแต่ละตัวแปรเพื่อศึกษาถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรภายในระบบได้

##### 4.3.1. การเปรียบเทียบอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

จากรูปแบบทั่วไปในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรของระบบที่วัดได้จากการทดลอง มักนำเสนอในรูปของกำลังที่ใช้ต่อหน่วยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สต่อพื้นที่หน้าตัดตั้งสมการ 2.69 นอกจากนี้ ในความสัมพันธ์สำหรับการทำนายตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการถ่ายโอนออกซิเจนภายในระบบ ประกอบด้วย สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในระบบ ขนาดของฟองอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน มักมีพจน์ของกำลังต่อปริมาตรในความสัมพันธ์ดังกล่าว (Garcia-Ochoa and Gomez 2009) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลของกำลังต่อปริมาตรนั้นมาจากการวัดกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในการปั่นกวน หรือแรงบิดของใบพัดขณะปั่นกวน ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยรวมทั้งระบบถังกวน ไม่สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาผลของค่าเฉพาะที่ภายในระบบได้

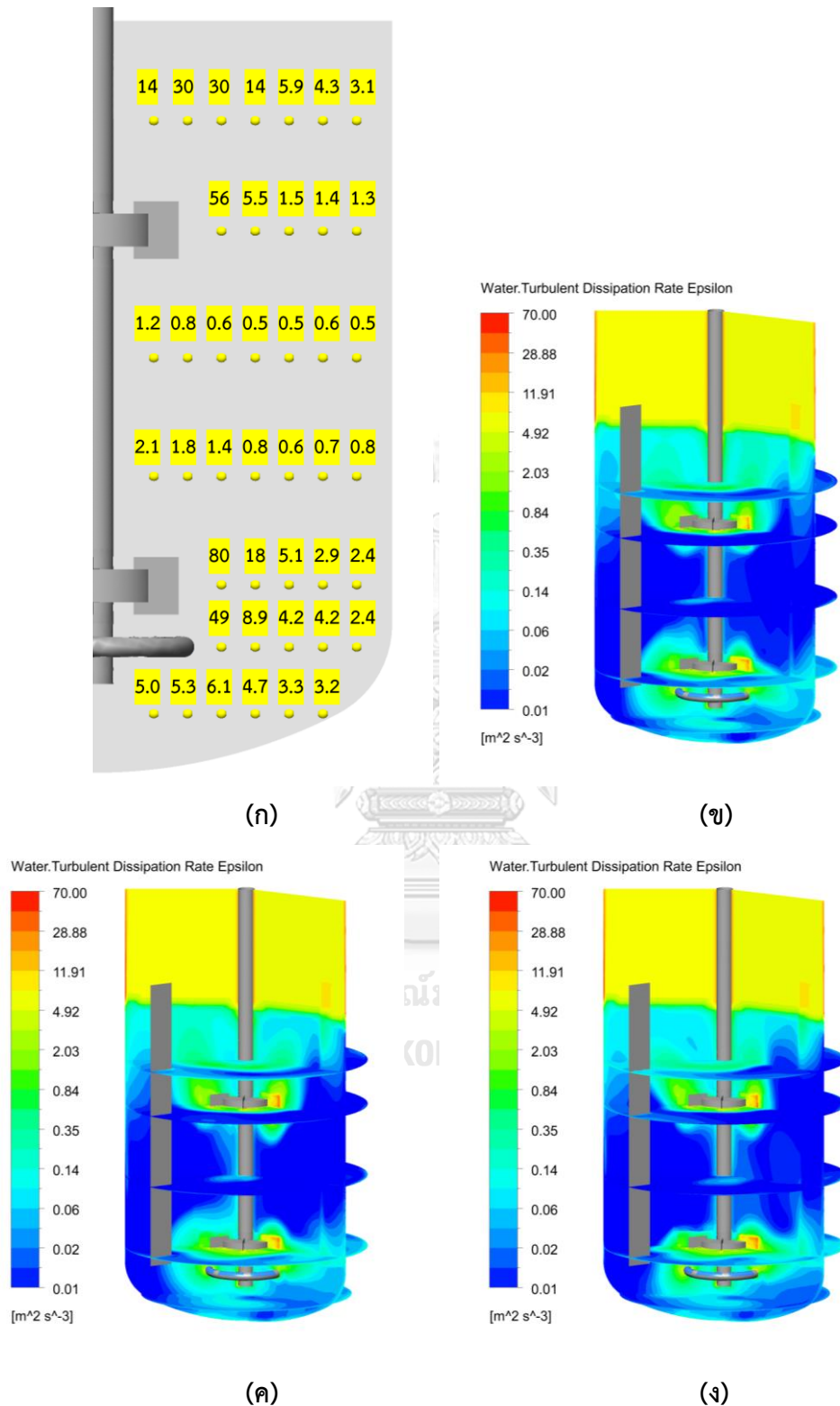
เมื่อพิจารณาการกำลังของใบพัดต่อมวลของไหลในระบบ (P/pV) จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์กับอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent energy dissipation rate, W/kg) และเมื่อพิจารณาสมดุลของพลังงานในระบบ จะเห็นว่าพลังงานป้อนเข้าสู่ระบบ และไม่มีการถ่ายโอนออก ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่าพลังงานดังกล่าวนี้ถูกกระจาย และสลายไป ซึ่งเทียบเท่ากับอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Kresta and Brodkey 2003) ดังนั้น เราจึง



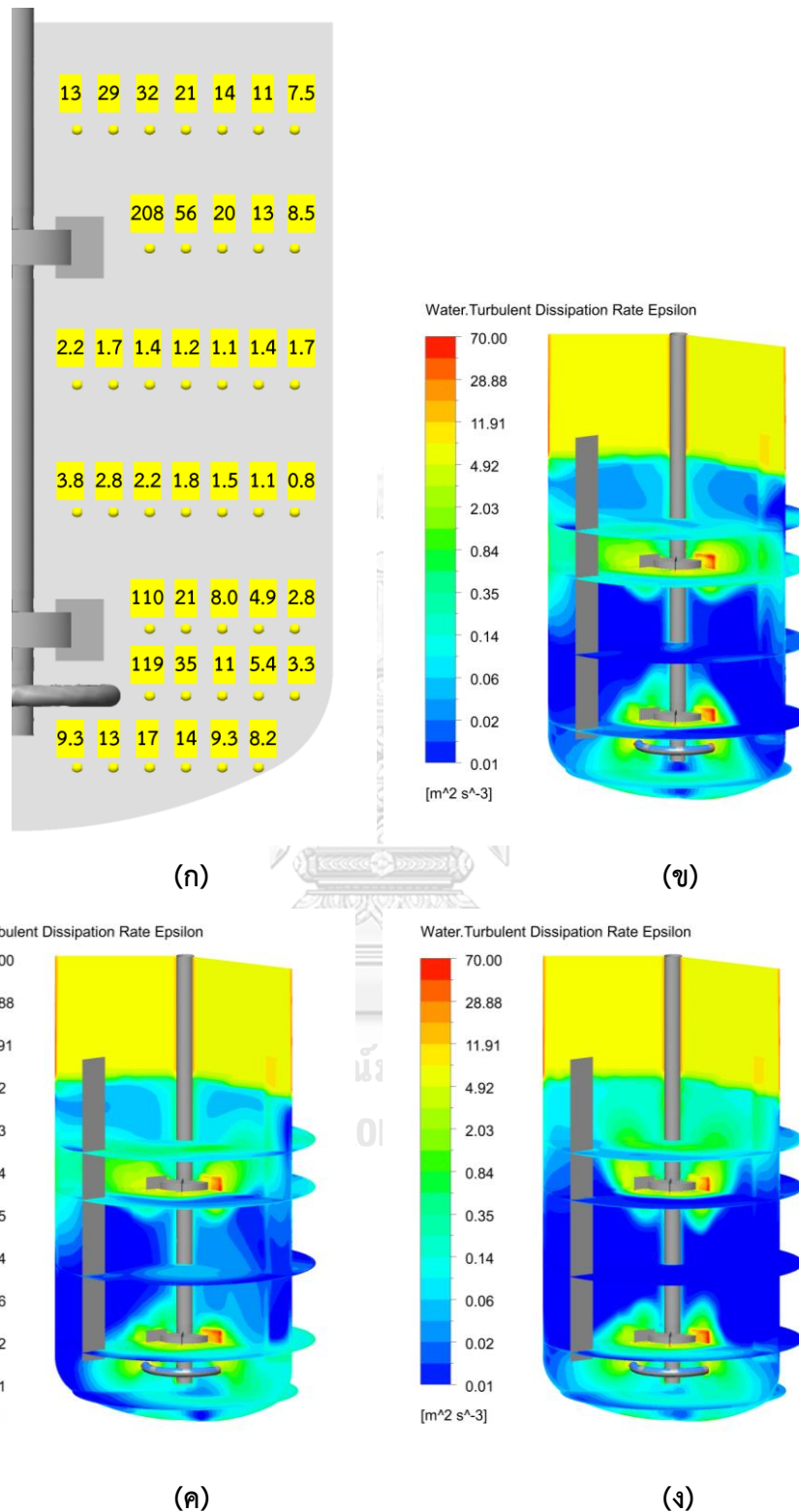
สามารถศึกษาค่าอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ที่คำนวณได้ เพื่อวิเคราะห์กำลังภายในระบบได้

รูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.17 แสดงค่าอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ของกรณี V1 ถึง V3 ตามลำดับ (ความเร็วการปั่นกววน 300, 400, และ 500 รอบต่อนาที ที่อัตราการป้อนอากาศคงที่ 2.55 ลิตรต่อนาที) จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วการปั่นกววนขึ้น ส่งผลให้ขนาดของกำลังเฉพาะที่เพิ่มขึ้น แต่ลักษณะการกระจายของพลังงานภายในระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ สังเกตได้จากภาพคอนทัวร์ของกรณี V1 และ V2 ในรูปที่ 4.15(ข)-(ง) และรูปที่ 4.16(ข)-(ง) จะเห็นว่าลักษณะการกระจายของพลังงานความปั่นป่วนมีลักษณะเหมือนกัน เพียงแต่มีขนาดของค่าอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนในแต่ละบริเวณเพิ่มขึ้นเท่านั้น แต่ที่บริเวณระหว่างใบปั่นกววนทั้งสองยังคงมีค่าน้อยอยู่

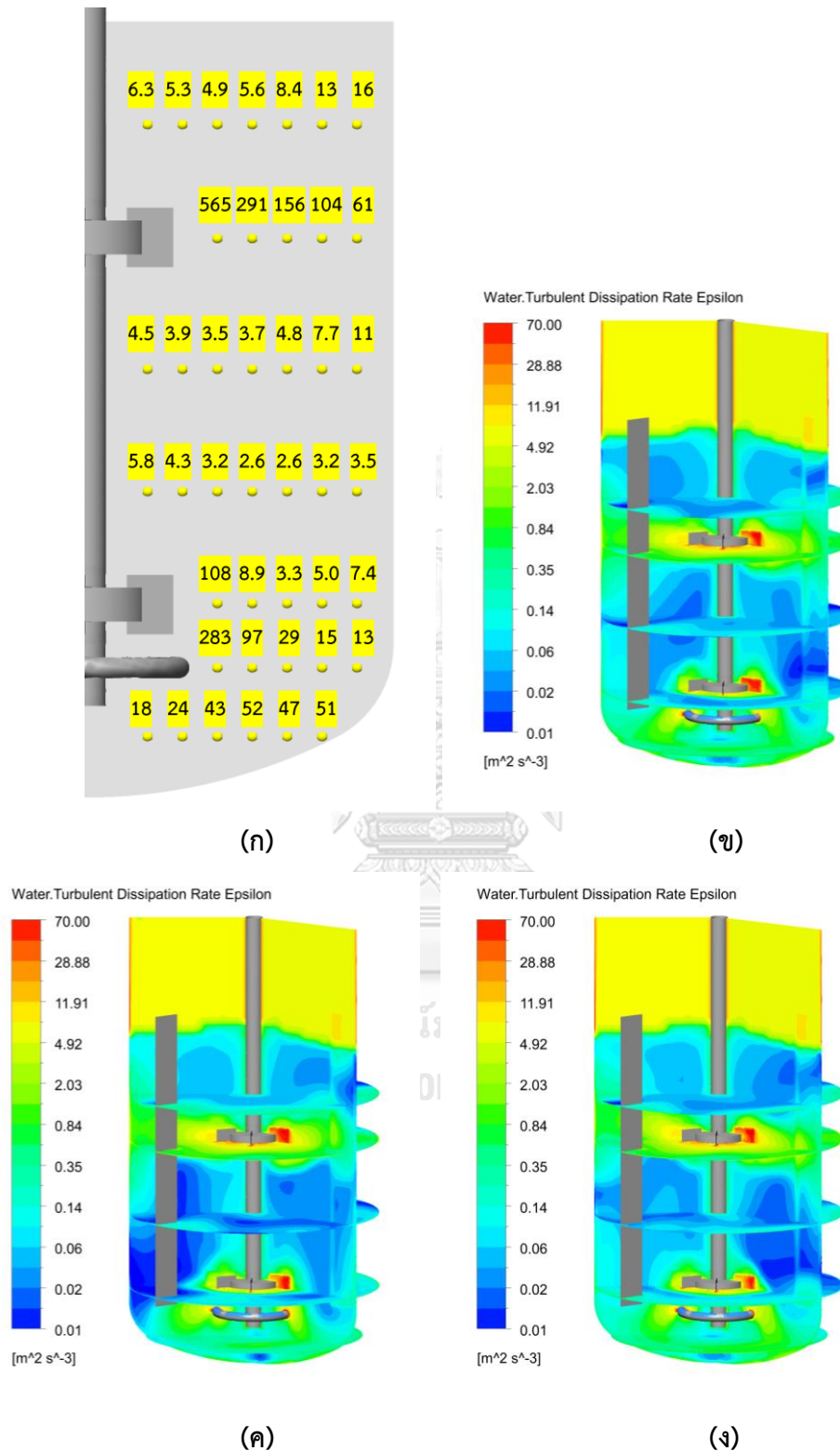
ต่อมาเมื่อพิจารณากรณี V2, V4, และ V5 (อัตราการป้อนอากาศ 2.55, 5.11, และ 7.66 ลิตรต่อนาที ที่ความเร็วการปั่นกววน 400 รอบต่อนาที) เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศขึ้น ขนาดของกำลังที่ถูกส่งจากใบปั่นกววนยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ลักษณะการกระจายของพลังงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.16(ข)-(ง), รูปที่ 4.18(ข)-(ง), และรูปที่ 4.19(ข)-(ง) จะเห็นได้ว่าบริเวณระหว่างใบปั่นกววนทั้งสองมีค่าอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนอากาศมากขึ้น และเมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายของอากาศในระบบเทียบกับอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ พบว่ามีลักษณะการกระจายคล้ายกัน กล่าวคือ ในบริเวณที่อากาศกระจายไปได้ดี จะส่งผลให้ในบริเวณดังกล่าวมีค่าอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากถูกรบกวนโดยการเคลื่อนที่ของวัฏภาคแก๊ส



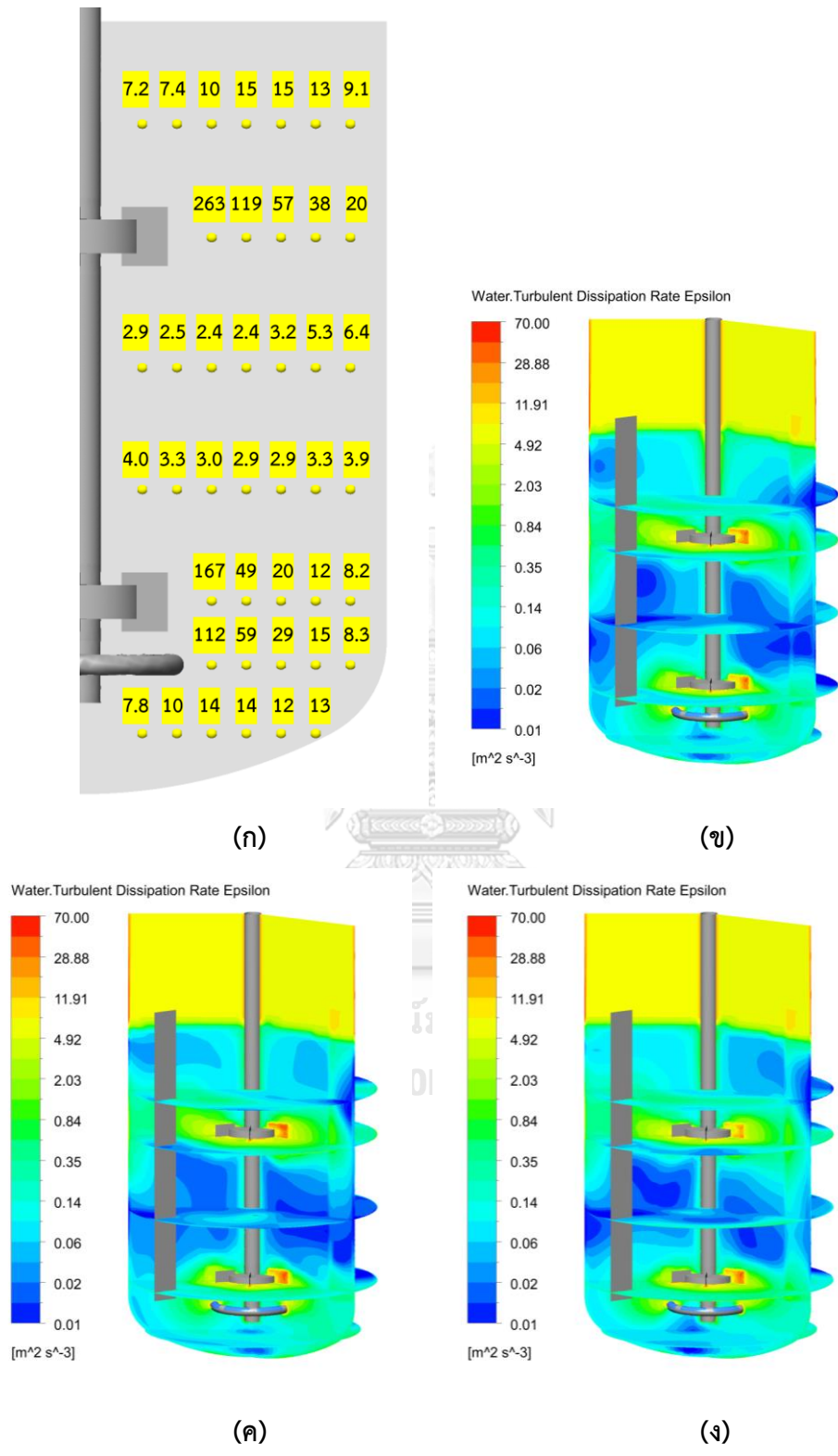
รูปที่ 4.15 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรรณศึกษา V1 (300RPM, 2.55LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว  $\times 10^2$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



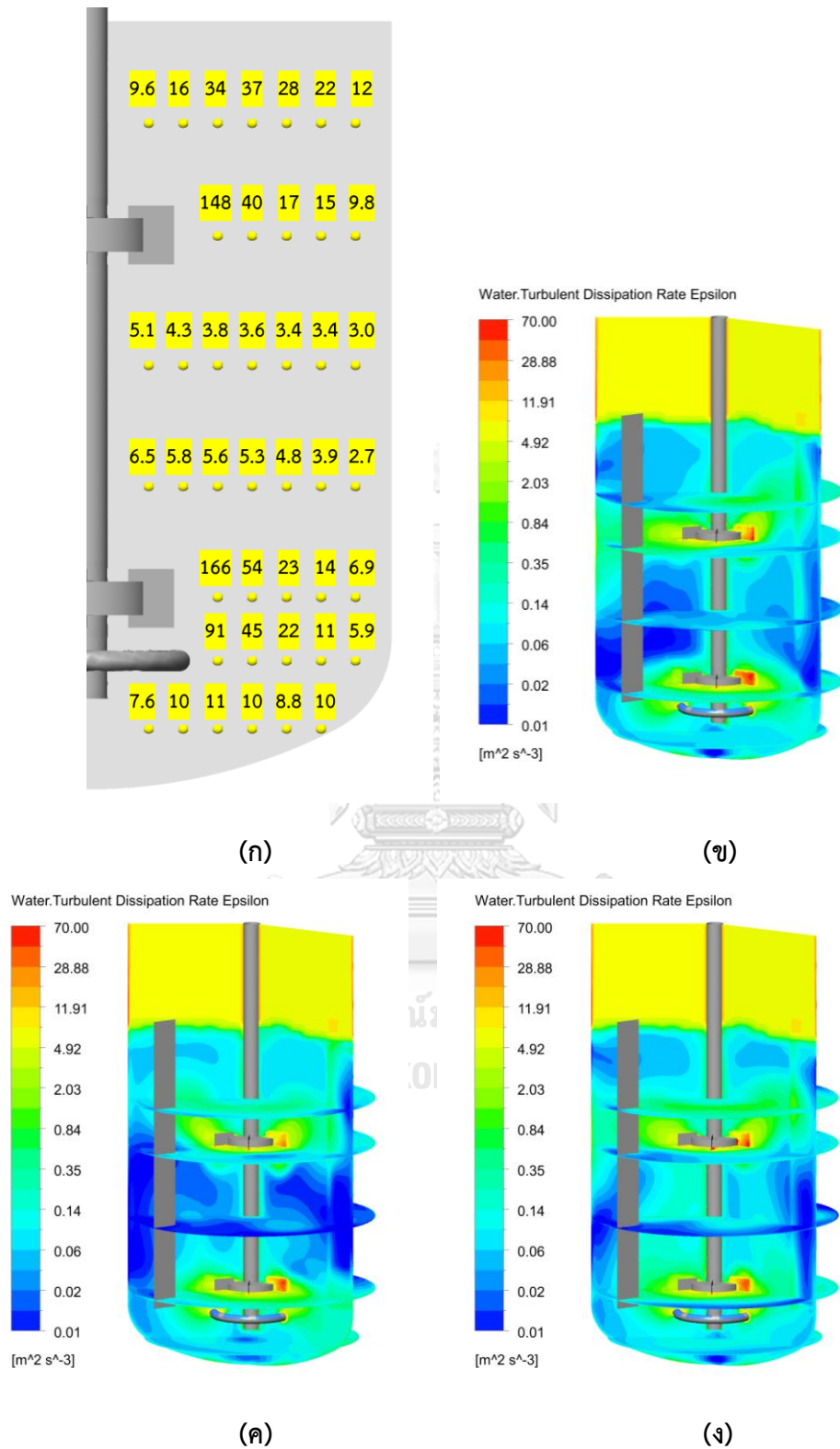
รูปที่ 4.16 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรรณีสึกษา V2 (400RPM, 2.55LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว  $\times 10^2$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



รูปที่ 4.17 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรณีศึกษา V3 (500RPM, 2.55LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว  $\times 10^2$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



รูปที่ 4.18 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรรณศึกษา V4 (400RPM, 5.11LPM), (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^2$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



รูปที่ 4.19 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ ( $W/kg$ ) ของกรณีศึกษา V5 (400RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^2$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

#### 4.3.2. การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตร

พื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตร เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับขนาดฟองอากาศเฉลี่ย และสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในระบบ ดังสมการ 2.70 ผลการทำนายขนาดฟองอากาศเฉลี่ยในระบบสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในการทำนายขนาดของฟองในระบบถังกวน (Garcia-Ochoa and Gomez 2009) ดังสมการ 4.2 ขนาดของฟองอากาศเฉลี่ยในระบบแสดงดังตาราง 4.8 โดยมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากระบบที่ต่างกัน แต่ยังคงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเหมือนกัน สังเกตได้จากร้อยละของความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ จากสมการ 4.2 จะเห็นได้ว่าขนาดของฟองผกผันกับกำลังต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ในกรณีศึกษา V1 ถึง V3 จะเห็นว่าเมื่ออัตราเร็วการปั่นกวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ขนาดฟองอากาศเฉลี่ยในระบบจึงมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกรณีศึกษา V2, V4, และ V5 เมื่อเพิ่มอัตราการปั่นกวนอากาศที่ความเร็วปั่นกวนคงที่ ส่งผลให้สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ขนาดของฟองอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น

$$d_b = 4.15 \frac{\sigma^{0.6}}{\left(\frac{P}{V}\right)^{0.4} \rho_L^{0.2}} \varepsilon_G^{0.5} + 0.0009 \quad \text{สมการ 4.2}$$

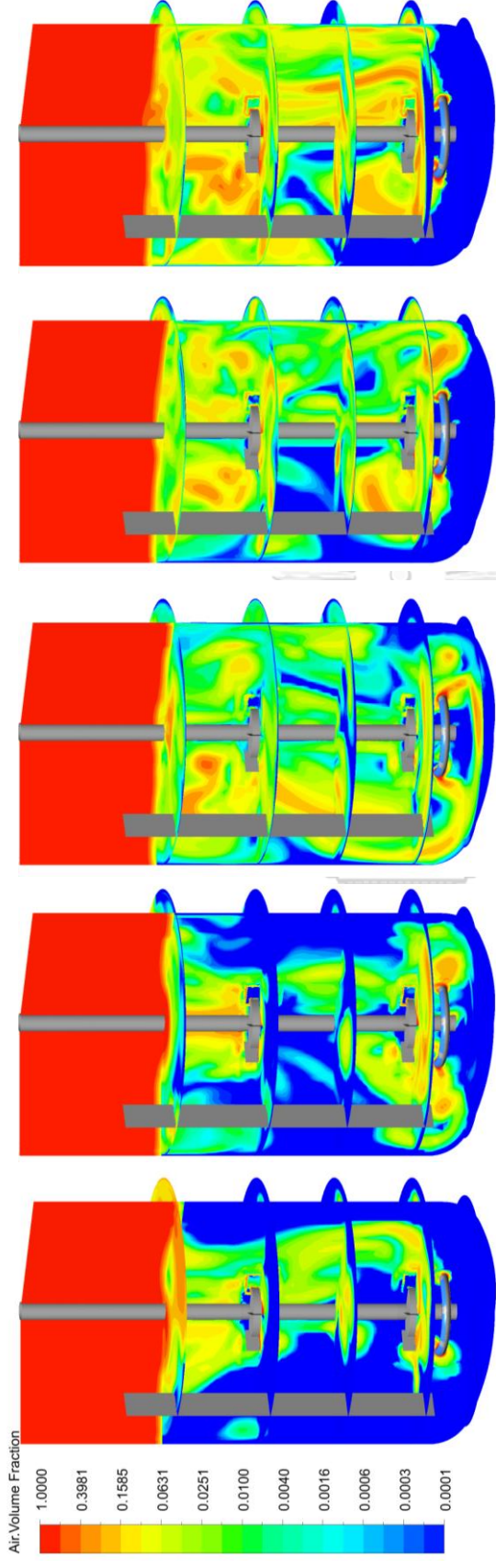
ตาราง 4.8 ผลการทำนายปริมาณอากาศสะสมในระบบ และการเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่คำนวณได้จากแบบจำลอง กับความสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดฟองในถังกวนของกรณี V1 ถึง V5

กรณีศึกษา	N	Q <sub>G</sub> Gas holdup			ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย (mm.)	
	RPM	LPM	%	แบบจำลอง	สมการ 4.2	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
V1	300	2.55	2.15	3.07	4.94	-37.9
V2	400	2.55	2.56	2.73	4.17	-34.5
V3	500	2.55	2.67	2.18	3.42	-36.3
V4	400	5.11	3.64	2.86	4.72	-39.4
V5	400	7.66	5.47	3.60	5.90	-39.0



รูปที่ 4.20(ก) ถึง (จ) แสดงลักษณะการกระจายตัวของอากาศของกรณี V1 ถึง V5 ตามลำดับ ในกรณี V1 ความเร็วของใบป่นกวนยังไม่มากพอที่จะทำให้อากาศกระจายตัวไปถึงบริเวณผนังถังกวนได้ เมื่อเพิ่มความเร็วในการป่นกวนขึ้น ในกรณี V2 และ V3 การกระจายตัวของอากาศสามารถกระจายได้ทั่วทั้งถังกวนมากขึ้น โดยในกรณี V3 ความเร็วการป่นกวนมีมากพอที่จะทำให้อากาศกระจายได้ทั่วทั้งถังกวน รวมถึงเกิดการไหลวนลงบริเวณก้นถังกวนด้วย เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของกรณี V2, V4, และ V5 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศขึ้น โดยที่ใบป่นกวนยังคงสามารถกระจายอากาศในลักษณะเดียวกันได้ ส่งผลให้มีอากาศกระจายอยู่ในระบบได้มากขึ้น สังเกตได้จากบริเวณระหว่างใบป่นกวน เมื่ออัตราการป้อนอากาศมากขึ้น จะมีปริมาณอากาศที่กระจายอยู่ในบริเวณนี้มากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเฉพาะของกรณี V1 ถึง V5 ดังรูปที่ 4.21 การเพิ่มความเร็วในการป่นกวนที่อัตราการป้อนอากาศเดียวกันในกรณี V1 ถึง V3 จะเห็นว่านอกจากลักษณะการกระจายตัวที่ดีขึ้นแล้ว ค่าเฉพาะที่ของสัดส่วนโดยปริมาตรของระบบจะมีค่าสม่ำเสมอมากขึ้นด้วย ในกรณี V1 เนื่องจากการกระจายตัวที่แย่มากที่สุด สัดส่วนโดยปริมาตรเฉพาะที่มีค่าสูงที่บริเวณแกนหมุนเท่านั้น แต่บริเวณรอบนอกถังกวนจะมีค่าต่ำมาก เมื่อเพิ่มความเร็วการป่นกวน ทำให้อากาศกระจายไปทั่วถังกวนมากขึ้นจะเห็นได้ว่าค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในถังกวนของกรณี V2 และ V3 ที่บริเวณที่ห่างออกจากแกนหมุนมีค่ามากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ อากาศสะสมบริเวณแกนหมุนยังมีค่าน้อยลงด้วย ต่อมาเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศในกรณี V2, V4, และ V5 ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนอากาศที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกรณี V2 และ V4 การเพิ่มอัตราการป้อนอากาศส่งผลให้สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในระบบมีความสม่ำเสมอเท่ากันมากขึ้น ในบริเวณแกนหมุน เริ่มมีอากาศสะสมอยู่มากขึ้นเช่นกัน เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศขึ้นอีกดังกรณี V5 ถึงแม้จะยังคงทำให้สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศเฉพาะที่ในระบบมีค่ามากขึ้น





(ก) 300RPM 2.55LPM

(ข) 400RPM 2.55LPM

(ค) 500RPM 2.55LPM

(ง) 400RPM 5.11LPM

(จ) 400RPM 7.66LPM

รูปที่ 4.20. ภาพคอมพิวเตอร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในระบบของกรณีศึกษา V1-V5

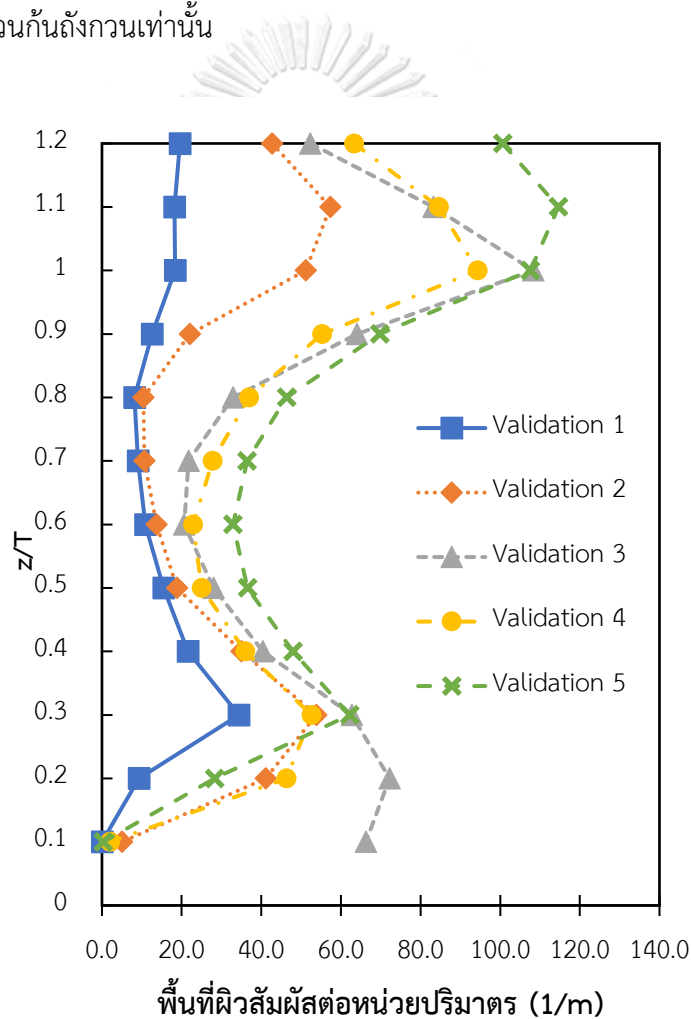
(ก) กรณี V1, (ข) กรณี V2, (ค) กรณี V3, (ง) กรณี V4, (จ) กรณี V5



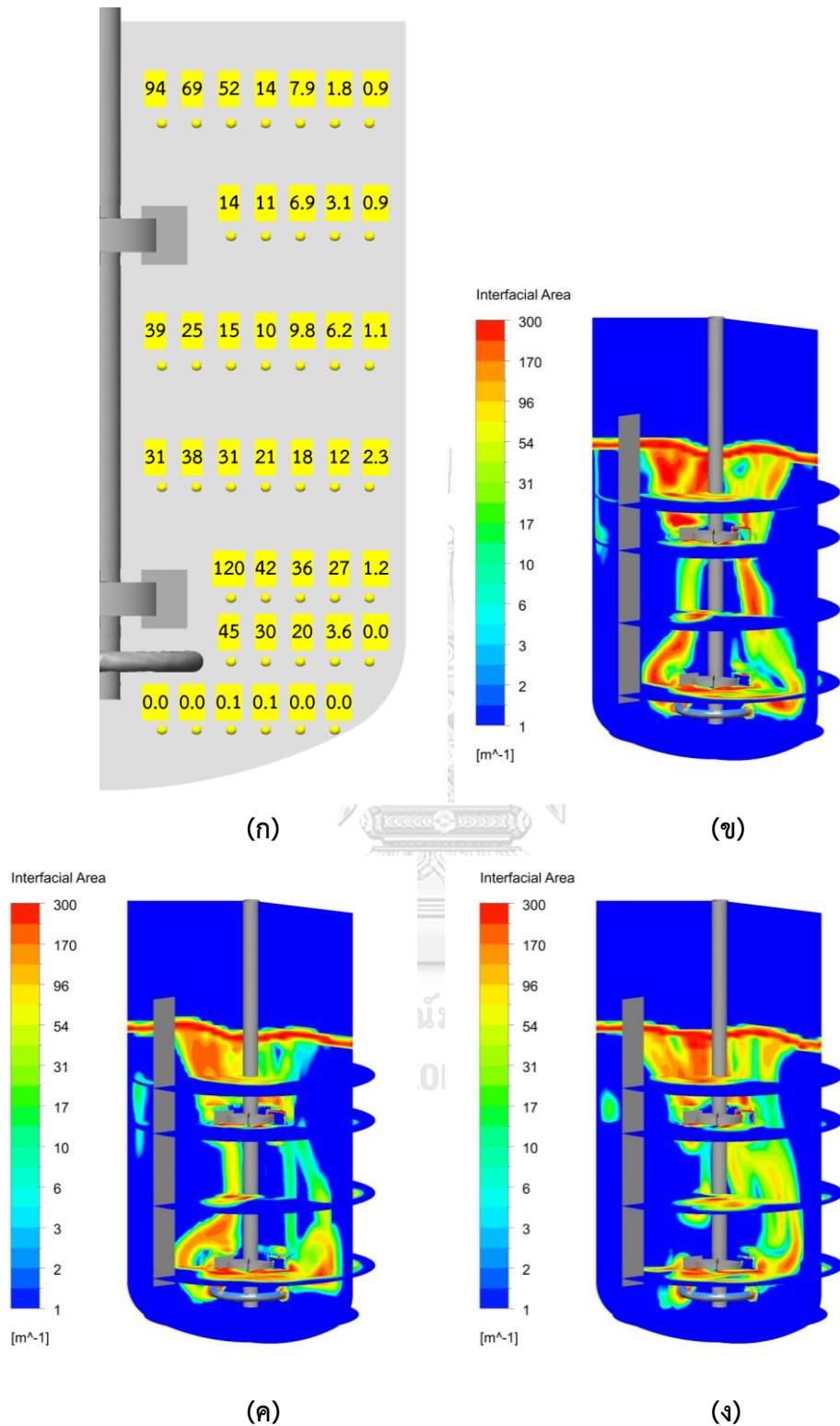
ต่อมาเมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคต่อหน่วยปริมาตรภายในระบบที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลมาจากสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศที่กระจายตัวอยู่ในถังกวน และขนาดของฟองอากาศภายในถังกวนที่ดังแสดงในตาราง 4.8 โดยรูปที่ 4.22 แสดงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเทียบกับความสูงไร้หน่วย (ระดับความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน,  $z/T$ ) จะเห็นว่ากรณี V1 มีค่าน้อยกว่ากรณีอื่นในทุกระดับความสูง เนื่องจากมีความเร็วการปั่นกวนที่ต่ำ ทำให้อากาศกระจายตัวได้ไม่ทั่วทั้งถัง มีอากาศสะสมอยู่ในระบบได้น้อย จึงทำให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรมีค่าน้อยตามไปด้วย ในกรณี V2 และ V3 เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นกวนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรมีค่ามากขึ้นในทุก ๆ บริเวณ เมื่อเทียบกับกรณี V1 เนื่องจากมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้มีอากาศสะสมอยู่ในระบบมากขึ้น รวมถึงขนาดฟองอากาศเฉลี่ยในระบบมีค่าน้อยลง นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าที่ความสูงบริเวณก้นถังกวน กรณี V3 สามารถทำให้อากาศเกิดการหมุนวนกลับไปสู่บริเวณก้นถังได้ จึงทำให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรมากกว่ากรณีอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรกรณี V2, V4 และ V5 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการปั่นอากาศ ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากมีการกระจายตัวได้ทั่วทั้งถังกวนเหมือนกัน ดังนั้นเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในระบบเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นจากกรณี V2 ไป V4 มีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นจากกรณี V4 ไป V5 อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากขนาดฟองใหญ่ที่ขึ้นตามปริมาณของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบเป็นอัตราส่วนมากกว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในระบบ จึงทำให้การเพิ่มขึ้นของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรมีค่าน้อยกว่ากรณี V2 ไป V4

รูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.27 แสดงค่าเฉพาะที่ของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรของกรณี V1 ถึง V5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ในกรณี V1 ที่บริเวณใกล้แกนหมุน ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรมีค่าใกล้เคียงกับกรณีอื่น ๆ แต่มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะห่างออกจากแกนหมุนดังรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรที่บริเวณใกล้ผนังของถังกวนในทุก ๆ ระดับความสูงมีค่าน้อยมาก เนื่องจากการกระจายตัวของอากาศในระบบไม่ดี เมื่อเพิ่มความเร็วในการปั่นกวนขึ้น จากรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าในกรณี V2 และ V3 มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้นที่บริเวณใกล้กับผนังของถังกวน เนื่องจากอากาศสามารถกระจายตัวออกไปได้ทั่วทั้งถัง

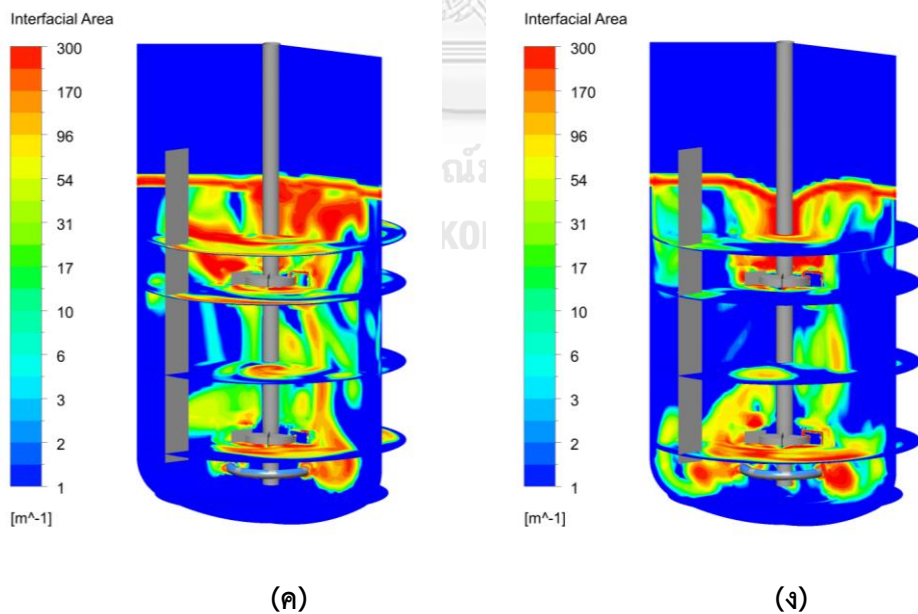
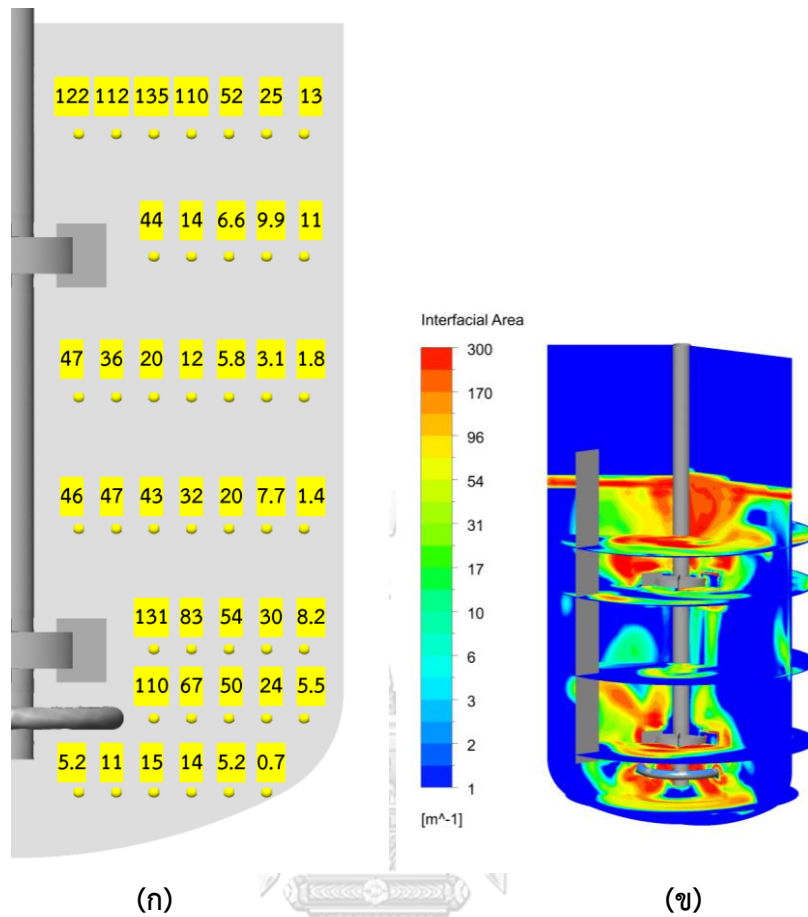
โดยเฉพาะกรณี V3 จะเห็นว่าค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรที่บริเวณก้นถังมีค่าสูงกว่ากรณีอื่น ๆ แต่ยังไม่สามารถกระจายไปถึงบริเวณส่วนล่างของแกนหมุนได้ เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศในกรณี V4 และ V5 จะเห็นได้ว่าจะสามารถทำให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นได้ในทุก ๆ บริเวณเมื่อเทียบกับกรณี V2 โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับผนังของถังวงดั่งรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27 เนื่องจากอากาศสามารถกระจายไปได้ทั่วทั้งถังวงดั่งนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศที่เข้าสู่ระบบ จึงทำให้มีสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในแต่ละบริเวณเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกรณี V3, V4, และ V5 จะเห็นได้ว่ามีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเฉพาะที่ใกล้เคียงกันในทุก ๆ บริเวณยกเว้นในส่วนก้นถังวงดั่งเท่านั้น



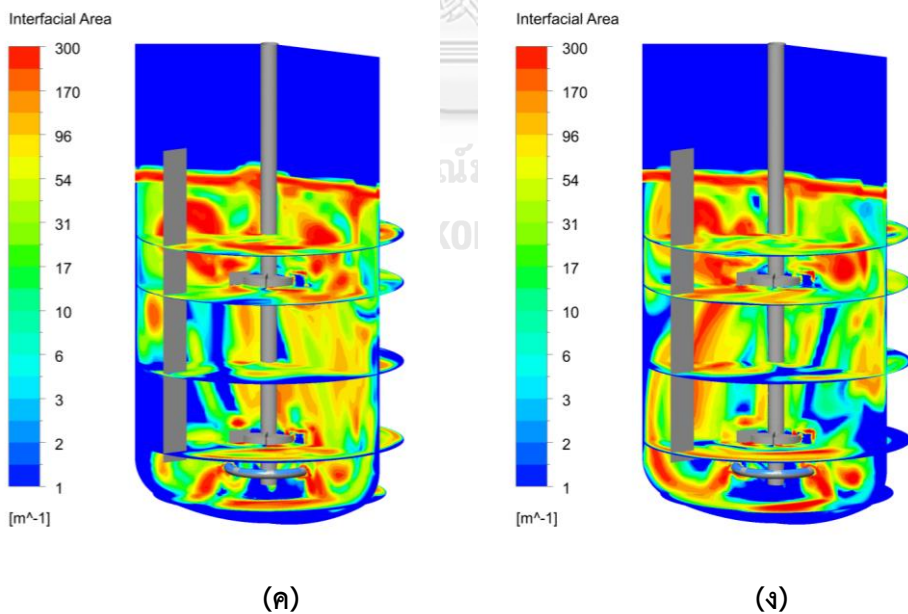
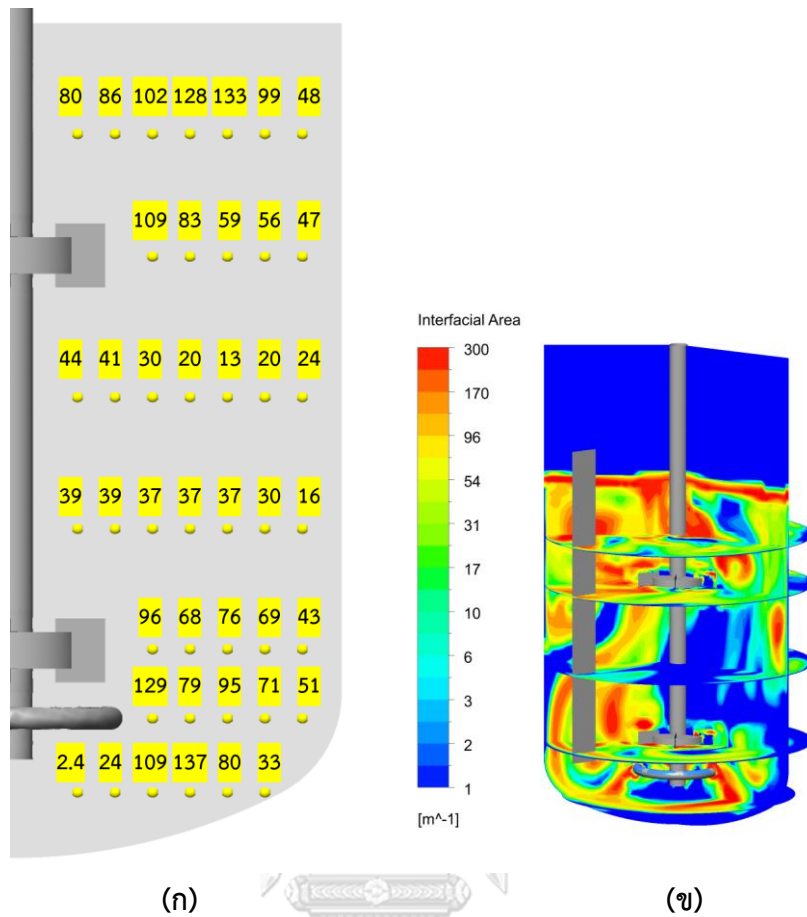
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเฉลี่ยกับความสูงไร้หน่วยกรณี V1 ถึง V5



รูปที่ 4.23 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) ของกรณีศึกษา V1 (300RPM, 2.55 LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

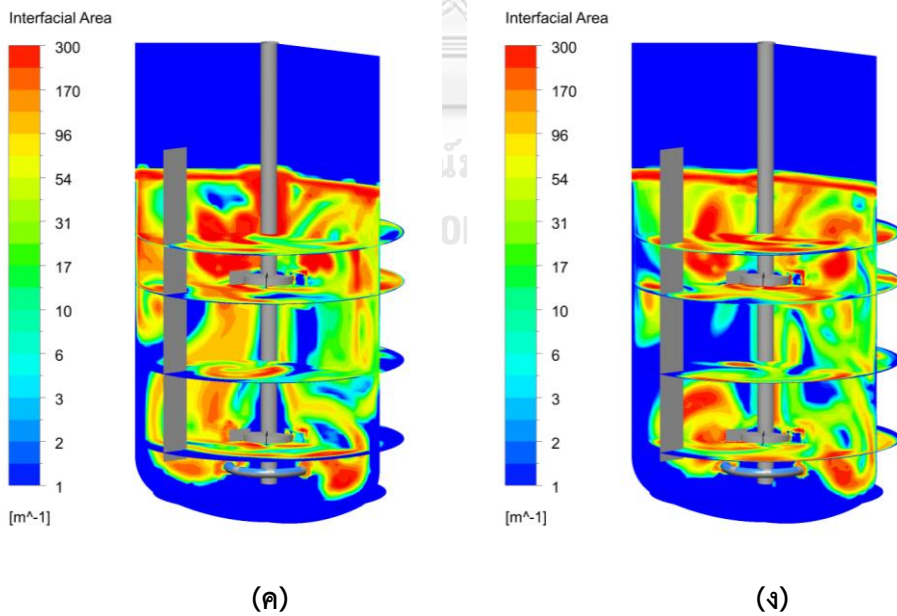
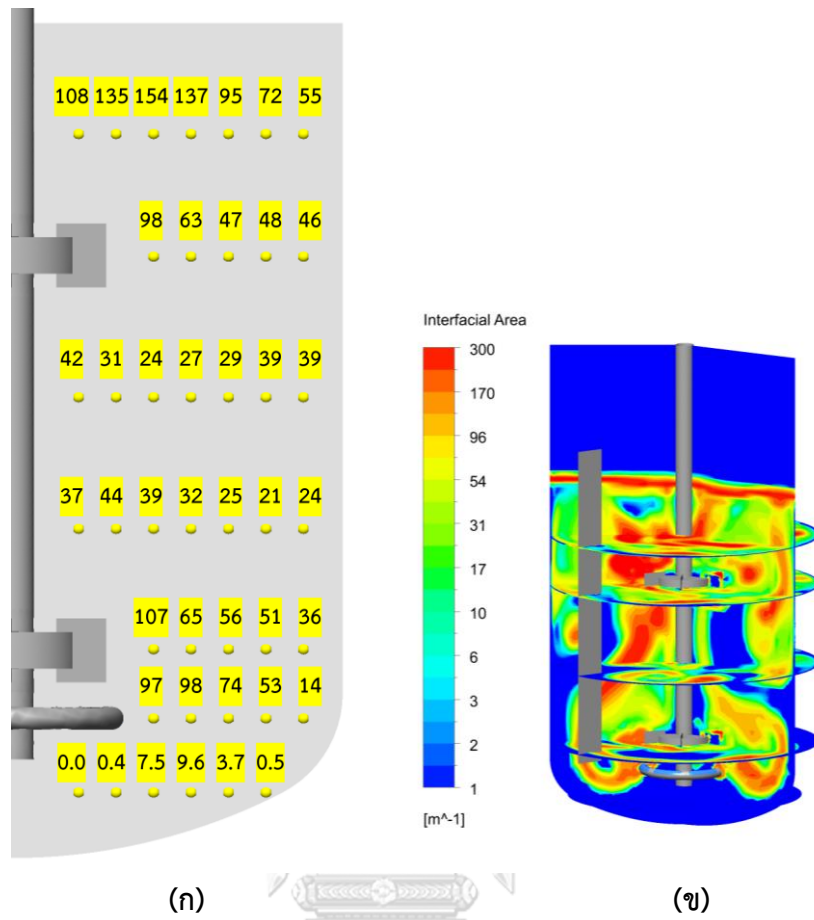


รูปที่ 4.24 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $m^2/m^3$ ) ของกรณีศึกษา V2 (400RPM, 2.55 LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



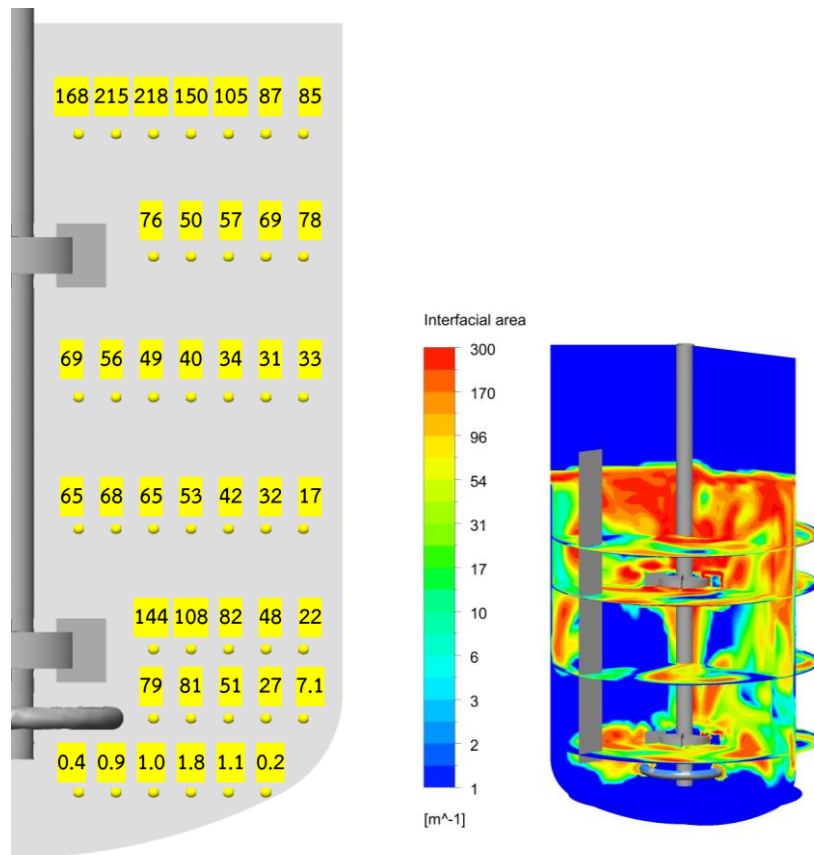
รูปที่ 4.25 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $m^2/m^3$ ) ของกรณีศึกษา V3 (500RPM, 2.55 LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ





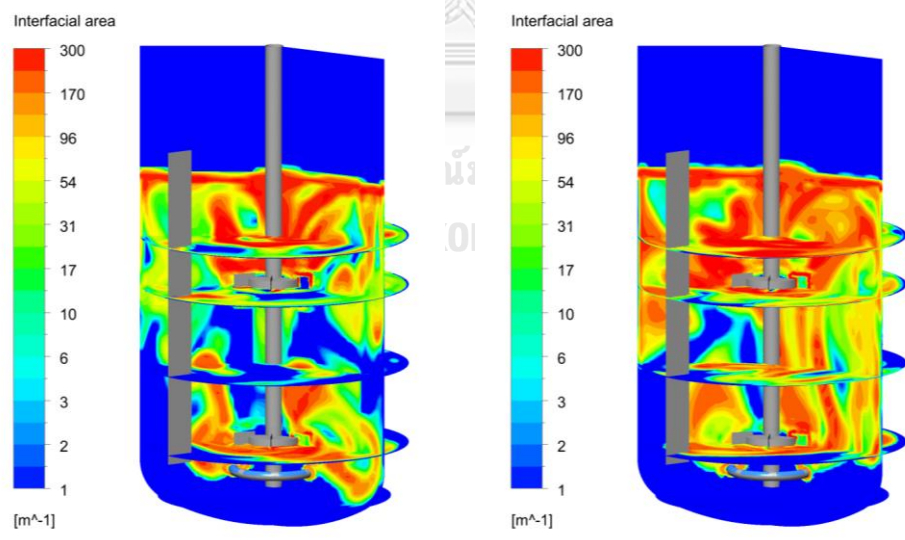
รูปที่ 4.26 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $m^2/m^3$ ) ของกรณ์ศึกษา V4 (400RPM, 5.11 LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ





(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4.27 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $m^2/m^3$ ) ของกรณีศึกษา V5 (400RPM, 7.66 LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

#### 4.3.3. การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร

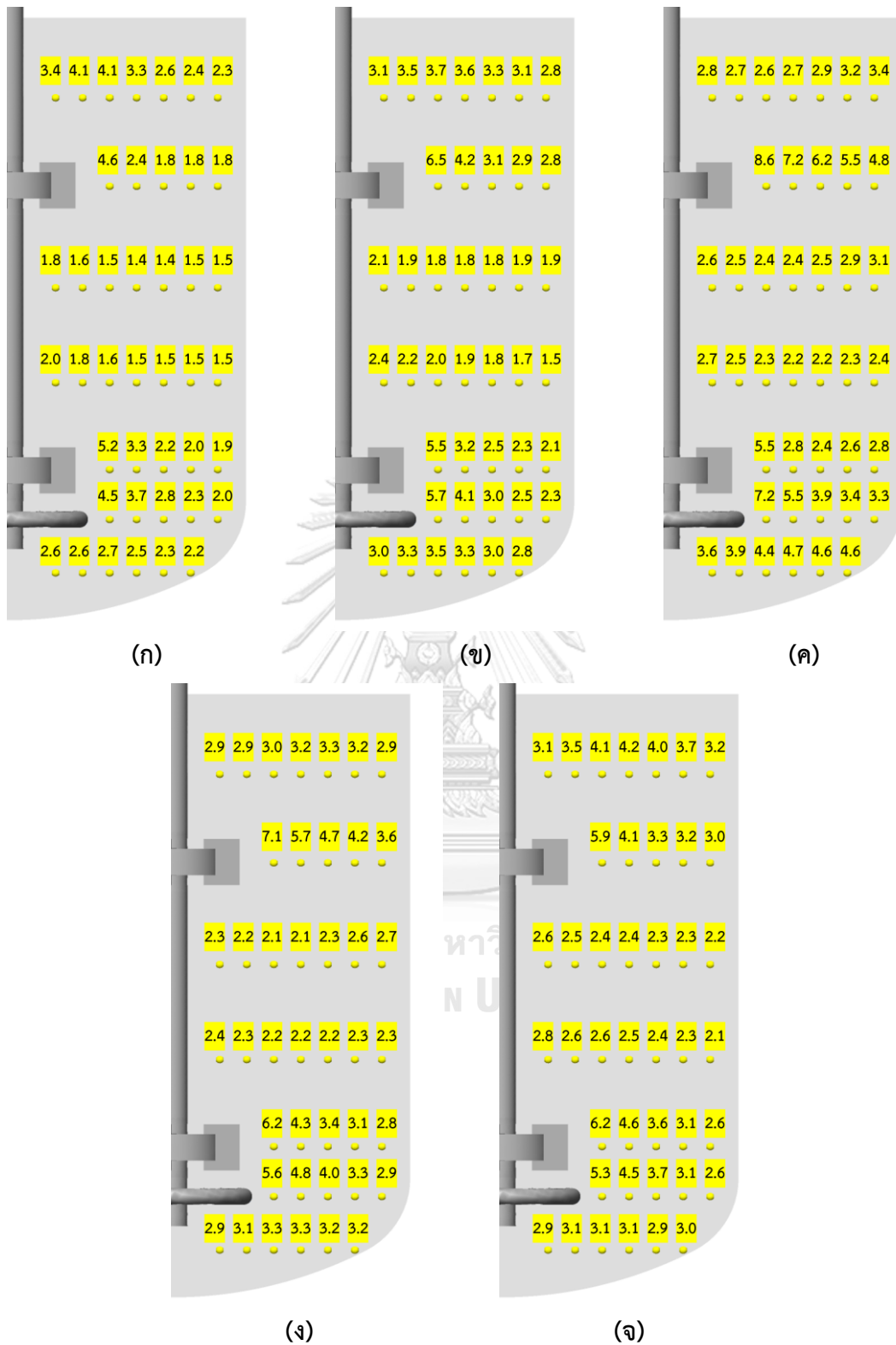
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร ( $k_L a$ ) เป็นผลคูณระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรซึ่งได้อธิบายไปในหัวข้อก่อนหน้า และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน ( $k_L$ ) โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนในงานวิจัยนี้ถูกนิยามด้วยสมการ 2.72 โดยที่  $C_1$  มีค่า 0.301 (Laakkonen et al. 2007) จะเห็นว่าขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนจะขึ้นกับอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนโดยตรง ดังนั้นการกระจายของค่าทั้งสองดังกล่าวจึงเป็นไปในลักษณะเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.28 โดยมีขนาดของค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1 ถึง  $5 \times 10^{-4}$  ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ถูกรายงานในอังกฤษ (Doran 2013)

เมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยรวมทั้งระบบของแต่ละตัวแปรที่พิจารณา แสดงดังตาราง 4.9 จะเห็นว่า การเพิ่มความเร็วในการปั่นกวนในกรณี V1 ถึง V3 ส่งผลให้มีอากาศสะสมอยู่ในระบบมากขึ้น เนื่องจากวัฏภาคน้ำมีความเร็วมากพอที่จะทำให้อากาศไหลวนอยู่ในระบบ นอกจากนี้ยังมีอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเพิ่มขึ้น หรือมีค่ากำลังต่อมวลเฉพาะที่เพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดฟองอากาศในระบบเล็กลงจึงส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น รวมถึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนที่ดีขึ้นด้วย จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้การเพิ่มความเร็วในการปั่นกวนส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบเพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศในกรณี V2, V4, และ V5 จะเห็นว่าขนาดของฟองอากาศในระบบ และปริมาณอากาศที่สะสมอยู่ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนอากาศ แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน พบว่าไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศจากกรณี V2 ไป V4 เท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศเข้าไปอีก ในกรณี V5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนไม่ได้เพิ่มขึ้นจากกรณี V4 นั่นคืออัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉลี่ยภายในระบบไม่ได้ดีขึ้นเนื่องจากอัตราการป้อนอากาศของกรณี V5 เริ่มส่งผลกระทบต่อความสามารถในการปั่นกวนของระบบ ทำให้ใบปั่นกวนไม่สามารถส่งกำลังสู่ของเหลวได้ดีขึ้นกว่ากรณี V4

ตาราง 4.9 ค่าเฉลี่ยรวมทั้งระบบที่คำนวณได้จากแบบจำลองของกรณี V1 ถึง V5

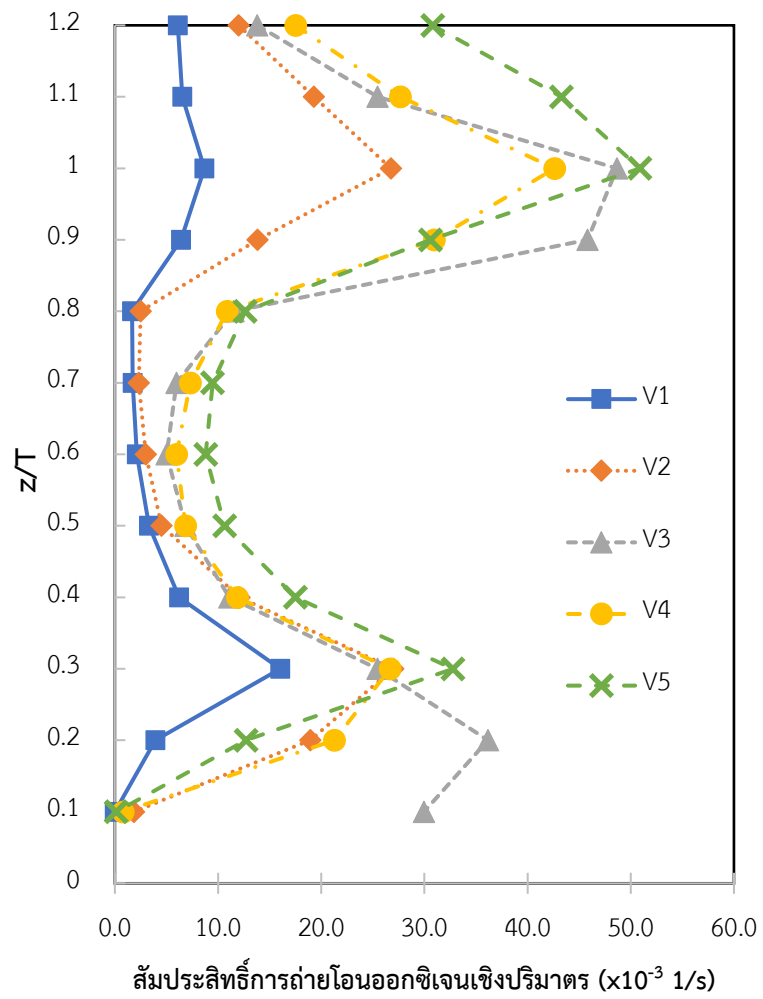
Case	N	Q <sub>G</sub>	d <sub>32</sub>	Gas holdup	Interfacial area	k <sub>L</sub>	k <sub>L</sub> a
	RPM	LPM	mm	%	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	x10 <sup>-4</sup> m/s	1/s
V1	300	2.55	3.07	2.15	27.2	2.54	0.0088
V2	400	2.55	2.73	2.56	35.4	2.77	0.0152
V3	500	2.55	2.18	2.67	52.7	3.38	0.0202
V4	400	5.11	2.86	3.64	52.2	3.12	0.0190
V5	400	7.66	3.60	5.47	66.3	3.10	0.0238

รูปที่ 4.29 แสดงค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรภายในระบบเทียบกับระดับความสูงที่สภาวะการดำเนินการ V1 ถึง V5 จะเห็นได้ว่า ในกรณี V1 ถึง V3 เมื่อเพิ่มอัตราการปั่นกววนขึ้นที่อัตราการป้อนอากาศคงที่ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากขนาดกำลังจากใบปั่นกววนมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเพิ่มขึ้น รวมถึงเมื่อมีความเร็วการปั่นกววนมากขึ้น ทำให้อากาศสามารถกระจายไปได้ทั่วทั้งถังกวน และวนอยู่ในระบบมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณากรณี V2, V4, และ V5 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบโดยที่อัตราการปั่นกววนคงที่ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มจากกรณี V2 ไป V4 จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างมากจนเกือบเทียบเท่ากรณี V3 เนื่องจากปริมาณอากาศที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาผลการเพิ่มขึ้นจากกรณี V4 ไป V5 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นจากกรณี V2 ไป V4 ถึงแม้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนใกล้เคียงกันก็ตาม เนื่องจากที่กรณี V5 ปริมาณอากาศในระบบมีมากขึ้น และขนาดของฟองอากาศใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรไม่ได้เพิ่มขึ้นมากเท่าที่ควร



รูปที่ 4.28 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่เฉลี่ยที่สภาวะคงตัว ( $10^{-4}$  m/s)

(ก) กรณี V1 (300RPM, 2.55LPM), (ข) กรณี V2 (400RPM, 2.55LPM), (ค) กรณี V3 (500RPM, 2.55LPM), (ง) กรณี V4 (400RPM, 5.11 LPM), (จ) กรณี V5 (400RPM, 7.66LPM)



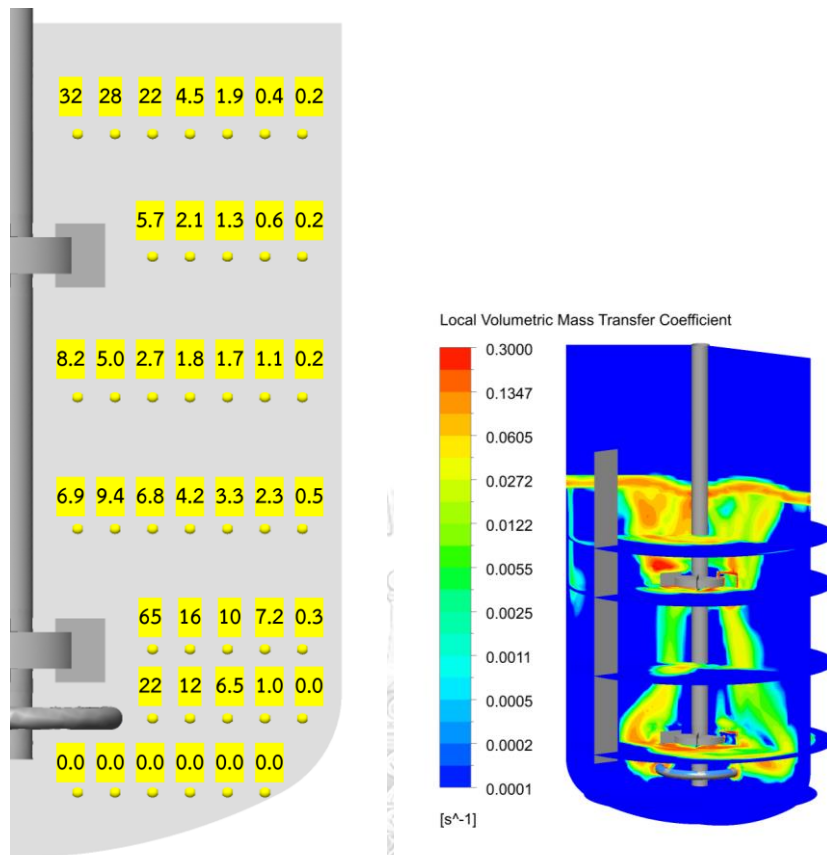
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉลี่ยกับความสูงไร้หน่วย

รูปที่ 4.30 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ของกรณี V1 จะเห็นว่าเนื่องจากการกระจายตัวของอากาศไม่ดี บริเวณที่เกิดการถ่ายโอนออกซิเจนซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้กลับแกนหมุนเท่านั้น จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของระบบมีค่าน้อย ต่อมารูปที่ 4.32 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ของกรณี V3 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วของวัฏภาคน้ำมีเพียงพอที่จะทำให้อากาศกระจายไปได้ทั่วทั้งถังกวน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่มีการกระจายตัวของค่าที่ดีตามไปด้วย เกิด dead zone ของการถ่ายเทออกซิเจนภายในระบบน้อยมาก เมื่อพิจารณารูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.33 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ของกรณี V2 และ V4 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศขึ้น ทำให้มีปริมาณอากาศกระจายไปทั่วทั้งถังกวนมากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการถ่ายโอนที่ดีตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศเข้าไปอีกดังรูปที่ 4.34 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ของกรณี V5 ถึงแม้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การกระจายของค่าภายในระบบมีค่าแย่ง เนื่องจากปริมาณอากาศที่มีมากขึ้นทำให้วัฏภาคน้ำเริ่มพาอากาศออกไปรอบนอกถังกวนได้แย่ง โดยจะเห็นว่าบริเวณระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่บริเวณแกนหมุน ซึ่งมีอากาศกระจายอยู่หนาแน่นกว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่สูงกว่า ในขณะที่บริเวณอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกับกรณี V4

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้น การเพิ่มความเร็วในการปั่นกวนส่งผลให้ระบบมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนดีขึ้น รวมถึงทำให้การกระจายของอากาศมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เกิด dead zone ของการถ่ายโอนออกซิเจนภายในถังกวนน้อยลง ส่วนการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศนั้น ทำให้มีอากาศสะสมในระบบมากขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อปริมาตรมากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการถ่ายโอนออกซิเจนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราการป้อนอากาศมากขึ้นจนทำให้ใบปั่นกวนไม่สามารถกระจายอากาศออกไปทั่วทั้งถังกวนได้ดีเหมือนเดิม จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง และทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนออกซิเจนภายในถังกวนแย่ง ดังนั้น ในการออกแบบเงื่อนไขการดำเนินการของถังหมัก เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนออกซิเจน ควรทำให้ความเร็วการปั่นกวนมีมากพอที่จะทำให้เกิดการกระจายตัวของอากาศแบบ completely gas disperse เพื่อให้เกิด dead zone ของการถ่าย

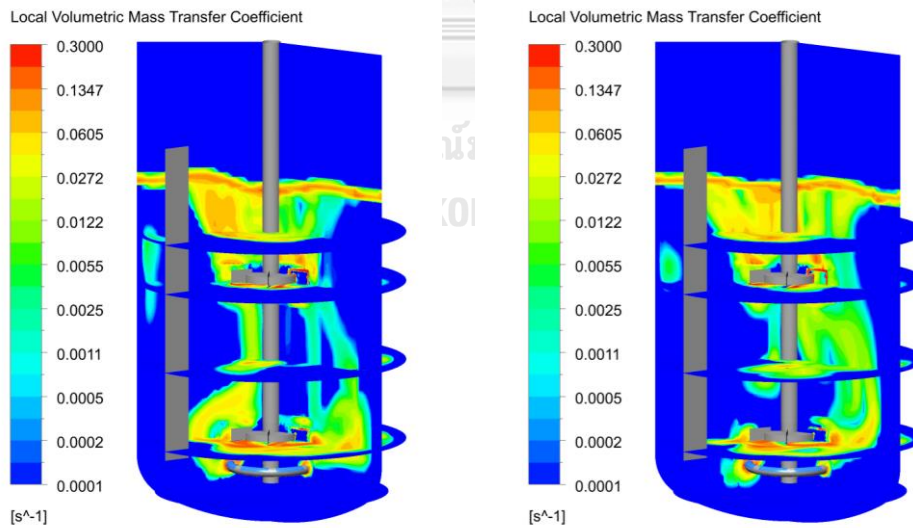
ไอออนออกซิเจนภายในถังกวนน้อยที่สุด และควบคุมอัตราการป้อนอากาศให้มากที่สุดโดยที่ยังคงสภาพการกระจายตัวแบบ completely gas disperse เอาไว้ได้ จะส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรดีที่สุด อย่างไรก็ตาม ในการดำเนินการจริงในถังหมัก ความเร็วในการปั่นกวนนั้นถูกจำกัด เนื่องจากความเร็วการปั่นกวนที่มากเกินไป อาจทำลายเซลล์ที่อยู่ในระบบถังหมัก รวมถึงปัญหาการเกิดฟองค้ำที่บริเวณเหนือผิวน้ำ นอกจากนี้ ในกรณีที่อัตราการป้อนอากาศที่ทำให้เกิดลักษณะการไหลแบบ completely gas disperse อาจมีค่าน้อย จนทำให้ออกซิเจนภายในระบบไม่เพียงพอต่อความต้องการของเซลล์ในระบบ ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการได้ ดังนั้นในสถานการณ์ดำเนินการจริงในถังหมัก จึงอาจไม่สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวแบบ completely gas disperse ได้





(ก)

(ข)

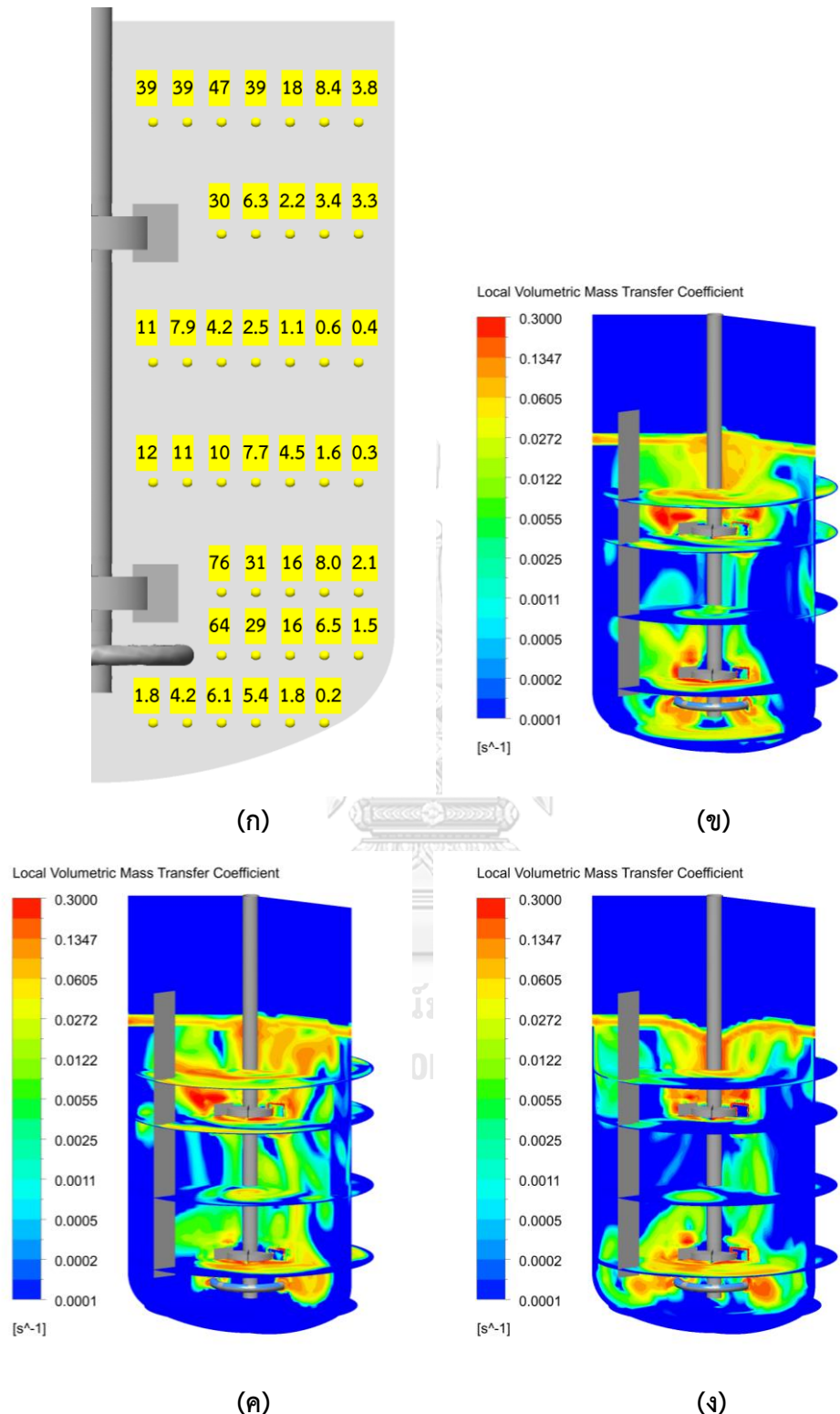


(ค)

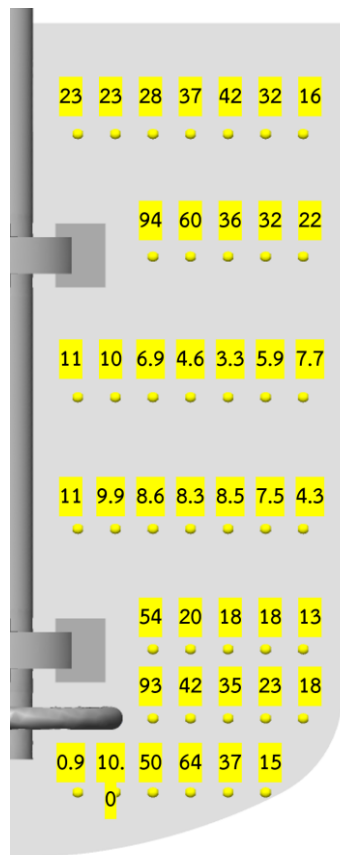
(ง)

รูปที่ 4.30 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ (1/s) ของกรณีศึกษา V1 (300RPM, 2.55LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^3$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

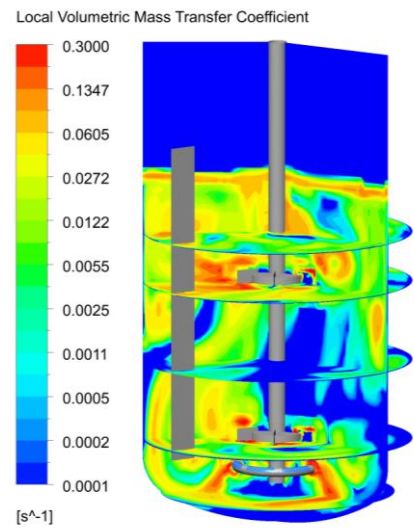




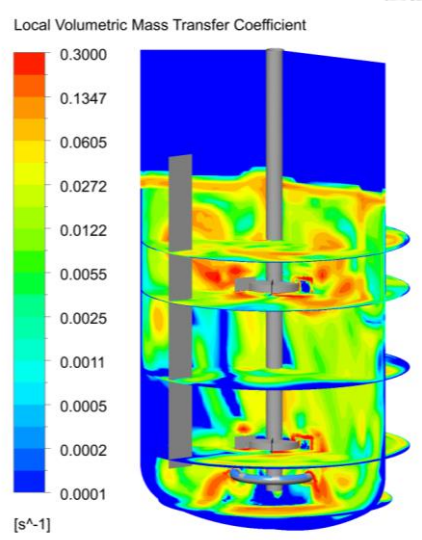
รูปที่ 4.31 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ (1/s) ของกรณีศึกษา V2 (400RPM, 2.55LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว  $\times 10^3$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



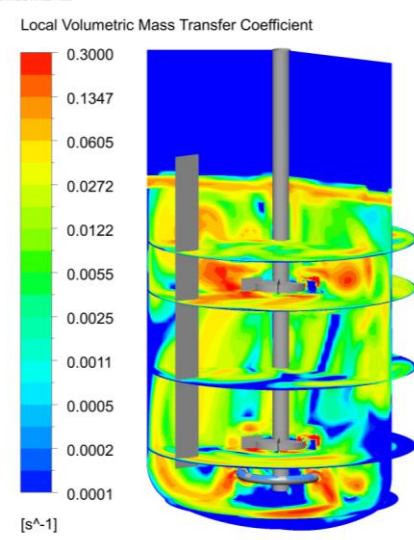
(ก)



(ข)

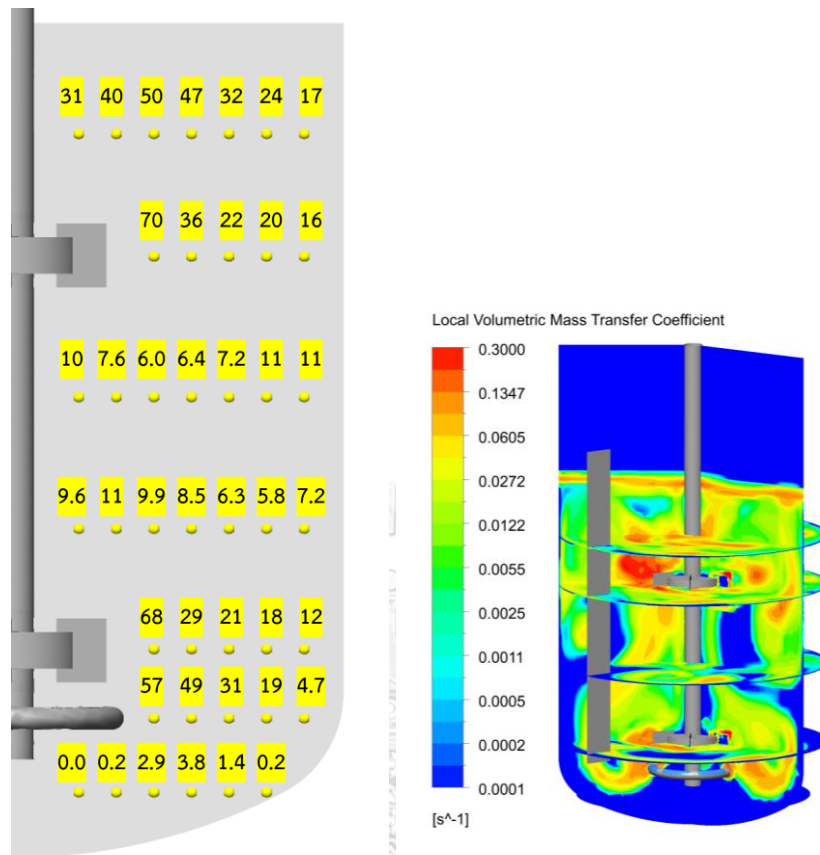


(ค)



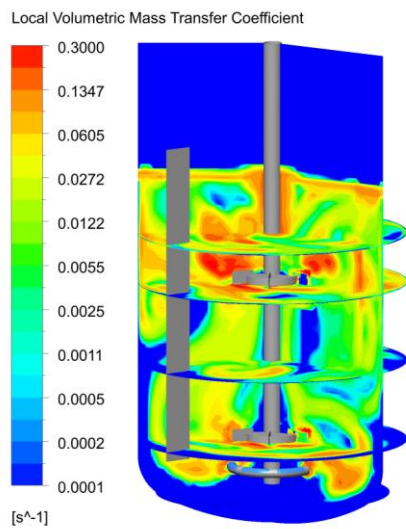
(ง)

รูปที่ 4.32 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ (1/s) ของกรณีศึกษา V3 (500RPM, 2.55LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^3$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

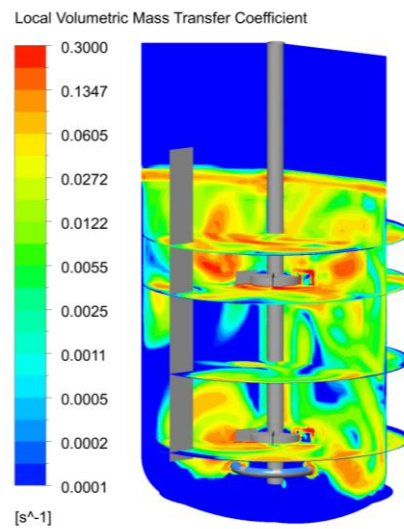


(ก)

(ข)

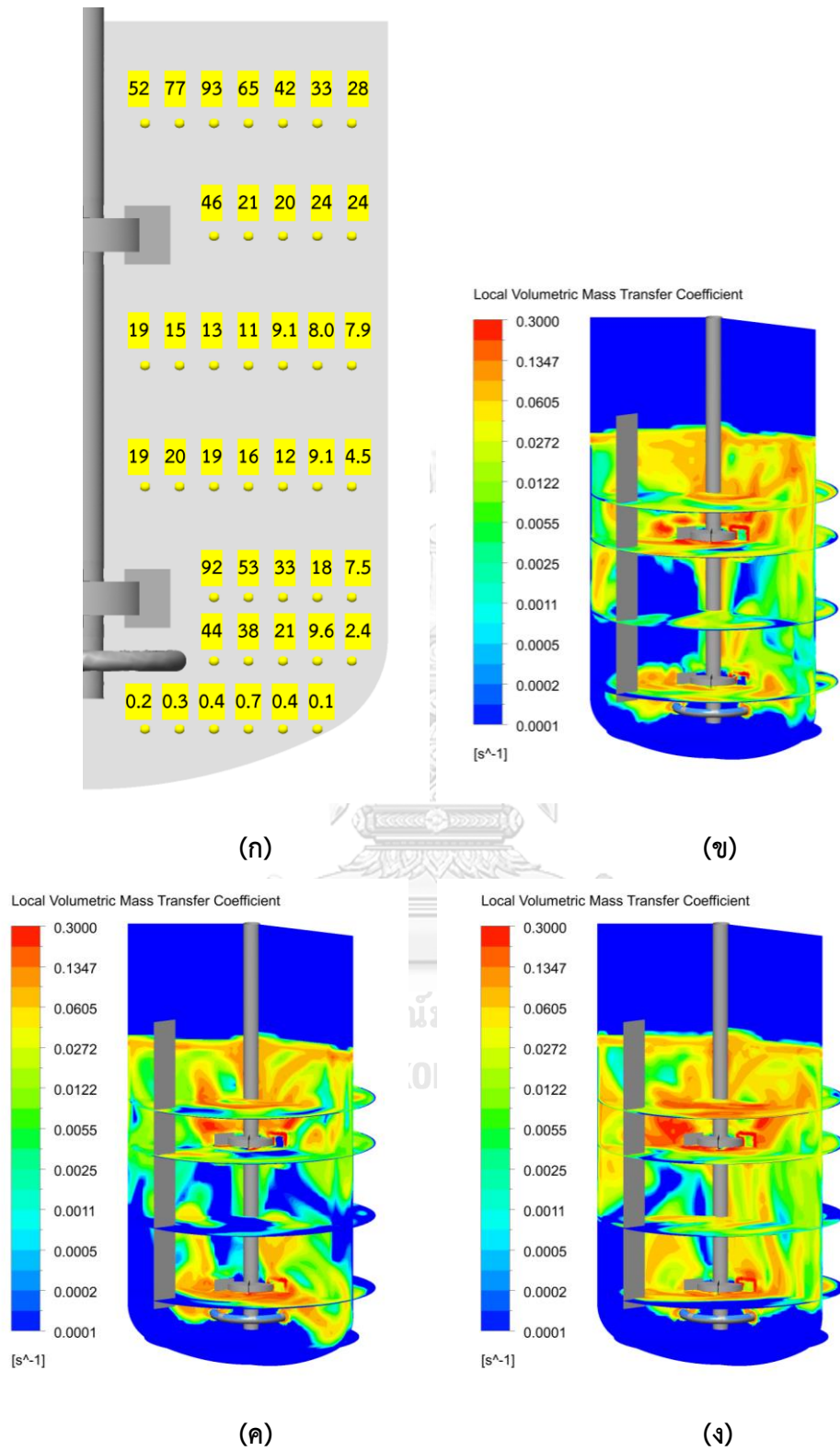


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.33 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ (1/s) ของกรณีศึกษา V4 (400RPM, 5.11LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^3$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



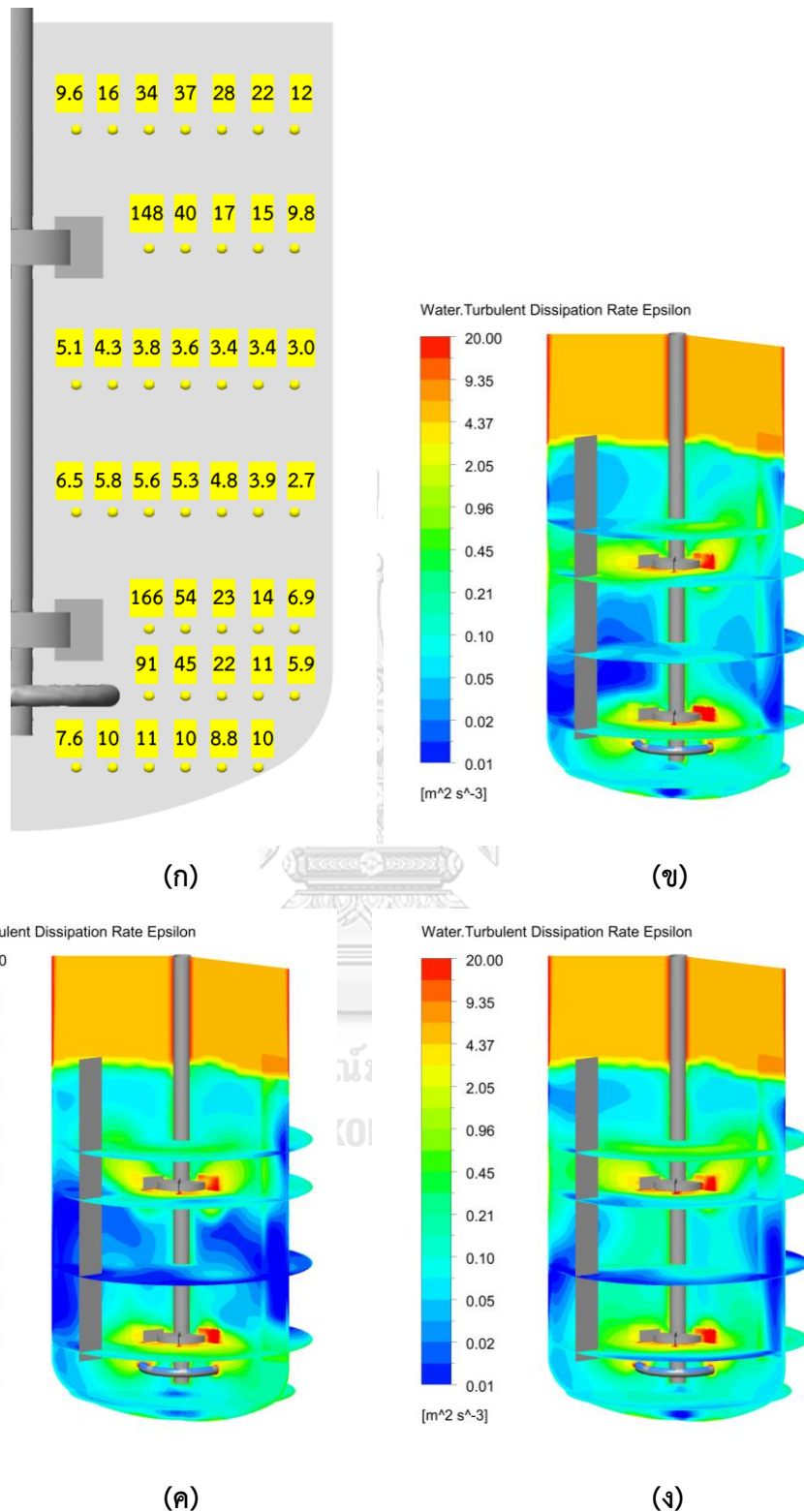
รูปที่ 4.34 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ (1/s) ของกรณีศึกษา V5 (400RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^3$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

#### 4.4. ผลการจำลองการไหล และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในถังกวนที่มีระยะระหว่างใบปั่นกวนต่างกัน

ในการพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างใบปั่นกวน จะอ้างอิงตามสภาวะการดำเนินการ V5 ที่ความเร็วการปั่นกวน 400 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนอากาศ 7.66 ลิตรต่อนาที เนื่องจากเป็นสภาวะจริงที่ใช้ในการดำเนินการของถังกวนในห้องปฏิบัติการ และเกิดปัญหาในการขยายขนาดของถังหมัก โดยการกำหนดกำลังต่อปริมาตร กับอัตราการป้อนอากาศต่อหน้าตัดคงที่ของไม่สามารถทำให้การถ่ายโอนออกซิเจนภายในระบบเหมือนกับระบบก่อนการขยายขนาดได้

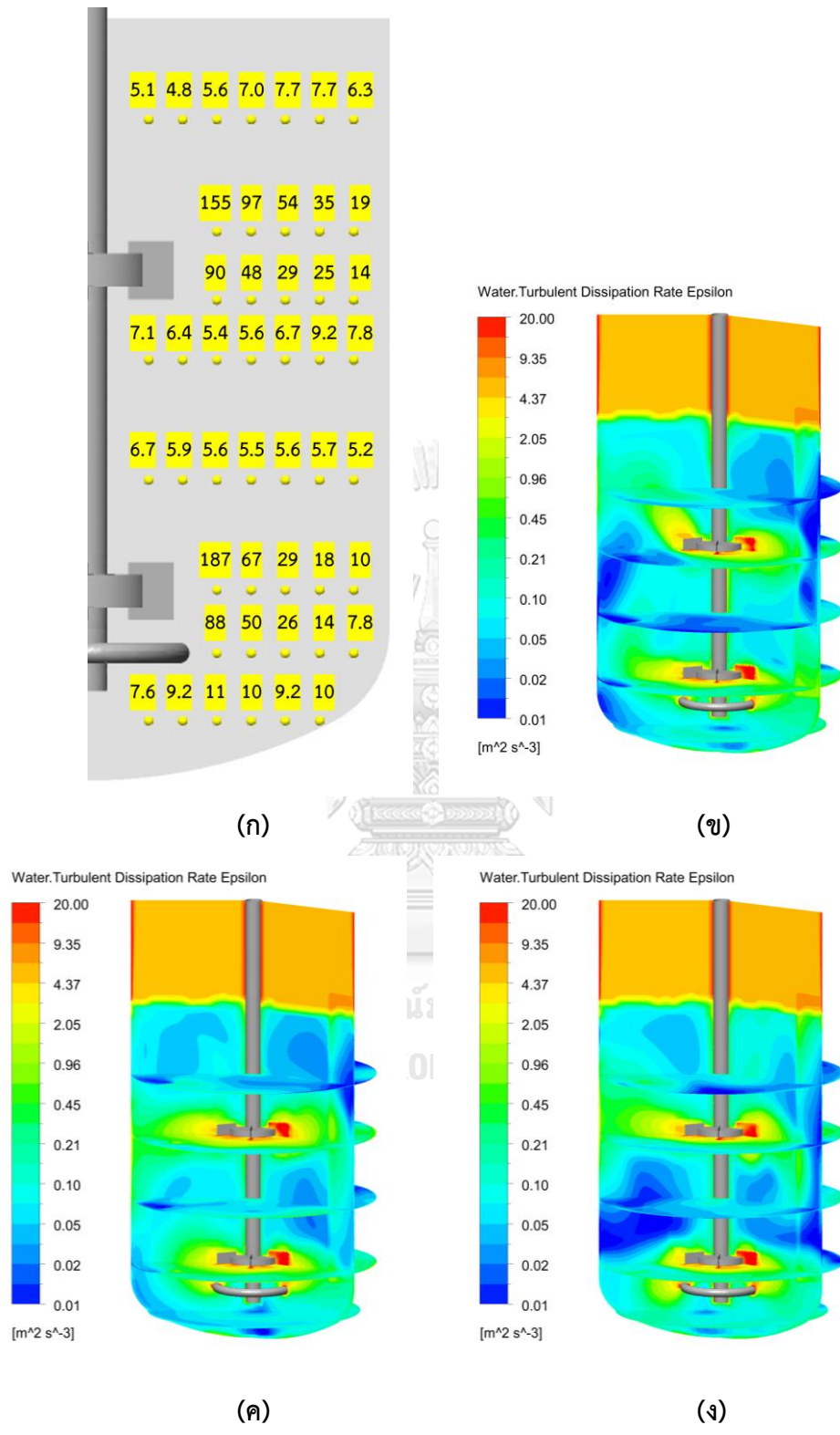
##### 4.4.1. การเปรียบเทียบอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

รูปที่ 4.35 ถึงรูปที่ 4.37 แสดงการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนภายในถังกวนที่มีระยะระหว่างใบปั่นกวนเป็น 1.8, 1.6, และ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางใบปั่นกวน จะเห็นว่าขนาดและลักษณะการกระจายของกำลังในระบบมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Hudcova, Machon, and Nienow 1989) สำหรับถังกวนที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิดรัศมีทอนเทอร์โบใบสองใบ เมื่อระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนมากกว่า 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบปั่นกวน ใบปั่นกวนแต่ละอันจะเป็นอิสระต่อกัน ไม่รบกวนกัน ทำให้ใบปั่นกวนแต่ละอันมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกระจายกำลังสู่ระบบ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.38 ซึ่งแสดงการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนภายในถังกวนที่มีระยะระหว่างใบปั่นกวนเป็น 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางใบปั่นกวน จะเห็นว่าขนาดและรูปแบบการกระจายของกำลังในระบบแตกต่างจาก 3 กรณีก่อนหน้านี้ เนื่องจากแต่ละใบปั่นกวนไม่เป็นอิสระต่อกัน ส่งผลให้เกิดการรบกวนกัน จะเห็นได้ว่าอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนในระบบมีแคในบริเวณระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองเท่านั้น ไม่สามารถกระจายกำลังไปในบริเวณด้านล่างของใบปั่นกวนใบล่างได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำแบบจำลองของ (Dendee 2018) โดยที่ระยะห่างระหว่างใบปั่นกวนของกรณี S4 ส่งผลให้ลักษณะการไหลเป็นแบบ Merging flow ซึ่งทำให้การกระจายตัวความเร็วในระบบมีค่าสูงที่บริเวณระหว่างใบปั่นกวน แต่มีค่าที่บริเวณอื่น ๆ น้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณี S1 ถึง S3

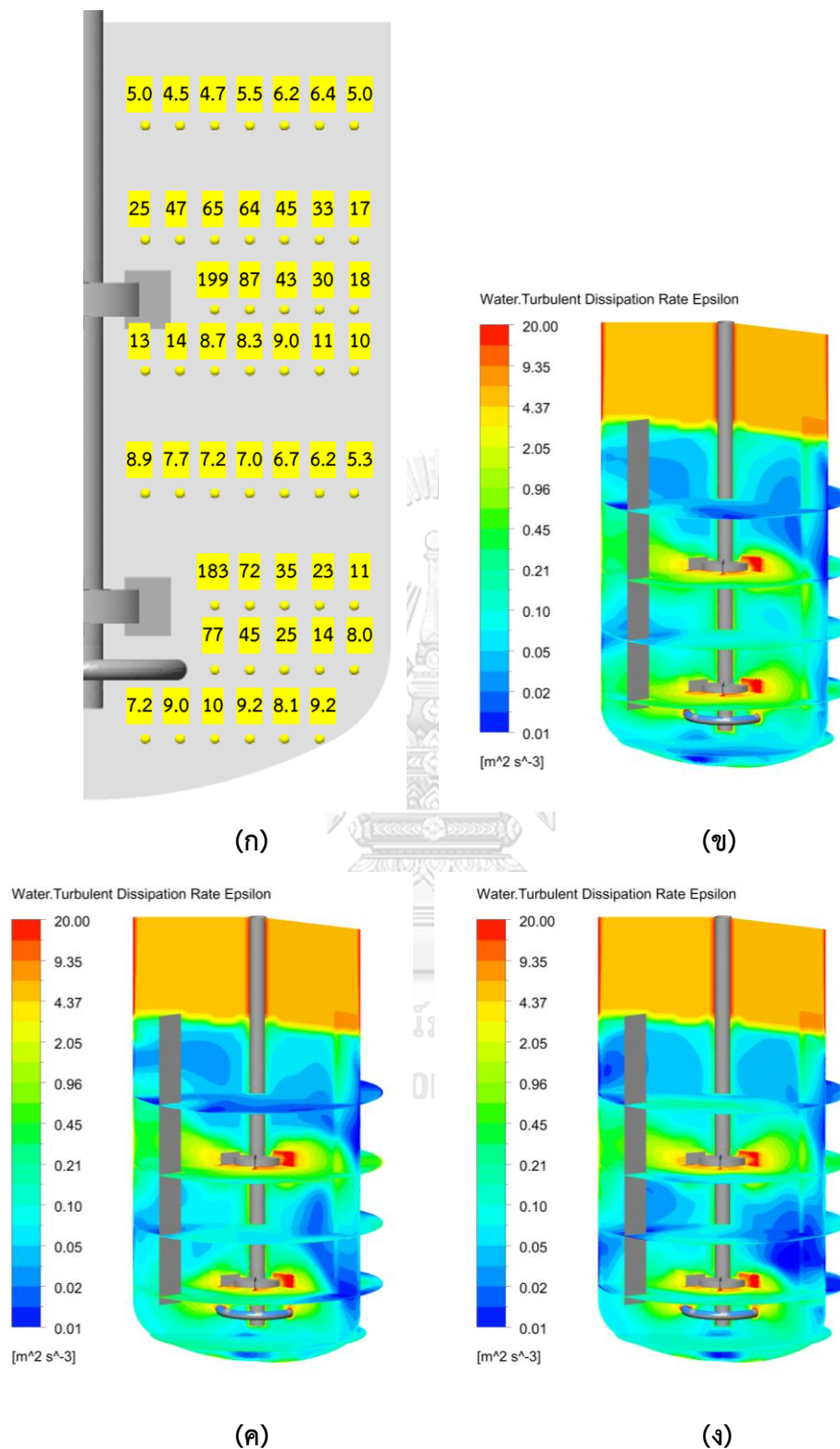


รูปที่ 4.35 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรณีศึกษา S1 (S:D=1.8, 400RPM 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว  $\times 10^2$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



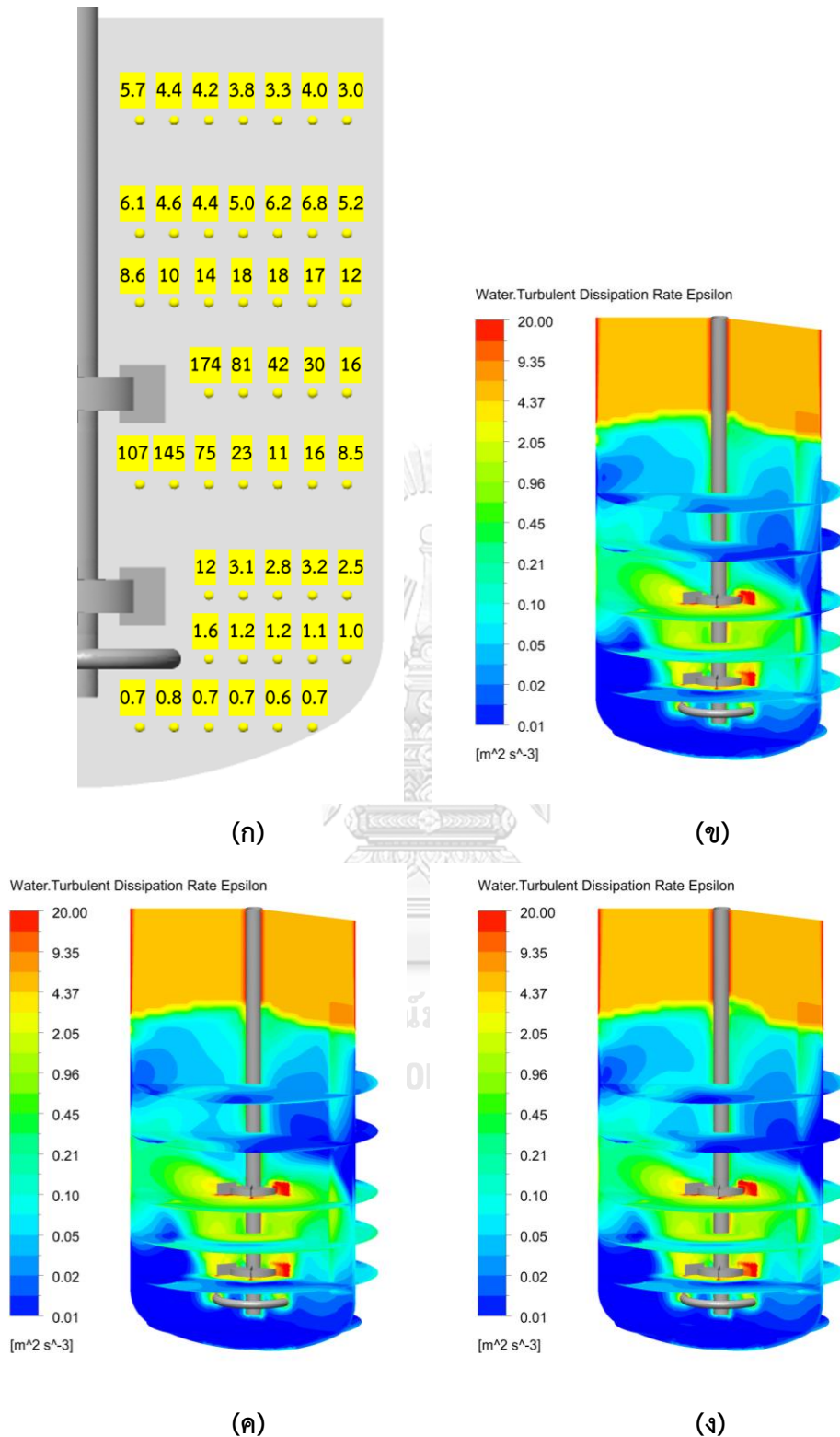


รูปที่ 4.36 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรรณีสึกษา S2 (S:D=1.6, 400RPM 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว  $\times 10^2$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



รูปที่ 4.37 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรณีสึกษา S3 (S:D=1.5, 400RPM 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^2$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ





รูปที่ 4.38 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรรณีศึกษา S4 (S:D=1.0, 400RPM 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^2$ , (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

#### 4.4.2. การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตร

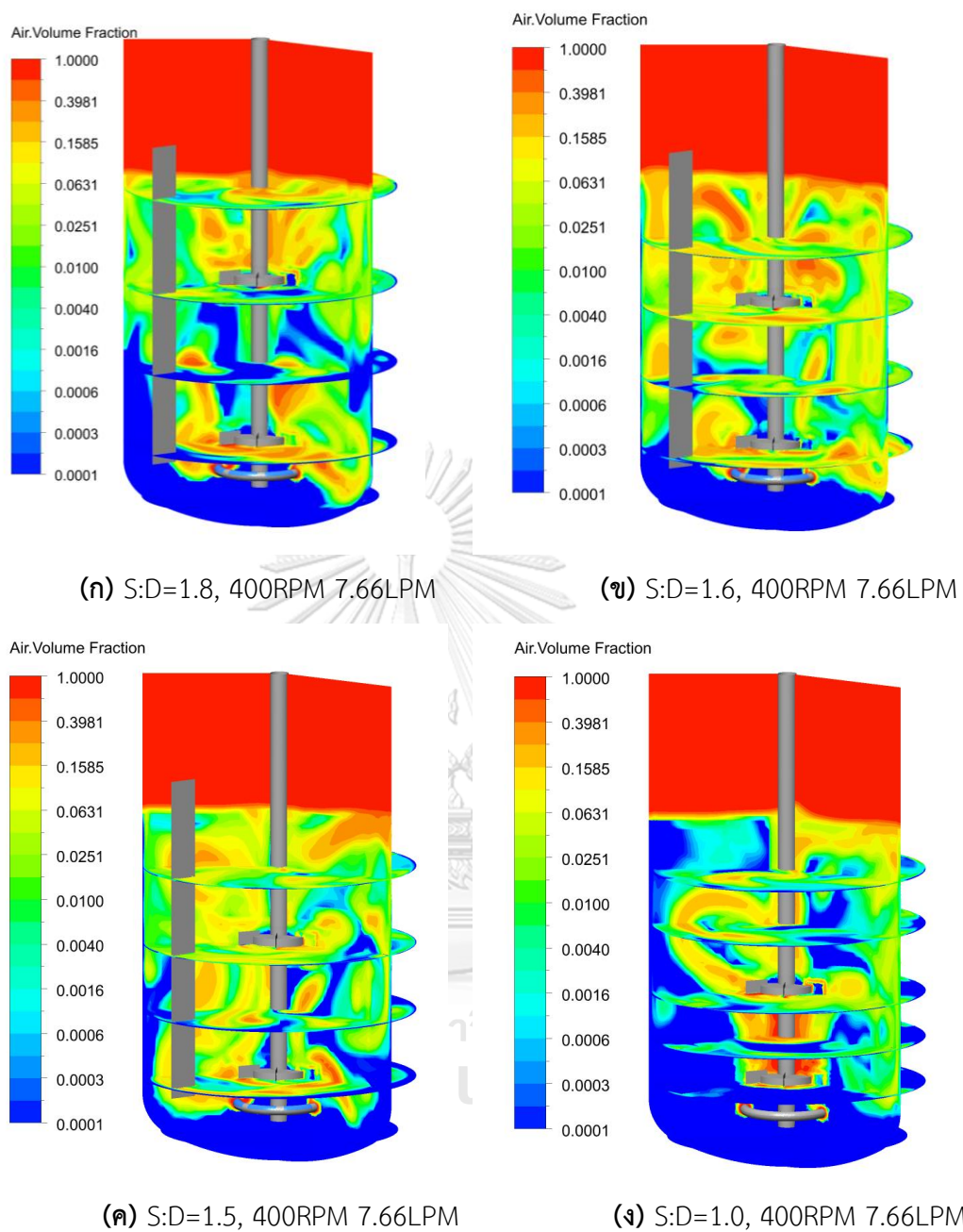
ผลการทำนายขนาดฟองเฉลี่ยของระบบจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดฟองภายในถังกวน แสดงดังตาราง 4.10 จะเห็นว่าผลการคำนวณจากแบบจำลองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกันกับสมการ 4.2 โดยขนาดฟองกรณี S1 ถึง S3 มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีพลศาสตร์ภายในถังกวนเหมือนกัน ทำให้มีกำลังต่อหน่วยปริมาตร และสัดส่วนของอากาศในระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นในกรณี S4 ซึ่งมีกำลังต่อหน่วยปริมาตร และสัดส่วนของอากาศในระบบน้อยกว่า เนื่องจากพลศาสตร์การไหลภายในถังกวนแตกต่าง

ตาราง 4.10 ผลการทำนายปริมาณอากาศสะสมในระบบ และการเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่คำนวณได้จากแบบจำลอง กับความสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดฟองในถังกวนของกรณี S1 ถึง S4

กรณีศึกษา	N	Q <sub>G</sub>	Gas holdup	ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย (mm.)		
	RPM	LPM	%	แบบจำลอง	สมการ 4.2	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
S1 (S:D=1.8)	400	7.66	5.47	3.60	5.90	-39.0
S2 (S:D=1.6)	400	7.66	5.34	3.49	5.62	-38.0
S3 (S:D=1.5)	400	7.66	5.04	3.30	5.51	-40.1
S4 (S:D=1.0)	400	7.66	4.35	3.12	5.84	-46.6

รูปที่ 4.39 แสดงภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในระบบ จะเห็นว่าในกรณี S1 ถึง S3 ขนาดของสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศ และลักษณะการกระจายตัวของอากาศ เป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือเป็นแบบ second loading ซึ่งสามารถกระจายอากาศออกไปได้ทั่วถึง กว้าง แต่ยังไม่สามารถทำให้อากาศวนกลับไปได้ถึงกวางได้ แต่เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของอากาศในกรณี S4 จะเห็นว่า มีลักษณะต่างจากในสามกรณีก่อนหน้า คือการกระจายตัวของอากาศ เป็นแบบ flooding กล่าวคือ ใบป่นกวนไม่สามารถกระจายอากาศออกไปรอบนอกของถังกวางได้ ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองของ (Hudcova, Machon, and Nienow 1989) เมื่อระยะระหว่างใบป่น กวนน้อยกว่า 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบป่นกวน ความเร็วการป่นกวนขั้นต่ำที่ ป้องกันไม่ให้เกิดลักษณะการไหลของวัฏภาคแก๊สเป็นแบบ flooding จะมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลจาก แบบจำลอง ซึ่งมีความเร็วการป่นกวน และอัตราการป้อนอากาศเท่ากัน แต่ในกรณี S4 ไม่สามารถทำ ให้อากาศกระจายตัวไปทั่วถึงกวางได้

เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนโดยปริมาตรเฉพาะที่ดังแสดงในรูปที่ 4.40 เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วน โดยปริมาตรของอากาศกรณี S1 ถึง S3 จะเห็นว่าค่อนข้างมีค่าสม่ำเสมอทั่วทั้งถังกวาง แต่กรณี S2 และ S3 มีค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในระบบที่ดีกว่ากรณี S1 เล็กน้อย โดยที่ความเร็วการป่น กวน และอัตราการป้อนอากาศเดียวกัน ปริมาณอากาศที่สะสมอยู่บริเวณใกล้ใบป่นกวนของกรณี S2 และ S3 จะมีค่าน้อยกว่ากรณี S1 และที่บริเวณระหว่างใบป่นกวนทั้งสองอัน ค่าสัดส่วนโดยปริมาตร ของอากาศในกรณี S2 และ S3 จะมีค่ามากกว่ากรณี S1 จึงสามารถกล่าวได้ว่ากรณี S2 และ S3 มีความสามารถในการกระจายอากาศได้ดีกว่ากรณี S1 ส่วนในกรณี S4 เนื่องจากลักษณะการกระจาย ตัวแยกว่ากรณีอื่น ๆ ใบป่นกวนใบล่างไม่สามารถกระจายอากาศออกไปรอบ ๆ ถังกวางได้ เกิดเป็น ลักษณะการไหลแบบ flooding ทำให้สัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศที่บริเวณรอบนอกถังกวางที่ ระดับใบป่นกวนใบล่างมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จนถึงระดับใบป่นกวนใบบน จึงเริ่มมีอากาศกระจายตัวออก จากบริเวณแกนหมุนได้ โดยปริมาณอากาศที่สะสมมีค่าใกล้เคียงกับกรณีอื่น ๆ ที่บริเวณรอบใบป่น กวนใบบน แต่ยังคงมีค่าน้อยอยู่ที่บริเวณผนังของถังกวาง

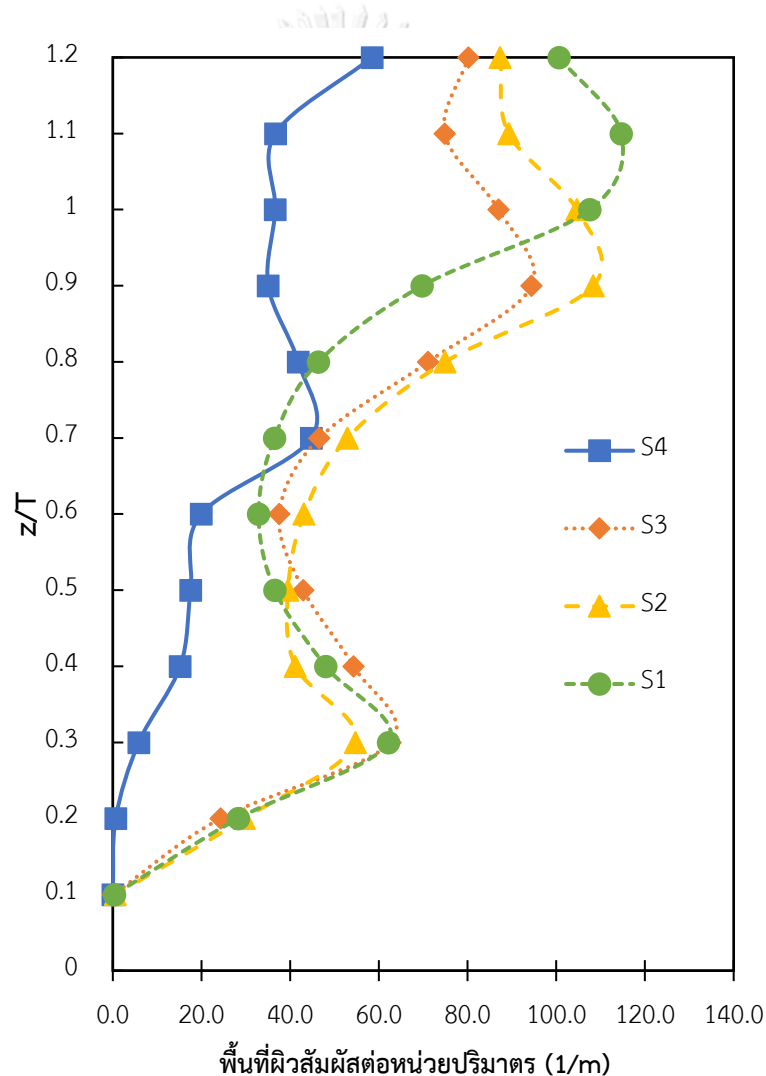


รูปที่ 4.39 ภาพคอนทัวร์แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในระบบ

(ก) กรณี S1, (ข) กรณี S2, (ค) กรณี S3, (ง) กรณี S4

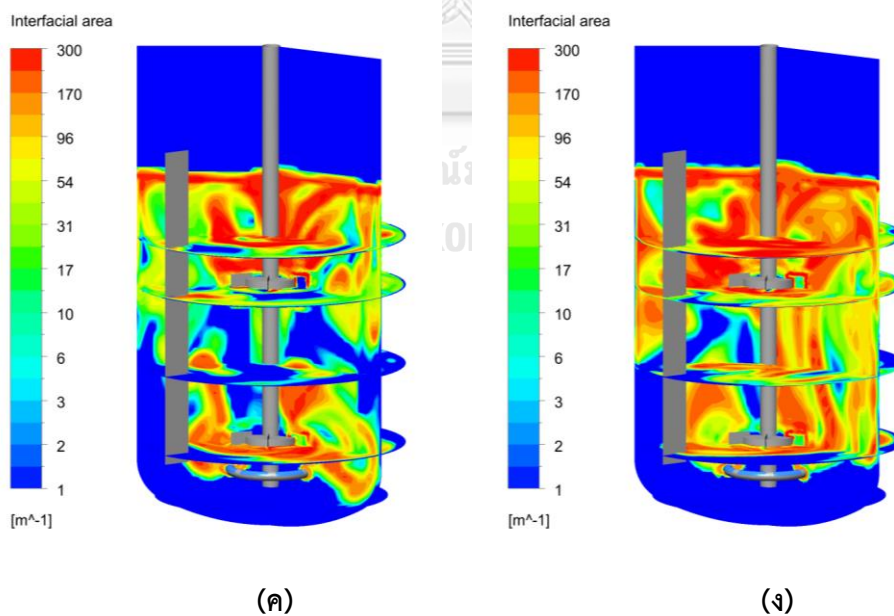
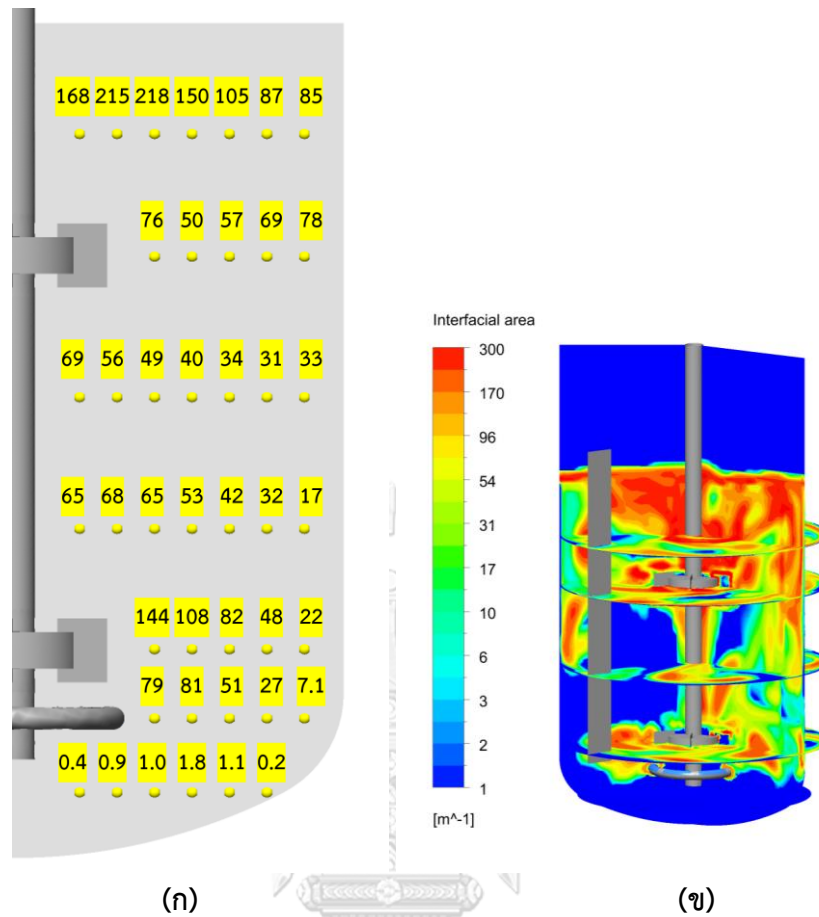


รูปที่ 4.41 แสดงค่าเฉลี่ยตามระดับความสูงของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรภายในระบบของกรณี S1 ถึง S4 จะเห็นได้ว่าในกรณี S1 ถึง S3 ขนาดของค่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยในกรณี S2 และ S3 มีค่าที่บริเวณระหว่างใบป็นกวนสูงกว่ากรณี S1 เล็กน้อย และมีความแตกต่างกันที่บริเวณยอดของค่าสูงสุด ซึ่งขึ้นกับระยะของใบในแต่ละกรณี แต่ในกรณี S4 จะเห็นได้ว่ามีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรน้อยกว่าสามกรณีแรกอย่างชัดเจน เนื่องจากลักษณะการกระจายของอากาศที่แตกต่างกัน



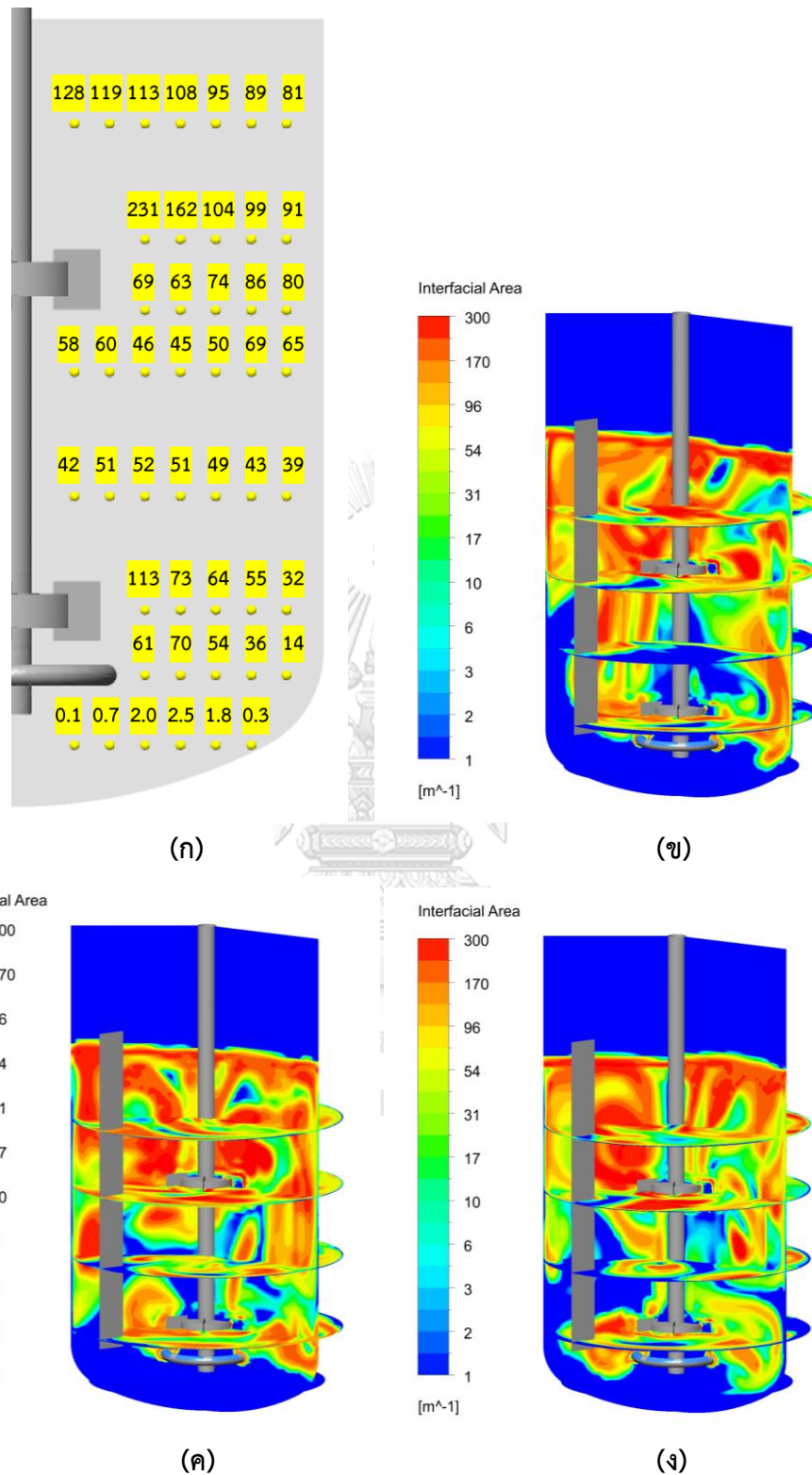
รูปที่ 4.41 กราฟแสดงพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเฉลี่ยกับความสูงไร้หน่วยของกรณี S1 ถึง S4

รูปที่ 4.42 ถึง รูปที่ 4.45 แสดงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรเฉพาะที่ของกรณี S1 ถึง S4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากรณี S1 ถึง S3 มีการกระจายของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรไปทั่วทั้งถังกวนได้เหมือนกัน จากรูปที่กรณี S1 จะมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรบริเวณเหนือใบปั่นกวนใบบนสูงกว่าเล็กน้อย ส่วนกรณี S2 และ S3 สามารถกระจายค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรในระบบได้ดีกว่าเล็กน้อย โดยจะเห็นว่าที่บริเวณใกล้ผนังของถังกวนค่อนข้างมีค่าสม่ำเสมอในทุกระดับความสูง แต่ในกรณี S4 เนื่องจากการกระจายตัวของอากาศไม่ดี จึงทำให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรเฉพาะที่แย่มากตามไปด้วย เนื่องจากรูปแบบการไหลของอากาศเป็นแบบ flooding ทำให้บริเวณใบปั่นกวนใบล่าง ไม่สามารถกระจายอากาศออกไปรอบนอกของถังกวนได้ ทำให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรน้อยมาก นอกจากนี้ใบปั่นกวนใบบนไม่สามารถกระจายอากาศออกไปได้จนถึงผนังของถังกวน และเกิดการวนกลับสู่บริเวณระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองได้ จึงทำให้เกิด dead zone ของค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรภายในระบบในหลายบริเวณ

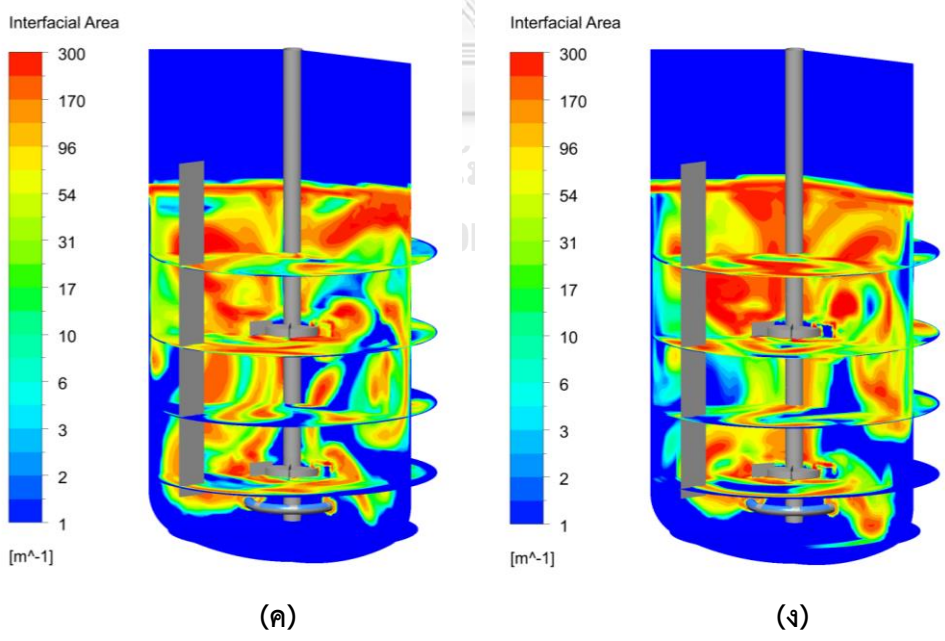
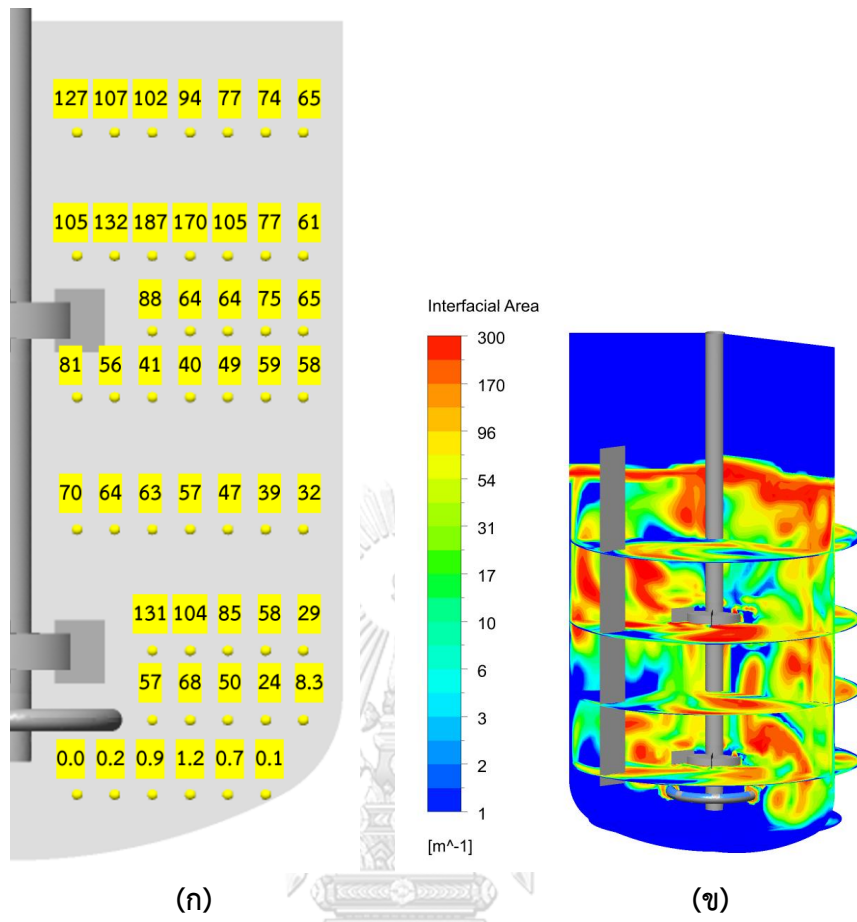


รูปที่ 4.42 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $m^2/m^3$ ) ของกรณีศึกษา S1 (S:D=1.8, 400RPM 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

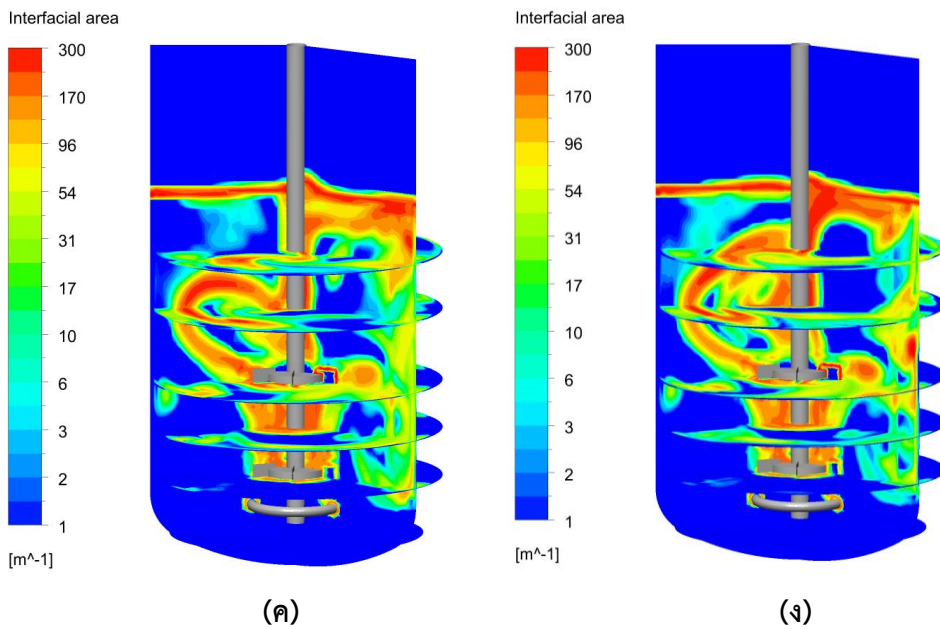
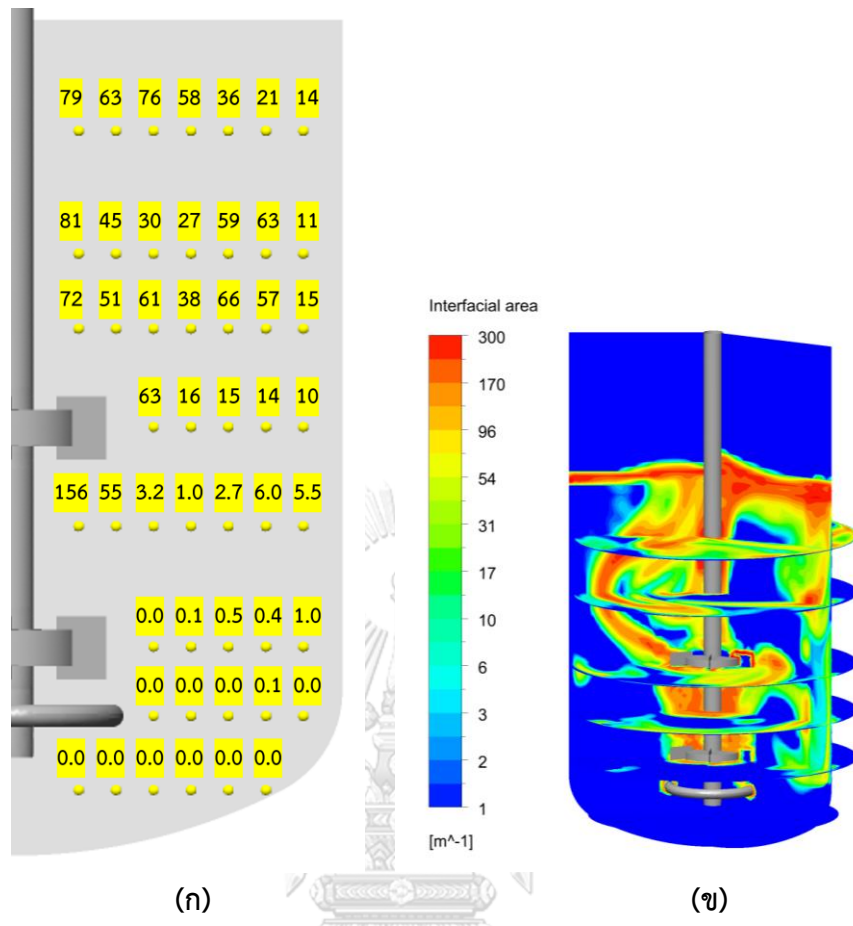




รูปที่ 4.43 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $m^2/m^3$ ) ของกรณีศึกษา S2 (S:D=1.6, 400RPM 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



รูปที่ 4.44 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $m^2/m^3$ ) ของกรณีศึกษา S3 (S:D=1.5, 400RPM 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

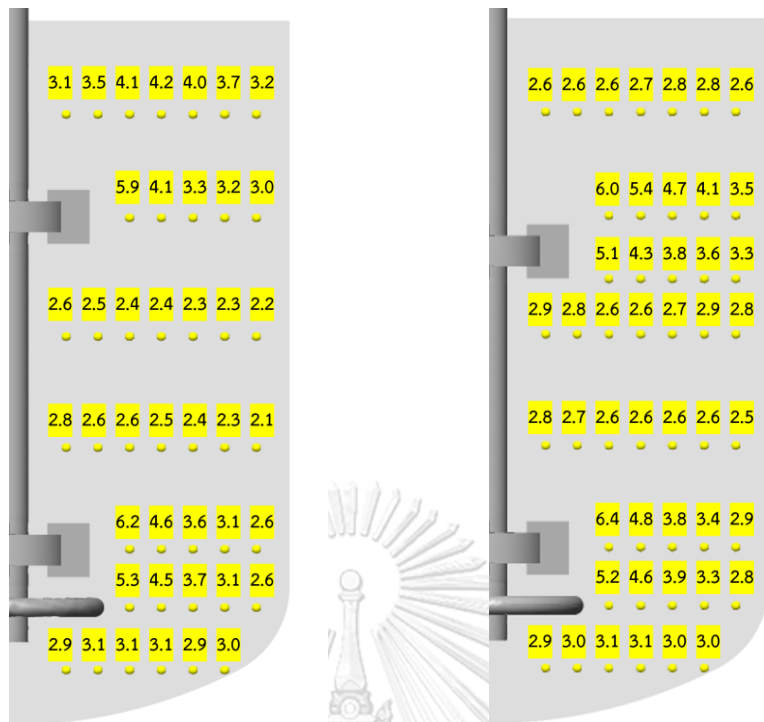


รูปที่ 4.45 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $m^2/m^3$ ) ของกรณีศึกษา S4 (S:D=1.0, 400RPM 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

#### 4.4.3. การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร

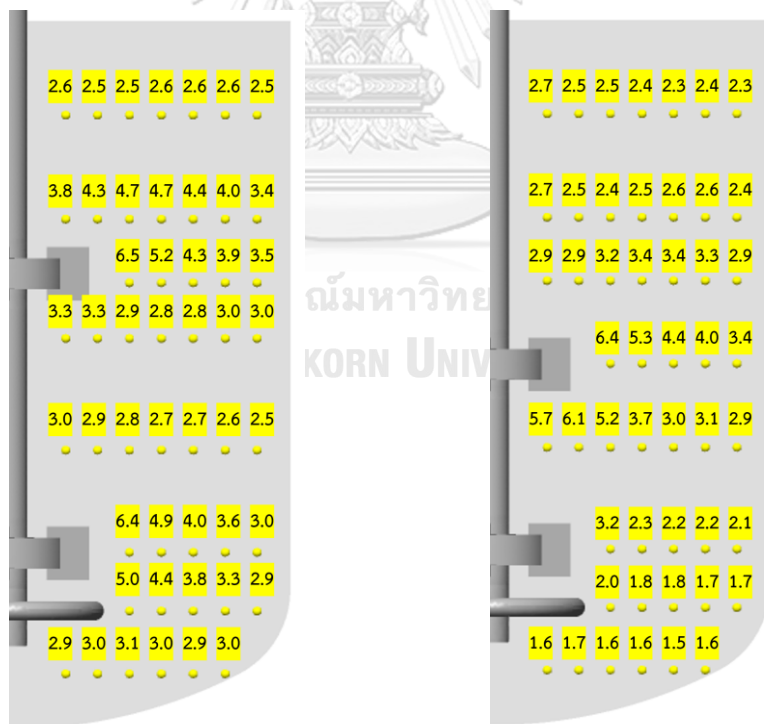
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่เฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของกรณี S1 ถึง S4 แสดงดังรูปที่ 4.46 จะเห็นได้ว่าในกรณี S1 ถึง S3 มีลักษณะการกระจายของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่ในรูปแบบเดียวกันตามลักษณะของค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ โดยมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ ในกรณี S1 มีค่าบริเวณเหนือใบปั่นกววนใบบนสูงกว่ากรณี S2 และ S3 เล็กน้อย แต่กรณี S2 และ S3 มีค่าที่บริเวณระหว่างใบปั่นกววนทั้งสองอันดีกว่ากรณี S1 ส่วนในกรณี S4 จะเห็นว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่บริเวณแกนหมุนระหว่างใบปั่นกววนทั้งสองอันสูงกว่าในกรณีอื่น ๆ ใบบริเวณเหนือใบปั่นกววนอันบนมีค่าใกล้เคียงกับทั้งสามกรณีก่อนหน้า แต่ที่บริเวณใบปั่นกววนอันล่างไปจนถึงกันถึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่น้อยกว่าบริเวณอื่น ๆ ภายในระบบ และน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งสี่กรณี





(ก) S:D=1.8, 400RPM 7.66LPM

(ข) S:D=1.6, 400RPM 7.66LPM



(ค) S:D=1.5, 400RPM 7.66LPM

(ง) S:D=1.0, 400RPM 7.66LPM

รูปที่ 4.46 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่เฉลี่ยที่สภาวะคงตัว ( $10^{-4}$  m/s)

(ก) กรณี S1, (ข) กรณี S2, (ค) กรณี S3, (ง) กรณี S4

เมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยรวมทั้งระบบของแต่ละตัวแปรที่พิจารณา แสดงดังตาราง 4.11 จะเห็นว่าที่สภาวะการดำเนินการเดียวกัน จะเห็นได้ว่าทั้งสี่กรณีมีค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนใกล้เคียงกันถึงแม้การกระจายตัวของค่าดังกล่าวของกรณี S4 จะแยกไว้ในกรณีอื่น ๆ แต่เนื่องจากบริเวณระหว่างใบปั่นกวรมีขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนสูง ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการไหลของใบปั่นกวรมที่เสริมกันในบริเวณดังกล่าว ทำให้มีกำลังต่อมวลที่บริเวณนั้นสูงขึ้น ทำให้มีค่าเฉลี่ยที่ดีขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของวัฏภาคอากาศ กรณี S1 ถึง S3 มีค่าเฉลี่ยของทุกตัวแปรใกล้เคียงกัน เนื่องจากทั้งสามกรณีสามารถกระจายอากาศออกไปได้ทั่วทั้งระบบ และขนาดฟองที่ใกล้เคียงกัน ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรใกล้เคียงกันด้วย แต่เมื่อพิจารณาในกรณี S4 ถึงแม้ขนาดของฟองอากาศ และปริมาณอากาศที่สะสมในระบบไม่ต่างจากทั้งสามกรณีก่อนหน้านัก แต่กลับมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอากาศกระจายตัวไม่ทั่วทั้งระบบ ทำให้ถึงแม้จะมีขนาดฟอง และปริมาณอากาศที่สะสมอยู่ในระบบใกล้เคียงกับกรณีอื่นแต่อากาศกระจุกตัวอยู่ในบริเวณเดียว คือบริเวณแกนหมุน และเหนือใบปั่นกวรมอันบนเท่านั้น จึงส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรน้อยกว่า ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมน้อยกว่ากรณี S1 ถึง S3 ถึงแม้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนใกล้เคียงกันก็ตาม

ตาราง 4.11 ค่าเฉลี่ยรวมทั้งระบบที่คำนวณได้จากแบบจำลองของกรณี S1 ถึง S4

Case	$d_{32}$ mm	Gas holdup %	Interfacial area $m^2/m^3$	$k_L$ $\times 10^{-4} m/s$	$k_L a$ 1/s
S1 (S:D=1.8)	3.60	5.47	66.3	3.10	0.0238
S2 (S:D=1.6)	3.49	5.34	69.4	3.17	0.0242
S3 (S:D=1.5)	3.30	5.04	65.4	3.21	0.0231
S4 (S:D=1.0)	3.12	4.35	37.6	3.06	0.0128

\*ดำเนินการที่ความเร็วการปั่นกวรม 400 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนอากาศ 7.66 ลิตรต่อนาที

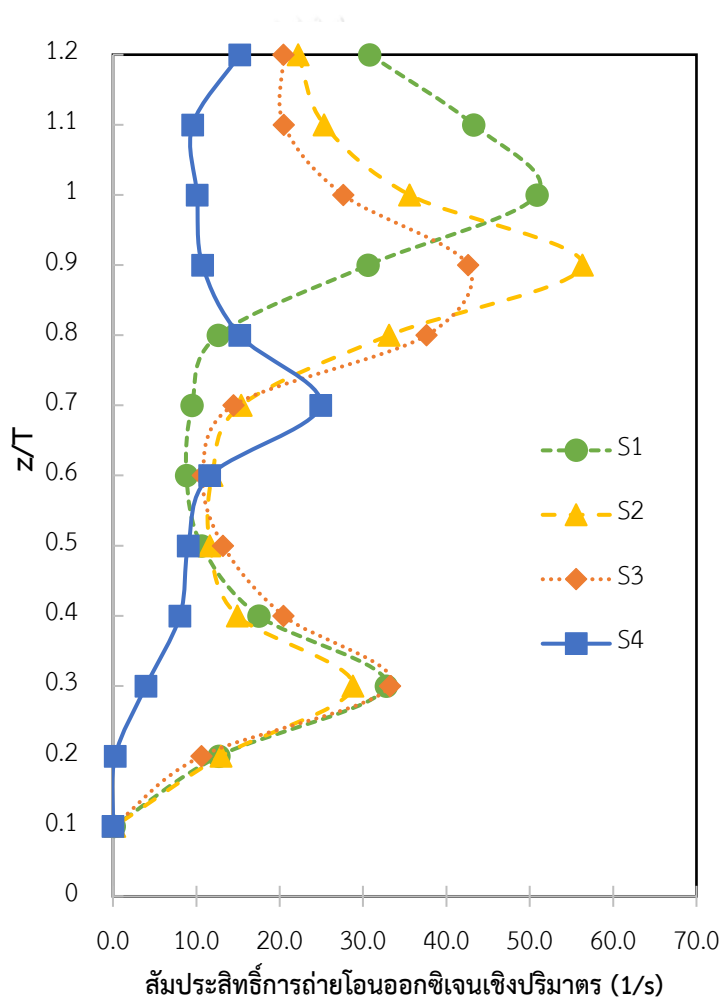
เมื่อพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างใบป่นกวนที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบ ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตาราง 4.12 จะเห็นว่าในกรณี S1 ถึง S3 ความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นตามสมการ 4.1 สามารถทำนายผลได้โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ แต่ในกรณี S4 จะเห็นได้ว่าไม่สามารถความสัมพันธ์ดังกล่าวในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบนี้ได้ถึงแม้กำลังต่อหน่วยปริมาตรยังอยู่ในช่วงที่ใช้พัฒนาความสัมพันธ์ขึ้นมาก็ตาม ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างใบป่นกวนมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบ หากระยะที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นส่งผลให้พลศาสตร์ภายในระบบเปลี่ยนไปจากรูปแบบที่ใช้ในการพัฒนาความสัมพันธ์ขึ้น ถึงแม้จะดำเนินการอยู่ในสภาวะกำลังต่อปริมาตร หรือ อัตราการป้อนอากาศต่อพื้นที่หน้าตัดในช่วงเดียวกัน

ตาราง 4.12 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบที่มีระยะห่างระหว่างใบป่นกวนต่างกันที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับสมการ 4.1

กรณี	P/V W/m <sup>3</sup>	u <sub>G</sub> mm/sec.	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร		
			แบบจำลอง	สมการ 4.1	ความคลาดเคลื่อน
S1 (S:D=1.8)	311.6	5.23	0.0238	0.0216	-9.1
S2 (S:D=1.6)	348.7	5.23	0.0242	0.0230	-4.8
S3 (S:D=1.5)	343.5	5.23	0.0231	0.0228	-1.3
S4 (S:D=1.0)	241.1	5.23	0.0128	0.0188	47.3

รูปที่ 4.47 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉลี่ยตามระดับความสูงภายในถังกวน ในกรณี S1 ถึง S3 ลักษณะของค่าเฉลี่ยตามความสูงมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน โดยบริเวณตั้งแต่ใบป่นกวนใบล่างจนถึงบริเวณระหว่างใบป่นกวนมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกันที่ลักษณะของค่าสูงสุดอยู่ที่ระดับความสูงของใบป่นกวนใบบนของแต่ละกรณี ซึ่งในกรณี S1 จะเห็นได้ว่ามียอดฟิคอยู่ที่ระยะสูงกว่า ทำให้ค่าบริเวณเหนือใบป่นกวนใบบนจนถึงผิวน้ำมีค่าสูงกว่ากรณี S2 และ S3 แต่ในช่วงระหว่างใบป่นกวนซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรน้อยเป็นบริเวณกว้างกว่าสองกรณีดังกล่าว ส่วนในกรณี S2 และ S3 จะเห็นได้ว่าบริเวณยอดฟิคของค่าสัมประสิทธิ์การถ่าย

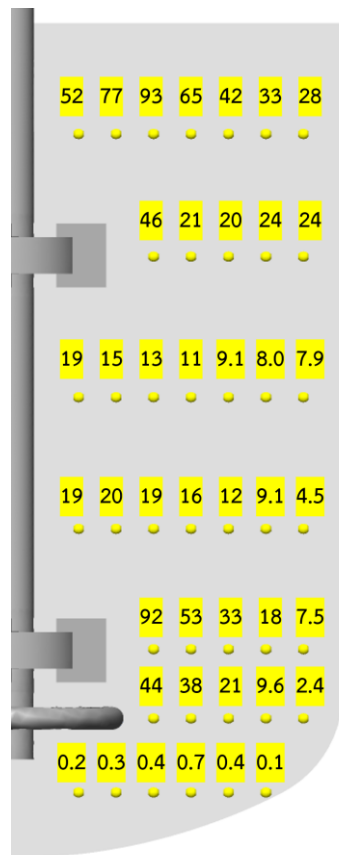
ไอออนออกซิเจนเชิงปริมาตรที่ระดับความสูงของใบป่นกวนใบบนใกล้กัน แต่กรณี S2 มีค่าสูงกว่าและพืคกว้างกว่า ส่วนในกรณี S4 จะเห็นได้ว่า เนื่องจากระยะระหว่างใบป่นกวนเปลี่ยนแปลงจนทำให้ลักษณะการไหลภายในถังกวนเปลี่ยนไปในทางที่แยลง ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายไอออนออกซิเจนเชิงปริมาตรต่ำกว่าทั้งสามกรณีข้างต้นในทุกระดับความสูง โดยจะเห็นว่าตั้งแต่ความสูงกันถึงจนถึงระดับความสูงของใบป่นกวนใบบน จะมีความสามารถในการถ่ายไอออนออกซิเจนต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ในระบบ จนกระทั่งถึงระดับใบป่นกวนใบบน ซึ่งอากาศเริ่มกระจายออกรอบนอกแกนหมุนได้ จึงเริ่มมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายไอออนออกซิเจนเชิงปริมาตรสูงขึ้นเล็กน้อย



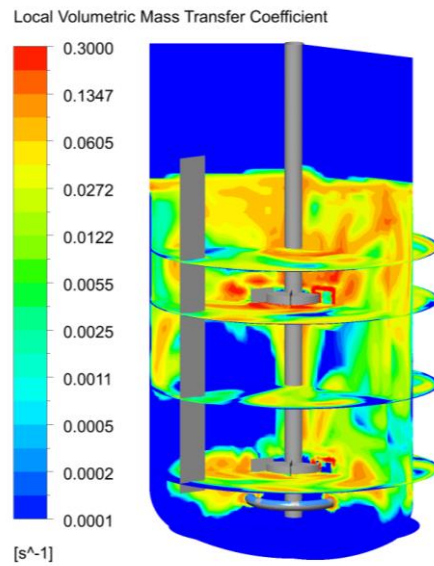
รูปที่ 4.47 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายไอออนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉลี่ย กับความสูงไร่น้ำในระบบที่มีระยะระหว่างใบป่นกวนต่างกัน



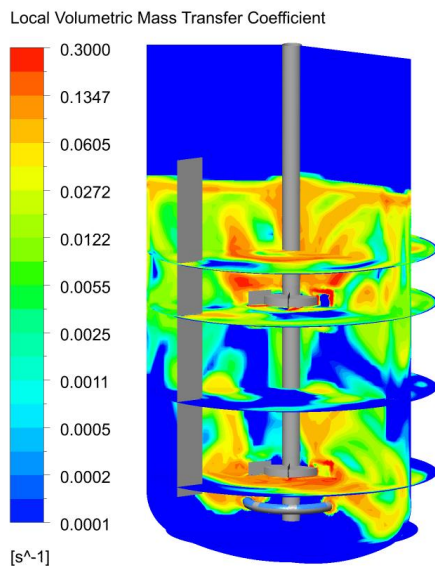
รูปที่ 4.48 ถึงรูปที่ 4.50 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ของกรณี S1 ถึง S3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งสามกรณีมีการกระจายของค่าที่ดีในทุก ๆ บริเวณของถังกวน โดยมี dead zone เกิดขึ้นบริเวณก้นถังกวนเท่านั้น ในกรณี S1 จะเห็นได้ว่าที่ระยะระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองใบมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรที่บริเวณใกล้ผนังของถังกวนน้อยกว่าในบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวมีอากาศไหลวนกลับมาในบริเวณนี้น้อยเนื่องจากน้ำในบริเวณเริ่มมีความเร็วลดลงจนพาอากาศมาตามแนวการเคลื่อนที่ได้น้อยลง รวมถึงการกระจายของค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนต่ำ จึงส่งผลให้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนต่ำตามไปด้วย และฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรในบริเวณนี้น้อยกว่าบริเวณอื่น ส่วนในกรณี S2 และ S3 มีการกระจายของค่าที่ดีกว่าในบริเวณระหว่างใบปั่นกวนทั้งสองใบ และมีค่าสม่ำเสมอตั้งแต่บริเวณใกล้แกนหมุนจนไปถึงบริเวณผนังของถังกวน นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรปริมาตรที่บริเวณใบปั่นกวนใบบนของกรณี S2 มีค่าสูงกว่ากรณี S1 และ S3 เนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรสูงกว่า ต่อมาในรูปที่ 4.51 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ของกรณี S4 จะเห็นได้ว่ามี dead zone ของการถ่ายโอนออกซิเจนภายในระบบในหลายบริเวณตั้งแต่บริเวณก้นถังกวนจนถึงระยะระหว่างใบปั่นกวน เนื่องจากไม่มีอากาศไหลวนอยู่ในระบบ ส่วนบริเวณใบปั่นกวนใบบน ถึงแม้จะเริ่มกระจายอากาศไปรอบนอกของถังกวนได้ แต่ยังคงมีความสามารถในการถ่ายโอนออกซิเจนต่ำ อยู่ดีเมื่อเทียบกับที่ตำแหน่งเดียวกันในกรณี S1 ถึง S3 เนื่องจากใบปั่นกวนมีการรบกวนกันส่งผลให้การกระจายความเร็วที่แยกว่า ไม่สามารถกระจายอากาศออกไปได้ดีพอ รวมถึงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่ต่ำกว่า จึงยังส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่น้อยลงไปด้วย



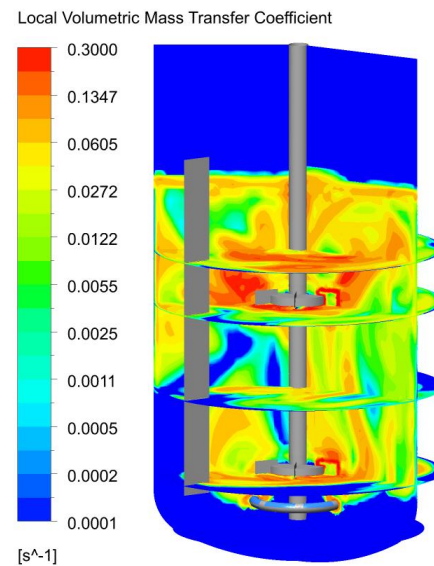
(ก)



(ข)

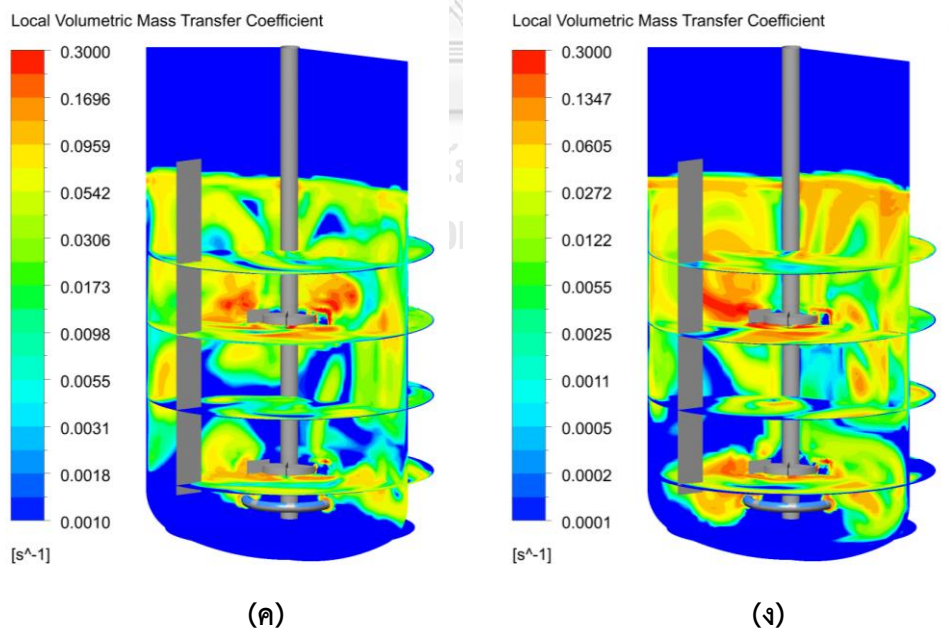
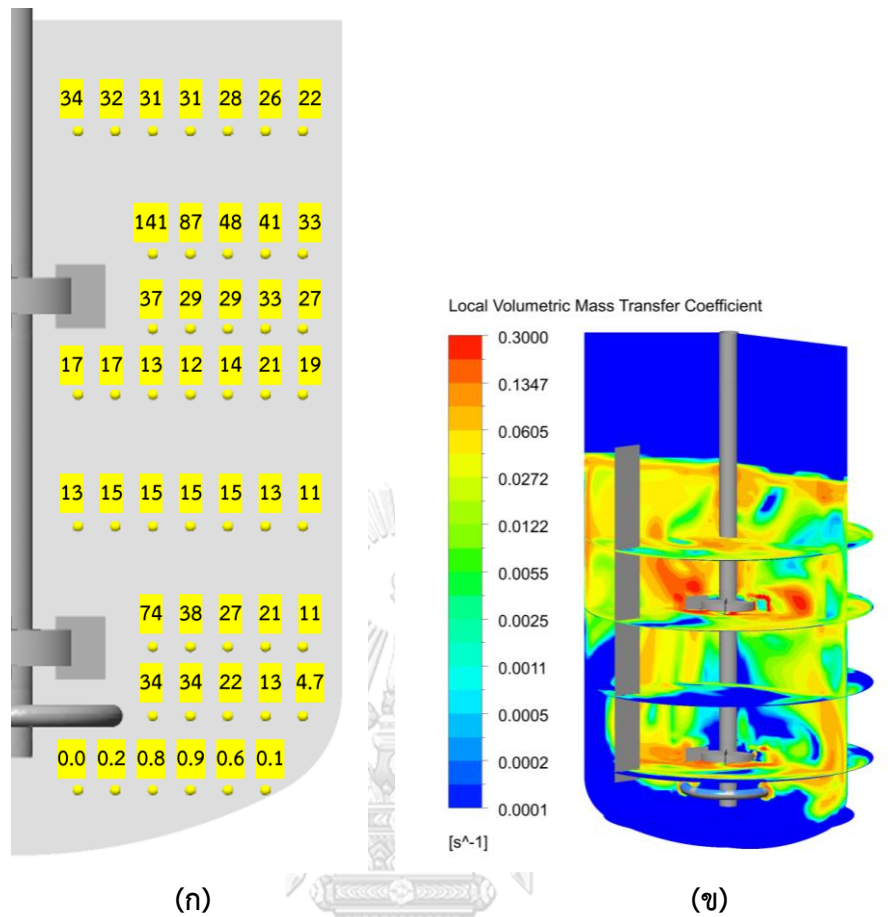


(ค)

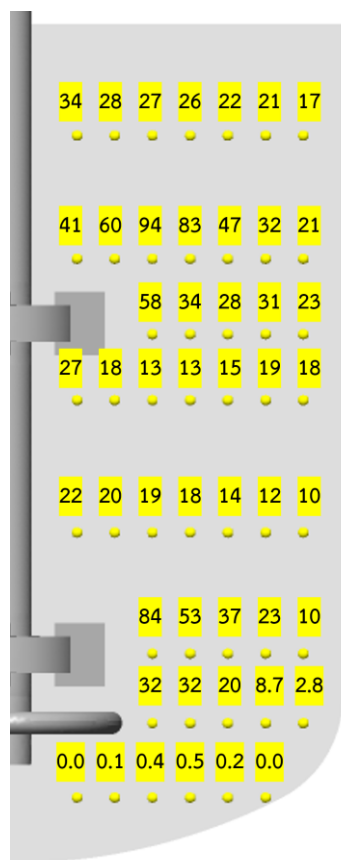


(ง)

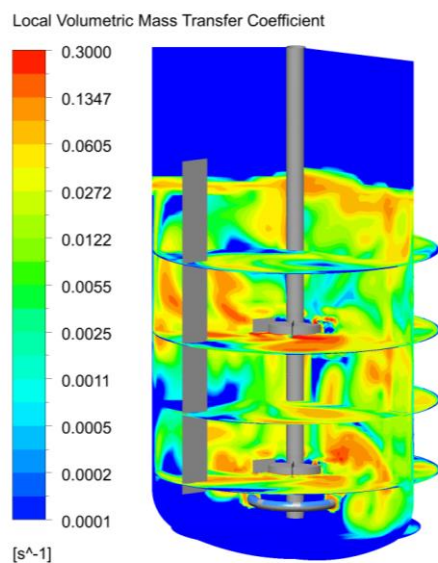
รูปที่ 4.48 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรปริมาตรเฉพาะที่ (1/s) ของกรณีศึกษา S1 (S:D=1.8, 400RPM 7.66LPM) (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



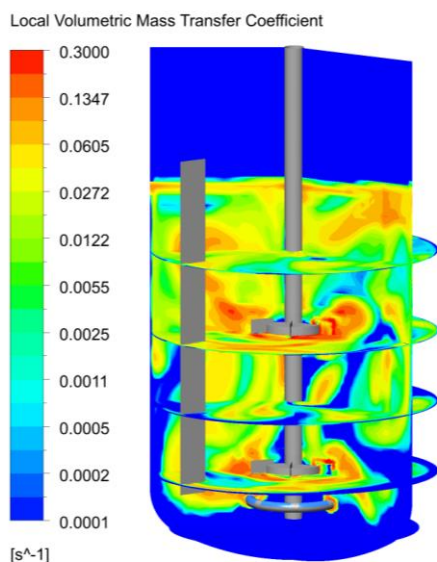
รูปที่ 4.49 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ ( $1/s$ ) ของกรณีศึกษา S2 (S:D=1.6, 400RPM 7.66LPM) (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



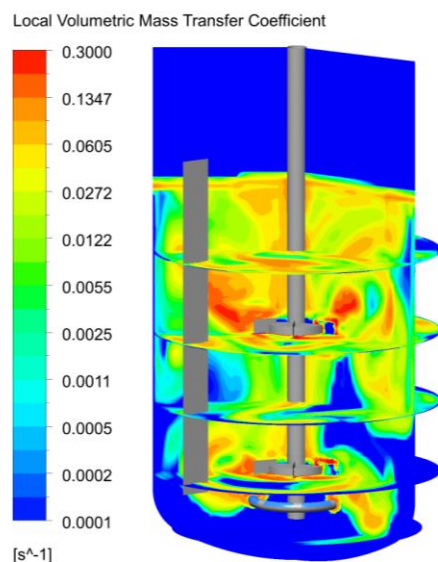
(ก)



(ข)

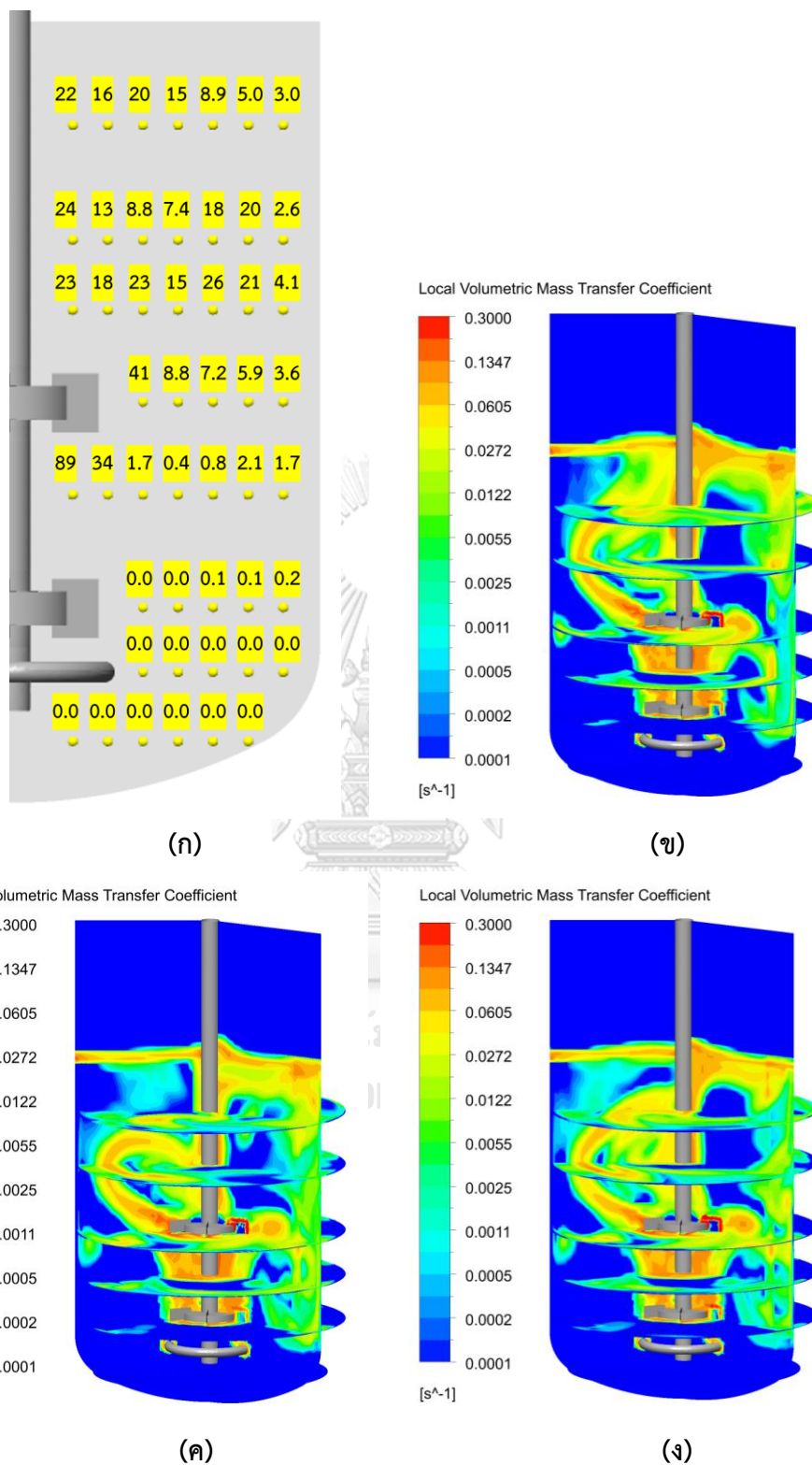


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.50 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรปริมาตรเฉพาะที่ ( $1/s$ ) ของกรณีศึกษา S3 (S:D=1.5, 400RPM 7.66LPM) (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ



รูปที่ 4.51 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรปริมาตรเฉพาะที่ ( $1/s$ ) ของกรณีศึกษา S4 (S:D=1.0, 400RPM 7.66LPM) (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข)-(ง) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 25, 30, และ 35 วินาทีตามลำดับ

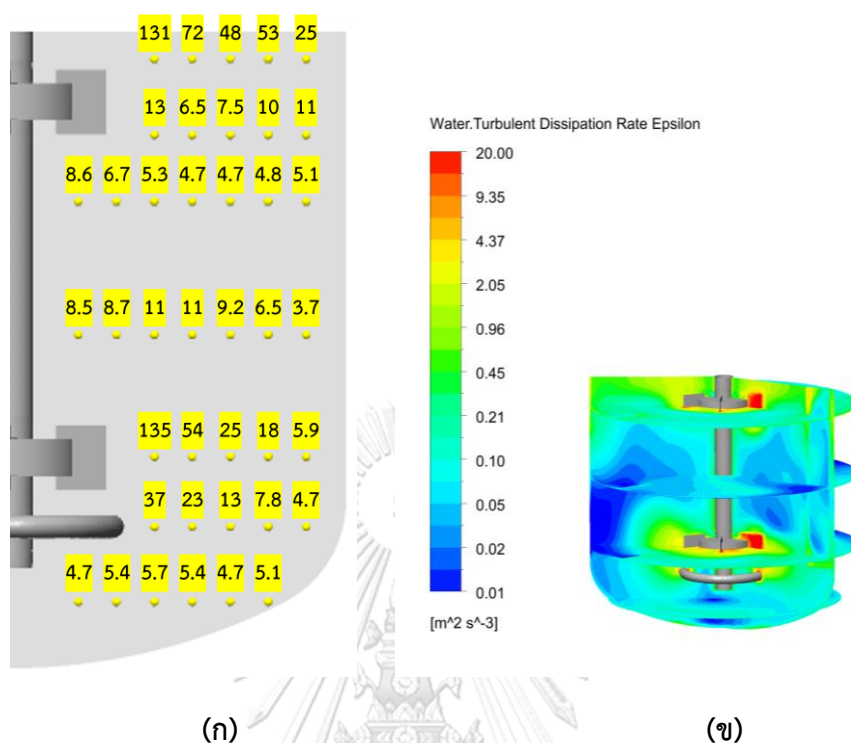
#### 4.5. ผลจำลองการไหล และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรในถังกวนที่มีระดับความสูงของน้ำในระบบต่างกัน

เนื่องจากระบบที่จะพิจารณาต่อไปนี้มีปริมาตรของน้ำในระบบไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการดำเนินการให้สอดคล้องกับการขยายขนาดโดยมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมคงที่ โดยกำหนดให้มีกำลังต่อปริมาตร และอัตราการป้อนอากาศต่อพื้นที่หน้าตัดคงที่ โดยอ้างอิงจากสภาวะการดำเนินการของกรณี S2 จะได้ว่าความเร็วการปั่นกวนของกรณี H1 ถึง H4 มีค่า 363, 400, 430, และ 459 รอบต่อนาทีตามลำดับ และมีอัตราการป้อนอากาศเท่ากันที่ 7.66 ลิตรต่อนาที เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวนคงที่

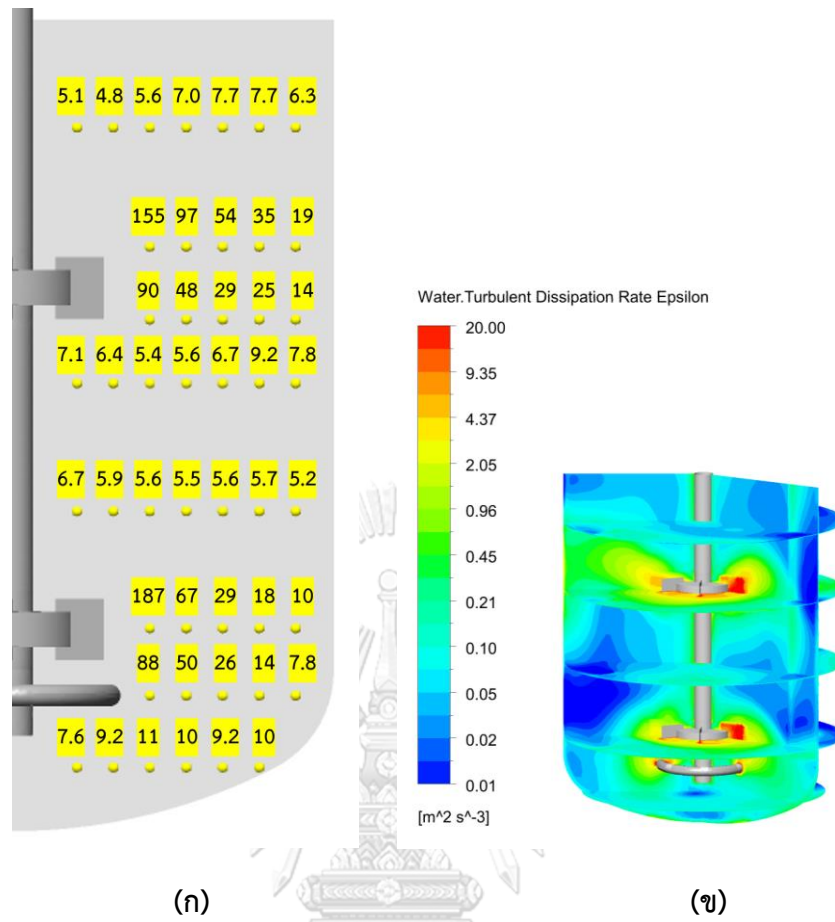
##### 4.5.1. การเปรียบเทียบอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

ค่าอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ของกรณี H1 ถึง H4 แสดงดังรูปที่ 4.52 ถึงรูปที่ 4.55 จะเห็นว่าทั้งสี่กรณีมีลักษณะการกระจายตัวเหมือนกันเมื่อเทียบกับระดับความสูงเท่ากัน ต่างกันที่ขนาดของค่าอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่บริเวณใบปั่นกวน เนื่องจากความเร็วการปั่นกวนที่ต่างกันเท่านั้น ในบริเวณอื่นภายในระบบพบว่ามีค่าประมาณใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยลงที่ระดับความสูงเหนือใบปั่นกวนอันบน โดยมาค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความสูงมากขึ้น ดังจะเห็นในรูปที่ 4.55 ที่บริเวณด้านบนใกล้เคียงกับผิวน้ำจะมีอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนน้อยกว่าบริเวณอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในระบบดังแสดงในรูปที่ 4.56 จะเห็นว่าทั้งสี่กรณีมีลักษณะการไหลวนของวัฏภาคน้ำในระบบเหมือนกันคือใบปั่นกวนอันล่างจะสร้าง 1 รอบการหมุนจากใบปั่นกวนออกไปสู่ผนังถังกวน และไหลวนสู่ด้านล่างถังกวน ส่วนใบปั่นกวนอันบนจะสร้างการไหล 2 รอบการหมุนจากใบปั่นกวนไปสู่ผนังของถังกวน ไหลวนลงด้านล่างอีก 1 รอบการหมุนวน และไหลวนขึ้นไปเกิด 1 รอบการหมุนวน แต่เนื่องจากกรณี H1 ความสูงของผิวน้ำอยู่ในระดับใกล้เคียงกับใบปั่นกวน จึงทำให้เกิดได้เพียง 1 รอบการหมุนวน และหากเพิ่มระดับความสูงของวัฏภาคน้ำจนถึงระดับ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน จะทำให้เกิดรอบการหมุนอีก 1 รอบ ซึ่งเกิดจากการไหลวนกลับของรอบการหมุนจากรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกวนอันบน ทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นที่บริเวณขอบของรอบการหมุน จึงส่งผลให้เกิดการไหลขึ้นอีก 1 รอบการหมุน โดยจะเห็นว่ารอบการหมุนด้านบนนั้น มีความเร็วต่ำกว่าส่วนอื่น





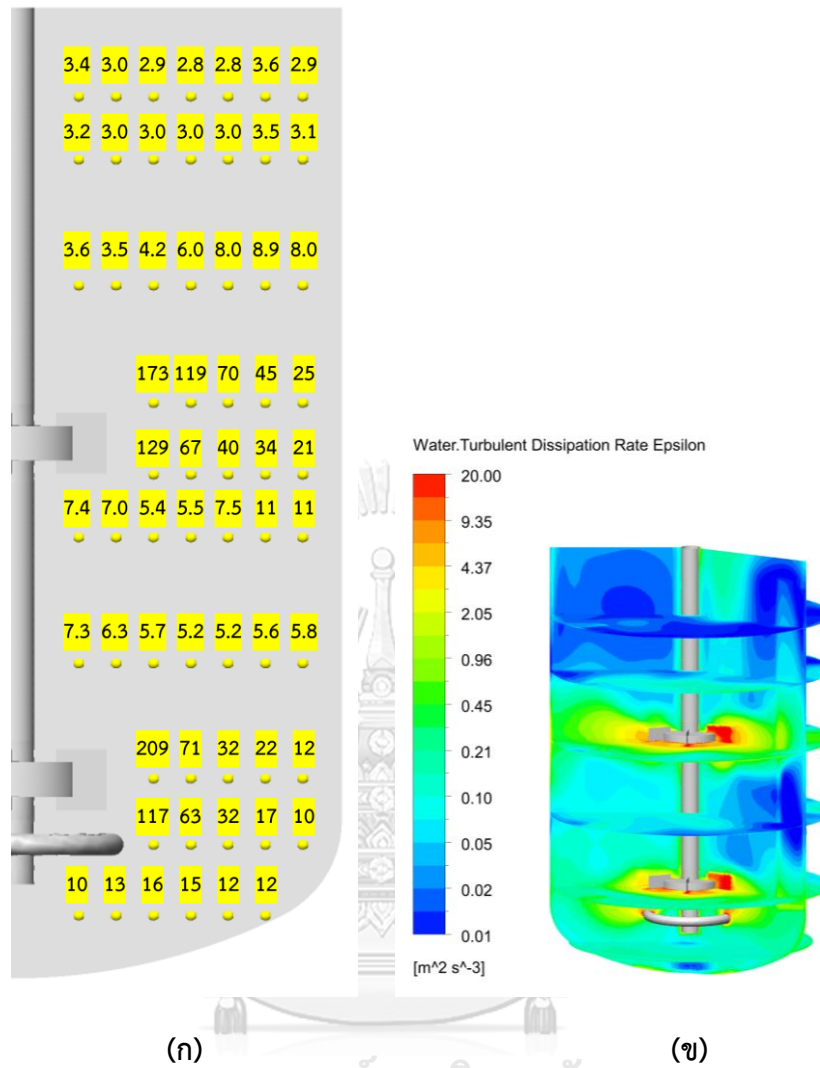
รูปที่ 4.52 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรณีศึกษา H1 (H:T=0.9, 363RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^2$ , (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที



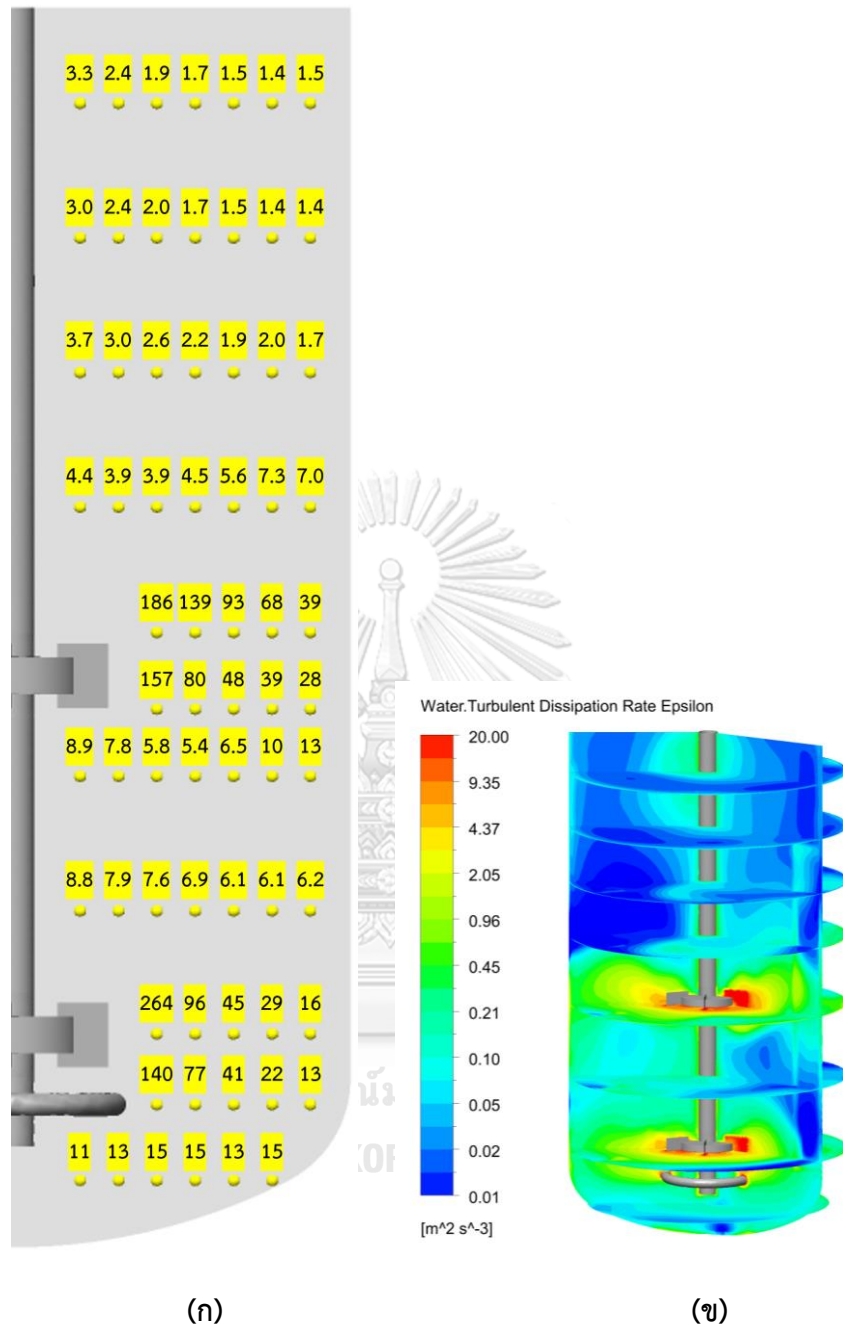
รูปที่ 4.53 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรณีศึกษา H2

(ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^2$ , (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที





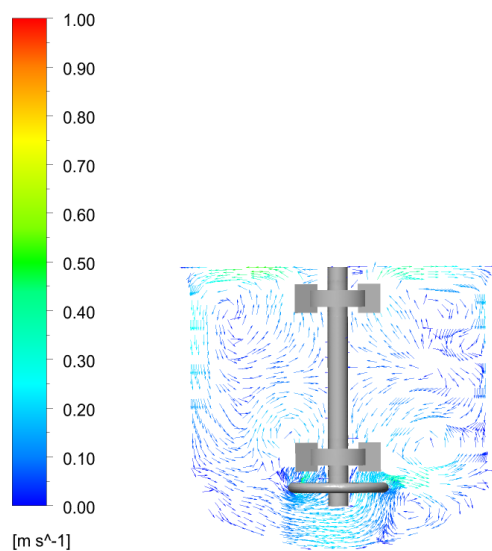
รูปที่ 4.54 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรณีศึกษา H3  
 (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว  $\times 10^2$ , (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที



รูปที่ 4.55 อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่ (W/kg) ของกรณีศึกษา H4

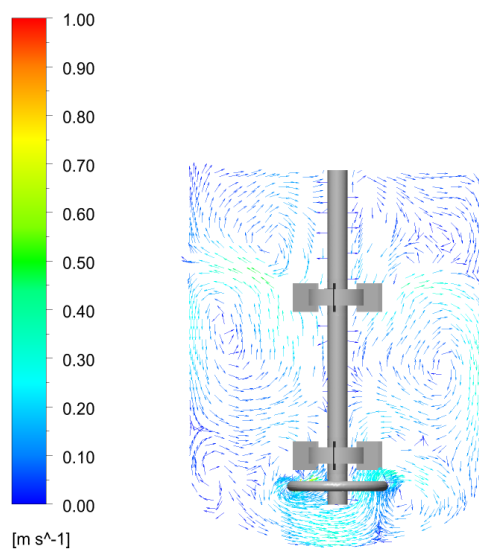
(ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว $\times 10^2$ , (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที

Water.Velocity (Projection)



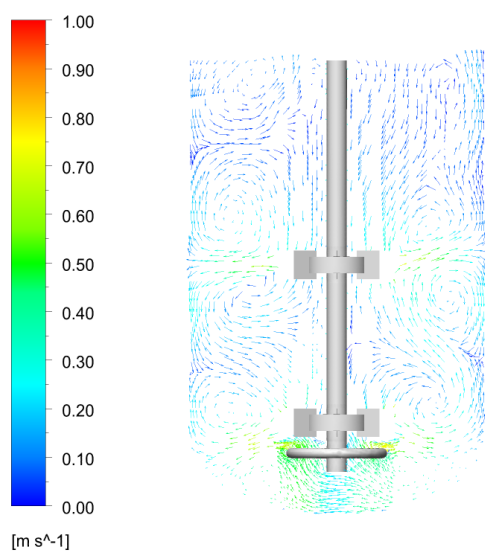
(ก) (H:T=0.9, 363RPM, 7.66LPM)

Water.Velocity (Projection)



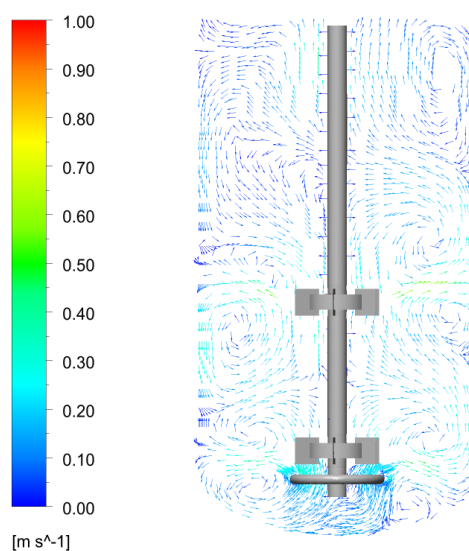
(ข) (H:T=1.2, 400RPM, 7.66LPM)

Water.Velocity



(ค) (H:T=1.5, 430RPM, 7.66LPM)

Water.Velocity (Projection)



(ง) (H:T=1.8, 459RPM, 7.66LPM)

รูปที่ 4.56 เวกเตอร์แสดงความเร็วของวัฏภาคน้ำภายในถังกวน

(ก) กรณี H1, (ข) กรณี H2, (ค) กรณี H3, (ง) กรณี H4,

#### 4.5.2. การเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตร

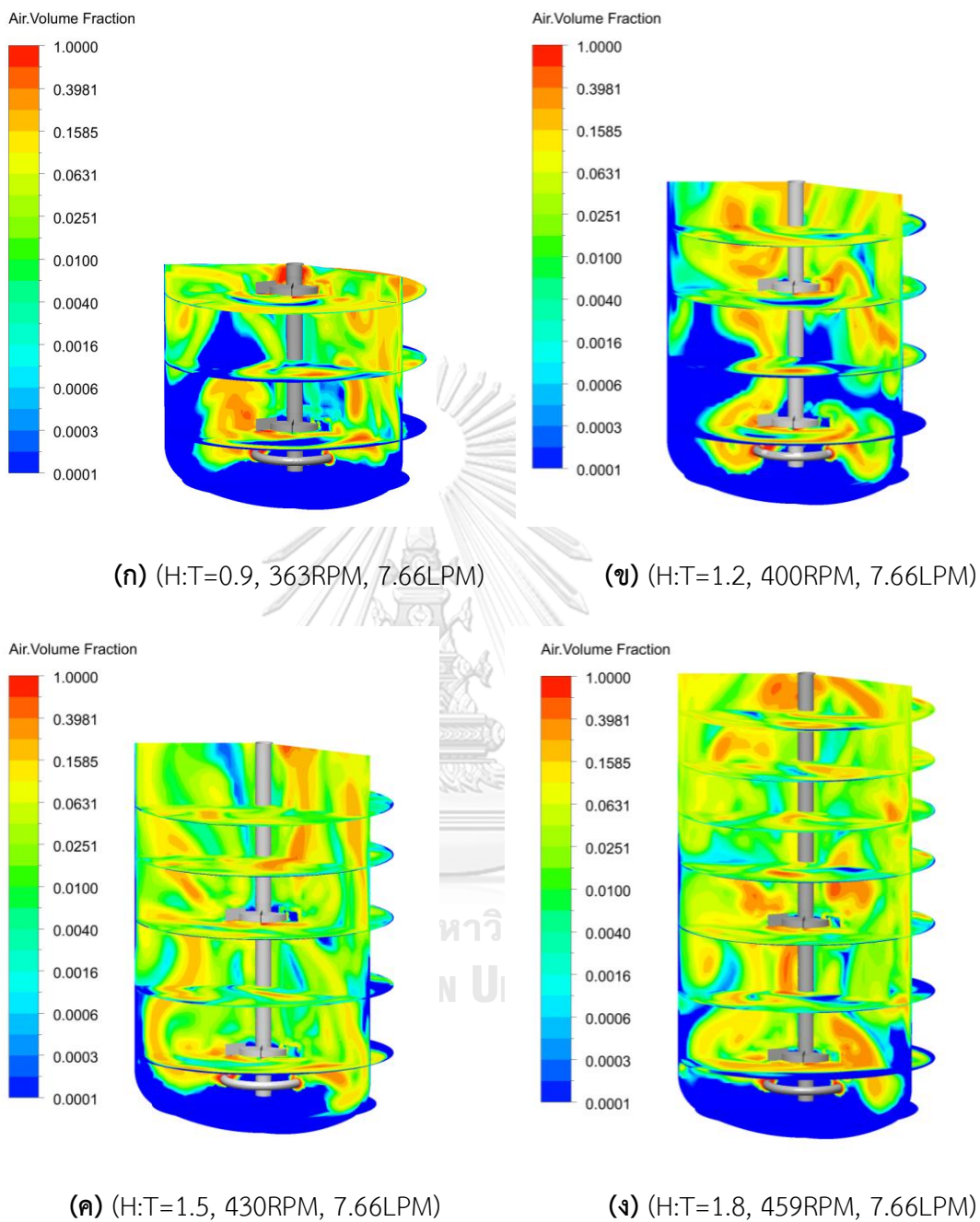
ผลการทำนายฟองอากาศเฉลี่ยของระบบที่คำนวณได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดฟองอากาศในถังกวนแสดงดังตาราง 4.13 จะเห็นว่าผลจากแบบจำลองมีแนวโน้มเดียวกันกับความสัมพันธ์ดังกล่าว จะเห็นว่าในกรณี H1 มีปริมาณอากาศสะสมในระบบ และขนาดฟองอากาศสูงกว่าเมื่อเทียบกับอีกสามกรณี ถึงแม้จะดำเนินการที่สภาวะการขยายขนาดกำลังต่อปริมาตรเท่ากันก็ตาม

ตาราง 4.13 ผลการทำนายปริมาณอากาศสะสมในระบบ และการเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่คำนวณได้จากแบบจำลอง กับความสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดฟองในถังกวนของกรณี H1 ถึง H4

กรณีศึกษา	N	QG	Gas holdup	ขนาดฟองอากาศเฉลี่ย (mm.)		
				แบบจำลอง	สมการ 4.2	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
	RPM	LPM	%			
H1 (H:T=0.9)	363	7.66	7.11	4.15	6.80	-38.9
H2 (H:T=1.2)	400	7.66	5.34	3.49	5.62	-38.0
H3 (H:T=1.5)	430	7.66	4.94	3.31	5.44	-39.2
H4 (H:T=1.8)	459	7.66	5.53	3.53	5.69	-37.9

รูปที่ 4.57 แสดงภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในระบบ จะเห็นได้ว่า ทั้งสี่กรณีมีลักษณะการไหลของอากาศเป็นแบบ second loading แต่ในกรณี H3 และ H4 ก่อนข้าง กระจายได้ดีกว่าเนื่องจากมีความเร็วการปั่นกววนมากกว่าจึงทำให้สามารถกระจายอากาศได้ดีกว่าใน กรณี H1 และ H2 โดยในกรณี H1 และ H2 ที่ใบปั่นกววนอันล่างมีบริเวณที่อากาศกระจายตัวไปไม่ถึง มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.57(ก) และ 4.54(ข) แต่เมื่อพิจารณาที่บริเวณใบปั่นกววนอันบน จะเห็นว่า สามารถทำให้อากาศกระจายตัวออกไปได้ทั่วทั้งถังถึงกวนเหมือนกันทั้งสี่กรณี นอกจากนี้ ในการ ดำเนินการจริงในห้องทดลอง ถึงกวนกรณี H1 ใบปั่นกววนอันบนจะสามารถดึงอากาศที่บริเวณเหนือ ผิวหน้าเข้าสู่ระบบได้เนื่องจากการหมุนใกล้กับผิวหน้า และรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนชนิด รัททอนเทอร์โบไนน์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการทำแบบจำลอง จึงไม่สามารถทำ แบบจำลองของปรากฏการณ์ดังกล่าวได้

เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศเฉพาะที่ของกรณี H1 ถึง H4 ดังรูปที่ 4.58 จะเห็นว่าที่ระดับเดียวกัน จะมีค่าประมาณเท่ากันในทุกกรณี ในกรณี H1 และ H2 จะมีค่าสัดส่วนโดย ปริมาตรของอากาศที่บริเวณใกล้ผิวหน้าสูงกว่ากรณี H3 และ H4 เล็กน้อย เนื่องจากความเร็ว และ ทิศทางของน้ำในระบบมีลักษณะด้านการเคลื่อนที่ออกของอากาศ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.56 จะเห็นว่าบริเวณที่ความเร็วของน้ำพุ่งลง จะทำให้มีค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศมากขึ้น ในกรณี H3 และ H4 เมื่อมีระดับน้ำสูงขึ้น จะเห็นว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับ ความสูง ทั้งยังมีค่าสูงกว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศที่เกิดการกระจายตัวจากการปั่นกววนของใบ ปั่นกววนด้วย เนื่องจากที่ระดับความสูงของน้ำไกลจากใบปั่นกววนมาก ทำให้บริเวณดังกล่าวเริ่มไม่ได้รับ อิทธิพลจากการปั่นกววนของใบปั่นกววน และเริ่มมีลักษณะเป็นแบบคอลัมน์ฟองอากาศ (Bubble column) จึงทำให้เริ่มมีปริมาณอากาศสะสมอยู่ในระบบมากขึ้นเมื่อเทียบกับบริเวณระหว่างใบปั่น กววน ซึ่งเป็นข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์ฟองอากาศ

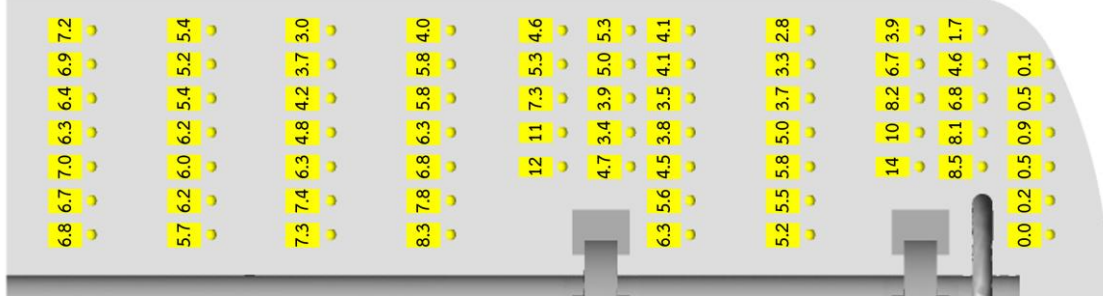


รูปที่ 4.57 ภาพคอนทัวร์แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศภายในถังกวน

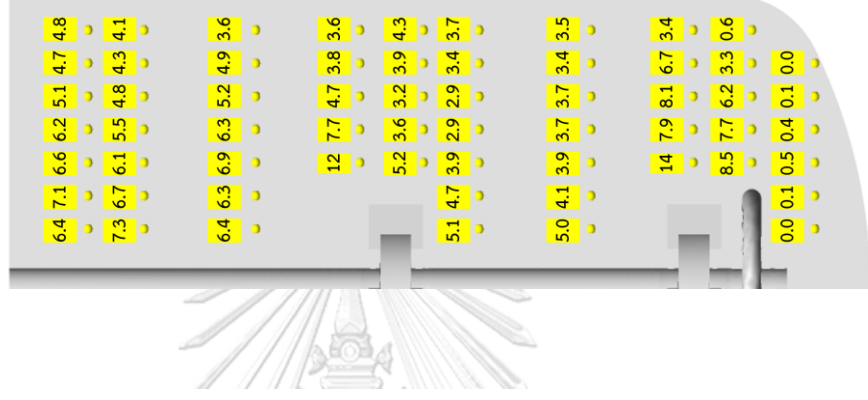
(ก) กรณี H1, (ข) กรณี H2, (ค) กรณี H3, (ง) กรณี H4,

รูปที่ 4.58 สัตส่วนโดยปริมาตรเฉพาะที่เฉลี่ยที่สภาวะคงตัว

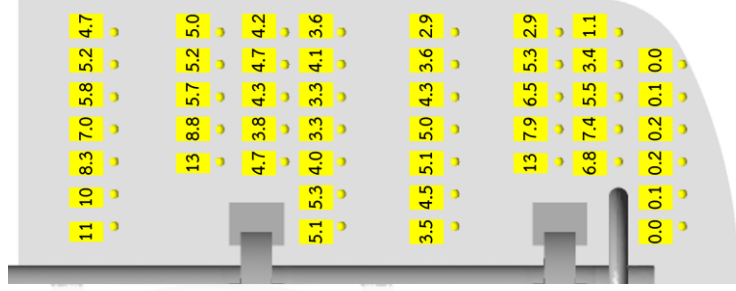
(ก) กรณี H1, (ข) กรณี H2, (ค) กรณี H3, (ง) กรณี H4



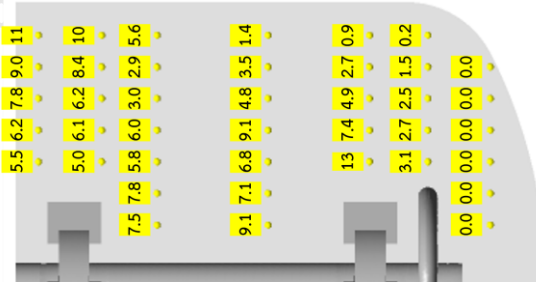
(ง)



(ค)

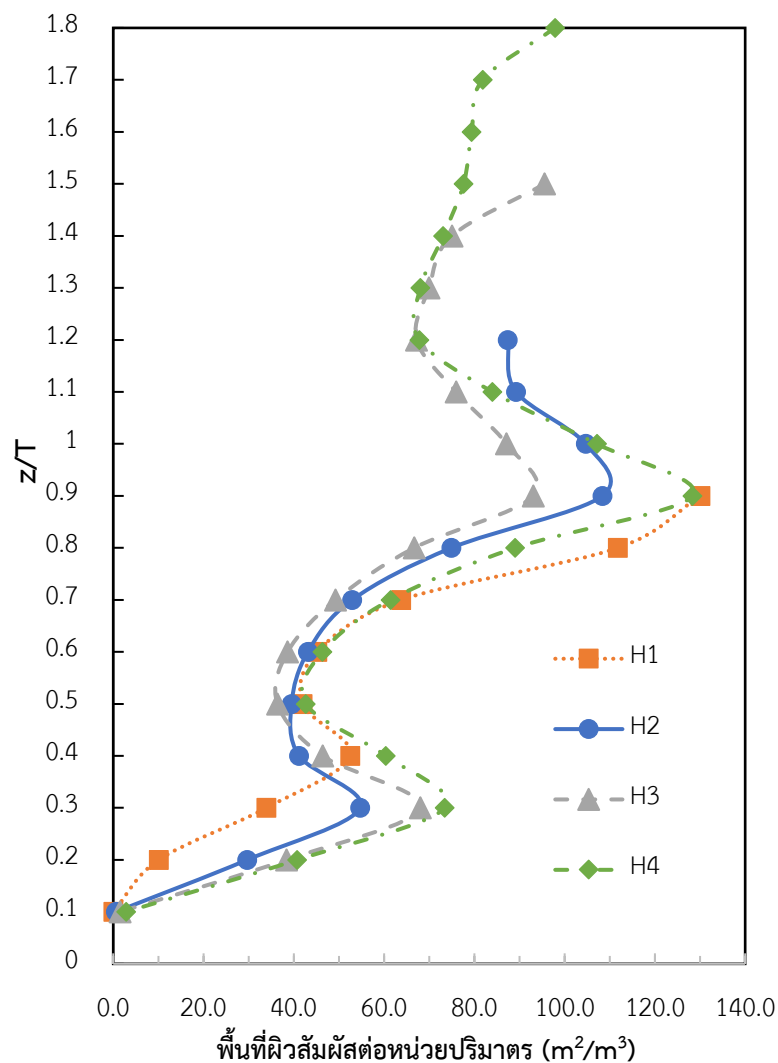


(ข)



(ก)

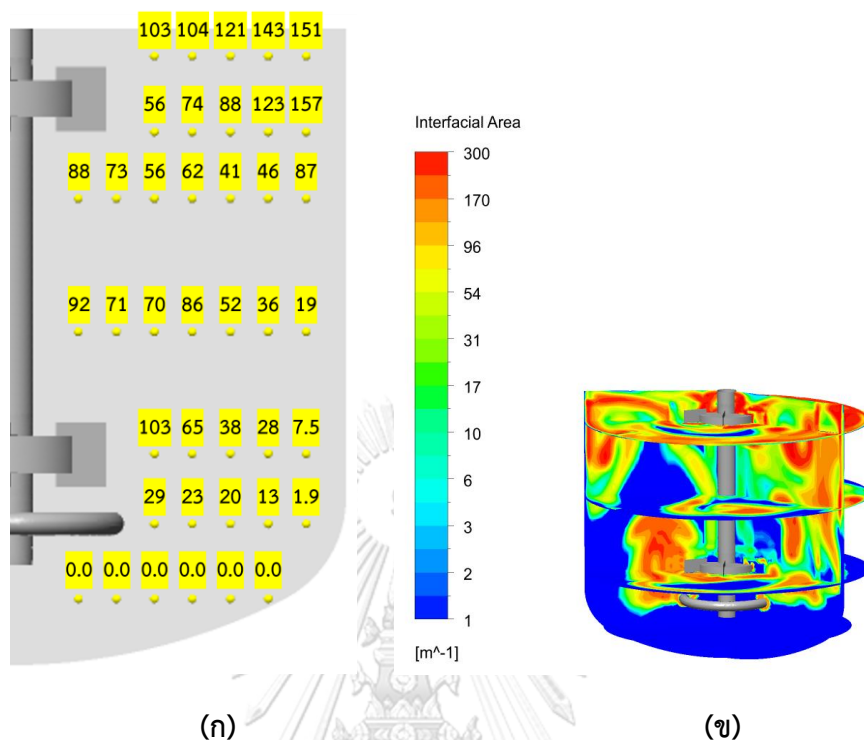
รูปที่ 4.59 แสดงค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรของระบบตามระดับความสูงไร้หน่วยของกรณี H1 ถึง H4 จะเห็นว่าทั้งสี่กรณีให้ค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันในทุกระดับความสูง โดยมีขนาดแตกต่างกันที่บริเวณใบป่นกวน เนื่องจากความเร็วการปั่นกวนที่ต่างกัน ทำให้ขนาดฟอง และสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศมีค่าต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงขอใบป่นกวนอันบน ( $z:T=0.9$ ) จะเห็นว่ากรณี H1 มีค่าเฉลี่ยสูงกว่ากรณีอื่น ถึงแม้จะมีความเร็วการปั่นกวนต่ำกว่า เนื่องจากอยู่ใกล้ผิวน้ำ และวัฏภาคน้ำซึ่งมีทิศทาง และความเร็วมากพอที่จะดึงให้อากาศไหลวนอยู่ในบริเวณใบป่นกวนอันบนมากกว่าในกรณีอื่น ซึ่งอากาศจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนเหนือใบป่นกวน



รูปที่ 4.59 กราฟแสดงพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเฉลี่ยกับความสูงไร้หน่วยของกรณี H1 ถึง H4

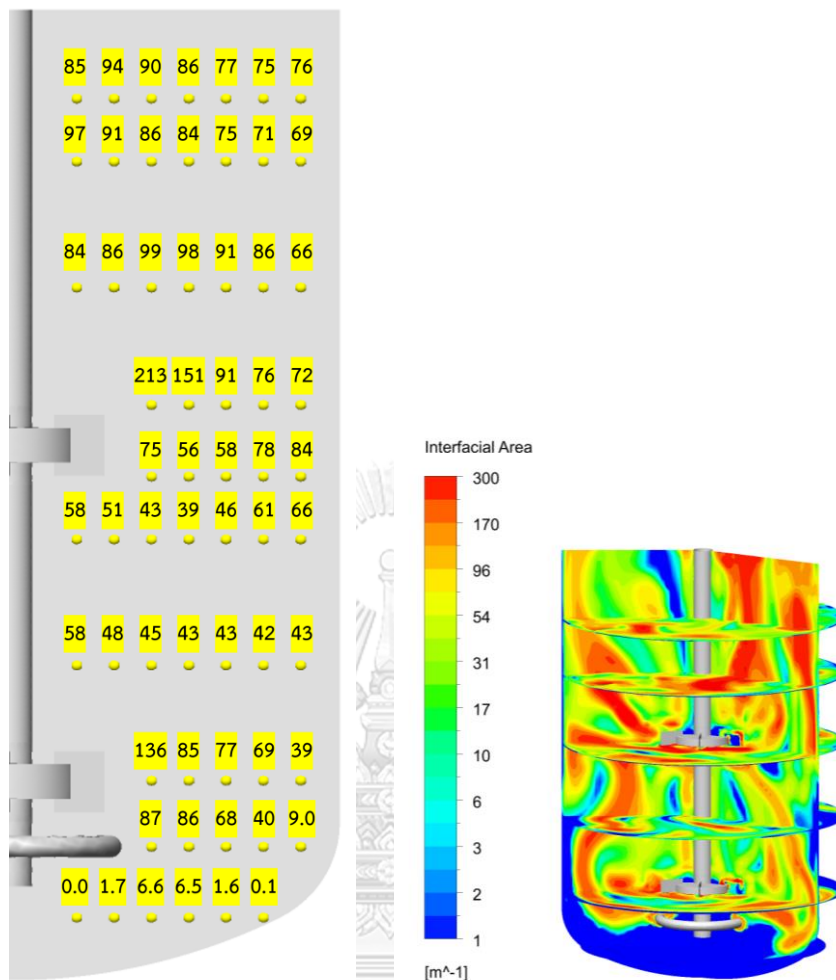


รูปที่ 4.60 ถึงรูปที่ 4.63 แสดงค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรเฉพาะที่ของกรณี H1 ถึง H4 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ความสูงของใบป่นกวนอันบน จะเห็นว่ากรณี H1 มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรสูงสุดตลอดแนวรัศมี ซึ่งแตกต่างจากอีกสามกรณีที่เหลือ ที่มีค่าสูงเฉพาะบริเวณใกล้ใบป่นกวน และมีค่าลดลงตามแนวรัศมี เนื่องจากในกรณี H1 ลักษณะการไหลวนของน้ำที่บริเวณใกล้ผิวน้ำมี 1 รอบการวน และเป็นลักษณะไหลวนลงด้านล่างของใบป่นกวน จึงทำให้อากาศไหลเวียนกลับสู่ระบบได้มากกว่ากรณีอื่น ๆ ที่เกิดลักษณะการไหลของน้ำเป็นสองรอบการหมุนวน จึงมีอากาศบางส่วนไหลขึ้นด้านบนตามการเคลื่อนที่ของน้ำ และแรงลอยตัวของอากาศเอง แต่เมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคที่บริเวณระหว่างใบป่นกวนไปจนถึงด้านล่างของถังกวน จะเห็นว่ากรณี H1 มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งสี่กรณี เนื่องจากความเร็วการปั่นกวนน้อยกว่า จึงทำให้ใบป่นกวนอันล่างกระจายอากาศได้แยกว่า ส่วนในกรณี H4 ซึ่งมีความเร็วการปั่นกวนมากที่สุด ทำให้สามารถกระจายอากาศออกไปทั่วทั้งถังกวนได้ดี ส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูงกว่ากรณีอื่น ๆ ที่บริเวณนี้ เมื่อพิจารณาค่าที่บริเวณเหนือใบป่นกวนอันบน เนื่องจากใบป่นกวนอันบนสามารถกระจายอากาศออกไปได้ทั่วทั้งถังกวนเหมือนกัน ส่งผลให้ค่าที่บริเวณนี้ของกรณี H2 ถึง H4 มีค่าไม่แตกต่างกันทั่วทั้งบริเวณ แม้จะออกห่างจากใบป่นกวนไปมากก็ตาม ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า หากความสูงน้ำในระบบเหนือใบป่นกวนอันบนสุดมีค่ามากกว่า 0.3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน (T) แล้ว จะไม่ส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรของระบบ แต่หากความสูงของน้ำในระบบมีค่าน้อยกว่า 0.3T จะส่งผลให้ลักษณะการหมุนวนของน้ำที่เกิดจากใบป่นกวนอันบนเปลี่ยนไปเหลือ 1 รอบการหมุนวนแบบกรณี H1 จะส่งผลต่อปริมาณอากาศที่สะสมในระบบเพิ่มขึ้น และทำให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.60 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) ของกรณีศึกษา H1 (H:T=0.9, 363RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที

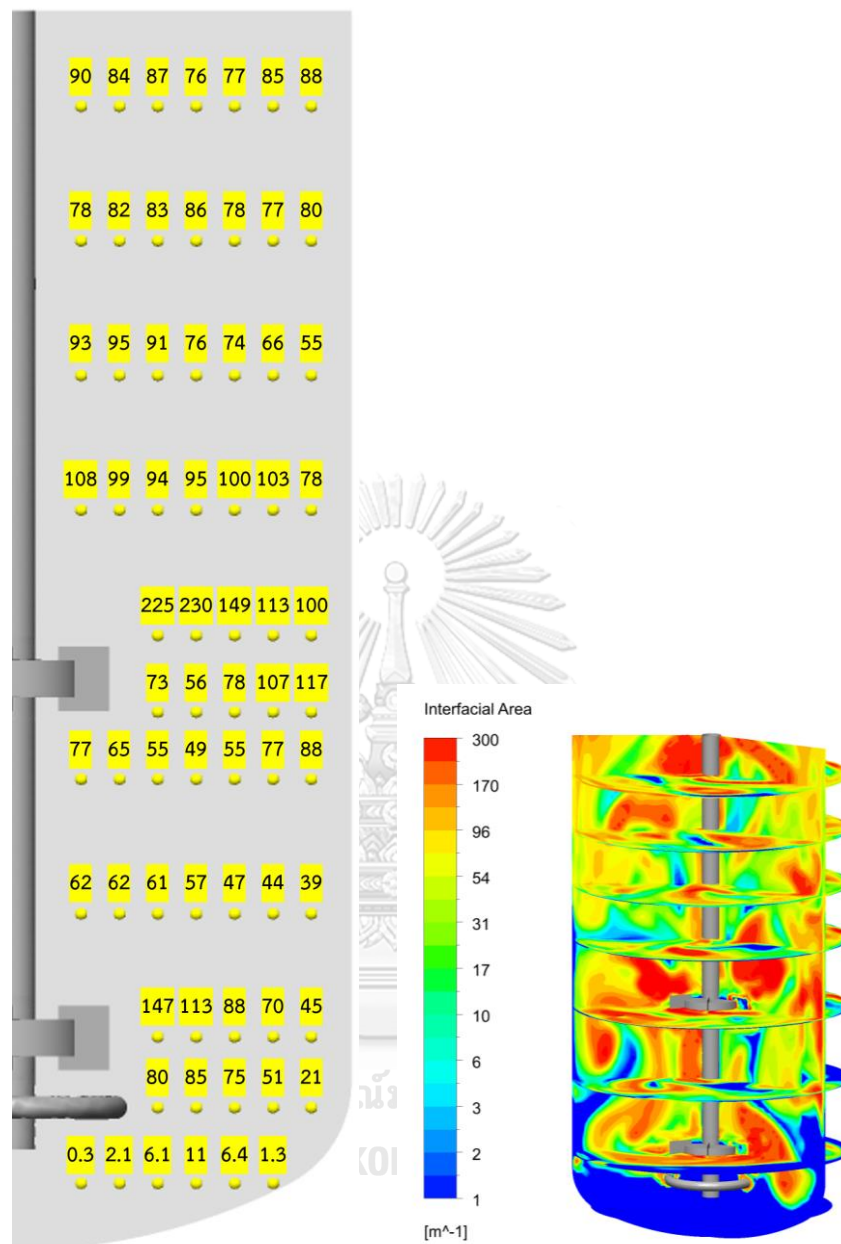




(ก)

(ข)

รูปที่ 4.62 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $m^2/m^3$ ) ของกรณีศึกษา H3 (H:T=1.5, 430RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.63 พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรเฉพาะที่ ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) ของกรรณศึกษา H4 (H:T=1.8, 459RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที

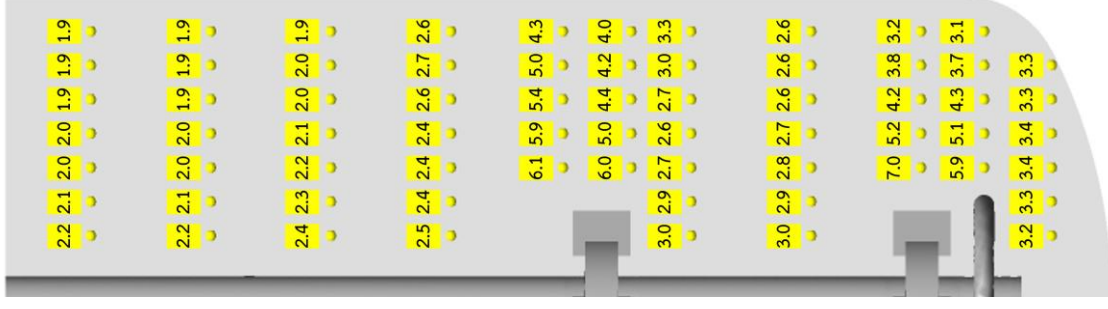
#### 4.5.3. การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร

รูปที่ 4.64 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่ของกรณี H1 ถึง H4 จะเห็นว่าทั้งสี่กรณีมีลักษณะการกระจายตัวของค่าภายในระบบในแนวโน้มเดียวกัน แต่มีขนาดต่างกัน เนื่องจากมีความเร็วการปั่นกววนต่างกัน ทำให้มีกำลังจากใบปั่นกววนต่างกัน เมื่อพิจารณาบริเวณเหนือใบปั่นกววนอันบน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนจะมีค่าประมาณเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.64(ค) และรูปที่ 4.64(ง) จะเห็นว่าถึงแม้จะออกห่างจากใบปั่นกววนไปมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนกลับมีค่าคงที่ ไม่ลดลงตามระยะห่างออกจากใบปั่นกววน เนื่องจากใบบริเวณดังกล่าวถูกรบกวนโดยการเคลื่อนที่ของอากาศภายในระบบเป็นหลัก ทำให้ยังคงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนที่สม่ำเสมออยู่ ถึงแม้จะไม่มีกำลังส่งมาจากใบปั่นกววน

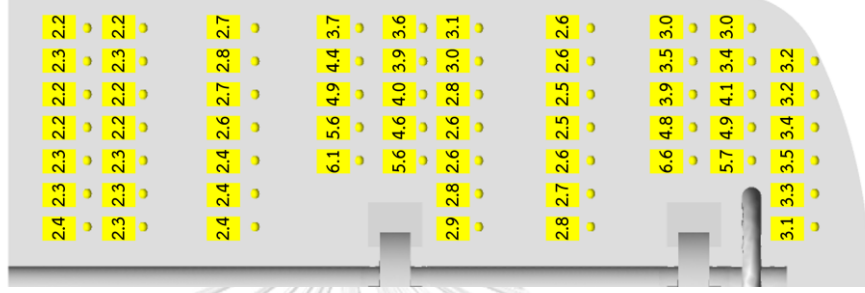


รูปที่ 4.64 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่เฉลี่ยที่สภาวะคงตัว ( $10^{-4}$  m/s)

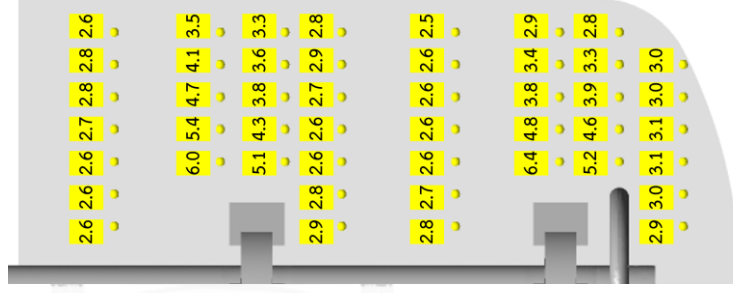
(ก) กรณี H1, (ข) กรณี H2, (ค) กรณี H3, (ง) กรณี H4



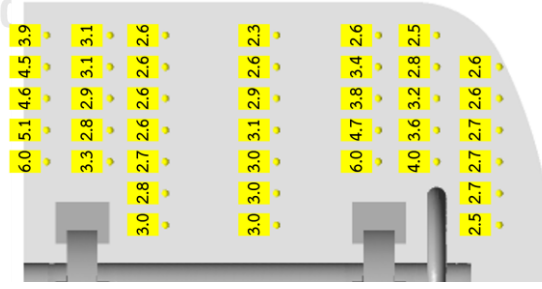
(ง)



(ค)



(ข)



(ก)

เมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยรวมทั้งระบบของแต่ละตัวแปรที่พิจารณาของกรณี H1 ถึง H4 แสดงดังตาราง 4.14 จะเห็นว่ากรณี H1 มีขนาดฟองใหญ่กว่ากรณีอื่น ๆ เนื่องจากมีความเร็วการปั่นกววนที่ต่ำกว่า รวมถึงมีปริมาณอากาศสะสมในระบบมากกว่า แต่เมื่อเทียบค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตร จะเห็นว่ายังคงมีค่าเฉลี่ยสูงอยู่ นั่นคือผลของขนาดฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นนั้น เมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนโดยปริมาตรของอากาศในระบบแล้ว ไม่ส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรแตกต่างกันมากนัก ส่วนกรณี H2 ถึง H4 มีค่าเฉลี่ยของขนาดฟองภายในระบบ ปริมาณอากาศที่สะสมอยู่ในระบบ และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคต่อหน่วยปริมาตรแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากผลของความเร็วการปั่นกววน และความสูงของน้ำในระบบ จะเห็นว่าในกรณี H4 ซึ่งมีความเร็วการปั่นกววนมากที่สุด แต่กลับมีขนาดฟองใหญ่ที่สุด เนื่องจากมีความสูงของน้ำเหนือใบปั่นกววนใบบนมากกว่า ทำให้บริเวณดังกล่าวเนื่องจากน้ำมีกำลังไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการรวมตัวกันของฟองอากาศจึงทำให้ขนาดฟองอากาศเฉลี่ยในระบบเพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉลี่ย จะเห็นว่ากรณี H1 กลับมีค่ามากที่สุด ถึงแม้ว่าจะมีความเร็วการปั่นกววนน้อยที่สุด แต่เนื่องจากระดับความสูงน้ำในระบบมีค่าน้อย จึงทำให้ใบปั่นกววนกระจายกำลังไปได้ทั่วถึง ไม่เกิดบริเวณที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนต่ำเหมือนที่เกิดขึ้นในกรณี H3 และ H4 ที่ความสูงเหนือใบปั่นกววนใบบน จึงส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยสูงกว่า ดังนั้นจึงส่งผลให้กรณี H1 มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมทั้งระบบที่สุดตามไปด้วย

ตาราง 4.14 ค่าเฉลี่ยรวมทั้งระบบที่คำนวณได้จากแบบจำลองของกรณี H1 ถึง H4

Case	N RPM	$d_{32}$ mm	Gas holdup %	Interfacial area $m^2/m^3$	$k_L$ $\times 10^{-4} m/s$	$k_L a$ 1/s
H1 (H:T=0.9)	363	4.15	7.11	77.3	3.30	0.0278
H2 (H:T=1.2)	400	3.49	5.34	69.4	3.17	0.0242
H3 (H:T=1.5)	430	3.31	4.94	66.3	3.05	0.0222
H4 (H:T=1.8)	459	3.53	5.53	76.0	2.89	0.0239

\*ดำเนินการที่กำลังต่อปริมาตรเท่ากัน และมีอัตราการป้อนอากาศ 7.66 ลิตรต่อนาที

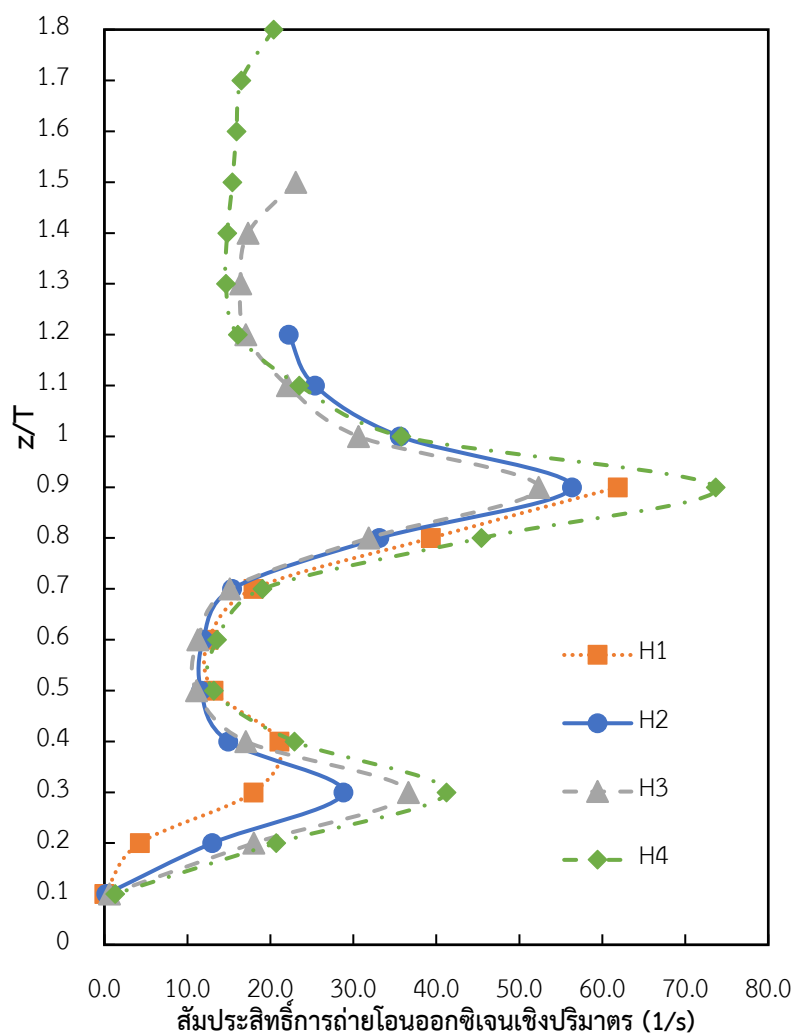


เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมจากแบบจำลองเทียบกับความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้น แสดงดังตาราง 4.15 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ในสมการ 4.1 สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของกรณี H2 ถึง H4 ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์รับได้ แต่ไม่สามารถทำนายผลของกรณี H1 ได้ โดยจะเห็นว่าค่ากำลังต่อปริมาตรที่คำนวณได้ในกรณี H1 มีค่าน้อยกว่าอีกสามกรณี ถึงแม้จะกำหนดสภาวะการดำเนินการจากการขยายขนาดที่กำลังต่อปริมาตรคงที่ก็ตาม เนื่องจากในกรณี H1 มีลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนใบบนแตกต่างจากกรณีอื่น คือเกิดรอบการหมุนวนเพียง 1 รอบ แต่ในกรณี H2 ถึง H4 ใบปั่นกววนใบบนเกิด 2 รอบการหมุนวน ส่งผลให้ในกรณี H1 ใบปั่นกววนอันบนใช้กำลังน้อยกว่าอีกสามกรณีที่เหลือ หรือสามารถกล่าวได้ว่า ในกรณี H1 มีพลศาสตร์การไหลภายในระบบแตกต่างจากอีกสามกรณี รวมถึงแตกต่างจากสภาวะที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์สำหรับทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวม จึงส่งผลให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่สามารถทำนายผลของค่าเฉลี่ยของกรณี H1 ได้

ตาราง 4.15 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบที่มีระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนต่างกันที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับสมการ 4.1

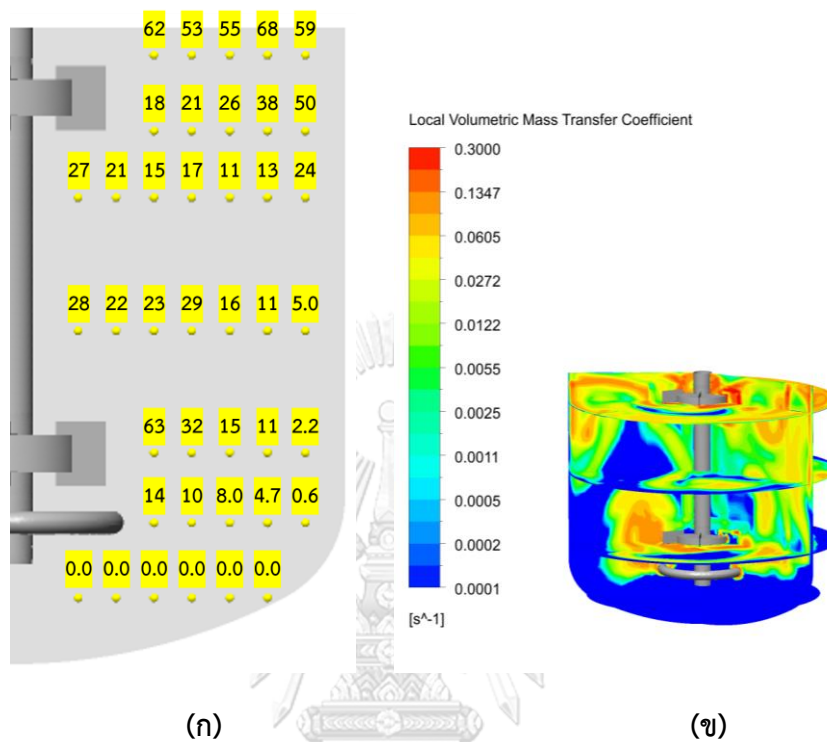
กรณี	P/V W/m <sup>3</sup>	u <sub>G</sub> mm/sec.	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตร		
			แบบจำลอง	สมการ 4.1	ความคลาดเคลื่อน
H1 (H:T=0.9)	285.1	5.23	0.0278	0.0206	25.9
H2 (H:T=1.2)	348.7	5.23	0.0242	0.0230	4.8
H3 (H:T=1.5)	348.4	5.23	0.0222	0.0230	-3.4
H4 (H:T=1.8)	351.2	5.23	0.0239	0.0231	3.4

รูปที่ 4.65 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉลี่ยเทียบกับความสูงไร้หน่วยภายในถังกวน จะเห็นว่าทุกกรณีมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันที่ระดับความสูงเดียวกัน โดยที่ระดับใบปั่นกวนจะมียอดพีคต่างกันตามความเร็วการปั่นกวน แต่ในกรณี H1 ที่ตำแหน่งใบปั่นกวนใบบน (z/T) จะมีค่าสูงกว่าเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรมากกว่า นอกจากนี้ จะสังเกตได้ว่ากรณี H1 มีบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรสูง เทียบกับปริมาตรทั้งระบบเยอะกว่าเมื่อเทียบกับอีกสามกรณี โดยมีเพียงบริเวณระหว่างใบปั่นกวน และบริเวณก้นถังกวนเท่านั้นที่มีค่าน้อย ในขณะที่อีกสามกรณีซึ่งมีสัดส่วนของบริเวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นตามระดับความสูงของน้ำที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยรวมทั้งระบบของกรณี H1 มีค่ามากกว่ากรณีอื่นตามไปด้วย ถึงแม้จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากันที่ระดับความสูงเท่ากันก็ตาม

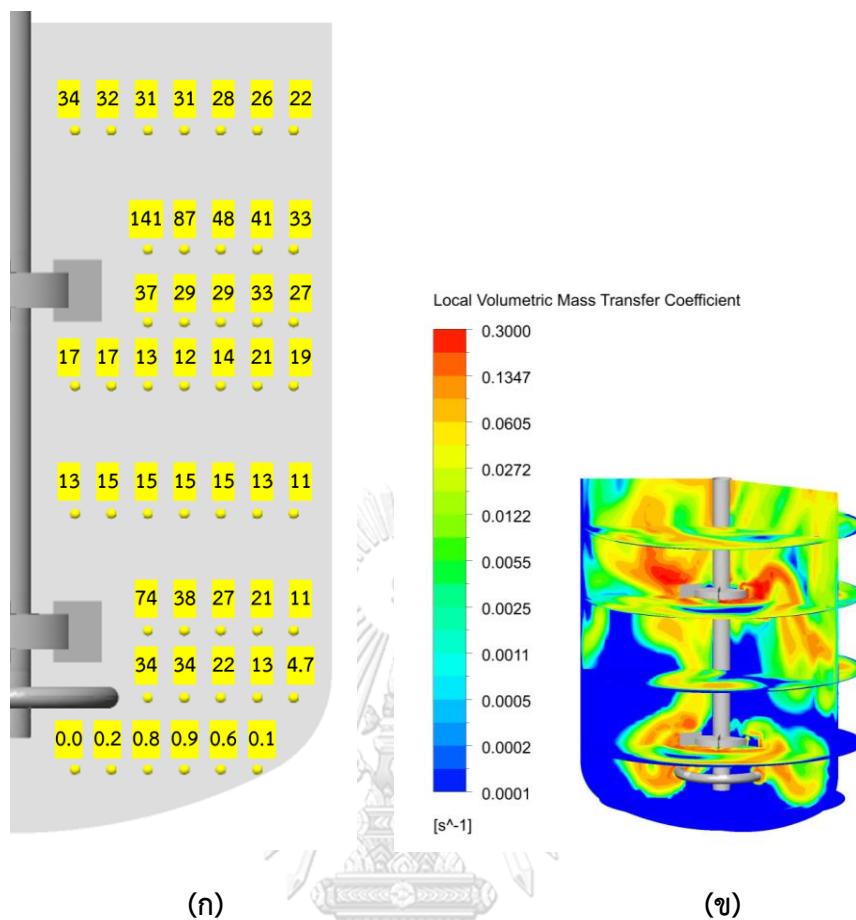


รูปที่ 4.65 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉลี่ยเทียบกับความสูงไร้หน่วยในระบบที่มีความสูงของน้ำต่างกัน

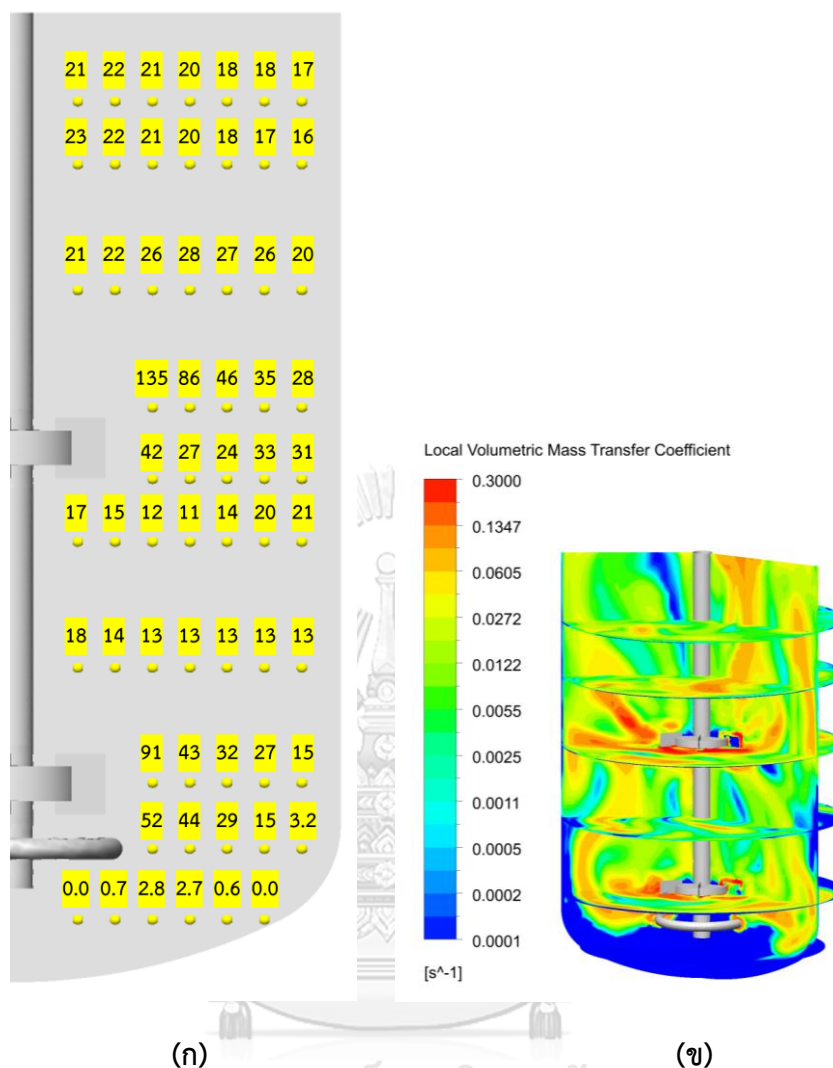
รูปที่ 4.66 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ของกรณี H1 จะเห็นว่าบริเวณกันดั้ม และบริเวณผนังถังกวนที่ระดับใบปั่นกวนใบล่าง เกิด dead zone ของการถ่ายโอนออกซิเจนเกิดขึ้น เนื่องจากความเร็วการปั่นกวนต่ำ ทำให้อากาศไม่สามารถกระจายออกไปถึงผนังของถังกวนได้ แต่บริเวณใบปั่นกวนใบบนซึ่งอยู่ใกล้กับผิวน้ำ เนื่องจากมีลักษณะการไหลของน้ำที่ส่งผลให้อากาศเกิดการไหลวนกลับด้านล่างใบปั่นกวน จึงทำให้บริเวณใบปั่นกวนอันบนมีความสามารถในการถ่ายโอนออกซิเจนดีกว่าในกรณีอื่น ๆ ถึงแม้จะมีขนาดของค่าต่ำกว่า แต่มีค่าสม่ำเสมอเท่ากับตามแนวรัศมี ซึ่งในกรณีอื่น ๆ จะมีค่าลดลงตามแนวรัศมี ต่อมาในกรณี H2 ถึง H4 ดังแสดงในรูปที่ 4.67 ถึง รูปที่ 4.69 **Error! Reference source not found.** จะเห็นว่าขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรใกล้เคียงกันในเกือบทุกบริเวณ ยกเว้นแค่บริเวณใบปั่นกวน ซึ่งมีค่าสูงขึ้นตามความเร็วในการปั่นกวนเท่านั้น โดยที่บริเวณกันดั้มกวนยังคงเกิด dead zone อยู่เนื่องจากอากาศไม่สามารถไหลวนกลับสู่บริเวณกันดั้มกวนได้ รวมถึงบริเวณเหนือใบปั่นกวนอันบนจนถึงผิวน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรไม่ได้มีค่าสูงมากนักเมื่อเทียบกับบริเวณใกล้ใบปั่นกวน รวมถึงเริ่มมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างจากใบปั่นกวนมากขึ้น โดยจะเห็นว่าเมื่อระดับความสูงของน้ำมีค่ามากกว่า 1.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน หรือในกรณี H3 และ H4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรที่ระดับความสูงมากกว่านั้นจะเริ่มมีการถ่ายโอนออกซิเจนที่แย่ง โดยจาก รูปที่ 4.69(ก) จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระดับความสูงใกล้ผิวน้ำมากขึ้น รวมถึงมีค่าลดน้อยลงตามแนวรัศมีออกจากแกนหมุนอีกด้วย



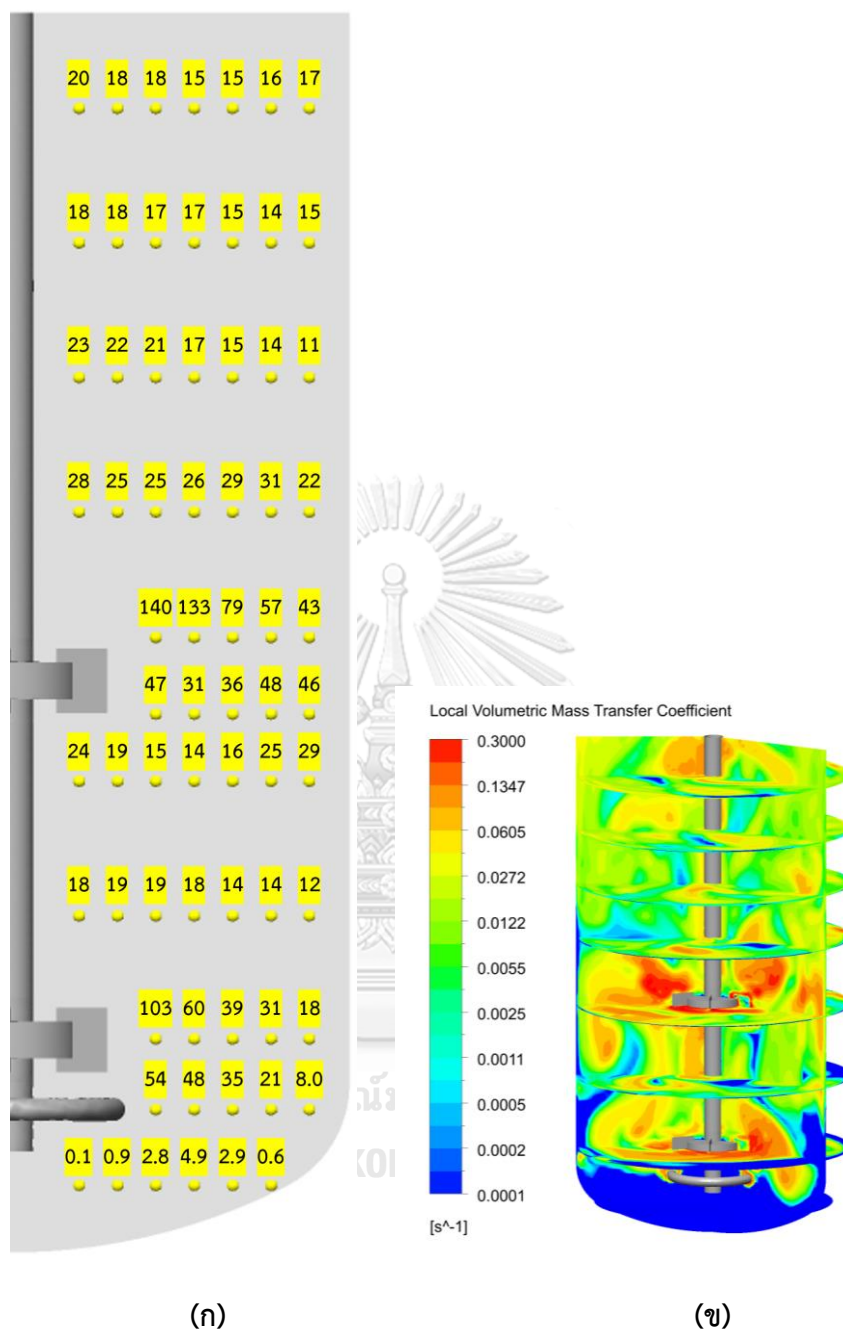
รูปที่ 4.66 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรปริมาตรเฉพาะที่ (1/s) ของกรณีศึกษา H1 (H:T=0.9, 363RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที



รูปที่ 4.67 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรปริมาตรเฉพาะที่ (1/s) ของกรณีศึกษา H2 (H:T=1.2, 400RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที



รูปที่ 4.68 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรปริมาตรเฉพาะที่ ( $1/s$ ) ของกรณีศึกษา H3 (H:T=1.5, 430RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที



รูปที่ 4.69 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรปริมาตรเฉพาะที่ (1/s) ของกรณีศึกษา H4

(H:T=1.8, 459RPM, 7.66LPM); (ก) ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว, (ข) ภาพคอนทัวร์ที่เวลา 20 วินาที

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินการ และข้อเสนอแนะ

#### 5.1. สรุปผลการดำเนินการ

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การสอบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลอง CFD กับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบที่วัดได้จากการทดลอง และการใช้ แบบจำลองดังกล่าวศึกษาพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในถังกวนน้ำ-อากาศ ที่ติดตั้งใบปั่นกวนชนิด รัชทอนเทอร์ไบน์คู่แบบไม่มาตรฐาน รวมถึงศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนระยะระหว่างใบปั่นกวน และความสูงของน้ำที่ใช้ในระบบ

การสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับผลการทดลอง พบว่าแบบผลจากแบบจำลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 รวมถึงสามารถทำนายค่า Power Number และ ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในระบบที่มีวัฏภาคน้ำ ซึ่งมีลักษณะเป็น Diverging flow กล่าวคือ มีลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น 3 รอบการหมุน แบ่งเป็น 1 รอบการหมุนจากใบปั่นกวนใบล่าง และ 2 รอบการหมุนจากใบปั่นกวนใบบน ซึ่งสอดคล้องกับผลการรายงานของ (Dendee 2018) และสามารถทำนายลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในระบบที่มีวัฏภาคน้ำ-อากาศได้สอดคล้องกับลักษณะการไหลที่สังเกตได้จากผลการทดลอง และเงื่อนไขของรูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊สที่ถูกลำเลียงโดย (Hudcova, Machon, and Nienow 1989)

ผลการใช้แบบจำลองเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรภายในถังกวน พบว่าที่ถังกวนที่มีรูปร่างเหมือนกัน เมื่อเพิ่มอัตราการปั่นกวนขึ้น จะส่งผลให้มีลักษณะการกระจายตัวของวัฏภาคแก๊สดีขึ้น กล่าวคือสามารถกระจายแก๊สออกไปได้ทั่วทั้งระบบมากขึ้น หากความเร็วการปั่นกวนนั้นมีมากพอจะทำให้เกิดการไหลของวัฏภาคแก๊สเป็นแบบ completely gas dispersed จะส่งผลให้มี dead zone ของบริเวณที่ไม่มีการถ่ายโอนออกซิเจนน้อยที่สุด นอกจากนี้เมื่อมีความเร็วในการปั่นกวนมากขึ้น จะส่งผลให้ระบบมีอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนเฉพาะที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเฉพาะที่ในระบบมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นอีกด้วย เมื่อพิจารณาผลของอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ พบว่า หากลักษณะการกระจายตัวของอากาศมีลักษณะเดียวกัน เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอากาศ โดยที่มีความเร็วการปั่นกวนคงที่ จะส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน



ออกซิเจนเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้น แต่มีอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยลง เนื่องจากเมื่ออากาศมีปริมาณมากขึ้น จะทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น และกำลังที่ส่งต่อจากใบปั่นกววนไม่สามารถที่จะพาอากาศไปตามแนวการเคลื่อนที่ของน้ำได้อย่างสมบูรณ์ จึงทำให้ค่าพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้นได้น้อยลง

ผลการทำแบบจำลองของถังกวนที่มีการเปลี่ยนระยะระหว่างใบปั่นกววน โดยที่มีสภาวะการดำเนินการเดียวกัน ในกรณีที่มีการเปลี่ยนระยะระหว่างใบปั่นกววนนั้นไม่ส่งผลต่อลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อมีระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนมากขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรบริเวณระหว่างใบปั่นกววนมีค่าลดลง เนื่องจากกำลังที่ส่งจากใบปั่นกววนมีค่าลดลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนลดลง ถึงแม้จะมีการกระจายของอากาศที่ดีก็ตาม เมื่อลดระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนจนทำให้ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนเปลี่ยนไป จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบ ทำให้ไม่สามารถใช้ความสัมพันธ์ในการขยายขนาดแบบเดียวกันได้ เช่นในกรณีที่ระยะห่างระหว่างใบปั่นกววนมีค่าเป็นหนึ่งในห้าของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบปั่นกววน ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนมีลักษณะเป็นแบบ Merging Flow ทำให้กำลังต่อมวล และการกระจายความเร็วของน้ำในระบบแย่งลง ส่งผลให้รูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊ส และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนในระบบเปลี่ยนไปในทางที่ไม่ดี ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมของระบบมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ที่ใช้ในการขยายขนาด

ผลการทำแบบจำลองของถังกวนที่มีระดับความสูงของน้ำในระบบต่างกัน โดยที่มีมีระยะระหว่างใบปั่นกววนเท่ากัน และควบคุมที่สภาวะการดำเนินการกำลังต่อปริมาตร และอัตราการป้อนอากาศต่อพื้นที่หน้าตัดคงที่ พบว่าระดับความสูงของน้ำที่ใช้ไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรเฉพาะที่ภายในระบบ แต่อาจส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมหากความสูงของน้ำที่ใช้ทำให้ลักษณะการไหลภายในเปลี่ยนแปลงไป โดยในกรณีที่ระดับความสูงของน้ำมีมากกว่า 1.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนเป็นแบบเดียวกัน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมมีค่าใกล้เคียงกัน และสอดคล้องความสัมพันธ์สำหรับการขยายขนาด แต่เมื่อระดับน้ำในถังกวนมีค่า 0.9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากใบปั่นกววนใบบนจะเปลี่ยนไปเนื่องจากระดับน้ำลดลง ทำให้เกิดรอบการหมุนเหลือเพียง 1 รอบ จากที่ควรจะเป็น 2 รอบการหมุน ส่งผลให้กำลังที่

ใบป๋นกววนใช้มีค่าลดลง แต่ยังคงมีพลศาสตร์ที่ระดับความสูงดังกล่าวเหมือนเดิมเมื่อเทียบกับระบบที่มีความสูงน้ำมากกว่า ส่งผลให้มีสัดส่วนของบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรสูงต่อปริมาตรทั้งหมดเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมสูงกว่าที่ทำนายได้จากความสัมพันธ์สำหรับการขยายขนาดซึ่งสามารถทำนายในระบบที่มีระดับน้ำสูงกว่า 1.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางถึงกวนได้

## 5.2. ข้อเสนอแนะ

ในการวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายโอนออกซิเจนภายในถังหมัก การพิจารณาการกระจายตัวของเซลล์ภายในถังหมักเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ต้องพิจารณาร่วมด้วย เนื่องจากจะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของอากาศบริเวณก้นถังกวนเป็นบริเวณที่เกิด dead zone ของการถ่ายโอนออกซิเจนได้ง่ายที่สุด และในบริเวณดังกล่าวนี้เอง มีโอกาสที่เซลล์จะมีกองรวมกันที่บริเวณนี้ได้เช่นกัน จึงอาจเกิดเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการได้ นอกจากนี้ อาจทำการลดข้อสมมติฐานของการถ่ายโอนออกซิเจนภายในแบบจำลองให้มีสถานะสมจริงยิ่งขึ้น โดยการสร้างแบบจำลองให้เกิดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนระหว่างวัฏภาค เพื่อศึกษาบริเวณที่เกิด dead zone ของการถ่ายโอนออกซิเจนสู่เซลล์เนื่องจากน้ำลำเลียงออกซิเจนไปไม่ถึงในบริเวณนั้น ๆ ให้สามารถทำนายผลได้เข้าใกล้สถานะในถังหมักจริงมากขึ้น

ในการเปรียบเทียบพลศาสตร์ภายในถังกวน อาจต้องพิจารณาแยกกันในแต่ละรูปแบบการไหล ซึ่งจะเห็นได้ว่า ทั้งรูปแบบการไหลของน้ำ และรูปแบบการไหลของวัฏภาคแก๊ส ล้วนส่งผลทำให้ค่าต่าง ๆ ระบบเปลี่ยนแปลงไป หรือส่งผลต่อค่าเฉลี่ยรวมภายในระบบ

## ภาคผนวก

### 6.1. ภาคผนวก ก ผลการสร้างปริมาตรควบคุม

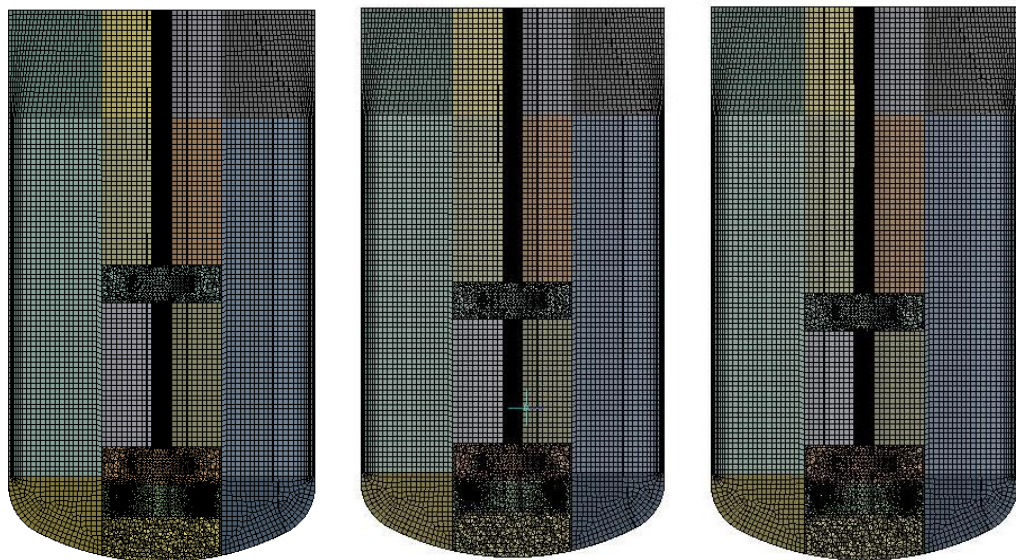
กระบวนการสร้างปริมาตรควบคุมสำหรับแบบจำลองถังกวนที่ทำการเปลี่ยนระยะระหว่างใบปั่นกวน ใช้การตั้งค่าแบบเดียวกับถังกวนต้นแบบ ดังแสดงในตาราง 6.1 และผลการสร้างปริมาตรควบคุมแสดงดังตาราง 6.2 จำนวนปริมาตรควบคุมจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากระยะระหว่างใบปั่นกวนที่เปลี่ยนไป ส่วนในกรณี ถังกวนที่มีระยะระหว่างใบปั่นกวนเป็น 1.6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางใบปั่นกวน สำหรับทำแบบจำลองที่มีความสูงของวัฏภาคน้ำเป็น 1.8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวนจะมีจำนวนมากกว่าในกรณีอื่น เนื่องจากจำเป็นต้องเพิ่มพื้นที่ของอากาศเหนือพื้นผิวน้ำเพื่อลดความซับซ้อนในการทำแบบจำลองที่บริเวณด้านบนของผิวน้ำ ภาพตัดขวางของปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้นของแต่ละกรณีแสดงดังรูปที่ 6.1

ตาราง 6.1 การกำหนดขนาดการสร้างปริมาตรควบคุมของถังกวน

ตำแหน่งที่ปรับปริมาตรควบคุม	ขนาด (มิลลิเมตร)
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับใบพัด	2
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับ Baffle	3
ขนาดของปริมาตรควบคุมบริเวณรูขาออกตัวกระจายอากาศ	1
ขนาดของปริมาตรควบคุมชั้นแรกที่ติดกับผนังของถังปั่นกวน	0.77
ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของปริมาตรควบคุม	3

ตาราง 6.2 ผลการสร้างปริมาตรควบคุมของถังกวนที่มีรูปทรงต่างกัน

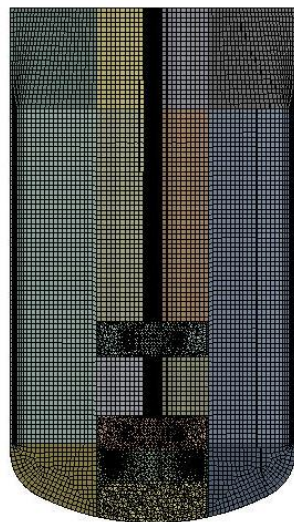
รูปทรง	จำนวนของปริมาตรควบคุม ( $\times 10^3$ )
ถังกวนดั้งเดิม (S:D=1.8)	480
ถังกวน S:D=1.6	479
ถังกวน S:D=1.5	479
ถังกวน S:D=1.0	482
ถังกวน S:D=1.6, H:T=1.8	522



(ก) ถังกวนต้นแบบ

(ข) ถังกวน S:D=1.6

(ค) ถังกวน S:D=1.5



(ง) ถังกวน S:D=1.0



(จ) ถังกวน S:D=1.6, H:T=1.8

รูปที่ 6.1 ปริมาตรควบคุมที่สร้างขึ้นในระนาบตัดขวางของรูปทรงถังกวนในแต่ละกรณี

## 6.2. ภาคผนวก ข การคำนวณขยายขนาดเบื้องต้น

ในการทำแบบจำลองกรณีที่มีความสูงของน้ำในระบบต่างกัน จะพยายามควบคุมให้มีสภาวะการดำเนินการที่มีกำลังต่อปริมาตร และอัตราการป้อนอากาศต่อพื้นที่หน้าตัดคงที่ เพื่อให้เสมือนว่าทำการขยายขนาดโดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรคงที่ ดังนั้น จึงต้องทำการคำนวณหาความเร็วในการปั่นกววนที่ทำให้ระบบมีกำลังต่อปริมาตรคงที่ที่อัตราการป้อนอากาศเดียวกัน โดยวิธีการคำนวณของระบบจะพิจารณาจากค่า Power Number ดังสมการ 6.1

$$P = N_p \rho_L N^3 D^5 \quad \text{สมการ 6.1}$$

โดยที่	$N_p$	คือ Power Number ของใบปั่นกววน (Single Rushton Turbine = 5.5)
	$\rho_L$	คือ ความหนาแน่นของน้ำ
	$N$	คือ ความเร็วการปั่นกววน (รอบต่อวินาที)
	$D$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบปั่นกววน

สำหรับถังกวนที่ติดตั้งใบปั่นกววนมากกว่า 1 อัน ค่า Power Number ของระบบจะมีค่าประมาณผลรวมของค่า Power Number ของใบปั่นกววนแต่ละอัน แต่เนื่องจากระบบที่ศึกษามีการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบด้วย ซึ่งส่งผลต่อกำลังที่ใช้ของใบปั่นกววน ค่า Power Number ซึ่งอัตราส่วนของกำลังที่ใบพัดใช้ขณะมีการป้อนอากาศ ( $N_{pG}$ ) ต่อกำลังที่ใบพัดที่ไม่มีมีการป้อนอากาศ ( $N_p$ ) ถูกนิยามด้วย  $K_{Gassing}$  ตามสมการ 6.2 โดยที่  $K_{Gassing}$  ของใบปั่นกววนแต่ละอันจะมีการพิจารณาต่างกัน

$$K_{Gassing} = \frac{N_{pG}}{N_p} \quad \text{สมการ 6.2}$$

สำหรับใบปั่นกววนใบล่างสุด ค่า  $K_{Gassing}$  จะขึ้นกับลักษณะของ Cavity หลังใบพัดของใบปั่นกววนซึ่งถูกนิยามโดย Flow gas Number ( $Fl_G$ ) โดยมีทั้งหมดสามเงื่อนไข (Middleton and Smith 2003) ดังสมการ 6.3 ถึงสมการ 6.5

$$K_{Gassing} = 1 - 16.7 Fl_G Fr^{0.35}, \quad Fl_G < Fl_{G3-3} \quad \text{สมการ 6.3}$$

$$K_{Gassing} = 0.18 Fl_G^{-0.2} Fr^{-0.25}, \quad Fl_{G3-3} < Fl_G < 0.1 \quad \text{สมการ 6.4}$$

$$K_{Gassing} = 0.27 + \frac{0.022}{Fr}, \quad Fl_G > 0.1 \quad \text{สมการ 6.5}$$

โดยที่

$$Fl_G = \frac{Q_G}{ND^3}$$

สมการ 6.6

$$Fr = \frac{N^2 D}{g}$$

สมการ 6.7

$$Fl_{G3-3} = 0.0038 \cdot \left(\frac{Re^2}{Fr}\right)^{0.07} \cdot \left(\frac{D}{T}\right)^{0.5}$$

สมการ 6.8

สำหรับใบปั่นกวนใบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่อันล่างสุด ค่า  $K_{Gassing}$  จะถูกแบ่งออกเป็นสองช่วง ดังสมการ 6.9 และ สมการ 6.10 (Cui, van der Lans, and Luyben 1996)

$$1 - K_{Gassing} = 37.6Q_G N, \quad Q_G N < 0.013 \quad \text{สมการ 6.9}$$

$$1 - K_{Gassing} = 0.375 + 8Q_G N, \quad Q_G N > 0.013 \quad \text{สมการ 6.10}$$

ค่า Power Number ของถังกวนที่ติดตั้งใบปั่นกวนมากกว่า 1 อัน ในระบบที่มีการป้อนอากาศจะพิจารณาตามสมการ 6.11 และนำกลับไปแทนค่าในสมการ 6.1 เพื่อทำนายกำลังต่อปริมาตรในระบบ

$$N_{pG} = \sum K_{i,Gassing} N_{p,i}$$

สมการ 6.11

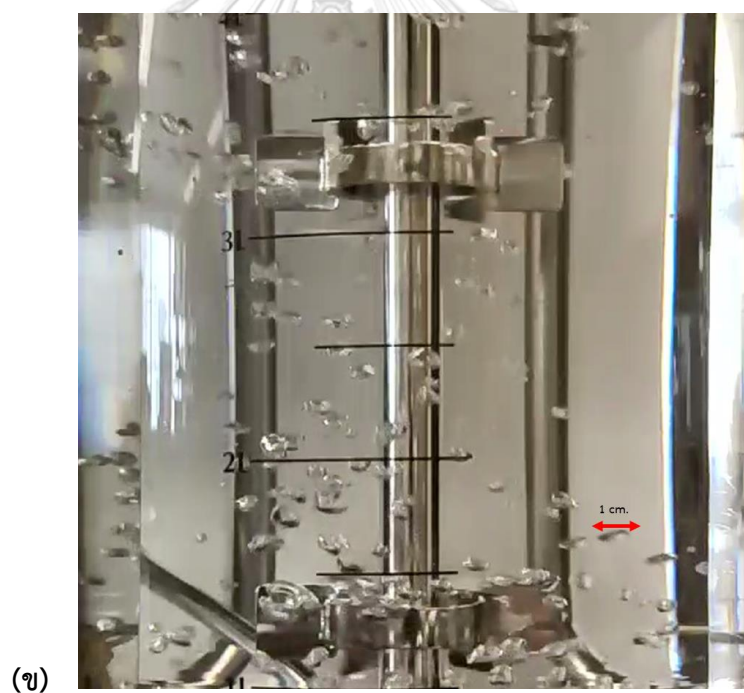
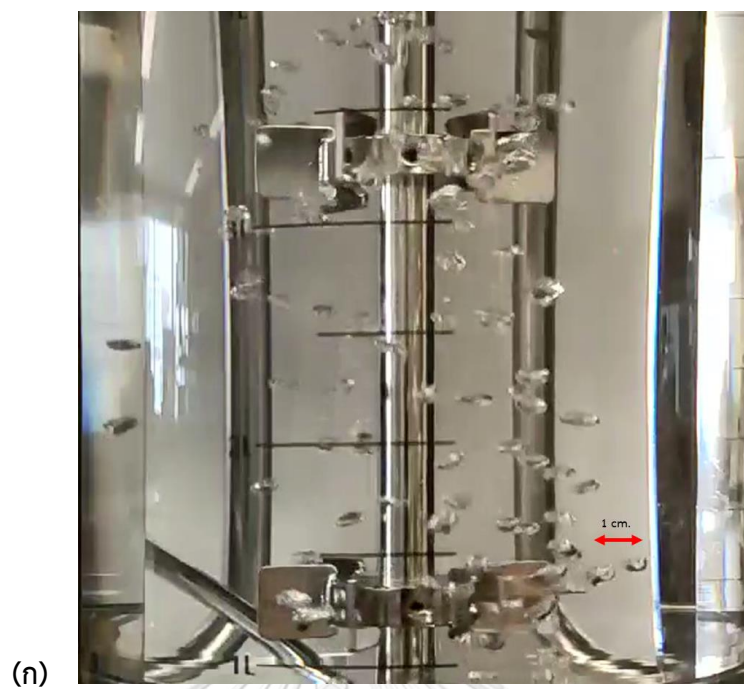
### 6.3. ภาคผนวก ค การสอบเทียบขนาดฟองอากาศจากแบบจำลองกับผลการทดลอง

ด้วยข้อจำกัดของทรัพยากร จึงไม่สามารถวัดขนาดของฟองอากาศที่สภาวะการดำเนินการเดียวกันการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเชิงปริมาตรรวมได้ การสอบเทียบขนาดฟองที่คำนวณจากแบบจำลองจึงต้องทำที่สภาวะที่มีความปั่นป่วนน้อยลง เพื่อให้สามารถสังเกตขนาดของฟองอากาศภายในระบบได้ โดยรูปที่ 6.2(ก) และรูปที่ 6.2(ข) แสดงขนาดฟองที่สังเกตได้จากการทดลองที่ความเร็วการปั่นกววน 100 และ 200 รอบต่อนาทีตามลำดับ โดยมีอัตราการป้อนอากาศคงที่ 1 ลิตรต่อนาที ผลการเปรียบเทียบขนาดฟองเฉลี่ยในระบบที่คำนวณได้จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง แสดงดังตาราง 6.3 จะเห็นได้ว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายขนาดฟองที่เกิดขึ้นในระบบได้โดยมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นจึงเชื่อได้ว่าการทำนายปรากฏการณ์ของวัฏภาคแก๊สของแบบจำลองจะสามารถทำนายผลในสภาวะการดำเนินการที่มีความปั่นป่วนมากขึ้นได้

ตาราง 6.3 ผลการสอบเทียบขนาดฟองอากาศเฉลี่ยจากแบบจำลองกับผลการทดลอง

Conditions		Sauter mean diameter			
Water Volume	N	$Q_G$	Measured	Simulation	Error
Liter	RPM	LPM	mm.	mm.	%
5.11	100	1	5.58	5.44	-2.40
5.11	200	1	5.07	5.02	-1.02





รูปที่ 6.2 ขนาดฟองที่สังเกตได้จากการทดลอง

(ก) 100 RPM, 1 LPM; (ข) 200 RPM, 1 LPM



## บรรณานุกรม

- Alves, S. S., C. I. Maia, J. M. T. Vasconcelos, and A. J. Serralheiro. 2002. 'Bubble size in aerated stirred tanks', *Chemical Engineering Journal*, 89: 109-17.
- Amer, M., Y. Feng, and J. D. Ramsey. 2019. 'Using CFD simulations and statistical analysis to correlate oxygen mass transfer coefficient to both geometrical parameters and operating conditions in a stirred-tank bioreactor', *Biotechnol Prog*, 35: e2785.
- ANSYS, Inc. 2016. "ANSYS Fluent Theory Guide v17.1." In *ANSYS 17.1 Documentation*, 850.
- Armenante, Piero M., and Gwo-Ming Chang. 1998. 'Power Consumption in Agitated Vessels Provided with Multiple-Disk Turbines', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 37: 284-91.
- Brucato, A., M. Ciofalo, F. Grisafi, and G. Micale. 1998. 'Numerical prediction of flow fields in baffled stirred vessels: A comparison of alternative modelling approaches', *Chemical Engineering Science*, 53: 3653-84.
- Calderbank, PH. 1958. 'Physical rate processes in industrial fermentations part i: The interfacial area in gas-liquid contacting with mechanical agitation', *Trans. Inst. Chem. Engrs*, 36: 443-63.
- Coroneo, M., G. Montante, A. Paglianti, and F. Magelli. 2011. 'CFD prediction of fluid flow and mixing in stirred tanks: Numerical issues about the RANS simulations', *Computers & Chemical Engineering*, 35: 1959-68.
- Cui, Y. Q., R. G. J. M. van der Lans, and K. Ch A. M. Luyben. 1996. 'Local power uptake in gas-liquid systems with single and multiple rushton turbines', *Chemical Engineering Science*, 51: 2631-36.
- Delafosse, A., A. Line, J. Morchain, and P. Guiraud. 2008. 'LES and URANS simulations of hydrodynamics in mixing tank: Comparison to PIV experiments', *Chemical Engineering Research & Design*, 86: 1322-30.
- Dendee, Arthorn. 2018. 'COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC SIMULATION FOR POWER CONSUMPTION IN NONSTANDARD MIXING TANK', Chulalongkorn University.

- Devi, T. T., and B. Kumar. 2017. 'Mass transfer and power characteristics of stirred tank with Rushton and curved blade impeller', *Engineering Science and Technology- an International Journal-Jestech*, 20: 730-37.
- Doran, P. M. 2012. *Bioprocess engineering principles: Second edition*.
- Doran, Pauline M. 2013. 'Mass Transfer.' in, *Bioprocess Engineering Principles*.
- Edwards, M. F., M. R. Baker, and J. C. Godfrey. 1992. 'Mixing of liquids in stirred tanks.' in, *Mixing in the Process Industries* (Butterworth-Heinemann).
- Elqotbi, M., S. D. Vlaev, L. Montastruc, and I. Nikov. 2013. 'CFD modelling of two-phase stirred bioreaction systems by segregated solution of the Euler–Euler model', *Computers & Chemical Engineering*, 48: 113-20.
- Fitschen, Jürgen, Marc Maly, Annika Rosseburg, Johannes Wutz, Thomas Wucherpfennig, and Michael Schlüter. 2019. 'Influence of Spacing of Multiple Impellers on Power Input in an Industrial-Scale Aerated Stirred Tank Reactor', *Chemie Ingenieur Technik*, 91: 1794-801.
- Garcia-Ochoa, F., and E. Gomez. 2009. 'Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: an overview', *Biotechnol Adv*, 27: 153-76.
- Gimbun, J., C. D. Rielly, and Z. K. Nagy. 2009. 'Modelling of mass transfer in gas–liquid stirred tanks agitated by Rushton turbine and CD-6 impeller: A scale-up study', *Chemical Engineering Research and Design*, 87: 437-51.
- Gimbun, Jolius, Shi Yan Liew, Zoltan K. Nagy, and Chris D. Rielly. 2016. 'Three-Way Coupling Simulation of a Gas-Liquid Stirred Tank using a Multi-Compartment Population Balance Model %J Chemical Product and Process Modeling', 11: 205.
- Higbie, R. 1935. 'The Rate of Absorption of a Pure Gas into a Still Liquid during Short Periods of Exposure', *Transactions of the AIChE*, 31: 365-89.
- Hudcova, V., V. Machon, and A. W. Nienow. 1989. 'Gas-liquid dispersion with dual Rushton turbine impellers', *Biotechnol Bioeng*, 34: 617-28.
- Ishii, Mamoru, and Novak Zuber. 1979. 'Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows', 25: 843-55.
- Jamialahmadi, M., M. R. Zehtaban, H. Müller-Steinhagen, A. Sarrafi, and J. M. Smith. 2001. 'Study of Bubble Formation Under Constant Flow Conditions', *Chemical*

*Engineering Research and Design*, 79: 523-32.

- Joshi, Jyeshtharaj B., Nandkishor K. Nere, Chinmay V. Rane, B. N. Murthy, Channamallikarjun S. Mathpati, Ashwin W. Patwardhan, and Vivek V. Ranade. 2011. 'CFD simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models. Part I: Radial flow impellers', 89: 23-82.
- Kaiser, S. C., R. Eibl, and D. Eibl. 2011. 'Engineering characteristics of a single-use stirred bioreactor at bench-scale: The Mobius CellReady 3L bioreactor as a case study', *Engineering in Life Sciences*, 11: 359-68.
- Kawase, Yoshinori, Benoit Halard, and Murray Moo-Young. 1992. 'Liquid-Phase mass transfer coefficients in bioreactors', 39: 1133-40.
- Kresta, Suzanne M., and Robert S. Brodkey. 2003. 'Turbulence in Mixing Applications.' in, *Handbook of Industrial Mixing*.
- Laakkonen, M., P. Moilanen, V. Alopaeus, and J. Aittamaa. 2007. 'Modelling Local Gas-Liquid Mass Transfer in Agitated Vessels', *Chemical Engineering Research and Design*, 85: 665-75.
- Launder, B. E. 1972. *Lectures in mathematical models of turbulence [by] B. E. Launder and D. B. Spalding* (Academic Press: London, New York).
- Lehr, F., M. Millies, and D. Mewes. 2002. 'Bubble-Size distributions and flow fields in bubble columns', *AIChE Journal*, 48: 2426-43.
- Li, Z. P., Y. Y. Bao, and Z. M. Gao. 2011. 'PIV experiments and large eddy simulations of single-loop flow fields in Rushton turbine stirred tanks', *Chemical Engineering Science*, 66: 1219-31.
- Luo, H. 1993. 'Coalescence, breakup and liquid circulation in bubble column reactors', the Norwegian Institute of Technology, Trondheim ,Norway.
- Mahmoudi S.M., Yianneskis M. 1992. 'The Variation of Flow Pattern and Mixing Time with Impeller Spacing in Stirred Vessels with Two Rushton Impellers', *Fluid Mechanics and Its Applications*, 10.
- Malik, S., E. Leveque, M. Bouaifi, L. Gamet, E. Flottes, S. Simoens, and M. El-Hajem. 2016. 'Shear improved Smagorinsky model for large eddy simulation of flow in a stirred tank with a Rushton disk turbine', *Chemical Engineering Research & Design*, 108: 69-80.

- Marshall, Elizabeth Marden, and André Bakker. 2003. 'Computational Fluid Mixing.' in, *Handbook of Industrial Mixing*.
- Mawson, Ryan A. 2012. 'Bubble Coalescence and Breakup Modeling for Computing Mass Transfer Coefficient', Utah State University
- Micale, Giorgio, Alberto Brucato, Franco Grisafi, and Michele Ciofalo. 1999. 'Prediction of flow fields in a dual-impeller stirred vessel', 45: 445-64.
- Middleton, John C., and John M. Smith. 2003. 'Gas-Liquid Mixing in Turbulent Systems.' in, *Handbook of Industrial Mixing*.
- Murthy, B. N., and J. B. Joshi. 2008. 'Assessment of standard  $k-\epsilon$ , RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs', *Chemical Engineering Science*, 63: 5468-95.
- Patel, Mehul. 2014. 'Using Multiple Reference Frame Model for Turbomachinery Analysis', Accessed March 18. <https://www.hitechcfd.com/cfd-knowledgebase/using-multiple-reference-frame-model-for-turbomachinery-analysis.html>.
- Ranganathan, Panneerselvam, and Savithri Sivaraman. 2011. 'Investigations on hydrodynamics and mass transfer in gas-liquid stirred reactor using computational fluid dynamics', *Chemical Engineering Science*, 66: 3108-24.
- Rathore, A. S., C. Sharma, and A. Persad. 2012. 'Use of computational fluid dynamics as a tool for establishing process design space for mixing in a bioreactor', 28: 382-91.
- Rutherford, K., K. C. Lee, S. M. S. Mahmoudi, and M. Yianneskis. 1996. 'Hydrodynamic characteristics of dual Rushton impeller stirred vessels', *AIChE Journal*, 42: 332-46.
- Sarkar, J., L. K. Shekhawat, V. Loomba, and A. S. Rathore. 2016. 'CFD of mixing of multi-phase flow in a bioreactor using population balance model', *Biotechnol Prog*, 32: 613-28.
- Schiller, L., and Z. Naumann. 1935. 'A drag coefficient correlation', *Zeit Ver Deutsch Ing.*, 77: 318-20.
- Singh, H., D. F. Fletcher, and J. J. Nijdam. 2011. 'An assessment of different turbulence

- models for predicting flow in a baffled tank stirred with a Rushton turbine', *Chemical Engineering Science*, 66: 5976-88.
- Syed, A. H., M. Boulet, T. Melchiori, and J. M. Lavoie. 2017. 'CFD Simulations of an Air-Water Bubble Column: Effect of Luo Coalescence Parameter and Breakup Kernels', *Front Chem*, 5: 68.
- Taghavi, Mahsa, Ramin Zadghaffari, Jafarsadegh Moghaddas, and Yousef Moghaddas. 2011. 'Experimental and CFD investigation of power consumption in a dual Rushton turbine stirred tank', *Chemical Engineering Research and Design*, 89: 280-90.
- Van't Riet, Klaas. 1979. 'Review of Measuring Methods and Results in Nonviscous Gas-Liquid Mass Transfer in Stirred Vessels', *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 18: 357-64.
- Versteeg, Henk Kaarle, and Weeratunge Malalasekera. 2007. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method* (Pearson education).
- Wang, Tiefeng, and Jinfu Wang. 2007. 'Numerical simulations of gas-liquid mass transfer in bubble columns with a CFD-PBM coupled model', *Chemical Engineering Science*, 62: 7107-18.
- Whitman, WG. 1923. 'Preliminary experimental confirmation of the two-film theory of gas absorption', *Chem. Metall. Eng*, 29: 146.
- Yawalkar, Archis A., Albertus B. M. Heesink, Geert F. Versteeg, and Vishwas G. Pangarkar. 2008. 'Gas-Liquid Mass Transfer Coefficient in Stirred Tank Reactors', *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 80: 840-48.
- Zhang, Hu, Kai Zhang, and Shengdi Fan. 2009. 'CFD simulation coupled with population balance equations for aerated stirred bioreactors', 9: 421-30.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กรพรรศน์ สติตรีภ
วัน เดือน ปี เกิด	28 สิงหาคม 2538
สถานที่เกิด	อ่างทอง
วุฒิการศึกษา	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	247/5 หมู่ 2 ตำบลไผ่ขวาง อำเภอเมืองสุพรรณบุรี จังหวัดสุพรรณบุรี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY