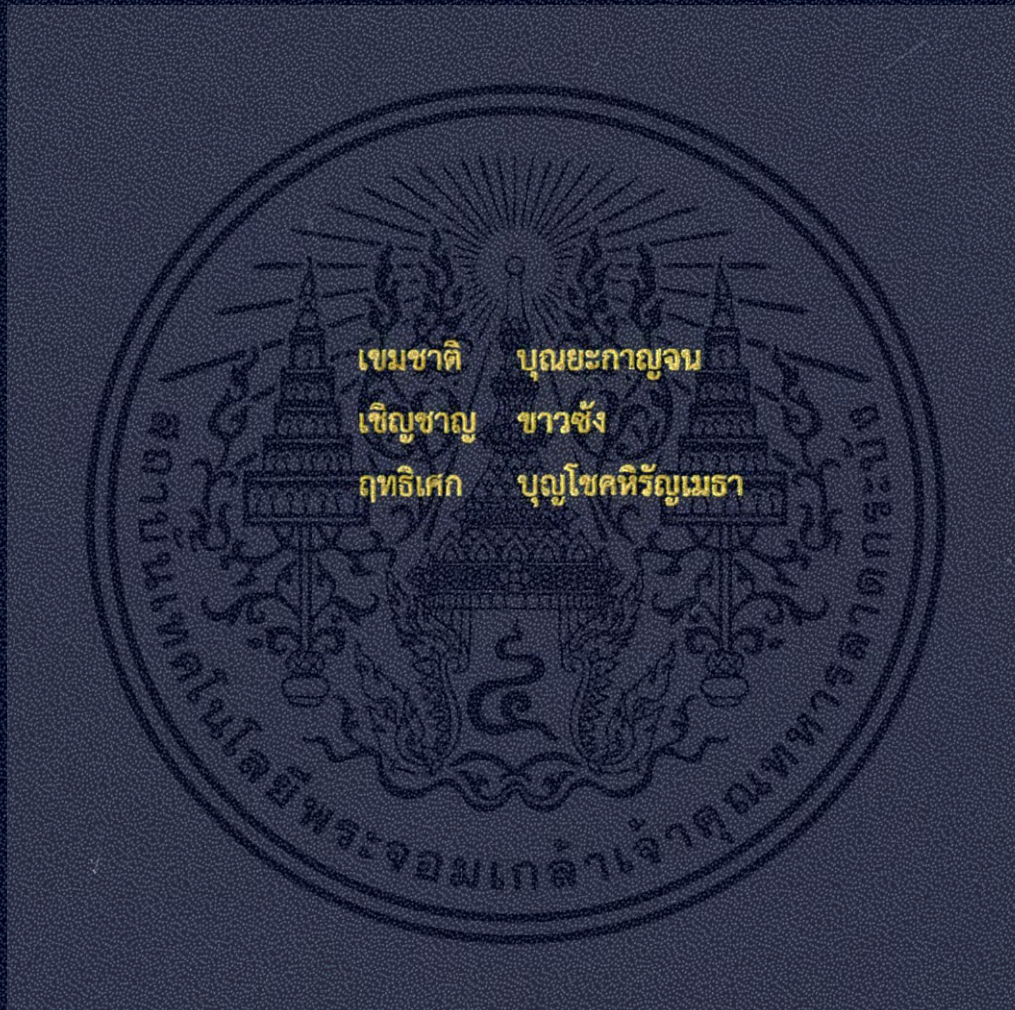


การออกแบบห้องผสมสำหรับชุดหัวฉีดเหนียวน้ำในหอบำบัดอากาศแบบเปียก  
DESIGN OF MIXING CHAMBER FOR LIQUID-GAS EJECTOR IN WET SCRUBBER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การออกแบบห้องผสมสำหรับชุดหัวฉีดเหนียวน้ำในหอบำบัดอากาศแบบเปียก

DESIGN OF MIXING CHAMBER FOR LIQUID-GAS EJECTOR IN WET SCRUBBER



T143896

เขมชาติ บุษยะกาญจน  
เชิญชาญ ขาวซัง  
ฤทธิเศก บุญโชคหิรัญเมธา

๑๒พ.  
๗ ๖๓๖๓  
๒๕๖๘


เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 143896  
วันเดือนปี 04 ต.ค. 2559



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN OF MIXING CHAMBER FOR LIQUID-GAS EJECTOR IN WET SCRUBBER



Khemmachat Bunyakanchana  
Charnchan Khosang  
Ritthisek Boonchokhirunmatha

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบห้องผสมสำหรับชุดหัวฉีดเหนียวน้ำในหอบำบัดอากาศแบบเปียก  
DESIGN OF MIXING CHAMBER FOR LIQUID-GAS EJECTOR IN WET SCRUBBER

ผู้จัดทำ

- |                               |                       |
|-------------------------------|-----------------------|
| 1. นายเชมชาติ บุณยะกาญจน      | รหัสประจำตัว 55010115 |
| 2. นายเชษฐาญ ขาวซัง           | รหัสประจำตัว 55010294 |
| 3. นายฤทธิเศก บุญโชคหิรัญเมธา | รหัสประจำตัว 55011058 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. ณัฐวิภา เจียรระโนวชิระ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบห้องผสมสำหรับชุดหัวฉีดเหนียวน้ำในหอบำบัดอากาศแบบเปียก

นายเชมชาติ บุญยะกาญจน	55010115
นายเชษฐาญญา ขาวซัง	55010294
นายฤทธิเศก บุญโชคศิริธูเมธา	55011058
ผศ.ดร.ณัฐวิภา เจียรระโนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2558	

### บทคัดย่อ

ในการบำบัดอากาศเสียในทางอุตสาหกรรม หัวฉีดน้ำเหนียวน้ำอากาศได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับหอบำบัดอากาศแบบเปียกโดยใช้ผลต่างของความดันบริเวณรอบหัวฉีดในการเหนียวน้ำอากาศเสียทำให้เกิดการถ่ายโอนมลภาวะในอากาศลงสู่น้ำ การออกแบบห้องผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลระหว่างน้ำกับอากาศได้ใช้ใบพัด helical static mixer ซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศขณะที่ของผสมไหลผ่านตัวใบพัด แบบจำลองถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม GAMBIT และจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT จากผลการจำลองพบว่าใบพัดชนิด helical static mixer โดยมีระยะห่างจากหัวฉีดที่ระยะ 20 เท่าของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด จะให้ค่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำมีค่าเข้าใกล้ค่า 0.50 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการแลกเปลี่ยนมวลที่ตรงระหว่างน้ำและอากาศ สำหรับการทดลองจริง การแลกเปลี่ยนมวลที่ดีที่สุดสามารถพิจารณาได้จากค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนออกซิเจนจากอากาศลงในน้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้ใบพัด helical static mixer ชนิดใบพัดสามแกน ที่อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที ให้ผลการแลกเปลี่ยนมวลที่ดีที่สุด โดยใช้เวลา 660 วินาทีในการทำให้ค่าออกซิเจนในน้ำขึ้นสู่ค่าอิ่มตัวที่ 7.06 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนเท่ากับ 9.74 ต่อชั่วโมง

## Design of mixing chamber for liquid-gas ejector in wet scrubber

Khemmachat Bunyakanchana 55010115  
Charnchan Khosang 55010294  
Ritthisek Boonchokhirunmatha 55011058  
Assoc.Prof. Dr.Nutvipa Jayranaiwachira  
Advisor Year 2558

### ABSTRACT

In industrial air pollution treatment, the wet scrubber has been used to clean polluted air from the processes. By using pressure gradient between the high speed water jet and surrounded air, the nozzles have been designed to increase the amount of induced air. To make better mass transfer rate, addition of mixing chamber with static mixer in proper length from the nozzle was done in this work. The designs of static mixers were done in many shapes by using the GAMBIT program to create the mixer geometry, mesh and boundaries. The flow of mixing fluids was simulated by ANSYS FLUENT program. From the simulation results, the helical static mixer gave good mixing by increasing contact surface between air and water. It can be seen from the simulation result that the proper length between nozzles to helical static mixer is about 20 times of nozzle diameter which the volume fraction of water value close to 0.50. According to the experimental work, good mixing efficiency in terms of oxygen transfer coefficient flow can achieve by using mixing chamber with static mixers. Moreover, the results also showed that the three-blade swirl mixer at the flow rate of 12 liter per minute took 660 seconds to make dissolved oxygen to the saturated point at 7.06 milligram per liter and the oxygen transfer coefficient at 9.74 per hour.

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร. ณัฏวิภา เจียรระโนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อมที่เอื้อเพื่อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการนี้ และขอบคุณพีโน้ต ที่ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงการนี้ และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นายเชมชาติ	บุญยะกาญจน
นายเชิญชาญ	ชาวซัง
นายฤทธิเศก	บุญโชคหิรัญเมธา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา III ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	viii
สารบัญรูป.....	x
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดเหนียวน้ำ.....	4
2.1.1 อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวน้ำ.....	4
2.1.2 อัตราส่วนการวางตัวและรูปแบบการวางตัวของชุดหัวฉีดเหนียวน้ำ.....	5
2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม.....	5
2.3 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ static mixer.....	5
2.3.1 การเลือกใช้ static mixer.....	5
2.3.2 Static mixer แบบ helical static mixer.....	7
2.4 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเติมอากาศแบบเหนียวน้ำโดยหัวฉีดพ่น.....	8
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1 ทฤษฎีเจ็ท.....	9
3.1.1 ความรู้เบื้องต้นของเจ็ท.....	9
3.1.2 โครงสร้างและพัฒนาของเจ็ทอิสระ.....	9
3.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท.....	10
3.1.3.1 รูปแบบความเร็วของเจ็ท ณ ตำแหน่งทางออกของหัวฉีด.....	10
3.1.3.2 รูปทรงของหัวฉีด.....	11
3.1.3.3 เลขเรย์โนลด์สของเจ็ท.....	11
3.1.3.4 ครึ่งความกว้างและจุดกำเนิดเสมือน (Half Width and Virtual Origin of the Jet).....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **IV** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3.5 ความไม่เสถียรของเจ็ท (Jet Instability).....	12
3.1.3.6 ความต่อเนื่องของโครงสร้าง (Coherent Structure).....	13
3.1.3.7 การกระจายตัวแบบอุณหภูมิคงที่และไม่คงที่ (Isothermal and Non isothermal Jet).....	13
3.1.3.8 การจำลองตัวเอง (Self Similarity).....	14
3.1.3.9 บทบาทของผนังด้านข้างต่อกระแสของเจ็ท (Role of Side Walls in Jet Flow).....	14
3.1.3.10 มาตรการส่วนความยาวของความปั่นป่วน (Turbulence Length Scales).....	15
3.2 ทฤษฎี Static Mixer.....	15
3.2.1 การแยกสลายตัวของพลังงานใน Static Mixer.....	16
3.3 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ.....	17
3.4 หลักการเติมอากาศและการถ่ายเทมวลระหว่างฟองอากาศกับน้ำ.....	17
3.4.1 ขั้นตอนของการถ่ายเทออกซิเจนจากบรรยากาศไปสู่ชั้นของเหลว.....	19
3.4.2 หลักการคำนวณมวลสารที่ถูกถ่ายเท.....	19
3.4.3 วิธีวัดประสิทธิภาพในการเติมอากาศ.....	22
3.4.3.1 การคำนวณปรับค่า $K_L a$ สำหรับอุณหภูมิต่างๆ.....	23
3.4.3.2 การคำนวณการปรับค่า $C_S$ สำหรับอุณหภูมิ และความดันบรรยากาศใดๆ.....	23
3.4.3.3 การคำนวณหาประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน.....	23
3.4.4 ปัจจัยที่ทำให้ออกซิเจนในน้ำมีมากหรือน้อย.....	24
3.5 วิธีการ Finite volume.....	25
3.5.1 บทนำ.....	25
3.5.2 วิธี Finite volume.....	25
3.5.3 Discretisation สมการควบคุม.....	27
3.5.3.1 Convection term.....	27
3.5.4 เงื่อนไขทางเข้าที่ทางเข้า (Boundary condition).....	28
3.5.5 กระบวนการหาคำตอบ.....	28
3.5.5.1 The SIMPLE Algorithm.....	28
3.6 การจำลองการไหลแบบปั่นป่วน.....	30
3.7 VOF Free Surface Model.....	31
บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองและวิธีการทดลอง.....	33
4.1 การสร้างแบบจำลอง.....	33
4.1.1 การสร้างรูปร่างห้องผสม.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ V ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 การสร้างขอบเขตย่อย (mesh).....	34
4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition).....	34
4.1.4 การกำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้น (Initial Condition).....	35
4.1.5 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร (Variable Condition) และการคำนวณผลเฉลย.....	35
4.1.6 การสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (Model Validation).....	36
4.2 ชุดทดลองและวิธีการทดลอง.....	39
4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	39
4.2.1.1 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ.....	40
4.2.1.2 ห้องเหนี่ยวนำอากาศ.....	40
4.2.1.3 ห้องผสม (Mixing Chamber).....	41
4.2.2 ถังผสม (Mixing Tank).....	42
4.2.3 ชุดเครื่องวัดความเข้มข้นออกซิเจน.....	44
4.2.4 ระบบสูบน้ำและอุปกรณ์ต่างๆ.....	44
4.2.4.1 เครื่องสูบน้ำ.....	44
4.2.4.2 วาล์ว (Valve).....	45
4.2.4.3 ชุดท่อพีวีซี.....	45
4.2.5 เครื่องมือวัด (Measuring Equipment).....	46
4.2.5.1 เครื่องวัดอัตราไหลของน้ำ (Rota meter).....	46
4.2.5.2 เครื่องวัดความเข้มข้นออกซิเจน (Dissolved Oxygen meter).....	46
4.2.5.3 เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า (Clamp on Power meter).....	47
4.2.6 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47
4.2.7 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ (Canon EOS 7D Mark II).....	48
4.3 วิธีการทดลอง.....	48
บทที่ 5 ผลการสร้างแบบจำลองและการทดลอง.....	49
5.1 ผลจากการสร้างแบบจำลอง.....	49
5.1.1 ผลการจำลองเพื่อหาระยะที่เหมาะสมในการติดใบพัด.....	49
5.1.1.1 ผลจากการจำลองห้องผสมที่ไม่ติดใบพัด.....	49
5.1.1.2 ผลจากการจำลองห้องผสมที่ติดใบพัดชนิดสองแกน, ชนิดสามแกนและชนิดสี่แกน.....	50
5.1.2 ผลจากการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำ ตามระยะความยาวของห้องผสม ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.3 ผลจากการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำ ตามแนวหน้าตัดของห้องผสมของห้องผสมโดยวัดตามระยะห่าง จากหัวฉีด ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	63
5.2 ผลการทดลอง.....	67
บทที่ 6 สรุปและอภิปรายผลโครงการ.....	75
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก.....	78
ภาคผนวก ข.....	83
ภาคผนวก ค.....	87
ภาคผนวก ง.....	105



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VII นี้ อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงข้อมูลจุดอิ่มตัวของค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำ, เวลาในการเข้าสู่ค่าอิ่มตัว, ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน และประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศ .....	71
ข1 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำ เมื่อระยะจากหัวฉีดถึงใบพัดเป็น 5D; .....	83
ข2 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำ เมื่อระยะจากหัวฉีดถึงใบพัดเป็น 10D; .....	83
ข3 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำ เมื่อระยะจากหัวฉีดถึงใบพัดเป็น 15D; .....	84
ข4 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำ เมื่อระยะจากหัวฉีดถึงใบพัดเป็น 20D; .....	84
ข5 ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของห้องผสมไม่ติดใบพัด วัตรระยะจากปลายหัวฉีด ที่อัตราการไหลของน้ำ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อวินาที.....	85
ข6 ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของห้องผสม ติดใบพัดชนิดสองแกน วัตรระยะจากปลายหัวฉีด ที่อัตราการไหลของน้ำ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อวินาที.....	85
ข7 ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของห้องผสม ติดใบพัดชนิดสามแกน วัตรระยะจากปลายหัวฉีด ที่อัตราการไหลของน้ำ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อวินาที.....	86
ข8 ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของห้องผสม ติดใบพัดชนิดสี่แกน วัตรระยะจากปลายหัวฉีด ที่อัตราการไหลของน้ำ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อวินาที.....	86
ค1 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ไม่ติดใบพัดที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อวินาที .....	87
ค2 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ไม่ติดใบพัดที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อวินาที .....	88
ค3 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ไม่ติดใบพัดที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อวินาที .....	89
ค4 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ไม่ติดใบพัดที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อวินาที .....	90
ค5 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดใบพัดชนิดสองแกนที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อวินาที .....	91
ค6 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมติด ใบพัดชนิดสองแกนที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อวินาที.....	92
ค7 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดใบพัดชนิดสองแกนที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อวินาที.....	93
ค8 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดใบพัดชนิดสองแกนที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อวินาที.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค9 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดไบบัดชนิดสามแกนที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อวินาที.....	95
ค10 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดไบบัดชนิดสามแกนที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อวินาที.....	96
ค11 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดไบบัดชนิดสามแกนที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อวินาที.....	97
ค12 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดไบบัดชนิดสามแกนที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อวินาที.....	98
ค13 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดไบบัดชนิดสี่แกนที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อวินาที.....	99
ค14 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดไบบัดชนิดสี่แกนที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อวินาที.....	100
ค15 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดไบบัดชนิดสี่แกนที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อวินาที.....	101
ค16 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสม ติดไบบัดชนิดสี่แกนที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อวินาที.....	102
ค17 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองกับประสิทธิภาพความเร็วอากาศ มีค่า PF = 0.98.....	103
ค18 แสดงข้อมูลของการเก็บค่าของเวลาในการเทียบวัดของ Rota meter.....	103

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 หัวฉีดเหนียวนำอากาศโดย นายจิรพล เนียมพินิจสกุลและคณะ.....	2
2.1 ตัวแปรของระยะต่างๆในหัวฉีดเหนียวนำ .....	4
2.2 การแบ่งกลุ่ม Static mixer ตามลักษณะการใช้งาน.....	6
2.3 การเลือก Static mixer .....	7
2.4 รูปแบบของ helical static mixer elements : (a) ภาพ 3D (b) ภาพตามแนวแกนของ mixer 3 elements ภายในท่อ (c) ภาพตัดขวางตามแนว BB' (d) ภาพตัดขวางตามแนว AA'.....	8
3.1 ลักษณะกระแสการไหลของเจ็ท.....	9
3.2 ตำแหน่งจุดกำเนิดเสมือนและระยะครึ่งความกว้าง.....	12
3.3 ความไม่เสถียรของชั้นความเค้นในเจ็ท.....	13
3.4 พฤติกรรมของรูปแบบความเร็วของเจ็ทเมื่อมีผนังด้านข้าง.....	15
3.5 แสดงการไหลในแนวสัมผัส.....	16
3.6 แสดงการแบ่งเป็นริ้วเมื่อของไหลไหลผ่านอิลิเมนต์.....	16
3.7 แสดงการไหลในแนวรัศมี.....	16
3.8 ออกซิเจนถ่ายเทอากาศให้กับหยดน้ำขนาดเล็กที่เกิดจากการตีน้ำ ของเครื่องเติมอากาศ.....	18
3.9 ออกซิเจนถ่ายเทจากฟองอากาศให้กับน้ำที่ห่อหุ้ม.....	18
3.10 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว.....	19
3.11 ลักษณะการวางเซลล์ใน Staggered grid.....	26
3.12 แสดงการประมาณค่าด้วยวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง.....	28
3.13 แผนผังของ SIMPLE algorithm .....	30
4.1 รูปแสดงระยะตัวแปรต่างๆในห้องผสม.....	33
4.2 (ก) Tetrahedral mesh ของแบบจำลอง (ข) จำนวนของขอบเขตย่อย.....	34
4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของห้องผสม.....	35
4.4 การสอบเทียบผลการจำลองด้วยการทดลองหาความยาวระยะยกในแนวราบของน้ำจาก ความสูง 30 มิลลิเมตรที่อัตราไหลน้ำ (ก) 10 ลิตรต่อนาที (ข) 12.5 ลิตรต่อนาที (ค) 15 ลิตรต่อนาที และ ง) 17.5 ลิตรต่อนาที.....	37
4.5 กราฟแสดงการสอบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองหาความยาวระยะยกในแนวราบ ของน้ำจาก ความสูง 30 มิลลิเมตรจากระดับอ้างอิง.....	37
4.6 รูปแสดงภาพแบบจำลองหัวฉีดของนาย จิรพล เนียมพินิจ สกุลและคณะ เพื่อใช้ในการ สอบเทียบผลการเหนียวนำอากาศของแบบจำลองกับผลการทดลอง.....	38
4.7 กราฟแสดงการสอบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองการเหนียวนำอากาศของนาย จิรพล เนียมพินิจและคณะ.....	38
4.8 (ก) แผนผังชุดทดลอง (ข) การติดตั้งชุดทดลองจริง.....	40
4.9 หัวฉีดเหนียวนำอากาศที่ใช้ทดลอง.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ห้องเหนียวนำอากาศ.....	41
4.11 (ก) ห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด (ข) กล่องยึดห้องผสมกับชุดทดลอง.....	41
4.12 ห้องผสมที่ติดใบปิด (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกน (ค) ชนิดสี่แกน.....	42
4.13 ถังผสมที่ใช้ในการทดลอง.....	43
4.14 ชุดทดลองส่วนถังผสม.....	43
4.15 ชุดเครื่องวัดค่าความเข้มข้นออกซิเจน.....	44
4.16 เครื่องสูบน้ำที่ใช้ทดลอง.....	44
4.17 วาล์วที่ใช้ในการทดลอง (ก) Globe valve (ข) Ball valve.....	45
4.18 ชุดท่อพีวีซี.....	45
4.19 เครื่องวัดอัตราไหลของน้ำ.....	46
4.20 เครื่องวัดเข้มข้นออกซิเจน.....	46
4.21 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า.....	47
4.22 (ก) สารโซเดียมซัลไฟต์ (ข) สารโคบอลตคลอไรด์.....	47
4.23 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ.....	48
5.1 (ก) ผลจากการจำลองห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด (ข) ค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามระยะจากหัวฉีด.....	50
5.2 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อ $L_b$ เท่ากับ 5D <sub>j</sub> เมื่อ (ก) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสามแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสี่แกน.....	50
5.3 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อ $L_b$ เท่ากับ 10D <sub>j</sub> เมื่อ (ก) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสามแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสี่แกน.....	50
5.4 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อ $L_b$ เท่ากับ 15D <sub>j</sub> เมื่อ (ก) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสามแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสี่แกน.....	51
5.5 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อ $L_b$ เท่ากับ 20D <sub>j</sub> เมื่อ (ก) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสามแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสี่แกน.....	51
5.6 (ก) ตารางเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของใบปิดทั้งสามชนิด ในแนวตัดขวางของห้องผสมเมื่อติดใบปิดที่ระยะ 5D <sub>j</sub> .....	53
(ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ออกแบบ ต่อระยะตามจำนวนใบปิด.....	54
5.7 (ก) ตารางเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของใบปิดทั้งสามชนิด ในแนวตัดขวางของห้องผสมเมื่อติดใบปิดที่ระยะ 10D <sub>j</sub> .....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **XI** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ออกแบบต่อระยะตามจำนวนใบปิด.....	56
5.8 (ก) ตารางเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของใบปิดทั้งสามชนิดในแนวตัดขวางของห้องผสมเมื่อติดใบปิดที่ระยะ 15D <sub>j</sub> .....	57
(ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ออกแบบต่อระยะตามจำนวนใบปิด.....	58
5.9 (ก) ตารางเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของใบปิดทั้งสามชนิดในแนวตัดขวางของห้องผสมเมื่อติดใบปิดที่ระยะ 20D <sub>j</sub> .....	59
(ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ออกแบบต่อระยะตามจำนวนใบปิด.....	60
5.10 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำของใบปิดที่ใช้ทดลองจริงที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อนาที เมื่อ (ก) ห้องผสมไม่ติดใบปิด (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดสามแกน (ง) ห้องผสมที่ติดใบปิดสี่แกน.....	61
5.11 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำของใบปิดที่ใช้ทดลองจริงที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อนาที เมื่อ (ก) ห้องผสมไม่ติดใบปิด (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดสามแกน (ง) ห้องผสมที่ติดใบปิดสี่แกน.....	61
5.12 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำของใบปิดที่ใช้ทดลองจริงที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อนาที เมื่อ (ก) ห้องผสมไม่ติดใบปิด (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดสามแกน (ง) ห้องผสมที่ติดใบปิดสี่แกน.....	62
5.13 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำของใบปิดที่ใช้ทดลองจริงที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อนาที เมื่อ (ก) ห้องผสมไม่ติดใบปิด (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดสามแกน (ง) ห้องผสมที่ติดใบปิดสี่แกน.....	62
5.14 (ก) รูปแสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	63
5.15 (ก) รูปแสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	64
5.16 (ก) รูปแสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 (ก) รูปแสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสม ในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	66
5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่อเวลา ของห้องผสมที่ออกแบบที่อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที.....	67
5.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่อเวลา ของห้องผสมที่ออกแบบที่อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที.....	68
5.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่อเวลา ของห้องผสมที่ออกแบบที่อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที.....	68
5.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่อเวลา ของห้องผสมที่ออกแบบที่อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที.....	69
5.22 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนออกซิเจนในหน่วยลิตรต่อวินาที กับเวลาในหน่วยวินาที.....	69
5.23 ภาพถ่ายแสดงรูปร่างของฟองอากาศที่เกิดขึ้นของห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสองแกน (ก) อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที (ข) อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที (ค) อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที (ง) อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที.....	72
5.24 ภาพถ่ายแสดงรูปร่างของฟองอากาศที่เกิดขึ้นของห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสามแกน (ก) อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที (ข) อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที (ค) อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที (ง) อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที.....	73
5.25 ภาพถ่ายแสดงรูปร่างของฟองอากาศที่เกิดขึ้นของห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสี่แกน (ก) อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที (ข) อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที (ค) อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที (ง) อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที.....	74
1.ก หน้าจอเริ่มต้นของโปรแกรม GAMBIT.....	78
2.ก การสร้างแบบจำลองใบปิด.....	78
3.ก การสร้างแบบจำลองห้องผสม.....	79
4.ก การสร้างขอบเขตย่อยด้วยโปรแกรม GAMBIT.....	79
5.ก การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยโปรแกรม GAMBIT .....	79
6.ก การเปิดไฟล์แบบจำลองจากโปรแกรม GAMBIT .....	80
7.ก การตั้งค่าพฤติกรรมการไหลที่สนใจในโปรแกรม fluent.....	80
8.ก การตั้งค่าของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิ.....	81
9.ก การตั้งค่าในเงื่อนไขขอบเขตในโปรแกรม fluent.....	81
10.ก การกำหนดการคำนวณหาค่าตอบในโปรแกรม fluent .....	82
11.ก แสดงการคำนวณรอบซ้ำในโปรแกรม fluent .....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XIII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
1.ค	กราฟการเปรียบเทียบอัตราไหลของ rota meter ที่เกิดจริงกับค่าที่อ่านได้.....104
1.ง	แสดงภาพแบบใบพัดชนิดสองแกน ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมออตแคด (Auto CAD).....106
2.ง	แสดงภาพแบบใบพัดชนิดสามแกน ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมออตแคด (Auto CAD).....107
3.ง	แสดงภาพแบบใบพัดชนิดสี่แกน ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมออตแคด (Auto CAD).....108



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นจะก่อให้เกิดมลพิษขึ้น เช่น ฝุ่นละออง แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และมีเทน ( $CH_4$ ) โดยมลพิษเหล่านี้จะต้องได้รับการบำบัดก่อนจะถูกปล่อยออกไป และการบำบัดที่ได้รับความนิยมคือการบำบัดแบบเปียก (wet scrubber) เนื่องจากสามารถดักมลพิษที่เป็นฝุ่นละอองได้และยังสามารถดักแก๊สบางชนิดได้ด้วย โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำอากาศจากผลต่างความดัน การประยุกต์ใช้หัวฉีดน้ำความเร็วสูงซึ่งจะทำให้ให้ความดันบริเวณรอบข้างลดลงนำไปสู่การเหนี่ยวนำอากาศที่มีความดันสูงกว่าเข้ามาสู่ของน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดการผสมและแลกเปลี่ยนมวลกันระหว่างน้ำและอากาศที่ห้องผสมซึ่งอยู่ถัดมาจากหัวฉีด จุดประสงค์เพื่อให้มลภาวะที่อยู่ในอากาศถ่ายโอนไปสู่เฟสน้ำ โดยปัจจัยที่มีผลในการแลกเปลี่ยนมวลขึ้นอยู่กับ การออกแบบรูปร่างของห้องผสมโดยจะทำการติดตั้ง static mixer (เครื่องกวนในท่อ) เพื่อเพิ่มระยะทางในท่อน้ำทั้งสองสามารถแลกเปลี่ยนมวลได้มากขึ้น

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาห้องผสมโดยใช้เครื่องกวนในท่อ แบบ helical และแบบปรับปรุงเพื่อเพิ่มระยะทางในการสัมผัสระหว่างเฟสน้ำและเฟสอากาศ เพื่อที่จะได้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลได้มากขึ้นโดยผลจากงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปต่อยอดในการพัฒนาการบำบัดอากาศแบบเปียกโดยใช้หัวฉีดเหนี่ยวนำได้ตามความเหมาะสมทั้งในทางวิศวกรรมและทาง เศรษฐศาสตร์

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาและออกแบบรูปร่างภายในห้องผสมเพื่อเพิ่มระยะทางในการสัมผัสระหว่างเฟสน้ำกับเฟสอากาศ ที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างเฟสน้ำและอากาศที่ดีขึ้นโดยการติดตั้งเครื่องกวนในท่อ

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

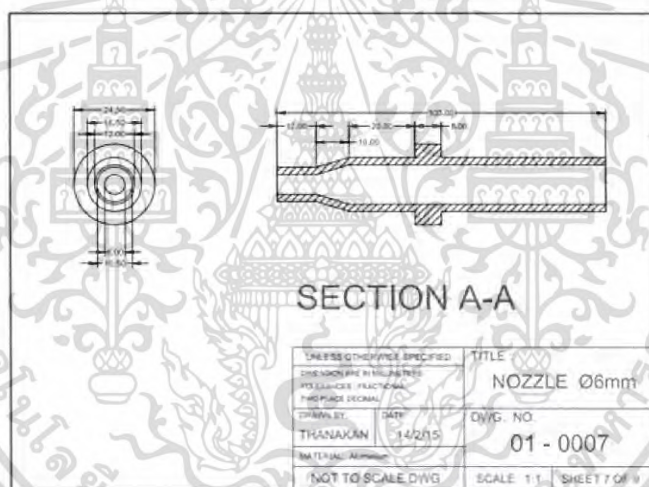
การเหนี่ยวนำอากาศแบบห้องผสมที่ยังไม่ได้พัฒนานั้น การถ่ายเทมวลระหว่างเฟสน้ำกับเฟสอากาศนั้นยังไม่ดี โครงการนี้จึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาห้องผสม โดยการติดตั้งเครื่องกวนในท่อ และ เครื่องกวนในท่อแบบปรับปรุง เพื่อช่วยในการสัมผัสกันของเฟสอากาศและเฟสน้ำ ซึ่งจะดูแนวโน้มจากผลการจำลอง และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

Static mixer (เครื่องกวนในท่อ) นั้นสามารถใช้ได้หลากหลายงานไม่ว่าจะเป็น การผสม, การแพร่กระจาย, การดูดซึม, การถ่ายเทความร้อน, การสัมผัสกันของเฟสแก๊ส ของแข็งและของเหลวโดยเครื่องกวนในท่อ เหมาะสำหรับเฟสของไหลต่อเนื่อง, การแพร่กระจายของแก๊สหรือเฟสของไหลที่ผสมกันไม่ได้และจะใช้ได้ดีในการทำงานแบบไหลแบบปั่นป่วนหลายเฟสและค่าความดันตก ต่ำน้อยเนื่องจากของไหลอาศัยปั๊มช่วยในการเคลื่อนที่ผ่านชุดการผสม โดยจะดูแนวโน้มจากการผลการจำลอง และ ทำการวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนและเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวเพื่อดูประสิทธิภาพในการเติมอากาศ, ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 งานวิจัยได้อ้างอิงรูปร่างและ การจัดวางเชิงมิติของหัวฉีดและห้องผสมของนายจิรพล เนียมพินิจสกุลและคณะ [1] ได้ทำการศึกษาไว้



รูปที่ 1.1 หัวฉีดเหนียวนำอากาศโดย นายจิรพล เนียมพินิจสกุลและคณะ

- 1.5.2 กำหนดให้น้ำเป็นของไหลปฐมภูมิที่ใช้เหนียวนำและ ของไหลทุติยภูมิที่ถูกเหนียวนำคืออากาศ
- 1.5.3 พิจารณาอัตราไหลของน้ำคงที่ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ที่ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ
- 1.5.4 กำหนดให้ Static mixer ที่ใช้เป็นแบบไบบิต (Helical static mixer)
- 1.5.5 กำหนดให้ของไหลทั้ง 2 ชนิด ไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้น
- 1.5.6 ของไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ที่ไม่ขึ้นกับเวลา, อุณหภูมิคงที่ (Isothermal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษารวบรวมข้อมูลของ wet scrubber และ water jet-ejector
- 1.6.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม Gambit และ ANSYS fluent
- 1.6.3 ศึกษาวิเคราะห์การใช้ Static mixer
- 1.6.4 ศึกษาการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการถ่ายเทออกซิเจน เช่น ประสิทธิภาพการเติมอากาศความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนที่อุณหภูมิใดๆ
- 1.6.5 ประเมินและเปรียบเทียบผลการจำลองและผลจากการทดลอง
- 1.6.6 แก๊สและปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ
- 1.6.7 สรุปและเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

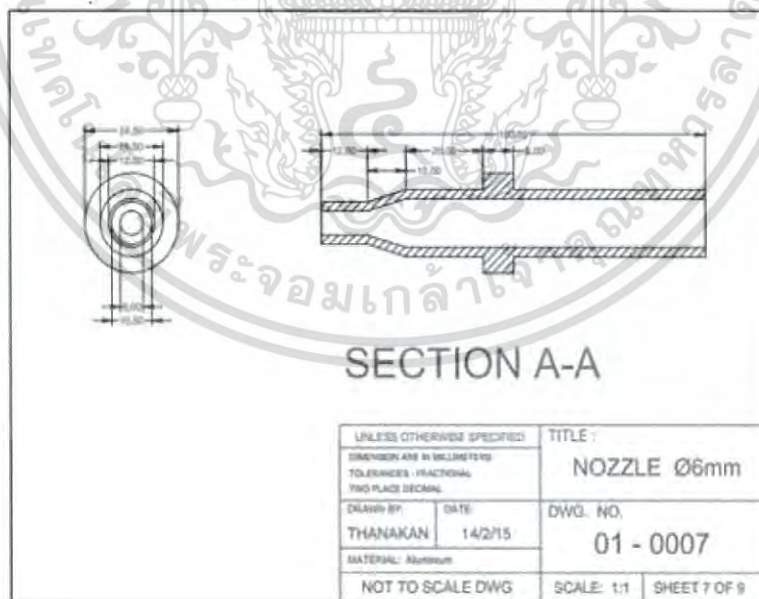
### การทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดเหนียวน้ำ

การศึกษาและทบทวนวรรณกรรมนี้ จะใช้เป็นหลักอ้างอิงในการใช้รูปร่างของหัวฉีดและห้องผสม รวมถึงการจัดวางเรียงตัวของหัวฉีด โดยสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

##### 2.1.1 อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวน้ำ

นาย จิรพล และคณะ [1] ได้ทำการศึกษารูปร่างของหัวฉีด โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายหัวฉีดเป็น 6 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานหัวฉีดมีค่าเป็นสองเท่าขอเส้นผ่านศูนย์กลางปลายหัวฉีด ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าอัตราการไหลของอากาศผ่านท่อเวนทูรีต่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าสูงมีสมรรถนะการเติมอากาศสูงที่สุดและมีพลังงานที่สูญเสียไปน้อยที่สุด โดยการออกแบบขนาดและสัดส่วนจะเป็นไปตามมาตรฐานของ ASME (American Society Mechanical Engineering)



รูปที่ 2.1 ตัวแปรของระยะต่างๆในหัวฉีดเหนียวน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 อัตราส่วนการวางตัวและรูปแบบการวางตัวของชุดหัวฉีดเหนี่ยวนำ

นาย ชัยรัช และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการวางตัวเชิงมิติและรูปแบบการวางตัวของชุดหัวฉีดเหนี่ยวนำที่ส่งผลต่ออัตราการเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาในถังผสมโดยฉีดน้ำซึ่งเป็นของไหลหลักด้วยความเร็วสูงผ่านหัวฉีดจำนวน 4 หัวโดยการทดลองได้ศึกษาการเรียงตัวของหัวฉีดจำนวน 2 รูปแบบ คือแบบจัดคู่สลับ และแบบม่าน อัตราการไหลของน้ำที่ใช้คือ 3.2, 3.6, 4.0, 4.4 และ 4.8 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งจากการทดลองพบว่าการวางหัวฉีดแบบม่าน และไม่ติดตั้งห้องผสมที่อัตราส่วนการวางเชิงมิติที่ 8D เมื่อ D แทนเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด จะมีประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำอากาศสูงที่สุดและอัตราส่วนของเหลวต่อแก๊สน้อยที่สุด

## 2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม

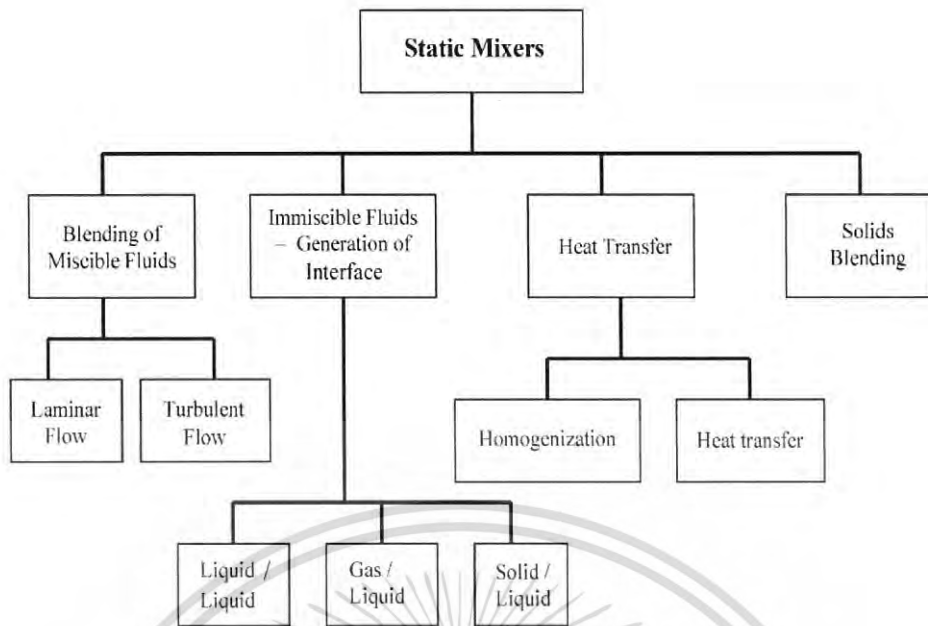
การศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบนั้น ช่วยกำหนดขอบเขตการออกแบบและการสร้างแบบจำลอง รวมถึงวิเคราะห์แนวโน้มของผลการทดลอง โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม CFD นั้นผ่านการใช้โปรแกรม 2 ชนิดด้วยกันคือ โปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) และ แอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS fluent) Shahbaz Khalid และ Amit Kumer [3] ได้ทำการจำลองการไหลของหัวฉีดน้ำเหนี่ยวนำอากาศ แบบ 3 มิติ จากแบบจำลองทั้งสามแบบในโปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (Ansys Fluent) คือ VOF (Volume of fraction), mixture และ Eulerian โดยได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ผลคือ แบบ VOF จะให้ผลที่ตรงกับการทดลองจริง รองลงมาจะเป็นแบบ mixture และ Eulerian ตามลำดับ Francesso Arleo [4] ได้เปรียบเทียบการใช้โมเดล k- $\epsilon$  ระหว่างแบบ standard และแบบ RNG พบว่าโมเดล RNG สามารถใช้กับการไหลปั่นป่วนได้ในหลายช่วงเลข Reynold Number ได้มากกว่าแบบ standard

## 2.3 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ Static mixer

การศึกษาเกี่ยวกับ Static mixer หรือ Motionless mixer จะใช้อ้างอิงในการออกแบบรูปร่างของห้องผสม เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลได้ดีขึ้น

### 2.3.1 การเลือกใช้ Static mixer

Static mixer ในอุตสาหกรรม R. K. THAKUR และคณะ [5] ได้มีการแบ่งกลุ่มตามการลักษณะการใช้งานออกเป็น 4 กลุ่ม



รูปที่ 2.2 การแบ่งกลุ่ม Static mixer ตามลักษณะการใช้งาน

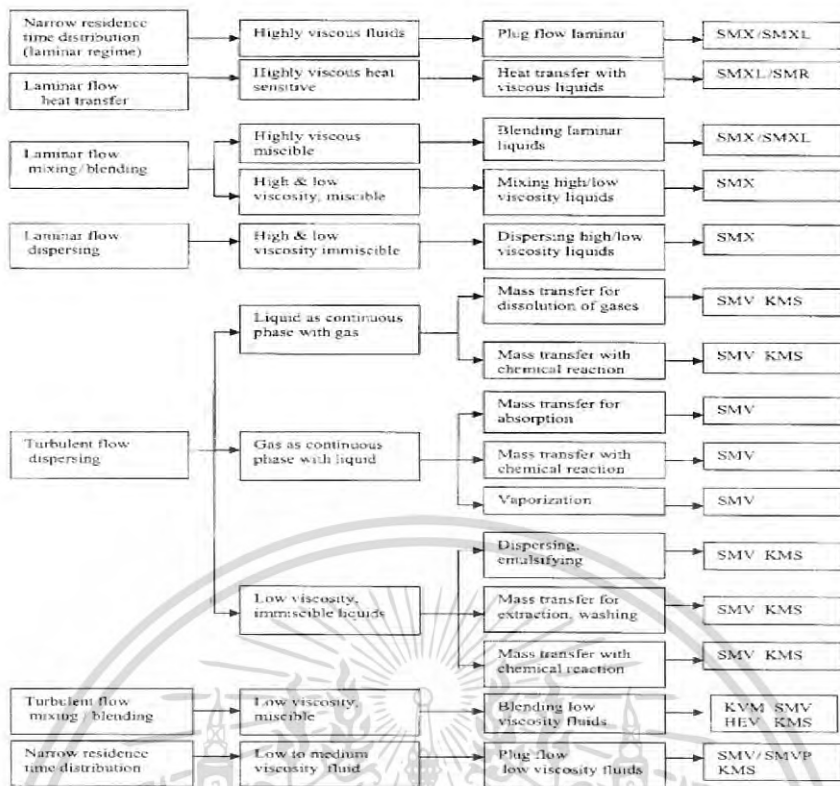
กลุ่ม 1 ของไหลที่สามารถผสมเข้ากันได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยตามลักษณะการไหลคือ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน

กลุ่ม 2 การสร้างพื้นที่สัมผัสร่วมของของไหลที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ โดยลักษณะการใช้งานในกลุ่มนี้จะขึ้นอยู่กับเฟสของของไหล แก๊ส-ของเหลว, ของเหลว-ของเหลว, ของเหลว-ของแข็งและของแข็ง-ของแข็ง

กลุ่ม 3 การแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งออกเป็น Thermal homogenize และการแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ element สามารถสร้างการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้

กลุ่ม 4 ใช้ในการผสมในแนวแกน

เนื่องจากความแตกต่างของ Static mixer ในแต่ละแบบนั้นมีมากทั้งการใช้งานในการไหลแบบราบเรียบหรือไหลแบบปั่นป่วนเพราะฉะนั้นการที่จะระบุแบบของ mixer ที่จะใช้งานนั้นทำได้ยาก Etchells และ Meyer [6] จึงได้ทำตารางขึ้นมาเพื่อให้ผู้ที่ต้องการจะเลือกใช้ mixer สามารถเลือกได้ใช้อย่างขึ้น



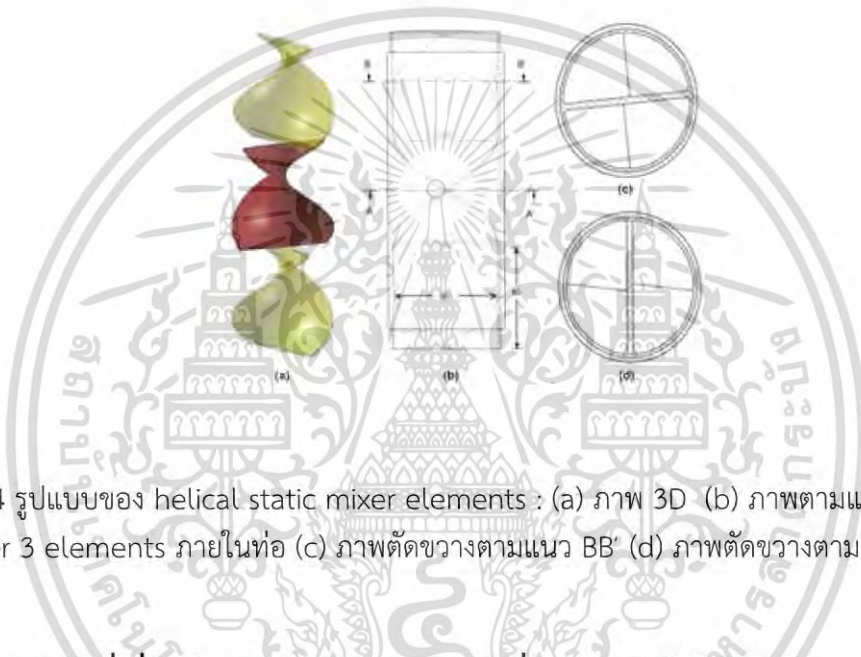
รูปที่ 2.3 การเลือก Static mixer

ในการออกแบบ Static mixer ในเชิงพาณิชย์โดยทั่วไปจะมีมาตรฐานของตัวแปรต่างๆที่เหมาะสมตลอดช่วงการใช้งานซึ่งค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบได้มาจากการทดลอง อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ Static mixer ในเบื้องต้นสามารถกระทำได้ แต่การหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ เช่น จำนวนของชั้น (element), ความดันตก, อัตราส่วนของความยาวของชั้น (element) ต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง จะทราบได้จากการทดลองเท่านั้น

### 2.3.2 Static mixer แบบ helical static mixer

Swapna Rabha และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาและทดลองเพื่อศึกษาขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในท่อแวนอนสำหรับ gas-liquid flow โดยใช้ Helical static mixer ได้กล่าวไว้ว่า รูปแบบของ mixer นั้นจะเป็นใบพัดแบบบิดตามทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาว่างสลับกัน โดยใบพัดจะวางต่อกันเป็นแนวยาวต่อเนื่องกันไป แต่ละใบจะวางตั้งฉากกันไปเรื่อยๆ การไหลจะไหลแบบแยกกันและไหลแบบหมุนตามแนวรัศมีตามรูปร่างของ Helical และจะมีความเหมาะสม แม่นยำในการผสมและการแพร่กระจายของทุกของเหลว อัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของ element เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการกำหนดความเหมาะสมและประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการผสมในแต่ละและกระบวนการ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของแต่ละชั้น (element) นั้นได้ใช้ข้อมูลจาก Schott et al [8] ที่ได้ศึกษารูปร่างของ Helical static mixer โดยค่าที่เลือกมา คือ 80 mm เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และใบปิด 180 องศา ซึ่งเป็นมุมมาตรฐานในการบิด และ Etchells และ Meyer [6] ได้กล่าวไว้ว่า ความยาวแต่ละชั้น (element) ของใบปิดนั้นจะมีค่าเป็น 1.0 หรือ 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ จึงจะดีที่สุด งานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1.0 เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Schott et al และ Cybulski & Werner [9] ได้ให้ข้อดีของ Static mixer ที่ gas-liquid ไหลผ่านนั้นว่า 1. ค่าการผสมกันระหว่างน้ำกับก๊าซจะมีค่าสูงขึ้น 2. ขนาดของฟองที่เกิดจะมีขนาดเล็ก 3. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าสูงขึ้นและพื้นผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศก็มากขึ้นด้วย 4. เกิดพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วน 5. ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศมีมากขึ้น A.Heyouni และคณะ [10] ค่าความดันตก และขนาดของฟองอากาศขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ Static mixer, ความเร็วของของเหลวและความเร็วของแก๊ส แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วของของเหลวเพิ่มมากขึ้น ค่าความดันตก จะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเมื่อเทียบกับความเร็วของแก๊สเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.4 รูปแบบของ helical static mixer elements : (a) ภาพ 3D (b) ภาพตามแนวแกนของ mixer 3 elements ภายในท่อ (c) ภาพตัดขวางตามแนว BB' (d) ภาพตัดขวางตามแนว AA'

## 2.4 วรรณกรรมที่เกี่ยวกับการเติมอากาศแบบเหนียวนำโดยหัวฉีดพ่น

นาย กิตติคุณ และคณะ [11] ได้ศึกษาลักษณะการกระจายตัวและขนาดฟองอากาศที่ออกมาจาก เครื่องเติมอากาศแบบเหนียวนำอากาศโดยหัวฉีดพ่น รวมถึงเปรียบเทียบผลของการผสมกันระหว่างอากาศกับน้ำในอัตราการไหลที่แตกต่างกันของหัวฉีดพ่น โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหล (Star CD) มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และทำการวิเคราะห์ผลจากค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ (Dissolve Oxygen) เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ (OC) และค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน ( $AE_T$ ) โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบในกรณีหัวฉีดพ่นเดียวกัน แต่ค่าอัตราการไหลแตกต่างกันคือ 0.37, 0.32, 0.27 และ 0.22 ลิตร/วินาที ทั้งหัวฉีดแบบเดิมและแบบพัฒนาใหม่ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อค่าต่างๆ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ( $k_L a$ ) โดยได้มาจากความชันของกราฟระหว่างเวลากับค่าผลต่างระหว่างค่าความเข้มข้นของออกซิเจนอิมิตัวกับค่าออกซิเจนละลายในน้ำ และในการทดลอง ได้ใส่สารเคมี 2 ตัว เพื่อดึงออกซิเจนออกจากน้ำให้หมด ( $DO = 0$  มิลลิกรัม / ลิตร) เพื่อง่ายต่อการวัดค่าเก็บผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

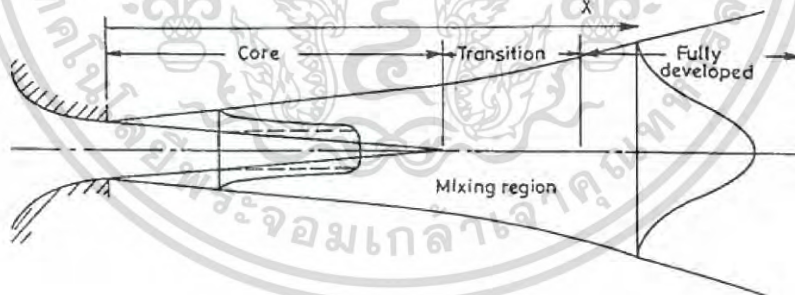
### 3.1 ทฤษฎีเจ็ท

#### 3.1.1 ความรู้เบื้องต้นของเจ็ท

พลวัตกรรมของเจ็ทมีการทดลอง และ วิเคราะห์อย่างกว้างขวาง เจ็ทแบบวงกลมและแบนราบ ถูกนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะใช้กับ กระบวนการอบแห้ง, ม่านอากาศสำหรับการปรับอากาศ, การให้ความร้อน และ การระบายอากาศ โดยค่าพารามิเตอร์ของ อัตราการสลายตัวของเจ็ท และ การสลายตัวของแกนหลัก (Potential Core) จะมีบทบาทอย่างมากในการกำหนดค่า ประสิทธิภาพของกระบวนการผสม บริเวณชั้นความเค้น (Shear Layer) จะเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา และ เกิดการผสมระหว่างเจ็ทและของไหลโดยรอบ การทำความเข้าใจในปรากฏการณ์ในชั้นความเค้น ตลอดกระบวนการพัฒนาการของเจ็ทจึงมีความสำคัญ

#### 3.1.2 โครงสร้างและการพัฒนาของเจ็ทอิสระ

มวลของของไหลที่ถูกอัดฉีดออกไปยังสภาพแวดล้อมของของไหลขนาดใหญ่โดยรอบเรียกว่า เจ็ทอิสระ โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระแบ่งออกเป็น 4 บริเวณ แบ่งตามการสลายตัวของความเร็ว ที่ศูนย์กลางของเจ็ท



รูปที่ 3.1 ลักษณะกระแสการไหลของเจ็ท

บริเวณที่ 1: บริเวณลู่เข้า (The convergent zone) บริเวณนี้แกนหลักของเจ็ท(potential core) ซึ่งความเร็วที่เส้นแกนกลางของเจ็ทจะมีค่าเท่ากับความเร็วของเจ็ทที่ออกมาจากหัวฉีด บริเวณนี้มีระยะ ตั้งแต่  $4d$  ถึง  $6d$  จากปลายหัวฉีด โดยที่  $d$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางตรงทางออกของหัวฉีด

บริเวณที่ 2: บริเวณเปลี่ยนแปลง (The transition zone) บริเวณนี้ความเร็วที่เส้นแกนกลางเริ่มลดลง เป็นสัดส่วน  $x^{-0.5}$  เมื่อ  $x$  ระยะห่างในแนวแกนกลางจากปลายหัวฉีด มีระยะตั้งแต่  $6d$  ถึง  $20d$  ซึ่ง บริเวณนี้จะมีปฏิกิริยาการผสมต่อกันอันเนื่องมาจากชั้นความเค้นทั้งสองด้านบรรจบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณที่ 3: บริเวณจำลองตัวเอง (The self-similar zone) บริเวณนี้รูปร่างความเร็วที่เส้นแกนกลางของเจ็ทมีลักษณะเหมือนกันทุกจุดบนระยะ  $x$  และความเร็วบนเส้นแกนกลางจะลดลงโดยสัดส่วน  $x^{-1}$

บริเวณที่ 4: บริเวณสลายตัว (The termination zone) บริเวณนี้ความเร็วที่เส้นแกนกลางของเจ็ทจะลดลงอย่างรวดเร็ว กลไกและพฤติกรรมของการไหลในบริเวณนี้ยังไม่ทราบแน่ชัด

ในสามบริเวณแรกของไหลรอบเจ็ทถูกเหนี่ยวนำเข้ามาในแกนกระแสหลักและผสมกันกับของไหลหลัก ในบริเวณที่สี่เป็นบริเวณที่เจ็ทสลายตัวจากภายในและกระจายตัวออก

เมื่อของไหลรอบเจ็ทถูกเหนี่ยวนำเข้ามาผสมกับเจ็ททำให้เจ็ทขยายตัว อัตราส่วนของปริมาตรสุทธิของกระแสเจ็ทต่อปริมาตรเริ่มต้นที่ระยะใดๆ จากปลายหัวฉีด ขึ้นกับอัตราส่วนของความเร็วเริ่มต้น  $\bar{U}_0$  ต่อความเร็วที่ระยะใดๆ  $\bar{U}_x$  อัตราส่วนนี้คืออัตราการเหนี่ยวนำ (inducing ratio)

$$\frac{\dot{Q}_x}{\dot{Q}_0} = C \frac{\bar{U}_0}{\bar{U}_x} \quad (3.1)$$

$\dot{Q}_x$  = อากาศผสมสุทธิที่ระยะ  $x$  จากหัวฉีด, ( $m/s^2$ )

$C$  = สัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำ (มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับกระแสอิสระแบบหน้าตัดกลม)

ในทางวิศวกรรมอาศัยความเข้าใจเพียงแค่ว่าสามบริเวณแรก เพราะความแตกต่างของความเร็วระหว่างพื้นผิวที่ไม่ต่อเนื่องของเจ็ทและของไหลโดยรอบมีความแตกต่างกันมาก เกิดกระแสไหลวนทำให้มีการผสมกันบริเวณด้านข้าง ผลจากการผสมกันทำให้ของไหลภายในเจ็ทมีความเร็วลดลง เพราะของไหลโดยรอบถูกเหนี่ยวนำเข้ามาผสมกับเจ็ทเป็นผลให้เจ็ทมีความกว้างเพิ่มขึ้น

### 3.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท

มีปัจจัยหลายอย่างเช่น รูปแบบของความเร็ว ณ ตำแหน่งทางออกของหัวฉีด, รูปทรงของหัวฉีด และ อุณหภูมิของของไหล ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท

#### 3.1.3.1 รูปแบบความเร็วของเจ็ท ณ ตำแหน่งทางออกของหัวฉีด

สภาวะเริ่มต้นของเจ็ทมีผลต่อการพัฒนาของเจ็ท รูปแบบการไหลของเจ็ทสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ แบบราบเรียบ (Laminar), เสมือนราบเรียบ (Nominally laminar), ถูกรบกวนอย่างมาก (Highly disturbed) และ ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ (Fully turbulent) การไหลแบบราบเรียบ และ ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์เป็นสภาวะที่มีข้อจำกัด รูปแบบที่พิจารณาจึงเป็นแบบ เสมือนราบเรียบ และ ถูกรบกวนอย่างมาก รูปแบบความเร็วเฉลี่ยที่ขึ้นความเค้น ณ ตำแหน่งทางออกของหัวฉีดจะมีลักษณะเดียวกันกับรูปแบบแบบบลาสเซียส (Blasius's profile) ของกรณีการไหลแบบราบเรียบ ความไม่เสถียรของชั้นความเค้นเหนี่ยวนำให้เกิดความผันผวนโดยจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของเจ็ท การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ตำแหน่งทางออกของหัวฉีด สามารถกำหนดได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความหนาของการกระจัด } \delta = \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 - \frac{U}{U_{\infty}}\right) dy \quad (3.2)$$

$$\text{ความหนาโมเมนตัม } \theta = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U}{U_{\infty}} \left(1 - \frac{U}{U_{\infty}}\right) dy \quad (3.3)$$

$$\text{สัดส่วนรูปร่าง } H = \frac{\delta}{\theta} \quad (3.4)$$

ค่าของสัดส่วนรูปร่างมีค่าเท่ากับ 2.5 สำหรับชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ และเท่ากับ 1.4 สำหรับชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ค่าของสัดส่วนรูปร่างที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 2.5 หมายถึงชั้นขอบเขตเป็นแบบเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ

### 3.1.3.2 รูปร่างของหัวฉีด

รูปร่างของหัวฉีดมีผลกระทบต่ออย่างมากกับการไหลของเจ็ทฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของความเร็วที่แกนกลางของเจ็ทแบบวงกลมกับแบบแบนราบนั้นมีความแตกต่างกัน ความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทแบบวงกลมจะเป็นฟังก์ชันของ  $X^{-1}$  และแบบแบนราบจะเป็นฟังก์ชันของ  $X^{0.5}$  ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเจ็ทจะขึ้นกับลักษณะภาพตัดขวางของหัวฉีดด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะหัวฉีดที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนของความกว้างยาวสูง ก่อให้เกิดปรากฏการณ์สับเปลี่ยนแกน ขณะที่เกิดปรากฏการณ์นี้ทำให้มวลในแกนหลักและแกนรองจะสลับเปลี่ยนกันไปตลอดระยะแนวแกนกลาง ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นจากความแตกต่างของอัตราการแพร่กระจายของเจ็ทที่ด้านข้างทั้งสองด้าน หัวฉีดแบบวงกลมจะไม่เกิดปรากฏการณ์นี้ รูปร่างของหัวฉีดมีบทบาทอย่างมากในการกำหนดรูปแบบของความเร็วเริ่มต้นของเจ็ท ออริฟิซแบบขอบคมจะทำให้เกิดรูปแบบความเร็วเริ่มต้นแบบอานม้า (Saddle-backed profile) ขณะที่รูปแบบหมวกทรงสูง (Top hat profile) จะเกิดขึ้นกับหัวฉีดที่ขอบเรียบสิ้น

### 3.1.3.3 เลขเรย์โนลด์ของเจ็ท

เลขเรย์โนลด์ของเจ็ทแบบแบนราบจะถูกกำหนดโดย เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด, ความเร็วเฉลี่ย  $U_0$  และความหนืดไคเนมาติก  $\nu$  ของของไหลเจ็ท

$$\text{Re} = \frac{U_0 d}{\nu}$$

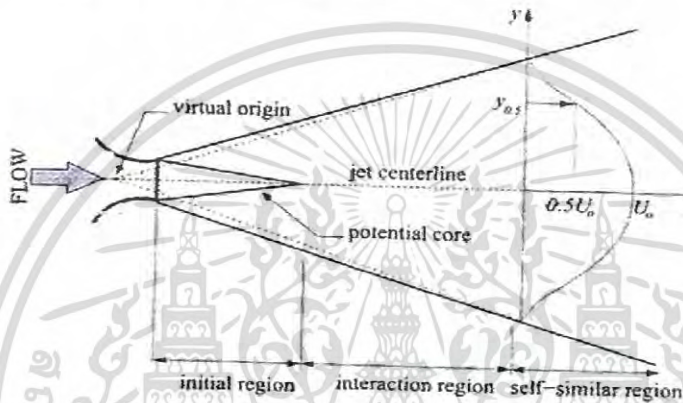
ถ้าเจ็ทถูกฉีดผ่านคอนทอร์วี่ในแนวระนาบของหัวฉีด การแปรเปลี่ยนของความเร็ว ณ ทางออกของหัวฉีดรูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะแบบหมวกทรงสูง และมีค่าความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ยที่เส้นแกนกลาง ณ จุดทางออกของหัวฉีด เลขเรย์โนลด์ของเจ็ทสามารถนิยามได้จากครึ่งความกว้าง และความเร็วเฉลี่ยที่เส้นแกนกลาง ณ จุดใดๆ

$$\text{Re}_{b_u} = \frac{U_c b_u}{\nu} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3.4 ครึ่งความกว้างและจุดกำเนิดเสมือน (Half Width and Virtual Origin of Jet)

ครึ่งความกว้างของเจ็ทตามแนวแกน ณ ตำแหน่งใดๆสามารถนิยามได้จาก ระยะห่างจากเส้นแนวแกนกลางและระนาบตามขวาง ซึ่งระนาบนี้จะมีค่าความเร็วเฉลี่ย ครึ่งหนึ่งของความเร็วแนวเส้นแกนกลาง ครึ่งความกว้างจะเพิ่มขึ้นด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นตลอด แกน  $x$  ยกเว้นในบางกรณีที่เกิดปรากฏการณ์การสลับแกนขึ้น ความชันของเส้นครึ่งความ กว้างตามทิศทางตามแนวแกนกลางเรียกว่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread rate) ส่วน ใหญ่ค่าของอัตราส่วนการกระจายตัวของเจ็ทแบบปั่นป่วนที่เลขเรย์โนลด์สูงๆ คือ 0.11 ขณะที่เจ็ทแบบราบมีค่าอัตราส่วนการกระจายตัวประมาณ 0.4 จุดกำเนิดเสมือนของเจ็ทคือ จุดที่เสมือนจุดกำเนิดของเจ็ท ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งจุดกำเนิดเสมือนและระยะครึ่งความกว้าง

จุดกำเนิดเสมือนในบางครั้งอาจมีความแตกต่างกับจุดกำเนิดตามรูปทรงเรขาคณิต และอาจอยู่ภายนอกหัวฉีดก็ได้ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของความเร็วที่ปลายหัวฉีด จุดกำเนิดและ ครึ่งความกว้างมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{b_u}{d} = K_{2u} \left( \frac{x}{d} \pm C_{2u} \right) \quad (3.6)$$

- เมื่อ  $C_{2u}$  = จุดกำเนิดเสมือน (Virtual origin)  
 $K_{2u}$  = อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)  
 $b_u$  = ครึ่งความกว้างของเจ็ท (Jet half width)  
 $d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของหัวฉีด (Nozzle diameter)  
 $x$  = ระยะจากปลายหัวฉีด

### 3.1.3.5 ความไม่เสถียรของเจ็ท (Jet Instability)

เจ็ทที่ถูกอัดฉีดจากหัวฉีดจะมีการแกว่งของชั้นความเค้น โดยการแกว่งจะขึ้นอยู่กับ รูปแบบของความเร็วทางออกไปตามระยะในแนวแกน โดยการแกว่งจะผันตัวและสร้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีซี เอช จำกัด เมื่อผู้ซื้อสินค้าและบริการนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสมุขวนซึ่งจะมีขนาดและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะในแนวแกน กระแสมุขวนจะมีอิทธิพลต่อการเหนี่ยวนำของไหลโดยรอบเจ็ทของมาผสมกับของไหลในเจ็ท กระแสมุขวนส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการกระแสบ้างเป็นแบบปั่นป่วน การศึกษาจากการภาพกระแสการไหลพบว่ามีความแตกต่างแบบตายตัวระหว่างการสร้างกระแสบางกลมและกระแสบ้างไม่เป็นวงกลม การเกิดขึ้นของกระแสมุขวนในชั้นความเค้นและการเปลี่ยนแปลงยิ่งยวดของกระแสบ้างเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วนดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 ความไม่เสถียรของชั้นความเค้นในเจ็ท

#### 3.1.3.6 ความต่อเนื่องของโครงสร้าง (Coherent Structure)

โครงสร้างต่อเนื่องนิยามได้จากมวลของของไหลแบบปั่นป่วนขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกัน ร่วมกับกระแสมุขวนร่วมกันตลอดขอบเขตความยาว นั่นคือ ภายใต้ความผันผวนของกระแสมุขวนแบบปั่นป่วน 3 แกน มีการจัดวางส่วนประกอบการหมุนวนที่มีสภาวะร่วมกัน (Coherent) ตลอดทั่วทั้งโครงสร้าง การสร้างโครงสร้างต่อเนื่องของเจ็ทจะขึ้นกับเงื่อนไขเริ่มต้น และสามารถควบคุมได้โดยการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียง การกระตุ้นมูลฐานนี้จะทำให้กระแสเปลี่ยนรูปไปในทางที่ทำให้กลไกการสร้างการไหลแบบละเอียดถูกทำลายไป เนื่องจากการกระจายของความหนืด กลไกการไหลแบบปั่นป่วนค่อยๆ เสื่อมสลายลงตามระยะทาง ทำให้โครงสร้างแบบต่อเนื่องนี้เพิ่มขึ้นและกระจายออก โครงสร้างนี้เริ่มเกิดขึ้นที่ชั้นความเค้นที่ไม่เสถียรบริเวณปากหัวฉีด โครงสร้างจะโตขึ้นโดยการดูดกลืนของไหลบริเวณโดยรอบจนถึงระยะ 20 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีด จากนั้นโครงสร้างเกิดการรวมตัวเป็นเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น ถึงแม้ว่าระยะที่ห่างจากปลายหัวฉีดมากๆ โครงสร้างก็ยังมีอยู่

#### 3.1.3.7 การกระจายตัวแบบอุณหภูมิคงที่และไม่คงที่ (Isothermal and Non-Isothermal Jet)

ไอโซเทอร์มอลเจ็ท คือ สภาวะของเจ็ทและของไหลโดยรอบมีอุณหภูมิเท่ากัน ในทางกลับกัน นอนไอโซเทอร์มอลเจ็ท คือ สภาวะที่อุณหภูมิของเจ็ทแตกต่างจากอุณหภูมิของของไหลตัวกลางที่เจ็ทถูกฉีดออกมา นอนไอโซเทอร์มอลเจ็ทอาจลอยตัวขึ้นหรือไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทเทียบกับอุณหภูมิสถานะแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ เมื่อค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ริชาร์ดนมเบอร์มีค่าน้อยมากๆ อุณหภูมิของของไหลจะทำหน้าที่เป็นปริมาณสเกลาร์พื้นฐาน และจะมีผลกระทบจากแรงลอยตัวมากขึ้นในกรณีนี้

### 3.1.3.8 การจำลองตัวเอง (Self-Similarity)

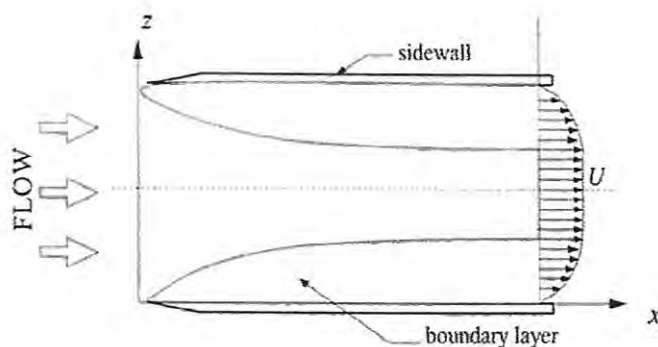
การจำลองตัวเองเป็นเองเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อสามารถทำให้รูปแบบของความเร็วของการไหลให้สอดคล้องกันโดยมาตราส่วนอย่างง่าย ซึ่งอยู่กับการแปลงลักษณะตามพิกัดเพียงพิกัดเดียว ผลจากการอนุรักษ์ทำให้สมการควบคุมการไหลของเจ็ทสามารถลดรูปลงได้ หรือกล่าวได้อีกในรูปแบบหนึ่งคือ กระแสนุรักษ์เกิดขึ้นได้เมื่อมีคำตอบของสมการพลศาสตร์และเงื่อนไขขอบของของไหลนั้นๆ ตลอดการเปลี่ยนแปลงของกระแส พจน์ทุกพจน์มีค่าที่สัมพันธ์กันที่จุดซึ่งสัมพันธ์กัน ดังนั้น การอนุรักษ์จึงเป็นการบอกว่ากระแสนี้ได้ไปถึงจุดที่สมดุลซึ่งค่าและผลกระทบทางพลศาสตร์ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วยกัน ดังนั้นกระแสเจ็ทอนุรักษ์ คือ สภาวะตามแนวเส้นซึ่งกระแสได้ถึงจุดที่โมเลกุลจัดเรียงตัวกันเรียบร้อยแล้ว สภาวะของกระแสนุรักษ์มีหลายชนิดที่เป็นไปได้ เช่น 1) กระแสสามารถอนุรักษ์ตัวเองได้อย่างสมบูรณ์ในทุกลำดับขั้นของช่วงที่มีการไหลแบบปั่นป่วน และทุกขนาดการเคลื่อนที่ 2) กระแสสามารถอนุรักษ์ได้บางส่วนเพื่อให้เป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัมหรือขึ้นอยู่กับความแน่นอนของลำดับในการไหลแบบปั่นป่วน ยกตัวอย่างเช่น สมการทั่วไปที่อธิบายกระแสเจ็ทที่ถึงจุดอนุรักษ์สำหรับความเร็วเฉลี่ยคือ

$$\frac{U}{U_c} = f\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (3.7)$$

สมการนี้อธิบายว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วใดๆและความเร็วที่แกนกลางของระนาบทแยงจะเป็นฟังก์ชันของระยะทางตามแกน  $y$  ต่อค่าความหนาของการกระจัดในแนวระนาบนั้นๆ

### 3.1.3.9 บทบาทของผนังด้านข้างต่อกระแสของเจ็ท (Role of Side Walls in Jet Flow)

ผนังถูกวางในระนาบ  $x-y$  จะบีบการขยายตัวของเจ็ทจากทางด้านข้างโดยการป้องกันการเกิดการเหนียวมาจากทางด้านข้าง ถึงแม้ว่าการบีบอัดในบริเวณใกล้เคียงชั้นขอบเขตก็เกิดขึ้นที่บริเวณผนังด้านข้าง ดังนั้นการเกิดขึ้นของกระแสจะแตกต่างกันสำหรับเจ็ทระนาบที่ถูกฉีດผ่านหัวฉีດทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีผนังและไม่มีผนัง ถึงแม้ว่ามีการมีอยู่ของผนังสามารถยึดขอบเขตสองมิติ การเกิดขึ้นขอบเขตที่ผนังด้านข้างมีความจำเป็นต้องพิจารณาเนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของเจ็ทในพื้นที่ห่างออกไป ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 พฤติกรรมของรูปแบบความเร็วของเจ็ทเมื่อมีผนังด้านข้าง

### 3.1.3.10 มาตรฐานความยาวของความปั่นป่วน (Turbulence Length Scales)

การไหลแบบปั่นป่วนจะประกอบด้วยกระแสวน (Eddy flow) ในหลายๆขนาด พลังงานจลน์ของการปั่นป่วนของกระแสวนหลักถูกถ่ายโอนไปเป็นการเกิดขึ้นของกระแสวนที่ส่วนที่ใหญ่ที่สุดของการเคลื่อนที่ พลังงานในส่วนนี้ได้ถูกส่งผ่านไปยังมาตรฐานที่เล็กกว่าและเล็กลงเรื่อยๆ เรียกว่าการยืดตัวของกระแสวนหมุนวน (Vortex stretching) ที่มาตรฐานที่เล็กที่สุด พลังงานจลน์ของกระแสวนค่อยๆลดลงเนื่องจากความหนืด ที่มาตรฐานขนาดใหญ่โดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Non-isotropic) และมีแนวโน้มที่จะไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่า อย่างไรก็ตาม การไหลแบบปั่นป่วนหลายชนิด มาตรฐานการเคลื่อนที่โดยละเอียดเป็นไปแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ค่าเฉลี่ยขนาดของกระแสวนเรียกว่าผลรวมมาตรฐานความยาว ขนาดของกระแสวนที่เล็กที่สุดซึ่งค่อยๆสลายไปเรียกว่า มาตรฐานคอลโมโกรอฟ (Kolmogorov scale)

## 3.2 ทฤษฎี Static Mixer

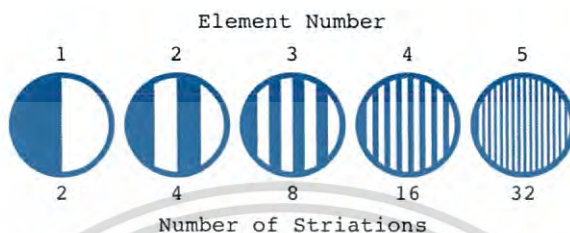
Static Mixer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมของไหลโดยตัวอุปกรณ์ที่เป็นกลไกในการผสม เรียกว่าชิ้นหรือ อิลิเมนต์ (element) โดยตัวอิลิเมนต์จะวางใน ท่อ หลอด หรือช่อง ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของของไหลเพื่อเพิ่มการถ่ายโอนมวลและอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน ในกระบวนการผสมอิลิเมนต์จะอยู่กับที่ไม่มี การเคลื่อนไหว เมื่อของไหลไหลผ่านอิลิเมนต์ จะมีการจัดเรียงการกระจายตัวในทิศทางของการไหลแบ่งออกเป็น แนวรัศมี และ แนวสัมผัส ของไหลจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นโดยตลอดตามแนวของอิลิเมนต์ โดยอิลิเมนต์จะทำให้เกิดการผสมในแนวรัศมี ทำให้ อัตราแยกสลายของพลังงานความปั่นป่วนเพิ่มขึ้นและเป็นระเบียบมากขึ้น

- แนวสัมผัส ของไหลจะถูกแบ่งเป็นริ้วที่ขอบของอิลิเมนต์และไหลไปตามช่องที่ถูกบังคับทิศทางตามลักษณะโครงสร้างของอิลิเมนต์ การแบ่งเป็นริ้วๆเมื่อของไหลไหลผ่านอิลิเมนต์จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล  $2^n$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนของอิลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงการไหลในแนวสัมผัส



รูปที่ 3.6 แสดงการแบ่งเป็นริ้วเมื่อของไหลไหลผ่านอิลิเมนต์

- แนวรัศมี ของไหลที่การไหลทั้งแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน จะมีการหมุนรอบจุดศูนย์กลางไฮดรอลิก ภายในช่องของการไหลทำให้เกิดการผสมในแนวรัศมีโดยของไหลเมื่อถูกผสมจะทำให้เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ความเร็ว และ องค์ประกอบ ในแนวรัศมีลดลง



รูปที่ 3.7 แสดงการไหลในแนวรัศมี

### 3.2.1 การแยกสลายตัวของพลังงานใน Static Mixer

พลังงานที่ใช้ในการผสมใน Static Mixer มาจากความดันตกเมื่อของไหลไหลผ่านอิลิเมนต์ สมการความดันตกในท่อเปล่าและตัวคูณปรับแก้เรขาคณิตสำหรับของไหลชนิดนิวโตเนียน นำเสนอโดย Pahl และ Muschelknautz (1982) ดังนี้

$$\frac{\Delta p}{2\rho U^2} \frac{D}{L} = \psi(\text{Re}, \text{geometry}) \quad (3.8)$$

$$U = \text{ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อเปล่า} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$Q$  = อัตราการไหล

$\rho$  = ความหนาแน่นของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta p$  = ความดันตกใน Static Mixer

$D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

$L$  = ความยาวทั้งหมดของมิกเซอร์

$Re$  = เรย์โนลด์นัมเบอร์ =  $\frac{UD}{\nu}$

$\nu$  = ความหนืดจลน์

อัตราการสลายตัวเฉลี่ยของพลังงานได้ถูกนำเสนอโดย Bourne และ Maire, 1991

$$\Phi = \frac{Ne^3}{eD} \tag{3.9}$$

$e$  = อัตราส่วนของปริมาตรของไหลทำงานต่อปริมาตรภายในทั้งหมด =  $\frac{V_m}{V_t}$

$Ne$  = สัมประสิทธิ์แรงต้านของนิวตัน

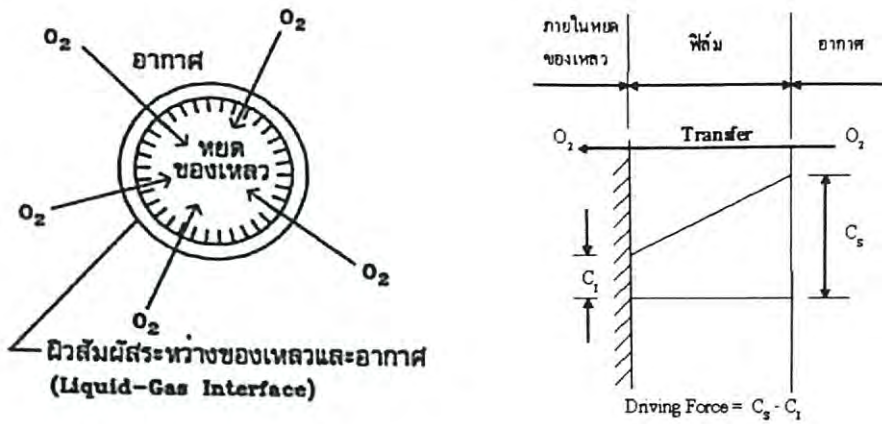
อัตราการสลายตัวของพลังงานยังสามารถแบ่งออกเป็น การสลายตัวของความปั่นป่วน (turbulence dissipation),  $\epsilon$ , และ การสลายตัวโดยตรง (direct dissipation),  $E_d$  การสลายตัวของความปั่นป่วนมาจากเกรเดียนต์ความเร็วของความปั่นป่วน ส่วนการสลายตัวโดยตรงจะขึ้นกับเกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย ทั้ง  $\epsilon$  และ  $E_d$  จะแปรเปลี่ยนตามจุดต่างๆ แต่ค่า  $\Phi$  จะเฉลี่ยทั่วทั้งปริมาตร,  $V_m$

### 3.3 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ

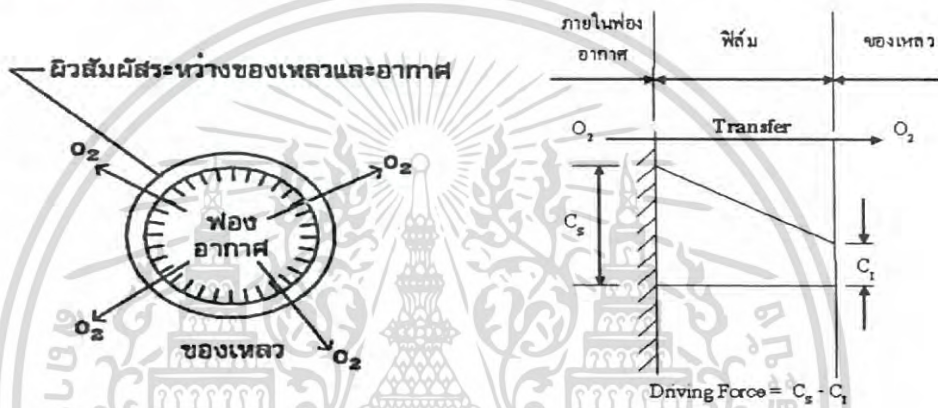
ปรากฏการณ์เหนี่ยวนำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นใน Ejector ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิ(อากาศ) โดยการเปลี่ยนพลังงานความดันจากเครื่องสูบน้ำของของไหลปฐมภูมิ (น้ำ) เป็นพลังงานจลน์ ทำให้ความดันในห้องผสม (Mixing Chamber) ลดลง ส่งผลอากาศบริเวณโดยรอบที่มีความดันสูงกว่าถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ห้องผสม

### 3.4 หลักการเติมอากาศและการถ่ายเทมวลระหว่างฟองอากาศกับน้ำ

การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศให้กับน้ำเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ ออกซิเจนอาจถ่ายเทจากอากาศให้กับหยดน้ำขนาดเล็กที่เกิดจากการตีน้ำของเครื่องเติมอากาศและออกซิเจนอาจถ่ายเทจากฟองอากาศให้กับน้ำห่อหุ้ม ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.8 ออกซิเจนถ่ายเทจากอากาศให้กับหยดน้ำขนาดเล็กที่เกิดจากการตีน้ำของเครื่องเติมอากาศ



รูปที่ 3.9 ออกซิเจนถ่ายเทจากฟองอากาศให้กับน้ำที่ห่อหุ้ม

การเติมอากาศหรือออกซิเจนให้กับน้ำทั้งสองวิธีขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- ขนาดของหยดน้ำ
- ขนาดของฟองอากาศ
- ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศซึ่งแสดงออกในรูปแบบความดันย่อยของออกซิเจน
- เวลาที่ใช้สัมผัสน้ำและอากาศ
- แรงสนับสนุนให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจน (ผลต่างระหว่างออกซิเจนอิ่มตัวและออกซิเจนละลายน้ำที่มีอยู่ในขณะทำการเติมอากาศ)

เนื่องจากการถ่ายเทออกซิเจนเกิดขึ้นผ่านผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ การทำให้หยดน้ำหรือฟองอากาศมีขนาดเล็ก จึงช่วยให้มีการถ่ายเทออกซิเจนได้ดีขึ้น เนื่องจากเป็นกาเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ ทำให้ออกซิเจนสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น เป็นผลทำให้แรงผลักดันการถ่ายออกซิเจนเพิ่มขึ้น ยิ่งความเข้มข้นออกซิเจนที่ละลายน้ำมีค่าต่ำ แรงสนับสนุนการถ่ายเทออกซิเจนยิ่งมีค่ามาก ทำให้ต้องเติมออกซิเจนในอัตราสูงนั่นคือ น้ำที่ขาดแคลนออกซิเจน จะรับการถ่ายเทออกซิเจนได้เร็ว ในทางตรงข้ามกับน้ำที่มีออกซิเจนอิ่มตัวจะไม่รับออกซิเจนจากอากาศเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

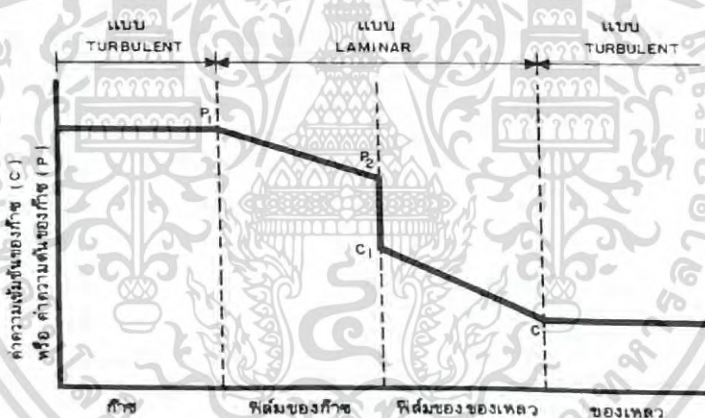
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 ขั้นตอนของการถ่ายเทออกซิเจนจากบรรยากาศไปสู่ชั้นของเหลว

ขั้นตอนที่หนึ่ง การถ่ายเทของออกซิเจนจากบริเวณบรรยากาศเข้าสู่ฟิล์มของก๊าซ ซึ่งอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนในบริเวณนี้มีอัตราเร็วมาก เนื่องจากความต้านทานในชั้นฟิล์มของก๊าซมีค่าน้อยมาก ค่าความดันของก๊าซจะค่อยๆลดลงแต่ในปริมาณที่น้อย

ขั้นตอนที่สอง การถ่ายเทของออกซิเจนจากบริเวณฟิล์มของก๊าซเข้าสู่ฟิล์มของของเหลวโดยจะมีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของบริเวณผิวของของเหลว(ผิวน้ำ) ถ้ามีความปั่นป่วนบริเวณผิวน้ำมาก ชั้นฟิล์มของผิวน้ำอาจแตกออก ทำให้อัตราการถ่ายเทของออกซิเจนเข้าสู่ผิวน้ำมีมากขึ้น บริเวณชั้นฟิล์มของน้ำค่าความเข้มข้นของออกซิเจนจะค่อยๆลดลงจาก  $C_1$  ไปเป็น  $C_2$

ขั้นตอนที่สาม การถ่ายเทออกซิเจนจากชั้นฟิล์มของของเหลวเข้าสู่ชั้นของเหลว ในชั้นนี้จะมีค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน เท่ากับ  $C$  ถ้าน้ำมีการกวนสมบูรณ์ ค่า  $C$  จะมีค่าเท่าๆกันในทุกส่วนของน้ำ แต่ถ้าน้ำไม่มีการกวนค่า  $C$  อาจมีค่าแตกต่างกันตามระดับความลึกของน้ำ โดยทั่วไปยิ่งลึกไปเท่าใด ค่า  $C$  จะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ



รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว

### 3.4.2 หลักการคำนวณมวลสารที่ถูกถ่ายเท

$$r_m = k_G A (C_s - C) \quad (3.10)$$

เมื่อ  $r_m$  = อัตราของการถ่ายเทมวลสาร, (kg/day)

$K_G$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการกระจายของก๊าซ, (kg/(day.m<sup>2</sup>.(mm/L)))

$A$  = พื้นที่ผิวที่ก๊าซได้กระจาย, (m<sup>2</sup>)

$C_s$  = ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในสารละลาย, (mg/L)

$C$  = ความเข้มข้นของสารในสารละลาย, (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.1) สมการเขียนใหม่ได้ในรูปสมการดังนี้

$$r_m = V \frac{dt}{dc} = k_G A (C_s - C) \quad (3.11)$$

เมื่อ  $V$  = ปริมาตรของสารละลาย, (l) เพราะฉะนั้น

$$\frac{dC}{dt} = k_G \frac{A}{V} (C_s - C) \quad (3.12)$$

ในทางปฏิบัติค่า  $A$  เป็นค่าที่หาได้ยาก ดังนั้นจึงรวมตัวแปร  $A$  และ  $V$  เป็นตัวแปรใหม่คือ  $a$  โดยที่  $a = A/V$  และพิจารณา  $k_G$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทก๊าซผ่านชั้นฟิล์มของของเหลว ซึ่งกำหนดให้เป็น  $k_L$  ดังนั้น  $k_G A/V$  จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น  $k_L a$  ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซ (ออกซิเจน) ค่า  $k_L a$  นี้ขึ้นอยู่กับระบบการเติมอากาศ รูปร่างของถังเติมอากาศ ลักษณะของน้ำ และอุณหภูมิโดยทั่วไปค่า  $k_L a$  โดยแยกออกเป็น  $k_L$  และ  $a$  เพราะค่า  $a$  เป็นค่าที่คำนวณหาได้ยากในทางปฏิบัติ จากสมการ (3.2) สามารถเขียนได้ใหม่เป็นสมการดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad (3.13)$$

เมื่อ  $\frac{dC}{dt}$  = ค่าความเข้มข้นของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา, (mg/l.s)

$k_L a$  = ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซต่อวินาที

จากสมการที่ได้กล่าวมานำมาวิเคราะห์ต่อจะได้เป็น

$$\int_{c_1}^{c_2} \frac{dC}{(C_s - C)} = K_L a \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$\ln \left[ \frac{c_s - c_2}{c_s - c_1} \right] = K_L a (t_2 - t_1)$$

$$k_L a = \frac{\ln \left[ \frac{c_s - c_2}{c_s - c_1} \right]}{(t_2 - t_1)}$$

เมื่อพิจารณา  $t_1 = 0$  โดยมี  $C_1 = 0$ ,  $t_2 = t_1$  และ  $C_2 = C_t$  จะได้

$$\ln \left[ \frac{c_s - c_t}{c_s - c_0} \right] = -k_L a t \quad (3.14)$$

ถ้าระบบมีของเหลวที่อิ่มตัวด้วยก๊าซ ทำให้ก๊าซถ่ายเทออกจากของเหลว ดังนั้น

สมการเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln \left[ \frac{c_t - c_s}{c_0 - c_s} \right] = -k_L at \quad (3.15)$$

จากหลักการข้างต้นสามารถนำมาใช้คำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องการเติมลงในน้ำทิ้งโดยสมมติให้อัตราการเติมออกซิเจนลงไปใต้น้ำทิ้งมีค่าเท่ากับ  $\frac{dm}{dt}$

$$\frac{dm}{dt} = k_T V (C_s - C) \quad (3.16)$$

เมื่อ  $k_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทของออกซิเจน ณ อุณหภูมิ T ( $^{\circ}\text{C}$ ) จะได้

$$k_T = k_{20} (1.024)^{T-20} \quad (3.17)$$

กำหนดให้ประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนลงไปใต้น้ำทิ้งเป็น (Aeration Efficiency)

$$E = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{20}}{M} \quad (3.18)$$

เมื่อ  $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{20}$  = อัตราการเติมออกซิเจน ณ 20 องศาเซลเซียส และมี DO = 0 mg/l

M = อัตราการเติมออกซิเจนลงไปใต้น้ำทิ้ง, (g/s)

จะได้

$$M = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{20}}{E} \quad (3.19)$$

$$E = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_T \left(\frac{dm}{dt}\right)_{20}}{\left(\frac{dm}{dt}\right)_T} \quad (3.20)$$

กำหนดให้

$$\frac{dm}{dt} = V \frac{dC}{dt} = QdC$$

เมื่อ V = ปริมาตรของน้ำทิ้ง, ( $\text{m}^3$ )

Q = อัตราการไหลเข้าของน้ำทิ้ง, ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$$dM = \frac{Q}{E} \frac{(C_s)_{20}}{(1.024)^{T-20}} \left( \frac{dC}{(C_s - C)_T} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^M dM = \frac{Q}{E} \frac{(C_s)_{20}}{(1.024)^{T-20}} \int_{C_i}^{C_0} \frac{dC}{(C_s - C)}$$

$$M = \frac{Q}{E} \frac{(C_s)_{20}}{(1.024)^{T-20}} \ln \left( \frac{C_s - C_i}{C_s - C_0} \right)_T \quad (3.21)$$

$$Q_a = 0.00353 \frac{Q}{E} \frac{(C_s)_{20}}{(1.024)^{T-20}} \ln \left( \frac{C_s - C_i}{C_s - C_0} \right)_T \quad (3.22)$$

เมื่อ  $0.00353 = (\text{g/s}) \times (\text{m}^3/1230\text{g}) \times (1/0.23)$

$1230 =$  ความหนาแน่นของอากาศ,  $(\text{g/m}^3)$

$0.23 =$  ปริมาณออกซิเจนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยของปริมาณอากาศ

$Q_a =$  ปริมาณอากาศที่ต้องการเติมลงไปใต้น้ำทิ้ง,  $(\text{m}^3/\text{s})$

เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพจริงคือปริมาณอากาศที่เติมลงไปใต้น้ำทิ้ง หรือน้ำเสียจึงนิยมคูณด้วย 1.10 ( $1.1 = 1/0.9$ ;  $0.9 =$  ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำเสีย/ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำสะอาด) ทำให้ปริมาณอากาศที่ต้องการเติมลงไปใต้น้ำทิ้ง เป็นดังสมการ (3.23)

$$Q_a = 0.0039 \frac{Q}{E} \frac{(C_s)_{20}}{(1.024)^{T-20}} \ln \left( \frac{C_s - C_i}{C_s - C_0} \right)_T \quad (3.23)$$

### 3.4.3 วิธีวัดประสิทธิภาพในการเติมอากาศ

การหาค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศ (Oxygenation Capacity, OC) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$OC = \frac{V(k_L a)(C_s)}{1000} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $OC =$  ความสามารถในการเติมออกซิเจน,  $(\text{kg/hr})$

$V =$  ปริมาตรของน้ำ,  $(\text{m}^3)$

$k_L a =$  ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซต่อวินาที

$C_s =$  ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในสารละลาย,  $(\text{mg/l})$

เนื่องจากในการหาค่า  $k_L a$  จะกระทำในสภาวะต่างๆ ซึ่งไม่ได้อยู่ในสภาวะมาตรฐาน ดังนั้น ค่า  $k_L a$  ต้องทำการคำนวณปรับค่า สำหรับอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่มีค่าแตกต่างกันกับสภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$  และความดันบรรยากาศ  $10.33$  เมตรของน้ำ หรือ  $760$  มิลลิเมตรปรอท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในอินเทอร์เน็ตเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3.1 การคำนวณปรับค่า  $k_La$  สำหรับอุณหภูมิใดๆ

$$k_La_{(T)} = k_La_{(20^\circ C)} \theta^{(T-20)} \quad (3.25)$$

เมื่อ  $k_La_{(T)}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ณ อุณหภูมิ T, ( $^\circ\text{C}$ )

$k_La_{(20^\circ C)}$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทออกซิเจน ณ อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C}$

$\theta^{(T-20)}$  = ค่าคงที่ โดยมากอยู่ในช่วง 1.015-1.040 โดยทั่วไปค่า  $\theta = 1.024$  สำหรับเครื่องเติมอากาศแบบเป่าอากาศจุ่มใต้น้ำและแบบเติมอากาศบริเวณผิวน้ำ

T = อุณหภูมิของน้ำ, ( $^\circ\text{C}$ )

3.4.3.2 การคำนวณการปรับค่า  $C_s$  สำหรับอุณหภูมิและความดันบรรยากาศใดๆ

$$C_{s(T)} = 14.652 + 10.53(e^{-0.038967} - 1) \quad (3.26)$$

เมื่อทำการปรับค่า  $C_s$  แล้วนำค่า  $C_{s(T)}$  มาคำนวณปรับแก้เพื่อหาค่า  $C_s$  สำหรับ ความดันบรรยากาศใดๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{C'_s}{C_{s(T)}} = \frac{P - p}{760 - p} \quad (3.27)$$

เมื่อ  $C_{s(T)}$  = ค่า  $C_s$  ณ ความดันบรรยากาศมาตรฐาน, (mg/l)

$C'_s$  = ค่า  $C_s$  ณ ความดันบรรยากาศ P มิลลิเมตรของปรอท, (mg/l)

P = ค่าความดันบรรยากาศใดๆ, (mmHg)

p = ค่าความดันไอของน้ำ, (mmHg)

## 3.4.3.3 การคำนวณหาประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน

ค่าของ  $k_La$  ที่อุณหภูมิ T ( $^\circ\text{C}$ ) จะมีความสัมพันธ์กับค่า  $k_La$  ที่อุณหภูมิ Tr ( $^\circ\text{C}$ ) ในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับอุณหภูมิที่แตกต่างกันออกไป สามารถใช้สมการการแปลงกลับเพื่อให้อยู่ในมาตรฐานอุณหภูมิเดียวกันได้ดังนี้

$$k_La_{Tr} = \frac{k_La_T}{1.024^{(T-Tr)}} \quad (3.28)$$

จะเห็นได้ว่าสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทออกซิเจนได้จากค่า  $k_La$  สำหรับมาตรฐานทั่วไปในระบบเติมอากาศ จะวัดประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศในน้ำสะอาดเป็นน้ำหนักของออกซิเจนต่อหน่วยกำลังงานที่ใช้ภายในระยะเวลาหนึ่งชั่วโมง สมรรถนะของ Aerator จะมีมาตรฐานที่ใช้วัดที่อุณหภูมิมาตรฐานคือ

ประเทศเยอรมัน ใช้อุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}$  จะได้  $\text{OTR}_{10} = k_L a_{10} C_{S10}$   
 ประเทศอเมริกา ใช้อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  จะได้  $\text{OTR}_{20} = k_L a_{20} C_{S20}$

$\text{OTR}_{10}$  อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $10^{\circ}\text{C}$  และความดัน 1 บรรยากาศ มีหน่วย ( $\text{g}/\text{m}^3/\text{h}$ )

$\text{OTR}_{20}$  อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  และความดัน 1 บรรยากาศ มีหน่วย ( $\text{g}/\text{m}^3/\text{h}$ )

เราจะได้ค่า  $C_{S10} = 11.29 \text{ mg/l}$  และ  $C_{S20} = 9.09 \text{ mg/l}$

ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$AE_T = \frac{\text{OTR}_T V}{P} \times 100 \quad (3.29)$$

เมื่อ  $AE_T$  = ประสิทธิภาพของ Aerator ที่อุณหภูมินั้น

$V$  = ปริมาตรของน้ำ ( $\text{m}^3$ )

$P$  = กำลังปั๊มที่ใช้ขับปั๊ม (W)

#### 3.4.4 ปัจจัยที่ทำออกซิเจนในน้ำมีมากหรือน้อย

1. อุณหภูมิของน้ำ ออกซิเจนละลายในน้ำได้มากเมื่อน้ำมีอุณหภูมิต่ำ และจะลดลงเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น
2. พื้นผิวสัมผัสของอณูก๊าซออกซิเจน ยิ่งพองอากาศมีพื้นที่สัมผัสมากและมีขนาดเล็กของอณูมาก ออกซิเจนก็ยิ่งมีโอกาสละลายน้ำได้สูง
3. ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ละลายน้ำอยู่ก่อนแล้ว หากมีปริมาณก๊าซออกซิเจนละลายในน้ำอยู่ก่อนแล้ว มากจนเกือบจะถึงจุดอิ่มตัว อัตราการละลายของออกซิเจนใหม่ที่เติมลงในน้ำก็จะต่ำลงพื้นผิวสัมผัสของน้ำ (ต่างจากข้อ 2) กรณีที่ผู้เลี้ยงสร้างให้บ่อเลี้ยงมีการพ่นน้ำออกแบบเหนือน้ำในลักษณะน้ำพุหรือน้ำตก เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำนั้น ยิ่งน้ำที่พ่นออกมาสัมผัสกับอากาศมากเท่าไร ก็ยิ่งเพิ่มโอกาสในการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างน้ำกับอากาศมากขึ้นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 วิธีการ Finite volume

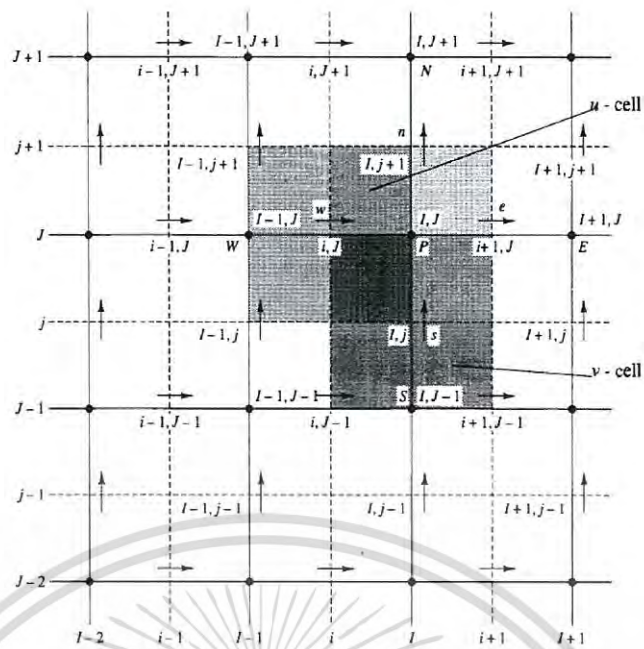
#### 3.5.1 บทนำ

ปัญหาในทางวิศวกรรมจะมีคำตอบที่เกี่ยวข้องกับตัวเลขและตัวแปร วิธีการหาคำตอบแบ่งออกเป็นสองวิธีใหญ่ๆคือ วิธีการเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) คำตอบจากวิธีการนี้เรียกว่า คำตอบจริง (Exact solution) คำตอบเป็นได้ทั้งตัวเลขหรือตัวแปร และอีกวิธีหนึ่งคือ วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) คำตอบจะเป็นคำตอบที่เป็นค่าประมาณอยู่ในรูปของตัวเลข เรียกว่า คำตอบเชิงตัวเลข (Numerical solution) ถ้าความผิดพลาดของคำตอบเป็นศูนย์ จะทำให้คำตอบเชิงตัวเลขมีค่าเท่ากับคำตอบจริง แต่ความเป็นจริงปัญหาส่วนใหญ่มีความซับซ้อนทำให้ความผิดพลาดของคำตอบไม่เท่ากับศูนย์ เทคนิคของวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีหลายวิธี วิธีที่นิยมคือ วิธี Finite volume ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามากจาก Finite difference (FDM) ซึ่งวิธี FDM เป็นการประมาณตัวไม่ทราบค่า ( $\phi$ ) ที่จุดต่อของโหนด (Node) ใดๆจากค่าของโหนดที่แวดล้อมโดยใช้ฟังก์ชัน Taylor series expansion ในการประมาณค่า โดยหลักการของ Finite volume คือ กำหนดสมการควบคุมของระบบที่กำลังพิจารณา จากนั้นแบ่งระบบนั้นออกเป็นชิ้นส่วนที่สามารถนับได้ในลักษณะของปริมาตรควบคุม (Control volume) และจะต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ให้กับ Control volume จากนั้นทำการอินทิเกรตตัวแปรในสมการควบคุมทั่วทั้ง Control volume ก็จะได้ระบบสมการ Discretized หลังจากแก้สมการก็จะได้คำตอบของระบบ

#### 3.5.2 วิธี Finite volume

การวางเซลล์ (Cell) ในโดเมนการไหลโดยตำแหน่งที่มีการตัดกันของเส้นกริดเรียกว่า โหนด ตัวอักษรกำกับของโหนด ตัวเล็กแทนโหนดของเซลล์ความดันหรือเซลล์ของคุณสมบัติอื่นๆ และตัวอักษรใหญ่แทนเซลล์ของเร็ว ส่วนตัวอักษร N, S, E, W, T และ B แทนตำแหน่งของโหนดที่ต้องการอ้างอิงกับโหนดปัจจุบัน ไปในทิศเหนือ, ใต้, ตะวันออก, ตะวันตกบน และ ล่างตามลำดับ

การวางเซลล์ดังรูป 4.1 นั้นจะเป็นลักษณะการวางแบบเหลื่อมกันของเซลล์ความดันหรือเซลล์ของคุณสมบัติอื่นๆ  $\phi$  กับเซลล์ของความเร็ว U, V หรือ W นั่นคือเซลล์ของความดันจะวาง ณ ศูนย์กลางส่วนเซลล์ความเร็วจะวาง ณ เซลล์ที่ขอบเส้นกริดการวางเซลล์ในรูปแบบนี้เรียกว่า Staggered grid



รูปที่ 3.11 ลักษณะการวางเซลล์ใน Staggered grid

เซลล์ที่วางเหลื่อมกันเพื่อ ต้องการให้เทอมของ source ที่มาจาก Pressure gradient ของเซลล์ศูนย์กลางสำหรับทั้งสองแนวแกนในสมการ Navier-Stokes หรือคือ สมการอนุกรมโมเมนตัมมีค่าเป็นศูนย์ ในทุกๆ โหนด มิเช่นนั้นแล้วจะไม่สามารถอธิบายเชิงกายภาพสำหรับ Pressure gradient ที่ไม่เป็นศูนย์ได้ แต่เมื่อพิจารณาเซลล์ที่ขอบจะพบว่า Pressure gradient มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับกับพฤติกรรมของ Discretize สมการอนุกรมโมเมนตัม และข้อดีของ Staggered grid ยังทำให้สามารถหาค่าคุณสมบัติอื่นๆ ได้โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องมีการประมาณค่าเซลล์ที่ขอบ

รูปทั่วไปของสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ เมื่อเป็น steady flow โดยที่  $\Gamma_\phi$  คือ Diffusion coefficient

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (3.30)$$

อินทิเกรตสมการ (3.3) ทัวทั้ง Control volume จะได้สมการ Governing discretized ที่ Node P ใดๆ

$$\int_{cv} \left( \frac{\partial(\rho U_i \Phi)}{\partial x_i} \right) dV = \int_{cv} \left( \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \right) \right) dV + \int_{cv} (S_\phi) dV \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3 สมการควบคุม Discretization

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั่วไปนั้นประกอบด้วย Convection term, Diffusion term และ Source term แต่ละเทอมเราสามารถทำการ Discretization ได้ดังนี้

#### 3.5.3.1 Convection term

Discretization ของ Convection term ทำได้โดยการอินทิเกรต  $\varphi$  ตลอดทั้ง Control volume จะได้

$$\int_{cv} \left( \frac{\partial(\rho U_i \Phi)}{\partial x_i} \right) dV = C = C_e \varphi_e - C_w \varphi_w - C_n \varphi_n - C_s \varphi_s \quad (3.32)$$

โดยที่ Convection flux คือ

$$C_e = \rho_e u_e A_e$$

$$C_w = \rho_w u_w A_w$$

$$C_n = \rho_n u_n A_n$$

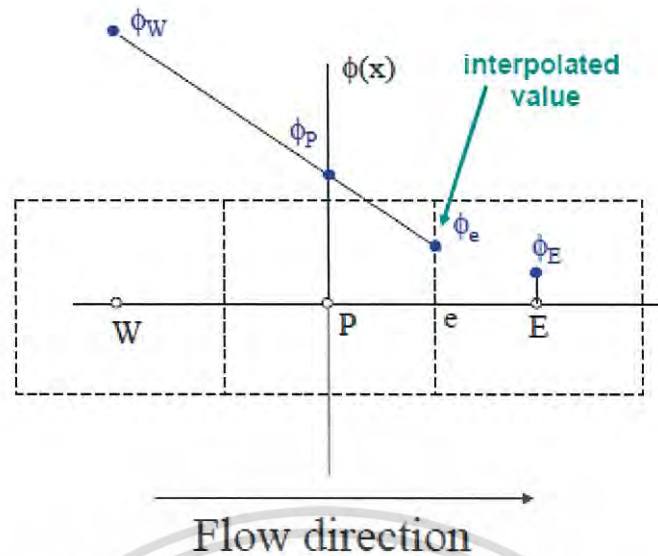
$$C_s = \rho_s u_s A_s$$

เมื่อ  $\varphi_e$ ,  $\varphi_w$ ,  $\varphi_n$  และ  $\varphi_s$  เป็นค่าของ  $\varphi$  ที่บริเวณของเขตเซลล์หรือ Control volume หาได้จากการประมาณที่เหมาะสม

มี Scheme ที่ใช้ในการประมาณค่าของ  $\varphi$  ที่บริเวณขอบของ Control volume หลายแบบแต่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเพียงแบบเดียวคือแบบ ผลต่างต้นลมอันดับสอง (Second order upwind, SOU)

วิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง (Second order upwind, SOU) เป็นการประมาณค่าอย่างเป็นเชิงเส้นของตัวแปร  $\varphi$  ที่ขอบของ Control volume ใดๆโดยใช้ตำแหน่ง Upstream ที่อยู่ข้างเคียง โดยยกตัวอย่างเฉพาะที่ตำแหน่ง e เท่านั้น(รูปที่ 3.12) คือ

$$\varphi_e = \begin{cases} \varphi_p & \text{if } C_e > 0 \\ \varphi_E & \text{if } C_e < 0 \end{cases} \quad (3.33)$$



รูปที่ 3.12 แสดงการประมาณค่าด้วยวิธีผลต่างอันดับสอง

### 3.5.4 เงื่อนไขทางเข้าที่ทางเข้า (Boundary condition)

ตำแหน่งทางเข้าโดยส่วนใหญ่จะกำหนดเป็น รูปร่างของความเร็วทางเข้า (Inlet velocity profile) หรือกำหนดเป็นอัตราการไหลเชิงมวลขาเข้า (Inlet mass flow rate)

### 3.5.5 กระบวนการหาคำตอบ

#### The SIMPLE Algorithm

เป็นวิธีการที่เข้ามาช่วยในการแก้สมการที่มีการใช้ค่าของความดันและความเร็วในสมการอนุกรมโมเมนตัม โดยจะสร้างความสัมพันธ์กันของทั้งสองคุณสมบัติข้างต้น และจัดลำดับในการแก้ระบบสมการ ขั้นตอนเริ่มจากการสมมุติค่า  $p^*$ ,  $u^*$  และ  $v^*$  แล้วแทนค่าลงในสมการอนุกรมโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่อง แล้วนำคำตอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการมาใช้ในการปรับค่าสมมุติอันใหม่เพื่อป้อนให้กับขั้นตอนการแทนค่าในสมการทั้งสองข้างต้น ทำซ้ำจนกว่าคำตอบจะลู่เข้า

ขั้นตอนการ Discretize สมการโมเมนตัมในแนวแกน x ของ Control volume ดังแสดงในรูป สามารถเขียนได้เป็น

$$a_w u_w = \sum a_{nb} u_{nb} + A_{ew} (P_w - P_p) + b_{u,w} \quad (3.34)$$

ค่า  $u^*$  อยู่บนพื้นฐานของค่า  $p^*$  และควรจะต้องสอดคล้องกับสมการอนุกรมโมเมนตัม

$$a_w u_w^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + A_{ew} (P_w^* - P_p^*) + b_{u,w}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดเทอม  $\sum a_{nb} (u_{nb} - u_{nb}^*)$  จะได้สมการ Velocity-correction เป็น

$$u_w = u_w^* + d_w (p'_w - p'_p) \quad (3.35)$$

ซึ่ง  $d_w = A_w/a_w$  และ  $p' = p - p^*$

ในทำนองเดียวกันกับขอบอื่นๆของ Control volume สามารถสรุปได้เป็น

$$\begin{cases} u_e \\ u_n \\ u_s \end{cases} = \begin{cases} u_e^* + d_e (p'_p - p'_e) \\ u_n^* + d_n (p'_p - p'_n) \\ u_s^* + d_s (p'_p - p'_s) \end{cases} \quad (3.36)$$

เมื่อ  $d_e = A_e/a_e$ ,  $d_n = A_n/a_n$ ,  $d_s = A_s/a_s$

สำหรับสมการโมเมนตัมแกน y สามารถทำได้เช่นเดียวกับแกน x

สมการ Pressure-correction สามารถทำได้จากสมการความต่อเนื่อง โดยการแทนสมการ Velocity-correction ลงไปแล้วจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$a_p p'_p = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b_m \quad (3.37)$$

โดยที่

$$\begin{cases} a_E \\ a_W \\ a_N \\ a_S \end{cases} = \begin{cases} \rho_e d_e A_e \\ \rho_w d_w A_w \\ \rho_n d_n A_n \\ \rho_s d_s A_s \end{cases}$$

$$a_p = a_E + a_N + a_S - S_p$$

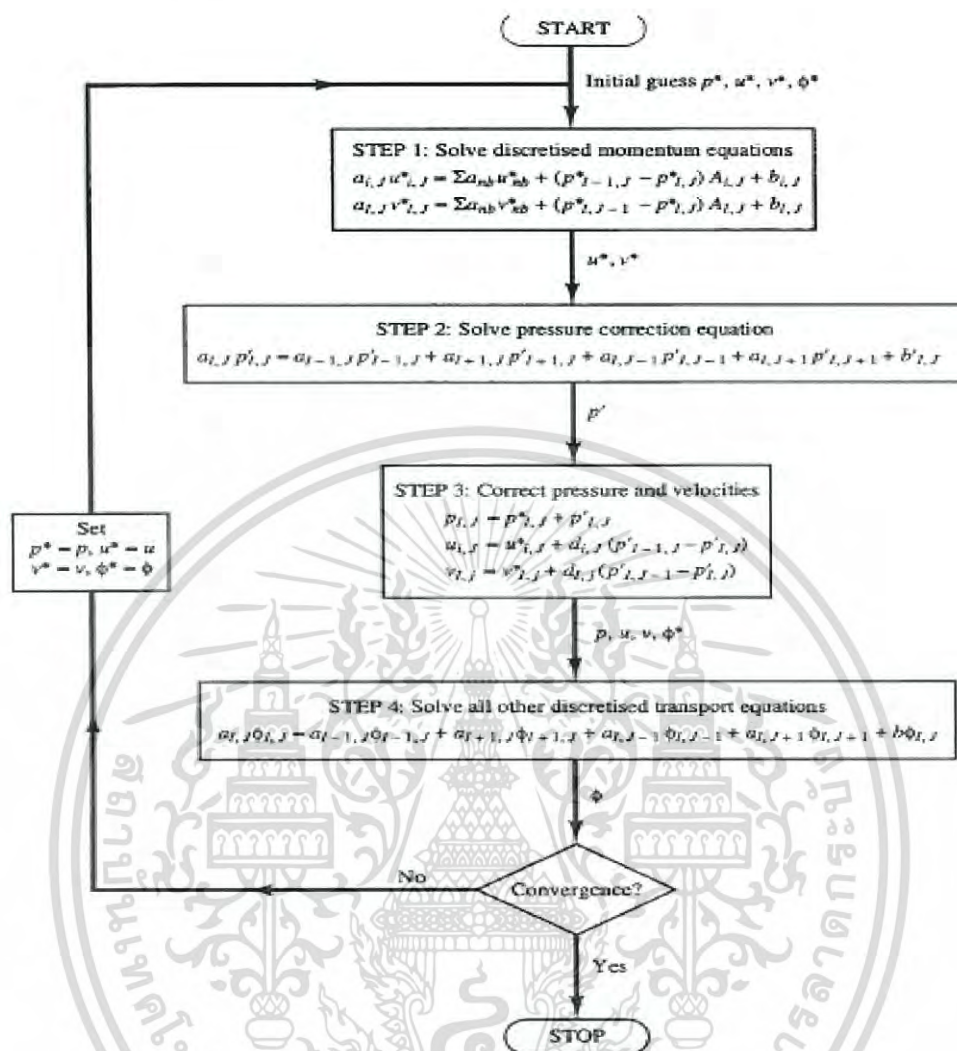
$$b_m = \rho_w u_w^* A_w - \rho_e u_e^* A_s - \rho_n u_n^* A_n + S_C$$

ในการปรับค่าความดัน บางครั้งมีการใช้ Under-relaxation  $\alpha_p$  ซึ่งจะได้

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนของกระบวนการ SIMPLE algorithm ดังรูป



รูปที่ 3.13 แผนผังของ SIMPLE algorithm

### 3.6 การจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

กระแสของของไหลที่มีความเร็วและเลขเรย์โนลด์สูงจะเรียกว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) เนื่องจากกระแสน้ำวนของการไหลของเจ็ทเป็นการไหลแบบปั่นป่วน การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจึงถูกนำมาพิจารณาและใช้ในการคำนวณคุณสมบัติการไหลในโปรแกรมนี้

การไหลแบบปั่นป่วน สนามความเร็วจะไม่คงที่ ความผันผวนนี้จะรวมเข้ากับปริมาณที่ส่งผ่านได้เช่น โมเมนตัม พลังงาน และความเข้มข้นเฉพาะ อย่างไรก็ตาม สมการของระบบที่ถูกต้องนั้นสามารถเป็นได้ทั้งแบบเฉลี่ยเวลาและเฉลี่ยผลรวมเพื่อทำการกำจัดความผันผวน สมการและตัวแปรต่างๆได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อกระบวนการนี้

โปรแกรม Fluent มีแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน 5 รูปแบบ งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  ในการจำลองกระแสการไหล เมื่อค่า  $k$  คือ พลังงานศักย์ปั่นป่วนและค่า  $\varepsilon$  คืออัตราการกระจายตัว สมการที่ใช้ในการจำลองมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (3.39)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( a_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.40)$$

โดยที่

$$C_1 = \max \left[ 0.43 \frac{n}{n+5} \right], \quad n = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

เมื่อ

$t$  = เวลา, (s)

$\rho$  = ความหนาแน่น, (kg/m<sup>3</sup>)

$k$  = พลังงานจลน์ปั่นป่วน, ((J.m<sup>3</sup>)/kg)

$x$  = ระยะห่าง, (m)

$\mu$  = ความหนืด, (kg/(m.s))

$\mu_i$  = ความหนืดปั่นป่วน, (kg/(m.s))

$G_k$  = พลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากผลเฉลี่ยองค์ประกอบความเร็ว, (J)

$G_b$  = พลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว, (J)

$\varepsilon$  = อัตราการกระจายตัว, ((J.m<sup>3</sup>)/(kg.s))

$Y_m$  = ค่าที่เกิดเมื่อมีการกระจายพื้นที่อย่างผันผวนในกระแสนปั่นป่วนบีบอัดได้ในการกระจายตัวทั้งหมด, (J)

$C_{1\varepsilon}$  = ค่าคงที่ในโมเดล = 1.42

$C_{2\varepsilon}$  = ค่าคงที่ในโมเดล = 1.68

### 3.7 VOF (Volume of Fluid) Free Surface Model

เมื่อในระบบมีของไหลมากกว่าหนึ่งชนิดที่ไม่สามารถรวมเข้าด้วยกันได้ แบบจำลอง VOF ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ของไหลเมื่อมีการอินเตอร์เฟซ โดยแบบจำลองนี้จะใช้สมการโมเมนต์ร่วมกันสำหรับของไหลในระบบ และ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของของไหลสามารถทราบได้ตลอดทั้งโดเมน โมเดลนี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ เช่น การสลายตัวของเจ็ท การเคลื่อนที่ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟองอากาศในของเหลว การอินเตอร์เฟสของของเหลวและแก๊สที่สภาวะ steady หรือ transient เป็นต้น แบบจำลองมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})$$

(3.41)

$\alpha_q$  = อัตราส่วนปริมาตรของแต่ละเซลล์

$\dot{m}_{qp}$  = อัตราการถ่ายโอนมวลจากของไหลเฟส q ไปยังเฟส p

$\dot{m}_{pq}$  = อัตราการถ่ายโอนมวลจากของไหลเฟส p ไปยังเฟส q

$S_{\alpha_q}$  = อัตราการสร้างมวลของแต่ละเฟส



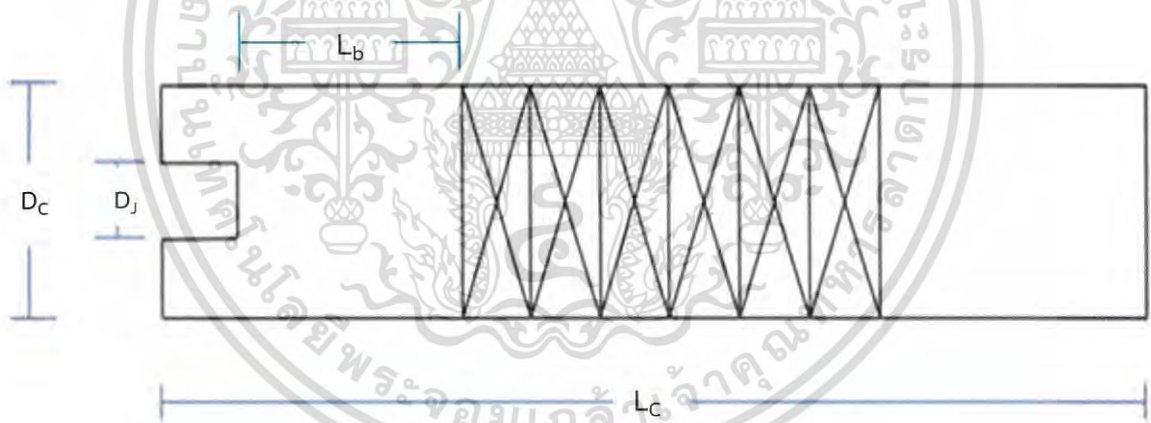
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การสร้างแบบจำลองและวิธีการทดลอง

### 4.1 การสร้างแบบจำลอง

โครงการเล่มนี้ ได้ทำการสร้างรูปจำลองของห้องผสมของของฉืดเหนียวนำอากาศ โดยอ้างอิงขนาดอัตราส่วนเชิงมิติของนาย จิรพล เนียมพินิจ สกุลและคณะ[1] ซึ่งได้ทำการวิจัยค่าอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉืด ( $D_j$ ) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางห้องผสม ( $D_c$ ) มีค่าหนึ่งต่อสามซึ่งทำให้เกิดการเหนียวนำอากาศสูงที่สุด ดังนั้นหัวฉืดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จึงใช้ห้องผสมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 18 มิลลิเมตรเป็นแบบแผนในการออกแบบห้องผสม

ห้องผสมถูกออกแบบโดยการติดใบพัดชนิด helical static mixer ที่ทำการออกแบบโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องผสม โดยมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหนึ่ง ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของน้ำกับอากาศ [7] ในการจำลองเพื่อการหาระยะห่างที่เหมาะสมในการติดใบพัดภายในห้องผสม ( $L_b$ ) ซึ่งได้ทำการจำลองเป็นจำนวนเท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉืด ( $D_j$ )



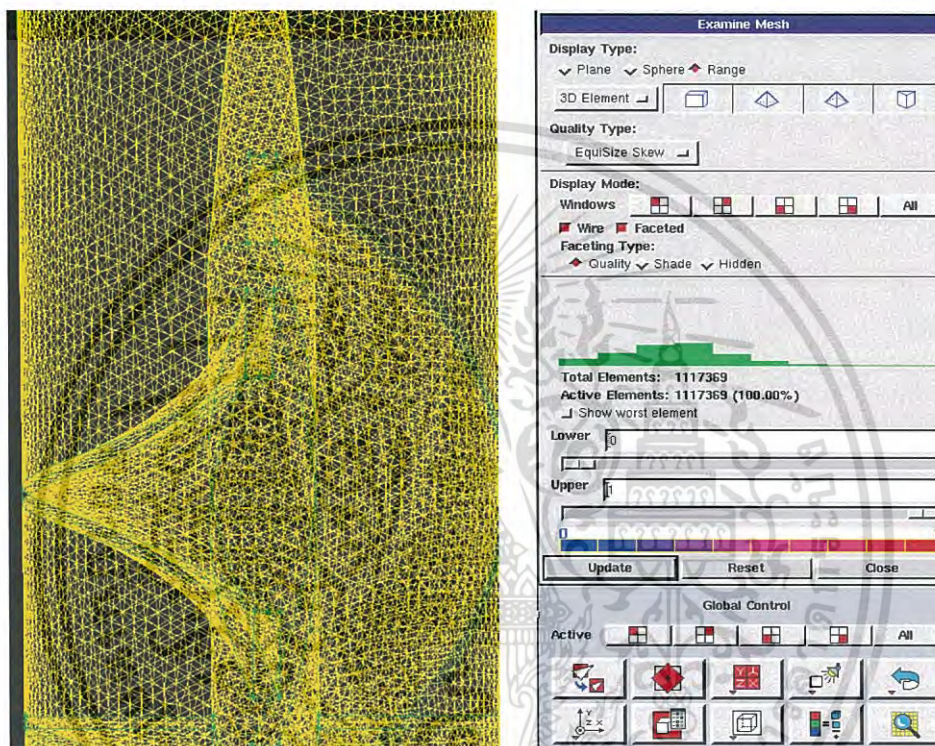
รูปที่ 4.1 รูปแสดงระยะตัวแปรต่างๆในห้องผสม

#### 4.1.1 การสร้างรูปร่างห้องผสม

แบบจำลองห้องผสมถูกสร้างขึ้นจากโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) เป็นโปรแกรมสร้างแบบจำลองที่สามารถสร้างขอบเขตย่อยและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เพื่อจะถูกนำไปใช้คำนวณพฤติกรรมการไหลด้วยโปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS fluent) ต่อไป

#### 4.1.2 การสร้างขอบเขตย่อย (mesh)

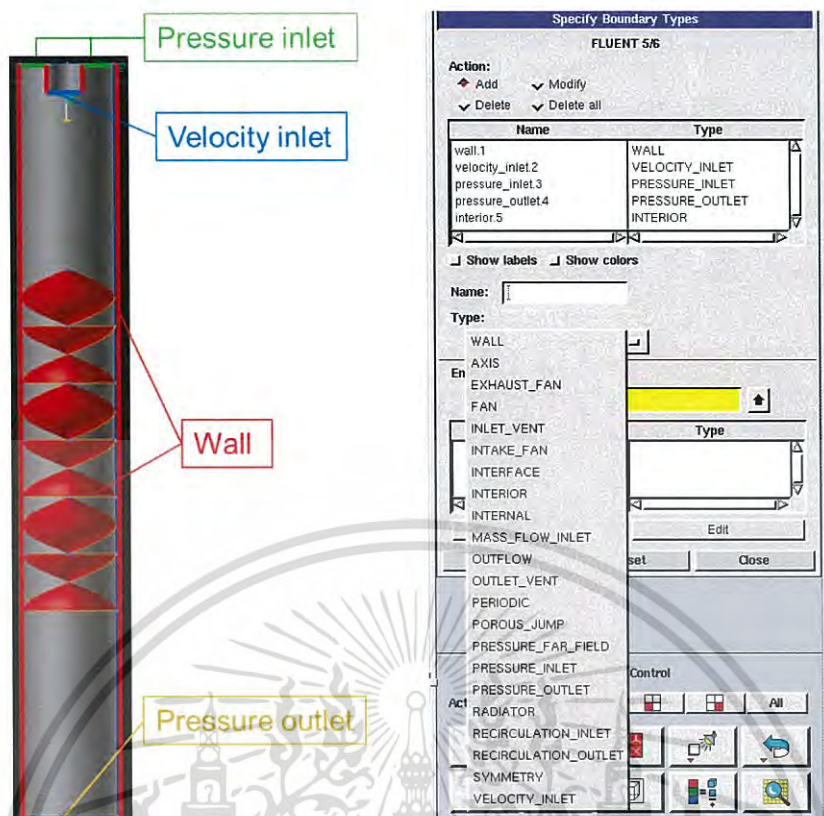
ขอบเขตย่อย (mesh) คือการแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองออกเป็นชิ้นย่อยจำนวนมาก โดยมีผลในเรื่องความละเอียดและความถูกต้องของแบบจำลอง ในการสร้างแบบจำลองได้ใช้ การแบ่งขอบเขตย่อยในแบบ tetrahedral ลักษณะ hybrid ซึ่งเหมาะสมในการจำลองแบบจำลองสามมิติที่มีส่วนโค้งจำนวนมากได้ดี จำนวนขอบเขตย่อยที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองอยู่ช่วง 1,000,000 ถึง 1,200,000 ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 (ก) Tetrahedral mesh ของแบบจำลอง (ข) จำนวนของขอบเขตย่อย

#### 4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

เงื่อนไขขอบเขตเป็นการกำหนดสภาพในแต่ละด้านของแบบจำลอง โดยกำหนดให้หัวฉีดน้ำที่เป็นเงื่อนไข Velocity inlet, ทางเข้าของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำเป็นเงื่อนไข Pressure inlet และทางออกของห้องผสมกำหนดเงื่อนไขเป็น Pressure Outlet ในส่วนของพื้นที่ผิวห้องผสมและผิวไบปิดทั้งหมดได้กำหนดเงื่อนไขเป็น Wall ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของห้องผสม

#### 4.1.4 การกำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้น (Initial Condition)

เมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต แบบจำลองจึงถูกนำไปใช้กำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของเงื่อนไขขอบเขตนั้นๆ ด้วยโปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS fluent) แบบจำลองสร้างขึ้นโดยระบบพิกัดฉากสามมิติโดยห้องผสมอยู่ในแนวแกนตั้ง (z-component) ในทิศทางบวก จึงกำหนดค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $g$ ) เป็น  $-9.81$  เมตรต่อวินาทีกำลังสอง กำหนดให้น้ำเป็นเฟสหลัก (Primary phase) เงื่อนไขค่าเริ่มต้นของน้ำมีค่าความหนาแน่น  $998.2$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนืด  $0.001003$  กิโลกรัมต่อเมตรวินาที มีค่าความตึงผิวสัมพัทธ์ระหว่างน้ำกับอากาศเท่ากับ  $0.072$  นิวตันต่อเมตร ความดันและอุณหภูมิภายนอกพิจารณาที่ความดัน  $1$  บรรยากาศ อุณหภูมิ  $25$  องศาเซลเซียส และจำลองการไหลที่สภาวะคงตัว (Steady state)

#### 4.1.5 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร (Variable Condition) และการคำนวณผลเฉลย

พิจารณาการจำลองการไหลหลายเฟสในรูปแบบของวิธี Volume of fluid (VOF model) ซึ่งเหมาะกับการจำลองการไหลของน้ำกับอากาศ [3] การไหลมีค่าเลขเรย์โนลด์ที่สูง ได้เลือกใช้การจำลองแบบ Renormalization-group (RNG)  $k-\epsilon$  model ซึ่งสามารถใช้ได้กับช่วงเลขเรย์โนลด์ที่กว้างมากกว่าในแบบของ standard  $k-\epsilon$  model [4]

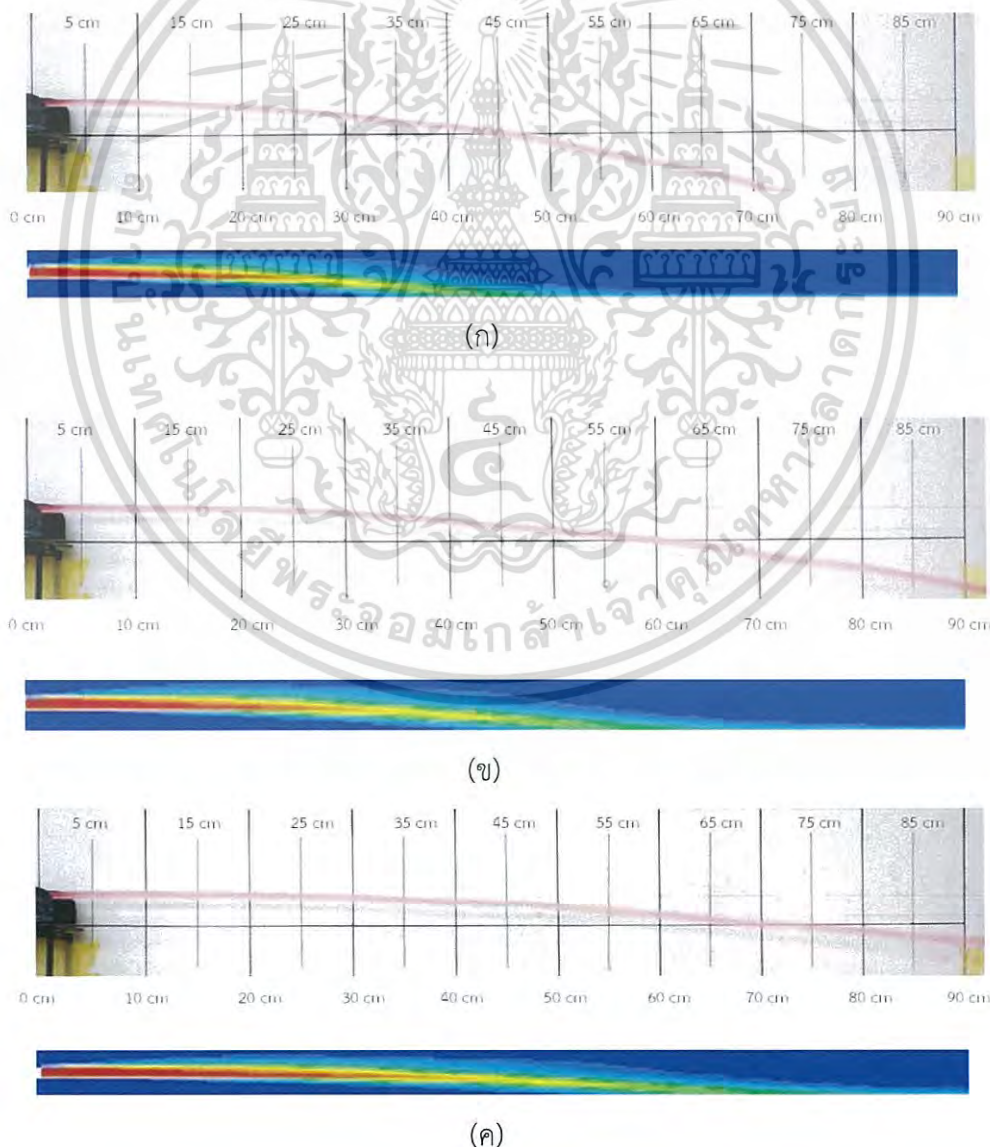
การคำนวณผลเฉลยจะใช้การคำนวณแบบ SIMPLE (semi-implicit method for pressure link equation) คือการสมมติตัวแปรความดันหนึ่งค่าแล้วนำไปแทนในสมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สโตกส์ เพื่อคำนวณหาค่าความเร็วและปริมาณอื่นๆที่สนใจและใช้วิธีผลต่างอันดับสอง (second order upwind) ในการคำนวณวนรอบซ้ำ (iterations) แม้ผลเฉลยจะมีค่าการกระเพื่อม (oscillatory solution) ที่สูงกว่าแบบผลต่างอันดับหนึ่ง แต่มีความละเอียดในการแพร่เชิงตัวเลขที่น้อยกว่าซึ่งเหมาะในการจำลองการไหลที่มีหลายเฟส

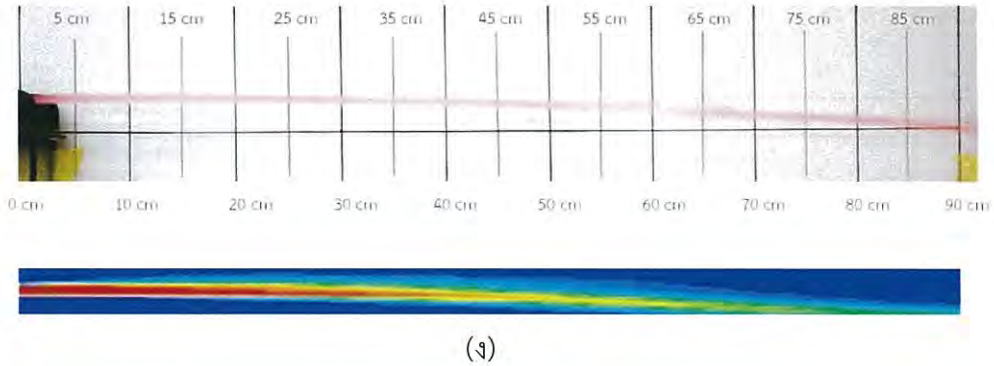
#### 4.1.6 การสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง (Model Validation)

จากการตั้งค่าจากโปรแกรมทั้งสองในข้างต้น ได้ทำการสอบเทียบผลการจำลองด้วยการทดลองด้วยรูปทรงที่เป็นพื้นฐาน โดยได้ออกแบบการทดลองในการฉีดน้ำที่อัตราไหลที่ 10, 12.5, 15 และ 17.5 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 มิลลิเมตรจากจุดอ้างอิงเพื่อดูระยะตกของลำน้ำในแนวระนาบ

ผลการจำลองได้แสดงในลักษณะของสัดส่วนปริมาตรน้ำในของไหลทั้งสองซึ่งจะเป็นการแสดงผลพฤติกรรมกรการไหลของผสมอย่างชัดเจนจากการสังเกตอัตราส่วนปริมาตรของเฟสที่ปรากฏ ผลการสอบเทียบการตั้งค่าของแบบจำลองเทียบกับผลทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4.4



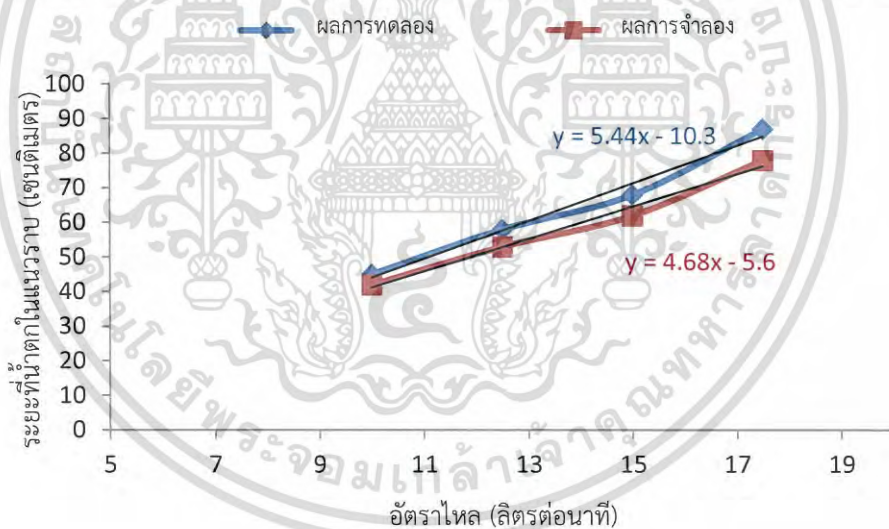
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 4.4 การสอบเทียบผลการจำลองด้วยการทดลองหาความยาวระยะยกในแนวราบของน้ำจาก ความสูง 30 มิลลิเมตรที่อัตราไหลน้ำ (ก) 10 ลิตรต่อนาที (ข) 12.5 ลิตรต่อนาที (ค) 15 ลิตรต่อนาที และ ง) 17.5 ลิตรต่อนาที

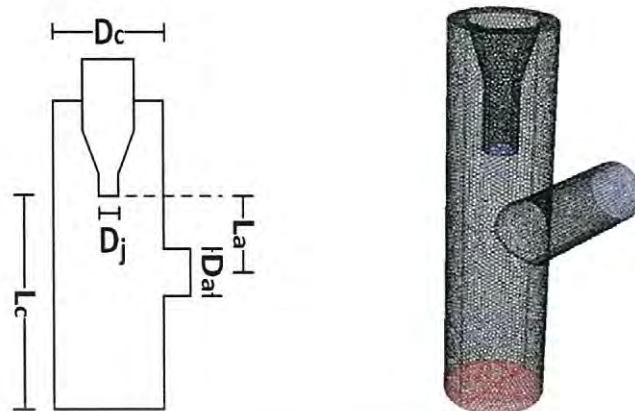
เมื่อทำการวัดระยะตกของน้ำจากการทดลองกับระยะจากผลการจำลอง ได้แสดงเป็นกราฟ เปรียบเทียบของระยะตกกับอัตราไหลดังรูปที่ 4.5 ซึ่งมีค่าความแตกต่างของความชันเส้นตรงของ ข้อมูลระยะทั้งสอง 8.54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเพียงพอที่จะยอมรับได้ของการสอบเทียบแบบจำลอง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการสอบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองหาความยาวระยะยกในแนวราบ ของน้ำจาก ความสูง 30 มิลลิเมตรจากระดับอ้างอิง

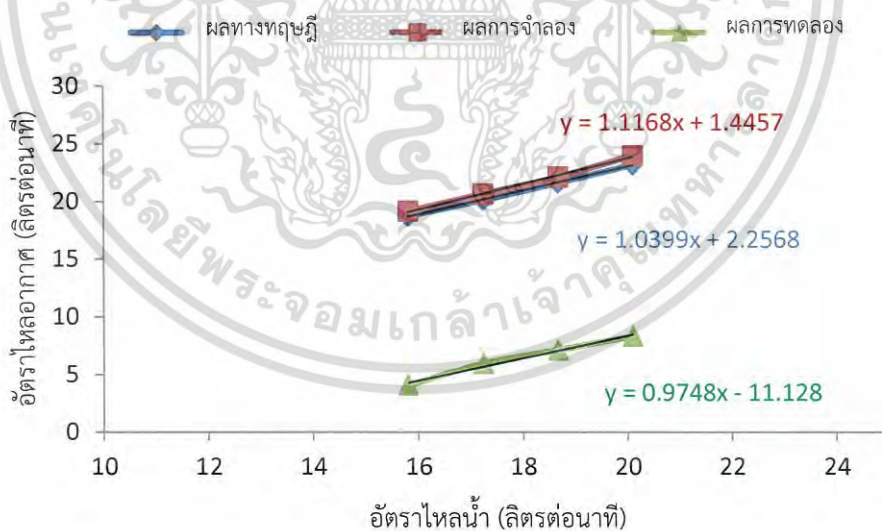
นอกจากนี้ยังได้ทำการสอบเทียบผลการจำลองด้วยผลการทดลองของหัวฉีดเหนียวนำอากาศ ของนายจิรพล เนียมพินิจ สุกุลและคณะ [1] ที่ได้ทำการทดลองไว้ โดยการทดลองได้ใช้อัตราไหลน้ำ 15.82 , 17.24, 18.67 และ 20.1 ลิตรต่อนาที ในการเหนียวนำอากาศเข้ามาทางช่องอากาศที่อยู่ ด้านข้างห้องผสมซึ่งห่างจากหัวฉีด 2Dj (12 มิลลิเมตร) ดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รูปแสดงภาพแบบจำลองหัวฉีดของนาย จีรพล เนียมพินิจ สกุลและคณะ เพื่อใช้ในการสอบเทียบผลการเหนี่ยวนำอากาศของแบบจำลองกับผลการทดลอง

เนื่องจากในโครงการของนายจีรพล เนียมพินิจและคณะ [1] ได้ใช้การจำลองของน้ำเพียงเฟสเดียว โดยผลการจำลองดังกล่าวนั้นไม่คิดถึงช่องอากาศและได้ใช้ค่าทางทฤษฎีเหนี่ยวนำอากาศมาใช้แทนค่าที่โปรแกรมแอนซิฟลูเอนท์คำนวณ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงโดยการเพิ่มช่องอากาศในโมเดลและจำลองการไหลเป็นสองเฟสคือมีทั้งเฟสของน้ำและอากาศมาคำนวณพฤติกรรมไหลโดยผลการจำลองและผลการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการสอบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองการเหนี่ยวนำอากาศของนายจีรพล เนียมพินิจและคณะ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

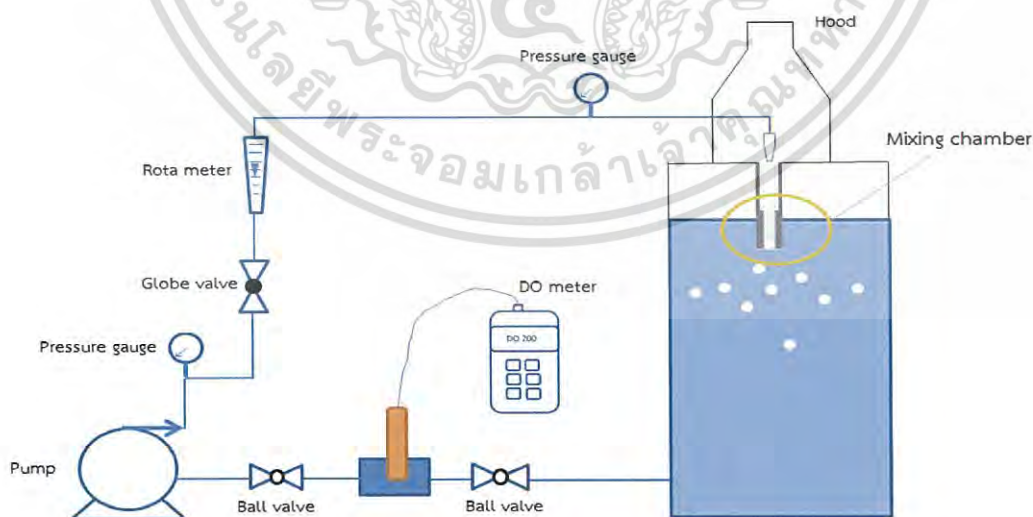
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณทางทฤษฎีอีกทั้งหากเปรียบเทียบค่าความชันเชิงเส้นตรงของแบบจำลองกับผลการทดลองพบว่าความแตกต่างกัน 14.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

ในการใช้ค่าสัดส่วนปริมาตรในการอธิบายการผสมของน้ำและอากาศนั้น หากค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำมีค่าที่สูงนั้นหมายถึงที่บริเวณนั้นเฟสของน้ำมีค่ามากกว่าเฟสของอากาศ ในทางกลับกันค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่ต่ำหมายถึงมีเฟสที่เป็นอากาศมากกว่าน้ำ ดังนั้นการผสมที่ดีค่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำกับอากาศควรมีค่าเท่ากับค่า 0.5 ซึ่งเป็นค่ากลางของค่าสัดส่วนปริมาตรดังกล่าว ซึ่งหากพิจารณาในการทำการทดลองแล้วค่าสัดส่วนปริมาตรนั้นแสดงถึงโอกาสการเกิดฟองของของอากาศในน้ำ ดังนั้นเมื่อค่าสัดส่วนปริมาตรเข้าใกล้ค่ากลาง จะทำให้โอกาสในการเกิดฟองอากาศในน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงมีการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลที่ดีขึ้น

## 4.2 ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

### 4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

การออกแบบชุดทดลองของชุดห้องผสม ได้ดูการผสมจากการถ่ายโอนออกซิเจน ในการทดลองได้ทำการล้างออกซิเจนน้ำในถังผสมออกก่อน เมื่อเริ่มการทดลอง น้ำที่ค่าความเข้มข้นออกซิเจนเป็นศูนย์จะถูกปั๊มมาสู่หัวฉีดเพื่อเหนี่ยวนำอากาศ เมื่ออากาศถูกเหนี่ยวนำจะเข้าสู่ห้องผสมทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลของออกซิเจนลงสู่ น้ำที่มีค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่ำกว่าจากนั้นของผสมจึงไหลออกสู่ถังผสม กระบวนการนี้จะทำการเติมออกออกซิเจนน้ำในถังผสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่าอิ่มตัวของออกซิเจนของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) แผนผังชุดทดลอง (ข) การติดตั้งชุดทดลองจริง

#### 4.2.1.1 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ

หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศที่นำมาใช้ทดลองถูกออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หัวฉีดที่ 6 มิลลิเมตร การออกแบบขนาดสัดส่วนต่างๆเป็นไปตามมาตรฐาน ASME (American Society Mechanical Engineering) ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศที่ใช้ทดลอง

#### 4.2.1.2 ห้องเหนี่ยวนำอากาศ

ห้องเหนี่ยวนำอากาศมีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความสูง เท่ากับ 15x15x20 เซนติเมตรได้ใช้ท่ออลูมิเนียม ที่ยึดที่ปลายทั้งสองข้างติดแน่นกับผนังของห้องเหนี่ยวนำ ที่ปลาย ได้ยึดกับหัวฉีดที่บริเวณกึ่งกลางห้องผสม ด้านบนได้ติดตั้งดูดอากาศ (Hood) ซึ่งถูก ออกแบบตามมาตรฐาน ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) โดยขนาดพอดีกับขนาดห้องเหนี่ยวนำ แผ่นคลิสิกที่ใช้มีความหนา 3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ห้องเหนี่ยวนำอากาศ

#### 4.2.1.3 ห้องผสม (Mixing Chamber)

ห้องผสมที่ใช้ในการทดลองจะมีอยู่ 4 แบบ คือ ห้องผสมเปล่าที่ไม่ติดใบพัด, ห้องผสมที่ติดใบพัดสองแกน, ห้องผสมที่ติดใบพัดสามแกนและห้องผสมที่ติดใบพัดสี่แกน ตัวใบพัดถูกออกแบบให้สามารถให้ถอดออกจากห้องผสมเปล่าได้ ห้องผสมถูกทำขึ้นจากท่อออลิลิกใส เพื่อสะดวกในการศึกษาภาพฟองอากาศที่เกิดขึ้น ขนาดห้องผสมเท่ากับ 18 มิลลิเมตร มีความยาว 250 มิลลิเมตร ในการทดลองห้องผสมได้ถูกยึดไว้กับกับผสมส่วนบนที่มีลักษณะเป็นกล่องออลิลิกใส มีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความสูง เท่ากับ 15x15x30 เซนติเมตร มีแผ่นปิดสำหรับเกาะยึดกับห้องเหนี่ยวนำอากาศด้านบนและถังผสมด้านล่างเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 25x5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.11



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) ห้องผสมที่ไม่ติดใบพัด (ข) กล่องยึดห้องผสมกับชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบปิดถูกออกมาให้ยึดกับตัวห้องผสมเปล่าได้ ใบปิดชนิดสองแกนมีมุมระหว่างแกน  $180^\circ$  แต่ละชั้นทำมุม  $90^\circ$  ต่อชั้นที่ติดกัน ใบปิดชนิดสามแกนมีมุมระหว่างแกน  $120^\circ$  แต่ละชั้นทำมุม  $60^\circ$  ต่อชั้นที่ติดกันและใบปิดชนิดสี่แกนมีมุมระหว่างแกน  $90^\circ$  แต่ละชั้นทำมุม  $45^\circ$  ต่อชั้นที่ติดกัน ใบปิดในทุกชนิดมีการบิด (twist) แต่ละใบที่  $180^\circ$  จำนวนหกชั้นที่ความยาวชั้นละ 18 มิลลิเมตร มีขนาดแกนกลางที่ใช้ยึดใบ 6 มิลลิเมตร ความหนาตัวใบ 2 มิลลิเมตร ด้านบนเป็นรูปกรวยมีความสูง 12 มิลลิเมตรเพื่อลดภาระน้ำที่กระแทกใบปิดตัวบนสุด ภาพห้องผสมติดใบปิดแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ห้องผสมที่ติดใบปิด (ก) ชนิดสองแกน (ข) ชนิดสามแกน (ค) ชนิดสี่แกน

#### 4.2.2 ถังผสม (Mixing Tank)

ถังถูกสร้างเป็นรูปทรงปริซึมฐานสี่เหลี่ยม ฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความยาวด้านละ 29 เซนติเมตร มีความสูง 70 เซนติเมตร ด้านล่างมีรูสำหรับเชื่อมต่อไปยังชุดเครื่องวัดความเข้มข้นของออกซิเจน ฐานด้านล่างยึดกับโครงเหล็กฉากเพื่อให้ถังมีเกิดการสั่นขณะทำการทดลอง แผ่นออคิลิคที่ใช้ประกอบเป็นถังมีความหนา 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.13 ถังผสมที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อประกอบอุปกรณ์ที่ 4.2.1.1 ถึง 4.2.1.3 เข้ากับถังผสมจะได้ชุดทดลองดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ชุดทดลองส่วนถังผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ชุดเครื่องวัดความเข้มข้นออกซิเจน

เครื่องวัดความเข้มข้นออกซิเจน (DO meter) ได้ถูกยึดแน่นไว้กับข้อต่อเกลียวนอกเพื่อให้สวมพอดีกับข้อต่อเกลียวในซึ่งเชื่อมต่อจากท่อที่ไหลออกมาจากถังผสมและติดตั้ง Ball valve เพื่อสะดวกที่จะถอดชิ้นหัววัดความเข้มข้นโดยที่ไม่เกิดการล้นของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ชุดเครื่องวัดค่าความเข้มข้นออกซิเจน

### 4.2.4 ระบบสูบน้ำและอุปกรณ์ต่างๆ

#### 4.2.4.1 เครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำที่นำมาใช้เป็นแบบหอยโข่ง (Centrifugal Water Pump, Wizz WCP130) ใช้แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังขับที่ 1 Hp (745.6 วัตต์) อัตราไหลสูงสุด 90 ลิตรต่ออนาที



รูปที่ 4.16 เครื่องสูบน้ำที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4.2 วาล์ว (Valve)

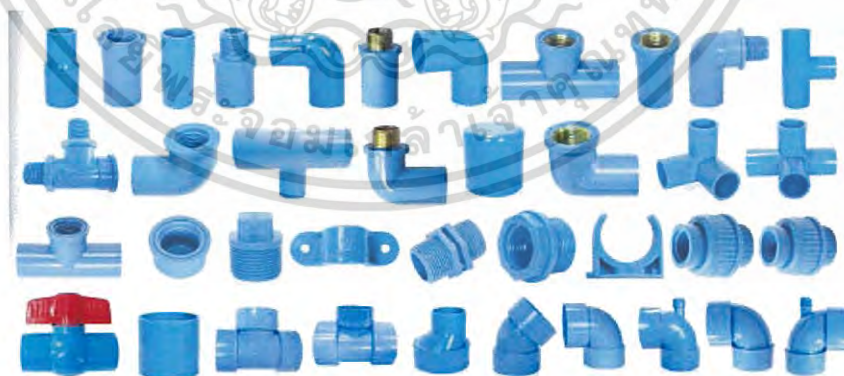
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหล ในการทดลองนี้ได้ใช้วาล์วสองชนิดคือ Globe valve ซึ่งใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำซึ่งต้องติดอยู่ก่อนเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ และ Ball valve เพื่อใช้ในการตัดน้ำที่เข้าสู่ชุดเครื่องวัดออกซิเจนในกรณีที่ต้องการดึงหัววัดค่าออกซิเจนออก



รูปที่ 4.17 วาล์วที่ใช้ในการทดลอง (ก) Globe valve (ข) Ball valve

#### 4.2.3.3 ชุดท่อพีวีซี

ท่อพีวีซีถูกใช้ในการส่งผ่านน้ำไปยังอุปกรณ์ต่างๆ มีการใช้ท่อขนาด  $\frac{1}{2}$  นิ้ว ใช้ข้อต่อตรงเกลียวนอกและข้อต่อเกลียวในขนาด  $\frac{3}{4}$  นิ้ว ในการยึดหัววัดออกซิเจน ใช้ข้อต่อ  $90^\circ$  จำนวนสองชิ้นในการต่อเข้ากับเครื่องวัดอัตราการไหลและหนึ่งชิ้นสำหรับต่อท่อออกจากถังผสม และตัวแปลงข้อต่อตรงจาก  $\frac{1}{2}$  นิ้วเป็น  $\frac{3}{4}$  นิ้วจำนวนหนึ่งชิ้น



รูปที่ 4.18 ชุดท่อพีวีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.5 เครื่องมือวัด (Measuring Equipment)

### 4.2.5.1 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Rota meter)

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ของบริษัท Treattion รุ่น Z-3002 สามารถวัดค่าอัตราการไหลค่าอัตราการไหลที่อยู่ในช่วง 2 ถึง 18 ลิตรต่อนาที มีขีดจำกัดที่ความดัน 6 บาร์



รูปที่ 4.19 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ

### 4.2.5.2 เครื่องวัดความเข้มข้นออกซิเจน (Dissolved Oxygen meter)

เครื่องมือวัดค่าความเข้มข้นออกซิเจน ของบริษัท EcoSense รุ่น DO200 ซึ่งสามารถวัดค่าความเข้มข้นของน้ำที่ไหลเร็วหรือวัดในน้ำที่มีความลึกได้ดี หน่วยความเข้มข้นที่วัดได้จะอยู่ในหน่วยของ ppm (part per million)



รูปที่ 4.20 เครื่องวัดเข้มข้นออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5.3 เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า (Clamp on Power meter)

เป็นอุปกรณ์ที่สามารถใช้วัดค่าของ กระแส (Amp), ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) พาวเวอร์แฟกเตอร์ (Power factor) และกำลังไฟฟ้า (Power)



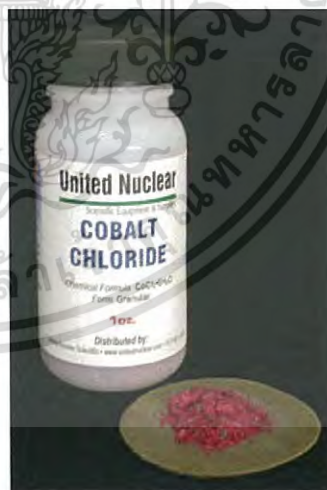
รูปที่ 4.21 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

#### 4.2.6 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ถูกนำมาใช้เพื่อทำการหาล้างค่าความเข้มข้นของน้ำในถังผสมให้เป็นค่าศูนย์ที่ต้องทำทุกครั้งที่เราเริ่มการทดลองโดยใช้โซเดียมซัลไฟต์ ( $Na_2SO_4$ ) ทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจนในน้ำโดยมีโคบอลคลอไรด์ ( $CoCl_2$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 (ก) สารโซเดียมซัลไฟต์ (ข) สารโคบอลคลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.7 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ (Canon EOS 7D Mark II)



รูปที่ 4.23 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ

#### 4.3 วิธีการทดลอง

1. ทำความสะอาดหัววัดเครื่องวัดความเข้มข้นออกซิเจน หลังจากเปิดเครื่อง 15 นาทีจึงทำการ คาลิเบรต (calibrate) แล้วต่อเข้ากับชุดเครื่องวัดที่ต่อออกมาจากถังผสม
2. เติมน้ำในถังผสม โดยน้ำที่เติมมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยเติมน้ำจมนมีปริมาตร 45 ลิตรหรือ คือที่ความสูง 53.5 เซนติเมตรจากพื้นถึง
3. เติมสารโซเดียมซัลไฟต์จำนวน 10 กรัมและโคบอลคลอไรด์จำนวน 1 กรัมลงในถังผสมเพื่อ ทำการชะล้างออกซิเจนในถังตามปฏิกิริยา  $2\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{CoCl}_2} 2\text{Na}_2\text{SO}_4$  ทำการ กวนและรอเป็นเวลาประมาณ 5 นาทีเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จนค่าความเข้มข้น ที่อ่านได้จาก DO meter มีค่าเป็น 0 ppm.
4. เดินเครื่องปั๊มเพื่อเติมอากาศ ปรับอัตราการไหลของน้ำเป็น 6 ลิตรต่อนาที โดยใช้ห้องผสมที่ ไม่ติดใบพัดในการทดลอง
5. เริ่มบันทึกค่าความเข้มข้นออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงทันทีที่ค่าที่วัดได้ของเครื่อง DO meter เปลี่ยนแปลงจากค่า 0 ppm โดยวัดค่าความเข้มข้นในทุกๆ 1 นาที และวัดต่อเนื่องจนถึง ค่าที่ความเข้มข้นของออกซิเจนเริ่มไม่เปลี่ยนแปลงเป็นเวลา 30 นาที
6. วัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ด้วย Clamp-On Power meter
7. ถ่ายภาพฟองอากาศด้วยกล้อง Canon EOS 7D Mark II
8. ทำการถ่ายน้ำในถังออก
9. วาดกราฟค่าความคลาดเคลื่อนค่าความเข้มข้นต่อเวลาและทำกราฟดังกล่าวเป็น semi-log plot ซึ่งจะหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน ( $k_L a$ ) จากความชันของกราฟ
10. คำนวณค่าประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศ ( $AE_T$ )
11. เปลี่ยนอัตราไหลเป็น 8, 10, 12 ลิตรต่อนาที ทำซ้ำตั้งแต่ 2 ถึง 10
12. เปลี่ยนห้องผสมเป็นแบบติดใบพัดชนิดสองแกน, ใบพัดชนิดสามแกน และใบพัดชนิดสี่แกน ทำซ้ำตั้งแต่ 2 ถึง 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

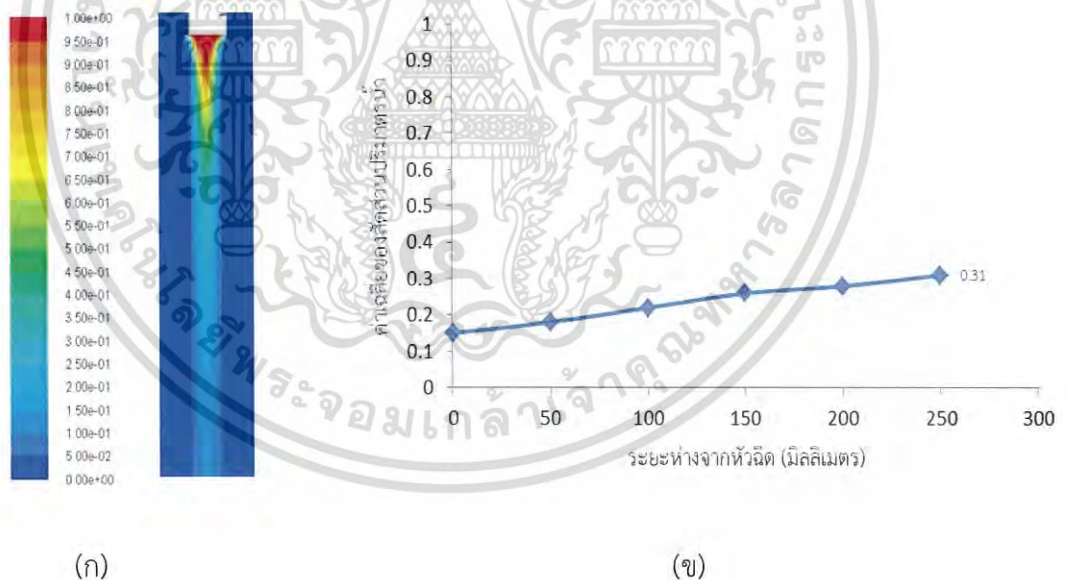
# ผลการสร้างแบบจำลองและการทดลอง

### 5.1 ผลจากการสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเพื่อหาระยะที่เหมาะสมของการติดใบปิดโดยวัดระยะห่างจากปลายหัวฉีด ( $L_b$ ) ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงเป็นจำนวนเท่าของความยาวหัวฉีด ( $D_j$ ) คือ  $5D_j$ ,  $10D_j$ ,  $15D_j$ ,  $20D_j$  กำหนดอัตราส่วนเชิงมิติของห้องผสมกับหัวฉีดตามที่ นายจิรพล เนียมพินิจ สุกุลและคณะ[1] ได้ทำการศึกษาไว้ ซึ่งหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ห้องผสมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร ผลการจำลองได้ทำการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำโดยทำการจำลองที่อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที การผสมที่ดีของน้ำและอากาศสามารถดูได้จากค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของน้ำนั้นมีค่าใกล้เคียงค่า 0.5 การสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรมฟลูเอนท์ (Fluent)

#### 5.1.1 ผลการจำลองเพื่อหาระยะที่เหมาะสมในการติดใบปิด ( $L_b$ ) ที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อนาที

##### 5.1.1.1 ผลจากการจำลองห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด

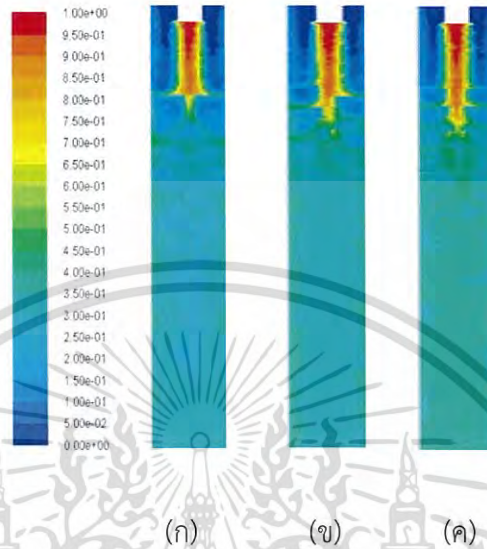


รูปที่ 5.1 (ก) ผลจากการจำลองห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด (ข) ค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามระยะจากหัวฉีด

ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่า ห้องผสมที่ไม่ติดใบปิดมีพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำและอากาศที่น้อยด้วยมีค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำตามระยะแนวหน้าตัดให้ค่ามากที่สุดเพียง 0.31

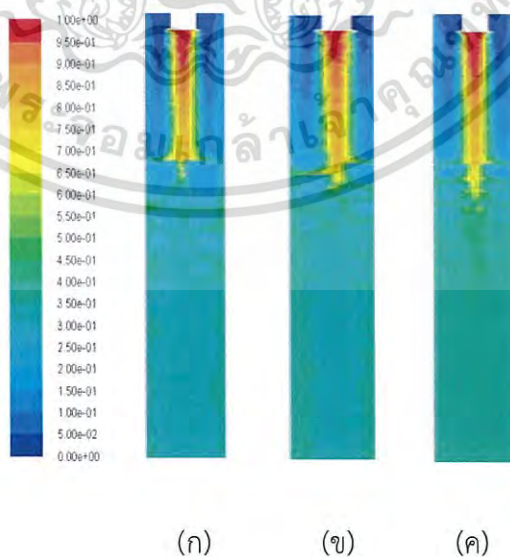
### 5.1.1.2 ผลจากการจำลองห้องผสมที่ติดใบบิตชนิดสองแกน, ชนิดสามแกนและชนิดสี่แกน

ผลการจำลองห้องผสมชนิดใบบิตชนิดสองแกน, ใบบิตชนิดสามแกน และ ใบบิตชนิดสี่แกน เมื่อระยะห่างที่ติดใบบิตเป็นระยะ 5D; แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.2 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อ  $L_b$  เท่ากับ 5D; เมื่อ (ก) ห้องผสมติดใบบิตชนิดสองแกน (ข) ห้องผสมติดใบบิตชนิดสามแกน (ค) ห้องผสมติดใบบิตชนิดสี่แกน

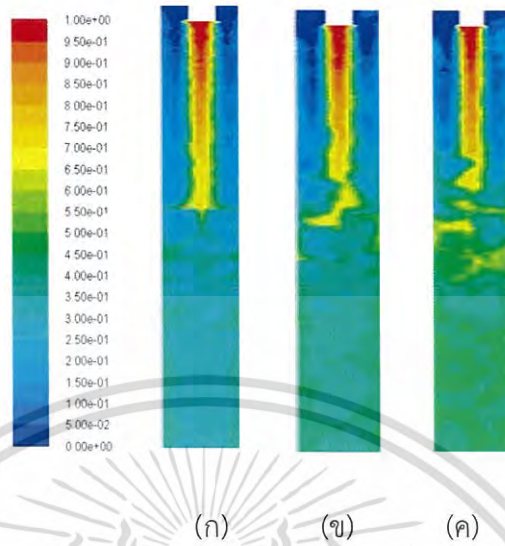
ผลการจำลองห้องผสมชนิดใบบิตชนิดสองแกน, ใบบิตชนิดสามแกน และ ใบบิตชนิดสี่แกน เมื่อระยะห่างที่ติดใบบิตเป็นระยะ 10D; แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.3 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อ  $L_b$  เท่ากับ 10D; เมื่อ (ก) ห้องผสมติดใบบิตชนิดสองแกน (ข) ห้องผสมติดใบบิตชนิดสามแกน (ค) ห้องผสมติดใบบิตชนิดสี่แกน

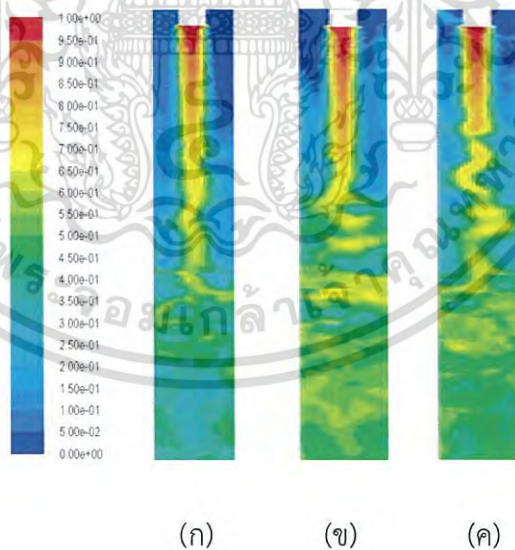
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ในพ็อกเก็ตบุ๊กเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองห้องผสมชนิดใบพัดชนิดสองแกน, ใบพัดชนิดสามแกน และ ใบพัดชนิดสี่แกน เมื่อระยะห่างที่ติดใบพัดเป็นระยะ  $15D_j$  แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.4 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อ  $L_b$  เท่ากับ  $15D_j$  เมื่อ (ก) ห้องผสมติดใบพัดชนิดสองแกน (ข) ห้องผสมติดใบพัดชนิดสามแกน (ค) ห้องผสมติดใบพัดชนิดสี่แกน

ผลการจำลองห้องผสมชนิดใบพัดชนิดสองแกน, ใบพัดชนิดสามแกน และ ใบพัดชนิดสี่แกน เมื่อระยะห่างที่ติดใบพัดเป็นระยะ  $20D_j$  แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.5 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อ  $L_b$  เท่ากับ  $20D_j$  เมื่อ (ก) ห้องผสมติดใบพัดชนิดสองแกน (ข) ห้องผสมติดใบพัดชนิดสามแกน (ค) ห้องผสมติดใบพัดชนิดสี่แกน

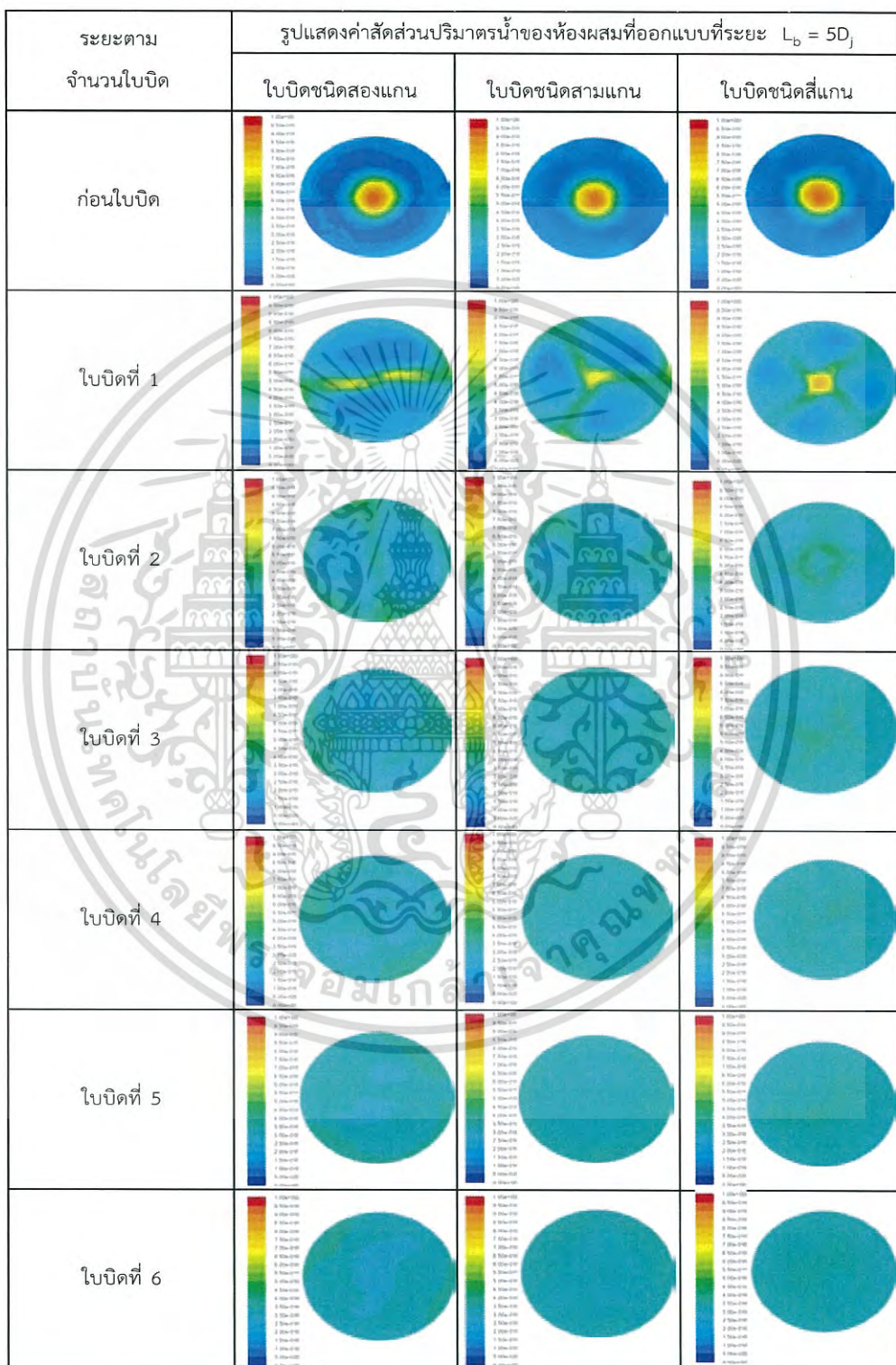
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำในห้องผสมทั้งสามแบบในแนวหน้าตัดของห้องผสมโดยดูที่ระยะใบบิตตัวที่ 1 , 2 , 3, 4, 5 และ 6 โดยใบบิตแต่ละใบมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (L/D) มีค่าเท่ากับ 1 นั่นคือมีความยาวใบละ 18 มิลลิเมตรและ ใบบิตทั้งหกใบนั้นวางชิดติดกันพบว่าค่าสีที่แสดงถึงค่าสัดส่วนของปริมาตรที่ระยะห่างระหว่างใบบิตกับหัวฉีด 5D<sub>j</sub> และ 10D<sub>j</sub> มีสีค่อนข้างเป็นสีฟ้าแสดงถึงมีค่าสัดส่วนปริมาตรของอากาศที่มากกว่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำดังที่แสดงในรูปที่ 5.5 และ 5.6 ในส่วนระยะห่างระหว่างใบบิตกับหัวฉีดเท่ากับ 15D<sub>j</sub> ใบบิตชนิดสี่แกนมีสีค่อนข้างเป็นสีเขียวมากกว่าใบบิตในอีกสองชนิดดังที่แสดงในรูปที่ 5.7 และที่ระยะห่างระหว่างใบบิตกับหัวฉีด 20D<sub>j</sub> ใบบิตทั้งสามชนิดมีแนวโน้มของโทนสีเข้าสู่สีเขียวซึ่งหมายถึงมีค่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำและอากาศเท่ากันซึ่งแสดงถึงมีการแลกเปลี่ยนมวลที่ดีที่ระยะ 20D<sub>j</sub> ดังที่แสดงในรูปที่ 5.8 ดังนั้นระยะที่เหมาะสมในการติดใบบิตคือที่ระยะ 20D<sub>j</sub> ซึ่งมีค่าเท่ากับ 120 มิลลิเมตรนับแต่จากหัวฉีด



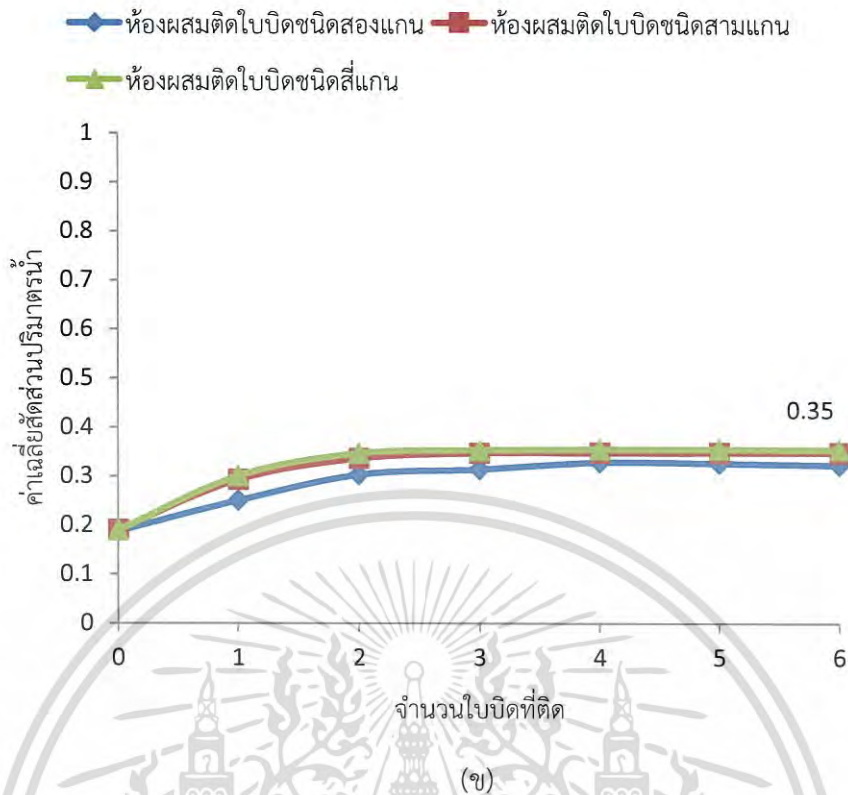
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำโดยแสดงภาพหน้าตัดของห้องผสมที่ออกแบบทั้งสามชนิดที่ระยะเท่ากับระยะเทียบจากตำแหน่งใบพัดที่ตำแหน่งนั้นๆ ที่ระยะใบพัดที่ 1 ห่างจากหัวฉีดเท่ากับ  $5D_j$  ดังแสดงในรูปที่ 5.5



(ก)

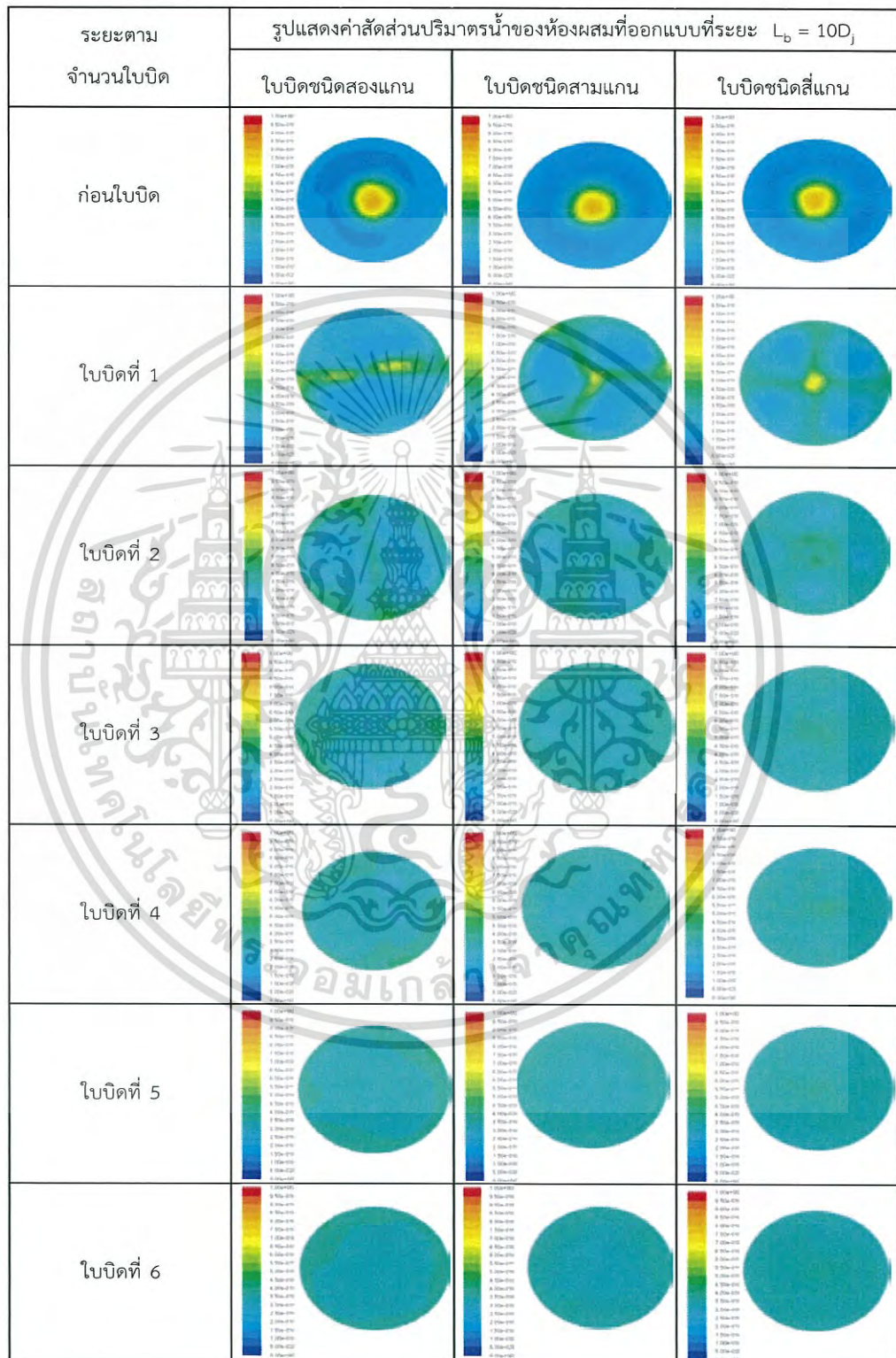
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 (ก) ตารางเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาณน้ำของใบปิดทั้งสามชนิดในแนวตัดขวางของห้องผสมเมื่อติดใบปิดที่ระยะ 5D; (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณน้ำของห้องผสมที่ออกแบบต่อระยะตามจำนวนใบปิด

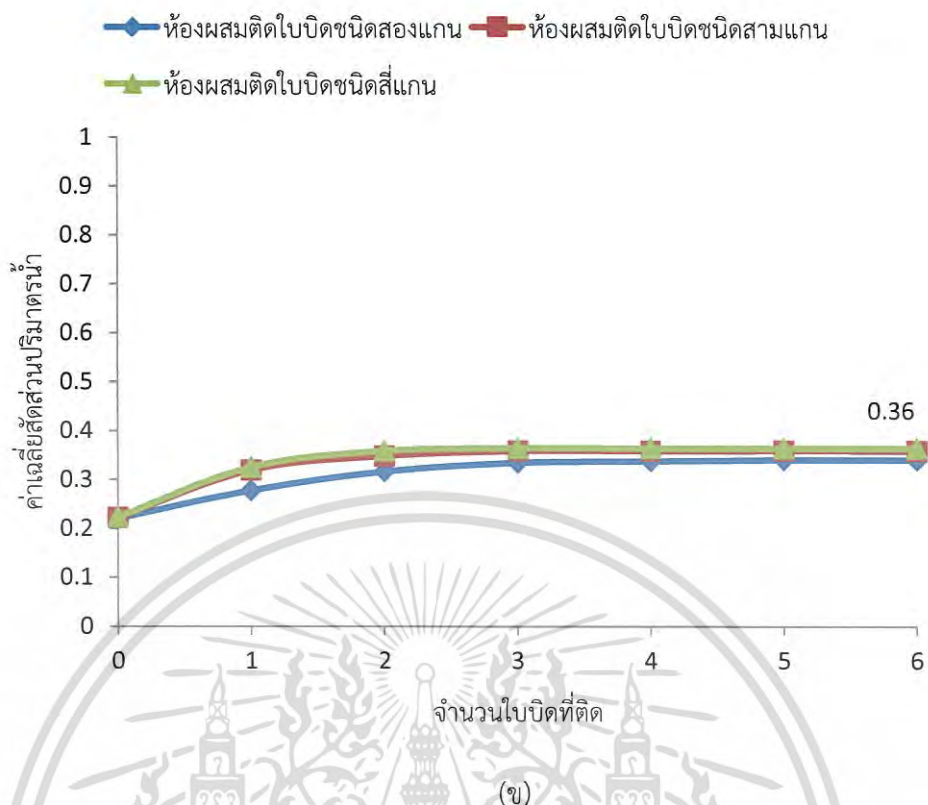
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำโดยแสดงภาพหน้าตัดของห้องผสมที่ออกแบบทั้งสามชนิดที่ระยะเท่ากับระยะเทียบจากตำแหน่งไบบิตที่ตำแหน่งนั้นๆ ที่ระยะไบบิตที่ 1 ห่างจากหัวฉีดเท่ากับ 10D<sub>j</sub> ดังแสดงในรูปที่ 5.6



(ก)

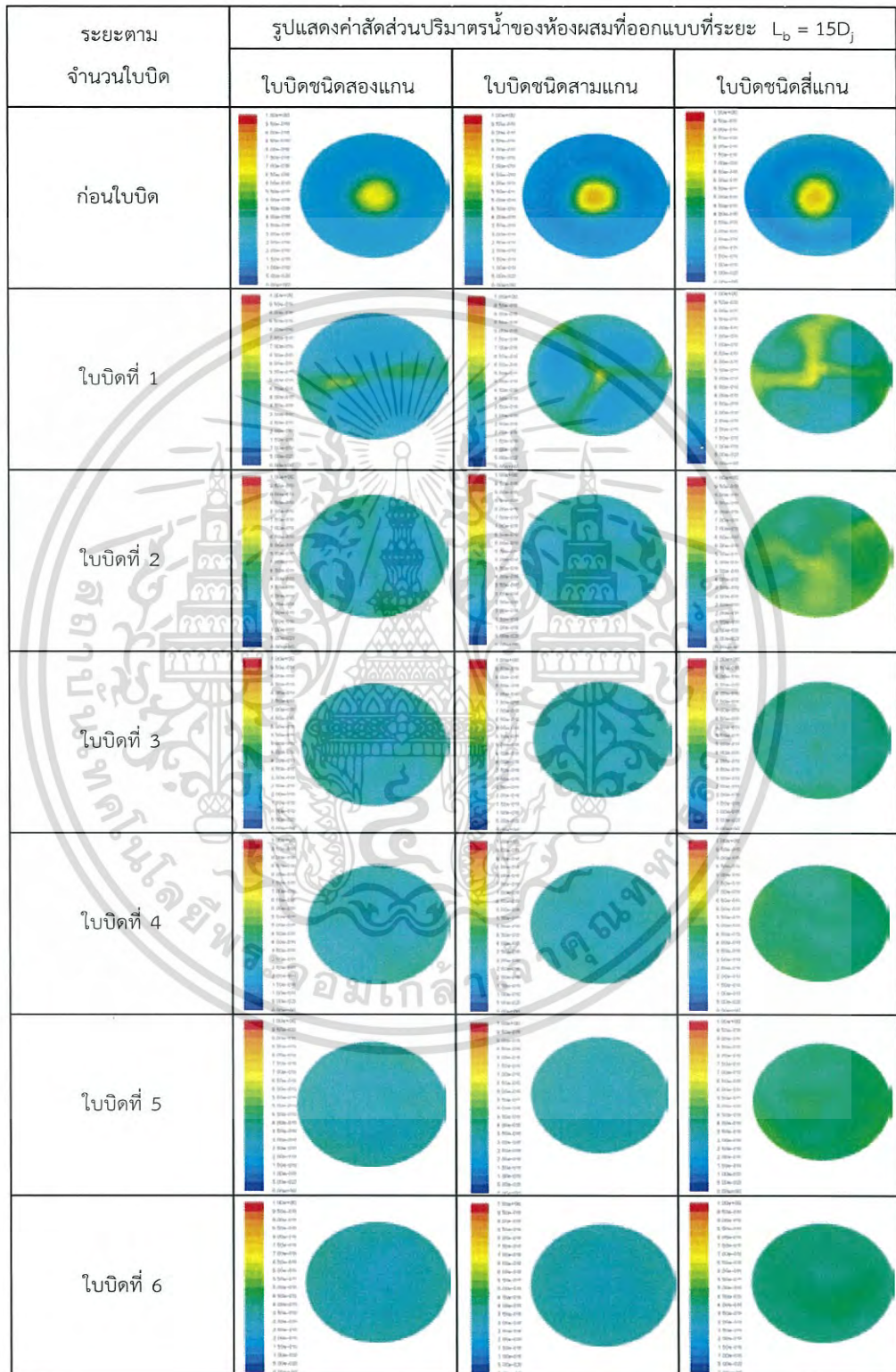
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 (ก) ตารางเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาณน้ำของใบปิดทั้งสามชนิดในแนวตัดขวางของห้องผสมเมื่อติดใบปิดที่ระยะ 10D; (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณน้ำของห้องผสมที่ออกแบบต่อระยะตามจำนวนใบปิด

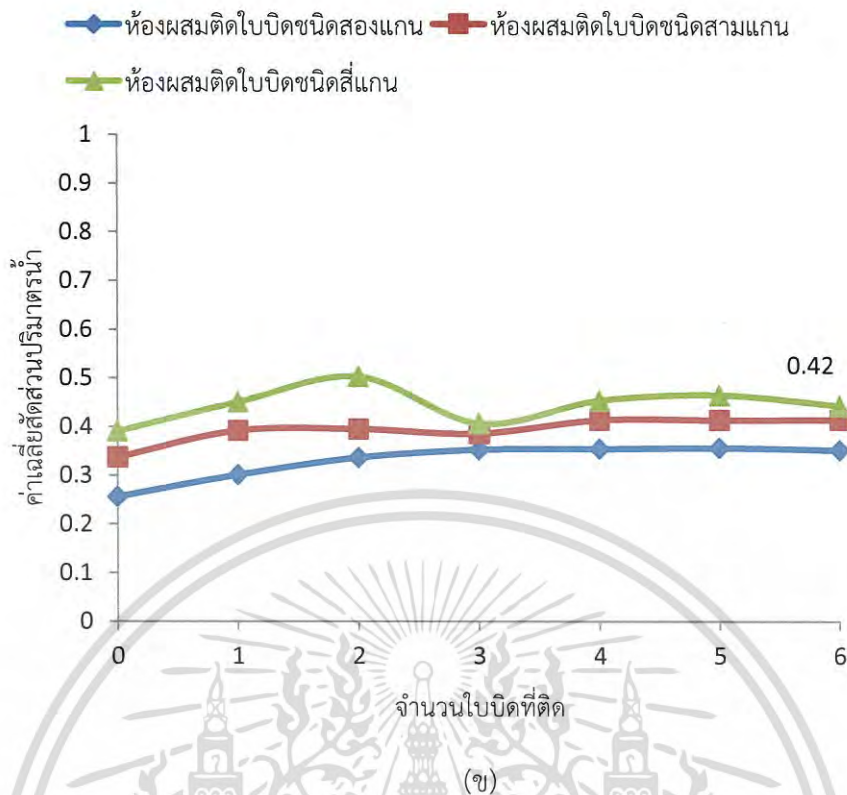
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำโดยแสดงภาพหน้าตัดของห้องผสมที่ออกแบบทั้งสามชนิดที่ระยะเท่ากับระยะเทียบจากตำแหน่งไบบิตที่ตำแหน่งนั้นๆ ที่ระยะไบบิตที่ 1 ห่างจากหัวฉีดเท่ากับ 15D<sub>j</sub> ดังแสดงในรูปที่ 5.7



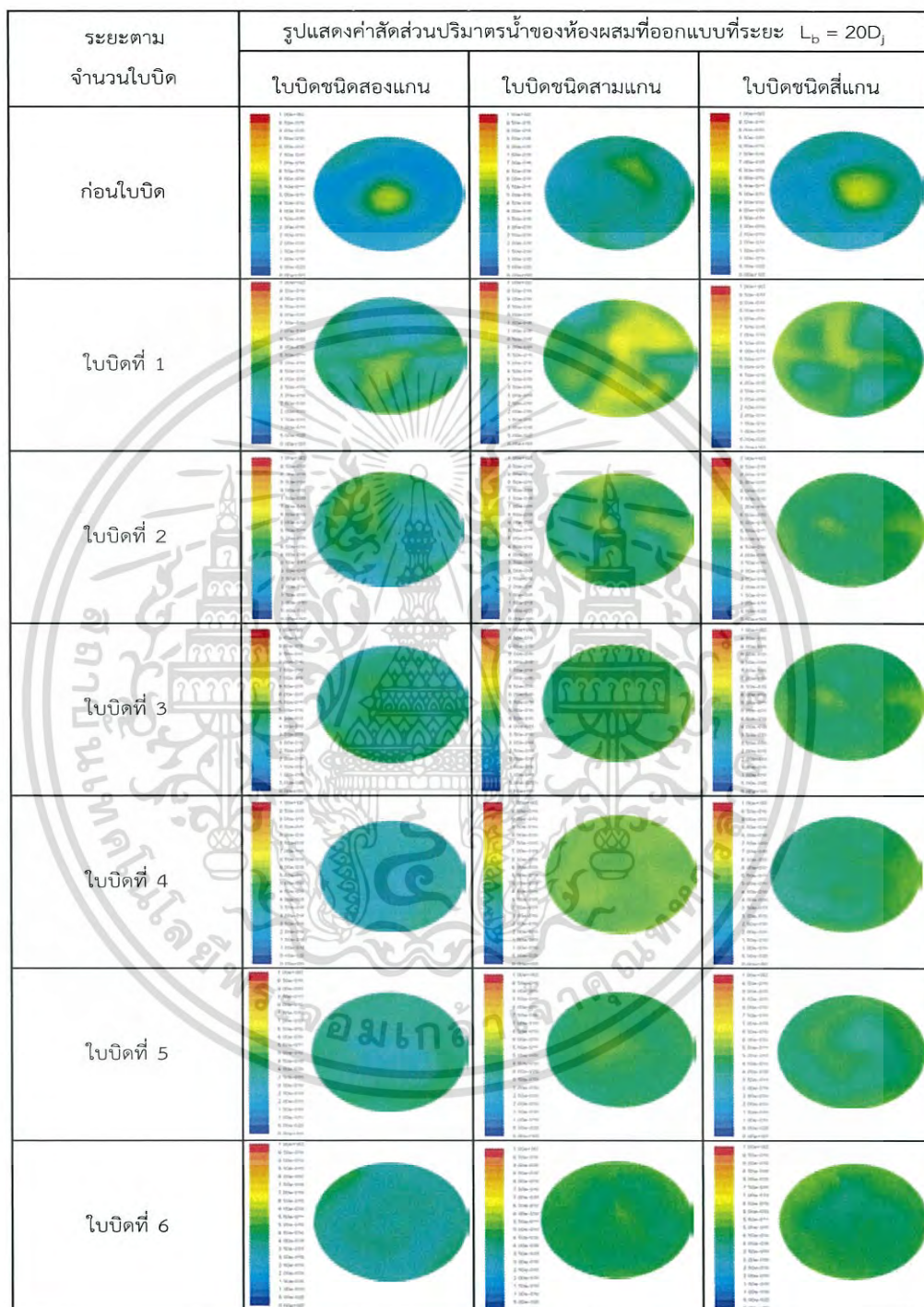
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



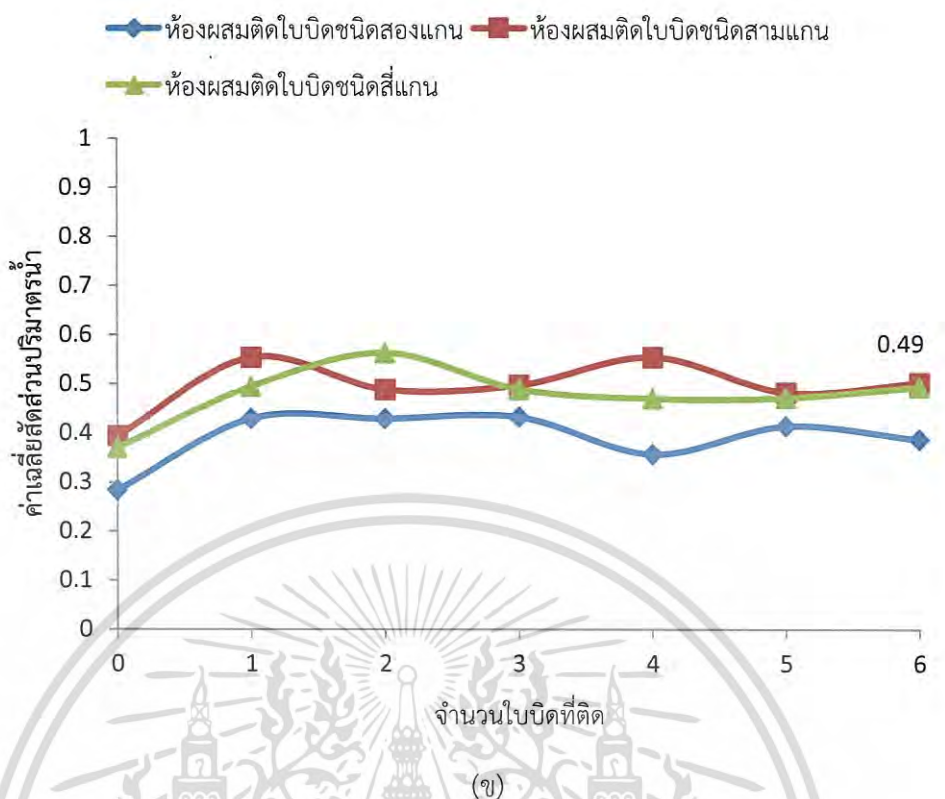
รูปที่ 5.8 (ก) ตารางเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาณน้ำของใบปิดทั้งสามชนิดในแนวตัดขวางของห้องผสมเมื่อติดใบปิดที่ระยะ 15D; (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณน้ำของห้องผสมที่ออกแบบต่อระยะตามจำนวนใบปิด

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำโดยแสดงภาพหน้าตัดของห้องผสมที่ออกแบบทั้งสามชนิดที่ระยะเท่ากับระยะเทียบจากตำแหน่งใบพัดที่ตำแหน่งนั้นๆ ที่ระยะใบพัดที่ 1 ห่างจากหัวฉีดเท่ากับ 20D<sub>j</sub> ดังแสดงในรูปที่ 5.8



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

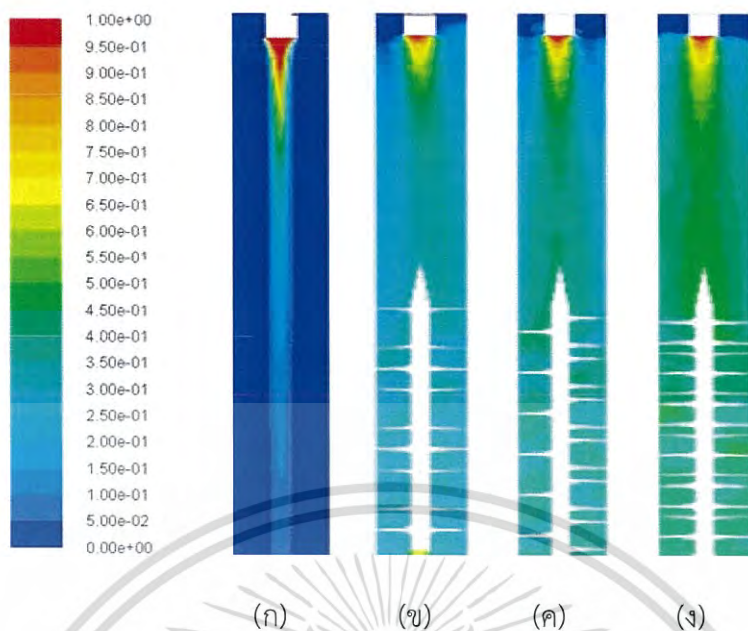


รูปที่ 5.9 (ก) ตารางเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของโอบิตทั้งสามชนิดในแนวตัดขวางของห้องผสมเมื่อติดโอบิตที่ระยะ  $20D_j$  (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ออกแบบต่อระยะตามจำนวนโอบิต

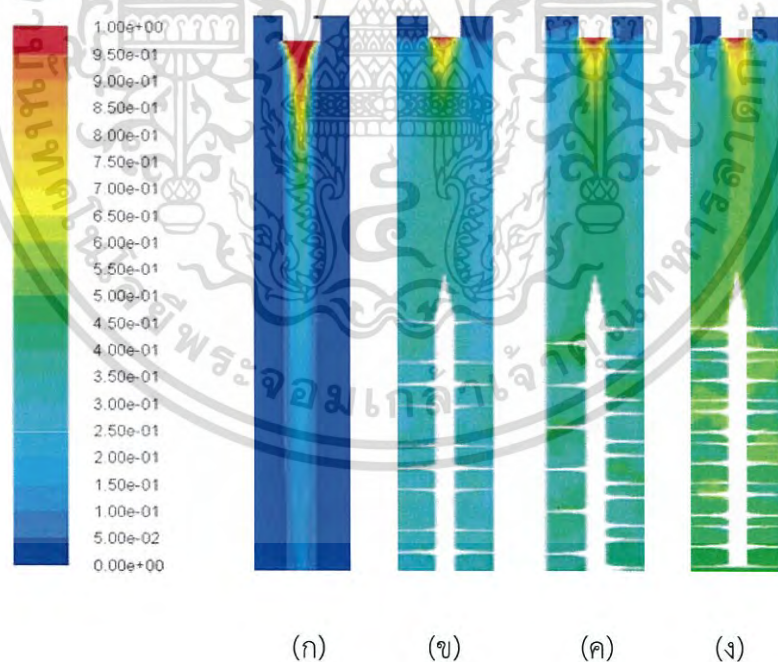
จากการจำลองขึ้นต้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการติดโอบิตห่างจากปลายหัวฉีดเป็นระยะเท่ากับ  $20D_j$  พบว่าค่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำมีค่าใกล้เคียงค่า 0.5 มากที่สุดโดยใช้จำนวนโอบิตที่เหมาะสมคือ 6 โอบิต เมื่อได้ระยะห่างที่เหมาะสมในการติดโอบิตทั้งสามชนิดจึงทำการจำลองขึ้นงานจริงของโอบิตที่ออกแบบโดยมีการพิจารณาถึงความแข็งแรงของโครงสร้างโอบิตจึงมีการเพิ่มแกนกลางในการยึดโอบิตและในส่วนของด้านบนในทุกโอบิตได้ทำการออกแบบให้เป็นในลักษณะกรวยคว่ำเพื่อลดภาระของโอบิตในการโดนน้ำความเร็วสูงกระทบตัวโอบิต โดยตัวแกนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรและโอบิตในทุกการออกแบบมีความหนาใบที่ 1 มิลลิเมตร รูปทรงกรวยคว่ำด้านบนมีความสูง 20 มิลลิเมตร

5.1.2 ผลจากการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำตามระยะความยาวของห้องผสม ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่ออนาที

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ไม่ติดโอบิตและห้องผสมติดโอบิตที่ทำการออกแบบโดยการจำลองอัตราไหลของน้ำที่ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่ออนาที แสดงในรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.13 ตามลำดับ

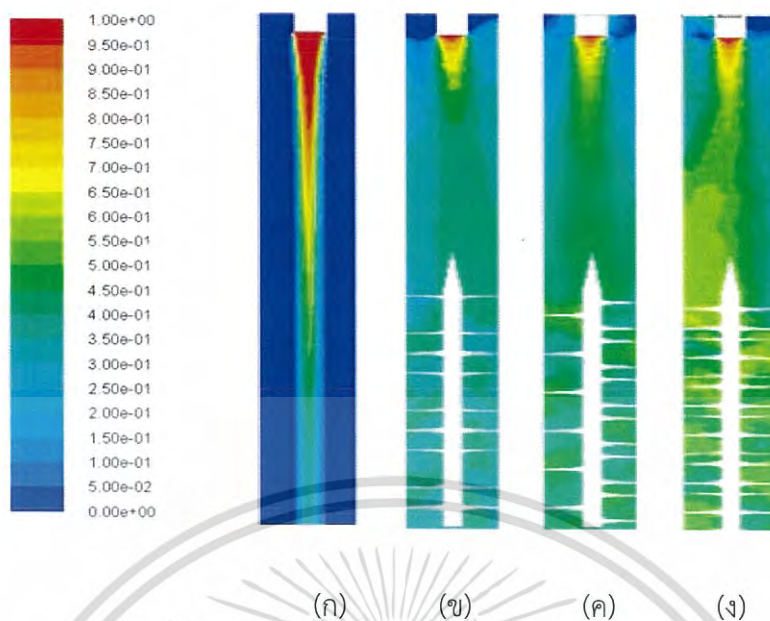


รูปที่ 5.10 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาณน้ำของใบปิดที่ใช้ทดลองจริงที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อนาที เมื่อ (ก) ห้องผสมไม่ติดใบปิด (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดสามแกน (ง) ห้องผสมที่ติดใบปิดสี่แกน

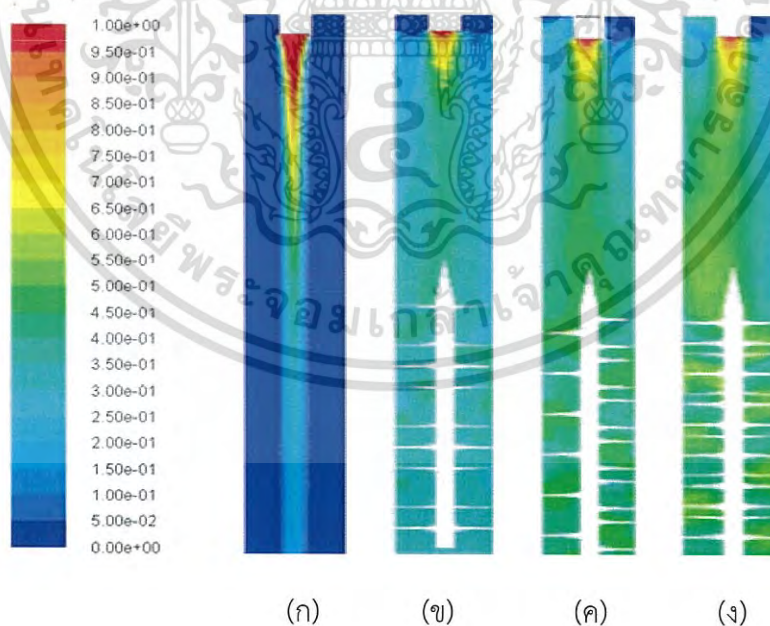


รูปที่ 5.11 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาณน้ำของใบปิดที่ใช้ทดลองจริงที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อนาที เมื่อ (ก) ห้องผสมไม่ติดใบปิด (ข) ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน (ค) ห้องผสมติดใบปิดสามแกน (ง) ห้องผสมที่ติดใบปิดสี่แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำของไบบิตที่ใช้ทดลองจริงที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อนาที เมื่อ (ก) ห้องผสมไม่ติดไบบิต (ข) ห้องผสมติดไบบิตชนิดสองแกน (ค) ห้องผสมติดไบบิตสามแกน (ง) ห้องผสมที่ติดไบบิตสี่แกน

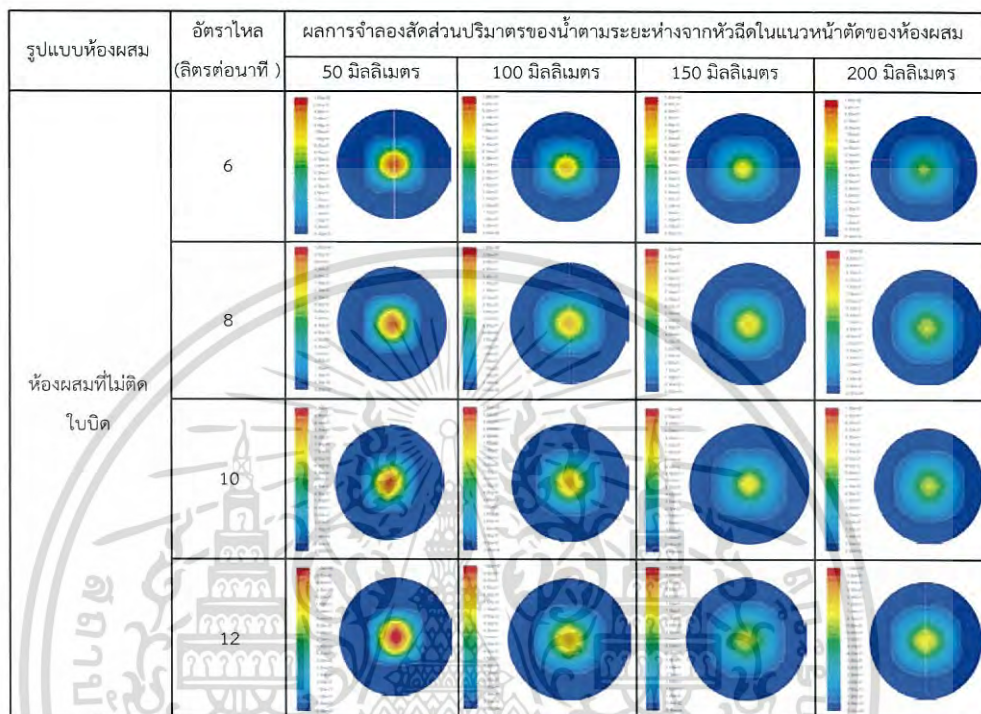


รูปที่ 5.13 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำของไบบิตที่ใช้ทดลองจริงที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อนาที เมื่อ (ก) ห้องผสมไม่ติดไบบิต (ข) ห้องผสมติดไบบิตชนิดสองแกน (ค) ห้องผสมติดไบบิตสามแกน (ง) ห้องผสมที่ติดไบบิตสี่แกน

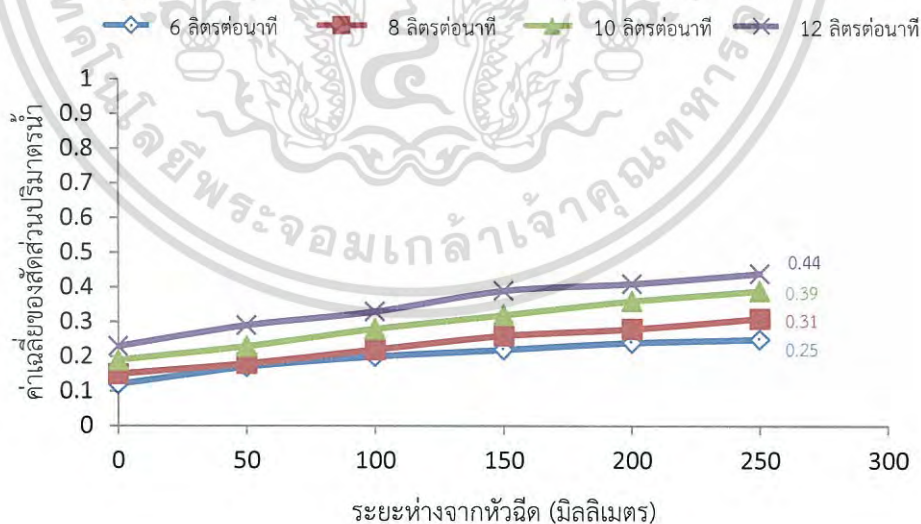
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลจากการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของห้องผสมของห้องผสมโดยวัดตามระยะห่างจากหัวฉีด ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ผลการจำลองสภาพหน้าตัดซึ่งแสดงในรูปสัดส่วนปริมาตรของน้ำของห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด โดยวัดจากหัวฉีดทุก 50 มิลลิเมตรในช่วงอัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 5.13



(ก)

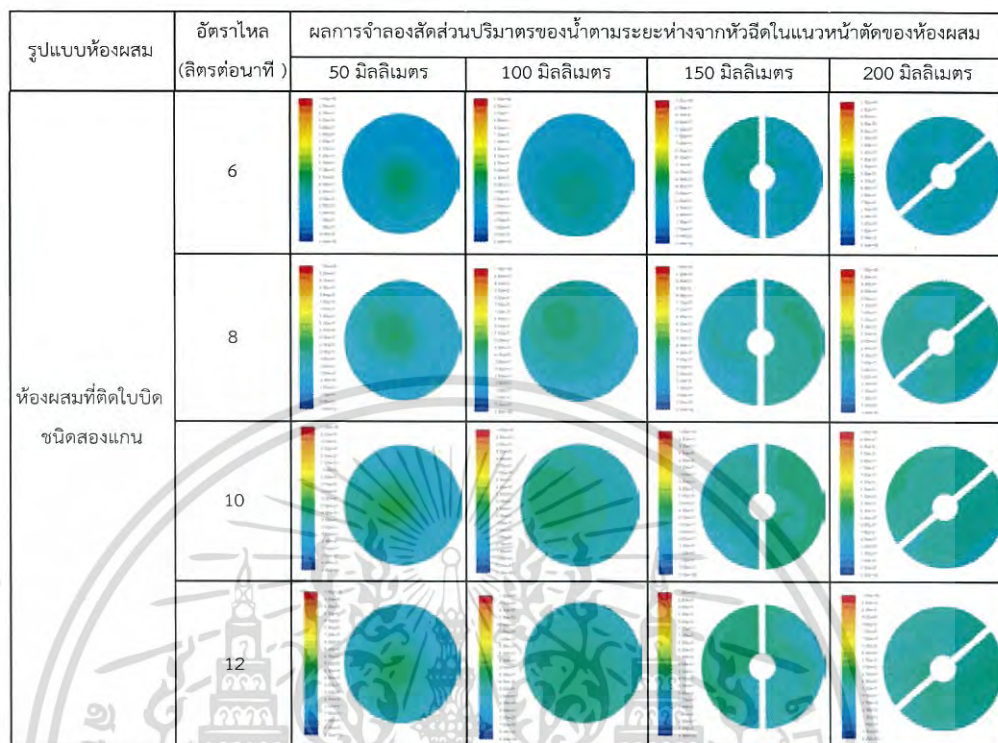


(ข)

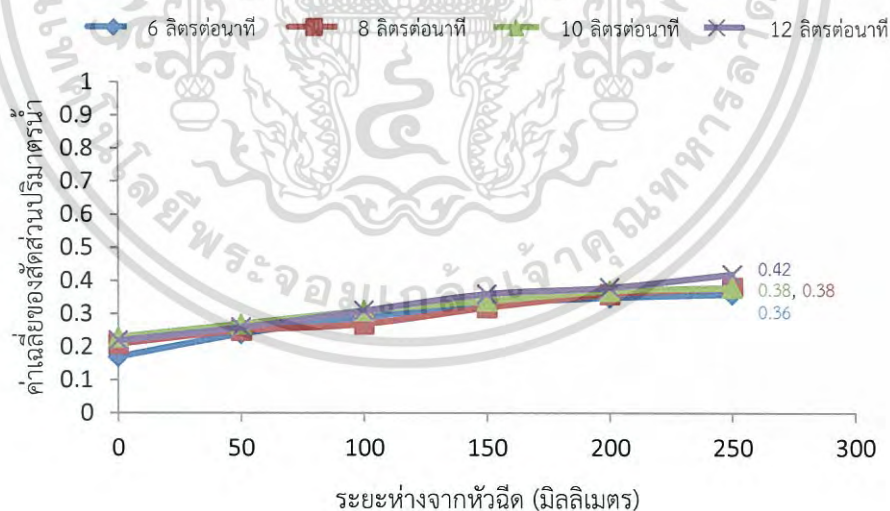
รูปที่ 5.14 (ก) รูปแสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด (ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสม ในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองสภาพหน้าตัดซึ่งแสดงในรูปสัดส่วนปริมาตรของน้ำของห้องผสมที่ติดใบพัดชนิดสองแกนโดยวัดจากหัวฉีดยุติทุก 50 มิลลิเมตรในช่วงอัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที



(ก)

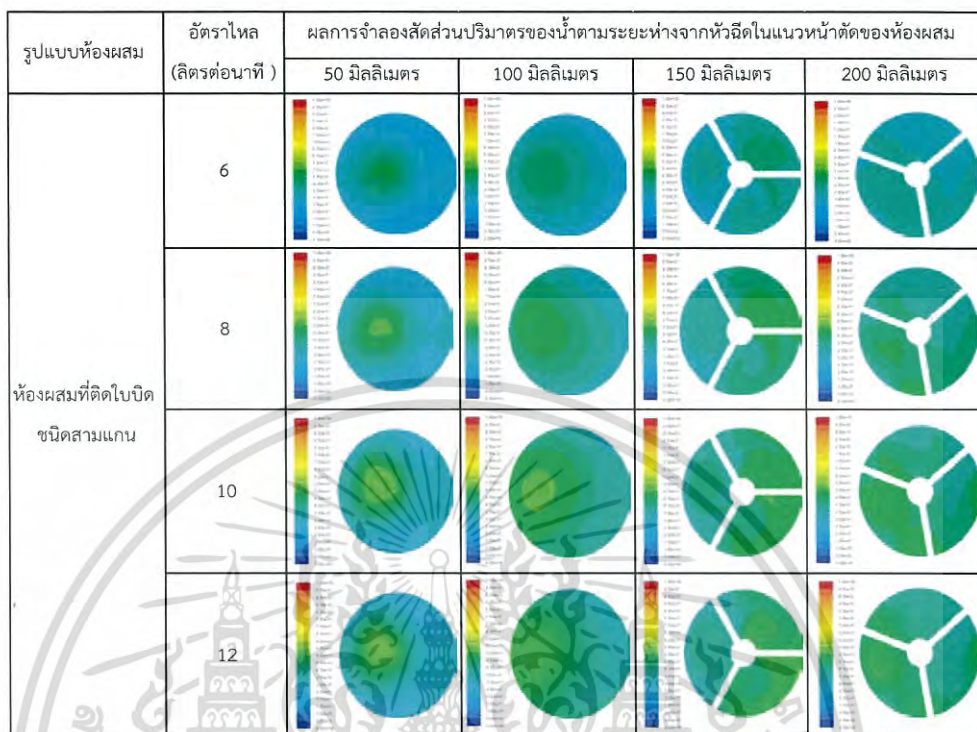


(ข)

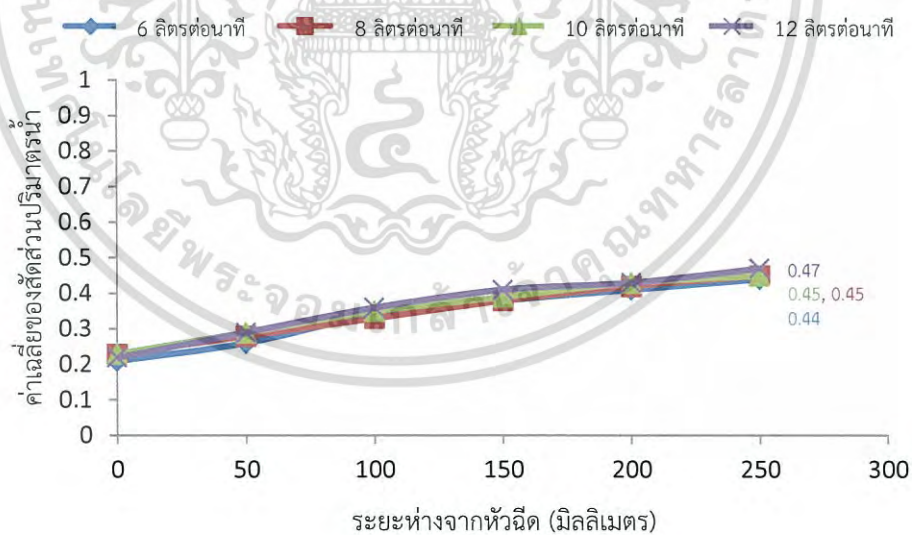
รูปที่ 5.15 (ก) รูปแสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ติดใบพัดชนิดสองแกน  
(ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสม ในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจาก หัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองสภาพหน้าตัดซึ่งแสดงในรูปสัดส่วนปริมาตรของน้ำของห้องผสมที่ติดไปปิดชนิดสามแกนโดยวัดจากหัวฉีดทุก 50 มิลลิเมตรในช่วงอัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที



(ก)

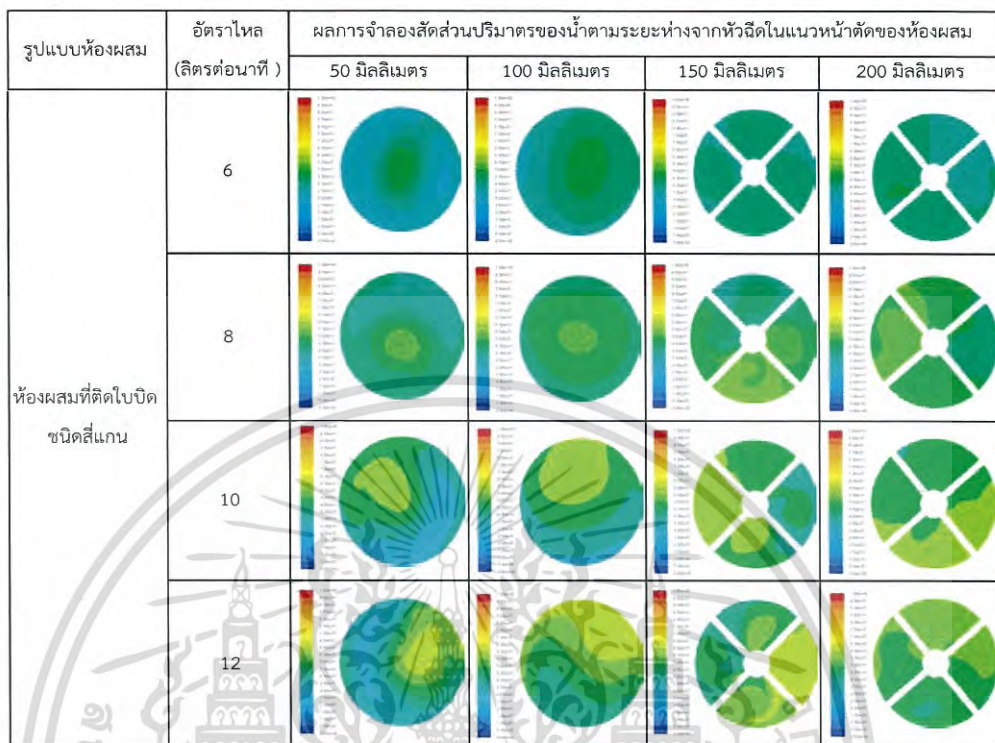


(ข)

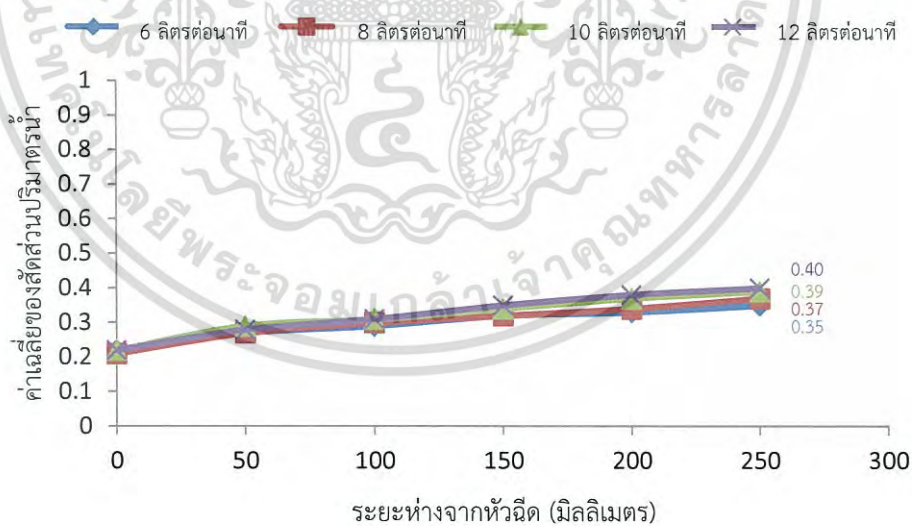
รูปที่ 5.16 (ก) รูปแสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ติดไปปิดชนิดสามแกน  
(ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสม ในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจาก หัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองสภาพหน้าตัดซึ่งแสดงในรูปสัดส่วนปริมาตรของน้ำของห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสี่แกนโดยวัดจากหัวฉีดทุก 50 มิลลิเมตรในช่วงอัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที



(ก)



(ข)

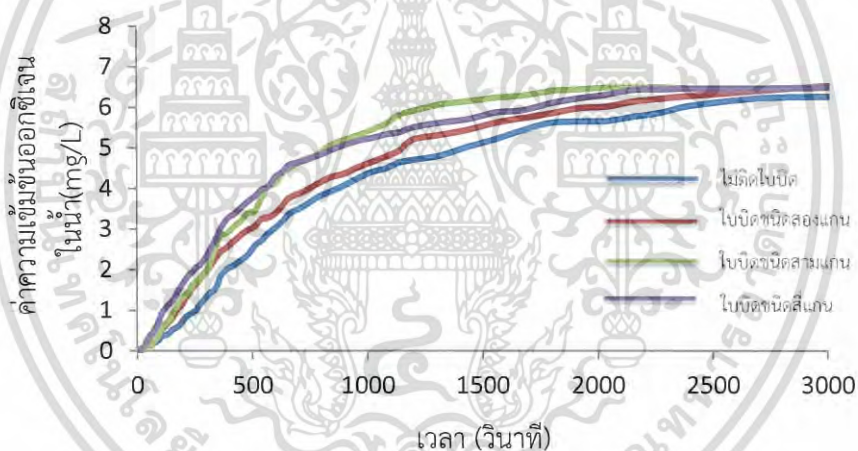
รูปที่ 5.17 (ก) รูปแสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสี่แกน  
(ข) กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสม ในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจาก หัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำพบว่าในทุกค่าอัตราไหลของน้ำ ห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด มีบริเวณที่น้ำสัมผัสกับอากาศที่น้อยกว่าแบบห้องผสมที่ออกแบบแต่มีแนวโน้มพื้นที่สัมผัสกับอากาศเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราไหลของน้ำเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของอัตราไหลของน้ำที่ 6 และ 8 ลิตรต่อนาที ห้องผสมที่ติดใบปิดทั้งสามแบบมีแนวโน้มการแลกเปลี่ยนมวลที่ดีกว่าห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด เมื่ออัตราไหลของน้ำมีค่า 12 ลิตรต่อนาที ห้องผสมชนิดสี่แกนมีแนวโน้มสัดส่วนปริมาตรของอากาศมากกว่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำแสดงถึงมีพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำและอากาศน้อยลงกว่าค่าที่อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที ที่อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาทีนี้ห้องผสมที่ติดใบปิดสามแกนให้การผสมที่ดีที่สุด

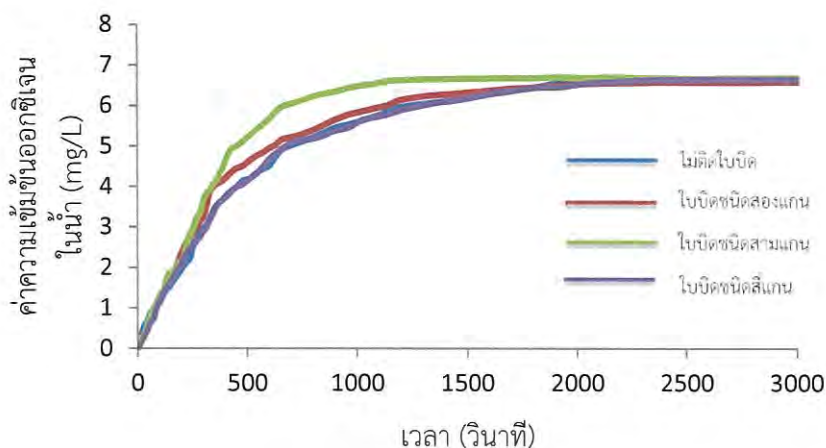
## 5.2 ผลการทดลอง

การทดลองของหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องผสม 18 มิลลิเมตร ความยาวห้องผสม 250 มิลลิเมตร ทำการทดลองกับห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด ห้องผสมติดใบปิดชนิดสองแกน ห้องผสมติดใบปิดชนิดสามแกนและห้องผสมติดใบปิดชนิดสี่แกนเพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการถ่ายโอนออกซิเจน ( $k_La$ ) ที่อัตราไหลของน้ำเท่ากับ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงโดยกราฟค่าความเข้มข้นออกซิเจนในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาในหน่วยวินาที



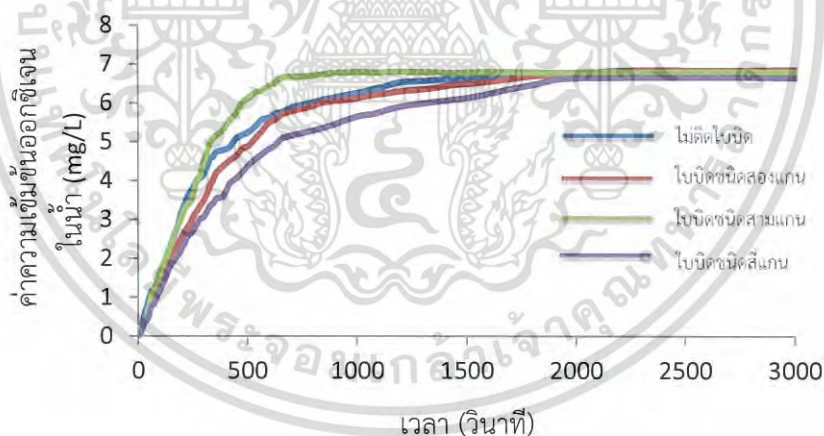
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่อเวลาของห้องผสมที่ออกแบบที่อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที

กราฟในรูปที่ 5.18 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราไหลของน้ำเท่ากับ 6 ลิตรต่อนาทีห้องผสมที่ติดใบปิดทั้งสามแบบให้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำขึ้นสู่ค่าอิ่มตัวได้เร็วกว่าห้องผสมที่ไม่ติดใบปิดซึ่งต้องใช้เวลารวมถึง 3000 วินาที โดยใบปิดชนิดสามแกนและใบปิดชนิดสองแกนให้ค่าการผสมที่ดีกว่าแบบใบปิดสี่แกน คือใช้เวลา 2000 , 2400 และ 2700 วินาทีตามลำดับ



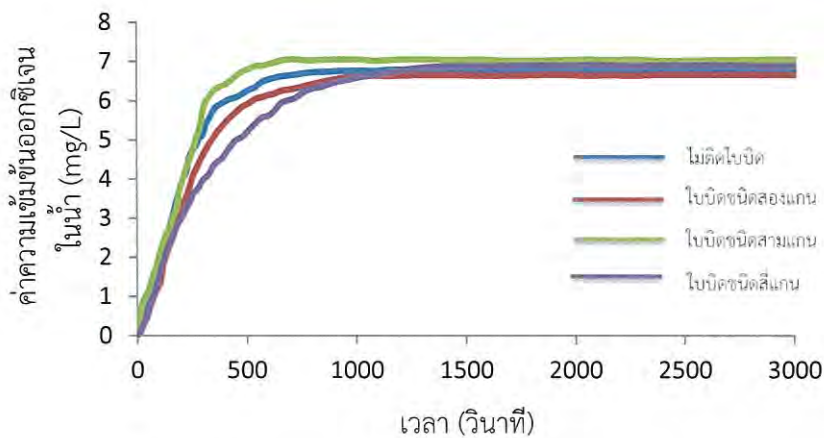
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่อเวลาของห้องผสมที่ออกแบบที่อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที

กราฟในรูปที่ 5.19 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราไหลของน้ำ 8 ลิตรต่อนาที ห้องผสมที่ไม่ติดใบพัดเริ่มมีประสิทธิภาพแลกเปลี่ยนมวลที่ดีขึ้นเพราะใช้เวลาที่ทำให้ค่าความเข้มข้นออกซิเจนถึงจุดอิ่มตัวคือ 2280 วินาทีซึ่งเร็วกว่าที่อัตราไหลของน้ำเป็น 6 ลิตรต่อนาที ในส่วนของการติดใบพัดที่ออกแบบพบว่าใบพัดสามแกนยังคงให้การผสมที่ดีที่สุดคือใช้เวลาถึงจุดอิ่มตัว 1440 หากแต่ใบพัดชนิดสองแกนและสี่แกนให้ค่าการผสมที่ลดลงกว่าเดิม คือใช้เวลา 2400 วินาทีทั้งสองแบบ



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่อเวลาของห้องผสมที่ออกแบบที่อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที

กราฟในรูปที่ 5.20 สามารถทำให้เห็นได้ว่า ห้องผสมชนิดสามแกนยังคงให้ค่าการผสมที่ดีที่สุด โดยใช้เวลา 1440 วินาทีในการทำให้ค่าความเข้มข้นถึงจุดอิ่มตัว รองลงมาคือห้องผสมที่ไม่ติดใบพัดซึ่งใช้เวลา 1800 วินาที ห้องผสมชนิดสองแกน 2160 วินาที และแบบใบพัดสี่ทางให้การผสมน้อยที่สุดโดยใช้เวลาถึง 2280 วินาทีถึงจุดอิ่มตัว



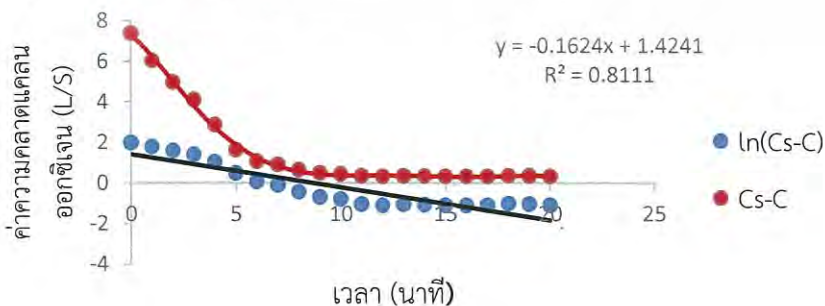
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นออกซิเจนต่อเวลาของห้องผสมที่ออกแบบที่อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที

กราฟในรูปที่ 5.21 พบว่าห้องผสมติดใบปิดชนิดสามแกนใช้เวลาถึงจุดอิ่มตัวน้อยที่สุดคือ 660 วินาที ห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด 960 วินาที ห้องผสมติดใบปิดสองแกน 1080 วินาที และห้องผสมติดใบปิดชนิดสี่แกนให้การผสมที่น้อยที่สุด คือใช้เวลาถึง 1440 วินาที

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ห้องผสมที่ไม่ติดใบปิดที่ความเร็วต่ำจะให้การผสมที่น้อยกว่าแบบห้องผสมที่ติดใบปิด แต่เมื่อเพิ่มอัตราไหลของน้ำที่มากขึ้นพบว่าห้องผสมแบบไม่ติดใบปิดจะให้การผสมที่ดีขึ้น ในส่วนของการติดใบปิดพบว่า ห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสามแกนให้ค่าการผสมที่ดีที่สุดในทุกๆอัตราไหลที่ทำการทดลอง ห้องผสมชนิดสองทางให้การผสมที่ดีเฉพาะที่อัตราไหลของน้ำเป็น 6 และ 8 ลิตรต่อนาที ในส่วนห้องผสมที่ติดใบปิดสี่ทางนั้นให้การผสมที่ดีเฉพาะที่ความเร็วต่ำ หากเพิ่มอัตราไหลของน้ำขึ้น การผสมของแบบติดใบปิดสี่ทางจะให้ค่าน้อยลงอย่างชัดเจน

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน ( $k_La$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนของการทดลองห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสามแกนที่อัตราไหลของน้ำเท่ากับ 12 ลิตรต่อนาที กราฟในรูป 5.20 สามารถนำมาใช้วาดกราฟค่าความคลาดเคลื่อนค่าความเข้มข้นออกซิเจนซึ่งหาได้มาจากค่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวของการทดลองลบการค่าความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ( $C_s - C$ ) ซึ่งจะได้กราฟในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนออกซิเจนในหน่วยลิตรต่อวินาทีกับเวลาในหน่วยวินาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะค่าความคลาดเคลื่อนออกซิเจนจะมีค่าลดลงในลักษณะของฟังก์ชันลอการิทึม เมื่อเราวาดกราฟ semi-log ซึ่งแสดงแทนด้วยจุดสี่ฟ้าในรูปที่ 5.22 จะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนมีค่าเท่ากับค่าความชันของกราฟ semi-log ดังกล่าว ดังนั้นจึงได้ว่าค่า  $k_L a$  มีค่าเท่ากับ 0.1624 ต่อ นาที ซึ่งเท่ากับ 9.74 ต่อชั่วโมง

### การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน ( $k_L a$ )

ทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนที่อุณหภูมิทดลอง  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นที่ค่ามาตรฐาน (ASCE standard , 1992) ซึ่งใช้ค่าอุณหภูมิที่  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$k_L a_{20} = \frac{k_L a_{30}}{1.024^{30-20}}$$

$$k_L a_{20} = \frac{9.74}{1.024^{10}} = 7.68 \text{ ต่อชั่วโมง}$$

ประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศสามารถหาได้จากสูตร ;

$$AE_T = \frac{(k_L a)_{20} \times C_{s20} \times V}{P} \times 100$$

เมื่อวัดกำลังที่ใช้ขับปั๊มได้ 324.16 kW และปริมาตรของน้ำเท่ากับ 45 ลิตรซึ่งเท่ากับ 0.045 ลูกบาศก์เมตรและค่าความเข้มข้นที่ออกซิเจนที่ค่าอุณหภูมิมาตรฐานมีค่าอิมิตัวเท่ากับ 9.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจะได้

$$AE_T = \frac{7.68 \times 9.09 \times 0.045}{324.16} \times 100 = 0.97 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kW} * \text{hr}}$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนและประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศรวมถึงข้อมูลที่ค่าอิมิตัวของห้องผสมชนิดต่างๆได้แสดงดังตารางที่ 1

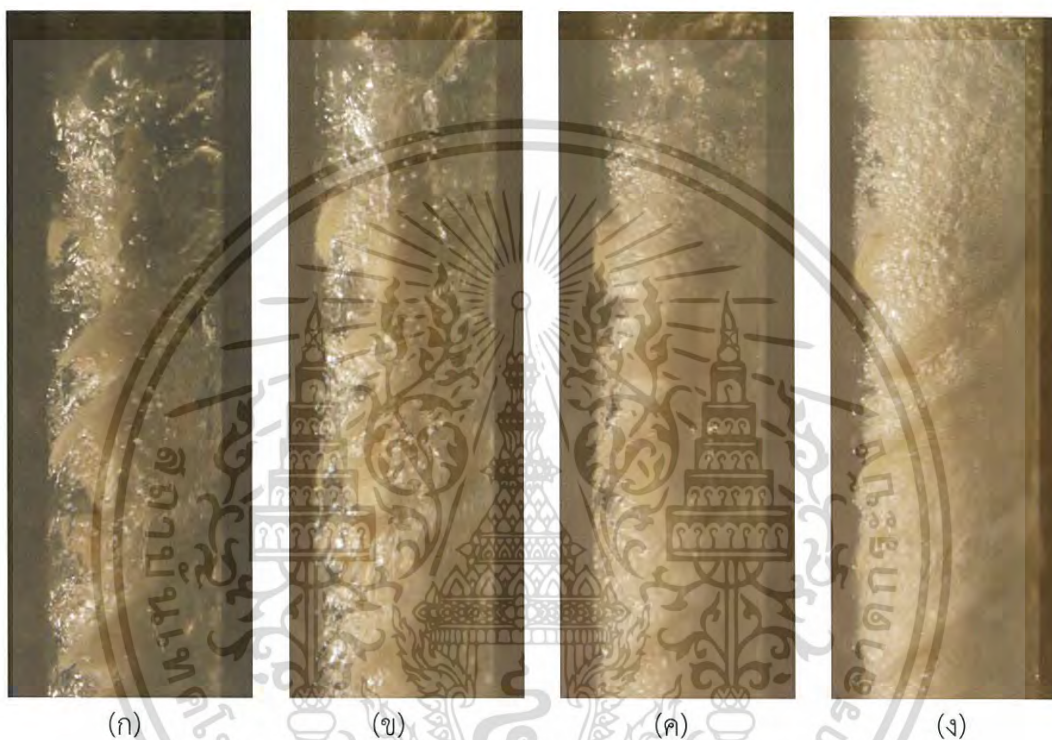
ชนิดห้องผสม	อัตราไหล (LPM)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจนที่จุดอิมิตัว (mg/L)	เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ค่าความเข้มข้นอิมิตัว (s)	$k_L a$ (per hour)	$AE_T$ ( $kgO_2/kW hr$ )
ห้องผสมที่ไม่ติดใบพัด	6	6.28	3000	2.14	0.21
	8	6.61	2280	3.57	0.36
	10	6.78	1800	4.68	0.47
	12	6.81	960	7.72	0.77
ห้องผสมที่ติดใบพัดสองแกน	6	6.53	2400	2.36	0.24
	8	6.59	2400	3.32	0.33
	10	6.85	2160	4.47	0.45
	12	6.66	1320	7.19	0.72
ห้องผสมที่ติดใบพัดสามแกน	6	6.53	2000	2.45	0.24
	8	6.65	1440	3.55	0.35
	10	6.81	1440	4.76	0.47
	12	7.06	660	9.74	0.97
ห้องผสมที่ติดใบพัดสี่แกน	6	6.52	2700	2.19	0.22
	8	6.65	2400	3.46	0.34
	10	6.67	2280	3.89	0.39
	12	6.91	1560	6.75	0.67

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลจุดอิมิตัวของค่าความเข้มข้นอิมิตัวออกซิเจนในน้ำ, เวลาในการเข้าสู่ค่าอิมิตัว, ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน และประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายภาพฟองอากาศเพื่อดูขนาดฟองอากาศ เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการดูการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างน้ำกับอากาศ โดยขนาดฟองอากาศที่เล็กที่จำนวนมากหมายถึงการมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศนั้นมีมากทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการถ่ายโอนมวลสูง ในทางกลับกันหากฟองมีขนาดใหญ่และมีจำนวนไม่มากก็จะมีโอกาสแลกเปลี่ยนมวลได้น้อยลง

ภาพถ่ายเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศของห้องผสมที่ติดใบพัดสองแกนที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูป 5.22 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ



รูป 5.23 ภาพถ่ายแสดงรูปร่างของฟองอากาศที่เกิดขึ้นของห้องผสมที่ติดใบพัดชนิดสองแกน เมื่อ (ก) อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที (ข) อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที (ค) อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที (ง) อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที

จากภาพถ่ายแสดงให้เห็นถึงขนาดของฟองอากาศของห้องผสมที่ติดใบพัดชนิดสองแกนที่ความเร็วต่ำจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่และมีจำนวนไม่มาก ซึ่งอาจเกิดจากรูปร่างที่ซับซ้อนน้อยที่สุดที่ออกแบบทำให้ผิวของฟองอากาศสัมผัสกับน้ำได้น้อยลงเพราะตัวฟองมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เมื่อเพิ่มอัตราไหลที่สูงขึ้นขนาดของฟองจะมีการเพิ่มจำนวนและมีขนาดฟองที่เล็กลงอย่างชัดเจน

ภาพถ่ายเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศของห้องผสมที่ติดไบปิดสามแกนที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูป 5.23 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ



(ก)

(ข)

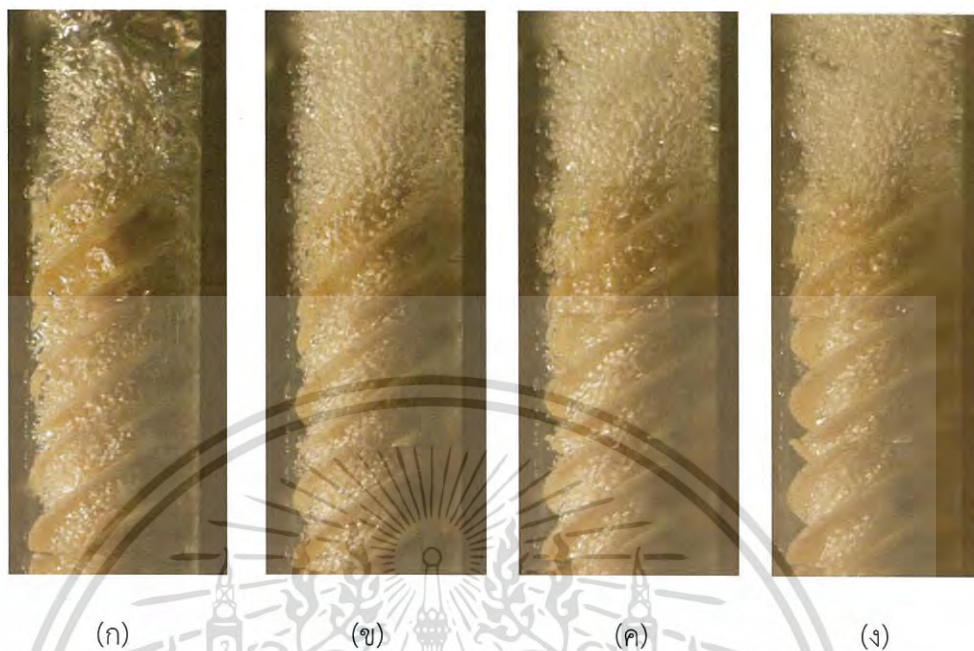
(ค)

(ง)

รูป 5.24 ภาพถ่ายแสดงรูปร่างของฟองอากาศที่เกิดขึ้นของห้องผสมที่ติดไบปิดชนิดสามแกน เมื่อ (ก) อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที (ข) อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที (ค) อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที (ง) อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที

จากภาพถ่ายพบว่าห้องผสมที่ติดไบปิดชนิดสามแกนมีขนาดฟองที่เล็กละเอียดมากตั้งแต่ อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาทีและมีจำนวนค่อนข้างมากกว่าแบบห้องผสมแบบอื่นอย่างชัดเจนจึงสอดคล้องกับผลการจำลองและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจน ที่ให้ผลตรงกันว่าห้องผสมที่ติดไบปิดชนิดสามทางที่อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาทีให้การผสมที่ดีที่สุด

ภาพถ่ายเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศของห้องผสมที่ติดใบปิดสี่แกนที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูป 5.24 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ



รูป 5.25 ภาพถ่ายแสดงรูปร่างของฟองอากาศที่เกิดขึ้นของห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสี่แกน เมื่อ (ก) อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที (ข) อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที (ค) อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที (ง) อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที

จากภาพถ่ายพบว่าห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสี่แกนมีขนาดของฟองอากาศขนาดเล็กละเอียด เช่นเดียวกับห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสามแกน หากแต่มีการรวมตัวกันของฟองที่ปลายของใบปิดทำให้ฟองอากาศเกิดการขังและไหลผ่านตัวใบปิดได้น้อยลง ซึ่งอาจเกิดมาจากรูปร่างของใบปิดที่ซับซ้อนจึงทำให้เกิดการไหลของน้ำและอากาศได้ไม่ดี จึงเป็นผลให้การแลกเปลี่ยนมวลมีค่าน้อยกว่าห้องผสมชนิดอื่นๆ

## สรุปและอภิปรายผลโครงการงาน

จากผลการจำลอง ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการติดใบปิดคือระยะ  $20D_j$  ซึ่งเท่ากับ 120 มิลลิเมตรนับจากหัวฉีดห้องผสม และที่ระยะนี้ ห้องผสมที่ติดใบปิดมีแนวโน้มค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำเข้าใกล้ค่า 0.5 นั่นคือ มีพื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศที่เพิ่มขึ้นขณะของผสมเคลื่อนที่ผ่านใบปิด ต่อมาเมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะในการผสมของห้องผสมแต่ละแบบที่อัตราไหลของน้ำสี่ค่า จากผลการจำลองพบว่า ห้องผสมติดใบปิดชนิดสามแกน ที่อัตราไหลของน้ำ 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ให้การผสมที่ดีที่สุด

เมื่อทำการทดลองโดยการใช้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่เปลี่ยนแปลงไปสู่จุดอิ่มตัวต่อเวลาพบว่า ห้องผสมติดใบปิดสามแกนให้การผสมที่ดีที่สุด ที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อนาที ใช้เวลา 660 วินาทีในการขึ้นถึงค่าความเข้มข้นอิ่มตัวที่ 7.06 ค่าวนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนออกซิเจนมีค่า 9.74 ต่อชั่วโมงและมีค่าประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศเท่ากับ 0.97 กิโลกรัมออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับห้องผสมแบบเดิมที่นาย จิรพล และคณะ [1] ได้ทำการศึกษไว้พบว่า ห้องผสมติดใบปิดให้ประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศที่ดีขึ้นกว่าเดิม

สำหรับห้องผสมชนิดอื่นๆพบว่า ห้องผสมที่ติดใบปิดสองแกนและสี่แกนให้ค่าการผสมที่ดีเฉพาะที่อัตราไหลของน้ำต่ำหรือคือที่อัตราไหล 6 ลิตรต่อวินาทีเท่านั้น แต่เมื่ออัตราไหลของน้ำเพิ่มสูงขึ้นห้องผสมดังกล่าวให้ค่าการผสมที่ลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่ห้องผสมที่ไม่ติดใบปิด ให้การผสมที่ไม่ดีที่อัตราไหลของน้ำต่ำ แต่เมื่ออัตราไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ค่าการผสมของน้ำนั้นเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าห้องผสมที่ไม่ติดใบปิดเหมาะสำหรับการใช้น้ำที่มีอัตราไหลค่อนข้างสูงและห้องผสมที่ติดใบปิดเหมาะสำหรับน้ำที่มีอัตราไหลต่ำ

เมื่อพิจารณาด้วยภาพถ่ายฟองอากาศจะเห็นได้ว่า ห้องผสมที่ติดใบปิดสองแกน ให้ขนาดฟองที่ใหญ่จำนวนไม่มาก นั่นหมายถึงมีการแยกไหลกันอย่างชัดเจน ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง ห้องผสมที่ติดใบปิดชนิดสามแกน จะให้ฟองขนาดเล็กและจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากที่สุด และห้องผสมที่ติดใบปิดสี่แกนจะให้ขนาดฟองที่เล็กเช่นเดียวกับแบบสามแกน แต่เนื่องด้วยรูปร่างที่ซับซ้อนทำให้ฟองอากาศเกิดการสะสมบริเวณด้านบนจึงเป็นสาเหตุที่พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศลดลง จึงสอดคล้องกับผลการจำลองและค่าการผสมที่คำนวณได้ในข้างต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] จีรพล เนียมพินิจสกุล, ณัฐพล พาโคกทม และพนา สุขเจริญ (2556). รายงานการวิจัยเรื่อง อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวนำไปใช้ในการผสมแก๊สและของเหลว, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ชัยธวัช บุญถาวร, ธนาคาร จาดเปรม และนนทคุณ หอศิลาชัย (2557). รายงานการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการวางตัวมิติและรูปแบบการวางตัวของชุดหัวฉีดเหนียวนำไปส่งผลต่ออัตราการเหนียวนำอากาศเข้ามาในถังผสม, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Shahbaz Khalid and Amit Kumar. (2014). Evaluation of models for predicting water jet flow, Department of aerospace engineering, IIT Madras, Chennai August 2014.
- [4] Francesco Arleo. (2010). Numerical simulation of a pure water jet inside an orifice: jet stability and effects of droplets collisions, Department of Mechanical Engineering, San Sebastian – Milano, pp. 53-54 .
- [5] R.K. Thakur, Ch. Vial, D.P. Nigam, E.B. Nauman and G. Djelveh. (2003). Static mixers in the process industries- a review. Chemical Engineering Research and Design, pp. 826-878.
- [6] Etchells AW, Meyer CF. (2004). Mixing in pipelines in Handbook of Industrial Mixing Science and Practice, pp. 391-477.
- [7] Swapna Rabha, Markus Schubert, Fanny Grugel, Manuel Banowski, Uwe Hampel. (2014). Visualization and quantitative analysis of dispersive mixing by a helical static mixer in upward co-current gas-liquid flow.
- [8] N.R. Schott, B. Weinstein, D. Labombard. (1975). Motionless mixer in plastic processing, pp. 54-58.
- [9] Cybulski, A & Werner, K. (1986). Static mixers-criteria for applications and selection. International Chemical Engineering, pp. 171-180.
- [10] A.Heyouni, M. Roustan, Z. Do-Quang. (2001). Hydrodynamics and mass transfer in gas-liquid flow through static mixers.
- [11] กิตติคุณ คำเวียงสา, กฤษณา วงศิริ และธวัชพล ทิพยารมณ (2548). รายงานการวิจัยเรื่อง เครื่องเติมอากาศแบบเหนียวนำอากาศโดยหัวฉีดพ่น, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



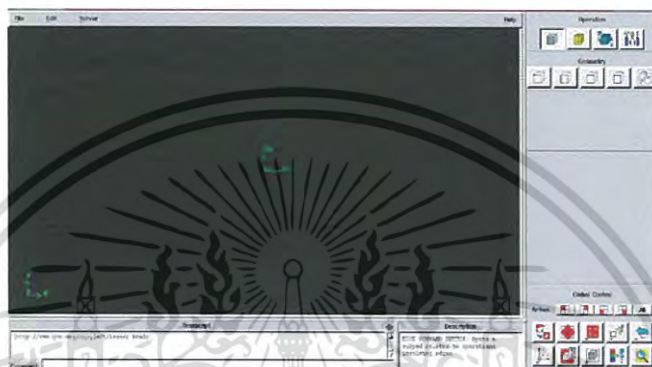
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การสร้างแบบจำลองของหัวฉีดในโปรแกรม GAMBIT และ ANSYS fluent

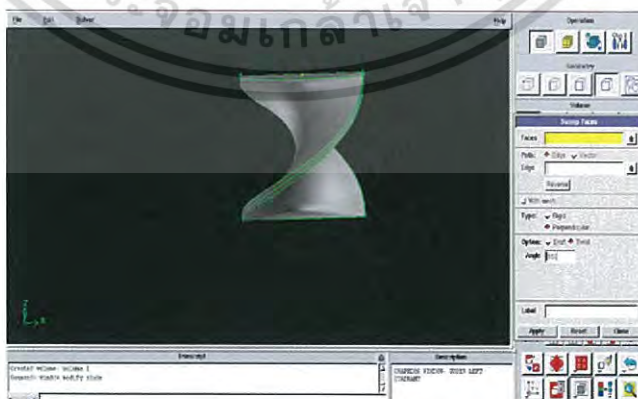
#### ก1. GAMBIT

โปรแกรม GAMBIT เป็นโปรแกรมสำหรับการสร้างแบบจำลอง กำหนดจำนวนขอบเขตย่อยและเงื่อนไขขอบเขต เพื่อเตรียมส่งต่อไปที่โปรแกรม ANSYS fluent เพื่อจำลองการไหลต่อไป



รูปที่ 1.ก หน้าจอเริ่มต้นของโปรแกรม GAMBIT

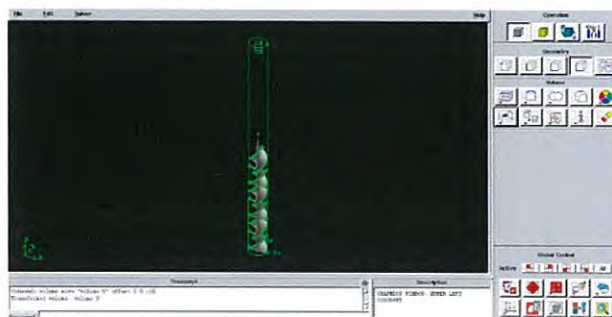
สำหรับการสร้างแบบจำลองห้องผสม เริ่มต้นจากการใช้คำสั่ง Vertex ในการกำหนดจุดสองจุด แล้วใช้คำสั่ง Edge ในการเชื่อมทั้งสองจุดเป็นเส้นตรง จากนั้นใช้คำสั่ง Face ในส่วนของ Rectangle ทำการวาดสี่เหลี่ยม จากนั้นใช้คำสั่ง Circle ในการสร้างวงกลมแล้วใช้คำสั่ง Intersect ระหว่างวงกลมและสี่เหลี่ยม จากนั้นในหมวด Volume ใช้คำสั่ง Sweep faces โดยเลือก Face เป็นรูปที่ทำการ intersect ไปและ edge เลือกเส้นตรงที่วาดไว้ ให้เลือกที่ perpendicular twist  $180^{\circ}$  จะได้เป็นแบบจำลองใบพัดชนิดสองแกน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2.ก การสร้างแบบจำลองใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวาดรูปทรงห้องผสมโดยใช้คำสั่ง Cylinder และ Frustum ในการสร้างห้องผสมเปล่า  
แกนกลางของใบปัด และใช้คำสั่ง copy และ rotate ในการวาดแบบจำลองของห้องผสม



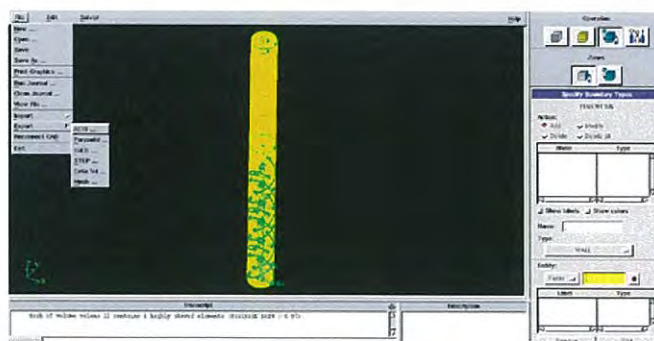
รูปที่ 3.ก การสร้างแบบจำลองห้องผสม

ใช้คำสั่ง Unite ตัวใบปัดและแกนเข้าด้วยกันจากนั้นใช้คำสั่ง Split Volume ระหว่างใบปัด  
กับห้องผสม เริ่มสร้างขอบเขตย่อยโดยการเลือกที่ Mesh Volume ให้เปลี่ยนช่อง elements เป็น  
Tet/Hybrid เลือกค่า spacing ตามความละเอียดที่ต้องการ



รูปที่ 4.ก การสร้างขอบเขตย่อยด้วยโปรแกรม GAMBIT

จากนั้นใช้คำสั่ง Specify Boundary Types เพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต สุดท้ายคือการ  
Export ไปโปรแกรม ANSYS fluent โดยเลือกที่ File > Export > mesh

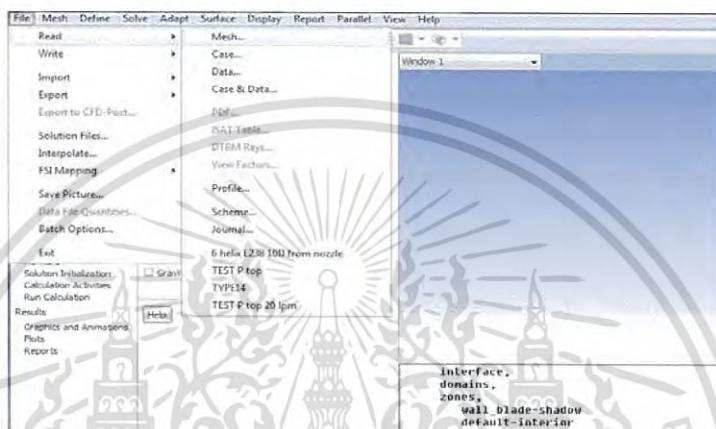


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 5.ก การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยโปรแกรม GAMBIT ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2ก. ANSYS fluent

โปรแกรม ANSYS fluent เป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของการไหลด้วยระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการความต่อเนื่องและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม จำลองค่าปริมาณต่างๆที่สนใจในแต่ละขอบเขตย่อย ซึ่งเมื่อรวมกันแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการไหลนั้นๆ โดยโปรแกรม ANSYS fluent ที่ใช้ทำการจำลองเป็น fluent R15

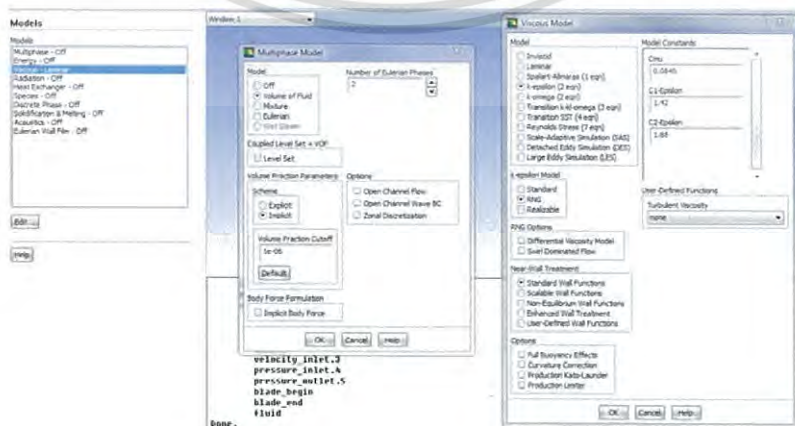
เริ่มต้นการใช้โปรแกรมโดยการเปิดไฟล์นามสกุล mesh ของแบบจำลองที่สร้างจากโปรแกรม GAMBIT ใช้คำสั่ง file > Read > mesh



รูปที่ 6.ก การเปิดไฟล์แบบจำลองจากโปรแกรม GAMBIT

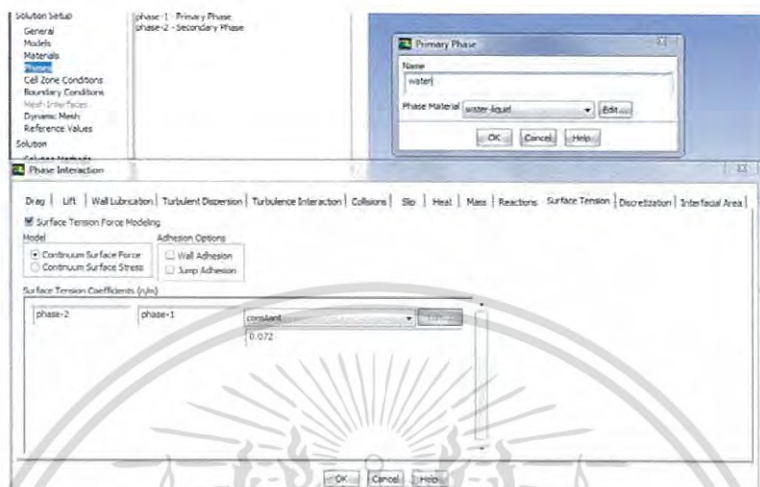
ทำการเลือกหน่วยของแบบจำลอง ในกรณีนี้ใช้หน่วยเป็นมิลลิเมตร ให้ปรับด้วยคำสั่ง Scale Mesh และตั้งค่าความเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (g) เป็น  $-8.81 \text{ m/s}^2$  กำหนดสภาวะ (Time) เป็น Steady และเลือกใช้การคำนวณแบบ Pressure base solver

ในส่วนของการตั้งค่าพฤติกรรมไหลที่สนใจ (Models) ให้เลือกที่สภาพการไหลหลายเฟสด้วยโมเดล VOF โดยใช้คำสั่ง Multiphase > Volume of Fluid > Implicit scheme และแบบการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ด้วย RNG  $k - \epsilon$  model โดยใช้คำสั่ง Viscous > k-epsilon > RNG



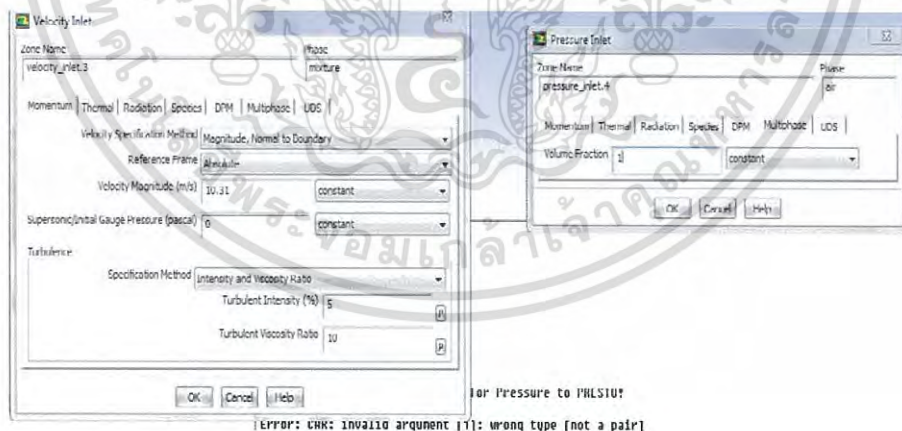
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 7.ก การตั้งค่าพฤติกรรมไหลที่สนใจในโปรแกรม fluent** ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการกำหนดของไหลปฐมภูมิ (Primary phase) ที่ใช้น้ำ ของไหลทุติยภูมิ (Secondary phase) เป็นอากาศและ กำหนดความตึงผิวระหว่างน้ำมี โดยเลือกที่ Material > create > fluid data base > water (liquid) > copy จากนั้นใช้คำสั่ง phases > primary phase > water > interaction > surface tension



รูปที่ 8.ก การตั้งค่าของไหลปฐมภูมิและของไหลทุติยภูมิ

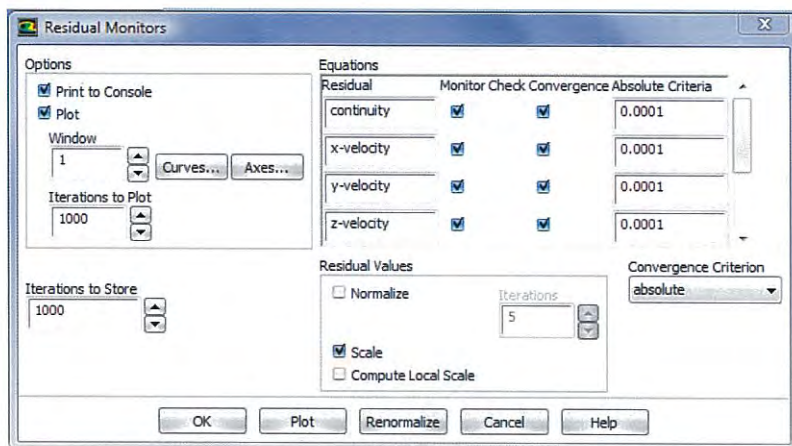
ตั้งค่าความเร็วน้ำด้วยคำสั่ง Boundary Condition > Velocity inlet > mixture > edit และที่ทางเข้าอากาศมีค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำเป็นศูนย์ ดังนั้นใช้คำสั่ง Boundary Condition > Pressure inlet > air > multiphase มีค่าเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 9.ก การตั้งค่าในเงื่อนไขขอบเขตในโปรแกรม fluent

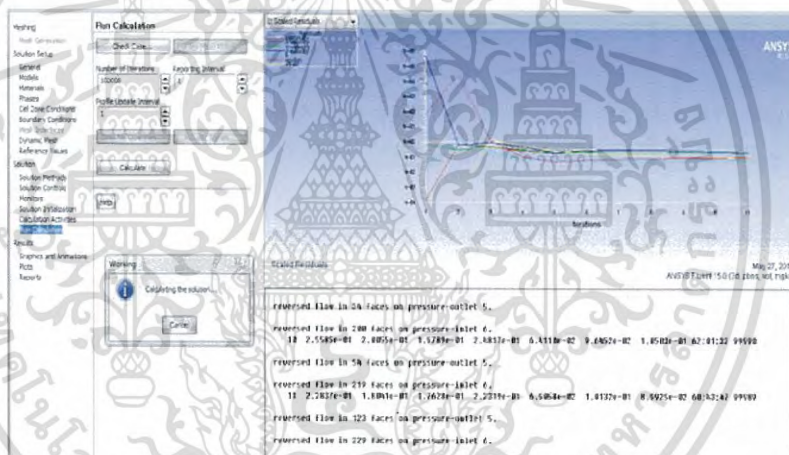
กำหนดการคำนวณหาคำตอบให้ตั้งค่า Momentum, Volume fraction, Turbulent kinetic energy และ Turbulent dissipation rate เป็น Second order upwind จากนั้นเลือกค่าผลต่างคำตอบที่ต้องการในคำสั่ง Monitor > edit > absolute Criteria มีค่าเท่ากับ 0.0001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10.ก การกำหนดการคำนวณหาคำตอบในโปรแกรม fluent

เริ่มการคำนวณรอบซ้ำด้วยคำสั่ง Run calculation > Number of iterate > Calculate



รูปที่ 11.ก แสดงการคำนวณรอบซ้ำในโปรแกรม fluent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ผลการจำลอง

ผลการจำลองค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรตามแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดเพื่อหาระยะที่เหมาะสมในการติดใบปิด ( $L_b$ ) ทำการจำลองที่อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข1 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำ เมื่อระยะจากหัวฉีดถึงใบปิดเป็น 5D;

จำนวนใบปิด	ติดใบปิดชนิดสองแกน	ติดใบปิดชนิดสามแกน	ติดใบปิดชนิดสี่แกน
0	0.18	0.19	0.19
1	0.25	0.26	0.30
2	0.30	0.33	0.34
3	0.31	0.34	0.35
4	0.32	0.34	0.35
5	0.32	0.34	0.35
6	0.32	0.34	0.35

ตารางที่ ข2 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำ เมื่อระยะจากหัวฉีดถึงใบปิดเป็น 10D;

จำนวนใบปิด	ติดใบปิดชนิดสองแกน	ติดใบปิดชนิดสามแกน	ติดใบปิดชนิดสี่แกน
0	0.22	0.22	0.22
1	0.28	0.32	0.32
2	0.31	0.34	0.36
3	0.33	0.35	0.36
4	0.35	0.36	0.36
5	0.35	0.36	0.36
6	0.35	0.36	0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข3 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำ เมื่อระยะจากหัวฉีดถึงใบปิดเป็น 15D;

จำนวนใบปิด	ติดใบปิดชนิดสองแกน	ติดใบปิดชนิดสามแกน	ติดใบปิดชนิดสี่แกน
0	0.25	0.33	0.39
1	0.30	0.39	0.45
2	0.33	0.39	0.50
3	0.35	0.38	0.40
4	0.35	0.41	0.45
5	0.36	0.41	0.46
6	0.35	0.41	0.44

ตารางที่ ข4 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำ เมื่อระยะจากหัวฉีดถึงใบปิดเป็น 20D;

จำนวนใบปิด	ติดใบปิดชนิดสองแกน	ติดใบปิดชนิดสามแกน	ติดใบปิดชนิดสี่แกน
0	0.28	0.39	0.37
1	0.42	0.55	0.49
2	0.43	0.48	0.56
3	0.43	0.49	0.48
4	0.36	0.55	0.47
5	0.41	0.48	0.47
6	0.38	0.50	0.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำของห้องผสมชนิดต่างๆเพื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วน ปริมาตรน้ำที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราไหลของน้ำ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข5 ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของห้องผสมไม่ติดใบปิดวัด ระยะจากปลายหัวฉีด ที่อัตราไหลของน้ำ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ระยะจากปลาย หัวฉีด	อัตราไหล 6 ลิตร ต่อนาที	อัตราไหล 8 ลิตร ต่อนาที	อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที	อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที
0	0.12	0.15	0.19	0.23
50	0.17	0.18	0.23	0.29
100	0.2	0.22	0.28	0.33
150	0.22	0.26	0.32	0.39
200	0.24	0.28	0.36	0.41
250	0.25	0.31	0.39	0.44

ตารางที่ ข6 ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของห้องผสมติดใบปิดชนิดสอง แขน วัดระยะจากปลายหัวฉีด ที่อัตราไหลของน้ำ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ระยะจากปลาย หัวฉีด	อัตราไหล 6 ลิตร ต่อนาที	อัตราไหล 8 ลิตร ต่อนาที	อัตราไหล 10 ลิตร ต่อนาที	อัตราไหล 12 ลิตร ต่อนาที
0	0.17	0.21	0.23	0.22
50	0.24	0.25	0.27	0.26
100	0.29	0.27	0.31	0.31
150	0.33	0.32	0.34	0.36
200	0.35	0.36	0.37	0.38
250	0.36	0.38	0.38	0.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข7 ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของห้องผสมติดใบปิดชนิดสามแกน วัดระยะจากปลายหัวฉัด ที่อัตราไหลของน้ำ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ระยะจากปลายหัวฉัด	อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที	อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที	อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที	อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที
0	0.21	0.23	0.23	0.22
50	0.26	0.28	0.29	0.29
100	0.34	0.33	0.35	0.36
150	0.38	0.38	0.39	0.41
200	0.41	0.42	0.43	0.43
250	0.44	0.45	0.45	0.47

ตารางที่ ข8 ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของห้องผสมติดใบปิดชนิดสี่แกน วัดระยะจากปลายหัวฉัด ที่อัตราไหลของน้ำ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ระยะจากปลายหัวฉัด	อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที	อัตราไหล 8 ลิตรต่อนาที	อัตราไหล 10 ลิตรต่อนาที	อัตราไหล 12 ลิตรต่อนาที
0	0.22	0.21	0.22	0.22
50	0.27	0.27	0.29	0.28
100	0.29	0.3	0.31	0.31
150	0.32	0.32	0.34	0.35
200	0.33	0.34	0.37	0.38
250	0.35	0.37	0.39	0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## ผลการทดลอง

ตารางที่ ค1 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมไม่ติดใบปิดที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	2.6
15	0.02	540	2.73
30	0.07	570	2.91
45	0.13	600	3.04
60	0.19	630	3.19
75	0.21	660	3.38
90	0.27	720	3.56
105	0.35	780	3.78
120	0.39	840	3.93
135	0.43	900	4.08
150	0.52	960	4.26
165	0.57	1020	4.41
180	0.62	1080	4.5
195	0.73	1140	4.65
210	0.84	1200	4.71
225	0.9	1320	4.82
240	0.95	1440	5.04
255	1.01	1560	5.23
270	1.14	1680	5.45
285	1.24	1800	5.63
300	1.35	1920	5.66
315	1.45	2040	5.67
330	1.5	2160	5.78
345	1.63	2280	5.88
360	1.85	2400	6.04
390	2.02	2700	6.23
420	2.11	3000	6.27
450	2.24	3300	6.28
480	2.37	3600	6.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค2 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมไม่ติดใบปิดที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	4.19
15	0.3	540	4.32
30	0.55	570	4.43
45	0.67	600	4.51
60	0.88	630	4.73
75	0.95	660	4.92
90	1.1	720	5.06
105	1.23	780	5.17
120	1.35	840	5.31
135	1.47	900	5.45
150	1.55	960	5.53
165	1.68	1020	5.62
180	1.79	1080	5.73
195	1.91	1140	5.85
210	2.04	1200	5.96
225	2.13	1320	6.06
240	2.24	1440	6.12
255	2.58	1560	6.24
270	2.7	1680	6.36
285	2.85	1800	6.44
300	2.97	1920	6.57
315	3.06	2040	6.62
330	3.22	2160	6.61
345	3.37	2280	6.65
360	3.52	2400	6.63
390	3.68	2700	6.63
420	3.85	3000	6.64
450	3.98	3300	6.65
480	4.14	3600	6.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค3 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมไม่ติดไปบิตที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	5.27
15	0.24	540	5.41
30	0.6	570	5.58
45	0.85	600	5.625
60	1.12	630	5.73
75	1.23	660	5.78
90	1.37	720	5.92
105	1.59	780	5.99
120	1.77	840	6.08
135	2.02	900	6.15
150	2.34	960	6.22
165	2.56	1020	6.28
180	2.78	1080	6.37
195	3.1	1140	6.45
210	3.32	1200	6.54
225	3.56	1320	6.58
240	3.71	1440	6.64
255	3.86	1560	6.68
270	4.01	1680	6.73
285	4.07	1800	6.77
300	4.15	1920	6.79
315	4.32	2040	6.79
330	4.55	2160	6.8
345	4.62	2280	6.78
360	4.74	2400	6.77
390	4.79	2700	6.78
420	4.86	3000	6.78
450	5.09	3300	6.77
480	5.18	3600	6.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค4 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมไม่ติดใบปิดที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	6.28
15	0.12	540	6.35
30	0.36	570	6.48
45	0.75	600	6.55
60	0.99	630	6.59
75	1.25	660	6.63
90	1.49	720	6.67
105	1.7	780	6.72
120	2.04	840	6.74
135	2.36	900	6.76
150	2.81	960	6.77
165	3.14	1020	6.78
180	3.46	1080	6.77
195	3.75	1140	6.79
210	4.02	1200	6.8
225	4.2	1320	6.81
240	4.6	1440	6.8
255	4.75	1560	6.8
270	4.87	1680	6.81
285	5.06	1800	6.82
300	5.14	1920	6.81
315	5.43	2040	6.8
330	5.55	2160	6.81
345	5.72	2280	6.8
360	5.84	2400	6.8
390	5.95	2700	6.8
420	6.04	3000	6.81
450	6.09	3300	6.79
480	6.18	3600	6.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค5 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมดีดใบปิดชนิดสอง  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	3.07
15	0.05	540	3.25
30	0.11	570	3.29
45	0.14	600	3.39
60	0.19	630	3.58
75	0.29	660	3.77
90	0.37	720	3.92
105	0.52	780	4.11
120	0.62	840	4.28
135	0.72	900	4.37
150	0.81	960	4.53
165	0.97	1020	4.66
180	1.09	1080	4.79
195	1.15	1140	4.94
210	1.31	1200	5.21
225	1.45	1320	5.33
240	1.57	1440	5.46
255	1.66	1560	5.63
270	1.76	1680	5.75
285	1.9	1800	5.86
300	1.99	1920	5.99
315	2.1	2040	6.03
330	2.22	2160	6.15
345	2.35	2280	6.22
360	2.45	2400	6.29
390	2.56	2700	6.41
420	2.71	3000	6.53
450	2.86	3300	6.55
480	2.98	3600	6.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค6 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมตีใบปิดชนิดสอง  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	4.63
15	0.22	540	4.75
30	0.35	570	4.83
45	0.47	600	4.94
60	0.66	630	5.03
75	0.93	660	5.16
90	1.08	720	5.24
105	1.24	780	5.35
120	1.39	840	5.49
135	1.52	900	5.65
150	1.71	960	5.77
165	1.91	1020	5.85
180	2.07	1080	5.93
195	2.28	1140	6.01
210	2.46	1200	6.14
225	2.63	1320	6.24
240	2.77	1440	6.29
255	2.89	1560	6.35
270	3.02	1680	6.41
285	3.14	1800	6.45
300	3.25	1920	6.51
315	3.5	2040	6.54
330	3.84	2160	6.56
345	3.98	2280	6.57
360	4.06	2400	6.58
390	4.15	2700	6.58
420	4.31	3000	6.59
450	4.44	3300	6.58
480	4.51	3600	6.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค7 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมติตไบบิตชนิดสอง  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	4.92
15	0.12	540	5.11
30	0.42	570	5.3
45	0.62	600	5.5
60	0.9	630	5.58
75	1.05	660	5.71
90	1.29	720	5.82
105	1.29	780	5.89
120	1.5	840	6.01
135	1.79	900	6.06
150	1.96	960	6.09
165	2.2	1020	6.15
180	2.35	1080	6.22
195	2.5	1140	6.26
210	2.66	1200	6.31
225	2.78	1320	6.37
240	2.92	1440	6.47
255	3.11	1560	6.53
270	3.23	1680	6.61
285	3.36	1800	6.7
300	3.48	1920	6.73
315	3.65	2040	6.77
330	3.86	2160	6.83
345	4.02	2280	6.85
360	4.21	2400	6.85
390	4.38	2700	6.84
420	4.52	3000	6.86
450	4.65	3300	6.86
480	4.83	3600	6.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค8 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมดีไบปิดชนิดสอง  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	5.94
15	0.11	540	6.05
30	0.34	570	6.1
45	0.61	600	6.15
60	0.8	630	6.19
75	1.02	660	6.26
90	1.22	720	6.32
105	1.35	780	6.4
120	1.86	840	6.48
135	2.09	900	6.55
150	2.4	960	6.6
165	2.65	1020	6.62
180	2.85	1080	6.65
195	3.08	1140	6.64
210	3.38	1200	6.65
225	3.58	1320	6.66
240	3.82	1440	6.66
255	4.1	1560	6.65
270	4.27	1680	6.65
285	4.45	1800	6.66
300	4.62	1920	6.67
315	4.77	2040	6.65
330	4.92	2160	6.66
345	5.03	2280	6.65
360	5.16	2400	6.67
390	5.37	2700	6.67
420	5.55	3000	6.67
450	5.7	3300	6.65
480	5.85	3600	6.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค9 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมติตไปบิตชนิดสาม  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	3.45
15	0.05	540	3.79
30	0.09	570	4.07
45	0.12	600	4.13
60	0.14	630	4.38
75	0.28	660	4.51
90	0.4	720	4.71
105	0.58	780	4.84
120	0.68	840	5.07
135	0.75	900	5.2
150	0.9	960	5.32
165	1.05	1020	5.45
180	1.25	1080	5.61
195	1.31	1140	5.82
210	1.4	1200	5.92
225	1.49	1320	6.08
240	1.65	1440	6.16
255	1.7	1560	6.25
270	1.78	1680	6.3
285	1.89	1800	6.41
300	1.96	1920	6.45
315	2.24	2040	6.49
330	2.46	2160	6.49
345	2.67	2280	6.5
360	2.85	2400	6.48
390	2.91	2700	6.49
420	3.06	3000	6.5
450	3.2	3300	6.5
480	3.4	3600	6.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค10 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมดีดไบบิดชนิดสาม  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	5.25
15	0.24	540	5.4
30	0.31	570	5.52
45	0.61	600	5.67
60	0.81	630	5.84
75	1.01	660	5.98
90	1.15	720	6.08
105	1.34	780	6.19
120	1.44	840	6.28
135	1.76	900	6.34
150	1.88	960	6.43
165	1.91	1020	6.49
180	2.08	1080	6.54
195	2.15	1140	6.61
210	2.23	1200	6.63
225	2.59	1320	6.65
240	2.82	1440	6.66
255	2.98	1560	6.67
270	3.23	1680	6.68
285	3.35	1800	6.68
300	3.65	1920	6.7
315	3.83	2040	6.69
330	3.9	2160	6.7
345	4.04	2280	6.69
360	4.15	2400	6.68
390	4.46	2700	6.68
420	4.86	3000	6.69
450	4.99	3300	6.67
480	5.11	3600	6.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค11 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมติดยาบำบัดชนิดสาม  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	6.15
15	0.24	540	6.27
30	0.36	570	6.33
45	0.62	600	6.45
60	1.02	630	6.53
75	1.21	660	6.66
90	1.45	720	6.68
105	1.72	780	6.7
120	1.91	840	6.74
135	2.13	900	6.78
150	2.35	960	6.79
165	2.61	1020	6.8
180	2.8	1080	6.79
195	2.98	1140	6.8
210	3.22	1200	6.81
225	3.37	1320	6.8
240	3.46	1440	6.79
255	3.69	1560	6.8
270	4.04	1680	6.8
285	4.13	1800	6.8
300	4.48	1920	6.79
315	4.68	2040	6.8
330	4.95	2160	6.8
345	5.09	2280	6.79
360	5.17	2400	6.81
390	5.3	2700	6.8
420	5.55	3000	6.81
450	5.73	3300	6.79
480	6.03	3600	6.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค12 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมดีดใบปิดชนิดสาม  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	5.25
15	0.11	540	5.42
30	0.36	570	5.57
45	0.5	600	5.62
60	0.87	630	5.75
75	1.08	660	5.95
90	1.3	720	6.07
105	1.69	780	6.28
120	1.91	840	6.36
135	2.19	900	6.47
150	2.31	960	6.54
165	2.57	1020	6.61
180	2.79	1080	6.68
195	2.95	1140	6.71
210	3.08	1200	6.78
225	3.29	1320	6.86
240	3.4	1440	6.89
255	3.63	1560	6.9
270	3.71	1680	6.9
285	3.82	1800	6.91
300	3.98	1920	6.9
315	4.06	2040	6.92
330	4.14	2160	6.91
345	4.31	2280	6.9
360	4.41	2400	6.91
390	4.55	2700	6.91
420	4.79	3000	6.89
450	4.99	3300	6.9
480	5.08	3600	6.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค13 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมดีดไปบิตชนิดสี่  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 6 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	3.81
15	0.06	540	3.97
30	0.12	570	4.06
45	0.32	600	4.29
60	0.41	630	4.41
75	0.54	660	4.59
90	0.72	720	4.68
105	0.92	780	4.81
120	1.05	840	4.94
135	1.14	900	5.08
150	1.22	960	5.18
165	1.35	1020	5.25
180	1.52	1080	5.34
195	1.64	1140	5.39
210	1.77	1200	5.51
225	1.89	1320	5.63
240	1.95	1440	5.72
255	2.06	1560	5.88
270	2.11	1680	5.94
285	2.22	1800	6.11
300	2.34	1920	6.23
315	2.51	2040	6.32
330	2.67	2160	6.44
345	2.84	2280	6.45
360	3.01	2400	6.47
390	3.26	2700	6.47
420	3.37	3000	6.49
450	3.53	3300	6.48
480	3.68	3600	6.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค14 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมติดใบปิดชนิดสี่  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 8 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	4.18
15	0.15	540	4.31
30	0.3	570	4.47
45	0.45	600	4.67
60	0.66	630	4.81
75	0.75	660	4.94
90	1.06	720	5.12
105	1.16	780	5.16
120	1.37	840	5.24
135	1.53	900	5.38
150	1.64	960	5.45
165	1.76	1020	5.63
180	1.94	1080	5.71
195	2.02	1140	5.78
210	2.21	1200	5.88
225	2.36	1320	6.03
240	2.45	1440	6.14
255	2.55	1560	6.25
270	2.67	1680	6.34
285	2.74	1800	6.44
300	2.9	1920	6.46
315	2.99	2040	6.55
330	3.16	2160	6.59
345	3.31	2280	6.63
360	3.51	2400	6.64
390	3.67	2700	6.65
420	3.82	3000	6.65
450	3.98	3300	6.66
480	4.06	3600	6.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค15 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมดีดไปปิดชนิดสี่  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 10 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	4.42
15	0.13	540	4.57
30	0.38	570	4.7
45	0.46	600	4.82
60	0.76	630	4.92
75	0.84	660	5.09
90	1.08	720	5.19
105	1.24	780	5.27
120	1.42	840	5.35
135	1.65	900	5.46
150	1.82	960	5.58
165	1.95	1020	5.68
180	2.05	1080	5.73
195	2.19	1140	5.83
210	2.35	1200	5.91
225	2.56	1320	6.01
240	2.65	1440	6.09
255	2.74	1560	6.19
270	2.89	1680	6.34
285	3.03	1800	6.47
300	3.06	1920	6.62
315	3.19	2040	6.65
330	3.35	2160	6.66
345	3.42	2280	6.67
360	3.54	2400	6.67
390	3.6	2700	6.68
420	3.92	3000	6.66
450	4.06	3300	6.67
480	4.23	3600	6.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค16 ผลการทดลองวัดความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำต่อเวลาของห้องผสมดีดไปบิตชนิดสี่  
แกนที่อัตราไหลน้ำ 12 ลิตรต่อนาที

เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)	เวลา (s)	ค่าความเข้มข้น (ppm)
0	0	510	5.25
15	0.11	540	5.42
30	0.36	570	5.57
45	0.5	600	5.62
60	0.87	630	5.75
75	1.08	660	5.95
90	1.3	720	6.07
105	1.69	780	6.28
120	1.91	840	6.36
135	2.19	900	6.47
150	2.31	960	6.54
165	2.57	1020	6.61
180	2.79	1080	6.68
195	2.95	1140	6.71
210	3.08	1200	6.78
225	3.29	1320	6.86
240	3.4	1440	6.89
255	3.63	1560	6.9
270	3.71	1680	6.9
285	3.82	1800	6.91
300	3.98	1920	6.9
315	4.06	2040	6.92
330	4.14	2160	6.91
345	4.31	2280	6.9
360	4.41	2400	6.91
390	4.55	2700	6.91
420	4.79	3000	6.89
450	4.99	3300	6.9
480	5.08	3600	6.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

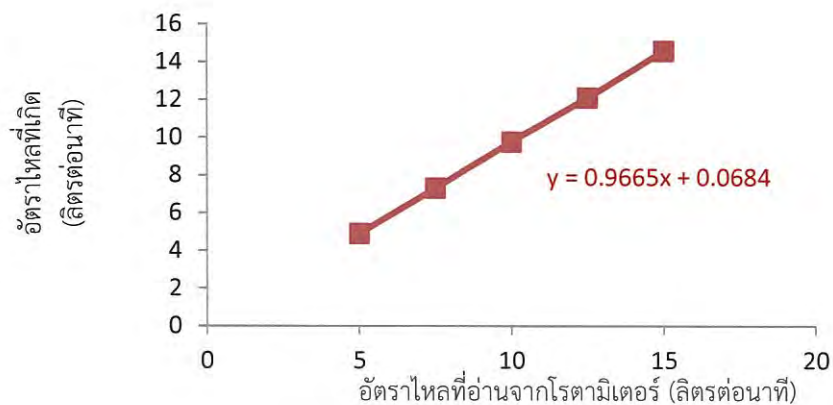
ตารางที่ ค17 แสดงข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองกับประสิทธิภาพความเร็วอากาศ  
มีค่า PF = 0.98

ชนิดห้องผสม	อัตราไหล (LPM)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt)	ค่ากระแส (Amp)	กำลัง (kW)	AE <sub>T</sub> (kgO <sub>2</sub> /kWhr)
ห้องผสมที่ไม่ติดใบพัด	6	218	1.486	323.95	0.21
	8	217	1.486	322.46	0.36
	10	218	1.485	323.73	0.47
	12	218	1.484	323.51	0.77
ห้องผสมที่ติดใบพัดสองแกน	6	218	1.485	323.73	0.24
	8	218	1.487	324.16	0.33
	10	217	1.485	322.24	0.45
	12	218	1.487	324.16	0.72
ห้องผสมที่ติดใบพัดสามแกน	6	218	1.487	324.16	0.24
	8	218	1.486	323.94	0.35
	10	217	1.485	322.24	0.47
	12	218	1.487	324.16	0.97
ห้องผสมที่ติดใบพัดสี่แกน	6	217	1.486	322.46	0.22
	8	218	1.486	323.95	0.34
	10	218	1.487	324.16	0.39
	12	217	1.487	322.68	0.67

ตารางที่ ค18 แสดงข้อมูลของการเก็บค่าของเวลาในการเทียบวัดของ Rota meter

อัตราไหลที่ rotameter (ลิตรต่อนาที)	ปริมาตรน้ำในถัง (ลิตร)	เวลาที่วัดได้เมื่อได้น้ำตามปริมาตร (วินาที)						อัตราไหลที่เกิดขึ้นจริง (ลิตรต่อนาที)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย	
5	10	123	122	124	121	122	122.4	4.901960784
7.5	15	125	122	123	122	123	123	7.317073171
10	20	124	123	122	124	121	122.8	9.771986971
12.5	25	124	124	124	123	123	123.6	12.13592233
15	30	124	125	124	123	121	123.4	14.58670989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.ค กราฟการเปรียบเทียบอัตราไหลของ rota meter ที่เกิดจริงกับค่าที่อ่านได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

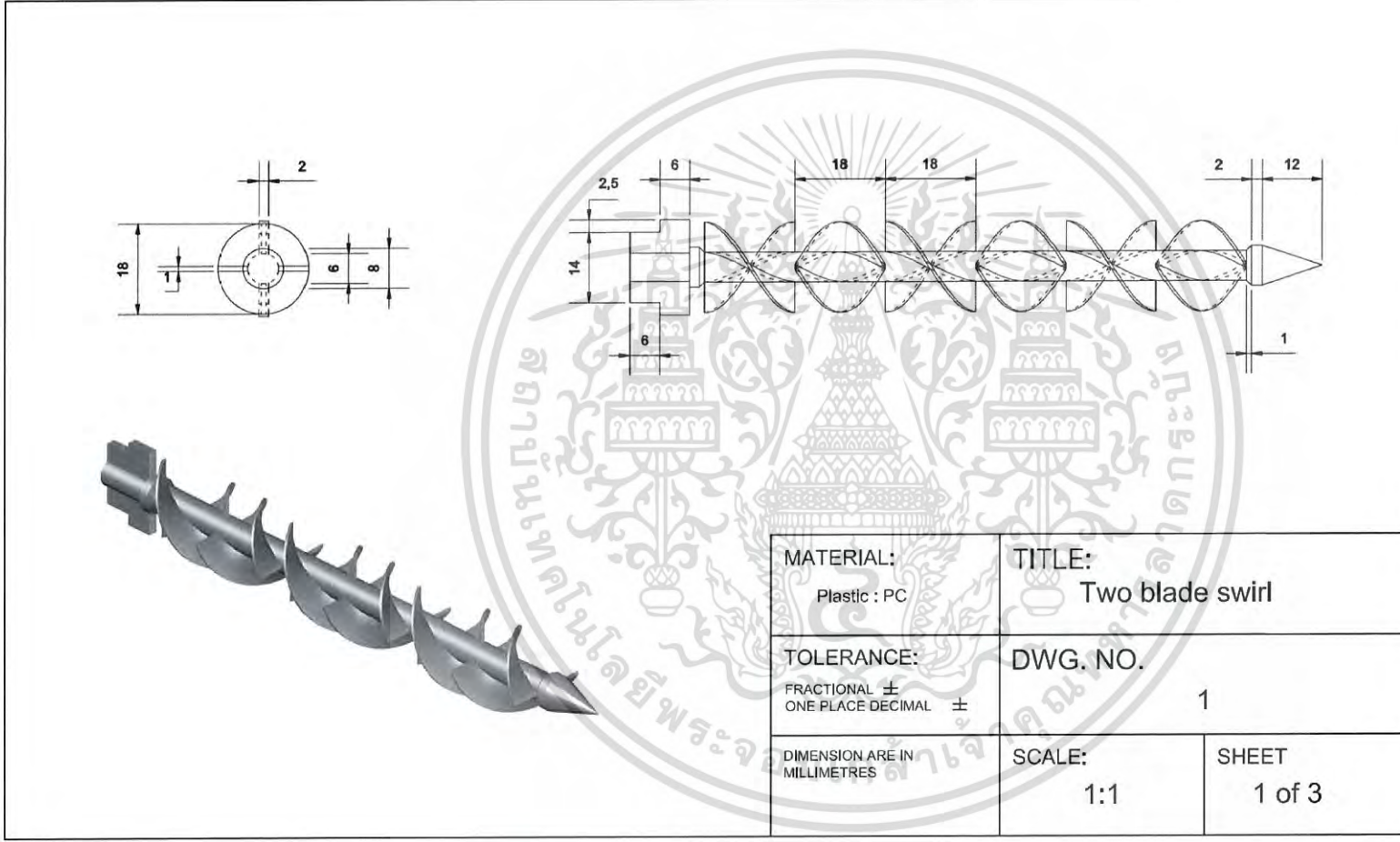
## ภาคผนวก ง

### การสร้างใบปัดห้องผสมด้วยโปรแกรมอโต้แคด (Auto CAD)

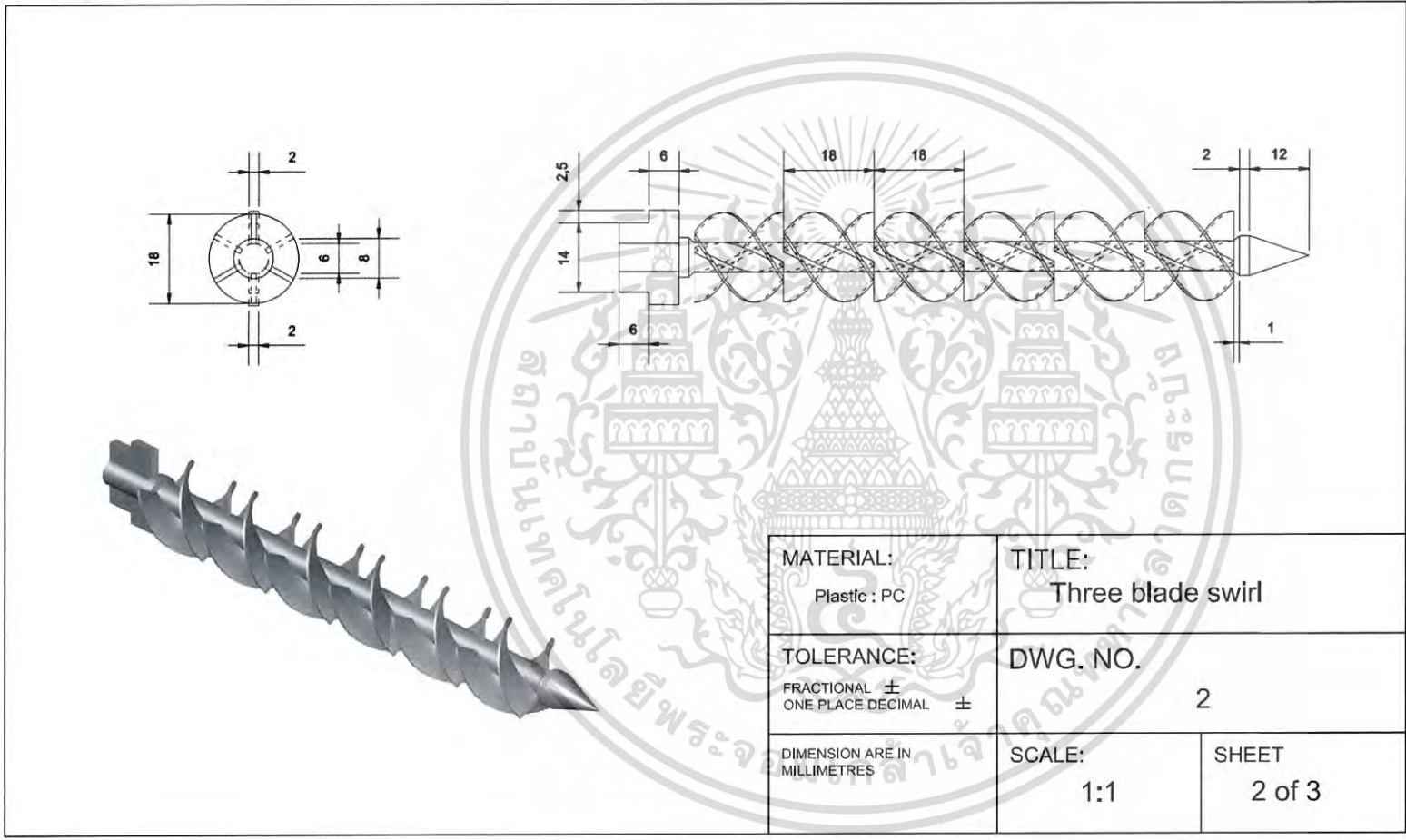
ใบปัดที่ใช้ติดตั้งในห้องผสมของชุดทดลองได้สร้างขึ้นมาจากวัสดุพลาสติก ABS ซึ่งมีความแข็งแรงและทนต่อการสัมผัสน้ำเป็นเวลานานได้ดี การสร้างได้ขึ้นรูปงานสามมิติจากภาพเขียนแบบที่ถูกสร้างโดยโปรแกรมอโต้แคด (Auto CAD) ขนาดที่ออกแบบได้แสดงดังรูป 13 ถึง รูปที่ 15

1. ใบปัดชนิดสองแกนมีแกนที่ใช้บิดสองแกนแต่ละแกนวางทำมุม  $180^{\circ}$  ต่อกัน
2. ใบปัดชนิดสามแกนมีแกนที่ใช้บิดสามแกนแต่ละแกนทำมุม  $120^{\circ}$  ต่อกัน
3. ใบปัดชนิดสี่แกนมีแกนที่ใช้บิดสี่แกนแต่ละแกนทำมุม  $90^{\circ}$  ต่อกัน
4. ในใบปัด 1 ชั้น (1 element) ทำการบิดแกน (twist) เป็นมุมบิดขนาด  $180^{\circ}$  ในทิศทวนเข็มนาฬิกา
5. การบิดใบปัดทำให้กลายเป็นลักษณะวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร
6. ใบปัด 1 ชั้น (1 element) มีความยาวชั้นละ 18 มิลลิเมตร
7. ใบปัด 1 ชั้น (1 element) มีความหนาของแกนที่บิด 2 มิลลิเมตร
8. ตัวใบปัดถูกยึดไว้ที่แกนกลางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร
9. บริเวณส่วนบนของแกนกลางเป็นลักษณะกรวยคว่ำ มีเส้นผ่านศูนย์กลางฐานเท่ากับแกนกลางคือ 6 มิลลิเมตร มีความยาว 12 มิลลิเมตร
10. ใบปัดชนิดสองแกนมีใบปัดเรียงชิดกัน 6 ชั้น (6 element) แต่ละชั้นวางทำมุม  $90^{\circ}$  ต่อกัน
11. ใบปัดชนิดสามแกนมีใบปัดเรียงชิดกัน 6 ชั้น (6 element) แต่ละชั้นวางทำมุม  $60^{\circ}$  ต่อกัน
12. ใบปัดชนิดสี่แกนมีใบปัดเรียงชิดกัน 6 ชั้น (6 element) แต่ละชั้นวางทำมุม  $45^{\circ}$  ต่อกัน
13. บริเวณส่วนล่างของแกนถูกออกแบบให้สวมพอดีกับห้องผสมเพื่อยึดใบปัดกับจัวห้องผสม

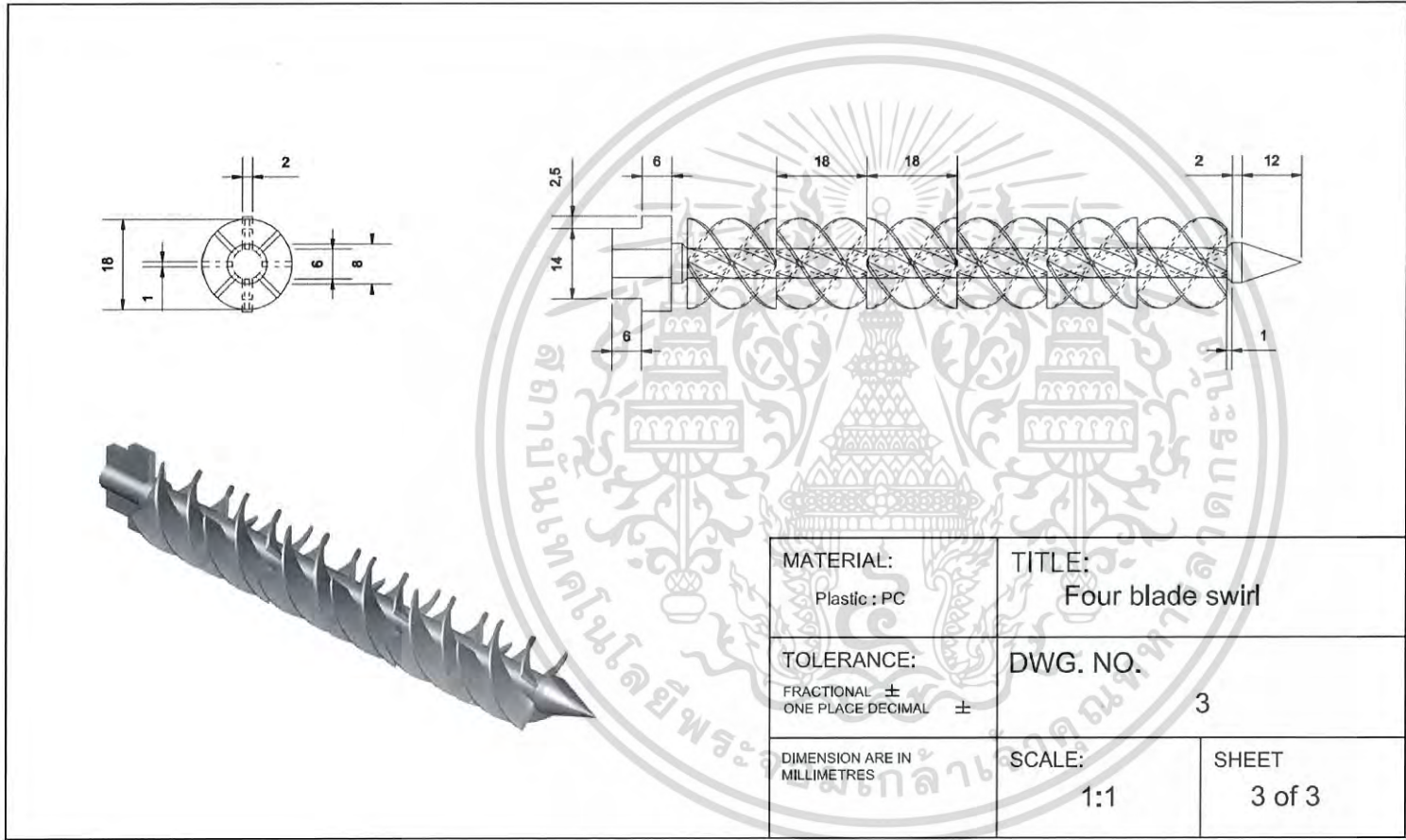
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.ง แสดงภาพแบบใบปัดชนิดสองแกน ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ (Auto CAD)



รูปที่ 2.4 แสดงภาพแบบใบพัดชนิดสามแกน ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมออโตแคด (Auto CAD)



รูปที่ 3.ง แสดงภาพแบบใบพัดชนิดสี่แกน ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมออโตแคด (Auto CAD)