


การศึกษาเชิงตัวเลขของการเพิ่มประสิทธิภาพการผสม  
ของเหลวและแก๊สในท่อผสมเขาระ่อง  
Numerical study of liquid-gas mixing enhancement  
in inner grooved pipe



วชิรวิทย์ ภัคดีพันธ์  
ศาสตราจารย์ เวชวิทยาขลัง  
สหัสวรรษ ลิ้มอุสันโน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงตัวเลขของการเพิ่มประสิทธิภาพการผสม  
ของเหลวและแก๊สในท่อผสมเขาระ่อง  
Numerical study of liquid-gas mixing enhancement  
in inner grooved pipe

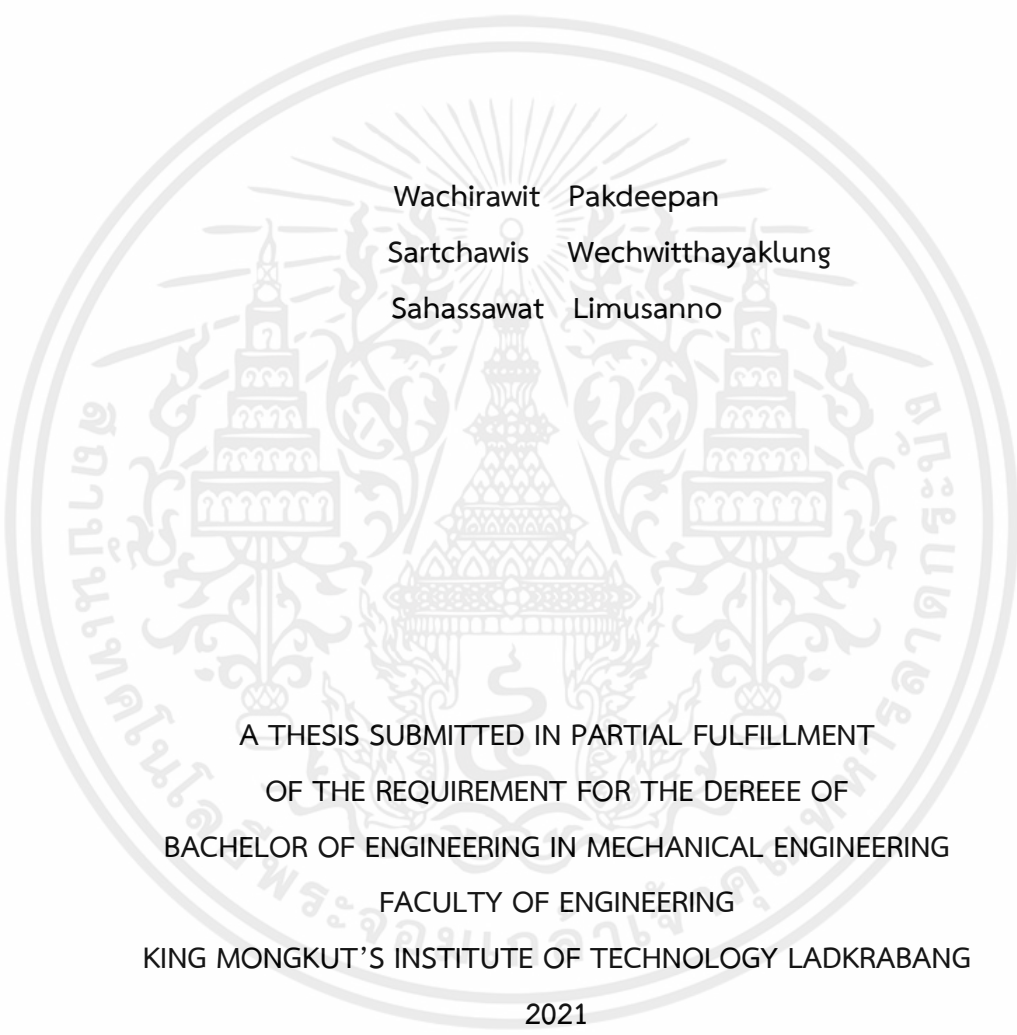
วชิรวิทย์ ภัคดีพันธ์  
ศาสตราจารย์ วิศวกรรมเครื่องกล  
สหัสวรรษ ลิมอุสันโน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Numerical study of liquid-gas mixing  
enhancement in inner grooved pipe

Wachirawit Pakdeepan  
Sartchawis Wechwitthayaklung  
Sahassawat Limusanno



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  
2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขของการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของเหลวและแก๊สในท่อผสมเซาะร่อง

Numerical study of liquid-gas mixing enhancement in inner grooved pipe

ผู้จัดทำ

- |                 |             |              |          |
|-----------------|-------------|--------------|----------|
| 1. นายวชิรวิทย์ | ภักดีพันธ์  | รหัสประจำตัว | 61010921 |
| 2. นายศาสชวิต   | เวชวิทยาลัง | รหัสประจำตัว | 61011013 |
| 3. นายสหสวรรค์  | ลิมอุสันโน  | รหัสประจำตัว | 61011099 |

**ดร.พงษ์ท.**

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. ณัฏวิภา เจียรระโนวชิระ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงตัวเลขของการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของเหลวและแก๊สในท่อผสมเซาะร่อง

นายวชิรวิทย์	ภักดีพันธ์	61010921
นายศาสตวิช	เวชวิทยาชลิ่ง	61011013
นายสหัสวรรษ	ลิมอุสนโน	61011099
ผศ.ดร. ณัฏวิภา เจียรระโนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษา		
ปีการศึกษา 2564		

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบท่อผสมโดยใช้วิธีการเซาะร่องบริเวณพื้นผิวด้านในของท่อผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนมวลออกซิเจนระหว่างน้ำและอากาศ นอกจากนี้การจำลองการไหลในท่อผสมแบบเซาะร่องจะสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ ทั้งยังสามารถเพิ่มความปั่นป่วนระหว่างเฟสด้วยการสร้างแบบจำลองโมเดลด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS และจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT การจำลองการฉีดน้ำด้วยหัวฉีดเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำอากาศบริเวณรอบลำน้ำที่อัตราการไหลที่ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อวินาที เข้าสู่ท่อผสมที่เซาะร่องบริเวณพื้นผิวภายในของท่อผสม เพื่อศึกษาความกว้าง, ความลึกของร่องจำนวนร่องในการเซาะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลระหว่างน้ำและอากาศ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสมกับท่อผสมแบบราบเรียบ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการเซาะร่องให้ประสิทธิภาพในการผสมระหว่างน้ำและอากาศดีกว่าท่อราบเรียบ การใช้ท่อเซาะร่องรูปวงกลมที่อัตราส่วนจำนวนร่องต่อระยะห่างระหว่างร่อง (N/S) ที่ 3.8 หรือที่อัตราส่วนความกว้างของร่องที่ทำการเซาะต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผสมที่ดีที่สุด (W/D) เท่ากับ 0.3 จะให้ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำต่อปริมาตรทั้งหมดในหนึ่งหน่วยหน้าตัดที่เข้าใกล้ 0.5 มากกว่าอัตราส่วนอื่น ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างน้ำและอากาศที่ดีที่สุด นอกจากนี้พบว่าความลึกของร่องมีผลเพียงเล็กน้อยในการการผสมระหว่างเฟส

## Numerical study of liquid-gas mixing enhancement in inner grooved pipe

Wachirawit Pakdeepan 61010921

Sartchawis Wechwitthayaklung 61011013

Sahassawat Limusanno 61011099

Assoc.Prof.Dr. Nutvipa Jayranaiwachira

Advisor Year 2564

### ABSTRACT

This research studied the mixing design of a mixing pipe by using a grooving method on the inner surface of the mixing pipe to increase the mass transfer efficiency of oxygen by water and air. In addition, this simulation can increase the contact surface area between water and air. Also, turbulence can expand during the water and air flows through the grooves by modeling with SOLIDWORKS and simulation by ANSYS FLUENT program. Water injection simulation with induction nozzle to induce the air induction around the water stream at a flow rate of 6, 8,10,12 liters per minute into the internal grooved mixing pipe to study the grooved width, depth, and the appropriate number of internal grooves to optimize the mass transfer between the water and air phases. The enhancement of mixing pipe efficiency is also compared with the smooth pipe. The simulation results show that grooving has more efficiency in mixing water and air than the smooth pipe. Using circular grooving pipes at the ratio of the groove number to space between groove (N/S) at 3.8 or the grooved width to diameter mixing tube (W/D) of 0.3 gives the water volume fraction in one unit cross-section nearly 0.5, which is greater than other ratios. This is the value that represents the best in mass transfer between water and air. In addition, the groove depth has little effect on the phase mixing.

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีก็เพราะความกรุณา ความเอาใจใส่ และความช่วยเหลือ  
เสมอมาจาก ผศ.ดร.ดร.ณัฏวิภา เจียรระโนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษาจึงขอกราบพระคุณอย่างสูงที่ได้ให้  
ความรู้ และคำแนะนำตลอดระยะเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณพีโน้ต ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชา  
วิศวกรรมเครื่องกลทุกๆท่านที่ได้ให้คำแนะนำจนทำให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ที่สุด



นายชिरวิทย์ ภัคดีพันธ์

นายศาศชวิศ เวชวิทยาขลัง

นายสหัสวรรษ ลิมอุสันโน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 สมมติฐานการศึกษา.....	1
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 หัวฉัดเหนียว.....	4
2.1.1 อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉัดเหนียว.....	4
2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างจำลองการออกแบบ ด้วยโปรแกรม.....	4
2.3 วรรณกรรมเกี่ยวกับการออกแบบท่อเซาะร่องเกลียว.....	5
2.3.1 พื้นที่ผิว.....	5
2.3.2 รูปแบบทางเรขาคณิตของร่องเกลียวภายในท่อผสม.....	5
2.3.3 อิทธิพลของความกว้าง ความลึก และมุมเกลียวที่ส่งผลต่อ การผสมของของไหลภายในท่อ.....	7
2.3.4 การแลกเปลี่ยนออกซิเจนระหว่างน้ำกับอากาศ.....	7
บทที่ 3 ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.1 ทฤษฎีเจ็ท.....	8
3.1.1 ความรู้เบื้องต้นของเจ็ท.....	8
3.1.2 โครงสร้างและการพัฒนาของเจ็ทอิสระ.....	8
3.1.3 ปัจจัยที่มีผลกระจายตัวของลำเจ็ท.....	10
3.1.3.1 รูปแบบความเร็วของเจ็ท ณ ตำแหน่งทางออกของหัวฉัด.....	10

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.3.2 เลขเรย์โนลด์ของเจ็ท.....	10
3.1.3.3 มาตรฐานความยาวของความปั่นป่วน.....	11
3.2 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ.....	11
3.3 วิธีการ Finite volume method.....	11
3.3.1 บทนำ.....	11
3.3.2 วิธี Finite volume.....	12
3.3.3 สมการควบคุม Discretization.....	13
3.3.3.1 เทอมการพา (Convection Term) .....	14
3.3.3.2 เทอมการแพร่ (Diffusion Term) .....	14
3.3.4 การประมาณค่าอินทิกรัลพื้นผิว.....	14
3.3.5 กระบวนการหาคำตอบ.....	15
3.3.6 เงื่อนไขทางเข้าที่ทางเข้า (Boundary Condition).....	15
3.4 VOF (Volume of Fluid).....	16
3.5 Governing Equations of Fluid Dynamics.....	16
3.6 การจำลองความปั่นป่วน.....	17
3.6.1 Turbulence model.....	17
3.7 ทฤษฎีการถ่ายเทมวล.....	18
บทที่ 4 การสร้างแบบจำลอง.....	20
4.1 การสร้างแบบจำลอง.....	20
4.1.1 การสร้างหัวฉีดเหนี่ยวนำ.....	20
4.1.2 การออกแบบท่อผสม.....	20
4.1.2.1 ท่อผสมพื้นผิวราบเรียบ.....	20
4.1.2.2 ท่อผสมแบบท่อเซาะร่อง.....	21
4.1.3 การสร้างขอบเขตย่อยที่เหมาะสม (Mesh).....	22
4.1.4 การกำหนดขอบเขตค่าเริ่มต้น (Initial Condition).....	22
4.1.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition).....	22
4.1.6 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร (Variable Condition).....	23

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.6.1 ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำต่อปริมาตรทั้งหมด	
ในหนึ่งหน่วยหน้าตัด.....	23
4.1.6.2 การหาโมเดลที่เหมาะสมกับชิ้นงาน.....	24
4.2 การสอบเทียบแบบจำลอง.....	26
บทที่ 5 ผลการสร้างแบบจำลอง.....	28
5.1 รูปแบบการเซาะร่อง.....	28
5.2 ผลการจำลอง.....	29
5.2.1 ผลการจำลองเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสม.....	29
5.2.2 ผลการจำลองเพื่อหาแบบรูปของร่องที่เหมาะสม.....	34
5.2.3 ผลการจำลองเพื่อหาจำนวนร่องที่เหมาะสม.....	37
5.2.4 ผลการจำลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของร่อง.....	39
5.2.4.1 ผลการจำลองอัตราส่วนระหว่างความกว้างของร่อง	
ต่อความกว้างท่อผสม.....	39
5.2.4.2 ผลการจำลองอัตราส่วนระหว่างความลึกของร่อง	
ต่อความกว้างท่อผสม.....	44
บทที่ 6 สรุปและอภิปรายผลโครงการ.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก ก.....	51
ภาคผนวก ข.....	53
ภาคผนวก ค.....	60
ภาคผนวก ง.....	63

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมแบบราบเรียบ.....	29
2 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องแบบวงกลม.....	30
3 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม.....	31
4 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม.....	32
5 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู.....	33
6 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำท่อผสมแบบราบเรียบ.....	39
7 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำท่อผสมเซาะร่องแบบวงกลม.....	40
8 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำท่อผสมเซาะร่องแบบสามเหลี่ยม.....	41
9 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำท่อผสมเซาะร่องแบบสี่เหลี่ยม.....	42
10 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำท่อผสมเซาะร่องแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	43
11 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำท่อผสมเซาะร่องแบบสามเหลี่ยม.....	45
12 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำท่อผสมเซาะร่องแบบสี่เหลี่ยม.....	46
13 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำท่อผสมเซาะร่องแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	47

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศในงานวิจัยของนายจิรพล เนียมพินิจสกุล และคณะ.....	2
2.1 ตัวแปรของของระยะต่างๆในการหัวฉีดเหนี่ยวนำ.....	4
2.2 ความขรุขระภายในท่อ.....	5
2.3 แสดงรูปเรขาคณิตของร่องและอัตราส่วนความลึกของร่องต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ของท่อ (e/D) เป็น 0.1 และ 0.2.....	6
2.4 แสดง เส้นการไหลของของไหล และการกระจายตัวความร้อนในร่อง ที่เลข Re=15,000 a) e/D = 0.1 และ b) e/D = 0.2.....	6
2.5 แสดงพื้นที่ของการเซาะร่อง.....	7
3.1 แสดงลักษณะกระแสไหลของเจ็ท.....	8
3.2 การวงเซลล์ในปริมาตรควบคุมของความดันและความเร็วในระบบ Staggered grid.....	13
3.3 แสดงกริดในปริมาตรควบคุม.....	15
4.1 ท่อผสมแบบราบเรียบ.....	20
4.2 ท่อผสมแบบเซาะร่อง.....	20
4.3 ท่อผสมเซาะร่องผิวด้านในแบบวงกลม.....	21
4.4 ท่อผสมเซาะร่องผิวด้านในแบบสามเหลี่ยม.....	21
4.5 ท่อผสมเซาะร่องผิวด้านในแบบสี่เหลี่ยม.....	21
4.6 ท่อผสมเซาะร่องผิวด้านในแบบวงสี่เหลี่ยมคางหมู.....	21
4.7 ขอบเขตย่อยในท่อผสมแบบเซาะร่อง.....	22
4.8 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของท่อผสม.....	23
4.9 ความเร็วของน้ำ.....	23
4.10 ความดันอากาศ.....	23
4.11 ทางออกของท่อผสม.....	23
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน, อัตราการไหลของอากาศต่อ จำนวนกริดใน Standard โมเดล.....	24
4.13 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน, อัตราการไหลของอากาศต่อ จำนวนกริดใน RNG โมเดล.....	25

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
4.14 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน, อัตราการไหลของอากาศ ต่อจำนวนกริดใน Realizable โมเดล.....	25
4.15 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลของอากาศลิตรต่อนาที และจำนวนช่อง กริดของท่อผสมเซาะร่องรูปแบบวงกลม, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู.....	25
4.16 กราฟแสดงการสอบเทียบผลจำลองกับผลจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อเทียบกับ ปริมาตรทั้งหมดในหนึ่งหน่วยหน้าตัดของนายเขมชาติ บุญยะกาญจน และคณะ.....	26
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ค่าอัตราการไหลของอากาศระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎี และการจำลอง.....	27
5.1 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบราบเรียบ.....	28
5.2 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบวงกลม.....	28
5.3 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบสามเหลี่ยม.....	28
5.4 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบสี่เหลี่ยม.....	28
5.5 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบสี่เหลี่ยมคางหมู.....	29
5.6 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมราบเรียบในแนวหน้าตัดโดยวัด ระยะห่าง จากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	29
5.7 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องแบบวงกลมในแนวหน้าตัด ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	30
5.8 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องแบบสามเหลี่ยม ในแนวหน้าตัด ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	31
5.9 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมร่องสี่เหลี่ยมในแนวหน้าตัด ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	32
5.10 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ในแนวหน้าตัดที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที.....	33
5.11 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดวงกลม, สามเหลี่ยมสี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู ที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อนาที.....	34
5.12 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดวงกลม, สามเหลี่ยม,สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู ที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที.....	35

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

5.13 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดวงกลม, สามเหลี่ยม,สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู ที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที.....	35
5.14 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดรูปแบบวงกลม, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู ที่อัตราการไหล 12 ลิตรต่อนาที.....	36
5.15 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของท่อผสมของ รูปแบบวงกลมที่จำนวนร่อง 10, 15, 20 และ 25 ร่อง.....	37
5.16 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของท่อผสมของ รูปแบบสี่เหลี่ยมที่จำนวนร่อง 10, 15, 20 และ 25 ร่อง.....	37
5.17 แสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของท่อผสมของ รูปแบบสามเหลี่ยมที่จำนวนร่อง 10, 15, 20 และ 25 ร่อง.....	38
5.18 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบวงกลม ความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7, 3.6, 4.5 และ 5.4 มิลลิเมตร.....	40
5.19 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบสามเหลี่ยม ความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7, 3.6, 4.5 และ 5.4 มิลลิเมตร.....	41
5.20 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยม ความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7, 3.6, 4.5 และ 5.4 มิลลิเมตร.....	42
5.21 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7, 3.6, 4.5 และ 5.4 มิลลิเมตร.....	43
5.22 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบสามเหลี่ยม ความลึกของร่องเท่ากับ 2.7, 3.15, 3.6 และ 4.05 มิลลิเมตร.....	44
5.23 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยม ความลึกของร่องเท่ากับ 2.7, 3.15, 3.6 และ 4.05 มิลลิเมตร.....	45
5.24 กราฟแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ความลึกของร่องเท่ากับ 2.7, 3.15, 3.6 และ 4.05 มิลลิเมตร.....	46

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การติดตั้งเกลียว Static Mixer (เครื่องกวนในท่อ) ภายในท่อผสมเป็นวิธีที่สามารถใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสน้ำและเฟสอากาศ แต่มีข้อจำกัดด้านการติดตั้งท่อบิดภายในท่อที่ทำได้ยาก และเมื่อใช้น้ำที่อัตราการไหลสูง จะทำให้เกลียวบิดไปขวางทางการไหล เกิดความดันตกภายในท่อผสมเพิ่มมากขึ้น เป็นเหตุให้น้ำที่ไหลเข้าท่อผสมมีการกระจายออก ส่งผลให้ค่าของการทดลองคลาดเคลื่อน และท่อผสมไม่สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองทั้งในด้านของทรัพยากรและการเงิน

โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงรูปแบบของท่อผสมเพื่อเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างเฟสน้ำ และอากาศ ด้วยวิธีการเจาะร่องภายในผนังท่อผสม ด้วยโปรแกรม Ansys Fluent เพื่อสร้างความปั่นป่วนในท่อผสมอีกทั้งการเจาะร่องในการทดลองทำได้ยาก เนื่องจากข้อจำกัดในด้านสร้างท่อผสมเกลียวภายในจากเครื่องปรีน 3 มิติที่ทำได้ยาก และ การควบคุมขอบเขตในการทดลอง

#### 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาและออกแบบอัตราส่วนที่เหมาะสมของท่อเจาะร่องในภายในท่อผสมที่ทำให้การประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างน้ำและอากาศ และการผสมระหว่างเฟสของเหลวและเฟสอากาศมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

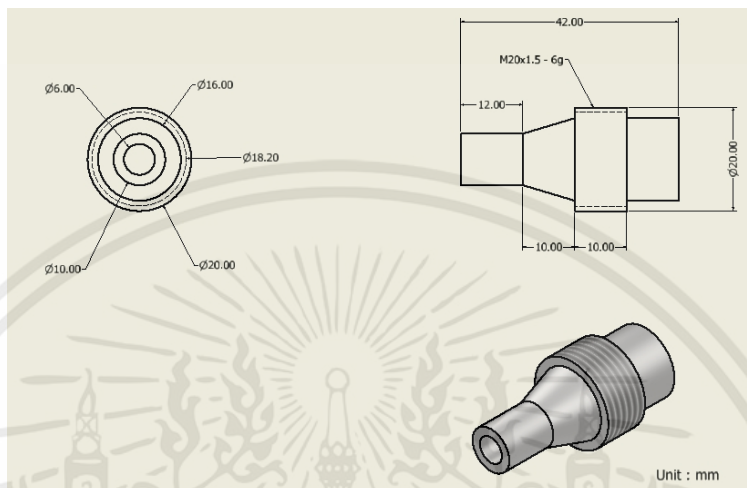
#### 1.3 สมมติฐานการศึกษา

1.3.1 การแลกเปลี่ยนมวลระหว่างเฟสน้ำ และเฟสอากาศในท่อผสมแบบท่อเจาะร่องใน มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนมวลดีกว่าท่อแบบราบเรียบ

1.3.2 ท่อผสมแบบท่อเจาะร่องในจะมีความดันตกคร่อมที่เกิดภายในท่อน้อยกว่า ที่อัตราการไหลสูง เมื่อเทียบกับการติดตั้งเครื่องเกลียวภายในท่อ (Static Mixer)

## 1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 กำหนดให้ท่อผสมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร และหัวฉีดเหนี่ยวนำเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มม. โดยอ้างอิงจากในงานวิจัยของนายจิรพล เนียมพิงสกุล และคณะ<sup>[1]</sup>



รูปที่ 1.1 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศในงานวิจัยของนายจิรพล เนียมพิงสกุล และคณะ

- 1.4.2 กำหนดให้ของเหลวปฐมภูมิที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ น้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และอากาศที่เหนี่ยวนำเป็นของไหลทุติยภูมิ
- 1.4.3 การจำลองนี้พิจารณาการไหลของน้ำโดยกำหนดอัตราการไหลที่ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที ความดัน 1 บรรยากาศ
- 1.4.4 กำหนดให้การออกแบบหัวฉีดเหนี่ยวนำ, ท่อผสมราบเรียบ และท่อผสมแบบเซาะร่องใน โดยใช้ โปรแกรม SOLIDWORKS และจำลองการทดลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT
- 1.4.5 ของไหลแบบสภาวะคงตัวไม่ขึ้นกับเวลา (Steady state), มีความหนืด (Viscous flow),อัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) และอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)
- 1.4.6 การวิเคราะห์การเหนี่ยวนำของน้ำที่กระทำกับอากาศ ใช้วิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยแบบจำลองความปั่นป่วนชนิด RNG k- $\epsilon$  turbulence model
- 1.4.7 อัตราส่วนความกว้างของร่องต่อความกว้างของท่อผสม(W/D) ที่ 0.15, 0.2, 0.25 และ 0.3
- 1.4.8 อัตราส่วนความลึกของร่องต่อความกว้างของท่อผสม(H/D) ที่ 0.15, 0.175, 0.2 และ 0.225
- 1.4.9 เซาะร่องด้วยจำนวนร่องที่ 10, 15, 20 และ 25 ร่อง

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ประกอบด้วย 7 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการไหลสองเฟสในท่อผสมราบเรียบและท่อผสมแบบท่อเซาะร่องภายใน และหัวฉีดเหนียวนำ
- 1.5.2 หาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และ การพัฒนาท่อผสม
- 1.5.3 ศึกษาการใช้โปรแกรม และออกแบบโมเดลท่อผสม และหัวฉีดเหนียวนำ ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS2020
- 1.5.4 จำลองการทดลองด้วยโปรแกรม Ansys Fluent
- 1.5.5 หาโมเดล และจำนวนเมชที่เหมาะสมกับชิ้นงาน
- 1.5.6 ทำการแก้ไขและปรับปรุงชุดทดลอง
- 1.5.7 นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทดลองในโปรแกรมทั้งหมดมาวิเคราะห์และสรุปผล
- 1.5.8 ตรวจสอบความถูกต้อง และทำเล่มวิจัยส่งเล่มให้อาจารย์ที่ปรึกษา

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)												
		ส.ค. 64	ก.ย. 64	ต.ค. 64	พ.ย. 64	ธ.ค. 64	ม.ค. 65	ก.พ. 65	มี.ค. 65	เม.ย. 65	พ.ค. 65			
1	ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง													
2	หาข้อมูลและพัฒนาท่อผสม													
3	ออกแบบหัวฉีดเหนียวนำและท่อผสมด้วยโปรแกรม Solidworks													
4	จำลองการทดลองด้วยโปรแกรม Ansys Fluent													
5	หา และจำนวนขอบเขตย่อยที่เหมาะสม													
6	ทำการแก้ไขและปรับปรุงชุดทดลอง													
7	นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทดลองในโปรแกรมทั้งหมดมาวิเคราะห์และสรุปผล													
8	ตรวจสอบความถูกต้อง และทำเล่มวิจัย													

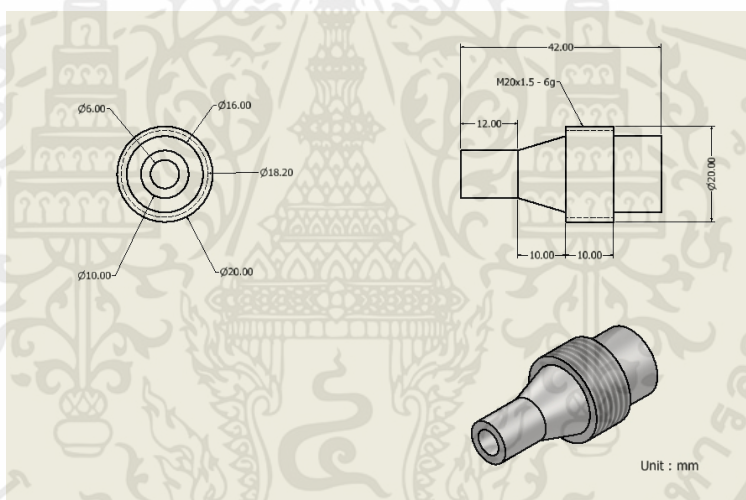
## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 หัวฉีดเหนียวนำ

##### 2.1.1 อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวนำ

นาย จิรพล และคณะ<sup>[1]</sup> ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบรูปร่างของหัวฉีด (Nozzle) ค่าอัตรา การไหลของอากาศผ่านท่อเวนทูรีต่ออัตราการไหลของน้ำที่มีค่าสูง ที่ทำให้มีสมรรถนะการเติมอากาศสูงที่สุดและมีพลังงานที่สูญเสีย้น้อยที่สุด โดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณปลายหัวฉีดให้มีขนาดอยู่ที่ 6 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางของฐานหัวฉีดมีค่าเป็นสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายหัวฉีดซึ่งการออกแบบหัวฉีดเหนียวนำ ขนาดและสัดส่วนเป็นไปตามมาตรฐานของ ASME (American Society Mechanical Engineering)



รูปที่ 2.1 ตัวแปรของของระยะต่างๆในการหัวฉีดเหนียวนำ

#### 2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างจำลองการออกแบบด้วยโปรแกรม

การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม จะต้องมีการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการสร้างแบบจำลอง เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบในการทดลอง โครงการงานการดำเนินงานในการออกแบบโมเดลท่อผสมด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SOLIDWORKS) และการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมแอนซิลฟลูเอนท์ (Ansys Fluent) ภายในงานวิจัยได้ศึกษาได้ศึกษาพฤติกรรมการเหนียวนำและการผสมของทั้งสองเฟสระหว่างเฟสน้ำและอากาศ Ajay K. Agrawal และ Nathan J. Vardaman<sup>[2]</sup> ได้ศึกษาการพฤติกรรมผสมของเฟสของไหล2เฟส ภายในงานทฤษฎีบทได้พูดถึงการเลือกใช้โมเดลในการ

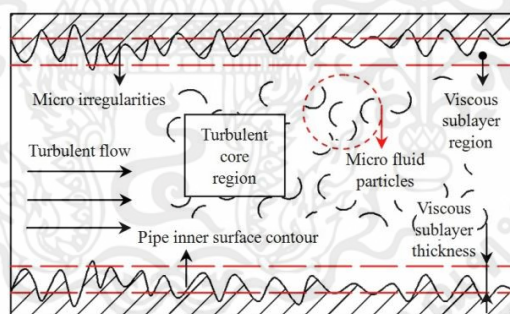
จำลองโมเดลแบบ VOF (Volume Of Fluid) จะเหมาะสำหรับการจำลองของไหลที่ผสมกัน โดยสนใจพื้นผิวของสารที่มีการสัมผัสกันและยังสามารถส่งผลได้แม่นยำและได้ผลดีในกรณีที่เฟสที่กระจายตัวน้อยอีกด้วย Mohamed Bennaya และคณะ<sup>[3]</sup> ได้เปรียบเทียบโมเดลในการจำลองของ k-epsilon โดยมีแบบ Standard , RNG และ Realized ผลการจำลองโมเดล RNG k- epsilon มีค่าความผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด และ Standard k-model มีความผิดพลาดมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า RNG k- epsilon model นั้นยังสามารถใช้ร่วมกับการไหลปั่นป่วนที่มีช่วงของเลข Reynold Number ได้กว้างกว่าเมื่อเทียบกับโมเดลอื่น

## 2.3 วรรณกรรมเกี่ยวกับการออกแบบท่อเซาะร่อง

การศึกษาการออกแบบท่อเซาะร่องภายใน และพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการไหล จะใช้อ้างอิงในการออกแบบรูปร่างของท่อผสม เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และเวลาระหว่างน้ำและอากาศที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างเฟสได้ดีขึ้น

### 2.3.1 พื้นที่ผิว

ความขรุขระของพื้นที่ผิวจะสร้างความปั่นป่วนใกล้พื้นที่ผิว ( laminar sub layer) ซึ่งทำให้เกิดการผสม และการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น<sup>[4]</sup>

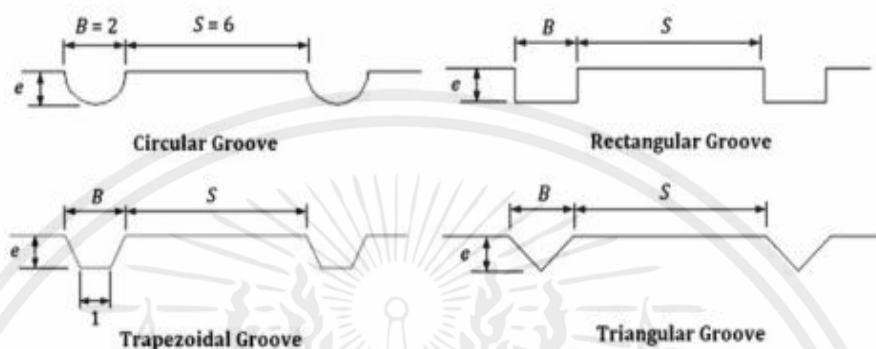


รูปที่ 2.2 แสดงความขรุขระภายในท่อ

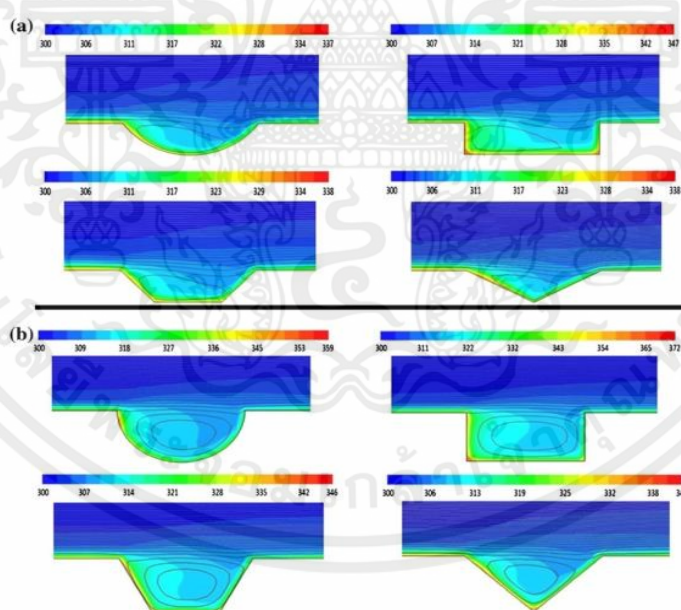
### 2.3.2 รูปแบบทางเรขาคณิตของร่องภายในท่อผสม

การศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบท่อผสม เพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการเหนียวน้ำ และการผสมของของไหลระหว่างน้ำและอากาศภายในท่อผสม โดยออกแบบท่อผสมเซาะร่อง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวการสัมผัสระหว่างทั้ง 2 เฟส Abdulmajeed A. Ramadhan, Yaser T. Al Anii และ Amer J. Shareef<sup>[5]</sup> ได้สร้างแบบจำลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมของการไหลของเหลวที่เกิดการปั่นป่วนภายในท่อที่ทำารเซาะร่องใน 4 รูปแบบ คือ รูปแบบสามเหลี่ยม

(Triangular), รูปแบบวงกลม (Circular), รูปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) และรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) และทำการทดลองที่อัตราส่วนความลึกของร่องต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  $\frac{e}{D}$  เป็น 0.1 และ 0.2



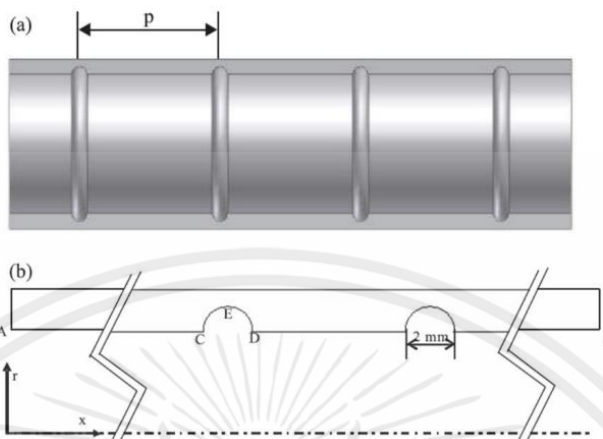
รูปที่ 2.3 แสดงรูปเรขาคณิตของร่องและอัตราส่วนความลึกของร่องต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ  $\frac{e}{D}$  เท่ากับ 0.1 และ 0.2



รูปที่ 2.4 แสดงเส้นการไหลของของไหล และการกระจายตัวความร้อนในร่องที่เลข  $Re = 15,000$

a)  $\frac{e}{D} = 0.1$  และ b)  $\frac{e}{D} = 0.2$

### 2.3.3 อิทธิพลของความกว้าง ความลึก และมุมร่องที่ส่งผลต่อการผสมของของไหลภายในท่อ



รูปที่ 2.5 แสดงพื้นที่ของการเซาะร่อง

Agnimitra Biswas และคณะ<sup>[4]</sup> ได้ทำการทดลอง และศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบของ มุมร่อง, ความกว้าง, ความลึกของร่องภายในท่อที่มีอิทธิพลต่อลักษณะการไหลของของไหล และการถ่ายเทความร้อนบนท่อด้วยความเร็วของน้ำเริ่มต้น 0.5 เมตรต่อวินาที จำนวนร่องที่ใช้มีจำนวน 4-6 ร่อง, ความกว้างของร่อง มีขนาด 1.5 มิลลิเมตร-2.5 มิลลิเมตร, ความลึกของร่อง 0.75 มิลลิเมตร-1.25 มิลลิเมตร

จากการทดลองพบว่า ณ จำนวนร่องที่เท่ากัน (groove) ความกว้างของร่อง และมุมร่องมีอิทธิพลต่อการไหล และการถ่ายเทความร้อน ส่วนความลึกของร่องไม่มีความสำคัญทางนัยสำคัญ

### 2.3.4 การแลกเปลี่ยนออกซิเจนระหว่างน้ำกับอากาศ

Dong-sheng CHENG และคณะ<sup>[6]</sup> ได้ทำการศึกษาการแลกเปลี่ยนของ ออกซิเจนในน้ำกับ ออกซิเจนในอากาศและสนใจไปที่ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำเป็นดัชนีที่สำคัญของคุณภาพน้ำ โดยทั่วไป ออกซิเจนละลายในน้ำมีต้นกำเนิดมาจากบรรยากาศที่นี้และการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชที่อาศัยอยู่ในน้ำ การหดตัวและการขยายตัวอย่างกะทันหัน (SCE) จากการไหลของท่อ SCE สองท่อที่มีพฤติกรรมที่ซับซ้อนกว่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาก ตัวอย่างเช่น ถ้าเกิดการแตกตัวของฟองและการรวมตัว ฟองอากาศจะนำออกซิเจนจำนวนมากลงไปใต้น้ำและทำให้ความเข้มข้น DO ของแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ส่งผลให้ลักษณะการถ่ายเทออกซิเจนที่ซับซ้อนมากขึ้น ในการทำงานในอนาคตควรคำนึงถึงปฏิสัมพันธ์ของฟองอากาศเพื่อจำลองสภาพการใช้งานจริงให้แม่นยำยิ่งขึ้น

## บทที่ 3

### ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 ทฤษฎีเจ็ท

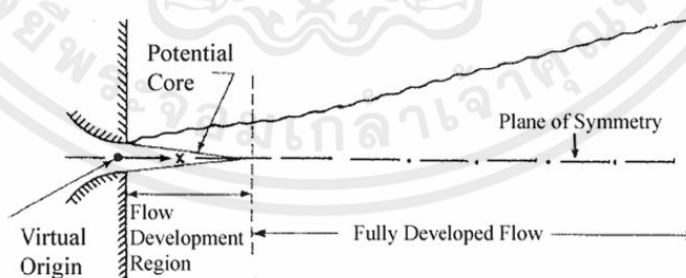
##### 3.1.1 ความรู้เบื้องต้นของเจ็ท

เจ็ทหรือหัวฉีด คืออุปกรณ์ที่ฉีดพ่นของเหลวให้เป็นฝอย ของเหลวจะแตกตัวเป็นละอองเล็กๆ และพุ่งกระจายเป็นละอองได้ต้องใช้พลังงาน ดังนั้น หัวฉีดจึงถูกแบ่งออกตามประเภทของพลังงานที่ก่อให้เกิดละออง หัวฉีดโดยทั่ว ๆ ไป จะทำหน้าที่ดังต่อไปนี้ เช่น ทำให้สารแตกกระจายเป็นละอองสาร, ควบคุมการกระจายของละอองสาร และ ควบคุมอัตราการไหลของสาร โดยเจ็ทหรือหัวฉีดถูกแบ่งออกตามประเภทของพลังงานที่ก่อให้เกิดละอองได้ดังนี้ หัวฉีดประเภทใช้แรงดันของเหลว, หัวฉีดใช้แรงลม, หัวฉีดใช้แรงเหวี่ยง, หัวฉีดใช้ความร้อน, หัวฉีดใช้ประจุไฟฟ้า

โดยในงานวิจัยนี้ จะกล่าวถึงหัวฉีดประเภทใช้แรงดันของเหลว เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้อ้างอิงในการจำลองหัวฉีดแบบรูปรอย เป็นหัวฉีดที่นิยมใช้กันมาก หัวฉีดแบบนี้มีขนาดของรูฉีด และแผ่นทำให้เกิดกระแสวนให้เล็กลงหลายขนาด เพื่อให้ได้อัตราการไหลและขนาดของ ละอองสารที่ต้องการมักจะใช้แรงดันสูงตั้งแต่ 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้วขึ้นไป

##### 3.1.2 โครงสร้างและการพัฒนาของเจ็ทอิสระ

เจ็ทอิสระถูกสร้างขึ้น เมื่อมีการเปิดแหล่งกำเนิดขนาดเล็กจากแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ที่ไปสู่ชั้นบรรยากาศหรือสภาพแวดล้อม โดยเจ็ทอิสระอาจเกิดขึ้นที่ด้านล่างของภาชนะที่จัดเก็บหรือด้านข้างของภาชนะที่จัดเก็บ และแม้ว่าจะเกิดขึ้นที่ไหนก็ตาม สามารถใช้สมการเบอร์นูลลีเพื่ออธิบายคุณลักษณะของมันได้



รูปที่ 3.1 ลักษณะกระแสไหลของเจ็ท

บริเวณที่ 1 : บริเวณที่มีการลู่เข้า (The convergent zone) บริเวณนี้จะเป็นแกนหลัก (Potential core) ของเจ็ท ซึ่งความเร็วที่เส้นแกนกลางของเจ็ทจะมีค่าเท่ากับความเร็วของเจ็ทที่ออกมา

จากหัวฉีด บริเวณนี้มีระยะตั้งแต่  $4d$  ถึง  $6d$  จากปลายหัวฉีด โดยที่  $d$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางตรงทางออกของหัวฉีด

บริเวณที่ 2 : บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลง (The transition zone) การไหลในบริเวณนี้จะมีรูปร่างคล้ายลักษณะวงกลม ความเร็วเส้นแกนกลางจะเริ่มมีแนวโน้มลดลง เปรียบดังฟังก์ชันของ  $x-0.5$  โดยที่  $x$  คือระยะห่างของปลายหัวฉีดเมื่ออิงจากแนวเส้นแกนกลาง โดยจะสามารถเกิดขึ้นได้ที่ระยะ  $6d$  ไปจนถึงที่ระยะ  $20d$  บริเวณนี้จะเกิดปฏิกิริยาการผสมกันก็ต่อเมื่อทั้งสองด้านบรรจบกันจากชั้นความเค้น

บริเวณที่ 3 : บริเวณที่มีการจำลองตัวเอง (The self-similar zone) รูปร่างความเร็วของความเร็วที่อิงจากเส้นแกนกลางในบริเวณนี้ จะมีลักษณะรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน ของทุกจุดบนระยะ  $x$  โดยความเร็วที่อิงจากเส้นแกนกลางสามารถเขียนเปรียบเทียบได้เป็นฟังก์ชันของ  $x-1$

บริเวณที่ 4 : บริเวณที่มีการสลายตัว (The termination zone) ความเร็วที่อิงจากเส้นแกนกลางในบริเวณนี้จะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่ไม่สามารถสรุปพฤติกรรมและกลไกการไหลครั้งนี้ได้อย่างแน่ชัด

บริเวณที่ 3 คือบริเวณที่เจ็ทอิสระพัฒนาแล้ว และบริเวณที่ 4 คือบริเวณที่เจ็ทได้มีการถูกทำลายลง โดยที่ในบริเวณที่ 1, 2 และ 3 นั้น ของไหลรอบเจ็ทจะถูกเหนี่ยวนำเข้ามาในเส้นแกนกระแสหลักและเกิดการผสมกันกับของไหลหลัก บริเวณที่ 4 กระแสของเจ็ทจะเกิดการสลายตัวอันเนื่องมาจากของไหลหลักได้กระจายตัวออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอก

การขยายออกของเจ็ท จะเกิดขึ้นจากการตั้งอากาศจากสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆของเจ็ทมาเหนี่ยวนำกับของไหล โดยที่อัตราส่วนของปริมาตรสุทธิของกระแสเจ็ทต่อปริมาตรเริ่มต้นที่ระยะใดๆ นับจากปลายหัวฉีด จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเร็วเริ่มต้น ( $U_0$ ) ต่อความเร็วที่ระยะใดๆที่กำหนด ( $U_x$ ) โดยมีชื่อว่า “อัตราส่วนการเหนี่ยวนำ” หรือ “Inducing ratio”

$$\frac{Q_x}{Q_0} = C \frac{U_0}{U_x}$$

โดย  $Q_x$  คือ อากาศผสมสุทธิ ที่ระยะ  $x$  จากหัวฉีด,  $\frac{m}{s_2}$

$C$  คือ สัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำ (มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับกระแสอิสระแบบหน้าตัดกลม)

ความรู้และความเข้าใจในส่วนของบริเวณสามบริเวณแรกของเจ็ทนั้น ก็สามารถกล่าวได้ว่าเพียงพอแล้ว ในด้านของกระบวนการวิศวกรรม เพราะความแตกต่างของความเร็วบริเวณพื้นผิวในช่วงที่เกิดความไม่ต่อเนื่องอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมและเจ็ทนั้นมีมากเกินไป สามารถทำให้เกิดกระแสไหลวน หรือ Eddy ก่อให้เกิดการผสมกันในบริเวณโดยรอบข้าง นำไปสู่การลดลงของความเร็วของของไหลภายในเจ็ท แต่ทว่าของไหลในบริเวณรอบนอกของเจ็ทกลับมีความเร็วมากขึ้น โดยสามารถกล่าวโดย

สรุปได้ว่า ของไหลในบริเวณรอบนอกจะถูกเหนี่ยวนำเข้ามา ทำให้เกิดการผสมกันกับกระแสของเจ็ท ทำให้ความกว้างของเจ็ทขยายเพิ่มขึ้น

### 3.1.3 ปัจจัยที่มีผลกระจายตัวของลำเจ็ท

มีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อการกระจายตัวของลำเจ็ทประกอบด้วย ด้านความเร็วของเจ็ทที่บริเวณทางออก ความดันของไหลที่ใช้ ระยะห่างของหัวฉีด รูปแบบของหัวฉีด ความสูงของฉีด ขนาดรูของหัวเจ็ท และอุณหภูมิของของไหล ณ ตอนนั้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท ความไม่เสถียรของการไหลลักษณะนี้ เป็นสาเหตุของการไหลแบบปั่นป่วนภายในของเหลวที่มีความหนาแน่นที่ต่างกัน จึงทำให้เกิดกระแสวนหมุนรอบลำเจ็ท

#### 3.1.3.1 รูปแบบความเร็วของเจ็ท ณ ตำแหน่งทางออกของหัวฉีด

สภาวะเริ่มต้นของเจ็ทมีผลต่อกระแสการพัฒนาของเจ็ท รูปแบบการไหลของเจ็ทสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ แบบราบเรียบ (Laminar), เสมือนราบเรียบ (Nominally laminar), ถูกรบกวนอย่างมาก (Highly disturbed) และ ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ (Fully turbulent) การไหลแบบราบเรียบ และ ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์เป็นสภาวะที่มีข้อจำกัดเยอะมาก จึงเลือกรูปแบบเสมือนราบเรียบมาพิจารณาและ ถูกรบกวนอย่างมากรูปแบบความเร็วเฉลี่ยที่ขึ้นความเค้น ณ ตำแหน่งทางออกของหัวฉีดจะมีลักษณะเดียวกันกับรูปแบบแบบบลาสเซียส (Blasius's profile) ของกรณีการไหลแบบราบเรียบ ความไม่เสถียรของชั้นความเค้นเหนี่ยวนำให้เกิดความผันผวนโดยจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของเจ็ท การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ตำแหน่งทางออกของหัวฉีด สามารถกำหนดได้เป็น

$$\text{ความหนาของการกระจัด} \quad \delta = \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy = 1.72 \sqrt{\frac{\nu x}{U}}$$

$$\text{ความหนาโมเมนต์} \quad \theta = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy = 0.665 \sqrt{\frac{\nu x}{U}}$$

$$\text{แรงเฉือนของผนัง} \quad \tau = 0.332 \sqrt{\frac{\rho \mu U^3}{x}}$$

$$\text{แรง} \quad F = 0.332 \sqrt{\rho \mu U^3}$$

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

ค่าของสัดส่วนรูปร่างมีค่าเท่ากับ 2.5 สำหรับชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ เท่ากับ 1.4 สำหรับชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ค่าของสัดส่วนรูปร่างที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 2.5 เป็นชั้นขอบเขตแบบเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ

#### 3.1.3.2 เลขเรย์โนลด์์ของเจ็ท

เลขเรย์โนลด์์ของเจ็ทแบบแบนราบจะถูกกำหนดโดย เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ความเร็วเฉลี่ย  $U_0$  และความหนืดไคเนมาติก  $\nu$  ของของไหลเจ็ท

$$Re = \frac{U_o d}{\nu}$$

ถ้าเจ็ทถูกฉีดผ่านคอนทัวร์ในแนวระนาบของหัวฉีด การแปรเปลี่ยนของความเร็ว ณ ทางออกของหัวฉีดรูปร่างของความเร็วมักจะมีลักษณะแบบหมวกทรงสูง และมีค่าความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกับความเร็วเฉลี่ยที่เส้นแกนกลาง ณ จุดทางออกของหัวฉีด เลขเรย์โนลด์ของเจ็ทสามารถ นิยามได้จากครึ่งความกว้าง และความเร็วเฉลี่ยที่เส้นแกนกลาง ณ จุดใด ๆ

$$Re_b = \frac{U_o d_u}{\nu}$$

### 3.1.3.3 มาตรฐานความยาวของความปั่นป่วน (Turbulence Length Scales)

การไหลแบบปั่นป่วนจะประกอบด้วยกระแสวน (Eddy flow) ในหลายๆขนาด พลังงานจากการปั่นป่วนของกระแสวนถูกถ่ายโอนไปเป็นการเกิดขึ้นของกระแสวนที่ส่วนที่ใหญ่ที่สุดของการเคลื่อนที่ พลังงานในส่วนนี้ได้ถูกส่งผ่านไปยังมาตรฐานที่เล็กกว่าและเล็กลงเรื่อย ๆ เรียกว่าการยืดตัวของกระแสวน (Vortex stretching) ที่มาตรฐานที่เล็กที่สุดพลังงานจลน์ของกระแสวนค่อยๆลดลงเนื่องจากความหนืด ที่มาตรฐานขนาดใหญ่โดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Non-isotropic) และมีแนวโน้มที่จะไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่า อย่างไรก็ตาม การไหลแบบปั่นป่วนหลายชนิด มาตรฐานการเคลื่อนที่โดยละเอียดเป็นไปแบบเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic) ค่าเฉลี่ยขนาดของกระแสวนเรียกว่าผลรวมมาตรฐานความยาว ขนาดของกระแสวนที่เล็กที่สุดซึ่งค่อยๆสลายไปเรียกว่า มาตรฐานคอลโมโกรอฟ (Kolmogorov scale)

## 3.2 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ

ปรากฏการณ์เหนี่ยวนำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นใน Ejector โดยเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำไหลทุติยภูมิ (Air) โดยการให้พลังงานความกลจากเครื่องสูบน้ำของของไหลปฐมภูมิ (น้ำ) เปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ทำให้ความดันในท่อผสม (Mixing Chamber) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลอากาศบริเวณโดยรอบที่มีความดันสูงกว่าจะถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ท่อผสม

## 3.3 วิธีกร Finite volume method

### 3.3.1 บทนำ

ปัจจุบันนี้ ได้มีระเบียบวิธีการคิดโดยใช้หลักการคำนวณต่างๆเข้ามาประยุกต์ใช้ เพื่อให้เกิดความสะดวกและความแม่นยำมากขึ้น ในการคำนวณเชิงวิศวกรรมเพื่อเป็นการจำลองวิธีและแบบการ โดยค่าที่ได้ออกมาจะแม่นยำในระดับหนึ่งและสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตจริงสำหรับการคำนวณได้ ซึ่ง

ระเบียบวิธีการนั้นได้มีการคิดค้นหลายวิธี ในที่นี้จะเป็นการนำเสนอวิธีการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณและการจำลองการทดลองซึ่งก็คือระเบียบวิธีการทางไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) เป็นวิธีการในการลดรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของพีชคณิตเพื่อให้สามารถหาค่าอย่างง่าย การสร้างสมการมีลักษณะคล้ายกับระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) หรือระเบียบวิธีการผลต่าง (Finite Difference Method: FDM) ไฟไนต์โวลุ่มจะอ้างอิงถึงพื้นที่ผิวที่อยู่รอบๆ จุดต่อ (Node point) การคำนวณเป็นการปริพันธ์ (Integral) สมการอนุพันธ์ที่ประกอบไปด้วยค่าเวกเตอร์ของสมการพื้นผิวแต่ละพื้นผิว

ความได้เปรียบของระเบียบวิธีการนี้คือสามารถใช้ได้ดีในแบบจำลองที่มีการแบ่งเอลิเมนต์ที่ไม่เป็นระเบียบ (Unstructured meshes)

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการประยุกต์ในการใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) กับ สมการพื้นฐานของการไหล โดยจะทำการศึกษาขั้นตอนและวิธีการต่างๆ ของระเบียบวิธีนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย การดิสครีไทซ์ (Discretization) ของสมการ เพื่อเป็นการประมาณค่าสเกลลาร์ในบริเวณผิวของปริมาตรควบคุม (Control Volume) ที่ถูกกำหนดไว้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่แตกต่างกัน รวมถึงเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) และกระบวนการที่ใช้ในการหาคำตอบ

### 3.3.2 วิธี Finite volume

กระบวนการวิธีการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย เพื่อให้เป็นสมการพีชคณิตนั้น ถูกเรียกว่า “กระบวนการดิสครีไทเซชัน” (Discretization Method) โดยกระบวนการนี้เป็นการนำวิธี Finite volume เข้ามาใช้ในการคำนวณ โดยหลักการคืออินทิเกรตสมการควบคุมตลอดปริมาตรควบคุม (Control volume) จากนั้นใช้แผนวิธีประมาณค่าเพื่อแปลงพจน์อนุพันธ์ให้เป็นพจน์ผลต่าง โดยจะต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) จากนั้นจะได้สมการ Discretized นำไปสู่การแก้ระบบสมการเพื่อหาคำตอบออกมานั่นเอง

การใช้ระเบียบวิธี Finite volume ในการแก้ปัญหาสมการการไหลจะสามารถทำได้โดยทำการจัดรูปสมการพื้นฐานของการไหลให้อยู่ในรูปของสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์พื้นฐานรูปทั่วไปของตัวแปร  $\phi$  และอาจกล่าวได้ว่าสมการนี้เป็นผลระหว่าง Convection term = Diffusion term + Source term ดังที่แสดงดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial(pu\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(pv\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi}$$

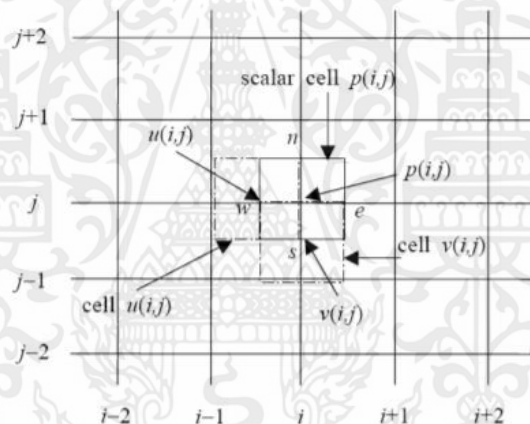
โดย  $\Gamma_{\phi}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)

การคำนวณโดยใช้วิธี Finite volume จะเริ่มต้นโดยการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยตลอดทั้งปริมาตรควบคุมที่ถูกกำหนด จากนั้นจะเป็นการดิสครีไทซ์ (Discretize) ลงบนจุดที่ต่อเนื่องในบริเวณ

ต่างๆ บนปริมาตรควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ ซึ่งเป็นการแสดงภาพของปริมาตรควบคุมแบบ Staggered grid เพื่อทำการเปลี่ยนรูปสมการพื้นฐานจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพื่อทำการเปลี่ยนไปเป็นสมการพีชคณิต

$$\int_{\Delta v} \left[ \frac{\partial(pu\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(pv\phi)}{\partial y} \right] dV = \int_{\Delta v} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \right] dV$$

สมการความสัมพันธ์ข้างต้นเป็นสมการพื้นฐานรูปทั่วไปที่ถูกเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอินทิกรัล ในส่วนของด้าน Staggered grid คือการแบ่งกริดหรือช่องขอบเขต เพื่อให้ช่องขอบเขตความเร็วอยู่ เชื่อมต่อกันระหว่างจุดต่อของตัวแปร Scalar เพื่อจุดประสงค์ให้มีความสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) และเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องจากข้อผิดพลาดจากวิธีคำนวณเชิงตัวเลข จุดเด่นของ Staggered grid คือสามารถหาค่าสมบัติค่าอื่นได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีการพิจารณาค่าที่ขอบ โดยการ จัดเรียงกริดของ ความดัน (Pressure)  $p$  และความเร็ว (Velocity)  $u$  และ  $v$  ดังที่แสดงในภาพ



รูปที่ 3.2 การวางเซลล์ในปริมาตรควบคุมของความดันและความเร็วในระบบ Staggered grid

จากภาพ การจัดเรียงเซลล์ในรูป มีการจัดเรียงตัวที่ซ้อนทับกันในบางส่วน เพื่อต้องการทำให้ สมการอนุรักษ์โมเมนตัมหรือ Source term ที่ได้จาก Pressure gradient จากเซลล์ศูนย์กลางทั้งสอง แนวแกนของสมการ Navier-Stokes มีค่าเท่ากับศูนย์ ในทุกโหนด แต่เมื่อนำบริเวณของมาพิจารณาจะ สังเกตเห็นว่า Pressure gradient มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งมีพฤติกรรมสอดคล้องกับ Discretize และ สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

### 3.3.3 สมการควบคุม Discretization

จากสมการควบคุมพื้นฐาน (Discretisation) ซึ่งประกอบด้วย เทอมการพา และเทอมการแพร่ ซึ่งในแต่ละเทอมสามารถดิสครีไทซ์ ได้ดังนี้

### 3.3.3.1 เทอมการพา (Convection Term)

การดิสครีไทซ์เทอมของการพาทำได้โดยอินทิเกรต  $\phi$  ตลอดทั้งสมการควบคุม จะได้

$$\int_V \left[ \frac{\partial(pu\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(pv\phi)}{\partial y} \right] dV$$

จะได้เทอมของการพาในแกน x และแกน y

$$\int_{\Delta v} \frac{\partial(pu\phi)}{\partial x} dV = (puA)_e \phi_e - (puA)_w \phi_w$$

$$\int_{\Delta v} \frac{\partial(pv\phi)}{\partial y} dV = (pvA)_n \phi_n - (pvA)_s \phi_s$$

เมื่อ  $\phi_e, \phi_w, \phi_n, \phi_s$  เป็นค่าของ  $\phi$  ที่ผนังเซลล์ ที่สามารถหาได้จากการประมาณที่เหมาะสม

### 3.3.3.2 เทอมการแพร่ (Diffusion Term)

การดิสครีไทซ์เทอมของการแพร่ทำได้โดยอินทิเกรต  $\phi$  ตลอดทั้งสมการควบคุม จะได้

$$\int_{\Delta v} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dV$$

จะได้เทอมของการพาในแกน x และ แกน y

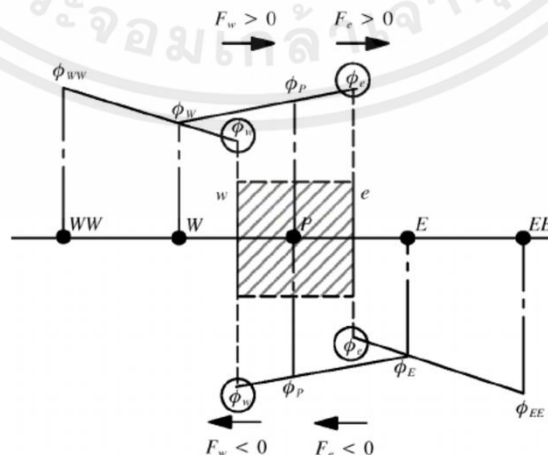
$$\int_{\Delta v} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] dV = \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w$$

$$\int_{\Delta v} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] dV = \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_n - \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_s$$

### 3.3.4 การประมาณค่าอินทิกรัลพื้นผิว

ในการประมาณค่าของ  $\phi$  บนบริเวณผิวของปริมาตรควบคุมในเทอมการพา สามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีต่างๆ แต่ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเพียงแบบเดียว คือ ผลต่างอันดับสอง (Second order upwind)

วิธีผลต่างอันดับสอง (Second order upwind) เป็นการประมาณค่า  $\phi$  ภายในพื้นที่ผิวของปริมาตรโดยใช้ตำแหน่งของกริด (Upstream)ข้างเคียง



### รูปที่ 3.3 แสดงกริดในปริมาตรควบคุม

โดยจะยกตัวอย่างเฉพาะที่ตำแหน่ง  $\phi_e$

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_p - \frac{1}{2}\phi_w \quad \text{เมื่อ } Fe > 0$$

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_E - \frac{1}{2}\phi_{EE} \quad \text{เมื่อ } Fe < 0$$

### 3.3.5 เงื่อนไขทางเข้าที่ทางเข้า (Boundary condition)

งานวิจัยนี้กำหนดตำแหน่งทางเข้าเป็นรูปร่างของความเร็วทางเข้า

### 3.3.6 กระบวนการหาคำตอบ

การหาคำตอบแบบ SIMPLE Algorithm (Semi-implicit method for pressure-linked equation )

เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณความเร็ว และความดันในสมการอนุรักษ์โมเมนตัมให้สัมพันธ์กับสมการต่อเนื่อง โดยใช้สมการ Pressure-Correction ในการคำนวณ ด้วยการอินทิเกรตสมการอนุรักษ์โมเมนตัม จะได้สมการดิสครีไทซ์ ดังนี้

$$\text{ในแนวแกน } x \quad ; \quad a_p a_p = \sum_{nb} a_{nb} a_{nb} + S_v V + (p_i + p_j) A$$

$$\text{ในแนวแกน } y \quad ; \quad a_p u_p = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + S_v V + (p_i - p_j) A$$

$$\text{โดย} \quad a_p a_p = \sum_{nb} a_{nb} a_{nb} + S_v V + (p_i + p_j) A$$

$$\sum_{nb} a_{nb} a_{nb} = a_N v_N + a_S v_S + a_E v_E + a_W v_W$$

ค่า  $u'$  อยู่บนพื้นฐานค่า  $p'$  และเพื่อสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$a_w u'_w = \sum_{nb} a_{nb} u'_{np} + (p'_w - p'_p) A_w$$

$$a_s v'_s = \sum_{nb} a_{nb} v'_{np} + (p'_s - p'_p) A_s$$

โดยที่กำหนดให้  $\sum_{nb} a_{nb} u'_{np}$  และ  $\sum_{nb} a_{nb} v'_{np}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อความง่ายของการหาคำตอบ (Patankar. 1980) เมื่อการไหลสอดคล้องกับสมการคล่องกับสมการอนุรักษ์มวล จะได้สมการของค่าแก้ไขความเร็ว (Velocity correction equation) ของ  $u_w$  เป็น

$$a_s u'_s = (p'_s + p'_p) A_w$$

หาร  $a$  ตลอดสมการจะได้

$$u'_w = d_w (p'_w - p'_p)$$

$$\text{เมื่อ} \quad d_w = \frac{A_w}{a_w}$$

ดังนั้นจะได้สมการ Velocity-correction

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

โดยพิจารณาแบบเดียวกันสำหรับ  $u_e$  จะได้สมการ Velocity-correction

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_E - p'_p)$$

เมื่อแทนค่าของความเร็ว (Velocity-correction) จากสมการข้างต้น จะได้สมการ (Pressure-correction equation) เป็น

$$a_p \dot{p}_p = a_N \dot{p}_N + a_S \dot{p}_S + a_E \dot{p}_E + a_W \dot{p}_W + b$$

โดย

$$a_N = \rho d_n A_n$$

$$a_S = \rho d_s A_s$$

$$a_W = \rho d_w A_w$$

$$a_E = \rho d_e A_e$$

$$b = (\rho u^* A)_e - (\rho u^* A)_w + (\rho v^* A)_n + (\rho v^* A)_s$$

### 3.4 VOF (Volume of Fluid)

ในการจำลองการไหลเมื่อการไหลมีหลายเฟส สามารถใช้แบบจำลอง VOF ในการจำลองได้ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ว่า โมเดล VOF อาศัยข้อเท็จจริงที่ว่าของไหล (หรือเฟส) สองอย่างหรือมากกว่าจะไม่เกิดการแทรกซึม ทั้งยังสามารถทำนายและคาดการณ์การเคลื่อนที่ของการไหลแบบหลายเฟส, ความผันผวนของของไหลและอากาศ, การก่อตัวของกระแสน้ำวน (Vortex), การสลายตัวของเจ็ท รวมไปถึงผลกระทบของพารามิเตอร์เชิงโครงสร้างและการปฏิบัติงาน โดยแบบจำลอง VOF นี้จะมีการอ้างอิงถึงสมการโมเมนตัมสำหรับของไหลที่เกิดขึ้นในระบบและอัตราส่วนเชิงปริมาตรของของไหลที่ระยะต่างๆ อินเตอร์เฟซระหว่างเฟสทำได้โดยการนำสมการความต่อเนื่องมาใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับเศษส่วนของปริมาตรของเฟสหนึ่งหรือมากกว่าในสถานะ transient หรือ steady โดยแบบจำลองมีสมการดังนี้

$$\frac{1}{\rho_a} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (r_a \rho_a) + \nabla \cdot (r_a \rho_a \bar{U}_a) \right] = [S_a + \sum_{\beta=1}^n (\dot{m}_{\beta a} - \dot{m}_{a\beta})]$$

โดย

- $r_a$  คือ ค่าสัดส่วนปริมาตรของเฟส a
- $\rho_a$  คือ ค่าความหนาแน่นของเฟส a
- $\bar{U}_a$  คือ ค่าความเร็วของเฟส a
- $S_a$  คือ อัตราการสร้างมวลของเฟส a
- $\dot{m}_{\beta a}$  คือ อัตราการถ่ายโอนมวลจากเฟส ไปยังเฟส a
- $\dot{m}_{a\beta}$  คือ อัตราการถ่ายโอนมวลจากเฟส a ไปยังเฟส

### 3.5 Governing Equations of Fluid Dynamics

#### การวิเคราะห์และลักษณะการไหล

โครงงานนี้ได้ศึกษาการไหลของน้ำที่เกิดจากความปั่นป่วนของการเหนี่ยวนำและการผสมระหว่างน้ำ และอากาศในท่อเจาะร่องด้วยโปรแกรม Ansys Fluent เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของของไหลด้วยความแม่นยำภายในโปรแกรม ซึ่งอาศัยหลักการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational

Fluid Dynamics) เป็นการคำนวณการเคลื่อนที่ของของไหลด้วยการแก้ระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stoke Equation) ที่อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ซึ่งประกอบด้วยสมการของการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน เพื่อยืนยันผลที่ได้จากทฤษฎีและการทดลองสำหรับการไหลของของไหลที่มีความหนืดซึ่งเป็นการไหลที่รวมผลที่เกิดจากการกระจายตัว และปรากฏการณ์ที่เกิดจากความหนืด โดยสมการควบคุม (Governing Equations) ดังนี้

- 1) สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial \rho}{\partial x_j} (\rho u_i) = 0$$

- 2) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_i$$

ซึ่งเทอมด้านซ้ายของสมการแสดงสมการแรงเฉื่อย และเทอมด้านขวาของสมการแสดงสมการที่เกี่ยวข้องกับความดัน

### 3.6 การจำลองความปั่นป่วน

หัวฉีดเหนียวน้ำที่ใช้ในการจำลองเพื่อเหนียวน้ำอากาศบริเวณโดยรอบของลำน้ำ ลำน้ำมีลักษณะการไหลด้วยความเร็วสูงเมื่อเทียบกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเหนียวน้ำ และมีค่าความหนืด (Viscosity) ต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจึงถูกนำมาพิจารณาพร้อมกับการใช้โปรแกรมนี้

#### 3.6.1 Turbulence model

แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence model) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณสมการความต่อเนื่อง และสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS) ในการไหลแบบปั่นป่วนในโมเดลความปั่นป่วนในโปรแกรม Ansys Fluent มีแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน 5 รูปแบบ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองด้วยโมเดลความปั่นป่วน  $k - \epsilon$  ในการจำลองกระแสการไหล เมื่อค่า  $k$  คือพลังงานศักย์ปั่นป่วน และ  $\epsilon$  คือ อัตราการกระจาย ซึ่งเหมาะกับการไหลที่เกิดการไหลวนภายในร่องสมการที่ใช้ในการจำลองมี ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon$$

เมื่อ  $t$  = เวลา, (s)

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

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

$$\begin{aligned}
 x &= \text{ระยะห่าง, (m)} \\
 u &= \text{ความหนืด, (kg/m.s)} \\
 t &= \text{ความหนืดปั่นป่วน, (kg/m.s)} \\
 G_k &= \text{พลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากผลเฉลี่ยองค์ประกอบความเร็ว, (J)} \\
 G_b &= \text{พลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว, (J)}
 \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \text{อัตราการกระจายตัว, ((J.m}^3\text{)/(kg.s))}$$

$$Y_M = \text{ค่าที่เกิดเมื่อมีการกระจายพื้นที่อย่างผันผวนในกระแสปั่นป่วนบีบอัดได้ในการกระจายตัวทั้งหมด (J)}$$

ค่าคงที่ในโมเดล

$$C_1 = 1.42$$

$$C_2 = 1.68$$

### 3.7 ทฤษฎีการถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวล หมายถึง การที่มีมวลสารในระบบของสารตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไป ที่มีความเข้มข้นต่างกัน โดยที่สารจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า เพื่อให้สารในระบบมีปริมาณความเท่าเทียมกัน และจะเกิดการถ่ายโอนระหว่างมวลสาร รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของความดันในสารระบบ และอุณหภูมิจะแลกเปลี่ยนมวลสารได้เช่นเดียวกัน โดยระบบการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายโอนระหว่างมวลสารสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การแพร่ของโมเลกุล (Molecular diffusion) เป็นการถ่ายเทมวลของสารที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random) โดยผ่านตัวกลางหรือของผสมนั้นจะหยุดนิ่ง

2. การพามวล (Convective mass transfer) เป็นการถ่ายเทมวลของสารที่เกิดจากตัวกลางของของผสมที่เกิดการเคลื่อนที่ สารในระบบจะสัมผัสกันในอีกเฟสโดยจะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

➤ ถ้าการไหลเป็นแบบ Laminar การถ่ายเทมวลมักเป็นแบบการแพร่

➤ ถ้าการไหลเป็นแบบ Turbulent การถ่ายเทมวลมักเป็นแบบการพามวลมากกว่า

การพามวล (Convective mass transfer) แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

1. การพามวลแบบบังคับ (Force convection) เป็นการพามวลที่ของไหลเคลื่อนที่โดยอาศัยปั๊มหรืออุปกรณ์อื่นๆ

2. การพามวลแบบธรรมชาติ (Natural convection) เป็นการพามวลที่ของไหลเคลื่อนที่ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ความเข้มข้น หรือความหนาแน่น

สมการแสดงฟลักซ์ของการพามวล

$$N_A = k_c \Delta C_A$$

เมื่อ  $N_A$  = ฟลักซ์เชิงมวลของโมเลกุล

$\Delta C_A$  = ผลต่างความเข้มข้นระหว่างค่าความเข้มข้นที่พื้นผิวกับค่าความเข้มข้นในของไหล

$k_c$  = สัมประสิทธิ์การพามวล (Convective mass transfer coefficient)

เรื่องการแพร่อาจถูกอธิบายได้ด้วยจากกฎของฟิค (Fick' law) “ฟลักซ์เชิงมวลต่อหน่วยพื้นที่ขององค์ประกอบหนึ่ง เป็นสัดส่วน กับความแตกต่างของความเข้มข้น”

คือ

$$\frac{m}{A} = D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

เมื่อ  $m$  = อัตราการไหลของมวล

$A$  = พื้นที่หน่วย

$D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสาร ผ่านตัวกลาง

$C$  = ความเข้มข้นของมวลสาร

$X$  = ระยะห่างระหว่างความเข้มข้น 2 จุดที่กำลังพิจารณา

## บทที่ 4

### การสร้างแบบจำลอง

#### 4.1 การสร้างแบบจำลอง

##### 4.1.1 การสร้างหัวฉีดเหนียวนำ

การออกแบบหัวฉีดและท่อผสมได้ทำการอ้างอิงจากในงานวิจัยนายจิรพล เนียมพินิจสกุล และคณะ[1] บริเวณปลายทางออกของหัวฉีดเหนียวนำมีเส้นผ่านศูนย์กลางใน 6 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 10 มิลลิเมตร ที่บริเวณทางเข้าของหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลางใน 12 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 16 มิลลิเมตร นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าที่อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม มีค่าเป็นหนึ่งต่อสามซึ่งทำให้เกิดการเหนียวนำอากาศที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงใช้ท่อผสมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 18 มิลลิเมตร

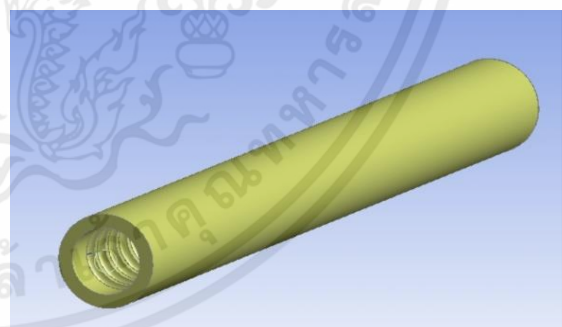
##### 4.1.2 รูปแบบการเจาะร่อง และการออกแบบท่อผสม

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการสร้างโมเดลของท่อผสมแบบราบเรียบ และท่อผสมแบบเจาะร่อง โดยได้ศึกษารูปทรงต่างๆในการเจาะร่องและได้แบ่งออกเป็น รูปวงกลม, รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส, รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, รูปสามเหลี่ยม และรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ได้ศึกษาขนาดความกว้าง, ความลึก และจำนวนของร่องภายในท่อผสมเพื่อให้ตรงกับจุดประสงค์ของการจำลองที่ต้องการให้ท่อผสมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

##### 4.1.2.1 ท่อผสมพื้นผิวราบเรียบ

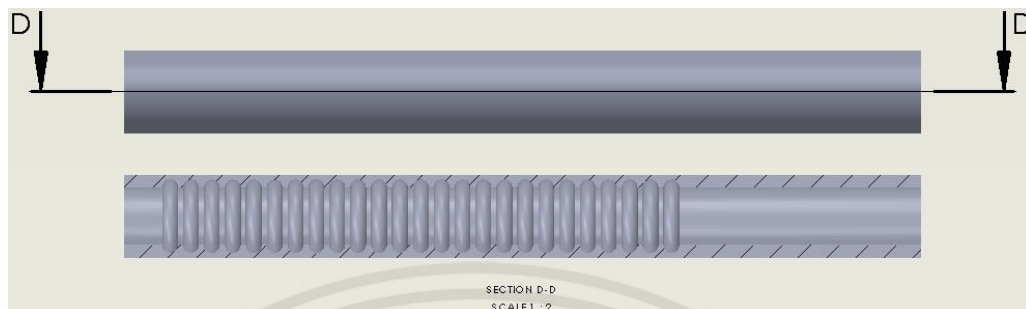


รูปที่ 4.1 ท่อผสมแบบราบเรียบ

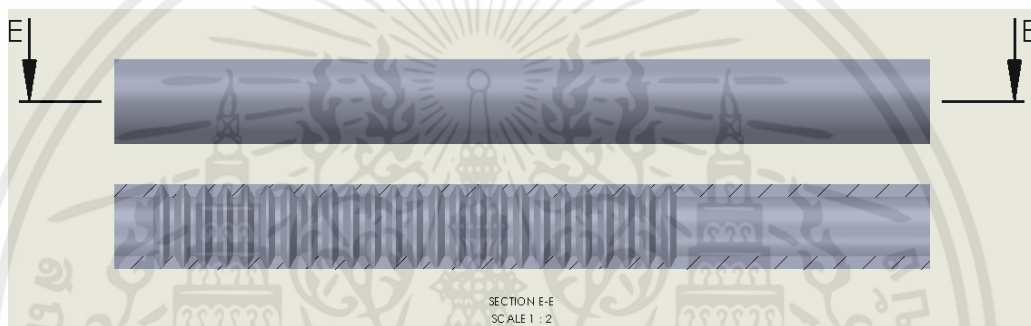


รูปที่ 4.2 ท่อผสมแบบเจาะร่อง

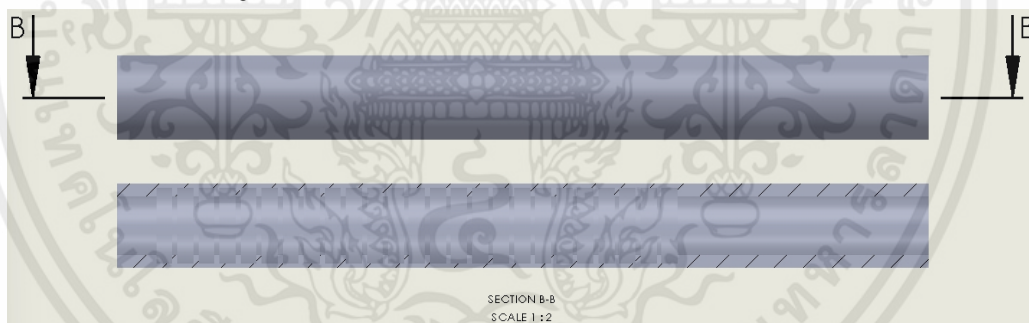
## 4.1.2.2 ท่อผสมแบบเซาะร่อง



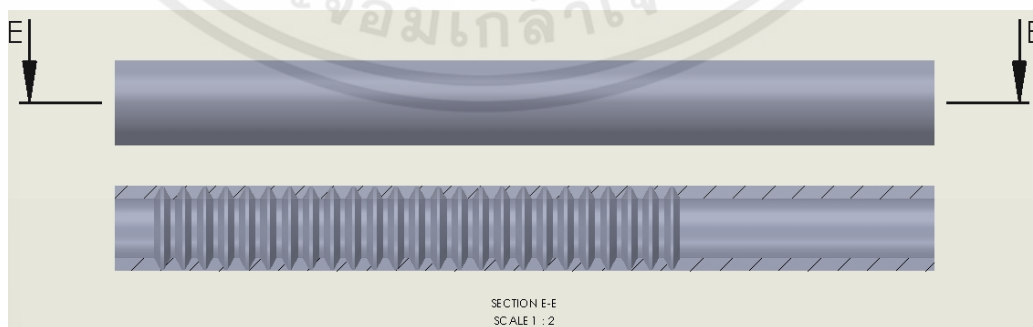
รูปที่ 4.3 ท่อผสมเซาะร่องผิวด้านในแบบวงกลม



รูปที่ 4.4 ท่อผสมเซาะร่องผิวด้านในแบบสามเหลี่ยม



รูปที่ 4.5 ท่อผสมเซาะร่องผิวด้านในแบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.6 ท่อผสมเซาะร่องผิวด้านในแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

#### 4.1.3 การสร้างขอบเขตย่อยที่เหมาะสม (mesh)

ทางคณะได้ทำการจำลองผลการทดลองจำนวนขอบเขตย่อยที่เหมาะสม โดยแบ่งจำนวนกริดออก ให้มีค่าความห่างของแต่ละค่าอยู่ที่ 50,000 กริด โดยเริ่มต้นจาก จำนวนกริดที่ 50,000 กริด ไปจนถึงที่ 500,000 กริด จากนั้นได้กำหนดการตั้งค่าของการจำลองนี้ โดยทำการใช้โมเดล Volume of Fluid (VOF model) , การจำลองแบบ Renormalization-group (RNG)  $k-\epsilon$  model , ใช้การคำนวณผลเฉลยแบบ SIMPLE (semi- implicit method for pressure link equation) และใช้วิธีผลต่างอันดับสอง (Second Order upwind) ในการคำนวณวนรอบซ้ำ ผลจากการจำลองพบว่า จำนวนกริดที่ดีที่สุด ที่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทฤษฎีอยู่ที่ 350,000 กริด



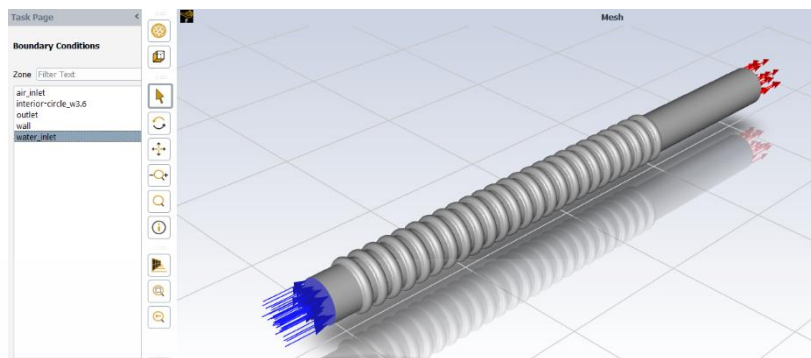
รูปที่ 4.7 ขอบเขตย่อยในท่อผสมแบบเขาระวัง

#### 4.1.4 การกำหนดขอบเขตค่าเริ่มต้น (initial condition)

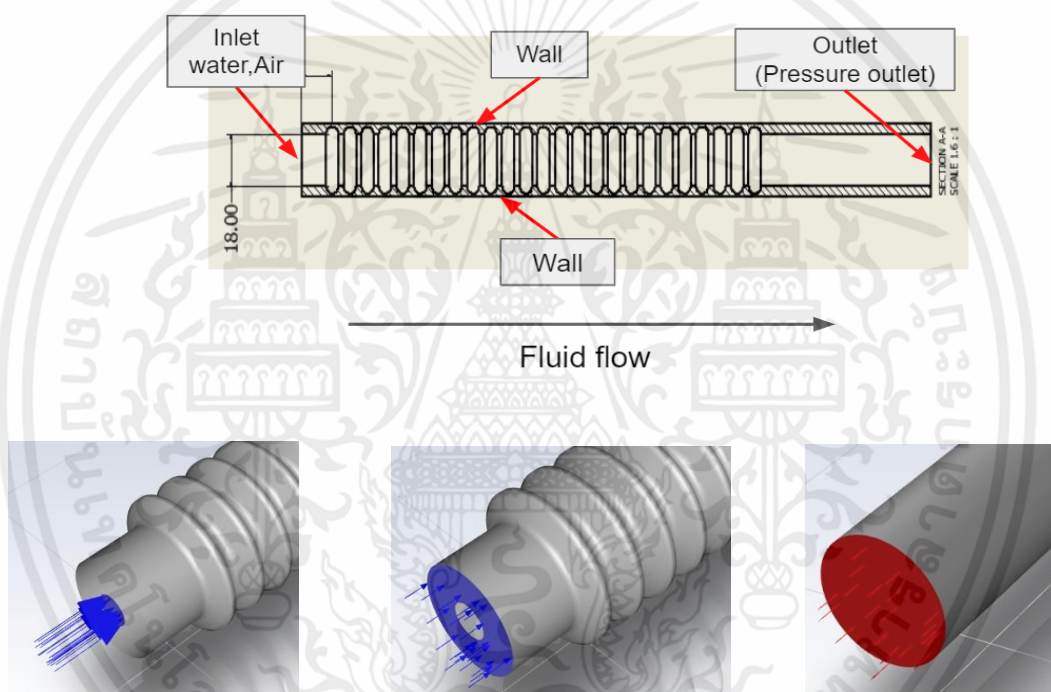
กำหนดค่าเริ่มต้นของแบบจำลองจึงถูกในใช้กำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของเงื่อนไขขอบเขตนั้นทำในโปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS fluent) แบบจำลองสร้างขึ้นโดยระบบพิกัดฉาก สามมิติโดยท่อผสมอยู่ในแกนตั้ง (Z-component) ในทิศทางบวก จึงกำหนดค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) ให้มีค่าเท่ากับ -9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง กำหนดให้การไหลเป็นการไหลหลายเฟส (Multiphase Model) น้ำที่ใช้ในการจำลองมีความหนาแน่น 998.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนืด 0.00103 กิโลกรัมต่อเมตรวินาที และอากาศมีความหนาแน่น 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนืด 0.00001789 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และจำลองการไหลที่สภาวะคงตัว (Steady state)

#### 4.1.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

กำหนดให้น้ำที่ฉีดจากหัวฉีดเหนี่ยวนำเป็นเงื่อนไข Velocity inlet, ทางเข้าอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำเป็นเงื่อนไข Pressure inlet และทางออกของท่อผสมกำหนดเงื่อนไขเป็น Pressure Outlet ในส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสของร่องทั้งหมดได้กำหนดเงื่อนไขเป็น Wall



รูปที่ 4.8 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของท่อผสม



รูปที่ 4.9 ความเร็วของน้ำ

รูปที่ 4.10 ความดันอากาศ

รูปที่ 4.11 ทางออกของท่อผสม

#### 4.1.6 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร (Variable Condition)

##### 4.1.6.1 Volume fraction

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาเรื่อง Volume fraction ที่เป็น Multiphase ได้แก่ เฟส น้ำกับเฟสอากาศ ซึ่งงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับการผสมที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสน้ำและเฟสอากาศซึ่งหาทำให้เกิดการผสมมากที่สุดคือ 0.5

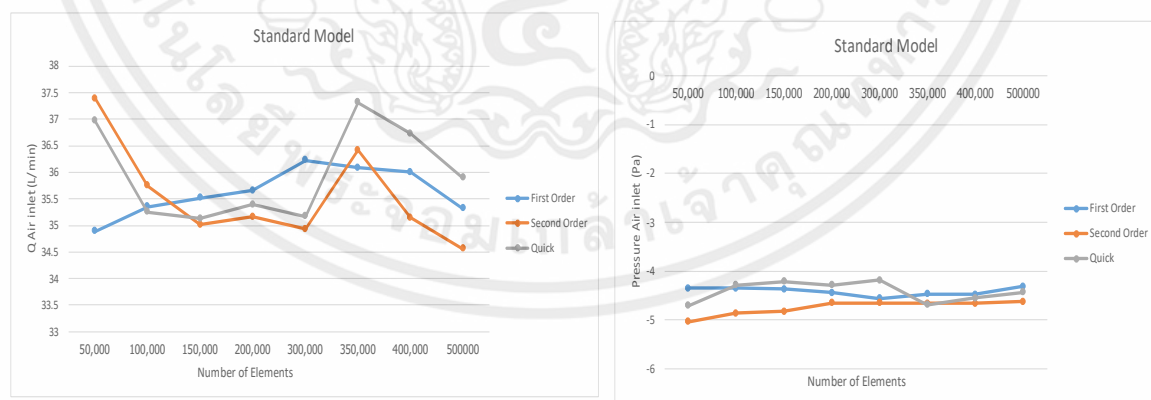
#### 4.1.6.2 การหาโมเดลที่เหมาะสมกับชิ้นงาน

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการทดสอบเพื่อหาโมเดลที่เหมาะสมกับชิ้นงาน ซึ่งโมเดล (Model) ที่ได้เลือกใช้คือ k-ε model [3] การจำลองแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ Standard k-ε model, RNG k-ε model และ Realizable k-ε model ดังนี้

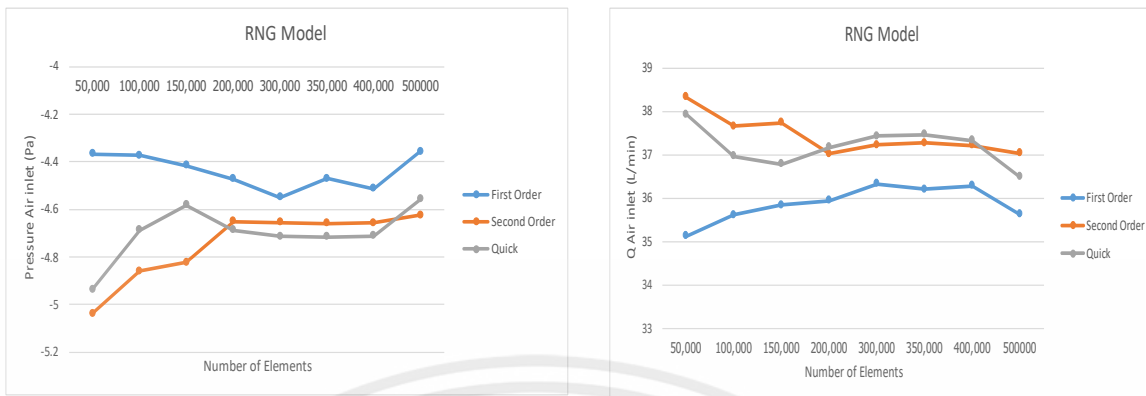
Standard k-ε model การคำนวณผลเฉลยจะใช้แบบคำนวณแบบ SIMPLE (Semi-Implicit method for pressure link equation) คือการสมมติตัวแปรความดันหนึ่งค่าแล้วนำไปแทนในสมการนาเวียร์-สโตกส์ เพื่อคำนวณหาค่า ความดันอากาศขาเข้าของท่อ (Pressure inlet) อัตราการไหลของอากาศขาเข้าและปริมาณอื่นๆที่สนใจ และใช้วิธีผลต่างที่มี 3 รูปแบบคืออันดับหนึ่ง (First order upwind อันดับสอง (Second order upwind) และแบบ Quick ในการคำนวณรอบซ้ำ (iteration)

RNG k-ε model การคำนวณผลเฉลยจะใช้แบบคำนวณแบบ SIMPLE (Semi-Implicit method for pressure link equation) คือการสมมติตัวแปรความดันหนึ่งค่าแล้วนำไปแทนในสมการนาเวียร์-สโตกส์ เพื่อคำนวณหาค่า ความดันอากาศขาเข้าของท่อ (Pressure inlet), อัตราการไหลของอากาศขาเข้าและปริมาณอื่นๆที่สนใจ และใช้วิธีผลต่างที่มี 3 รูปแบบคืออันดับหนึ่ง (First order upwind), อันดับสอง (Second order upwind) และแบบ Quick ในการคำนวณรอบซ้ำ (iteration)

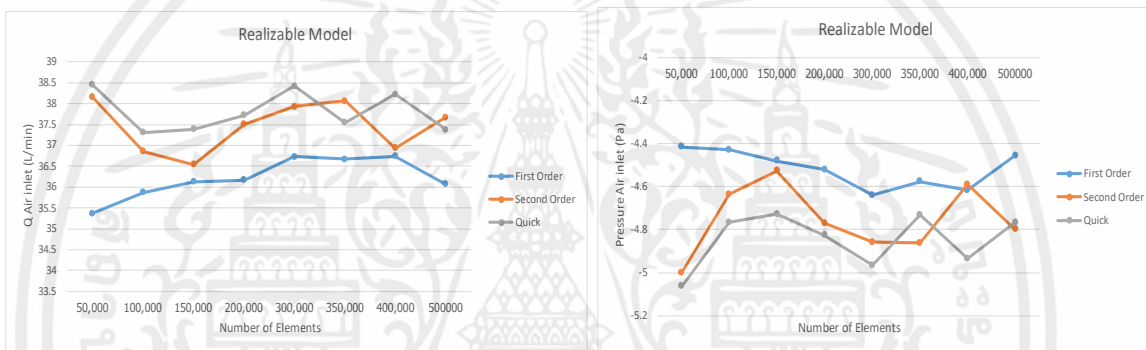
Realizable k-ε model การคำนวณผลเฉลยจะใช้แบบคำนวณแบบ SIMPLE (Semi-Implicit method for pressure link equation) คือการสมมติตัวแปรความดันหนึ่งค่าแล้วนำไปแทนในสมการนาเวียร์-สโตกส์ เพื่อคำนวณหาค่า ความดันอากาศขาเข้าของท่อ (Pressure inlet) อัตราการไหลของอากาศขาเข้าและปริมาณอื่นๆที่สนใจ และใช้วิธีผลต่างที่มี 3 รูปแบบคืออันดับหนึ่ง (First order upwind อันดับสอง (Second order upwind) และแบบ Quick ในการคำนวณรอบซ้ำ (iteration)



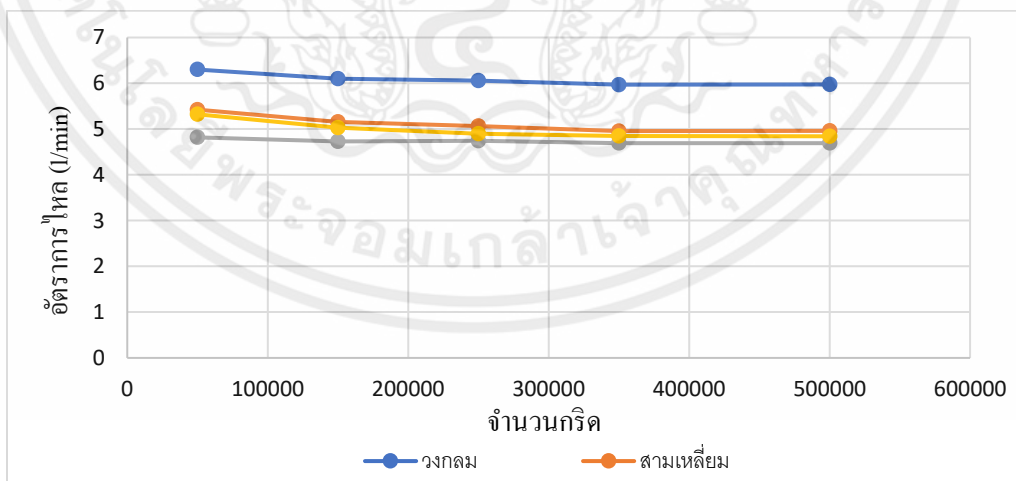
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน และอัตราการไหลของอากาศต่อจำนวนกริดใน Standard โมเดล



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน และอัตราการไหลของอากาศต่อจำนวนกริดใน RNG โมเดล



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน และอัตราการไหลของอากาศต่อจำนวนกริดใน Realizable โมเดล

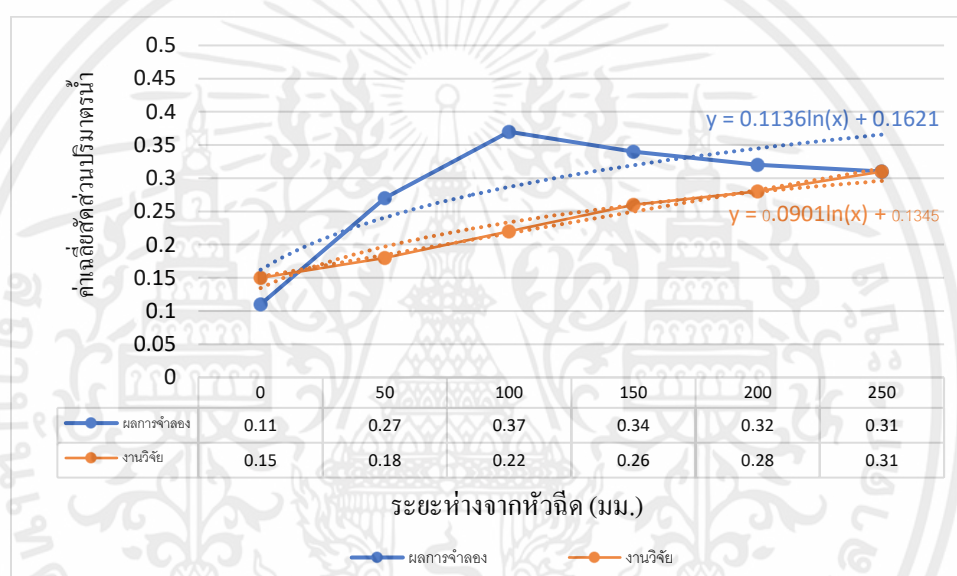


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลของอากาศลิตรต่อนาทีและจำนวนช่องกริดของท่อผสมเซาะร่องรูปแบบวงกลม, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู

พบว่า แบบจำลอง RNG k- $\epsilon$  model ที่บริเวณเมฆที่ 350,000-500,000 กริด ให้ค่าอัตราการไหลของอากาศ และความดันที่บริเวณทางเข้า เป็นค่าที่นิ่งเมื่อเทียบกับโมเดลอื่น ทั้งยังมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับทฤษฎี

## 4.2 การสอบเทียบแบบจำลอง

เมื่อทำการสอบเทียบผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมดในหนึ่งหน่วยหน้าตัดของนายเขมชาติ บุณยะกาญจน และคณะ[2] ที่ได้ทำทดลองไว้ โดยทดลองใช้อัตราการไหลน้ำที่ 8 ลิตรต่อนาทีในท่อผสมแบบราบเรียบ

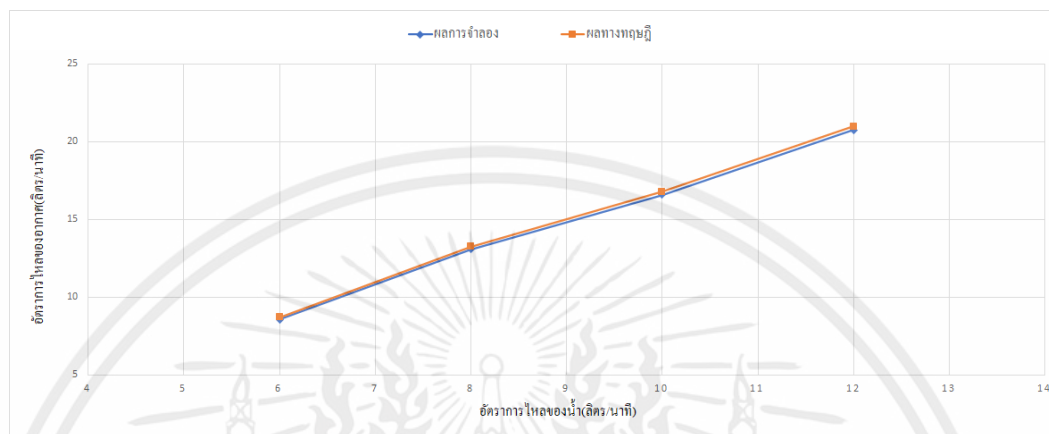


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการสอบเทียบผลจำลองกับผลจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำเมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมดในหนึ่งหน่วยหน้าตัดของนายเขมชาติ บุณยะกาญจนและคณะ[2]

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ที่ระยะห่างจากหัวฉีดที่ 250 มม. พบว่า ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำไม่มีค่าที่แตกต่างกันโดยนัยสำคัญ อีกทั้งเมื่อพิจารณาความชันของกราฟทั้งสองเส้นพบว่ามีค่าความแตกต่างกัน 20.68 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าที่ยอมรับได้ เนื่องจากโครงการของนายเขมชาติพิจารณาการผสมของน้ำและอากาศถึงรับน้ำ จึงทำให้เกิดความผิดพลาดที่มาก

นอกจากนี้ยังพบว่าผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณทางทฤษฎี อีกทั้งหากเปรียบเทียบค่าความชันของเส้นตรงของแบบจำลองกับผลการทดลองพบว่ามีค่าความแตกต่างอยู่ที่ 1.8405 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการจำลองการไหล โดย

กำหนดค่าอัตราการไหลต่างๆที่กำหนด จากนั้นนำค่าความดันที่ทางเข้าที่ได้จากการจำลองไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศเชิงทฤษฎี และนำมาเทียบหาค่าความผิดพลาดที่อัตราการไหลต่างๆที่ถูกกำหนดไว้



รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ค่าอัตราการไหลของอากาศระหว่างค่าที่ได้จากทฤษฎีและการจำลอง

## บทที่ 5

### ผลการสร้างแบบจำลอง

#### 5.1 รูปแบบการเจาะร่อง

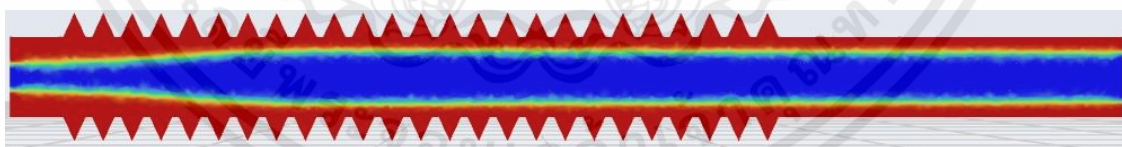
การสร้างแบบจำลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของขนาดร่อง คณะผู้จัดทำได้กำหนดรูปทรงเรขาคณิตของร่อง คือ วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างค่าความกว้างของร่องต่อความกว้างของท่อผสม ที่ 0.15 0.20 0.25 0.30 และค่าความลึกของร่องต่อความกว้างของท่อผสม ที่ 0.15 0.175 0.20 0.225 กำหนดอัตราส่วนเชิงมิติของท่อผสม และหัวฉีดของ นายจิรพล เนียมพินิจสกุลและคณะ[1] ได้ทำการศึกษาไว้ ท่อผสมมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 18 มิลลิเมตร และหัวฉีดมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตร ผลการจำลองได้ทำการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำ การผสมที่ดีของน้ำและอากาศสามารถดูได้จากค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่มีค่าใกล้เคียง 0.5



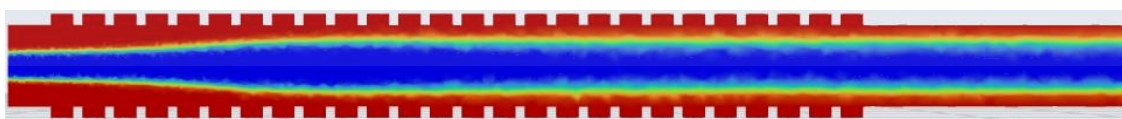
รูปที่ 5.1 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบราบเรียบ



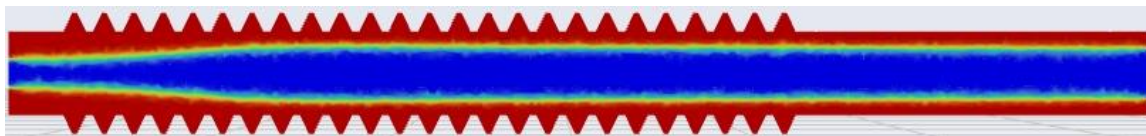
รูปที่ 5.2 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบวงกลม



รูปที่ 5.3 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบสามเหลี่ยม



รูปที่ 5.4 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบสี่เหลี่ยม

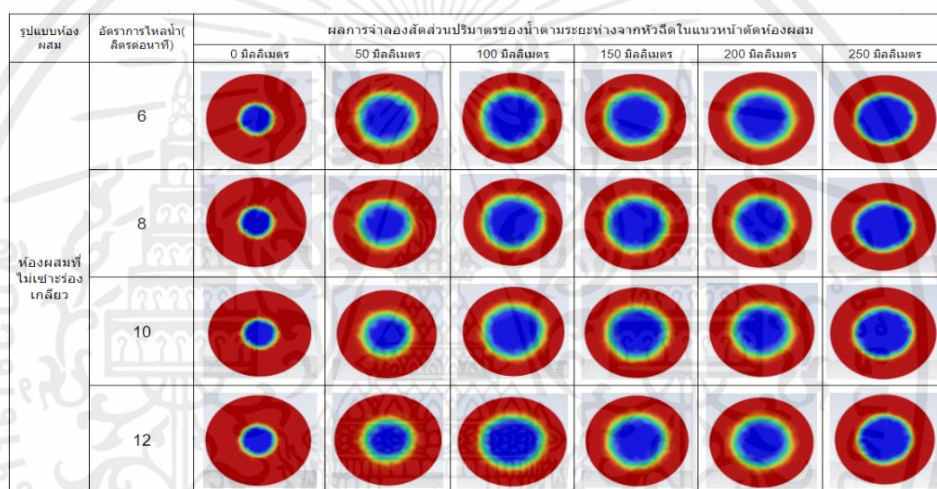


รูปที่ 5.5 แสดงเฟสของน้ำและอากาศในท่อผสมแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

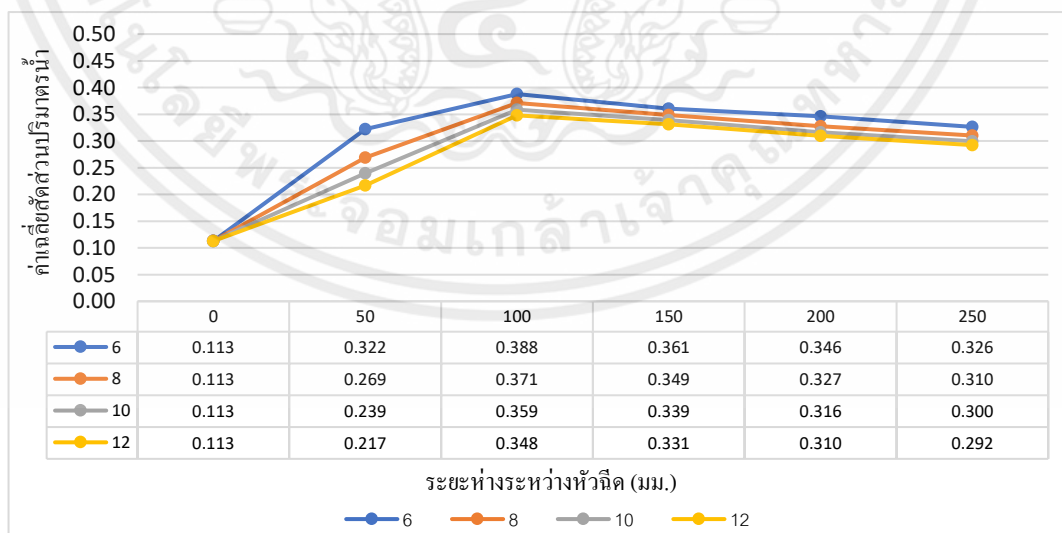
## 5.2 ผลการจำลอง

### 5.2.1 ผลการจำลองเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสม

ผลการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของท่อผสมราบเรียบโดยวัดระยะห่างจากหัวฉีด ที่อัตราการไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที



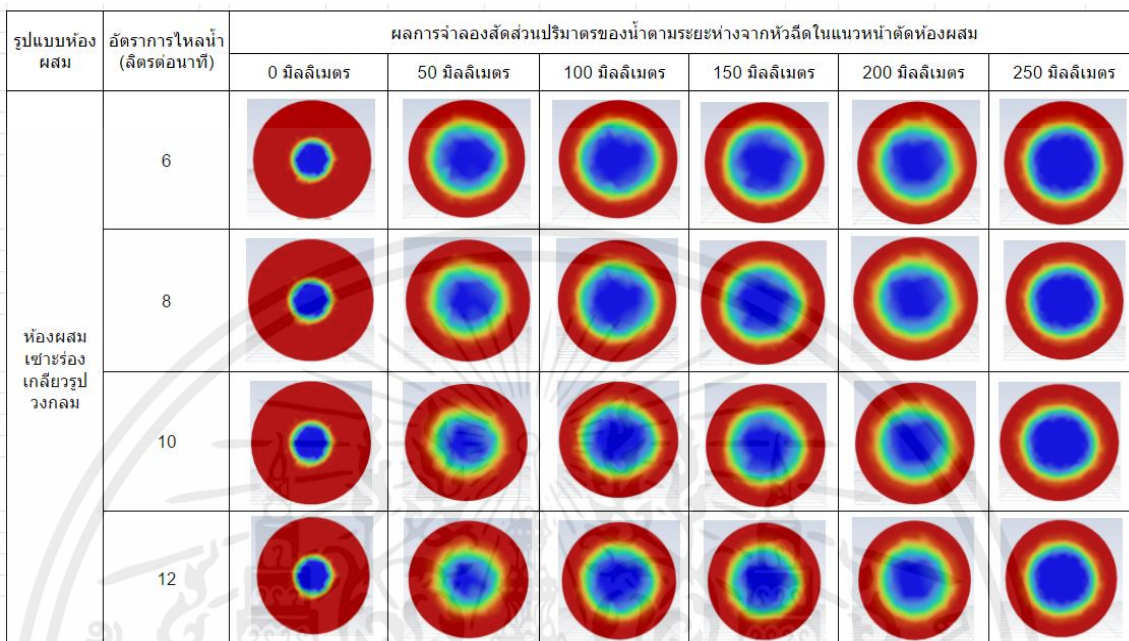
ตารางที่ 1 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมแบบราบเรียบ



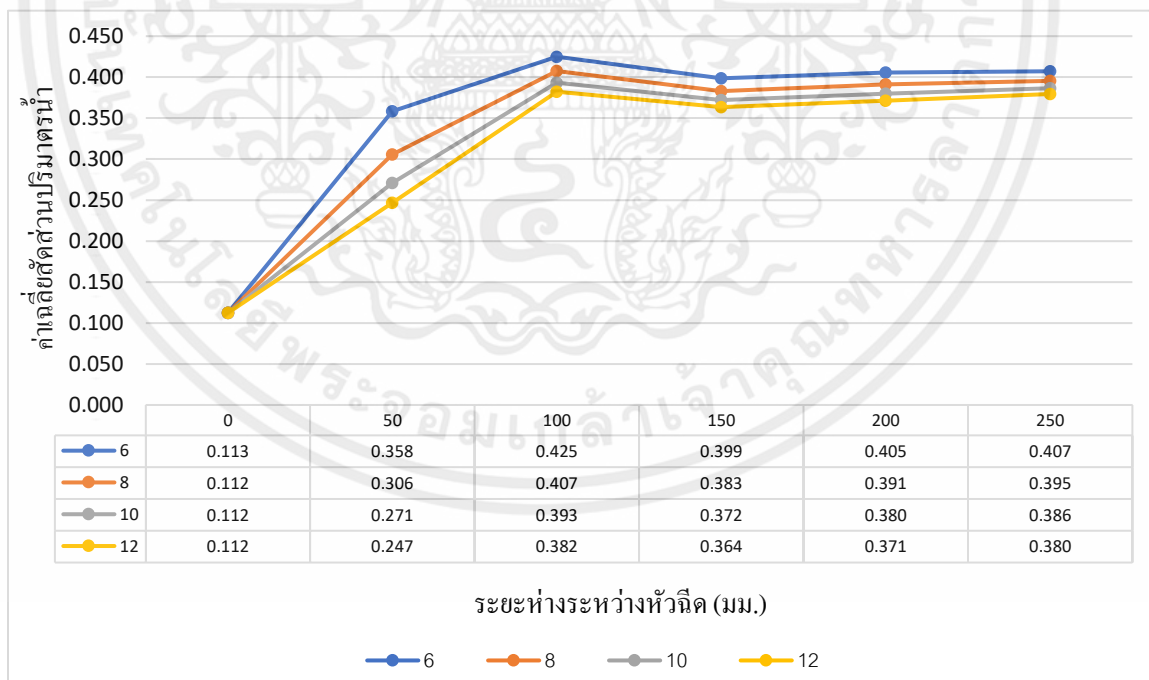
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมราบเรียบในแนวหน้าตัดโดยวัด

ระยะห่างจาก หัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตร ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ผลการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมรูปแบบร่องวงกลม โดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

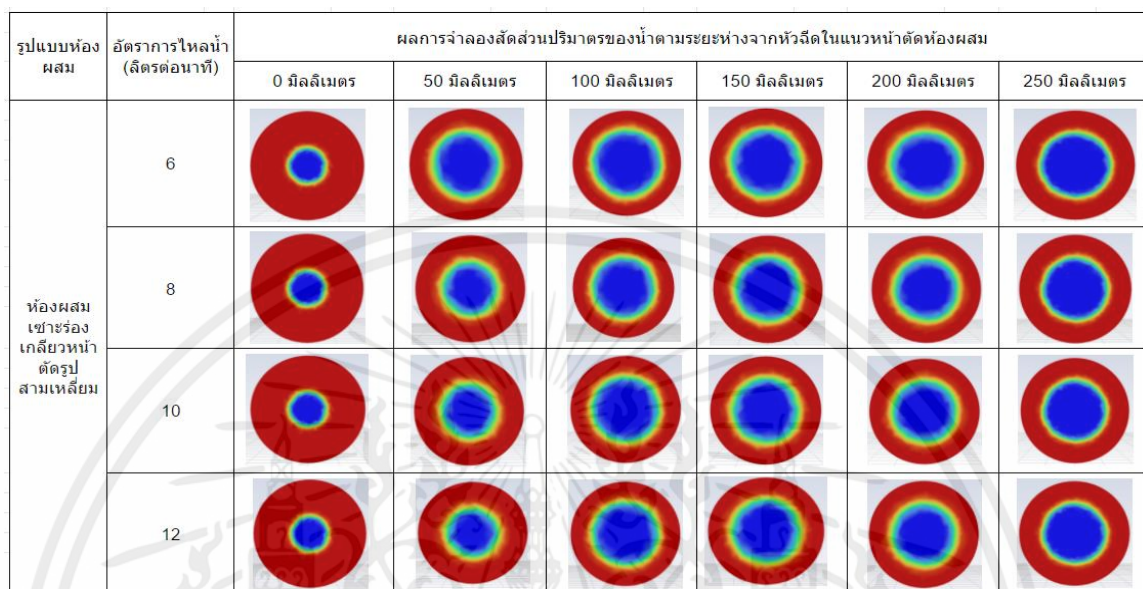


ตารางที่ 2 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องแบบวงกลม

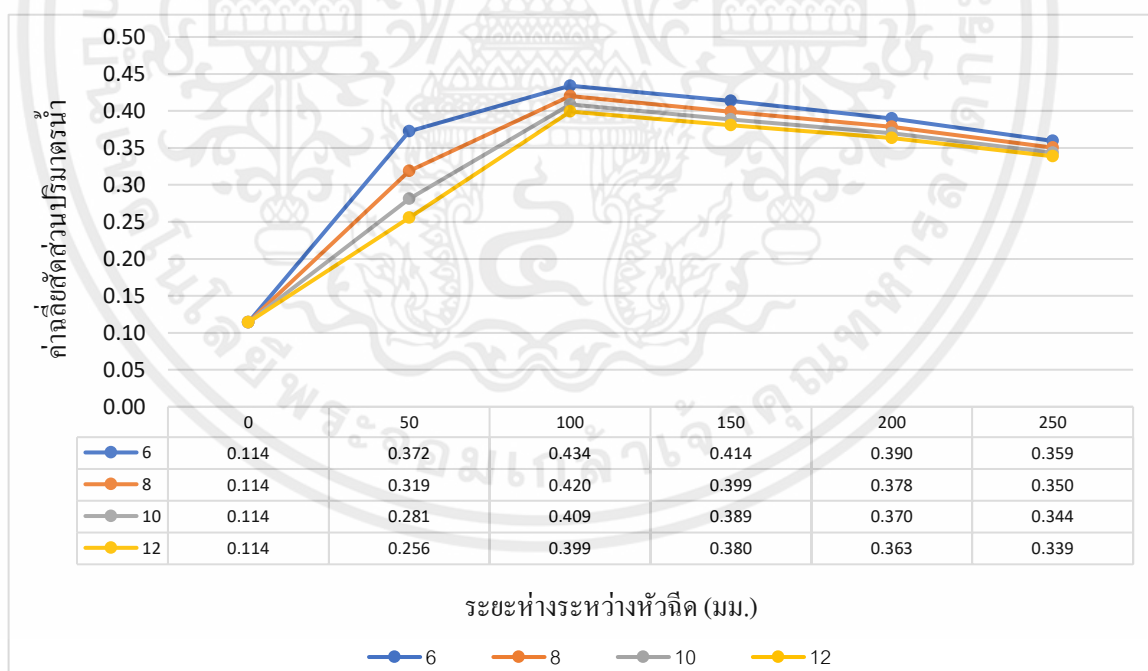


รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องแบบวงกลม ในแนวหน้าตัด โดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ผลการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมรูปแบบร่องสามเหลี่ยม โดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหล 6, 8, 10, 12 ลิตรต่อนาที

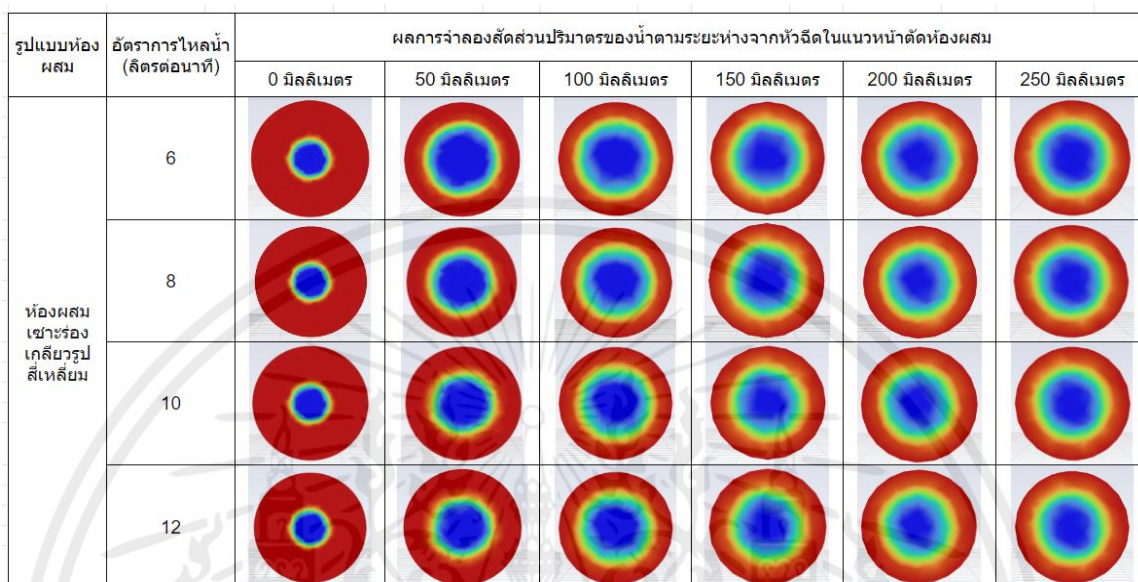


ตารางที่ 3 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม

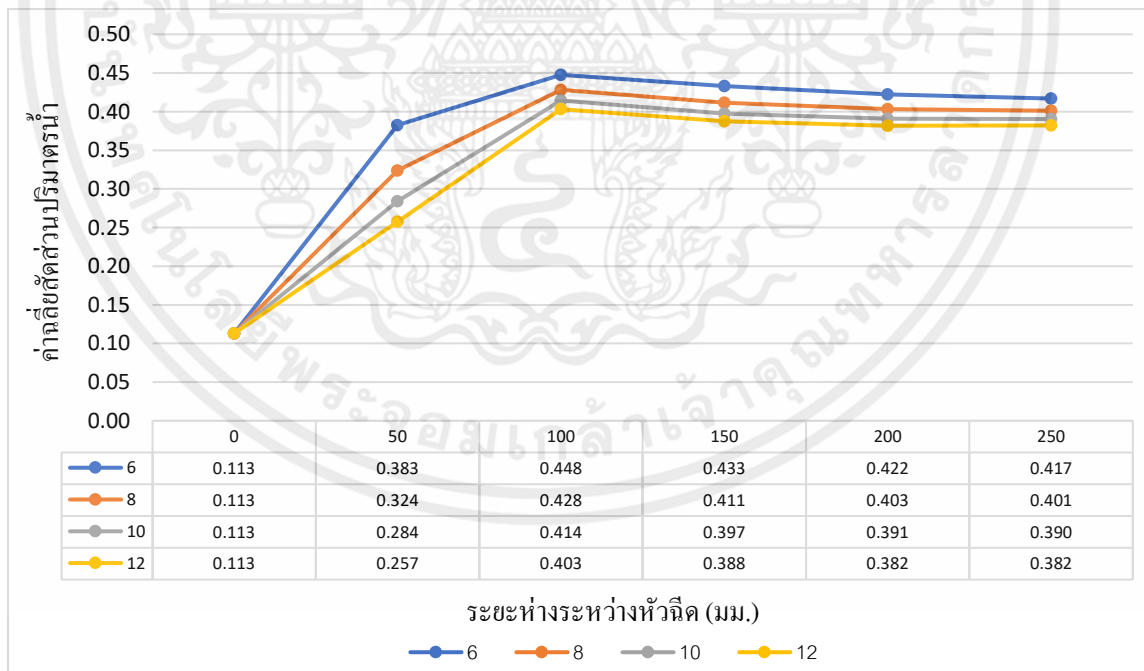


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องแบบสามเหลี่ยม ในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ผลการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมรูปแบบร่องสี่เหลี่ยม โดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

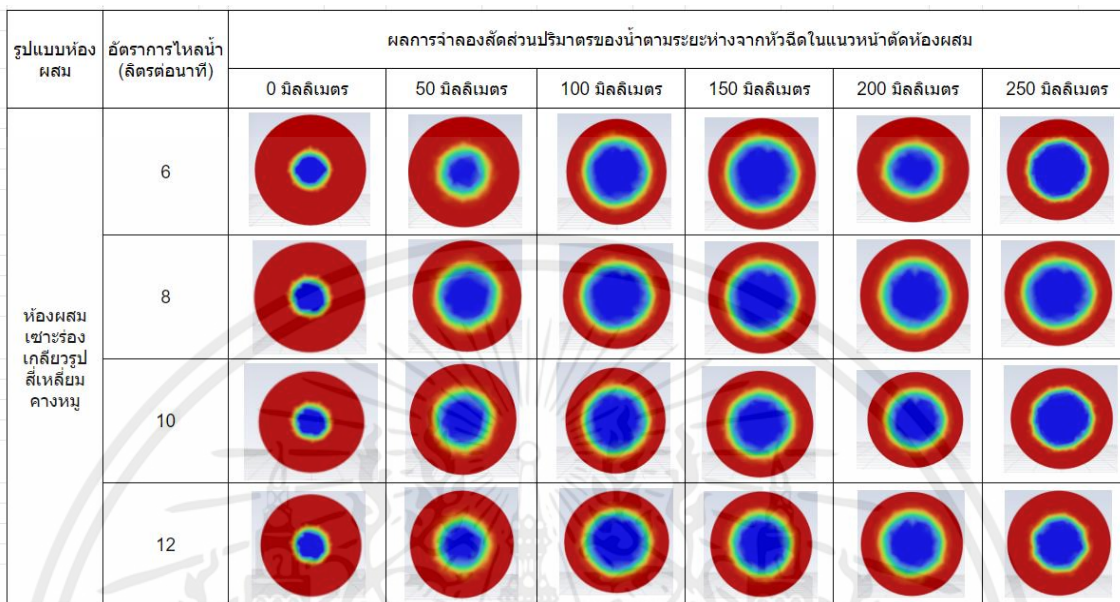


ตารางที่ 4 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเขาระ่องหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม

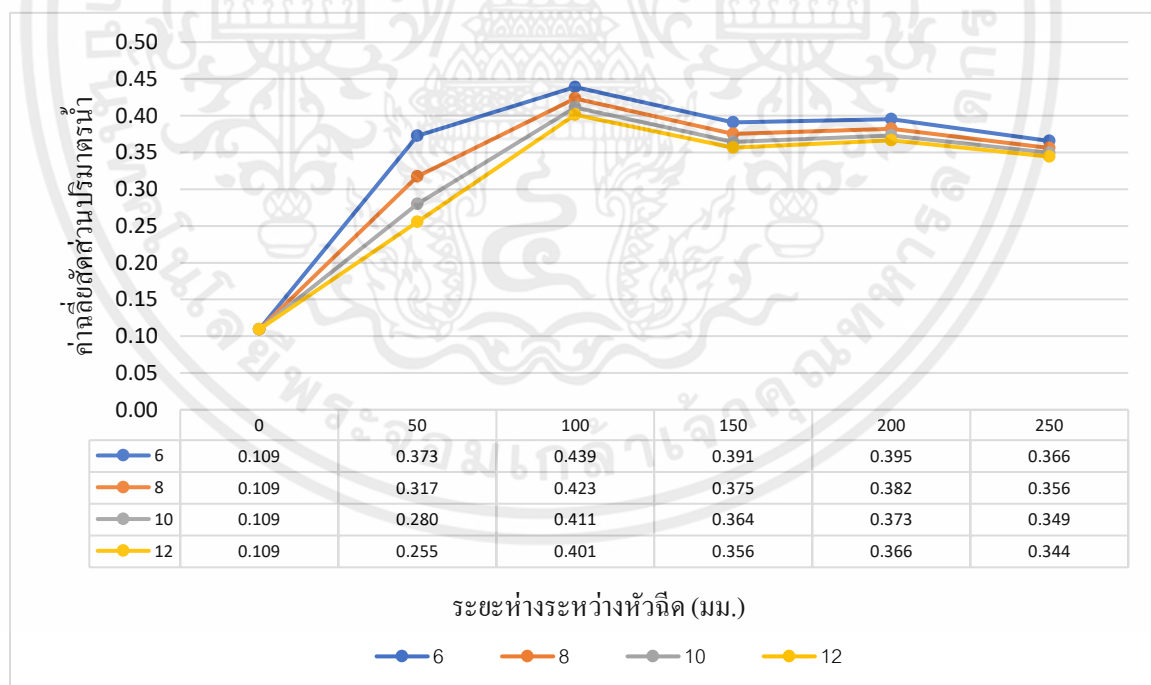


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมร่องสี่เหลี่ยมในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจาก หัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตรที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

ผลการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมรูปแบบร่องสี่เหลี่ยมคางหมู โดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที



ตารางที่ 5 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเขาระร่องหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

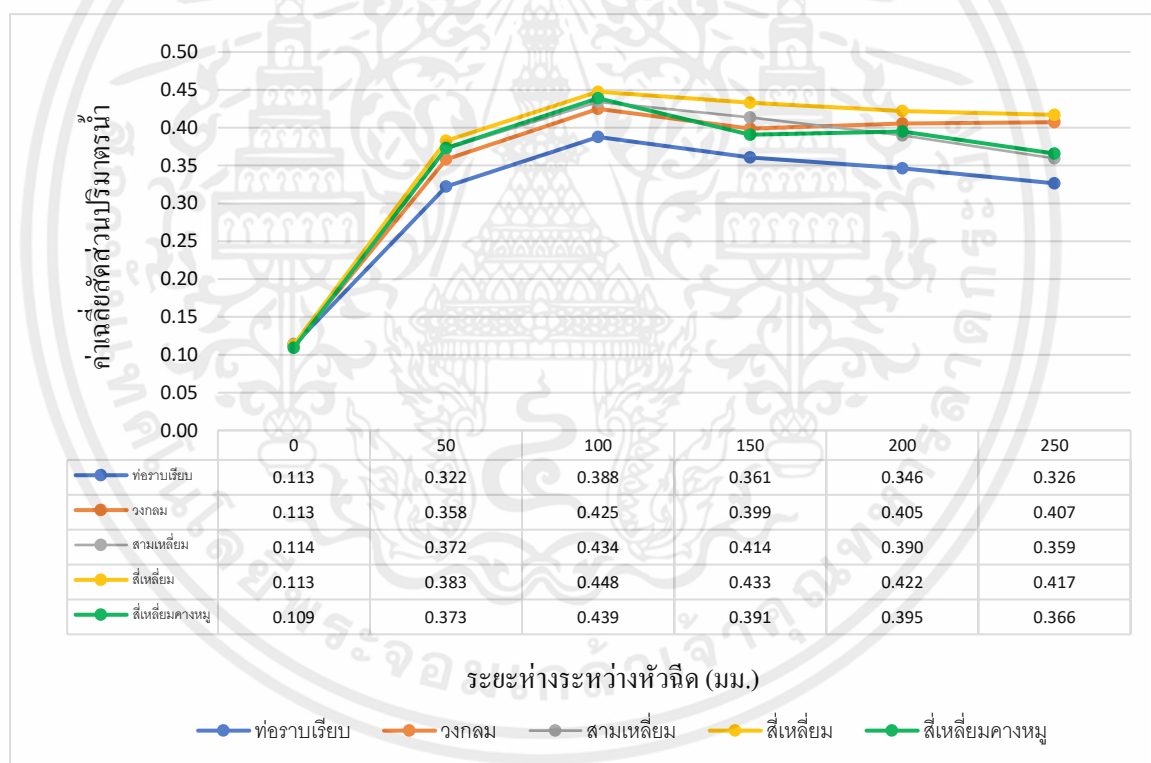


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเขาระร่องแบบสี่เหลี่ยมคางหมูในแนวหน้าตัดโดยวัดระยะห่างจากหัวฉีดครั้งละ 50 มม. ที่อัตราไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที

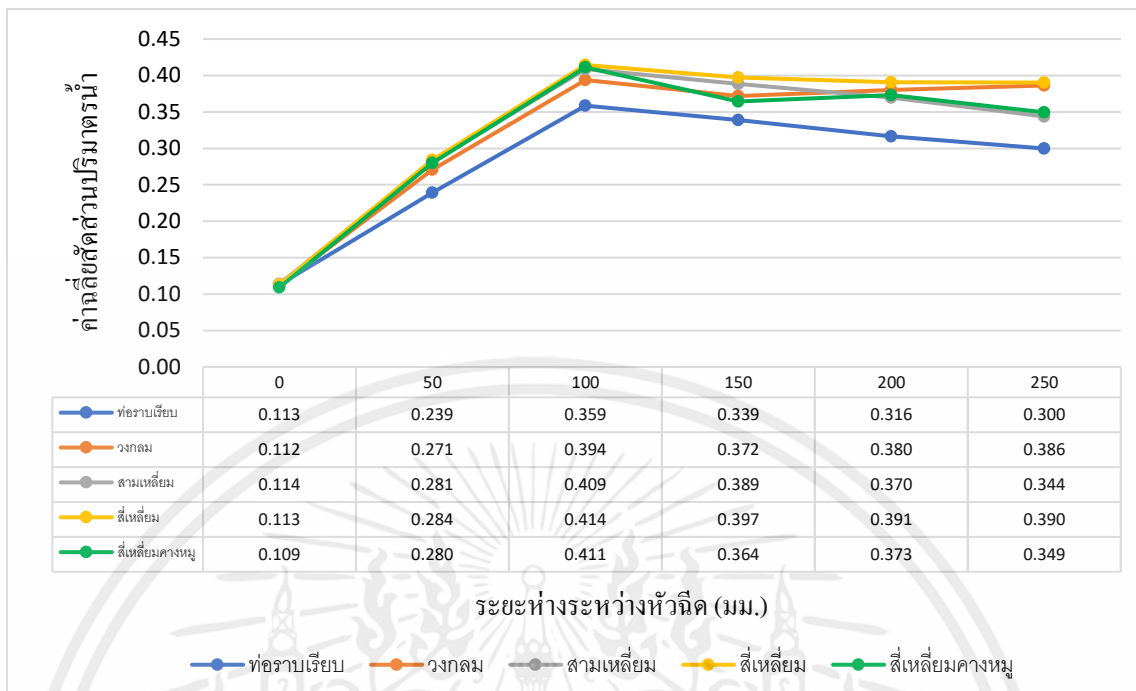
จากผลการจำลองเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมในการผสมระหว่างเฟส โดยใช้ น้ำที่ อัตราการไหลที่ 6 8 10 12 ลิตรต่อนาทีในท่อผสมราบเรียบ และท่อผสมเซาะร่อง แสดงให้เห็น ในทุกการ จำลองการไหลโดยใช้รูปทรงเรขาคณิตรูปแบบต่างๆในการออกแบบร่องในท่อผสมได้แก่ รูปแบบวงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมูนั้นมีผลไปทางเดียวกันคือ อัตราการไหลของน้ำที่ฉีดออกจาก หัวฉีด 6 ลิตรต่อนาที เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการจำลองที่ทำให้มีการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างน้ำและ อากาศ มีผลให้ค่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำในท่อผสมใกล้เคียง 0.5 มากที่สุด ซึ่งแสดงถึงการผสมระหว่าง เฟสได้ดี

### 5.2.2 ผลการจำลองเพื่อหาแบบรูปของร่องที่เหมาะสม

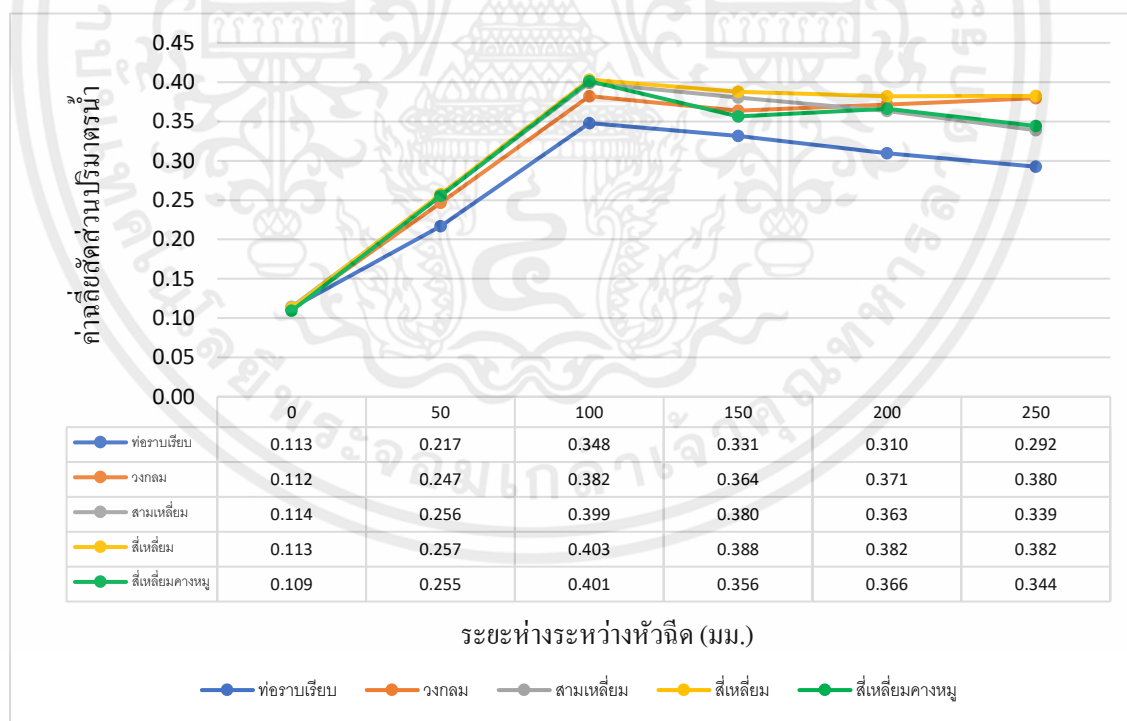
ผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำในท่อผสมราบเรียบและท่อผสมเซาะร่องแบบรูปวงกลม, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู ที่อัตราการไหล 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที



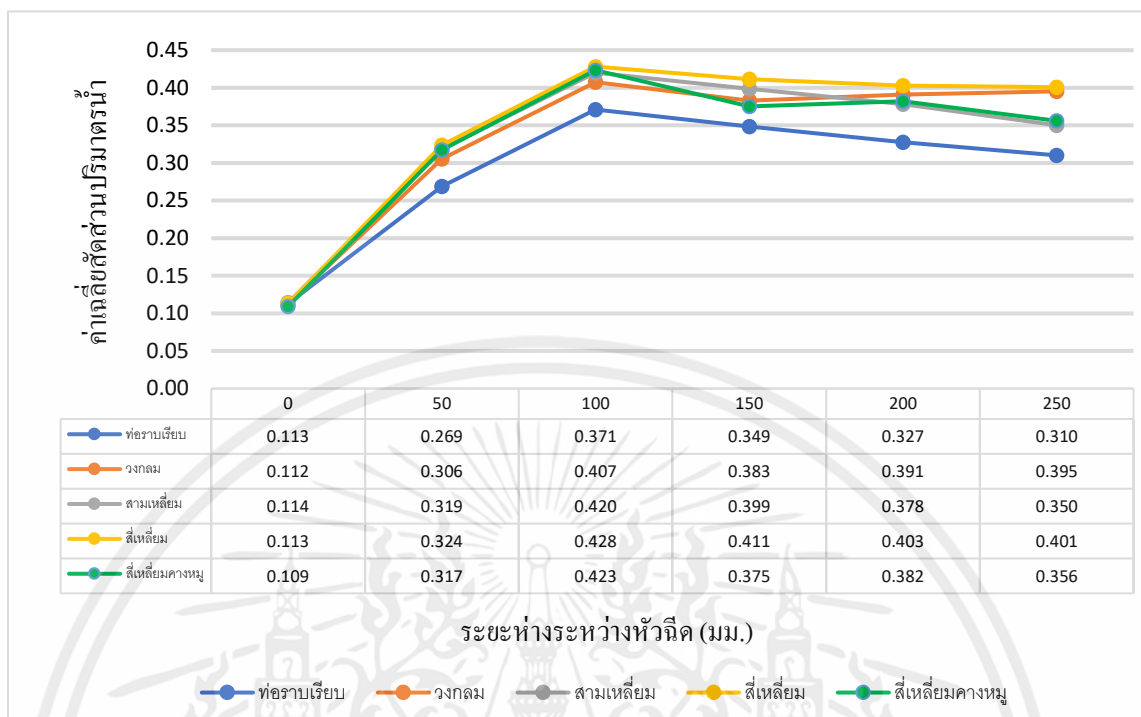
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดวงกลม, สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู ที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดวงกลม, สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู ที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเซาะร่องหน้าตัดวงกลม, สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู ที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที

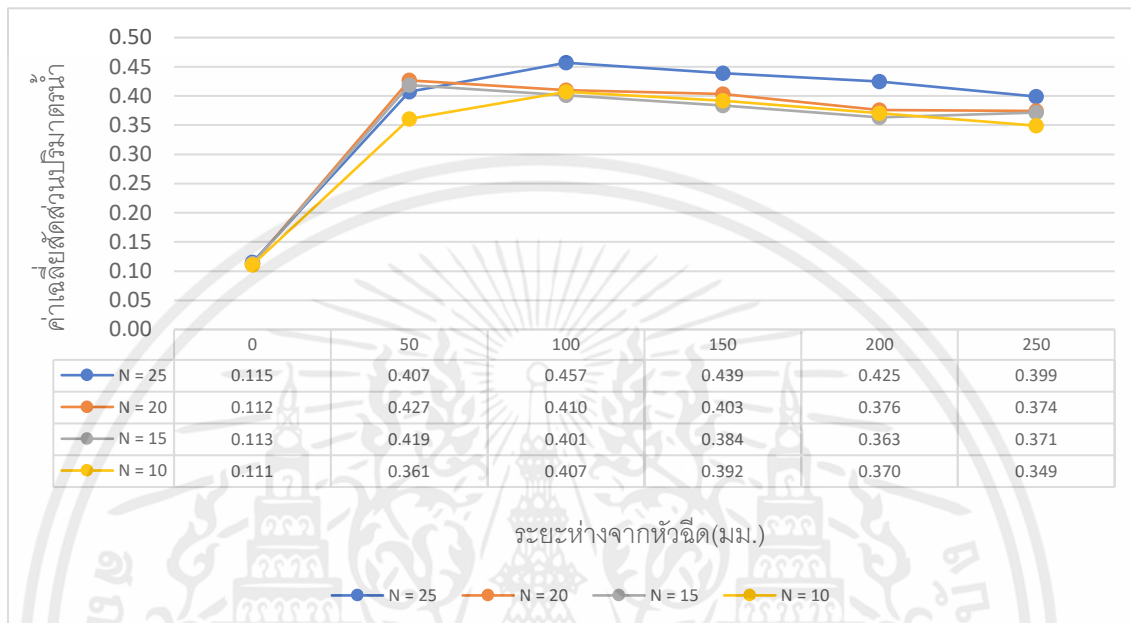


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมเขาระองหน้าตัดรูปแบบวงกลม, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู ที่อัตราการไหล 12 ลิตรต่อนาที

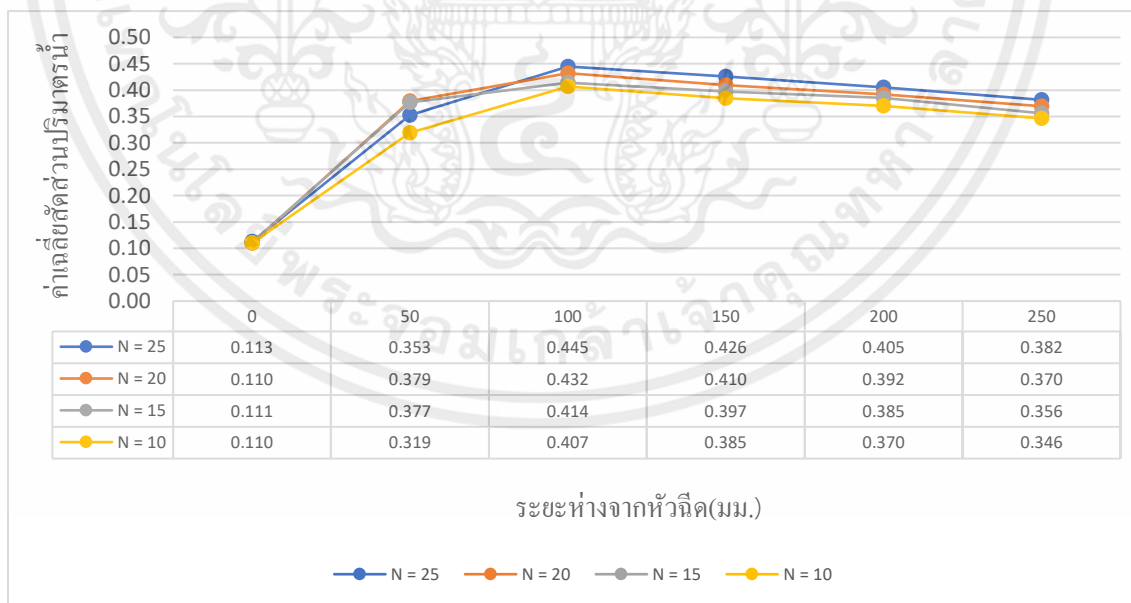
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำในท่อผสมในแนวหน้าตัดของท่อผสมระหว่างท่อผสมแบบราบเรียบ และท่อผสมแบบเขาระองด้านในรูปแบบวงกลม, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และ สี่เหลี่ยมคางหมู ณ อัตราไหลเดียวกันที่ 6, 8, 10 และ 12 ลิตรต่อนาที พบว่า ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำในท่อผสมในแนวหน้าตัดของท่อผสมแบบเขาระองมีค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำใกล้เคียง 0.5 ซึ่งมากกว่าท่อผสมแบบราบเรียบ ท่อผสมที่ทำการเขาระองด้านในมีบริเวณที่น้ำสัมผัสกับอากาศได้มากกว่าท่อผสมราบเรียบ นอกจากนี้การเขาระองสามารถสร้างการหมุนวนของอากาศภายในร่องเพื่อเพิ่มเวลาในการสัมผัสและการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างของไหลทั้งสองชนิด

### 5.2.3 ผลการจำลองเพื่อหาจำนวนร่องที่เหมาะสม

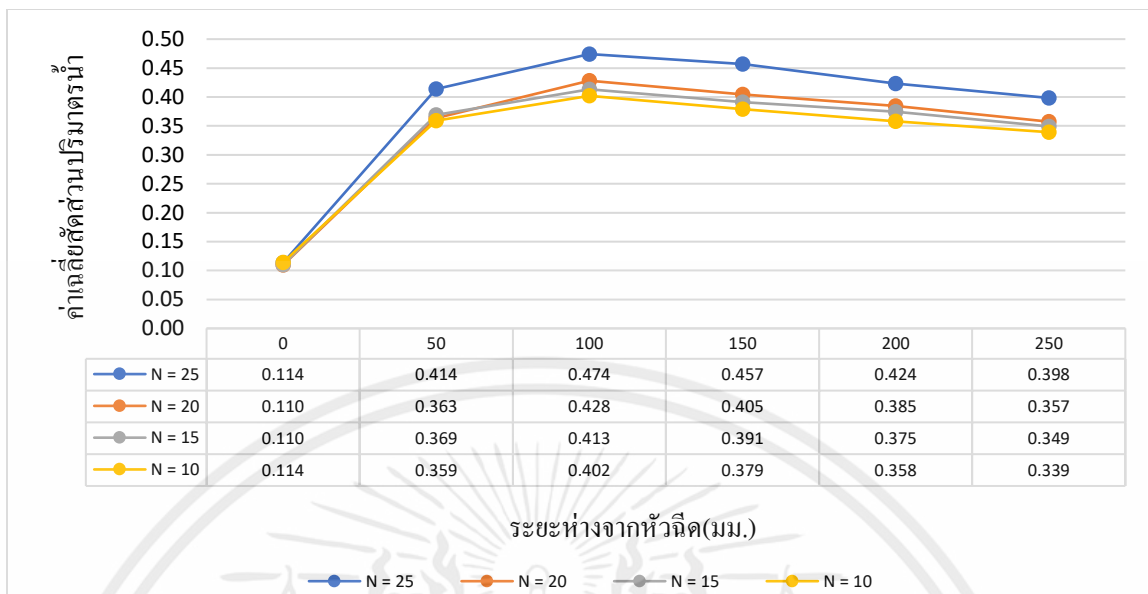
ผลการจำลองเปรียบเทียบรูปแสดงสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของท่อผสมของรูปแบบต่างๆ ที่จำนวนร่อง 10, 15, 20 และ 25 ร่อง



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของท่อผสมของรูปแบบวงกลม ที่จำนวนร่อง 10, 15, 20 และ 25 ร่อง



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของท่อผสมของรูปแบบสี่เหลี่ยม ที่จำนวนร่อง 10, 15, 20 และ 25 ร่อง

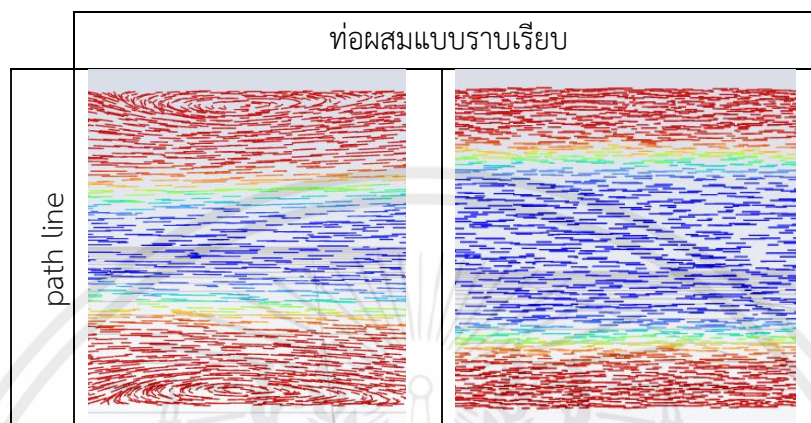


รูปที่ 5.17 แสดงค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำตามแนวหน้าตัดของท่อผสมของรูปแบบสามเหลี่ยม ที่จำนวนร่อง 10, 15, 20 และ 25 ร่อง

ในการออกแบบจำนวนร่องในท่อผสม ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการกำหนดขอบเขตในการออกแบบท่อผสมให้มีจำนวนร่องในการเจาะอยู่ที่ 10, 15, 20 และ 25 ร่อง เพื่อเปรียบเทียบจำนวนร่องในการผสมของอากาศและน้ำ แสดงให้เห็นว่า ทุกการจำลองการไหลโดยใช้รูปทรงเรขาคณิตรูปแบบต่างๆ ในการออกแบบร่อง ได้แก่ รูปแบบวงกลม สามเหลี่ยม และ สี่เหลี่ยม สรุปได้ว่า จำนวนร่องที่ 25 มีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำมากที่สุด เมื่อจำนวนของร่องที่เจาะในท่อผสมมีจำนวนน้อยลง ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำจะมีค่าที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

## 5.2.4 ผลการจำลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของร่อง

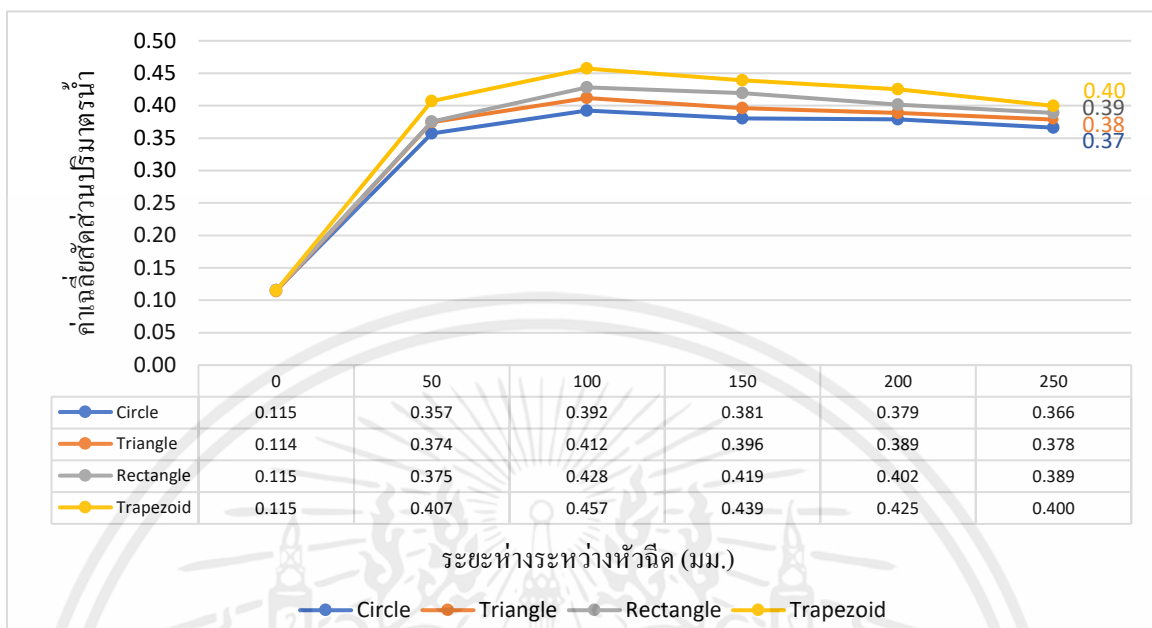
### 5.2.4.1 ผลการจำลองอัตราส่วนระหว่างความกว้างของร่องต่อความกว้างท่อผสม



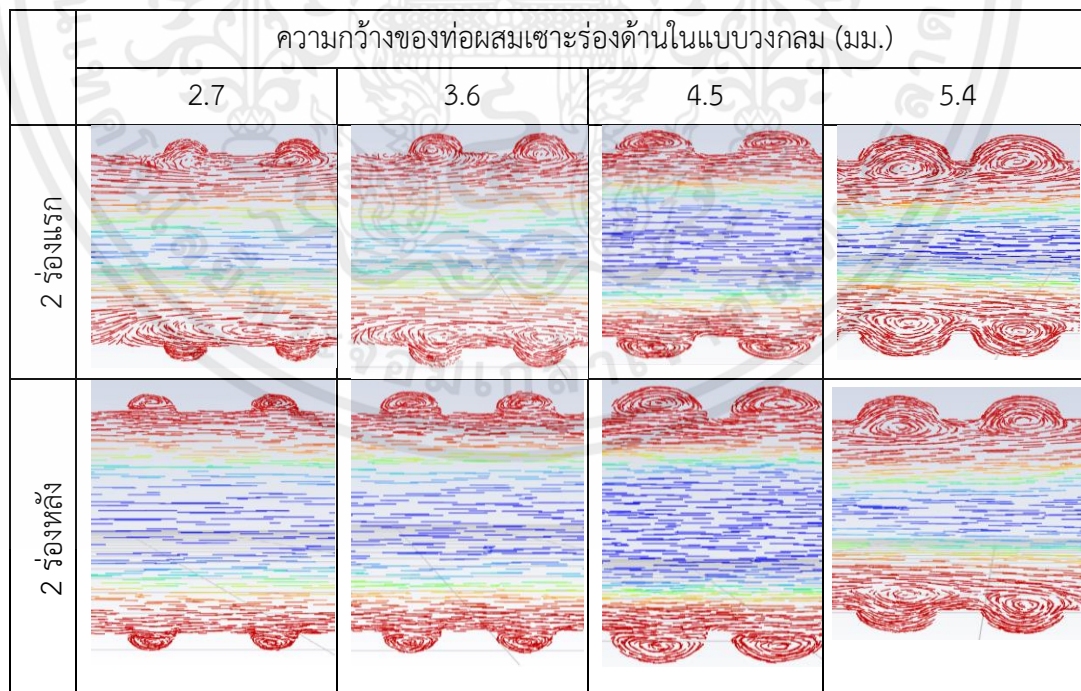
ตารางที่ 6 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำท่อผสมแบบราบเรียบ

กำหนดให้ความสูง 3.6 มิลลิเมตร โดยกำหนดความลึก 2.7, 3.15, 3.6 และ 4.05 มิลลิเมตร ณ อัตราการไหลที่ 6 ลิตรต่อนาที ในหน้าตัดของร่องลักษณะรูปทรงเรขาคณิต ได้แก่ วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำในแนวหน้าตัดในแต่ละรูปแบบของร่อง

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำในแนวหน้าตัดของท่อผสมเซาะร่องรูปแบบวงกลม

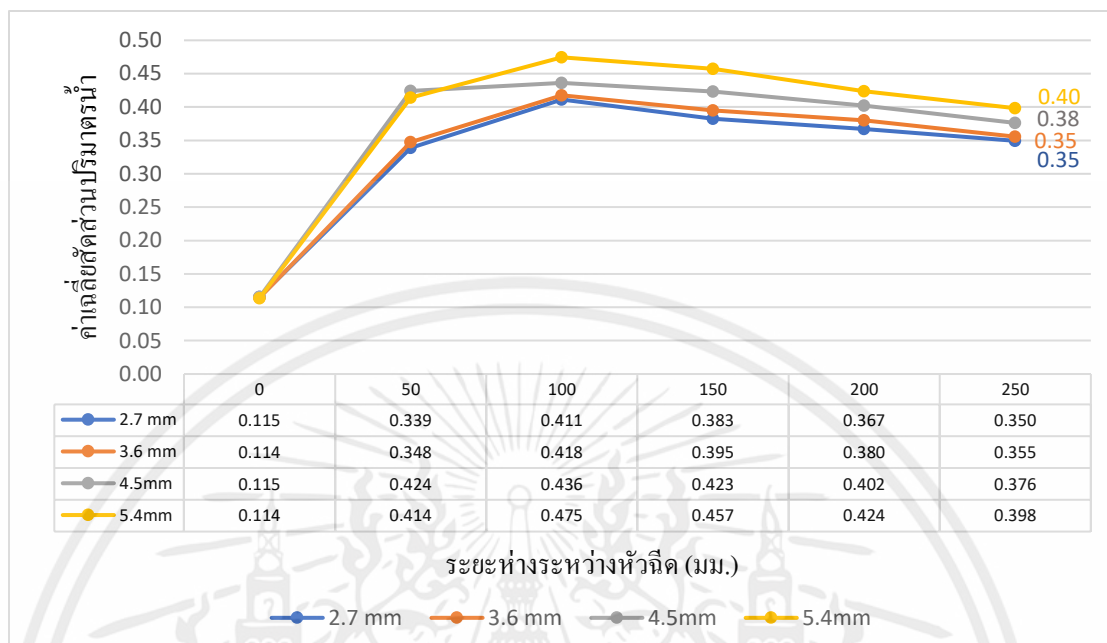


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบวงกลม ที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่ออนาที โดยใช้ขนาดความลึกของร่องเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตร และความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7, 3.6, 4.5 และ 5.4 มิลลิเมตร

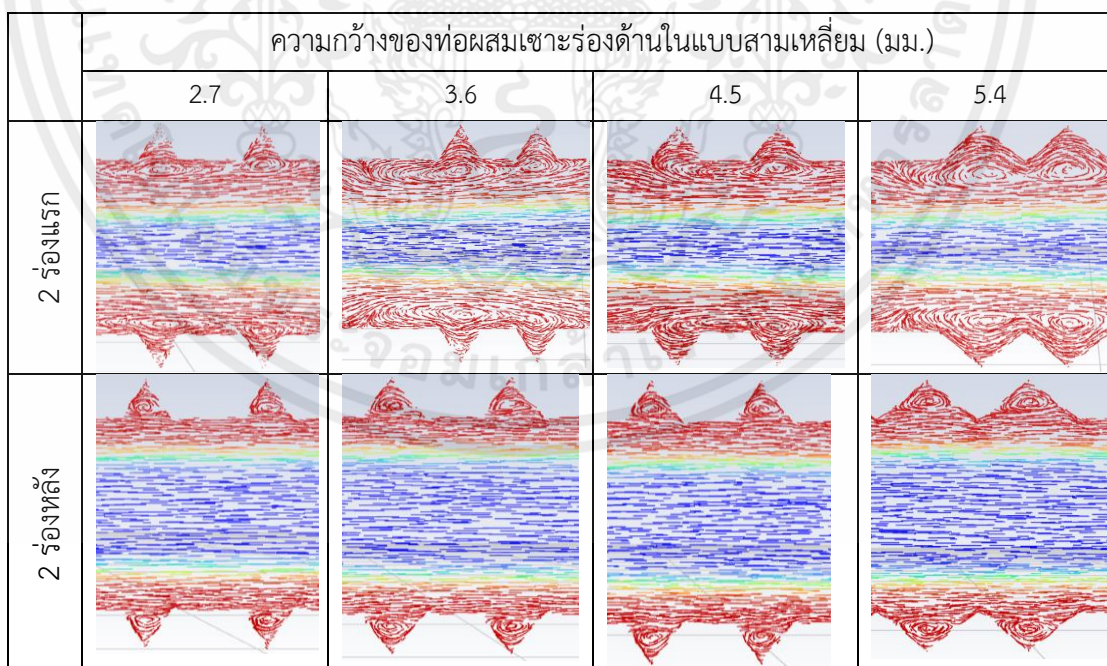


ตารางที่ 7 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำภายในท่อผสมเซาะร่องวงกลม

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำในแนวหน้าตัดของท่อผสมเซาะร่องรูปแบบสามเหลี่ยม

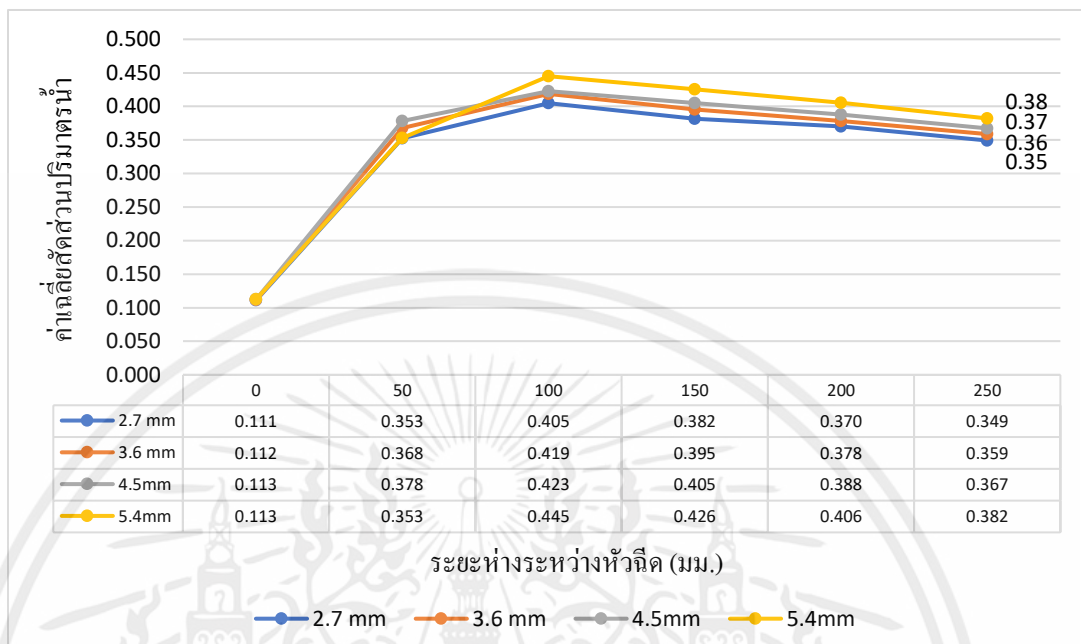


รูปที่ 5.19 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบสามเหลี่ยมที่ อัตราการไหล 6 ลิตรต่อวินาที โดยใช้ขนาดความลึกของร่องเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตร และความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7, 3.6, 4.5 และ 5.4 มิลลิเมตร

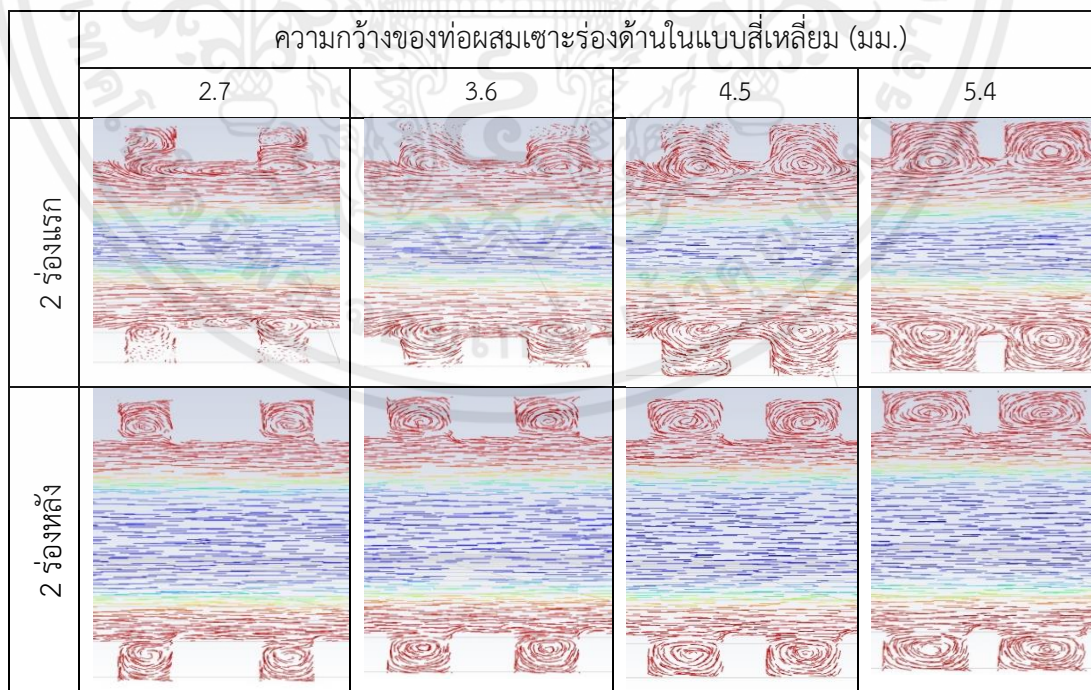


ตารางที่ 8 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำภายในท่อผสมเซาะร่องสามเหลี่ยม

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำในแนวหน้าตัดของท่อผสมเซาะร่องรูปแบบสี่เหลี่ยม

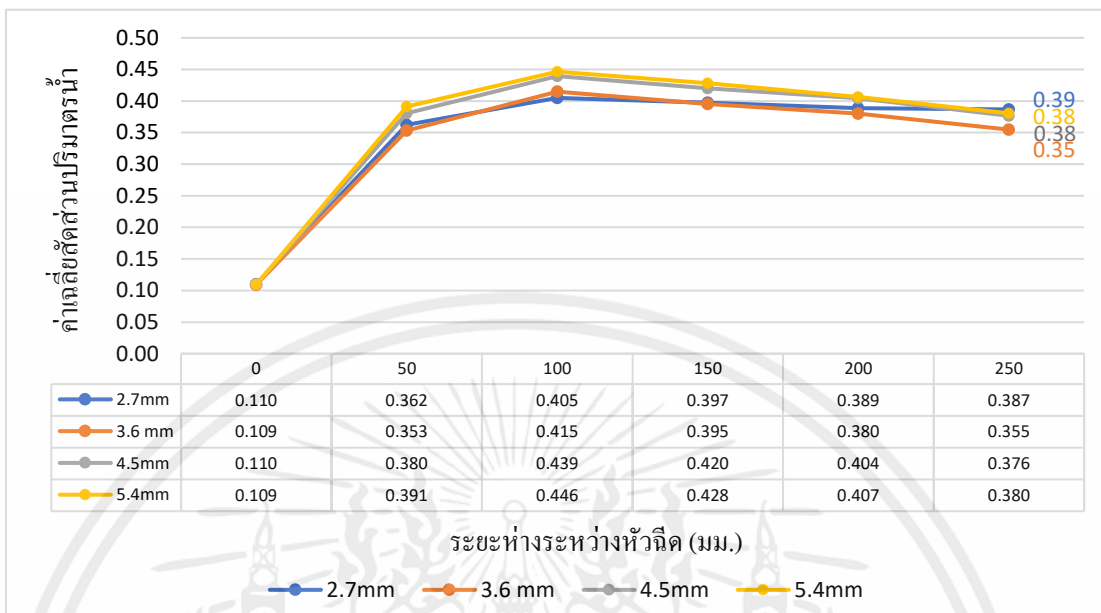


รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยมที่ อัตราการไหล 6 ลิตรต่อวินาที โดยใช้ขนาดความลึกของร่องเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตร และความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7, 3.6, 4.5 และ 5.4 มิลลิเมตร

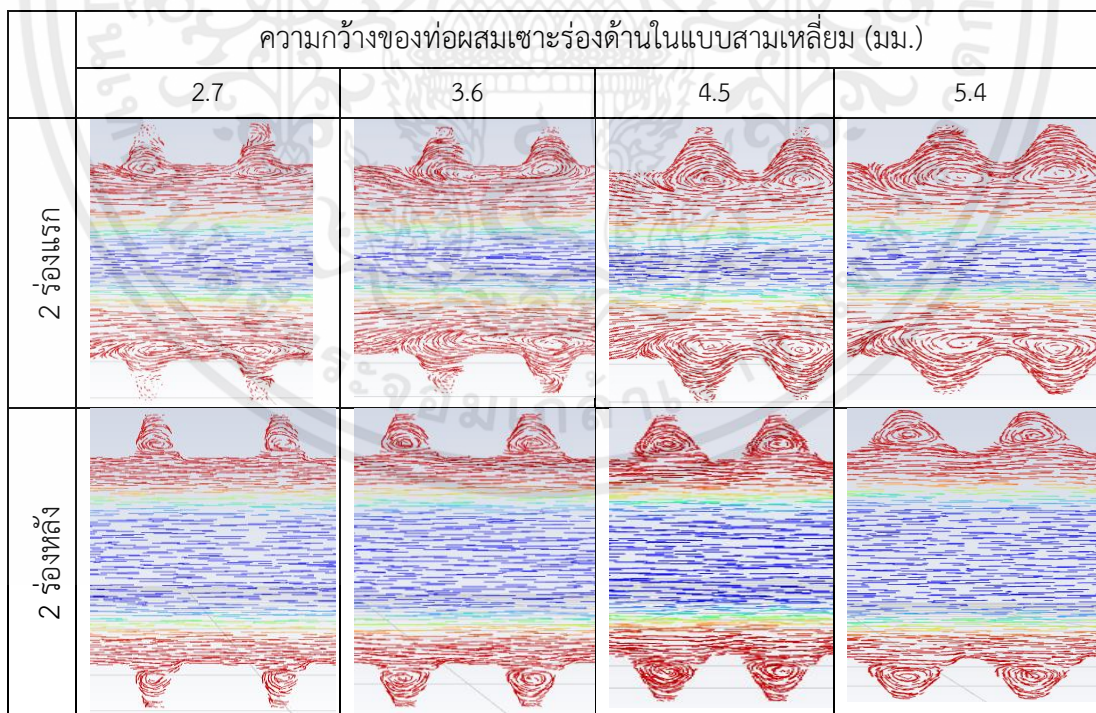


ตารางที่ 9 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำภายในท่อผสมเซาะร่องสี่เหลี่ยม

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำในแนวหน้าตัดของท่อผสมเซาะร่องรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมูที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อวินาที โดยใช้ขนาดความลึกของร่องเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตร และความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7, 3.6, 4.5 และ 5.4 มิลลิเมตร



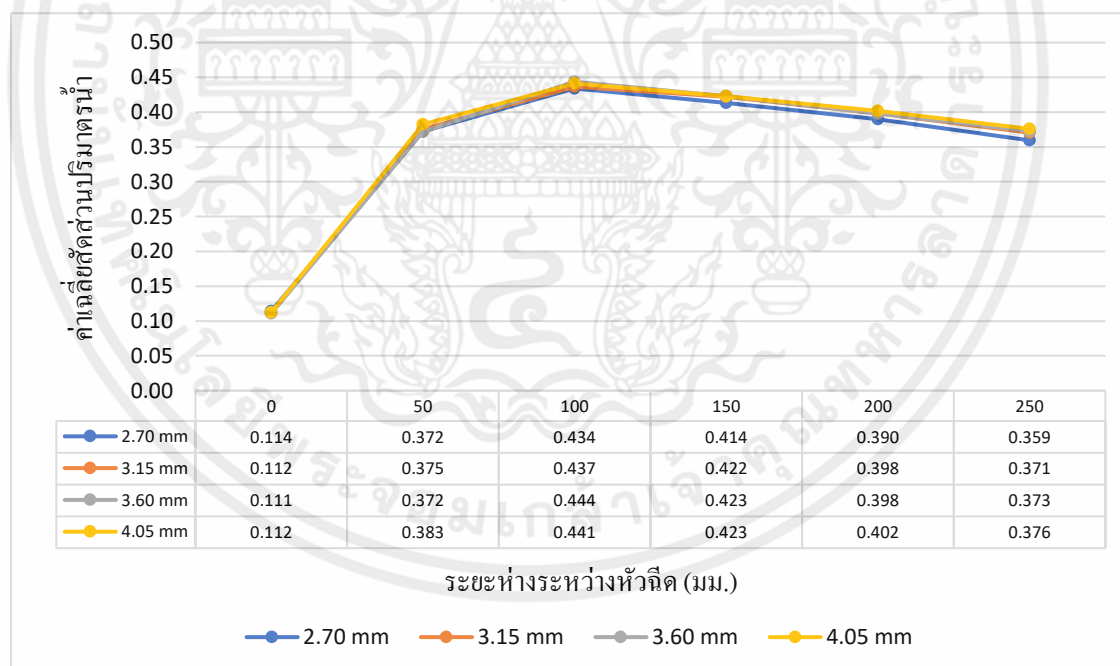
ตารางที่ 10 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำภายในท่อผสมเซาะร่องสี่เหลี่ยมคางหมู

จากการจำลองเพื่อหาอัตราส่วนความกว้างของร่องต่อความลึกของท่อผสมที่เหมาะสมที่สุด กำหนดความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7, 3.6, 4.5 และ 5.4 มิลลิเมตร พบว่าทุกรูปแบบการเซาะร่องภายในท่อผสม ที่ความกว้างเท่ากับ 5.4 มิลลิเมตร ให้ค่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำมีค่าใกล้เคียงค่า 0.5 มากที่สุดเมื่อเทียบกับความกว้างอื่นๆ โดยที่ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของน้ำในท่อผสมรูปแบบวงกลมมีค่ามากที่สุด สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมูตามลำดับ นอกจากนั้นทางคณะผู้จัดทำ ทำการจำลองเพิ่มเติมเพื่อดูเส้นทางการไหลของของไหลภายในร่องที่แต่ละความกว้างของร่อง พบว่าขนาดของการหมุนวน (Vortex) มีขนาดการหมุนวนเพิ่มขึ้นตามความกว้างของร่อง ส่งผลให้พื้นที่ในการสัมผัสระหว่างอากาศและน้ำเพิ่มมากขึ้น

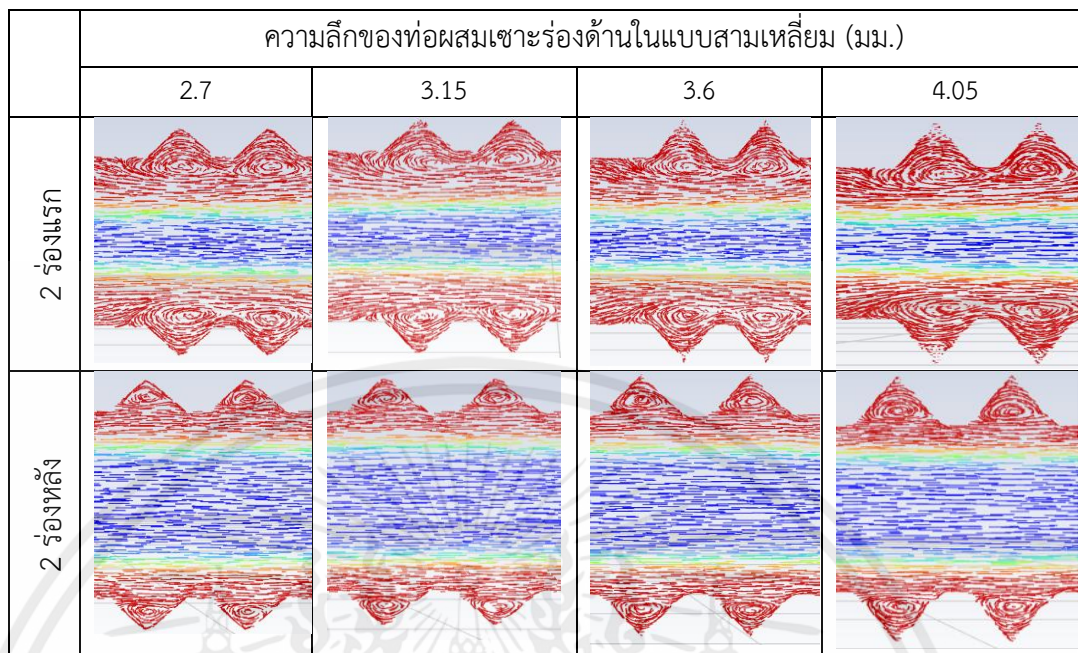
#### 5.2.4.2 ผลการจำลองอัตราส่วนระหว่างความลึกของร่องต่อความกว้างท่อผสม

กำหนดให้ความกว้างที่ 5.4 มิลลิเมตร โดยกำหนดความลึก 2.7, 3.15, 3.6 และ 4.05 มิลลิเมตร ณ อัตราการไหลที่ 6 ลิตรต่อนาที ในหน้าตัดของการเซาะร่องลักษณะรูปทรงเรขาคณิต

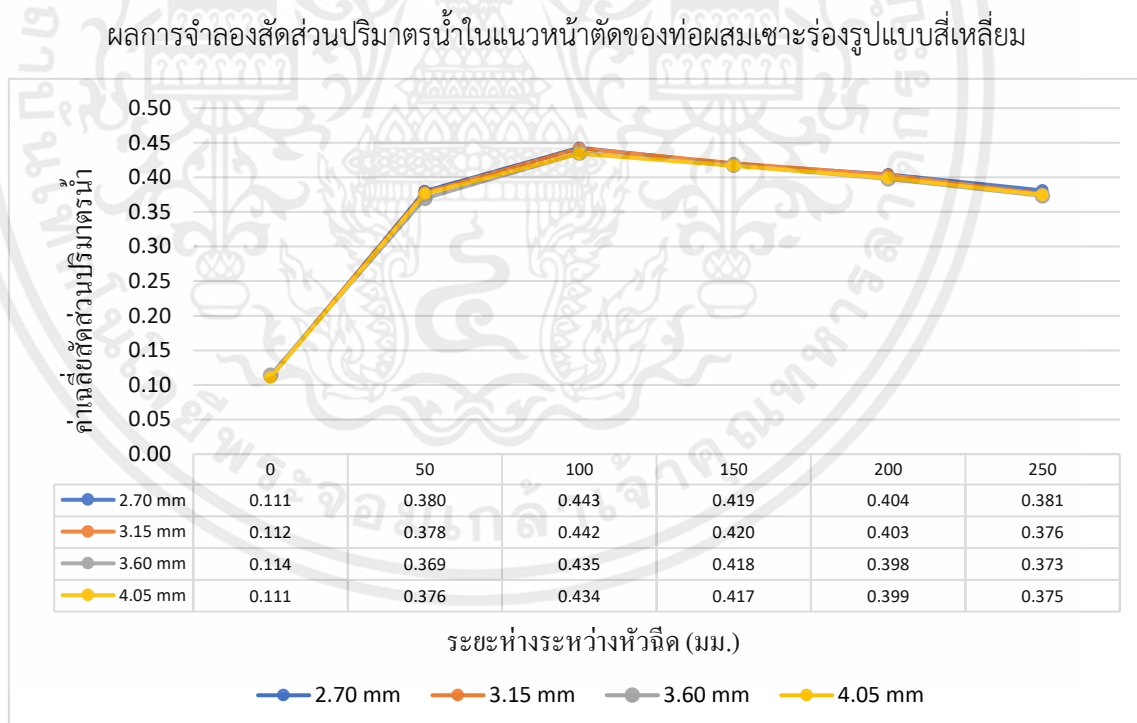
ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำในแนวหน้าตัดของท่อผสมเซาะร่องรูปแบบสามเหลี่ยม



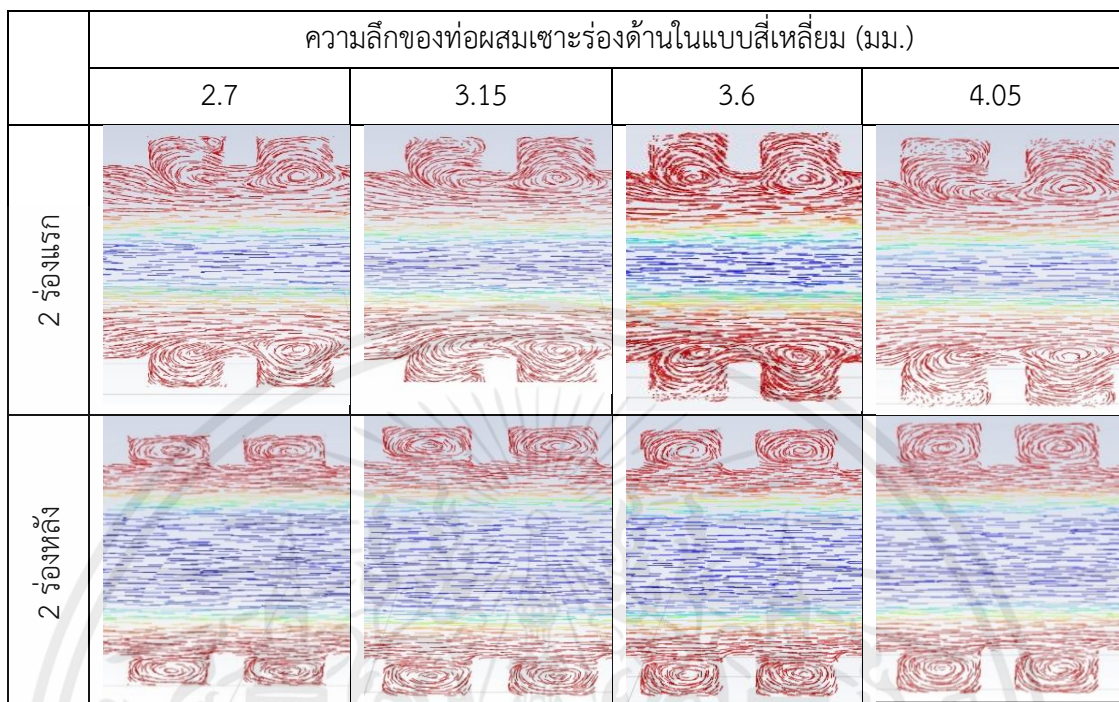
รูปที่ 5.22 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบวงกลมที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อนาที โดยใช้ขนาดความกว้างของร่องเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตร และความลึกของร่องเท่ากับ 2.7, 3.15, 3.6 และ 4.05 มิลลิเมตร



ตารางที่ 11 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำภายในท่อผสมเซาะร่องสามเหลี่ยม

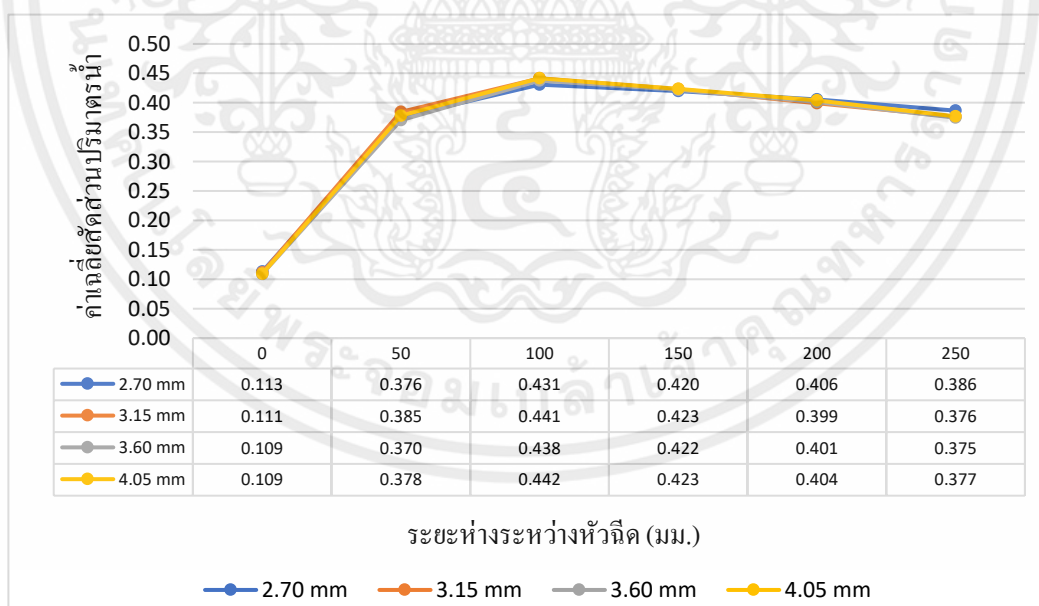


รูปที่ 5.23 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยม ที่อัตราไหล 6 ลิตรต่อนาที โดยใช้ขนาดความกว้างของร่องเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตร และความลึกของร่องเท่ากับ 2.7, 3.15, 3.6 และ 4.05 มิลลิเมตร

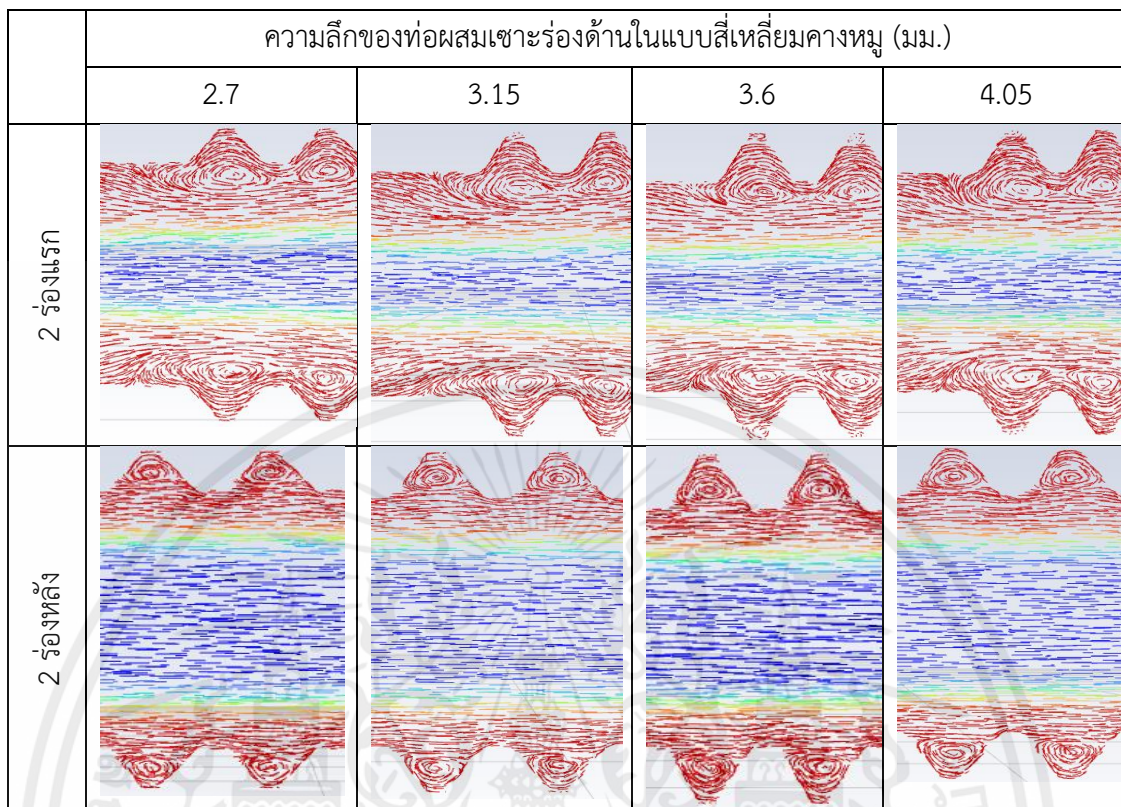


ตารางที่ 12 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำภายในท่อผสมเซาะร่องสี่เหลี่ยม

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรน้ำในแนวหน้าตัดของท่อผสมเซาะร่องรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 5.24 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยม ที่อัตราไหล 6 ลิตรต่อวินาที โดยใช้ขนาดความกว้างของร่องเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตร และความลึกของร่องเท่ากับ 2.7, 3.15, 3.6 และ 4.05 มิลลิเมตร



ตารางที่ 13 ผลจากแบบจำลองเส้นการไหลของสัดส่วนปริมาตรน้ำภายในท่อผสมเซาะร่องสี่เหลี่ยมคางหมู

พบว่าทุกรูปแบบการเซาะร่องภายในท่อผสมนั้นความลึกของร่องจะมีผลต่อค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความกว้างของร่อง จึงอาจสรุปได้ว่า ความลึกของร่องนั้นไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยสัดส่วนปริมาตรน้ำ

## บทที่ 6

### สรุปและอภิปรายผลโครงการ

จากผลการจำลอง อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการฉีดน้ำเข้าสู่ท่อผสมคือ 6 ลิตรต่อนาที โดยท่อผสมแบบราบเรียบให้ผลสรุปว่า เมื่อทำการฉีดน้ำที่อัตราการไหลที่มีค่าต่ำลงจะทำให้หน้าที่ฉีดสามารถสัมผัสกับอากาศ และทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลภายในท่อผสมได้มากขึ้น ทำให้ค่าสัดส่วนปริมาตรของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและเข้าใกล้ค่า 0.5 ซึ่งการจำลองนี้ได้มีการจำลองโดยใช้เงื่อนไขแบบเดียวกับท่อผสมแบบราบเรียบ เพื่อเปรียบเทียบและพิสูจน์หาอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดค่าอัตราการไหลของน้ำสี่ค่า และเปรียบเทียบในแต่ละท่อผสมที่ได้ทำการเจาะร่องตามรูปทรงเรขาคณิต ผลการจำลองในครั้งนี้ได้แสดงผลเช่นเดียวกับท่อผสมแบบราบเรียบคือ ที่อัตราการไหลที่ 6 ลิตรต่อนาที จะให้ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่เข้าใกล้ค่า 0.5 มากที่สุด

เมื่อทำการจำลองในส่วนของการหารูปทรงเรขาคณิตในการเจาะร่องภายในท่อผสมที่เหมาะสมและให้ค่าที่ดีที่สุด โดยการกำหนดที่ค่าอัตราการไหลที่เท่ากัน ขนาดสัดส่วนของรูปทรงเรขาคณิต และเงื่อนไขการคำนวณเบื้องต้นที่เหมือนกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า รูปทรงเรขาคณิตแบบสี่เหลี่ยมจะให้ค่าอัตราส่วนปริมาตรน้ำที่มากที่สุดในทุกค่าอัตราการไหล วงกลม สี่เหลี่ยมคางหมู และวงกลมตามลำดับ

ในการจำลองเพื่อพิสูจน์ว่าขนาดสัดส่วนความกว้าง ความลึก จำนวนของร่องนั้นมีอิทธิพลต่อค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำหรือไม่ ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการจำลองโดยแบ่งออกเป็น 3 การจำลอง คือ 1.ใช้ความกว้างของร่อง กำหนดให้ค่าความลึกและจำนวนร่องคงที่ 2.ใช้ความลึกของร่อง กำหนดให้ค่าความกว้างและจำนวนร่องคงที่ และ 3.ใช้จำนวนร่องในการเจาะสี่ค่า กำหนดค่าความกว้างและค่าความลึกของร่องคงที่ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า จำนวนของร่องจะส่งผลโดยตรงกับค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำคือ เมื่อมีจำนวนร่องมากขึ้นในท่อผสม จะทำให้มีการผสมกันระหว่างน้ำและอากาศภายในท่อผสมมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ค่าความกว้างของร่องนั้นให้ผลเช่นเดียวกันคือ เมื่อขนาดความกว้างของร่องเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากการเกิดการหมุนวนของอากาศภายในท่อผสมที่มากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลที่ดีขึ้นตามไปด้วย จำนวนร่องที่ดีที่สุดคือ 25 ร่อง และความกว้างของขนาดร่องที่เหมาะสมที่สุดคือ 5.4 มิลลิเมตร โดยรูปทรงในการเจาะร่องแบบวงกลมให้ค่ามากที่สุด สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมูตามลำดับ แต่ในส่วนของคุณค่าความลึกของร่องนั้นแสดงให้เห็นว่า ความลึกของร่องมีผลต่อค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการจำลองแบบอื่น

การเปรียบเทียบท่อผสมแบบเขาระ่องกับท่อผสมแบบติดใบปิดที่นายเชมชาติ บุญยะกาญจน และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาไว้พบว่า ท่อผสมแบบติดใบปิดให้ประสิทธิภาพดีกว่าท่อผสมแบบเขาระ่อง แต่ท่อผสมแบบเขาระ่องจะช่วยในการลดค่าความดันตกอันเนื่องมาจากใบปิดที่ขวางทิศทางการไหลของของผสมที่เกิดในท่อผสมได้และยังสามารถลดการกระจายของน้ำที่ฉีดออกมา นำไปสู่การลดความสิ้นเปลืองในต้นทุนการใช้ทรัพยากรได้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] จีรพล เนียมพินิจสกุล, ณัฐพล พาโคกหอม และพนา สุขเจริญ (2556). รายงานการวิจัยเรื่อง อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวนำไปใช้ในการผสมแก๊สและของเหลว, ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] เขมชาติ บุณยะกาญจน, เขิญชาญ ขาวซัง และ ฤทธิเศก บุญโชคศิริธูเมธา (2558). รายงานการวิจัย เรื่องการออกแบบท่อผสมสำหรับชุดหัวฉีดเหนียวนำไปในหอบำบัดอากาศแบบเปียก, ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- [3] Ajay K. Agrawal and Nathan J. Vardaman. (2017). Computational analysis of two-phase mixing inside a twin-fluid, fuel-flexible atomizer.
- [4] Arsalan Parvareh and Masoud Rahimi. (2005). Experimental and CFD investigation on mixing by a jet in a semi-industrial stirred tank.
- [5] Agnimitra Biswas, Soumith Voddepalli, Sujit Nath. (2020). Numerical analysis of Heat transfer in helically grooved tubes.
- [6] Abdulmajeed A. Ramadhan, Amer J. Shareef, Yaser T. (2012). Groove geometry effects on turbulent heat transfer and fluid flow.
- [7] CHENG Dong-sheng, LONG Xiang-yu, XIE Shao-hua, YIN Ze-gao. (2013). Oxygen transfer characteristics of water and bubble mixture pipe flow through two sudden contractions and expansions.

## ภาคผนวก ก

### 1. การออกแบบท่อผสมเซาะร่องภายในรูปวงกลม, สามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมคางหมู



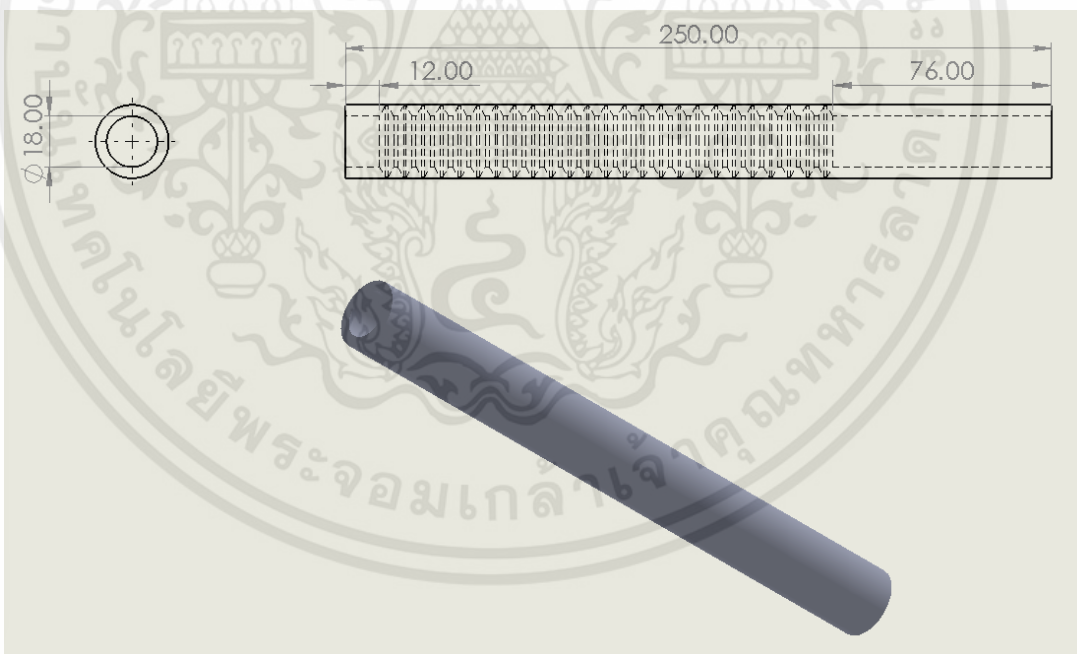
รูปที่ 1 ท่อเซาะร่องผิวด้านในแบบวงกลม



รูปที่ 2 ท่อเซาะร่องผิวด้านในแบบสามเหลี่ยม



รูปที่ 3 ท่อเจาะร่อนผิวด้านในแบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4 ท่อเจาะร่อนผิวด้านในแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### 2. ผลการจำลองค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำ

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่อัตราการไหล 6 8 10 12 ลิตรต่อนาที ในท่อผสมราบเรียบ

รูปแบบห้องผสม	อัตราการไหลของน้ำ (ลิตรต่อนาที)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำ					
		0 มิลลิเมตร	50 มิลลิเมตร	100 มิลลิเมตร	150 มิลลิเมตร	200 มิลลิเมตร	250 มิลลิเมตร
ท่อผสมราบเรียบ	6	0.112	0.322	0.388	0.361	0.346	0.326
	8	0.113	0.269	0.371	0.348	0.327	0.310
	10	0.113	0.239	0.359	0.339	0.316	0.300
	12	0.112	0.217	0.348	0.331	0.309	0.292

ตารางที่ 2 แสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่อัตราการไหล 6 8 10 12 ลิตรต่อนาที ในท่อผสมห้องผสมเขาระ่องรูปวงกลม

รูปแบบห้องผสม	อัตราการไหลของน้ำ (ลิตรต่อนาที)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำ					
		0 มิลลิเมตร	50 มิลลิเมตร	100 มิลลิเมตร	150 มิลลิเมตร	200 มิลลิเมตร	250 มิลลิเมตร
ท่อผสมเขาระ่องรูปวงกลม	6	0.112	0.393	0.435	0.419	0.410	0.393
	8	0.112	0.306	0.407	0.383	0.391	0.395
	10	0.112	0.271	0.394	0.372	0.380	0.386
	12	0.112	0.247	0.382	0.364	0.371	0.379

ตารางที่ 3 แสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่อัตราการไหล 6 8 10 12 ลิตรต่อนาที ในท่อผสมห้องผสมเขาระื่องรูปสามเหลี่ยม

รูปแบบห้องผสม	อัตราการไหล ของน้ำ (ลิตรต่อนาที)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำ					
		0 มิลลิเมตร	50 มิลลิเมตร	100 มิลลิเมตร	150 มิลลิเมตร	200 มิลลิเมตร	250 มิลลิเมตร
ท่อผสมเขาระื่องรูป สามเหลี่ยม	6	0.114	0.372	0.434	0.414	0.390	0.359
	8	0.114	0.319	0.420	0.399	0.378	0.350
	10	0.114	0.281	0.343	0.389	0.370	0.344
	12	0.114	0.252	0.403	0.384	0.366	0.345

ตารางที่ 4 แสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่อัตราการไหล 6 8 10 12 ลิตรต่อนาที ในท่อผสมห้องผสมเขาระื่องรูปสี่เหลี่ยม

รูปแบบห้องผสม	อัตราการไหล ของน้ำ (ลิตรต่อนาที)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำ					
		0 มิลลิเมตร	50 มิลลิเมตร	100 มิลลิเมตร	150 มิลลิเมตร	200 มิลลิเมตร	250 มิลลิเมตร
ท่อผสมเขาระื่อง รูปสี่เหลี่ยม	6	0.113	0.383	0.448	0.433	0.422	0.417
	8	0.113	0.323	0.428	0.411	0.403	0.400
	10	0.112	0.284	0.414	0.397	0.390	0.390
	12	0.112	0.257	0.403	0.387	0.381	0.382

ตารางที่ 5 แสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่อัตราการไหล 6 8 10 12 ลิตรต่อนาที ในท่อผสมห้องผสมเซาะ  
ร่องรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

รูปแบบห้อง ผสม	อัตราการไหลของ น้ำ (ลิตรต่อนาที)	ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาตรน้ำ					
		0 มิลลิเมตร	50 มิลลิเมตร	100 มิลลิเมตร	150 มิลลิเมตร	200 มิลลิเมตร	250 มิลลิเมตร
ท่อผสมเซาะ ร่องรูปสี่เหลี่ยม คางหมู	6	0.109	0.196	0.285	0.282	0.252	0.224
	8	0.109	0.195	0.282	0.280	0.248	0.223
	10	0.109	0.193	0.280	0.279	0.247	0.222
	12	0.109	0.191	0.279	0.279	0.246	0.221

ตารางที่ 6 แสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อนาที ในท่อผสมเซาะ  
ร่องแบบรูปต่างๆ

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	วงกลม	สามเหลี่ยม	สี่เหลี่ยม	สี่เหลี่ยมคางหมู
0	0.113	0.114	0.113	0.109
50	0.358	0.372	0.383	0.373
100	0.425	0.434	0.448	0.439
150	0.399	0.414	0.433	0.391
200	0.405	0.390	0.422	0.395
250	0.407	0.359	0.417	0.366

ตารางที่ 7 แสดงแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที ในท่อผสมเซาะ

ร่องแบบรูปต่างๆ

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	วงกลม	สามเหลี่ยม	สี่เหลี่ยม	สี่เหลี่ยมคางหมู
0	0.112	0.114	0.113	0.109
50	0.306	0.319	0.324	0.317
100	0.407	0.420	0.428	0.423
150	0.383	0.399	0.411	0.375
200	0.391	0.378	0.403	0.382
250	0.395	0.350	0.401	0.356

ตารางที่ 8 แสดงแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที ในท่อผสมเซาะ

ร่องแบบรูปต่างๆ

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	วงกลม	สามเหลี่ยม	สี่เหลี่ยม	สี่เหลี่ยมคางหมู
0	0.112	0.114	0.113	0.109
50	0.271	0.281	0.284	0.280
100	0.394	0.409	0.414	0.411
150	0.372	0.389	0.397	0.364
200	0.380	0.370	0.391	0.373
250	0.386	0.344	0.390	0.349

ตารางที่ 9 แสดงแสดงค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำที่อัตราการไหล 12 ลิตรต่อนาที ในท่อผสมเซาะ

ร่องแบบรูปต่างๆ

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	วงกลม	สามเหลี่ยม	สี่เหลี่ยม	สี่เหลี่ยมคางหมู
0	0.112	0.114	0.113	0.109
50	0.247	0.256	0.257	0.255
100	0.382	0.399	0.403	0.401
150	0.364	0.380	0.388	0.356
200	0.371	0.363	0.382	0.366
250	0.380	0.339	0.382	0.344

ตารางที่10 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบวงกลมโดยใช้

ขนาดความลึกของร่องเท่ากับ 3.6 มม. และความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7,3.6,4.5, 5.4 มม.

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	2.7 มม.	3.6 มม.	4.5 มม.	5.4 มม.
0	0.115	0.114	0.115	0.115
50	0.357	0.374	0.375	0.407
100	0.392	0.412	0.428	0.457
150	0.381	0.396	0.419	0.439
200	0.379	0.389	0.402	0.425
250	0.366	0.378	0.389	0.400

ตารางที่11 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบสามเหลี่ยมโดยใช้

ขนาดความลึกของร่องเท่ากับ 3.6 มม. และความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7,3.6,4.5, 5.4 มม.

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	2.7 มม.	3.6 มม.	4.5 มม.	5.4 มม.
0	0.115	0.114	0.115	0.114
50	0.339	0.348	0.424	0.414
100	0.411	0.418	0.436	0.475
150	0.383	0.395	0.423	0.457
200	0.367	0.380	0.402	0.424
250	0.350	0.355	0.376	0.398

ตารางที่12 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสม ในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยมโดยใช้

ขนาดความลึกของร่องเท่ากับ 3.6 มม. และความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7,3.6,4.5, 5.4 มม.

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	2.7 มม.	3.6 มม.	4.5 มม.	5.4 มม.
0	0.111	0.112	0.113	0.113
50	0.353	0.368	0.378	0.353
100	0.405	0.419	0.423	0.445
150	0.382	0.395	0.405	0.426
200	0.370	0.378	0.388	0.406
250	0.349	0.359	0.367	0.382

ตารางที่13 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมูโดยใช้ขนาดความลึกของร่องเท่ากับ3.6 มม. และความกว้างของร่องเท่ากับ 2.7,3.6,4.5,5.4 มม.

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	2.7 มม.	3.6 มม.	4.5 มม.	5.4 มม.
0	0.110	0.109	0.110	0.109
50	0.362	0.353	0.380	0.391
100	0.405	0.415	0.439	0.446
150	0.397	0.395	0.420	0.428
200	0.389	0.380	0.404	0.407
250	0.387	0.355	0.376	0.380

ตารางที่14 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมในแนวหน้าตัดรูปแบบสามเหลี่ยมโดยใช้ขนาดความกว้างของร่องเท่ากับ3.6 มม.และความลึกของร่องเท่ากับ 2.7,3.15,3.6, 4.05 มม.

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	2.7 มม.	3.6 มม.	4.5 มม.	5.4 มม.
0	0.114	0.112	0.111	0.112
50	0.372	0.375	0.372	0.383
100	0.434	0.437	0.444	0.441
150	0.414	0.422	0.423	0.423
200	0.390	0.398	0.398	0.402
250	0.359	0.371	0.373	0.376

ตารางที่15 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยมโดยใช้ขนาดความกว้างของร่องเท่ากับ3.6 มม.และความลึกของร่องเท่ากับ 2.7,3.15,3.6, 4.05 มม.

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	2.7 มม.	3.6 มม.	4.5 มม.	5.4 มม.
0	0.111	0.112	0.114	0.111
50	0.380	0.378	0.369	0.376
100	0.443	0.442	0.435	0.434
150	0.419	0.420	0.418	0.417
200	0.404	0.403	0.398	0.399
250	0.381	0.376	0.373	0.375

ตารางที่16 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำของท่อผสมในแนวหน้าตัดรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมูโดยใช้ขนาดความกว้างของร่องเท่ากับ3.6 มม.และความลึกของร่องเท่ากับ 2.7,3.15,3.6,4.05 มม.

ระยะห่างจากหัวฉีด (มม.)	2.7 มม.	3.6 มม.	4.5 มม.	5.4 มม.
0	0.113	0.111	0.109	0.109
50	0.376	0.385	0.370	0.378
100	0.431	0.441	0.438	0.442
150	0.420	0.423	0.422	0.423
200	0.406	0.399	0.401	0.404
250	0.386	0.376	0.375	0.377



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### 3. ผลการหาโมเดล และจำนวนกริดที่เหมาะสมกับชิ้นงาน

ตารางที่17 แสดงค่าความผิดพลาดของ RNG model ในแต่ละช่วงของจำนวนกริด

Range	Element sizing	จำนวน Mesh	sim	sim	error %	Theory	sim	
			Pressure (min)	Q Air (l/min)		Q Air (l/min)	V air (m/s)	V outlet(m/s)
50,000	2	54,258	-13.514	38.327	1.533	38.924	2.847	3.888
100,000	1.5	110,958	-15.224	37.659	1.483	38.226	2.789	3.859
150,000	1.3	157586	-9.940	37.735	0.912	38.082	2.789	3.871
200,000	1	190,153	-13.398	37.023	0.991	37.398	2.734	3.824
250,000	1.05	260,256	-12.798	37.299	0.766	37.587	2.781	3.929
300,000	0.98	305,433	-14.019	37.223	0.512	37.415	2.737	3.842
350,000	0.92	361,679	-9.759	37.269	0.418	37.425	2.747	3.854
400,000	0.87	404178	-10.899	37.215	0.557	37.424	2.744	3.848
500000	0.82	490,000	-9.820	37.038	0.667	37.287	2.698	3.790

ตารางที่18 แสดงค่าความผิดพลาดของ Standard model ในแต่ละช่วงของจำนวนกริด

Range	Element sizing	จำนวน Mesh	sim	sim	error %	Theory	sim		Pressure (air inlet)
			Pressure (min)	Q Air (l/min)		Q Air (l/min)	v air outlet(m/s)		
50,000	2	54,258	-11.422	37.392	1.801	38.078	2.770	3.820	-4.822
100,000	1.5	111,238	-11.588	35.751	3.365	36.997	2.664	3.751	-4.552
150,000	1.3	156690	-12.344	35.011	1.364	35.496	2.588	3.686	-4.189
200,000	1	190,153	-11.902	35.161	1.516	35.702	2.598	3.697	-4.239
300,000	0.98	305,433	-13.121	34.932	1.069	35.309	2.579	3.687	-4.146
350,000	0.92	356,942	-12.654	36.416	0.734	36.685	2.685	3.791	-4.475
400,000	0.87	404178	-10.490	35.147	0.842	35.446	2.592	3.705	-4.178
500,000	0.85	490,000	-9.840	34.560	1.212	34.985	2.551	3.652	-4.070

ตารางที่19 แสดงค่าความผิดพลาดของ Realizable model ในแต่ละช่วงของจำนวนกริด

Range	Element sizing	จำนวน Mesh	sim	sim	error %	Theory	sim		
			Pressure (min)	Q Air (l/min)		Q Air (l/min)	V air(m/s)	V outlet(m/s)	Pressure (air inlet)
50,000	2	54,258	-12.788	38.154	1.604	38.776	3.889	3.887	-4.999
100,000	1.5	111,238	-12.135	36.858	1.282	37.337	2.795	3.795	-4.636
150,000	1.3	157586	-12.761	36.545	0.949	36.895	2.701	3.778	-4.527
200,000	1	190,153	-13.326	37.507	0.970	37.875	2.771	3.844	-4.770
250,000	1.05	256,023	-12.651	37.596	0.731	37.873	2.776	3.853	-4.769
300,000	0.98	305,433	-14.233	37.932	0.761	38.223	2.801	3.877	-4.858
350,000	0.92	361,679	-13.029	38.062	0.469	38.241	2.807	3.891	-4.863
400,000	0.87	404178	-10.510	36.936	0.581	37.152	2.725	3.816	-4.589
500000	0.85	490,000	-9.896	37.668	0.842	37.988	2.709	3.857	-4.799

ตารางที่20 แสดงค่าความผิดพลาดของ First order upwind ใน RNG โมเดลแต่ละช่วงของจำนวนกริด

Range	Element sizing	จำนวน Mesh	sim	sim	Theory	sim		
			Pressure (min)	Q Air (l/min)	Q Air (l/min)	V air (l/min)	V outlet(m/s)	error %
50,000	2.10	50057	-11.136	35.120	36.229	2.609	3.722	3.062
100,000	1.50	113233	-8.096	35.612	36.257	2.634	3.751	1.779
150,000	1.30	159986	-10.285	35.839	36.436	2.648	3.769	1.639
200,000	1.15	211465	-12.212	35.941	36.669	2.653	3.784	1.986
300,000	0.98	311487	-12.269	36.325	36.981	2.679	3.813	1.774
350,000	0.92	361679	-8.783	36.207	36.658	2.673	3.810	1.230
400,000	0.87	416117	-11.530	36.289	36.836	2.643	3.816	1.484
500000	0.82	495377	-10.672	35.628	36.189	2.626	3.751	1.550

ตารางที่21 แสดงค่าความผิดพลาดของ Second order upwind ใน RNG โมเดลแต่ละช่วงของจำนวนกริด

Range	Element sizing	จำนวน Mesh	sim	sim	error %	Theory	sim	
			Pressure (min)	Q Air (l/min)		Q Air (l/min)	V air (m/s)	V outlet(m/s)
50,000	2	54,258	-13.514	38.327	1.533	38.923	2.846	3.888
100,000	1.5	110,958	-15.223	37.659	1.482	38.225	2.789	3.859
150,000	1.3	157586	-9.940	37.735	0.911	38.082	2.789	3.870
200,000	1	190,153	-13.397	37.023	0.991	37.393	2.734	3.823
250,000	1.05	260,256	-12.797	37.299	0.766	37.586	2.780	3.929
300,000	0.98	305,433	-14.019	37.223	0.512	37.414	2.737	3.842
350,000	0.92	361,679	-9.759	37.269	0.418	37.425	2.746	3.853
400,000	0.87	404178	-10.899	37.215	0.557	37.423	2.744	3.848
500000	0.82	490,000	-9.820	37.038	0.666	37.287	2.698	3.790

ตารางที่22 แสดงค่าความผิดพลาดของ Quick ใน RNG โมเดลแต่ละช่วงของจำนวนกริด

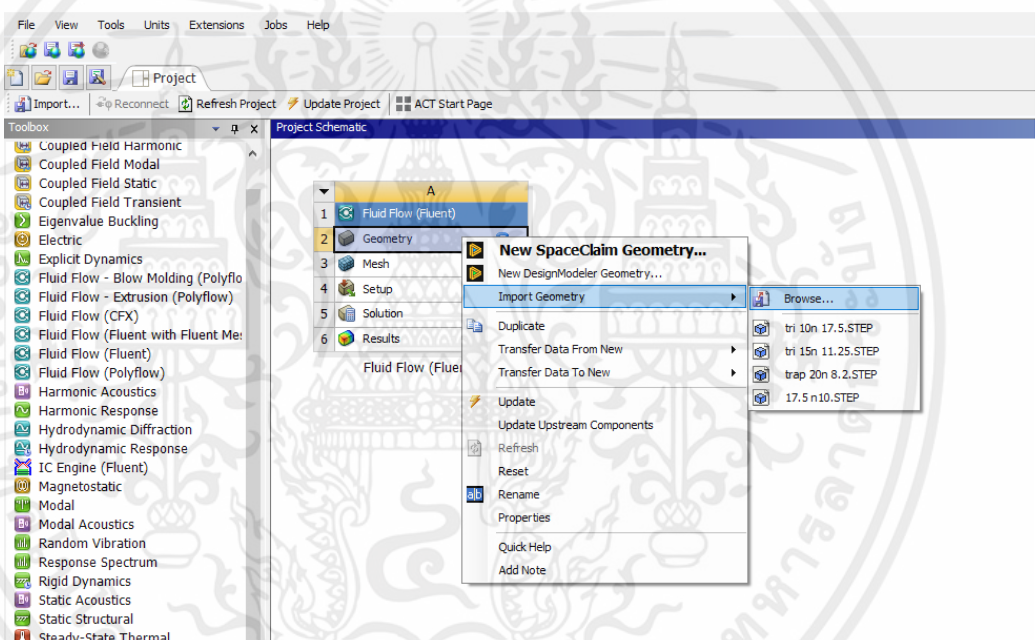
Range	Element sizing	จำนวน Mesh	sim	sim	Theory	sim	
			Pressure (min)	Q Air (l/min)	Q Air (l/min)	error %	V outlet(m/s)
50,000	2	54,258	-13.422	37.93	38.524	1.542	3.862
100,000	1.5	110,958	-15.080	36.969	37.539	1.517	3.812
150,000	1.3	157586	-9.721	36.784	37.117	0.898	3.805
200,000	1	209,492	-12.447	37.174	37.541	1.048	3.837
300,000	0.98	305,433	12.772	37.431	37.647	0.574	3.860
350,000	0.92	361,679	-10.874	37.466	37.655	0.501	3.868
400,000	0.87	404178	-12.607	37.334	37.638	0.806	3.857
500000	0.81	489551	-11.524	36.489	37.0155	1.422	3.787

## ภาคผนวก ง

### 4. การตั้งค่าในโปรแกรม ANSYS Fluent

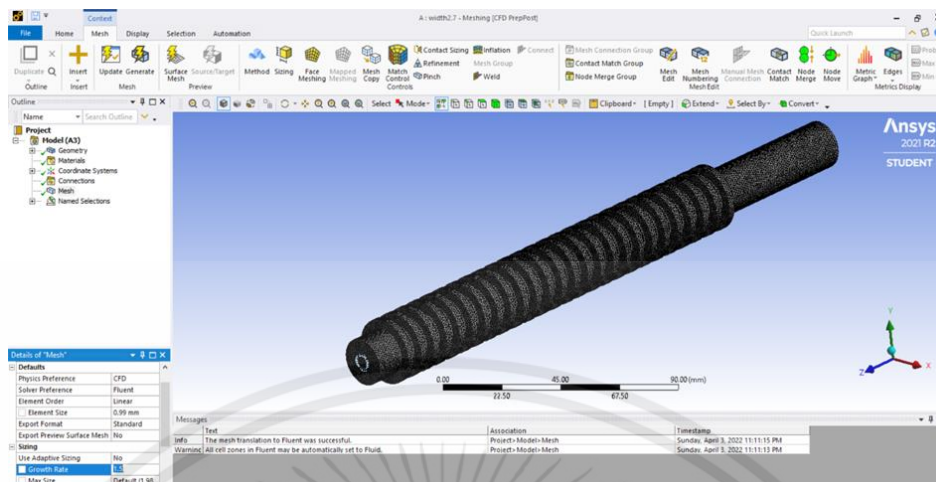
ในการสร้างแบบจำลองท่อผสมในงานวิจัยนี้ ได้ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ในการทำนายและวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลโดยอิงจากการใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์เริ่มต้นในการใช้โปรแกรมโดยการนำไฟล์แบบจำลองโมเดลที่ได้ทำการสร้างจากโปรแกรม Solidworks เข้ามาในโปรแกรม ANSYS ใช้คำสั่ง Geometry > Import Geometry > Browse ..

การตั้งค่าแบบจำลองนั้น ในการจำลองครั้งนี้จะกำหนดให้เป็นการไหลแบบหลายเฟส กำหนดให้เฟสแรกจะอยู่บริเวณกลางหน้าตัดทางเข้าคือน้ำ และวงรอบเป็นเฟสที่สอง คือเฟสของอากาศ



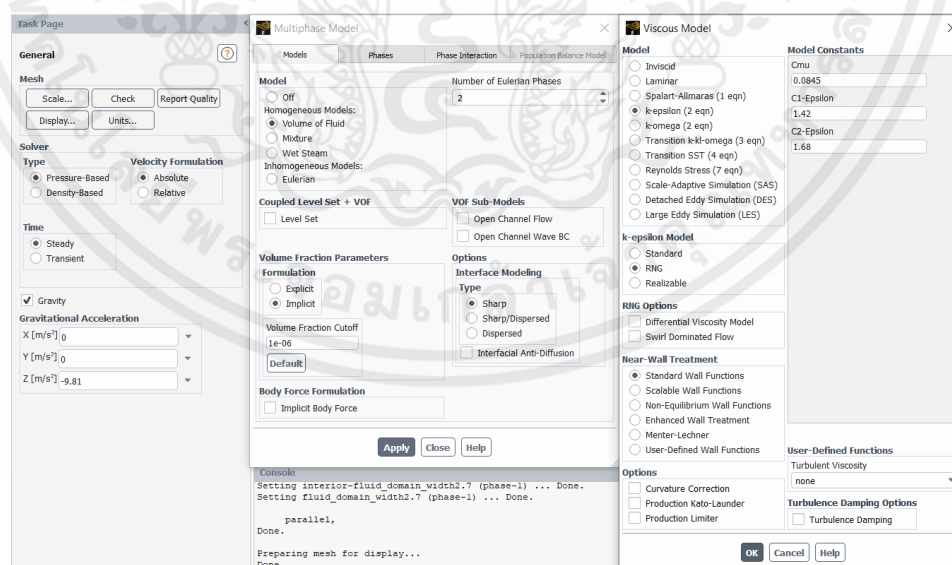
รูปที่ 5 การเปิดแบบจำลองจากโปรแกรม Solidworks

ทำการสร้างขอบเขตย่อย (Mesh) กำหนดให้จำนวนกริดมีค่าประมาณ 350,000 กริด ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมและคงที่มากที่สุด



รูปที่ 6 การสร้างขอบเขตย่อย (Mesh)

ทำการตั้งค่าหน่วยของแบบจำลองในโปรแกรม ในการจำลองครั้งนี้จะกำหนดให้เป็นหน่วย มิลลิเมตร จากการปรับคำสั่งของ Scale Mesh จากนั้นทำการตั้งค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) เป็น  $9.81 \text{ m/s}^2$  โดยกำหนดทิศทางของแรงโน้มถ่วงให้มีทิศทางตามการทดลอง และทำการ กำหนดสถานะ (Time) เป็น Steady เลือก Solver เป็นแบบ Pressure-Based ในการอิงการคำนวณ ในการตั้งค่าพฤติกรรมการไหลของแบบจำลองที่เราสนใจนั้น (Models) ทำการเลือกการไหล แบบหลายเฟส (Multiphase) ด้วยโมเดล Volume of Fluid จากนั้นเลือก Implicit Formulation และ เลือกการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน โดยเลือก Viscous > k-epsilon Model > RNG



รูปที่ 7 การตั้งค่าพฤติกรรมการไหลในโปรแกรม Fluent

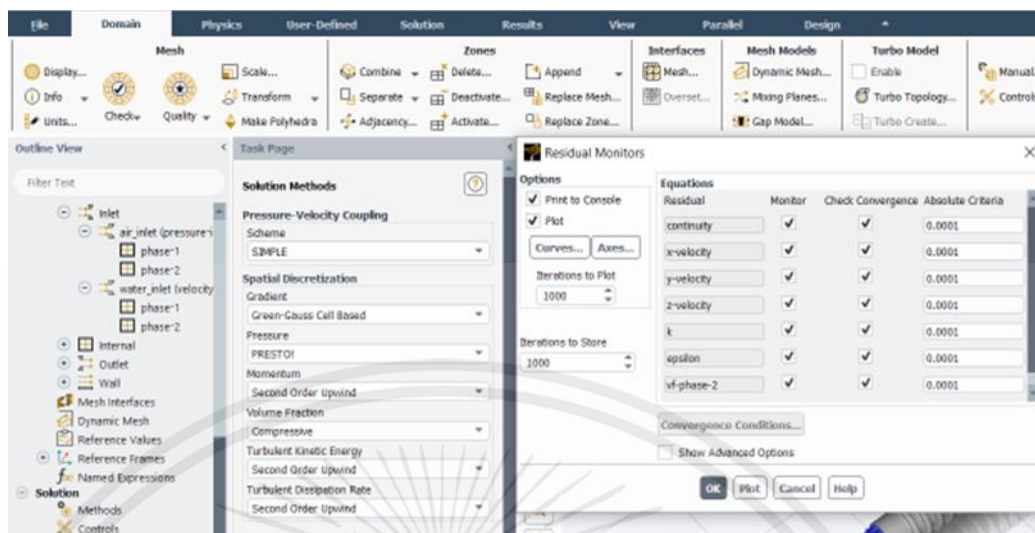
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดของไหลที่ใช้ในการจำลองครั้งนี้เป็น Air และ Water-liquid และตั้งค่าความเร็วน้ำด้วยการใช้คำสั่งการกำหนดเงื่อนไขที่ขอบเขต (Boundary Condition) กำหนดให้อากาศทางเข้า (Air inlet) เป็นแบบ Pressure inlet มีค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำเท่ากับศูนย์ และน้ำทางเข้า (Water inlet) เป็นแบบ Velocity inlet มีค่าสัดส่วนปริมาตรน้ำเท่ากับหนึ่ง จากนั้นทำการกำหนดค่าความเร็วน้ำตามที่กำหนดในการจำลอง



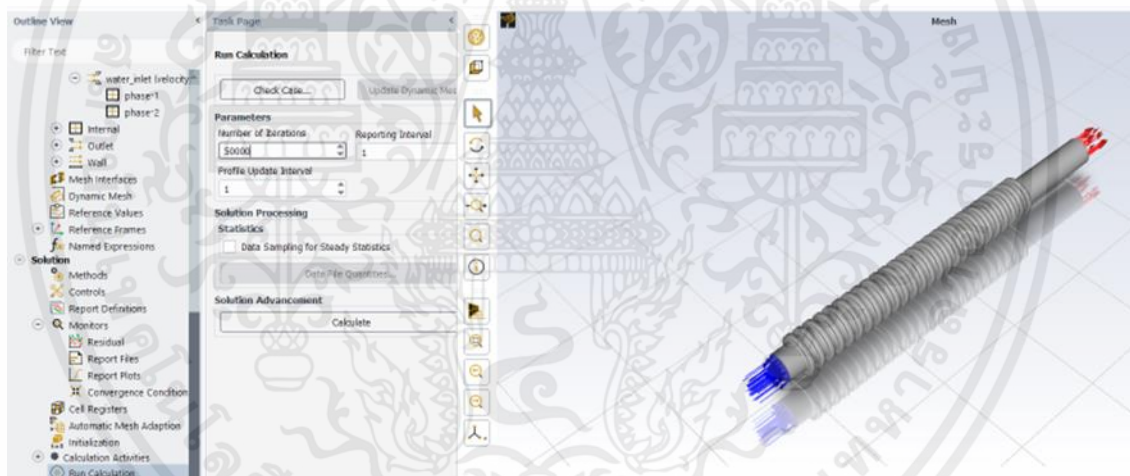
รูปที่ 8 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตในโปรแกรม Fluent

การคำนวณวิธีการหาคำตอบ (Methods) ในการจำลองครั้งนี้จะกำหนดวิธีเป็นแบบ SIMPLE Scheme , Green-Gauss Cell Based , Pressure เป็นแบบ PRESTO! , Momentum เป็นแบบ Second Order Upwind, Volume Fraction เป็นแบบ Compressive, Turbulent Kinetic Energy และ Turbulent Dissipation Rate เป็นการคำนวณแบบ Second Order Upwind จากนั้นตั้งค่าผลต่างคำตอบโดยใช้คำสั่ง Monitor > Residual กำหนดค่า Absolute Criteria ให้เท่ากับ 0.0001



รูปที่ 9 การกำหนดวิธีการคำนวณการหาคำตอบในโปรแกรม Fluent

ทำการเริ่มคำนวณรอบซ้ำโดยใช้คำสั่ง Run Calculation > Number of Iterate > Calculate



รูปที่ 10 การกำหนดการคำนวณรอบซ้ำในโปรแกรม Fluent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้