

อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวนี้เพื่อใช้ในการผสมก๊าซของเหลว
DIMENSION RATIO OF INDUCING JET FOR GAS-LIQUID MIXING

จิรพล เนียมทีนิจสกุล

ฉัฐพล พาโคกทม

ทนาย สุบเจริญ

ปริญญาโทชั้นปริญญาโทเป็นสาขาหนึ่งของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ปริญญาโทชั้นปริญญาโทเป็นสาขาหนึ่งของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวนำไปใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว
DIMENSION RATIO OF INDUCING JET FOR GAS-LIQUID MIXING

จิรพล เนียมพินิจสกุล
ณัฐพล พาโคกหอม
พนา สุขเจริญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

DIMENSION RATIO OF INDUCING JET FOR GAS-LIQUID MIXING

JIRAPON	NEAMPINITSAKUN
NATTHAPHON	PHAKHOKTHOM
PANA	SUKCHAROEN

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
2013

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวนำไปใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว

DIMENSION RATIO OF INDUCING JET FOR GAS-LIQUID MIXING

ผู้จัดทำ

1. นายจิรพล เนียมพินิจสกุล รหัสประจำตัว 53010214
2. นายณัฐพล พาโคกทม รหัสประจำตัว 53010493
3. นายพนา สุขเจริญ รหัสประจำตัว 53011048

เสาวภา .

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ณัตวิภา เจียรระโนวชิระ)

อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวนำเพื่อใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว

นายจิรพล เนียมพินิจสกุล 53010214

นายณัฐพล พาโคกหอม 53010493

นายพนา สุขเจริญ 53011048

ผศ.ดร.ณัฐวิภา เจียรระโนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวนำต่ออัตราการดูดอากาศเข้ามาในห้องผสม โดยน้ำเป็นของไหลหลักถูกฉีดผ่านหัวฉีดด้วยความเร็วสูง ทำให้ความดันรอบๆบริเวณหัวฉีดลดลงและเหนียวนำอากาศซึ่งเป็นของไหลรองจากภายนอกเข้ามาผสมกับของเหลวดังกล่าวโดยไม่ต้องใช้เครื่องอัดอากาศ การสร้างแบบจำลองอัตราการไหลของของไหลด้วยโปรแกรมคำนวณพฤติกรรมการไหลของของไหลและทำการเปรียบเทียบกับชุดทดลองจริงที่ออกแบบตามแบบจำลอง อัตราการไหลของน้ำที่ใช้มีทั้งหมด 4 ค่า คือ 20.10, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที ผลที่ได้คือค่าอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดที่ทำให้อัตราการดูดอากาศมีค่าสูงที่สุดและสมรรถนะการดูดอากาศในรูปของมวลออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

DIMENSION RATIO OF INDUCING JET FOR GAS-LIQUID MIXING

Jirapon Neampinitsakun
Natthaphon Phakhokthom
Pana Sukcharoen
Assis.Prof. Nutvipa Jayranaiwachira Advisor
Year 2556

ABSTRACT

In this present paper, the effects of changing in dimension ratio of liquid jet ejector to the air suction rate were investigate. By injecting high velocity water as the primary fluid through the vertical down-flow ejector, causing the pressure around the ejector to drop and entrained the surrounding air to mix with the liquid without using any compressor. The CFD modeling have been used to obtain the results and validated with experimental data. The water flow rates are varied into 4 values, which are 20.10, 18.67, 17.24 and 15.81 litre per minute. This paper yield the result as the dimension ratio which causes the highest air suction rate and the performance of the ejector in term of oxygen mass versus kilowatt-hour.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากท่านอาจารย์ณัฏวิภา เจริญระโนวชิระ ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาพร้อมให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงาน และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆตลอดจนการตรวจสอบเอกสารจนงานเสร็จสิ้น ซึ่งต้องขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

จิรพล เนียมพินิจสกุล

ณัฐพล พาโคกหอม

พนา สุขเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	viii
สารบัญรูป	ix
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม	3
2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎี	3
2.1.1 ลักษณะเฉพาะของเจ็ท	3
2.1.2 พฤติกรรมของเจ็ท	4
2.1.2.1 เจ็ทอิสระ (Free Jets)	4
2.1.3 ผลกระทบจากตัวแปรต่างๆต่อการกระจายตัวของเจ็ท	5
2.1.3.1 ผลกระทบจากความปั่นป่วน	5
2.1.3.2 ผลกระทบจากความหนืด	5
2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ	5
2.2.1 การออกแบบและการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม	5
2.2.2 การออกแบบและการสร้างชุดทดลอง	6
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
3.1 ทฤษฎีเจ็ท	7
3.1.1 โครงสร้างและการพัฒนาของเจ็ทอิสระ	9
3.1.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อการกระจายของเจ็ท	9
3.1.2.1 รูปแบบของความเร็วเจ็ท ณ ปลายหัวฉีด	9
3.1.2.2 รูปทรงของหัวฉีด	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2.3 ครึ่งความกว้างและจุดกำเนิดเสมือนของเจ็ท.....	11
3.1.2.4 ความไม่เสถียรของเจ็ท	12
3.1.2.5 ความต่อเนื่องของโครงสร้าง	13
3.1.2.6 การกระจายตัวแบบอนุกรมคิงที่และไม่คิงที่.....	14
3.1.2.7 การจำลองตัวเอง.....	14
3.1.2.8 บทบาทของผนังด้านข้างต่อกระแสเจ็ท	15
3.1.2.9 มาตรการส่วนความยาวของความปั่นป่วน	15
3.2 ทฤษฎีการเติมอากาศและการถ่ายเทมวลระหว่างฟองอากาศและน้ำ	16
3.2.1 หลักการคำนวณมวลสารที่ถูกถ่ายเท	17
3.2.2 ปัจจัยที่ทำให้ออกซิเจนในน้ำมีมากหรือน้อย.....	20
3.3 รูปแบบไร้มิติของสมการการขนถ่ายของไหล.....	21
3.3.1 กฎอนุรักษ์มวล (กฎความต่อเนื่อง)	22
3.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม	23
3.4 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	24
3.4.1 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	24
3.4.1.1 ชั้นก่อนประมวลผล	25
3.4.1.2 ชั้นประมวลผล	25
3.4.1.3 ชั้นแสดงผล	25
3.4.2 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล	25
3.4.2.1 ความเข้ากันได้.....	26
3.4.2.2 เสถียรภาพการคำนวณ	26
3.4.2.3 การรู้เข้าของผลเฉลย.....	26
3.4.2.4 การอนุรักษ์.....	27
3.4.2.5 ความจำกัดขอบ	27
3.4.2.6 ความเสมือนจริง	27
3.4.2.7 ความหนาแน่น.....	27
3.4.3 รูปแบบการจัดวางกริด.....	28
3.4.4 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข.....	29
3.4.4.1 แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง	29
3.4.4.2 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง.....	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.4.3 แบบแผนวิธีผลต่างชั้นลมอันดับสอง.....	30
3.4.4.4 แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก.....	32
3.4.5 การวิเคราะห์ที่ทดสอบการควบคุม.....	33
3.4.6 การวิเคราะห์ที่ทดสอบการอนุรักษ์มวล.....	33
3.4.7 ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการควบคุมในการไหลคงตัว.....	34
3.4.8 การจำลองโมเดลแบบปั่นป่วน.....	34
3.4.9 Renormalization-group (RNG) $k-\epsilon$ model.....	35
3.4.10 Mathematical Algorithm of the Renormalization $k-\epsilon$ model.....	36
บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองและชุดทดลอง.....	37
4.1 การสร้างแบบจำลอง.....	37
4.1.1 การสร้างรูปร่างหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT).....	37
4.1.2 การสร้างขอบเขตย่อยด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT).....	38
4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT).....	39
4.1.4 การกำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้น.....	40
4.1.5 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร และสถานะการแก้ปัญหา.....	40
4.1.6 กรณีศึกษา.....	41
4.2 ชุดทดลองและวิธีการทดลอง.....	45
4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	45
4.2.1.1 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ (Jet Head).....	46
4.2.1.2 ห้องผสม (Mixing Chamber).....	46
4.2.1.3 หัวต่อท่ออากาศ (Air Inlet).....	47
4.2.2 ถังผสม (Mixing Tank).....	48
4.2.3 ระบบสูบน้ำ ท่อ และอุปกรณ์ต่างๆ (Water Pump, pipes and Tools).....	49
4.2.3.1 เครื่องสูบน้ำ.....	49
4.2.3.2 วาล์ว(Valve).....	49
4.2.3.3 สายยาง (Rubber Tube).....	50
4.2.3.4 ชุดท่อพีวีซี (PVC pipes and joints).....	51
4.2.4 เครื่องมือวัด (Measuring Equipment).....	51
4.2.4.1 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer).....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4.2 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Rota Meter)	52
4.2.4.3 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Clamp on Power meter)	52
4.2.5 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ (Canon EOS 7D)	53
4.3 วิธีการทดลอง	53
บทที่ 5 ผลการสร้างแบบจำลองและการทดลอง	54
5.1 ผลการสร้างแบบจำลอง	54
5.2 ผลการทดลอง.....	66
บทที่ 6 วิจารณ์และสรุปผลการทดลองและการจำลอง.....	78
6.1 วิจารณ์ผลการทดลองและการจำลอง.....	78
6.2 สรุปผลการทดลองและการจำลอง	78
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก. การสร้างแบบจำลองของหัวฉีดในโปรแกรมแกมบิท (Gambit) และ (Ansys Fluent)	83
ภาคผนวก ข. ผลจากการจำลอง	91
ภาคผนวก ค. การสร้างชุดหัวฉีดด้วยโปรแกรมออโตแคด (Autocad)	92
ภาคผนวก ง. ผลการทดลอง	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณ	65
2 อัตราการไหลของน้ำเทียบกับปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศ.....	71
ข1 ความดันที่ได้จากการจำลองเทียบกับอัตราการไหลของน้ำ	91
ข2 แสดงข้อมูลของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งรูอากาศต่างๆ.....	91
ข3 แสดงข้อมูลของเลขเรย์โนลด์อากาศและน้ำ.....	91
ง1 แสดงข้อมูลจากการวัดความเร็วของอากาศในการทดลองที่ L_a ต่างๆ	105
ง2 แสดงข้อมูลอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ L_a ต่างๆ.....	105
ง3 แสดงข้อมูลของเลขเรย์โนลด์ของน้ำกับอากาศที่ L_a ต่างๆ	106
ง4 แสดงข้อมูลจากการวัดความเร็วของอากาศในการทดลองที่ D_a ต่างๆ.....	106
ง5 แสดงข้อมูลอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ	106
ง6 แสดงข้อมูลของเลขเรย์โนลด์ของน้ำกับอากาศที่ D_a ต่างๆ	107
ง7 แสดงข้อมูลของปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศ	107
ง8 แสดงข้อมูลการเก็บค่าของเวลาในการเทียบวัดของ Rota meter	107

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	ลักษณะกระแสการไหลของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดพ่น..... 7
3.2	ตำแหน่งของจุดกำเนิดเสมือนและระยะครึ่งความกว้าง 12
3.3	ความปั่นป่วนในเจ็ท 13
3.4	พฤติกรรมของรูปแบบความเร็วของเจ็ทเมื่อมีผนังด้านข้าง..... 15
3.5	การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศสู่หยดน้ำ 16
3.6	การถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศสู่ของเหลวที่ห่อหุ้ม 16
3.7	แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ..... 28
3.8	รูปแบบการจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ..... 29
3.9	รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติกในปริมาณควบคุมแบบ 1 มิติ 32
4.1	(ก) แบบของชุดหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง 37
	(ข) ตัวแปรของระยะต่างๆ ในชุดทดลองหัวฉีด 37
4.2	แบบจำลองของชุดหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) 38
4.3	(ก) รูปแบบของขอบเขตย่อยของชุดหัวฉีด, (ข) จำนวนขอบเขตย่อย 39
4.4	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของชุดหัวฉีด..... 40
4.5	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และที่ขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ 42
4.6	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และที่ขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ..... 43
4.7	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ..... 43
4.8	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 8 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ..... 44
4.9	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ 45
4.10	(ก) แผนผังโครงสร้างชุดทดลอง, (ข) การติดตั้งชุดทดลองของจริง 45
4.11	(ก) แบบของหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวฉีดเจ็ทที่ใช้ในการทดลอง..... 46
4.12	(ก) แบบของห้องผสมที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ห้องผสมขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง..... 47
4.13	(ก) แบบของห้องผสมที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ห้องผสมขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง 47
4.14	(ก) แบบของรูอากาศที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวต่อท่ออากาศที่ใช้ในการทดลอง 48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ถังผสม (Mixing-Tank) ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
4.16 เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลอง	49
4.17 เกทวาล์ว.....	49
4.18 โกลบวาล์ว	50
4.19 สายยางขนาดใหญ่	50
4.20 ชุดท่อพีวีซี	51
4.21 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer)	51
4.22 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ.....	52
4.23 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า.....	52
4.24 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ.....	53
5.1 แสดงแผนผังความเร็วที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $3D_j$	54
5.2 แสดงแผนผังความดันที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $3D_j$	55
5.3 แสดงแผนผังความเร็วที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$	55
5.4 แสดงแผนผังความดันที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$	55
5.5 แสดงแผนผังความเร็วที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $9D_j$	56
5.6 แสดงแผนผังความดันที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $9D_j$	56
5.7 แสดงถึงแผนผังความเร็ว (ซ้าย) และแผนผังความดัน (ขวา) ที่ D_c เท่ากับ $3D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$	57
5.8 (ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดันที่อัตราการไหล 20.1 ลิตรต่อนาที	57
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน	58
5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก.....	58
5.11 (ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดันที่อัตราการไหล 18.67 ลิตรต่อนาที	59
5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดันที่อัตราการไหล 18.67 ลิตรต่อนาที.....	59
5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.14 (ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน ที่อัตราการไหล 17.24 ลิตรต่อนาที	60
5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน ที่อัตราการไหล 17.24 ลิตรต่อนาที	61
5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก.....	61
5.17 (ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน ที่อัตราการไหล 15.81 ลิตรต่อนาที.....	62
5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน ที่อัตราการไหล 15.81 ลิตรต่อนาที.....	62
5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก	63
5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและอากาศ	65
5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์น้ำและอากาศของ L_a ต่างๆ ที่ได้จากการจำลอง.....	66
5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ อัตราการไหลของอากาศที่ L_a ต่างๆ	67
5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับ อัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ	68
5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์ส์น้ำและอากาศที่ L_a ต่างๆ	69
5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์ส์น้ำและอากาศที่ D_a ต่างๆ.....	69
5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำ กับอัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ	70
5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ส์น้ำและอากาศที่ D_a ต่างๆ	71
5.28 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $1D_j$	72
5.29 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $2D_j$	73
5.30 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $3D_j$	74
5.31 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1D_j$	75
5.32 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1.5D_j$	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.33 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $2.5D_j$	77
1 หน้าตาของโปรแกรมแกมบิท (Gambit)	83
2 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมแกมบิท (Gambit)	84
3 การสร้างขอบเขตย่อยด้วยโปรแกรมแกมบิท (Gambit)	84
4 การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองโดยโปรแกรมแกมบิท (Gambit)	85
5 การ Export แบบไปที่ โปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)	85
6 หน้าตาของโปรแกรมฟลูเอิน Fluent 6.3.24.....	86
7 การเปิด ไฟล์ จากโปรแกรมแกมบิท (Gambit) ในโปรแกรมฟลูเอิน Fluent	87
8 การตรวจสอบขอบเขตย่อย (Mesh) ในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)	87
9 การกำหนดรูปแบบการไหลในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)	88
10 การกำหนดชนิดของของไหลในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)	88
11 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)	89
12 การกำหนดเงื่อนไขของขอบในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)	89
13 การกำหนดการคำนวณหาค่าตอบในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)	90
14 แสดงการคำนวณในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)	90
15 แสดงแบบชุดหัวฉีดโดยโปรแกรม Autocad.....	93
16 แสดงแบบหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายเท่ากับ 6 มิลลิเมตร โดยโปรแกรม Autocad.....	94
17 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ D_j หรือ 6 มิลลิเมตร และ ขนาดรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Autocad	95
18 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตร และ ขนาดรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Autocad.....	96
19 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $3D_j$ หรือ 18 มิลลิเมตร และ ขนาดรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Autocad.....	97
20 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตร และ ขนาดรูอากาศเท่ากับ $1D_j$ หรือ 6 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Autocad.....	98
21 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตร และ ขนาดรูอากาศเท่ากับ $1.5D_j$ หรือ 9 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Autocad.....	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
22	แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 2Dj หรือ 12 มิลลิเมตร และ ขนาดรูอากาศเท่ากับ 2.5Dj หรือ 15 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Autocad 100
23	แสดงแบบขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1Dj หรือ 6 มิลลิเมตร โดยโปรแกรม Autocad..... 101
24	แสดงแบบขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5Dj หรือ 9 มิลลิเมตร โดยโปรแกรม Autocad..... 102
25	แสดงแบบขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2Dj หรือ 12 มิลลิเมตร โดยโปรแกรม Autocad..... 103
26	แสดงแบบขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5Dj หรือ 15 มิลลิเมตร โดยโปรแกรม AutoCad 104
27	กราฟการเทียบวัตต์ของ Rota meter 108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในปัจจุบันกระบวนการผสมของของไหลมีการใช้หัวฉีดของไหลความดันสูงในลักษณะเจ็ทเหนี่ยวนำของไหลอีกชนิดที่มีความดันต่ำกว่า ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างของไหลทั้งสองชนิด [1,2] ของเหลวในที่นี้อาจจะเป็นของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับก๊าซ เนื่องจากมีโครงสร้างของชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อนและปราศจากส่วนที่เคลื่อนที่ ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและซ่อมบำรุง [3] ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่งและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของอุตสาหกรรมเคมี [4] อุตสาหกรรมอาหารรวมถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยการเติมอากาศเข้าไปในระบบ (Aerobic System) ซึ่งอากาศมีส่วนประกอบของออกซิเจนซึ่งช่วยในการเพิ่มออกซิเจนเข้าไปในน้ำเสีย [3] และการเติมโอโซนในระบบบำบัดทางเคมีซึ่งสามารถให้ค่าการถ่ายเทมวลและอัตราการผสมที่สูง โดยการเพิ่มผิวสัมผัส (Interfacial Area) ระหว่างของเหลวและก๊าซให้มีค่ามากที่สุด ดังนั้นการเพิ่มผิวสัมผัสในลักษณะของฟองอากาศที่มีขนาดเล็กและปริมาณมาก รวมถึงการเกิดการผสมที่ดีและอย่างทั่วถึงทั้งระบบ จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างของเหลวและก๊าซ

โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพเหนี่ยวนำอากาศ ได้แก่ การคำนวณขนาดอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีด ห้องผสม และทางเข้าของของไหลที่ถูกเหนี่ยวนำ โดยใช้โปรแกรม CFD [5] ในการสร้างแบบจำลองระบบ ร่วมกับการทดลองจริงในอัตราส่วนเชิงมิติที่เท่ากัน ผลจากการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มหรือลดขนาดของหัวฉีด ห้องผสม และทางเข้าของของไหลที่ถูกเหนี่ยวนำ [6] ให้ได้ขนาดที่มีความเหมาะสมทั้งทางวิศวกรรมและทางเศรษฐศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนี่ยวนำต่อสมรรถนะการผสมระหว่างของเหลวและก๊าซ

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อสมรรถนะของการผสมระหว่างของเหลวและก๊าซ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดที่เหมาะสมที่สุดในการผสมของของเหลวและก๊าซ
- 1.3.2 สามารถนำไปใช้กับการเติมอากาศหรือโอโซนในถังปิดสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย
- 1.3.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเครื่องผสมแก๊สกับของเหลวและสามารถปรับขนาดตามการใช้งานได้

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 ของเหลวหลักที่ใช้ในการศึกษาคือน้ำที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ก๊าซที่ดูเหนี่ยวนำคืออากาศที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ

1.4.2 ของไหลในสภาวะคงตัว (Steady state) ที่ไม่ขึ้นกับเวลา อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) ลักษณะของการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของเลขเรย์โนลด์ภายใต้การจำลองด้วยโปรแกรม (AnsysFluent , Gambit)

1.4.3 สมมติให้ของไหลทั้ง 2 ชนิดไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน

1.4.4 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาอ้างอิงกับระบบขนาด Pilot Plant คือภายในถังขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 เมตร สูง 1.2 เมตร ปริมาตร 0.15 ลูกบาศก์เมตร เพื่อให้ได้อัตราการไหลของอากาศที่เข้ามามากที่สุด

1.4.5 การทดลองการเติมอากาศแบบต่อเนื่องที่ความดันบรรยากาศ (1 bar) มีปริมาณออกซิเจนประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์และของเหลวที่ใช้คือน้ำประปาที่อุณหภูมิห้อง (โดยเฉลี่ย 25°C)

1.4.6 ประสิทธิภาพของหัวฉีดเหนี่ยวนำวัดจากอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ถูกดูดเข้าไปยังห้องผสมและทำการคำนวณแปลงเป็นกรัมของออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ของปั๊มและประสิทธิภาพการผสมได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายของลำฟองอากาศที่เกิดขึ้นในถังเติมอากาศ [17]

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีเจ็ท

ทฤษฎีเจ็ทเป็นทฤษฎีหลักที่ใช้ในการคำนวณและคาดเดาแนวโน้มในโครงการวิจัยนี้ การศึกษาและทบทวนวรรณกรรมต่างๆจึงมุ่งเน้นไปยังวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีเจ็ทเป็นหลักโดยสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 ลักษณะเฉพาะของเจ็ท

การไหลแบบปั่นป่วนถูกนำมาพิจารณาเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือช่วยในการกระจายตัวของของไหลชนิดหนึ่งไปสู่อีกชนิดหนึ่งและเพื่อสร้างพื้นที่ที่เกิดการสัมผัสกัน สำหรับการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวและก๊าซส่วนมากนั้น การกระจายตัวของของไหลชนิดหนึ่งไปสู่อีกชนิดเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง ตัวอย่าง เช่นความเร็วของเจ็ท ความแตกต่างของความดัน รูปทรงของหัวฉีด อุณหภูมิของของไหลทั้งสองชนิด และคุณสมบัติของของไหลต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ความเค้นผิวสัมผัส ความดันไอ เป็นต้น

การกระจายตัวของเจ็ทได้ถูกศึกษาโดยนักวิจัยจำนวนมากเป็นเวลานานนับศตวรรษ โดยเพลโต [7] กล่าวไว้ว่าการกระจายตัวของเจ็ทมีระยะเท่ากับ 2π เท่าของรัศมีหัวฉีด เรย์ลี [7] อธิบายว่าความไม่เสถียรของพลศาสตร์ของไหล (Hydrodynamic Instability) มีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท เวเบอร์ [8] ได้ศึกษาผลกระทบจากความหนาแน่นของของไหลรอบนอกเจ็ทและความหนืด นอกเหนือจากนั้น โทโมติกะ [9] อธิบายถึงอัตราส่วนที่ดีที่สุดของความหนืดของของไหลรอบนอกและของเจ็ทที่ทำให้เจ็ทมีอัตราการขยายตัวสูงสุด แซนดราเชคาร์ [10] อธิบายความหนืดของเจ็ทไว้อย่างละเอียดเช่นเดียวกับความหนาแน่น ซึ่งในการวิจัยของเรย์ลีไม่ได้พิจารณาในส่วนนี้ และได้พิสูจน์ด้วยกรรมวิธีทางคณิตศาสตร์ว่าเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น อัตราการกระจายตัวของเจ็ทลดลง

2.1.2 พฤติกรรมของเจ็ท

2.1.2.1 เจ็ทอิสระ (Free Jets)

เจ็ทอิสระที่ออกจากหัวฉีดทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของไหลรอบนอก เป็นผลให้เจ็ทมีความเร็วลดลงและขยายตัวกว้างขึ้น โมเมนตัมทั้งหมดซึ่งถูกอนุรักษ์อยู่ในรูปของโมเมนตัมของเจ็ทจะถ่ายเทไปยังของไหลที่ถูกเหนี่ยวนำ เจ็ทที่มีเลขเรย์โนลด์สูงกว่า 2000 ให้พิจารณาเป็นเจ็ทอิสระ

2.1.2.2 ความยาวเจ็ท

เจ็ทความเร็วสูงที่ออกจากหัวฉีดถ้าพิจารณาจากบริเวณปลายหัวฉีดนั้นมีเอกลักษณ์ที่แตกต่างกันในระยะทางต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ที่แกนของเจ็ท (Core) ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่
- พื้นที่หน้าตัดของแกนมีขนาดลดลงตามระยะห่างจากหัวฉีด
- แกนเจ็ทถูกล้อมด้วยกระแสปั่นป่วน ซึ่งมีความเร็วลดลงตามระยะห่างในแนวรัศมีและระยะตามแนวแกนกลาง
- แกนของเจ็ทเสื่อมลงและหายไปในระยะช่วงหนึ่ง
- กระแสปั่นป่วนยังคงขยายตัวต่อไปเรื่อยๆถึงแม้ว่าแกนหายไป อย่างไรก็ตามความเร็วของกระแสปั่นป่วนนี้มีค่าลดลงอย่างคงที่
- ความเปลี่ยนแปลงในความเร็วและความดันนั้นเป็นไปตามหลักของแบร์นูลลี (Bernoulli Principle)

ของไหลรอบนอกเจ็ทถูกดูดเข้ามาผสมกับเจ็ท เมื่อถูกดูดเข้ามาผสมกับเจ็ทแล้ว มีความเร็วเพิ่มขึ้นและกลืนเป็นเนื้อเดียวกับเจ็ทที่ขยายตัวขึ้น ขั้นตอนนี้เรียกว่าการเหนี่ยวนำ (Entrainment)

ในขั้นตอนี้มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้นมากที่บริเวณขอบของเจ็ทซึ่งเป็นพื้นผิวที่สัมผัสกับของไหลรอบนอก ความเค้นนี้เป็นผลให้เกิดการไหลวนขึ้นที่ผิวของเจ็ทและสร้างความปั่นป่วนขึ้นเป็นเหตุให้เกิดการผสมกันระหว่างของไหลสองชนิดนี้ขึ้น แต่กระนั้นการผสมกันนี้ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เจ็ทที่มีความเร็วสูงหรืออัตราการเหนี่ยวนำที่สูงเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถก่อให้เกิดการผสมกันที่ดีขึ้นได้ ที่ว่างและเวลาในการเกิดกระบวนการนี้ก็เป็นปัจจัยสำคัญด้วยเช่นกัน

2.1.3 ผลกระทบจากตัวแปรต่างๆต่อการกระจายตัวของเจ็ท

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของเจ็ทมีมาก ทั้งความดันที่สภาวะแวดล้อม ผลกระทบจากความปั่นป่วนของเจ็ท ความหนืดของของไหลทั้งในเจ็ทและของไหลรอบนอก เป็นต้น ผลกระทบดังกล่าวได้อธิบายในหัวข้อต่อไปนี้

2.1.3.1 ผลกระทบจากความปั่นป่วน

คุณสมบัติของเจ็ทนั้นมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับการก่อตัวขึ้นของความปั่นป่วนที่ปลายหัวฉีดเป็นอย่างมาก [11] ยืนยันเรื่องนี้โดยการเปลี่ยนแปลงสภาวะที่ปลายหัวฉีด ซึ่งได้ผลคืออัตราการผสมเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของความปั่นป่วนของเจ็ทเพิ่มขึ้น [11] นำเสนอการวิเคราะห์สำหรับเจ็ทปั่นป่วนโดยสมบูรณ์

2.1.3.2 ผลกระทบจากความหนืด

โดยทั่วไปแล้ว การเพิ่มความหนืดของของไหลนั้นเป็นการชะลอการกระจายตัวของเจ็ทอันเป็นผลจากการคงสถานะสมดุลของความเฉื่อย [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของความหนืดโดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของกลีเซอรอลกับน้ำในสถานะของเหลว พวกเขาได้แสดงให้เห็นว่าความไม่เสถียรนั้นถูกทำให้น้อยลงเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เจ็ทมีรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ [13] ศึกษาผลกระทบของความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity) ต่อความยาวของการกระจายตัวของของเหลวความหนืดสูงที่ฉีดด้วยหัวฉีดความดันสูงถึง 15 เมกะปาสคาล

2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ

การศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบนั้น ช่วยกำหนดขอบเขตการออกแบบและการสร้างแบบจำลองง่ายและรวดเร็ว รวมถึงมีความถูกต้องต่อการวิเคราะห์แนวโน้มของผลการทดลอง การออกแบบนี้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การออกแบบโครงสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม CFD และการออกแบบชุดทดลอง

2.2.1 การออกแบบและการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม

การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม CFD นั้นผ่านการใช้โปรแกรม 2 ชนิดด้วยกัน คือ โปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) และแอนซิสฟลูเอนท์ (AnsysFLUENT) ปาลานี [14] ได้วิเคราะห์รูปแบบของของเหลว-แก๊สผ่านหัวฉีดด้วยโปรแกรม CFD โดยให้ของเหลวเป็นของไหลหลักเหนี่ยวนำให้แก๊สเข้ามาผสม เพื่อสร้างสมการคาคาเดค่าการไหลเข้าของอากาศ โดยพิจารณา

ถึงคุณสมบัติการบีบอัดของอากาศ ค่าความดันที่สูญเสียไปในของไหลสองเฟส และพลังงานที่สูญเสียไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด โทนี ยูโทโมะ [3] ได้ศึกษารูปแบบของการถ่ายเทมวลของของไหลสองชนิดคือแก๊สและของเหลว (อากาศและน้ำ ตามลำดับ) โดยใช้การจำลอง 3 มิติด้วยโปรแกรม CFD โดยกำหนดตัวแปรควบคุมคือ อัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำในช่วง 0.2-1.2 อัตราส่วนของความยาวท่อต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ในช่วง 4-10 โดยผลสรุปออกมาว่าที่อัตราส่วนของความยาวท่อผสมต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดมีค่า 5.5 ความสามารถในการถ่ายเทมวลเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่ที่อัตราส่วนของความยาวท่อผสมต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดมีค่า 4.0 ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลเชิงปริมาตรมีค่าสูงที่สุดที่ค่าอัตราการไหลของอากาศต่อน้ำมีค่าเป็น 0.6

2.2.2 การออกแบบและการสร้างชุดทดลอง

ชุดทดลองที่ถูกออกแบบมาในโครงการนี้ทำขึ้นโดยพิจารณาให้มีสมรรถนะการเติมอากาศสูงที่สุด และมีพลังงานที่สูญเสียไปน้อยที่สุด เบย์ลาร์ [6] ได้ทำการทดลองเพื่อหาผลกระทบของขนาดและอัตราส่วนเชิงมิติของท่อเวนทูรีต่ออัตราการเติมฟองอากาศ โดยมุมของหัวฉีดที่มีการสูญเสียความดันผ่านหัวฉีดน้อยที่สุดคือ 21 องศา (ASME MFC-3M-1989) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราการไหลของอากาศผ่านท่อเวนทูรีต่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าสูงที่สุด เมื่ออัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของฐานหัวฉีด รองศาสตราจารย์ ดอกเตอร์จำลอง ปราบแก้ว [15] กล่าวถึงค่าอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดและห้องผสมที่มีสมรรถนะดี ที่สุดนั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบห้องผสมในโครงการนี้ คือ ความยาวของห้องผสมนั้นมีค่าเป็น 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด

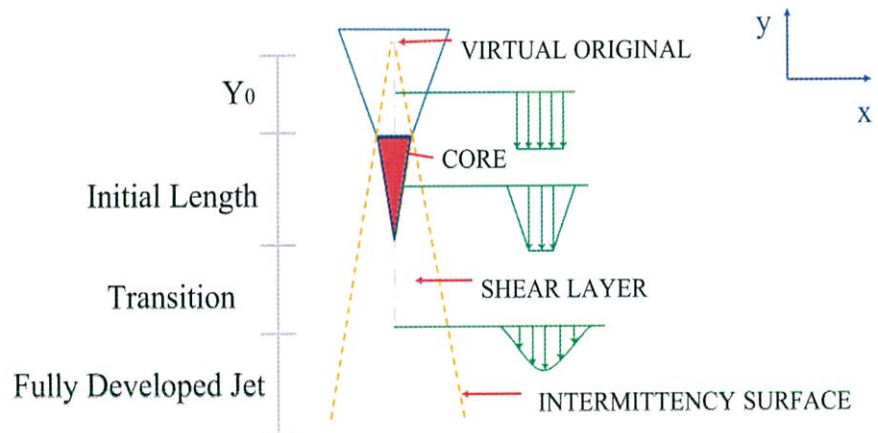
บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีเจ็ท

3.1.1 โครงสร้างและการพัฒนาของเจ็ทอิสระ

เจ็ทอิสระ (Free jet) คือมวลของของไหลที่ถูกอัดฉีดเข้าไปในสภาพแวดล้อมขนาดใหญ่ของของไหลรอบนอก โครงสร้างของกระแสถูกศึกษาค้นคว้าโดยนักวิจัยจำนวนมากซึ่งสามารถแบ่งสี่ลักษณะของเจ็ทออกเป็น 4 บริเวณ โดยแบ่งตามความเกี่ยวเนื่องกับความเร็วของของไหลที่ศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 [19]



รูปที่ 3.1 ลักษณะกระแสการไหลของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดพ่น

ลักษณะของของไหลในแต่ละบริเวณสามารถอธิบายได้ ดังนี้

บริเวณที่ 1: บริเวณที่กระแสลู่เข้า (The convergent zone) บริเวณนี้เรียกว่าแกนหลัก (Potential Core) ของเจ็ท ความเร็วที่เส้นแกนกลางมีค่าเท่ากับความเร็วที่ออกมาจากหัวฉีด บริเวณนี้อยู่ในช่วงระยะ $4D_j$ ถึง $6D_j$ นับจากปลายหัวฉีด

บริเวณที่ 2: บริเวณเปลี่ยนแปลง (The transition zone) เจ็ทพยายามสร้างรูปร่างการไหลเป็นวงกลม เป็นบริเวณที่ความเร็วเส้นแกนกลางเริ่มเสื่อมและลดลง ความเร็วที่ลดลงนั้นสามารถประมาณค่าเป็นฟังก์ชันแปรผันตรงกับ

$x^{-0.5}$ โดย x คือระยะห่างจากปลายหัวฉีดในแนวเส้นแกนกลาง บริเวณนี้เกิดขึ้นในช่วงระยะ $6D_j$ ถึง $20D_j$ และทราบกันว่าเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการผสมเมื่อชั้นความเค้นจากทั้งสองด้านเริ่มบรรจบกัน

บริเวณที่ 3: บริเวณจำลองตัวเอง (The self similar zone) ในบริเวณนี้รูปร่างของความเร็วที่เส้นแกนกลางมีลักษณะคล้ายๆ กันในทุกๆ จุดบนระยะ x และความเร็วที่เส้นแกนกลางจะลดลงเป็นฟังก์ชันแปรผันตรงกับ x^{-1}

บริเวณที่ 4: บริเวณสลายตัว (The termination zone) ความเร็วที่เส้นแกนกลางของเจ็ทจะลดลงอย่างรวดเร็วในบริเวณนี้ ถึงแม้ว่ามีการศึกษาพฤติกรรมของของไหลในบริเวณนี้โดยนักวิจัยจำนวนมาก แต่กลไกของพฤติกรรมของของไหลในบริเวณนี้ยังคงไม่เป็นที่เข้าใจอย่างแท้จริง

ในบริเวณที่ 2 กระแสเจ็ทที่ถูกฉีดออกมาจะมีพฤติกรรมในการสร้างรูปร่างการไหลเป็นวงกลม ความสัมพันธ์ของความเร็วเส้นแกนกลางของเจ็ทกับความเร็วเริ่มต้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{\bar{U}_x}{\bar{U}_0} = K \frac{\sqrt{A_0}}{x} \quad (3.1)$$

หรือ

$$\bar{U}_x = \frac{K \dot{Q}_0}{\sqrt{A_0} x} \quad (3.2)$$

เมื่อ \bar{U}_x = ความเร็วที่เส้นศูนย์กลางของกระแสเจ็ทที่ระยะ x ใดๆ, (m/s)

\bar{U}_0 = ความเร็วเริ่มต้นที่ช่องจ่ายอากาศ, (m/s)

A_0 = พื้นที่หน้าตัดของช่องจ่ายอากาศ, (m²)

x = ระยะห่างระหว่างช่องจ่ายอากาศถึงจุดสังเกต, (m)

\dot{Q}_0 = อัตราการไหลของอากาศที่จุดจ่ายอากาศ, (m³)

K = ค่าคงที่ตามสัดส่วน

ในสองบริเวณแรกของเจ็ทอิสระในแนวแกนนั้น ได้รับผลกระทบจากตัวกระจาย (Diffuser) อย่างรุนแรง บริเวณที่ 3 คือเจ็ทที่พัฒนาแล้ว (The developed jet) และบริเวณที่ 4 คือบริเวณที่เจ็ทถูกทำลาย (Jet termination) ในสามบริเวณแรก ของไหลรอบเจ็ทถูกเหนี่ยวนำเข้ามาในกระแสหลักและ

ผสมกันกับของไหลหลัก ในบริเวณที่ 4 เจ็ทสลายตัวจากภายในขอบและของไหลหลักกระจายออกสู่สภาพแวดล้อมในขณะที่กระแสของเจ็ทเสื่อมและสลายไป

เจ็ทขยายออกเนื่องจากมีการดึงอากาศรอบนอกเจ็ทมาผสม ของไหลเหนือบริเวณที่ 2 ถูกเหนี่ยวนำมาผสมกับของไหลปฐมภูมิ อัตราส่วนของปริมาตรสุทธิของกระแสเจ็ทต่อปริมาตรเริ่มต้นที่ระยะใดๆ จากปลายหัวฉีดหลักๆ แล้วขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเร็วเริ่มต้น \bar{U}_0 ต่อความเร็วปลายทาง \bar{U}_x อัตราการเหนี่ยวนำ (Inducing ratio) คือ

$$\frac{\dot{Q}_x}{\dot{Q}_0} = C \frac{\bar{U}_0}{\bar{U}_x} \quad (3.3)$$

เมื่อ \dot{Q}_x = อากาศผสมสุทธิที่ระยะ x จากหัวฉีด, (m^3/s)

C = สัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำ (มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับกระแสอิสระแบบหน้าตัดกลม)

ในกระบวนการทางวิศวกรรมส่วนมากนั้น ความรู้ความเข้าใจในสามบริเวณแรกก็เพียงพอแล้ว เพราะความแตกต่างของความเร็วที่พื้นผิวของช่วงที่ไม่ต่อเนื่องระหว่างเจ็ทและสภาวะแวดล้อมมีมาก อันทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy) ซึ่งทำให้เกิดการผสมกันระหว่างของไหลหลักกับของไหลรอบนอก บริเวณด้านข้าง การผสมกันนี้ทำให้ของไหลภายในเจ็ทมีความเร็วลดลง ในขณะที่เดียวกันทำให้ของไหลรอบนอกเจ็ทมีความเร็วเพิ่มขึ้น และในความเป็นจริงนั้น ของไหลรอบนอกถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่กระแสเจ็ท ซึ่งผลที่ตามมาคือความกว้างของเจ็ทเพิ่มขึ้นนั่นเอง

3.1.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อการกระจายของเจ็ท

องค์ประกอบหลากหลายที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท เช่น รูปแบบของความเร็วเจ็ท ณ ปลายหัวฉีด, รูปทรงของหัวฉีด, เลขเรย์โนลด์ของเจ็ท และอุณหภูมิของเจ็ทที่หัวฉีด ล้วนส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของเจ็ท องค์ประกอบและปรากฏการณ์ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของเจ็ทสามารถอธิบายอย่างง่ายในหัวข้อต่อไปนี้

3.1.2.1 รูปแบบของความเร็วเจ็ท ณ ปลายหัวฉีด (Inlet Velocity Profile)

สภาวะเริ่มต้นของเจ็ทส่งผลกระทบต่อกรก่อตัวในกระแสการไหล รูปแบบของการไหลที่ปลายหัวฉีดโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ คือ แบบราบเรียบ (Laminar), เสมือนราบเรียบ (Nominally laminar), ถูกรบกวนอย่างมาก (Highly disturbed) และ ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ (Fully

turbulent) กรณีการไหลแบบราบเรียบมีชั้นความเค้นมีรูปแบบแบบบลาสเซียส (Blasius's profile) ชั้นความเค้นที่ไม่มั่นคงเหนี่ยวนำให้เกิดความผันผวนขึ้น โดยความผันผวนนี้มีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของเจ็ท การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ปลายหัวฉีดในสภาวะต่างๆ สามารถกำหนดได้เป็น

- ค่าความหนาของการกระจัด (Displacement thickness), δ , คือระยะทางที่พื้นผิวของรูปแบบการไหลต้องเคลื่อนที่ไปในทิศตั้งฉากกับเวกเตอร์ปกติ จากระนาบอ้างอิงในกระแสของไหลไร้ความหนืดที่มีความเร็วเริ่มต้น \bar{U}_0 เพื่อให้อัตราการไหลคงเดิมดังที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวกับระนาบอ้างอิงในของไหลจริง
 - ค่าความหนาโมเมนตัม (Momentum thickness), θ คือระยะทางที่พื้นผิวของรูปแบบการไหลต้องเคลื่อนที่ไปในทิศขนานกับเวกเตอร์ของระนาบอ้างอิง เพื่อให้ผลรวมของโมเมนตัมมีค่าคงเดิม (จากกฎอนุรักษ์โมเมนตัม)
- พารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

ความหนาของชั้นขอบเขต

$$\delta = \int_0^\infty \left(1 - \frac{\bar{U}}{\bar{U}_0}\right) dy \quad (3.4)$$

ความหนาโมเมนตัม

$$\theta = \int_0^\infty \frac{\bar{U}}{\bar{U}_0} \left(1 - \frac{\bar{U}}{\bar{U}_0}\right) dy \quad (3.5)$$

สัดส่วนรูปร่าง (Shape factor)

$$H = \frac{\delta}{\theta} \quad (3.6)$$

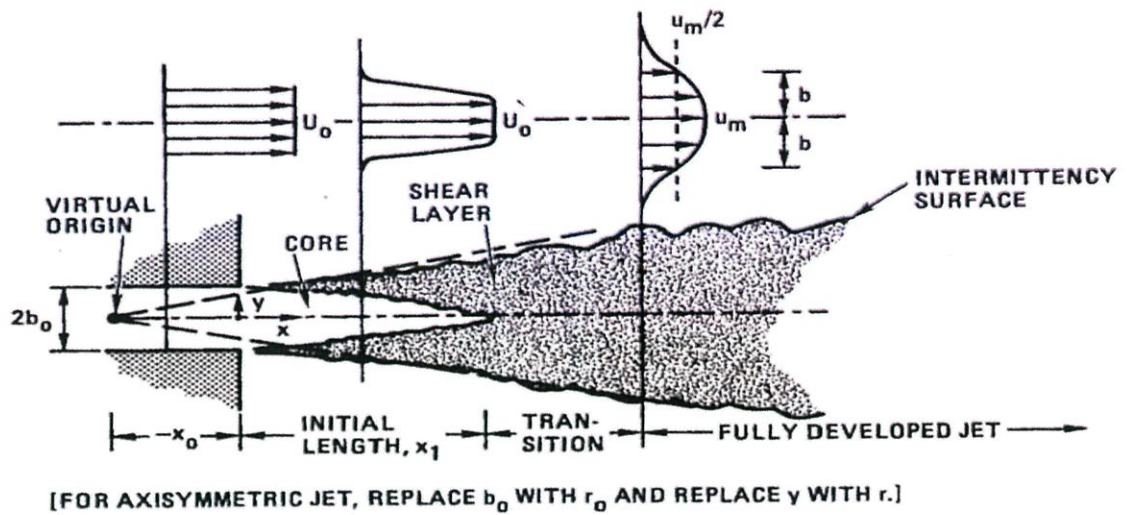
ค่าของสัดส่วนรูปร่างของสภาวะชั้นขอบเขตแบบราบเรียบ (Laminar boundary layer condition) ที่ปลายหัวฉีดมีค่าเป็น 2.5 และสำหรับสภาวะชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ (Fully developed turbulent boundary layer condition) มีค่าเป็น 1.4 ค่าที่อยู่ระหว่างช่วงนี้หมายถึงชั้นขอบเขตเปลี่ยนแปลงไปตามธรรมชาติ

3.1.2.2 รูปทรงของหัวฉีด (Nozzle Geometry)

ลักษณะของกระแสเจ็ทที่ได้รับผลกระทบอย่างมากจากรูปทรงของหัวฉีด และรูปแบบของผนังที่ล้อมรอบเจ็ท ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของความเร็วที่แกนกลางของเจ็ทแบบวงกลมกับแบบแผ่นนั้นต่างกัน โดยที่ฟังก์ชันของแบบวงกลมแปรผันตรงกับ x^{-1} ในขณะที่แบบแผ่นแปรผันตรงกับ $x^{0.5}$ ลักษณะเฉพาะของการเปลี่ยนแปลงของเจ็ทขึ้นอยู่กับลักษณะภาพตัดขวางของหัวฉีดด้วยเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหัวฉีดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนความกว้างยาวสูง รูปทรงชนิดนี้ก่อให้เกิดปรากฏการณ์การสลับเปลี่ยนแกน ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์นี้ มวลในแกนหลักและแกนรองจะสลับเปลี่ยนกันไปตลอดระยะแนวเส้นแกนกลาง สิ่งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการกระจายตัวที่แตกต่างกันของเจ็ทบริเวณด้านข้างทั้ง 2 ด้าน ซึ่งจะไม่เกิดในหัวฉีดแบบวงกลม รูปทรงของหัวฉีดมีผลอย่างมากในการนิยามรูปแบบของความเร็วเริ่มต้นของเจ็ท ออร์ฟิช (Orifice) แบบขอบคมทำให้เกิดรูปแบบความเร็วเริ่มต้นแบบอานม้า (Saddle-backed profile) ในขณะที่รูปแบบแบบหมวกทรงสูง (Top hat profile) ได้จากหัวฉีดที่ขอบเรียบลื่น เป็นต้น

3.1.2.3 ครึ่งความกว้างและจุดกำเนิดเสมือนของเจ็ท (Half Width and Virtual Origin of the Jet)

ครึ่งหนึ่งของความกว้างของเจ็ทในแนวแกนตำแหน่งใดๆ นิยามได้เป็น ระยะห่างระหว่างเส้นแกนกลางและระนาบทแยง โดยระนาบทแยงนี้คือระนาบที่ค่าเฉลี่ยของความเร็วตามแนวความกว้างที่ระยะนั้นมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วแนวเส้นแกนกลาง ครึ่งความกว้างนี้โดยปกติจะเพิ่มขึ้นด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นตลอดระยะ x ยกเว้นในกรณีที่มีบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์การสลับแกนขึ้น ความชันของฟังก์ชันเชิงเส้นในทิศทางตามแนวแกนกลางเรียกว่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread rate) ส่วนใหญ่แล้วค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของเจ็ทแบบปั่นป่วนที่มีเลขเรย์โนลด์สูงๆ คือ 0.11 (ทำมุม 6 องศา กับแนวแกน) ในขณะที่เจ็ทแบบราบเรียบมีค่าอัตราส่วนการกระจายตัวประมาณ 0.4 (ทำมุม 21 องศา กับแนวแกน) จุดกำเนิดเสมือนของเจ็ทคือจุดที่เป็นเสมือนจุดกำเนิด (จุดยอด) ของรูปกรวยของเจ็ท ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของจุดกำเนิดเสมือนและระยะครึ่งความกว้าง

จุดกำเนิดเสมือนนี้ในบางครั้งอาจแตกต่างกับจุดกำเนิดตามรูปทรงเรขาคณิตและอาจอยู่ภายนอกหัวฉีดก็เป็นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของความเร็วของของไหลที่ปลายหัวฉีด จุดกำเนิดเสมือนนี้เกี่ยวข้องกับครึ่งความกว้างตามสมการต่อไปนี้

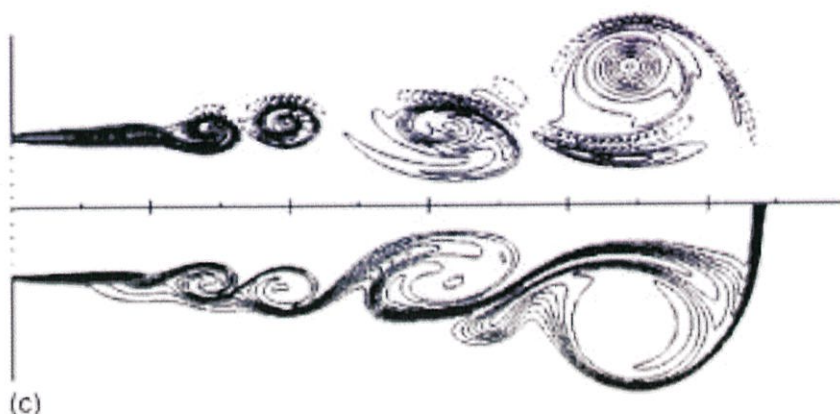
$$\frac{b_u}{D_j} = K_{2u} \left(\frac{x}{D_j} \pm C_{2u} \right) \quad (3.7)$$

- เมื่อ C_{2u} = จุดกำเนิดเสมือน (Virtual origin)
 K_{2u} = อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)
 b_u = ครึ่งความกว้างของเจ็ท (Jet half width)
 D_j = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางหัวฉีด (Nozzle diameter), (mm)
 x = ระยะห่างจากปลายหัวฉีด, (mm)

3.1.2.4 ความไม่เสถียรของเจ็ท (Jet Instability)

เจ็ทที่ถูกอัดฉีดจากหัวฉีดนั้นมีการแกว่งของชั้นความเค้นขึ้นในกระแส โดยการแกว่งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบความเร็วเริ่มต้นของของไหลในบริเวณเหนือขึ้นไปจากระยะตามแนวแกนทั่วไป การแกว่งเหล่านี้จะม้วนตัวและสร้างกระแสหมุนวนซึ่งมีขนาดและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะในแนวแกน กระแสหมุนวนเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อการเหนี่ยวนำของไหลภายนอกเจ็ทมาผสมต่อของไหลหลักในเจ็ท ปฏิกริยา

ของกระแสมุมวนเหล่านี้มีผลยังให้การเปลี่ยนแปลงของกระแสไปเป็นแบบปั่นป่วน การศึกษาภาพการไหลของกระแสนั้นแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างแบบตายตัวระหว่างการสร้างกระแสแบบวงกลมและกระแสแบบไม่เป็นวงกลม การเกิดขึ้นของกระแสมุมวนในชั้นความเค้นและการเปลี่ยนแปลงยิ่งยวดของกระแสรอบเรียบไปเป็นกระแสนปั่นป่วนแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความปั่นป่วนในเจ็ท

3.1.2.5 ความต่อเนื่องของโครงสร้าง (Coherent Structures)

โครงสร้างต่อเนื่องนิยามได้ตามมวลของของไหลแบบปั่นป่วนขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกัน ร่วมกับกระแสมุมวนร่วมกันตลอดขอบเขตความยาว นั่นคือ ภายใต้ความผันผวนของกระแสมุมวนแบบปั่นป่วนทั้ง 3 แกนนั้น มีการจัดวางส่วนประกอบของการหมุนวนซึ่งมีสภาวะร่วมกัน (Coherent) ตลอดทั้งโครงสร้าง การสร้างโครงสร้างต่อเนื่องในเจ็ทนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้นตั้งนั้น การควบคุมจึงสามารถทำได้ ความถี่ของรูปแบบการหมุนวนในโครงสร้างนี้สามารถคำนวณได้ และสามารถควบคุมได้ โดยการใช้การกระตุ้นด้วยคลื่นเสียง (Acoustic excitation) การกระตุ้นมูลฐานนี้ทำให้กระแสเปลี่ยนรูปไปในทางที่ทำให้กลไกการไหลแบบละเอียดถูกทำลายไป การไหลปั่นป่วนค่อยๆเสื่อมสลายลงตามระยะทางเนื่องด้วยการกระจายความหนืด ทำให้โครงสร้างต่อเนื่องนี้เพิ่มขึ้นและกระจายออก โครงสร้างเหล่านี้เริ่มก่อตัวขึ้นที่ชั้นความเค้นที่ไม่เสถียรอย่างมากบริเวณปากหัวฉีด จากนั้นจะเติบโตขึ้นโดยการรวมตัวกับของไหลรอบนอกจนถึงระยะ 20 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดในกระแสดเจ็ท จากนั้นโครงสร้างเกิดการรวมตัวกันและสร้างเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้น แม้ในระยะที่ห่างจากปลายหัวฉีดมากๆ โครงสร้างเหล่านี้ก็ยังคงมีและสามารถระบุได้อยู่

3.1.2.6 การกระจายตัวแบบอุณหภูมิคงที่และไม่คงที่ (Isothermal and Non-isothermal Jet)

เจ็ทที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ (isothermal jet) คือกระแสเจ็ทซึ่งของไหลภายในเจ็ทและของไหลรอบๆมีอุณหภูมิเหมือนกัน ในอีกกรณีหนึ่ง เจ็ทที่อุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ (Non-isothermal jet) คือเจ็ทที่มีอุณหภูมิของของไหลหลักที่ออกจากปลายหัวฉีดกับอุณหภูมิของของไหลในสถานะแวดล้อมไม่เท่ากัน เจ็ทที่มีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมออาจลอยตัวขึ้นหรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทเทียบกับอุณหภูมิสถานะแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ เมื่อคาร์บริชาร์ทสันนัมเบอร์มีค่าน้อยมากๆ อุณหภูมิของของไหลมีหน้าที่เป็นปริมาณสเกลาร์พื้นฐานและผลกระทบจากแรงลอยตัวมีผลมากในกรณีนี้ พลศาสตร์ความไม่คงที่และการเกิดการปั่นป่วนถูกพิจารณาในอีกรูปแบบหนึ่งในกรณีของการไหลที่มีอุณหภูมิไม่คงที่นี้

3.1.2.7 การจำลองตัวเอง (Self Similarity)

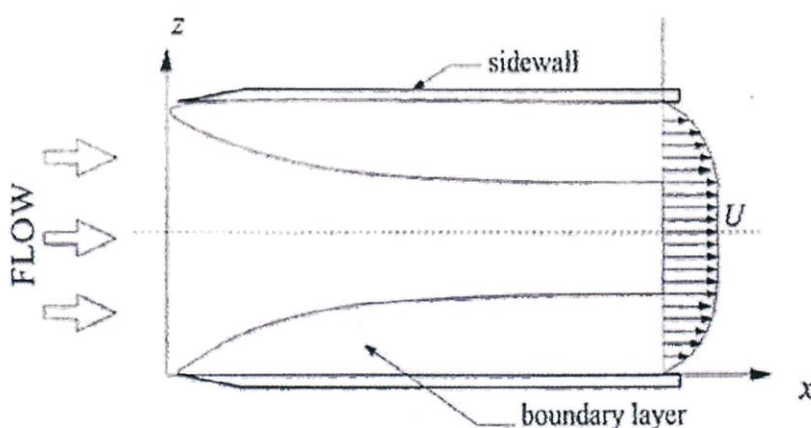
การอนุรักษ์ตัวเองหรือจำลองตัวเองนั้น กล่าวกันว่าเกิดขึ้นเมื่อรูปแบบของความเร็วของการไหล (หรือปริมาณอื่นใด) สามารถทำให้สอดคล้องกันได้โดยมาตราส่วนอย่างง่าย ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงลักษณะตามพิกัดเพียงพิกัดเดียว ผลที่ตามมาจากการอนุรักษ์นี้ คือสมการควบคุมของกระแสเจ็ทสามารถสรุปลงได้ หรือพูดในอีกรูปแบบหนึ่งก็คือ กระแสนุรักษ์เกิดขึ้นถ้ามีสมการที่เป็นผลคำตอบต่อสมการพลศาสตร์และเงื่อนไขขอบของของไหลนั้นๆ ซึ่งตลอดการเปลี่ยนแปลงของกระแส พจน์ทุกพจน์มีค่าที่เกี่ยวข้องกันที่จุดซึ่งสัมพันธ์กัน ดังนั้น การอนุรักษ์นี้จึงเป็นการบอกว่ากระแสนี้ได้ไปถึงจุดที่สมดุลซึ่งค่าและผลกระทบทางพลศาสตร์ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วยกัน และไม่จำเป็นต้องคำนวณหาองค์ประกอบทางพลศาสตร์อื่นซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของความเร็วเพียงเล็กน้อย ดังนั้นกระแสเจ็ทอนุรักษ์ คือสถานะตามแนวเส้นซึ่งกระแสได้ถึงจุดที่ไม่เลกุลจัดเรียงตัวกันเรียบร้อยแล้ว สถานะของกระแสนุรักษ์มีหลายชนิดที่เป็นไปได้ อาทิเช่น 1) กระแสสามารถอนุรักษ์ตัวเองได้โดยสมบูรณ์ในทุกลำดับชั้นของช่วงที่มีการไหลแบบปั่นป่วน และทุกขนาดของการเคลื่อนที่และ 2) กระแสสามารถอนุรักษ์ตัวเองได้บางบริเวณเพื่อให้เป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัมหรือขึ้นอยู่กับความแน่นอนของลำดับในการไหลแบบปั่นป่วนหรือในมาตราส่วน ยกตัวอย่างเช่น สมการทั่วไปที่อธิบายกระแสเจ็ทที่ถึงจุดอนุรักษ์สำหรับความเร็วเฉลี่ยคือ

$$\frac{U}{U_c} = f\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (3.8)$$

สมการนี้อธิบายได้ว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วใดๆและความเร็วที่แกนกลางของระนาบทแยงจะเป็นฟังก์ชันของระยะตามแนวแกน y ต่อค่าความหนาของการกระจัดในแนวระนาบนั้นๆ

3.1.2.8 บทบาทของผนังด้านข้างต่อกระแสเจ็ท (Role of Side Walls in Jet Flow)

ผนังที่ถูกละทิ้งในระนาบขนานกับระนาบ $x-y$ จะบีบและเปลี่ยนพฤติกรรมของการขยายตัวในสองมิติของเจ็ทโดยการป้องกันการเกิดการเหนี่ยวนำจากทางด้านข้าง ถึงแม้ว่าการบีบอัดในบริเวณใกล้เคียงชั้นขอบเขตก็เริ่มเติบโตขึ้นที่บริเวณผนังด้านข้าง ดังนั้น การก่อตัวขึ้นของกระแสจะแตกต่างกันสำหรับเจ็ทระนาบที่ถูกฉีดผ่านหัวฉีดทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีผนังด้านข้างและไม่มีผนัง และถึงแม้ว่าการมีอยู่ของผนังสามารถยืดขอบเขตสองมิติ การเกิดชั้นขอบเขตที่ผนังด้านข้างนั้นก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของเจ็ทในพื้นที่ที่ห่างออกไป ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 พฤติกรรมของรูปแบบความเร็วของเจ็ทเมื่อมีผนังด้านข้าง

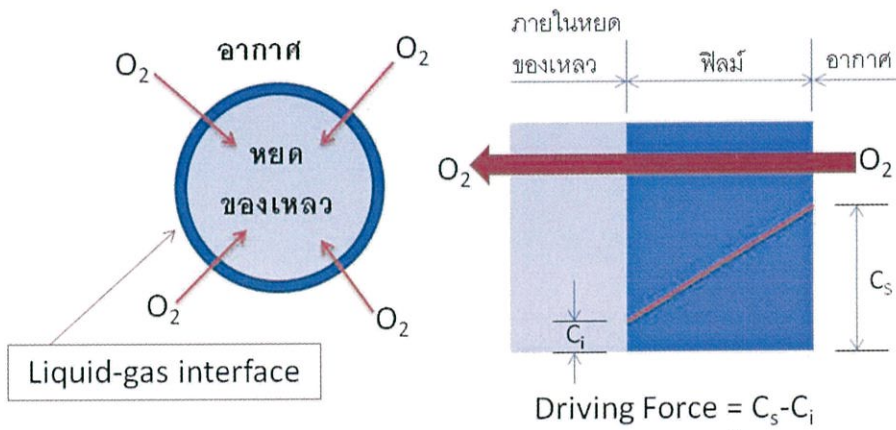
3.1.2.9 มาตรการส่วนความยาวของความปั่นป่วน (Turbulent Length Scales)

กระแสแบบปั่นป่วนประกอบด้วยกระแสวน (Eddy flow) ในหลายๆ ขนาดต่างๆ กัน พลังงานจลน์ของกระแสวนหลักถูกถ่ายเทออกไปเป็นการเกิดขึ้นของกระแสวนที่ส่วนที่ใหญ่ที่สุดของการเคลื่อนที่ พลังงานในส่วนนี้ได้ถูกส่งผ่านไปยังมาตรการส่วนที่เล็กกว่าและเล็กลงเรื่อยๆ ตลอดขั้นตอนการไหลไร้ความหนืด เรียกว่าการยืดตัวของกระแสวนหมุนวน (Vortex stretching) ที่มาตรการส่วนที่เล็กที่สุดนั้น พลังงานจลน์ของกระแสวนนี้ค่อยๆ น้อยลงจนหายไปซึ่งเป็นผลมาจากความหนืด ในมาตรการส่วนขนาดใหญ่ส่วนมากเป็นแบบไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Non-isotropic) และมีแนวโน้มไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่า อย่างไรก็ตาม

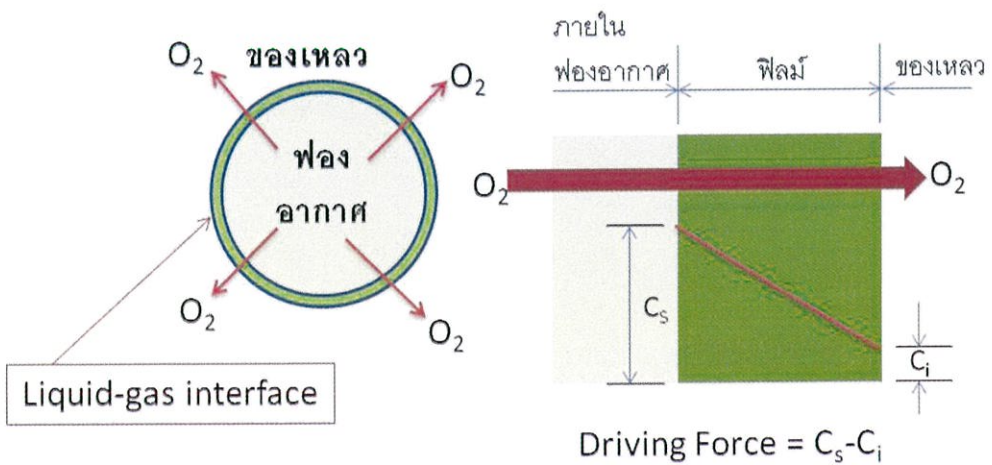
ตาม สำหรับกระแสแบบปั่นป่วนหลายชนิด มาตรฐานการเคลื่อนที่โดยละเอียดเป็นไปแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ค่าเฉลี่ยของขนาดของกระแสนี้เรียกว่าผลรวมมาตรฐานความยาว ขนาดของกระแสนที่เล็กที่สุดซึ่งค่อยๆสลายไปนั้นเรียกว่า มาตรฐานคอลโมโกรอฟ (Kolmogorov scale)

3.2 ทฤษฎีการเติมอากาศและการถ่ายเทมวลระหว่างฟองอากาศและน้ำ

การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศให้กับน้ำเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ ออกซิเจนถ่ายเทจากอากาศให้กับหยดน้ำขนาดเล็กที่เกิดจากการตีน้ำของเครื่องเติมอากาศ และออกซิเจนถ่ายเทจากฟองอากาศให้กับน้ำที่ห่อหุ้ม ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ [18]



รูปที่ 3.5 การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศสู่หยดน้ำ



รูปที่ 3.6 การถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศสู่ของเหลวที่ห่อหุ้ม

การเติมอากาศหรือออกซิเจนให้กับน้ำทั้งสองวิธีขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

- ขนาดของหยดน้ำหรือฟองอากาศเนื่องจากการถ่ายเทออกซิเจนเกิดขึ้นผ่านผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ การทำให้หยดน้ำหรือฟองอากาศมีขนาดเล็กจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส
- ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศซึ่งแสดงรูปความดันย่อยของออกซิเจน (Partial pressure of oxygen)
- เวลาที่ใช้ในการสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ
- แรงสนับสนุนให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจน นั่นคือ ผลต่างระหว่างออกซิเจนอิ่มตัวและออกซิเจนละลายในน้ำที่มีอยู่ในขณะทำการเติมอากาศ

3.2.1 หลักการคำนวณมวลสารที่ถูกถ่ายเท

จากการถ่ายเทของออกซิเจนลงไปใต้น้ำ สามารถเขียนได้ในรูปสมการดังนี้

$$r_m = K_G A (C_S - C) \quad (3.9)$$

เมื่อ r_m = อัตราของการถ่ายเทมวลสาร, (kg/day)

K_G = ค่าสัมประสิทธิ์ในการกระจายของก๊าซ, (kg/(day.m².(mm/L)))

A = พื้นที่ผิวที่ก๊าซได้กระจาย, (m²)

C_S = ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในสารละลาย, (mg/L)

C = ความเข้มข้นของสารในสารละลาย, (mg/L)

จากสมการ (3.9) สมการเขียนใหม่ได้ในรูปสมการดังนี้

$$r_m = V \frac{dC}{dt} = K_G A (C_S - C) \quad (3.10a)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของสารละลาย, (l)

เพราะฉะนั้น

$$\frac{dC}{dt} = K_G \frac{A}{V} (C_S - C) \quad (3.10b)$$

ในทางปฏิบัติค่า A เป็นค่าที่หาได้ยาก ดังนั้นจึงรวมตัวแปร A และ V เป็นตัวแปรใหม่คือ a โดยที่ $a = \frac{A}{V}$ และพิจารณา K_G เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทก๊าซผ่านชั้นฟิล์มของของเหลว ซึ่งกำหนดให้เป็น K_L ดังนั้น $K_G \frac{A}{V}$ จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น $K_L a$ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซ

(ออกซิเจน) ค่า $K_L a$ นี้ขึ้นอยู่กับระบบการเติมอากาศ รูปร่างของถังเติมอากาศ ลักษณะของน้ำ และ อุณหภูมิ โดยทั่วไปค่า $K_L a$ หาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ หรือในสนามจริง และจะไม่นิยม คำนวณหาค่า $K_L a$ โดยแยกออกเป็น K_L และ a เพราะค่า a เป็นค่าที่คำนวณหาได้ยากในทางปฏิบัติ

จากสมการ (3.10) สามารถเขียนได้ใหม่เป็นสมการดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_S - C) \quad (3.11)$$

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

$K_L a$ = ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซต่อวินาที

จากสมการที่ได้กล่าวมานำมาวิเคราะห์หาค่าจะได้เป็น

$$\int_{C_1}^{C_2} \frac{dC}{(C_S - C)} = K_L a \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (3.12)$$

$$\ln \left[\frac{C_S - C_2}{C_S - C_1} \right] = K_L a (t_2 - t_1) \quad (3.13)$$

$$K_L a = \frac{\ln \left[\frac{C_S - C_2}{C_S - C_1} \right]}{(t_2 - t_1)} \quad (3.14)$$

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

$$\ln \left[\frac{C_S - C_t}{C_S - C_0} \right] = K_L a t \quad (3.15)$$

ถ้าระบบมีของเหลวที่อิ่มตัวด้วยก๊าซ ทำให้ก๊าซถ่ายเทออกจากของเหลว ดังนั้นสมการเขียนใหม่ได้เป็น

$$\ln \left[\frac{C_t - C_S}{C_0 - C_S} \right] = K_L a t \quad (3.16)$$

จากหลักการข้างต้นสามารถนำมาใช้คำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องการเติมลงในน้ำทิ้ง โดย สมมติให้อัตราการเติมออกซิเจนลงไปใต้น้ำทิ้งมีค่าเท่ากับ $\frac{dm}{dt}$ จะได้

$$\frac{dm}{dt} = K_T V (C_S - C) \quad (3.17)$$

เมื่อ K_T = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทของออกซิเจน ณ อุณหภูมิ T (°C) จะได้

$$K_T = K_{20}(1.024)^{T-20} \quad (3.18)$$

กำหนดให้ประสิทธิภาพการของการเติมออกซิเจนลงไปในน้ำทิ้งเป็น (Aeration Efficiency, E)

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

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

M = อัตราการเติมออกซิเจนลงไปในน้ำทิ้ง, (g/s)

จะได้

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

$$M = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_T \left(\frac{dm}{dt}\right)_{20}}{E \left(\frac{dm}{dt}\right)_T} \quad (3.21)$$

กำหนดให้

$$\frac{dm}{dt} = V \frac{dC}{dt} = Q dC \quad (3.22)$$

เมื่อ V = ปริมาตรของน้ำทิ้ง, (m³)

Q = อัตราไหลเข้าของน้ำทิ้ง, (m³/s)

$$dM = \frac{Q}{E} \frac{(C_s)_{20}}{(1.024)^{T-20}} \left(\frac{dC}{(C_s - C)_T} \right) \quad (3.23)$$

$$\int_0^M dM = \frac{Q}{E} \frac{(C_s)_{20}}{(1.024)^{T-20}} \int_{C_1}^{C_0} \frac{dC}{(C_s - C)} \quad (3.24)$$

$$M = \frac{Q}{E} \frac{(C_s)_{20}}{(1.024)^{T-20}} \ln \left(\frac{C_s - C_i}{C_s - C_0} \right)_T \quad (3.25)$$

$$Q = 0.00353 \frac{Q}{E} \frac{(C_s)_{20}}{(1.024)^{T-20}} \ln \left(\frac{C_s - C_i}{C_s - C_0} \right)_T \quad (3.26)$$

เมื่อ Q_s = ปริมาณอากาศที่ต้องการเติมลงไปใต้น้ำทิ้ง, (m^3/s)

เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพจริงคือปริมาณอากาศที่เติมลงไปใต้น้ำทิ้ง หรือน้ำเสียจึงนิยมคูณด้วย 1.10 ($1.1 = 1/0.9$; $0.9 =$ ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำเสีย/ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำสะอาด) ทำให้ปริมาณอากาศที่ต้องการเติมลงไปใต้น้ำทิ้ง เป็นดังสมการ (3.27)

$$OC = \frac{V(K_L a)(C_s)}{1000} \quad (3.27)$$

เมื่อ OC = ความสามารถในการเติมออกซิเจน, (kg/hr)

V = ปริมาตรของน้ำ, (m^3)

$K_L a$ = ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซต่อวินาที

C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในสารละลาย, (mg/l)

3.2.2 ปัจจัยที่ทำให้ออกซิเจนในน้ำมีมากหรือน้อย

ออกซิเจนในน้ำ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1. อุณหภูมิของน้ำ ออกซิเจนจะละลายในน้ำได้มากเมื่อน้ำมีอุณหภูมิต่ำและจะลดลงเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น
2. พื้นผิวสัมผัสของอณูก๊าซออกซิเจน ยิ่งพองอากาศมีพื้นที่สัมผัสมากและมีขนาดเล็กของอณูมาก ออกซิเจนก็ยังมีโอกาสละลายน้ำได้สูง
3. ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ละลายในน้ำอยู่ก่อนแล้ว หากมีปริมาณก๊าซออกซิเจนละลายในน้ำอยู่ก่อนแล้ว มากจนเกือบจะถึงจุดอิ่มตัว อัตราการละลายของออกซิเจนใหม่ที่เติมลงในน้ำก็จะต่ำลง
4. พื้นผิวสัมผัสของน้ำ (ต่างจากข้อ 2) กรณีที่มีการพ่นน้ำออกแบบเหนือน้ำในลักษณะน้ำพุหรือน้ำตก เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำนั้น ยิ่งน้ำที่พ่นออกมาสัมผัสกับอากาศมากเท่าไร ก็ยิ่งเพิ่มโอกาสการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างน้ำและอากาศมากขึ้นเท่านั้น
5. ปริมาณสารละลายต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ น้ำที่มีสารละลายต่างๆ ในระดับความเข้มข้นสูง จะส่งผลให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนลดต่ำลง
6. ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำและก๊าซออกซิเจน
7. ปริมาณและลักษณะสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบ่อเลี้ยง ปริมาณสารอินทรีย์ต่างๆที่อยู่ในบ่อเลี้ยงที่ต้องใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย

3.3 รูปแบบไร้มิติของสมการการขนถ่ายของไหล (Dimensionless Forms of Fluid Transport Equations)

ปริมาณไร้มิตินั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรควบคุมต่างๆ เช่น ขนาดในการคำนวณ ความดัน ฯลฯ ดังนั้น องค์ประกอบต่างๆในการค้นคว้าจะถูกแปลงให้เป็นปริมาณไร้มิติทั้งสิ้น ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณสามารถแปลงให้เป็นรูปแบบไร้มิติได้ สมการต่างๆ เช่นสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงานจะถูกนำเสนอในหัวข้อนี้

สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่องคือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (3.28)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของของไหล, (kg/m^3)

t = เวลา, (s)

\bar{v} = ความเร็วของของไหลในรูปของเวกเตอร์, (m/s)

$\bar{\nabla}$ = องค์ประกอบตามแนวแกน

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับของไหลอัดตัวได้คือ

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\bar{\nabla} P_{static} + \mu \nabla^2 \bar{v} + 2\bar{\nabla} \mu \cdot \bar{\nabla} \bar{v} + \bar{\nabla} \mu \times (\bar{\nabla} \times \bar{v}) + \frac{1}{3} \mu \bar{\nabla} (\bar{\nabla} \cdot \bar{v}) - \frac{2}{3} (\bar{\nabla} \cdot \bar{v}) \bar{\nabla} \mu + K \bar{\nabla} (\bar{\nabla} \cdot \bar{v}) + (\bar{\nabla} \cdot \bar{v}) \bar{\nabla} K + \rho g + j \times \bar{B} \quad (3.29)$$

เมื่อ $\frac{D\bar{v}}{Dt}$ = อนุพันธ์ของของไหล

P_{static} = ความดันสถิตย์, (Pa)

μ = ความหนืดของของไหล, (N.m)

∇^2 = กระจับวนการลาปลาซ

K = ความหนืดบัลค์, (N.m)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, (m/s^2)

j = ทิศทางของกระแส

\bar{B} = สนามของกระแสแม่เหล็ก

ผลกระทบของค่า K ต่อพลศาสตร์ของของไหลจะยากต่อการตรวจสอบและส่วนมากจะถูกมองข้ามไป และเนื่องจากไม่มีกระแสแม่เหล็ก พจน์สุดท้ายในสมการจึงตัดทิ้งได้ การจะทำให้สมการที่ 3.29 ดูง่ายขึ้นนั้น สามารถใช้ค่าความดันพลศาสตร์ (Dynamic Pressure) เพิ่มเข้ามาในการคำนวณแทนค่าความดันสถิตยและความเร่งโน้มถ่วงได้ ความสัมพันธ์ของพลศาสตร์ความดันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{v}P_{dynamic} = \bar{v}P_{static} - \rho\bar{g} \quad (3.30)$$

เมื่อ $P_{dynamic}$ = พลความดัน, (Pa)

3.3.1 กฎอนุรักษ์มวล (กฎความต่อเนื่อง)

สมการทั่วไปของการไหลต่อเนื่องคือ

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \bar{v}(bv) = -\bar{v} \cdot f + B_V \quad (3.31)$$

เมื่อ b = ความเข้มข้นของปริมาณใดปริมาณหนึ่ง, (m^3)

t = เวลา, (s)

\bar{v} = ระบบของค์ประกอบ

v = ความเร็วของของไหล, (m/s)

f = ส่วนขยายของฟลักซ์ในปริมาณนั้น

B_V = อัตราของการเกิดขึ้นของปริมาณนั้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

ในสมการความต่อเนื่อง ความเข้มข้นคือความหนาแน่นทั้งหมดของมวล ดังนั้น ค่า b จะถูกแทนที่ด้วยความหนาแน่นของของไหล และเนื่องจากไม่มีฟลักซ์ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วของผลเฉลี่ยมวล ค่า f จะเท่ากับ 0 และในกรณีของหัวฉีดในโครงการนี้ จะไม่มีแหล่งกำเนิดมวลหรือเกิดการจมหายของมวล ดังนั้น ค่า B_V จะเท่ากับ 0 เช่นกัน

จากการตัดพจน์ข้างต้น สมการความต่อเนื่องจะลดรูปได้ ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{v} \cdot (\rho v) = 0 \quad (3.32)$$

ในระบบจำลองแบบ 2 มิติ สมการความต่อเนื่องจะแสดงดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot (\rho \bar{v}_x) + \frac{\partial}{\partial r} \cdot (\rho \bar{v}_r) + \frac{\rho \bar{v}_r}{r} = 0 \quad (3.33)$$

ในสมการข้างต้น x คือระบบพิกัดฉากแนวแกน และ r คือระบบพิกัดฉากแบบรัศมี ค่า \bar{v} คือความเร็วของของไหล

3.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

จากสมการอนุรักษ์ของระบบ สมการอนุรักษ์โมเมนตัมจะสามารถพิสูจน์ได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้
ขั้นแรกคือ ค่า b จะถูกแทนที่ด้วยพจน์ของโมเมนตัม ($\rho \bar{v}$) ในขณะเดียวกัน ค่าฟลักซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วจะถูกแทนที่ด้วยความดันสถิตย ความเค้น และฟลักซ์จากแรงโน้มถ่วง ในระบบหัวฉีด ค่า B_V จะเป็นศูนย์ เพราะฉะนั้น สมการอนุรักษ์โมเมนตัมจะเขียนได้ดังสมการที่ 3.34 ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \bar{v} (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\bar{v} P + \bar{v} \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} \quad (3.34)$$

โดยที่ P = ความดันสถิตย, (Pa)

$\bar{\tau}$ = เทนเซอร์ความเค้น, (J)

\bar{g} = แรงต่อหนึ่งหน่วยเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, (m/s^2)

สำหรับการจำลองระบบแบบ 2 มิติในรูปสมมาตรนั้น สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในระบบพิกัดในแนวแกนและในแนวรัศมีจะแสดงดังสมการที่ 3.35 และ 3.36 ตามลำดับ
ระบบพิกัดฉาก

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho \bar{v}_x \bar{v}_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \bar{v}_r \bar{v}_x) = & -\frac{\partial P}{\partial x} \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\bar{v} \cdot \bar{v}) \right) \right] \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial r} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.35)$$

พิกัดแนวรัศมี

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho \bar{v}_x \bar{v}_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho \bar{v}_r \bar{v}_r) = & -\frac{\partial P}{\partial r} \\
 & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial r} - \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial x} \right) \right] \\
 & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\bar{v} \cdot \bar{v}) \right) \right] \\
 & - 2\mu \frac{\bar{v}_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\bar{v} \cdot \bar{v}) \\
 & + \rho \frac{\bar{v}_z^2}{r}
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

โดยที่

$$\bar{v} \cdot \bar{v} = \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} + \frac{\bar{v}_r}{r} \tag{3.37}$$

3.4 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

3.4.1 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

หากพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองการโปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างของอัลกอริทึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสภาวะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ให้ผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าต่างๆ ที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณโดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้ [16]

3.4.1.1 ขั้นตอนประมวลผล

ขั้นตอนประมวลผล (pre-processing) คือขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหา และพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

3.4.1.1.1 กำหนดรูปทรง และระบุขนาดที่สนใจ เรียกว่า การกำหนดสนามการคำนวณ (computation domain)

- 3.4.1.1.2 กำหนดจำนวน และรูปแบบการจัดวางกริด (grid or mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามคำนวณออกเป็น ปริมาณเล็กๆ รูปแบบการจัดแบ่ง และจัดวางกริด ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณาการจัดที่เหมาะสมทำให้การหาผลเฉลยประมาณค่า (approximation solution) แม่นยำขึ้น
- 3.4.1.1.3 เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับธรรมชาติของปัญหา เลือกโดยใช้องค์ความรู้ทางทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง
- 3.4.1.1.4 กำหนดคุณสมบัติของของไหล เช่นพิจารณาอุณหภูมิอากาศของของไหลเป็นปกติ
- 3.4.1.1.5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และค่าเริ่มต้น (initial condition)

3.4.1.2 ชั้นประมวลผล

- ชั้นประมวลผล (solving) เป็นชั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา
- 3.4.1.2.1 ประมวลตัวแปรไม่ทราบค่าโดยหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน (มักใช้ในปัญหาแบบปั่นป่วน) สร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย โดยรวมกับสมการควบคุมการไหล
- 3.4.1.2.2 หาผลเฉลยวีค (weak solution) ของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง (weight residual) จากนั้นดิสcretize โดยประมาณแต่ละเทอมความสัมพันธ์ด้วยแบบแผนวิธีที่เลือกไว้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นพีชคณิต
- 3.4.1.2.3 แก้สมการพีชคณิต ผลเฉลยที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า

3.4.1.3 ชั้นแสดงผล

ชั้นแสดงผล (post-processing) คือการแสดงผลเฉลยประมาณค่าของตัวแปรที่สนใจ และใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เช่น รูปแบบความเร็ว รูปแบบการหมุน เป็น

3.4.2 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตระหนักว่าธรรมชาติักมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระมัดระวังอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีเลิศ เป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์สามารถหาค่าตอบได้เท่านั้น ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรง

คุณสมบัติของวิธีการคำนวณ คือปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่า เมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้

3.4.2.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (consistency) หมายถึงความเหมือน (equivalent) ระหว่างสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการพีชคณิตที่ผ่านกระบวนการดิสcretize ทั่ว เมื่อระยะกริด (grid spacing) และ หรือค่าขั้นเวลา (time step) ลดลงใกล้ศูนย์โดยปกติเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสcretize ทั่วว่า ความผิดพลาดแบบทรานเซชัน (truncation error) ซึ่งลดลงเมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

3.4.2.2 เสถียรภาพการคำนวณ

เสถียรภาพการคำนวณ (stability) เป็นลักษณะการคำนวณที่มีค่าผิดพลาดน้อยลงเมื่อคำนวณซ้ำ (damping of error) เรียกความผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณซ้ำว่าความผิดพลาดแบบเร้าออฟ (round-off error) เช่นความผิดพลาดในการคำนวณทศนิยมตำแหน่งที่ 12 ของคอมพิวเตอร์เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากวิธีการคำนวณไม่มีเสถียรภาพ ผลการคำนวณอาจมีลักษณะลู่ออก (divergence) โดยมักเกิดจากความเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ถูกต้อง หรือแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลขไม่เหมาะสมกับปัญหาที่พิจารณาซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพการคำนวณต้องใช้ความรู้ของทฤษฎีการรบกวน (perturbation theory) เป็นแนวทาง

3.4.2.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

ผลการคำนวณที่มีการลู่เข้าของผลเฉลย (convergence) หมายถึงผลเฉลยประมาณค่ามีแนวโน้มเข้าใกล้ผลเฉลยแม่นยำ สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น (nonlinear problem) ยากที่จะตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบทำได้ด้วยวิธีเปรียบเทียบผลการคำนวณที่มีระยะกริดลดลง กระทั่งผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะกริด (grid independent) เรียกได้ว่ามีคุณสมบัติการลู่เข้าของผลเฉลยที่ดี

3.4.2.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติการอนุรักษ์ (conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์เนื่องจากผลการคำนวณมาจากสมการควบคุม ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงมีคุณสมบัติดังนี้ด้วย โดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาณสี่เหลี่ยม ก้าวคือคำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่นรอบผิวปิดของปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริดเป็นต้น

3.4.2.5 ความจำกัดขอบ

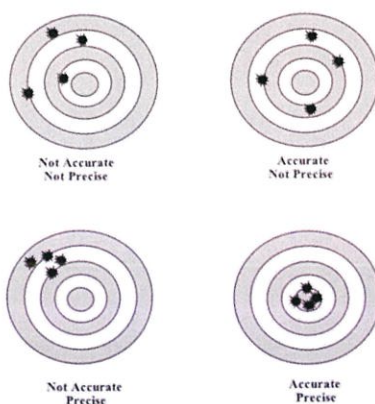
ความจำกัดขอบ (bounded ness) หมายถึงผลเฉลยควรมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด เช่นความหนาแน่น ความเข้มข้น ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หรือระบบการถ่ายเทความร้อนที่ทราบอุณหภูมิต่ำสุด-สูงสุด ผลเฉลยที่ควรได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วงนั้นด้วยเช่นกัน โดยวิธีการคำนวณที่มีอันดับสูง (higher order) มีแนวโน้มความจำกัดขอบต่ำลง ดังนั้นจึงไม่ควรเลือกใช้วิธีการคำนวณที่มีอันดับสูงมากเกินไปจนความจำเป็น

3.4.2.6 ความเสมือนจริง

ความเสมือนจริง (realizability) หมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่จำลองพฤติกรรมธรรมชาติที่ซับซ้อน เช่นจำลองการไหลปั่นป่วน แบบจำลองการเผาไหม้ เป็นต้น ควรเลือกแบบจำลองที่มีความเสมือนจริงเมื่อเทียบกับความหมายทางกายภาพ หากเลือกใช้ หรือนำมาใช้สอดคล้องกับปัญหา ผลเฉลยที่ได้อาจไม่สื่อความหมายทางกายภาพที่ถูกต้อง

3.4.2.7 ความหนาแน่น

บ่อยครั้งในงานทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแน่นอน (accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (precision) พิจารณารูปที่ 3.7 แสดงความแตกต่างระหว่างแนวความคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป้าเป็นเสมือนค่าแม่นยำ โดยเห็นได้ว่าความแน่นอนสูงหมายถึงค่าโดยเฉลี่ยไม่ต่างจากค่าแม่นยำ และความแม่นยำสูง หมายถึงค่าส่วนใหญ่อะไรกระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางวิศวกรรมจึงควรให้ความสำคัญกับความแน่นอน มากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ได้ถูกต้อง มีแนวโน้มกับสภาพความจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดลดน้อยที่สุด จึงควรใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบรวมกัน



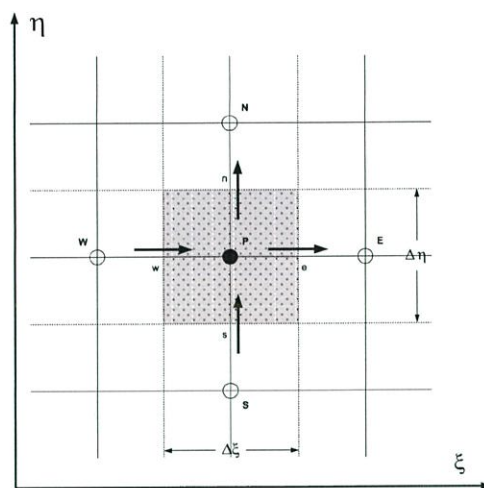
รูปที่ 3.7 แนวคิดของความแม่นยำและความเที่ยง

วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแม่นยำได้เป็น 3 ปัจจัยดังนี้

1. ความแม่นยำจากแบบจำลอง (modeling accuracy) เกิดจากความเหมือนจริงของแบบจำลอง เทียบกับพฤติกรรมจริงธรรมชาติ
2. ความแม่นยำจากการดิสcretize (discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิต เทียบกับสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย)
3. ความแม่นยำจากการแก้สมการพีชคณิต (iteration accuracy) เกิดจากการลู่เข้าของผลเฉลยประมาณค่า เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการพีชคณิต

3.4.3 รูปแบบการจัดวางกริด

รูปแบบการจัดวางกริดโดยทั่วไปแบ่งได้ 3 แบบคือ แบบโครงสร้างปกติ (structured grid) แบบกลุ่มโครงสร้าง (block structured grid) และแบบไม่เป็นโครงสร้าง (unstructured grid) เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจกระบวนการดิสcretize ในกระบวนการถัดไป จึงได้ใช้รูปแบบการวางกริดดังรูปที่ 3.8 (แบบโครงสร้างปกติ) และเพื่อความกระชับได้ดิสcretize กริด 2 มิติเท่านั้น ซึ่งสามารถขยายไปสู่กริด 3 มิติได้โดยตรง



รูปที่ 3.8 รูปแบบการจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ

จากรูปที่ 2 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (node) ที่สนใจ ตัวอักษรพิมพ์เล็ก เช่น w, e แสดงถึงปริมาตรที่เข้า-ออกจากปริมาตรควบคุมที่แรงงา (cell volume) เช่น ความเร็ว เป็นต้น เรียกว่า ตำแหน่งผิวเซลล์ (cell face) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวกเตอร์ที่ตำแหน่งผิวเซลล์ รูปแบบลักษณะนี้เรียกว่า การจัดเรียงแบบตำแหน่งรวม (co-located arrangement) กล่าวคือ ปริมาณสเกลาร์ และเวกเตอร์มีตำแหน่งเดียวกัน (มวล ความเร็ว ความดัน)

3.4.4 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข

ปัจจุบันมีนักวิจัยที่คิดค้นแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical scheme) มากมายซึ่งขอกกล่าวถึงเฉพาะแบบแผนในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 4 แบบคือ

3.4.4.1 แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง

แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง (central differencing scheme ,CDS) คือการประมาณค่าที่ตำแหน่งผิวเซลล์ต่างๆ ด้วยหลักการหาค่าเฉลี่ยกึ่งกลาง เป็นไปตามสมการ (3.38) , ϕ แทนปริมาณที่สนใจใดๆ

$$\begin{aligned}
 \phi_e &= (\phi_p + \phi_E)/2 \\
 \phi_w &= (\phi_W + \phi_p)/2 \\
 \phi_n &= (\phi_p + \phi_N)/2 \\
 \phi_s &= (\phi_s + \phi_p)/2
 \end{aligned}
 \tag{3.38}$$

จากสมการ (3.38) เห็นได้ว่าการประมาณค่าที่ผิวเซลล์ด้วยค่าที่ตำแหน่งโนด โดยถ่วงน้ำหนักโนด ประชิด (adjacent node) เท่ากัน แบบแผนวิธีนี้จึงขึ้นอยู่กับระยะกริดเป็นสำคัญ ซึ่งระยะกริดที่ลดลง ทำให้ผลเฉลยมีความแน่นอนสูงขึ้น

3.4.4.2 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง

การประมาณค่าที่ผิวเซลล์รูปที่ 2 ของแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง (1^{st} -order upwind differencing scheme, UDS-1,FOU) ให้ปริมาณที่ตำแหน่งท้ายลมมีค่าเท่ากับปริมาณที่ตำแหน่งต้นลม ดังสมการ (3.39) เมื่อ ϕ แทนปริมาณที่สนใจ และ u แทนความเร็วที่ตำแหน่งผิวเซลล์นั้นเช่น u_e แทนความเร็วที่ตำแหน่งผิวเซลล์ e เป็นต้น

$$\begin{aligned}\phi_e &= a_e \phi_P + (1 - a_e) \phi_E \text{ เมื่อ } u_e > 0 \Rightarrow a_e = 1 \text{ และ } u_e < 0 \Rightarrow a_e = 0 \\ \phi_w &= a_w \phi_W + (1 - a_w) \phi_P \text{ เมื่อ } u_w > 0 \Rightarrow a_w = 1 \text{ และ } u_w < 0 \Rightarrow a_w = 0 \\ \phi_n &= a_n \phi_P + (1 - a_n) \phi_N \text{ เมื่อ } u_n > 0 \Rightarrow a_n = 1 \text{ และ } u_n < 0 \Rightarrow a_n = 0 \\ \phi_s &= a_s \phi_E + (1 - a_s) \phi_P \text{ เมื่อ } u_s > 0 \Rightarrow a_s = 1 \text{ และ } u_s < 0 \Rightarrow a_s = 0\end{aligned}\quad (3.39)$$

แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งมีคุณสมบัติจำกัดขอบสูง ทำให้ผลเฉลยไม่กระเพื่อม (oscillatory solution) เป็นข้อดีทั้งในเสถียรภาพการคำนวณ และการลู่เข้าของผลเฉลย แต่ในขณะเดียวกัน ทำให้เกิดพฤติกรรมการแพร่เชิงตัวเลข (numerical diffusive) เนื่องจากลักษณะผลเฉลยเสมือนถูกถ่วงน้ำหนักจากค่าที่ตำแหน่งต้นลมเป็นหลัก สำหรับกรณีที่มีการไหลซับซ้อน แบบแผนวิธีนี้จะทำให้คุณสมบัติความเข้ากันได้ลดลง

3.4.4.3 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง

แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง (2^{nd} -order upwind differencing scheme, UDS-2,SOU) ได้พัฒนาให้มีความแน่นอนสูงขึ้น พิจารณาที่ตำแหน่งโนด P เมื่อใช้อนุกรมขยายของเทเลอร์ (Taylor series expansion) ตามหลักผลต่างต้นลม เขียนความสัมพันธ์ที่ผิวเซลล์ e ได้ว่า

$$\phi_e = \phi_P + \delta_{eP} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P + \frac{\delta_{eP}^2}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P + \text{H.O.T} \text{ เมื่อ } u_e > 0 \quad (3.40)$$

สมการ (3.40) เป็นตัวอย่างแบบแผนในกรณีวิธี 1 มิติ พิจารณาเฉพาะที่ผิวเซลล์ e เมื่อ δ_{eP} แทน ระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ e และโนดต้นลม P (เนื่องจาก $u_e > 0$) สำหรับกรณีแบบแผนวิธีผลต่างต้นลม อันดับหนึ่งจะใช้เฉพาะเทอมแรกทางขวาของสมการ และแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสองนี้จะใช้สอง เทอมแรกทางขวาของสมการ เทอม $(\frac{\partial \phi}{\partial x})_P$ คือ ความชันของเซลล์ต้นลม ซึ่งประมาณโดยการเฉลี่ยถ่วง น้ำหนักด้วยปริมาตรของเซลล์นั้น ดังสมการ (3.41) จากนั้นใช้ทฤษฎีของเกาส์ (Gauss theorem) จะเขียน ได้ในสมการ (3.42) ดังนี้

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_P = \frac{1}{V} \int \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) dV \quad (3.41)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_P = \frac{1}{V} \oint \phi \cdot \vec{n} dA \quad (3.42)$$

เมื่อ V แทนขนาดปริมาณของเซลล์ A แทนพื้นที่ผิวเซลล์และ \vec{n} แทนเวกเตอร์ตั้งฉากกับผิวเซลล์ สมการ (3.41) ทำการดิสเครทไทซ์ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ (กรณีที่มีการจัดวางกริดตาม รูปที่ 3.8 จะลดรูปได้เป็น

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_P = \frac{1}{A_P} \phi_e L_e + \phi_w L_w + \phi_n L_n + \phi_s L_s \quad (3.43)$$

จากสมการ (3.42) เมื่อ L แทนระยะความกว้างของเซลล์ในแต่ละด้านตามตัวห้อย เช่น L_e แทน ระยะความกว้างของผิวเซลล์ e เป็นต้น และ A_P แทนพื้นที่เซลล์ที่ตำแหน่งโนด P อยู่เช่น A_P มีค่าเท่ากับ พื้นที่แรงแจในรูปที่ 3.8 เป็นต้น ซึ่งค่า ϕ ที่ผิวเซลล์ต่างๆของสมการ (3.43) หาได้หลายวิธี แต่ในที่นี้เลือกใช้ แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางดังสมการ (3.38) ดังนั้นสมการ (3.40) เขียนใหม่ได้ว่า

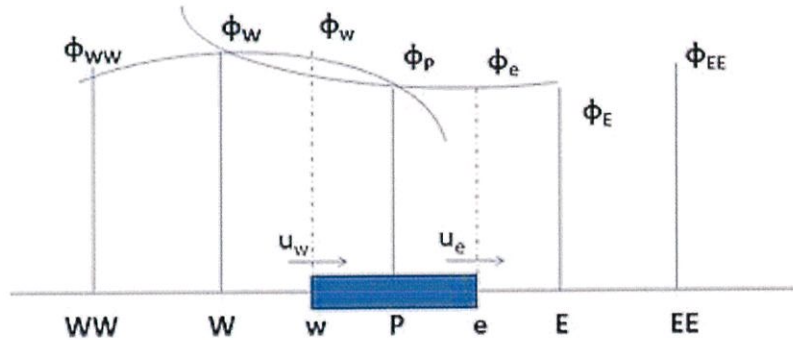
$$\phi_e = \phi_P + \frac{\delta_{eP}}{A_P} \left(\left(\frac{\phi_P + \phi_E}{2}\right) \cdot L_e + \left(\frac{\phi_w + \phi_P}{2}\right) \cdot L_w + \left(\frac{\phi_P + \phi_N}{2}\right) \cdot L_n + \left(\frac{\phi_S + \phi_P}{2}\right) \cdot L_s \right) \text{เมื่อ } u_e > 0 \quad (3.44)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อ $u_e < 0$ จะเขียนได้ดังสมการ (3.45) และสมการของ ϕ_w, ϕ_n, ϕ_s สามารถหาได้ด้วยสมการเดียวกัน ซึ่งไม่กล่าวถึงในรายละเอียด

$$\begin{aligned} \phi_e = \phi_E + \frac{\delta_{eE}}{A_E} \left(\left(\frac{\phi_E + \phi_{EE}}{2}\right) \cdot L_{ee} + \left(\frac{\phi_E + \phi_P}{2}\right) \cdot L_{we} \right. \\ \left. + \left(\frac{\phi_{NE} + \phi_E}{2}\right) \cdot L_{ne} + \left(\frac{\phi_E + \phi_{SE}}{2}\right) \cdot L_{se} \right) \text{เมื่อ } u_e < 0 \end{aligned} \quad (3.45)$$

3.4.4.4 แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก

แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติก (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) เริ่มนำเสนอโดย Leonard (1988) เป็นแบบแผนวิธีที่ใช้โนด 3 ตำแหน่งในการประมาณค่าของแต่ละผิวเซลล์ (2 โหนดที่ต้นลม และ 1 โหนดที่ท้ายลม) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติกในปริมาณควบคุมแบบ 1 มิติ

ตามรูปที่ 3 เมื่อ $u_w > 0$ และ $u_e > 0$ การประมาณค่า ϕ_w ที่ผิวเซลล์ w จะใช้ค่าที่โนดต้นลมคือ WW และ W ประกอบกับที่โนดท้ายลมคือ W และ P ในทำนองเดียวกันกับการประมาณค่า ϕ_e ที่ผิวเซลล์ e จะใช้ค่าที่โนดต้นลมคือ W และ P ประกอบกับที่โนดท้ายลมคือ E ตามลำดับ

ด้วยหลักการความคล้ายคลึง กรณีที่ $u_w < 0$ และ $u_e < 0$ การประมาณค่า ϕ_w ใช้โนด E และ P ประกอบกับโนด W และการประมาณค่า ϕ_e ใช้โนด EE , E และ P ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ต่างๆ สามารถเขียนได้ในสมการ (3.46) ถึง (3.49) โดย $u_x > 0$ แล้ว $a_x = 1$ และ $u_x < 0$ แล้ว $a_x = 0$ เมื่อ $x = w, e, s, n$ ตามลำดับ

$$\phi_w = \frac{3}{8}[(1 + a_w) \cdot \phi_W + (2 - a_w)\phi_P] - \frac{1}{8}[(1 - a_w) \cdot \phi_E + a_w \cdot \phi_{WW}] \quad (3.46)$$

$$\phi_e = \frac{3}{8}[(1 + a_e) \cdot \phi_P + (2 - a_e)\phi_E] - \frac{1}{8}[(1 - a_e) \cdot \phi_{EE} + a_e \cdot \phi_W] \quad (3.47)$$

$$\phi_s = \frac{3}{8}[(1 + a_s) \cdot \phi_S + (2 - a_s)\phi_P] - \frac{1}{8}[(1 - a_s) \cdot \phi_N + a_s \cdot \phi_{SS}] \quad (3.48)$$

$$\phi_n = \frac{3}{8}[(1 + a_n) \cdot \phi_P + (2 - a_n)\phi_N] - \frac{1}{8}[(1 - a_n) \cdot \phi_{NN} + a_n \cdot \phi_S] \quad (3.49)$$

แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติกมีความแน่นอนอันดับสาม ซึ่งสูงกว่าทั้งแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งและสอง เป็นเทคนิคการผสมผสานความได้เปรียบของแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางและแบบแผนวิธีผลต่างต้นลม อย่างไรก็ตามแบบแผนวิธีผลต่างเข้าด้วยกัน กล่าวคือมีคุณสมบัติอนุรักษ์ และความ

เข้ากันได้มากกว่าแบบแผนวิธีผลต่างต้นลม อย่างไรก็ตามแบบแผนวิธีผลต่างอันดับสูง จะมีเงื่อนไขเสถียรภาพการคำนวณ (conditionally stable) เพิ่มขึ้น และคุณสมบัติจำกัดขอบลดลง

3.4.5 การดิสcreteไทต์สมการควบคุม

การคำนวณด้วยวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ต้องการผลเฉลยวิคของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง โดยการเลือกใช้ 1 (unit) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weight function) ผลที่ได้เป็นสมการอินทิกรัล (integral equation) บนขอบเขตปริมาตรควบคุมเล็กๆจากทฤษฎีของเกาส์ทำให้สามารถพิจารณาปริมาณที่ส่งถ่ายเข้า-ออก เฉพาะที่ขอบเขต เป็นตัวแทนทั้งปริมาตรได้ รวมเรียกว่าการดิสcreteไทต์สมการอนุพันธ์ย่อย โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไปโดยจะเป็นการดิสcreteไทต์สมการอนุพันธ์มวล

3.4.6 การดิสcreteไทต์สมการอนุพันธ์มวล

จากสมการอนุพันธ์มวลแบบไร้การอัดตัว จะได้ผลเฉลยวิคดังสมการ (3.50) และใช้ทฤษฎีของเกาส์ จะได้สมการ (3.51)

$$\int \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega = 0 \quad (3.50)$$

$$\oint u_i n_i dA = 0 \quad (3.51)$$

เมื่อ A แทนพื้นที่ผิวเซลล์ และ \mathbf{n} แทนเวกเตอร์ตั้งฉากกับผิวเซลล์ จากสมการ (3.42) ให้ทำการดิสcreteไทต์ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมใน 2 มิติ (กรณีจัดวางกริดตามรูปที่ 3.8 จะได้สมการ (3.52) ซึ่งเรียกว่า สมการอนุพันธ์มวลแบบดิสcreteไทต์ เมื่อ L แทนระยะความกว้างของผิวเซลล์ในแต่ละด้านตามตัวห้อย เช่น L_e แทนระยะความกว้างของผิวเซลล์ e เป็นต้น

$$(uL)_e - (uL)_w - (uL)_n - (uL)_s = 0 \quad (3.52)$$

3.4.7 ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการควบคุมในการไหลคงตัว

ในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ตามระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมมีลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการควบคุมหลายวิธี โดยลำดับวิธีที่นิยมกันทั่วไปคือ ลำดับวิธี SIMPLE ลำดับวิธี SIMPLER ลำดับวิธี SIMPLE และลำดับวิธี PISO ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีแบบ SIMPLE เพียงอย่างเดียว ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE (semi-implicit method for pressure link equation) เป็นวิธีที่ใช้หลักการเดาค่าความดัน แล้วนำไปคำนวณหาค่าความเร็วและปริมาณสเกลาร์อื่นๆ จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ และตรวจสอบโดยสมการอนุรักษ์มวล หากค่าทั้งหมดมีความสอดคล้องกับสมการควบคุมแสดงว่าค่าความดันที่เดามีความถูกต้อง หากไม่สอดคล้องจะเดาค่าความดันใหม่บนฐานของค่าความดัน และความเร็วที่คำนวณได้

3.4.8 การจำลองโมเดลแบบปั่นป่วน

กระแสน้ำของไหลที่มีความเร็วและเลขเรย์โนลด์สูงจะเรียกว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) เนื่องจากกระแสน้ำเป็นการไหลแบบปั่นป่วน การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจึงถูกนำมาพิจารณาและใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของของไหลในโปรแกรมนี้

ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้น สนามความเร็วจะไม่คงที่ ความผันผวนนี้จะรวมเข้ากับปริมาณที่ส่งผ่านได้เช่น โมเมนตัม พลังงาน และความเข้มข้นเฉพาะ อย่างไรก็ตาม สมการของระบบที่ถูกต้องนั้นสามารถเป็นได้ทั้งแบบเฉลี่ยเวลาและเฉลี่ยผลรวมเพื่อทำการกำจัดความผันผวน สมการและตัวแปรต่างๆ ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อกระบวนการนี้

ในโปรแกรม Fluent มีแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน 5 รูปแบบ ดังนี้

- (1) Spalart-Allmaras Model
- (2) $k-\epsilon$ models
 - Standard $k-\epsilon$ model
 - Renormalization-group (RNG) $k-\epsilon$ model
 - Realizable $k-\epsilon$ model
- (3) $k-\omega$ models
 - Standard $k-\omega$ model
 - Shear-stress transport (SST) $k-\omega$ model
- (4) Reynolds Stress Model (RSM)
- (5) Large eddy simulation (LES) Model

เนื่องจากในโครงการนี้ใช้รูปแบบของ Renormalization-group (RNG) $k-\mathcal{E}$ model หลักการใช้งานและวิธีการคำนวณของโมเดลนี้จะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.4.9 Renormalization-group (RNG) $k-\mathcal{E}$ model

เป็นรูปแบบจำลองที่มีความแม่นยำในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่กว้างโดยการใช้เทคนิคทางสถิติอย่างแม่นยำและมีความคล้ายคลึงกับ Standard $k-\mathcal{E}$ model ซึ่งเป็นโมเดลมาตรฐานที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมีข้อดีที่เพิ่มขึ้นมาดังนี้

3.4.9.1 เพิ่มเติมเทอมลงในสมการของ \mathcal{E} ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำอย่างมากสำหรับกระแสที่มีความเครียดสูง

3.4.9.2 ผลกระทบของการไหลวนในกระแสปั่นป่วนได้ถูกนำมาคำนวณ เพิ่มความแม่นยำในกระแสที่มีการไหลวน

3.4.9.3 มีสูตรสำหรับเลขพลังค์ (Prandtl Numbers)

สิ่งเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณปริมาณต่างๆ ในการจำลองการไหลของกระแส แต่ทว่าการคำนวณจะกินเวลากว่าการใช้โมเดลแบบมาตรฐาน Standard $k-\mathcal{E}$ model อยู่ค่อนข้างมาก

3.4.10 Mathematical Algorithm of the Renormalization $k-\mathcal{E}$ model

เมื่อค่า k คือพลังงานศักย์ปั่นป่วนและค่า \mathcal{E} คืออัตราการกระจายตัว สมการที่จะใช้คำนวณในโมเดลนี้มีดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \mathcal{E} - Y_M + S_k \quad (3.53)$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathcal{E}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mathcal{E} u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_{\mathcal{E}} \mu_{eff} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} \right) + C_{1\mathcal{E}} \frac{\mathcal{E}}{k} (G_k + C_{3\mathcal{E}} G_b) - C_{2\mathcal{E}} \rho \frac{\mathcal{E}^2}{k} - R_{\mathcal{E}} + S_{\mathcal{E}} \quad (3.54)$$

โดยที่

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{n}{n+5} \right], n = S \frac{k}{\mathcal{E}}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.55)$$

เมื่อ	t	= เวลา, (s)
	ρ	= ความหนาแน่น, (kg/m^3)
	k	= พลังงานจลน์ปั่นป่วน, ($\text{J}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$)
	v	= ความเร็ว, (m/s)
	x	= ระยะห่าง, (m)
	μ	= ความหนืด, ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)
	μ_t	= ความหนืดปั่นป่วน, ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)
	G_k	= พลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากผลเฉลยองค์ประกอบความเร็ว, (J)
	G_b	= พลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว, (J)
	ε	= อัตราการกระจายตัว, ($\text{J}\cdot\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s})$)
	Y_M	= ค่าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการขยายพื้นที่อย่างผันผวนในกระแสปั่นป่วนบีบอัดได้ใน การกระจายตัวทั้งหมด, (J)
	$C_{1\varepsilon}$	= ค่าคงที่ในโมเดล = 1.42
	$C_{2\varepsilon}$	= ค่าคงที่ในโมเดล = 1.68

ในสมการนี้ ค่า G_k คือค่าพลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากผลเฉลยองค์ประกอบความเร็ว ค่า G_b คือค่าพลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

บทที่ 4

การสร้างแบบจำลองและการทดลอง

4.1 การสร้างแบบจำลอง

โครงการเล่มนี้ การสร้างรูปแบบจำลองของชุดหัวฉีดของของไหลสองชนิดได้แก่ของไหลปฐมภูมิ (Primary Fluid) เป็นน้ำและของไหลทุติยภูมิ (Secondary Fluid) เป็นอากาศด้วยโปรแกรมออโต้แคด (Autocad) เพื่อกำหนดขนาดการสร้างอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1ก รายละเอียดของตัวแปรของขนาดและระยะต่างๆถูกกำหนดด้วยตัวแปรดังนี้

D_j คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด (น้ำ)

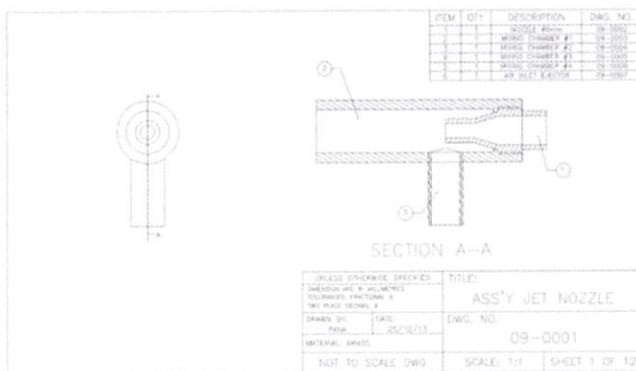
D_a คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศ

D_c คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องผสม

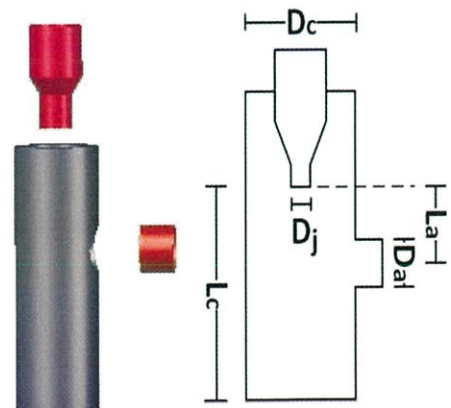
L_c คือ ความยาวของห้องผสมโดยเริ่มจากปลายของหัวฉีด

L_a คือ ตำแหน่งของรูอากาศโดยเริ่มจากปลายของหัวฉีดไปถึงจุดกึ่งกลางของรูอากาศ

ดังแสดงในรูปที่ 4.1ข



(ก)



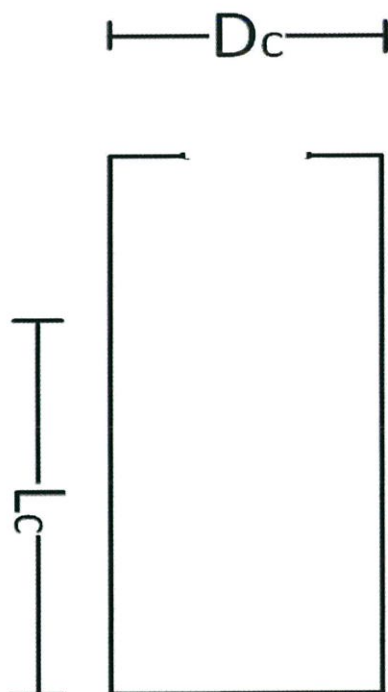
(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) แบบของชุดหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ตัวแปรของระยะต่างๆ ในชุดทดลองหัวฉีด

4.1.1 การสร้างรูปร่างหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT)

รูปแบบของชุดหัวฉีดที่สร้างด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) นั้นถูกสร้างแบบจำลองโดยให้แบบของชุดหัวฉีดเป็นแบบไม่มีรูอากาศ เนื่องจากโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) เป็นโปรแกรมที่สร้างแบบและกำหนดเงื่อนไขของชุดหัวฉีดก่อนส่งไปยังโปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS FLUENT) เพื่อทำการสร้าง

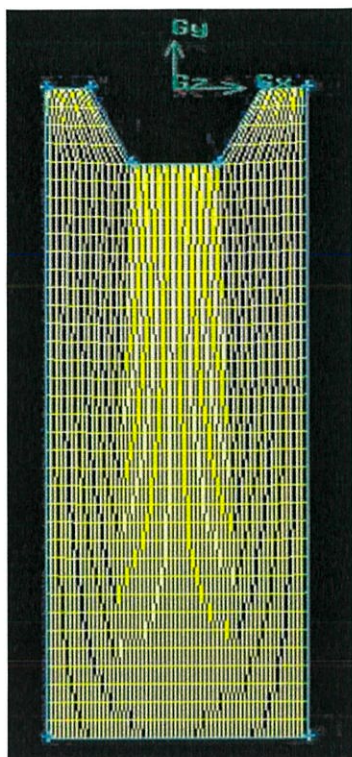
จำลองและคำนวณรูปแบบการไหล [21,22] การใช้โปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS FLUENT) นี้ไม่สามารถสร้างแบบจำลองการไหลของของไหลทั้งสองซึ่งก็คือน้ำและอากาศรวมกันได้ แต่สามารถจำลองการไหลเฉพาะของไหลที่ออกจากหัวฉีด (น้ำ) ได้เท่านั้น ดังนั้นแบบที่ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) จึงไม่มีรูอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



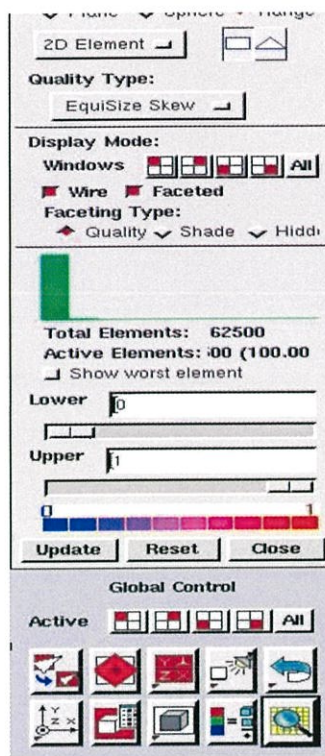
รูปที่ 4.2 แบบจำลองของชุดหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT)

4.1.2 การสร้างขอบเขตย่อยด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT)

การสร้างขอบเขตย่อย (mesh) คือการแบ่งพื้นที่ภายในแบบจำลองชุดหัวฉีดเป็นช่องเล็กๆ ความละเอียดของการแบ่งนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง จำนวนขอบเขตย่อยที่ใช้เพิ่มขึ้นเมื่อรูปจำลองมีการเปลี่ยนแปลงขนาด ขอบเขตย่อยที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองอยู่ในช่วง 60,000 ถึง 80,000 ช่องดังแสดงในรูปที่ 4.3



(ก)

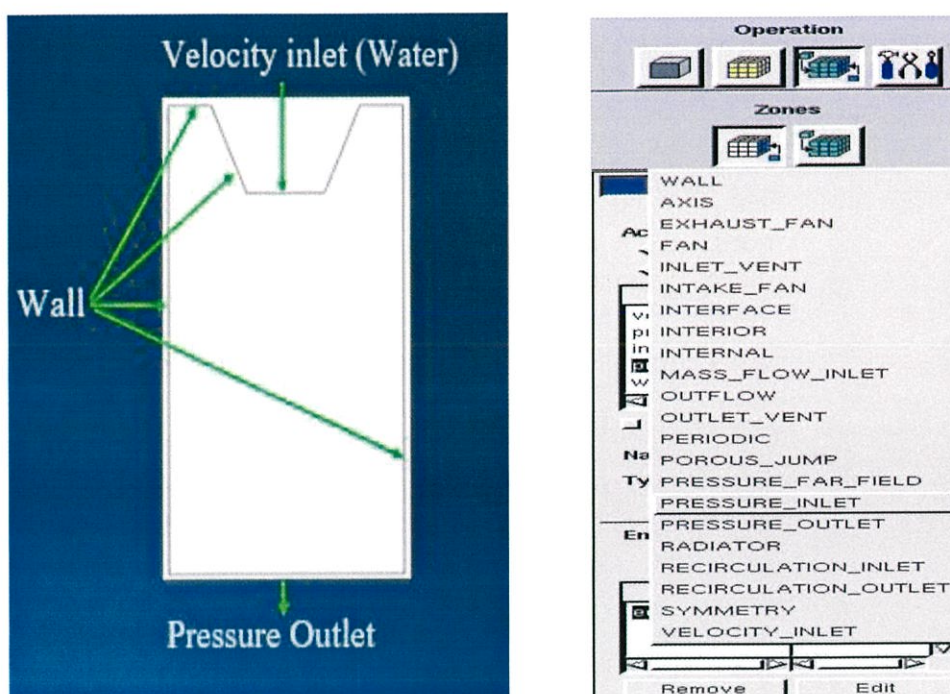


(ข)

รูปที่ 4.3 (ก) รูปแบบของขอบเขตย่อยของชุดหัวฉีด, (ข) จำนวนขอบเขตย่อย

4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของหัวฉีดด้วยโปรแกรมเกมบิท (GAMBIT)

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เป็นการกำหนดเงื่อนไขของการสร้างแบบจำลองเฉพาะในแต่ละด้านหรือแต่ละพื้นที่ประกอบด้วย (1) ความเร็วของของไหลปฐุมภูมิ (น้ำ) ที่ออกจากหัวฉีดเข้าสู่ห้องผสมกำหนดเป็น Velocity inlet , (2) ทางออกของของไหลปฐุมภูมิกำหนดเป็น Pressure Outlet และ (3) พื้นผิวอื่นๆกำหนดเป็น wall ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของชุดหัวฉีด

4.1.4 การกำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้น (Initial Condition)

การสร้างแบบจำลองในการทดลองนี้สร้างขึ้นในระบบพิกัดฉากโดยที่แกนกลางของห้องผสมอยู่ในแนวแกนตั้ง (y-component) เพราะฉะนั้นการสร้างแบบจำลองต้องนำค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) มาพิจารณาด้วย ของไหลปฐมภูมิที่ใช้ในการทดลองคือน้ำซึ่งมีความหนาแน่น 998.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนืด 0.001003 กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีความดันและอุณหภูมิภายนอกพิจารณาที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) และอุณหภูมิห้อง (25 °C) ที่สภาวะคงตัว (Steady State)

4.1.5 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร (Variable Condition) และสภาวะการแก้ปัญหา

โปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS FLUENT) เป็นการนำรูปแบบของชุดหัวฉีดที่มีการสร้างขอบเขตย่อยและกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจากโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) มาจำลอง ซึ่งมีการสร้างแบบจำลองของชุดหัวฉีดหลายค่าแตกต่างกันออกไป การพิจารณาการสร้างแบบจำลองเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในสภาวะคงตัว (Steady State) มีผนังที่ไม่เคลื่อนที่และไม่สิ้นไกลจึงใช้รูปแบบการคำนวณแบบ no-slip function ซึ่งรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน ใช้หลักการคำนวณในรูปแบบของ Renormalization-group (RNG) k - ϵ model ซึ่งเป็นรูปแบบจำลองที่มีความแม่นยำในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่กว้างโดยใช้เทคนิคทางสถิติอย่างแม่นยำ และมีความคล้ายคลึงกับ Standard k - ϵ model ซึ่งเป็นโมเดลมาตรฐานที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง

สำหรับการคำนวณผลเฉลย จะกำหนดเป็นวิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE(semi-implicit method for pressure link equation) เป็นวิธีที่ใช้หลักการเดาค่าความดัน แล้วนำไปคำนวณหาค่าความเร็วและปริมาณสเกลาร์อื่นๆ จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ และตรวจสอบโดยสมการอนุรักษ์มวล หากค่าทั้งหมดมีความสอดคล้องกับสมการควบคุมแสดงว่าค่าความดันที่เดามีความถูกต้อง หากไม่สอดคล้องจะเดาค่าความดันใหม่บนฐานของค่าความดัน และความเร็วที่คำนวณได้ และวิธีผลต่างอันดับหนึ่ง (First order upwind) มีคุณสมบัติจำกัดขอบสูง ทำให้ผลเฉลยไม่กระเพื่อม (oscillatory solution) เป็นข้อดีทั้งในเสถียรภาพการคำนวณ และการรู้เข้าของผลเฉลย แต่ในขณะเดียวกัน ทำให้เกิดพฤติกรรมการแพร่เชิงตัวเลข (numerical diffusive) เนื่องจากลักษณะผลเฉลยเสมือนถูกถ่วงน้ำหนักจากค่าที่ตำแหน่งต้นลมเป็นหลัก สำหรับกรณีที่มีการไหลซับซ้อน แบบแผนวิธีนี้จะทำให้คุณสมบัติความเข้ากันได้ลดลง

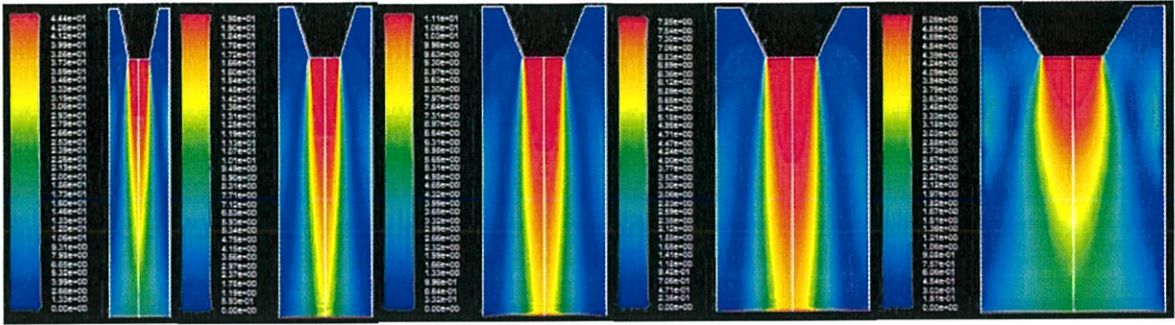
4.1.6 กรณีศึกษา

กรณีศึกษาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของของไหลปฐมภูมิที่ทางเข้า เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด (D_j) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องผสม (D_c) ความยาวของห้องผสม (L_c) ดังนี้

- กำหนดอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิที่ทางเข้าเป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด (D_j) เป็น 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องผสม (D_c) เป็น 2, 2.5, 3, 4 และ 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ($2D_j, 2.5D_j, 3D_j, 4D_j, 5D_j$)
- ขนาดความยาวของห้องผสมนับจากปลายหัวฉีด (L_c) เป็น 1, 2 และ 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องผสม (D_j)

การศึกษาการสร้างแบบจำลองการไหลของของไหลโดยใช้โปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS FLUENT) และการศึกษาแบบการไหลของชุดหัวฉีดที่มีการสร้างแบบจำลองการไหลสองชนิดที่ตัวแปรค่าต่างๆแสดงได้ดังรูป 4.5

- $Q = 2 \text{ m}^3/\text{hr}$, $D_j = 4, 6, 8, 10$ และ 12 mm , $D_c = 3D_j$, $L_c = 60 \text{ mm}$



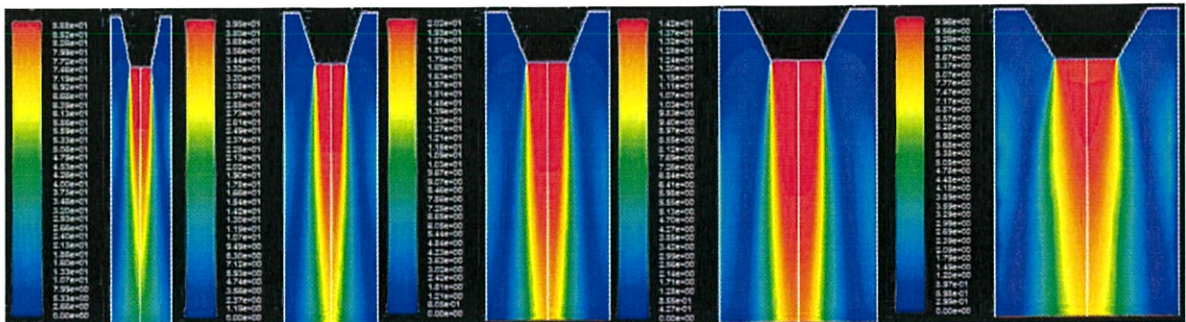
(ก) แผนผังความเร็ว



(ข) แผนผังความดัน

รูปที่ 4.5 แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและที่ D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ

- $Q = 4 \text{ m}^3/\text{hr}$, $D_j = 4, 6, 8, 10$ และ 12 mm , $D_c = 3D_j \text{ mm}$, $L_c = 60 \text{ mm}$



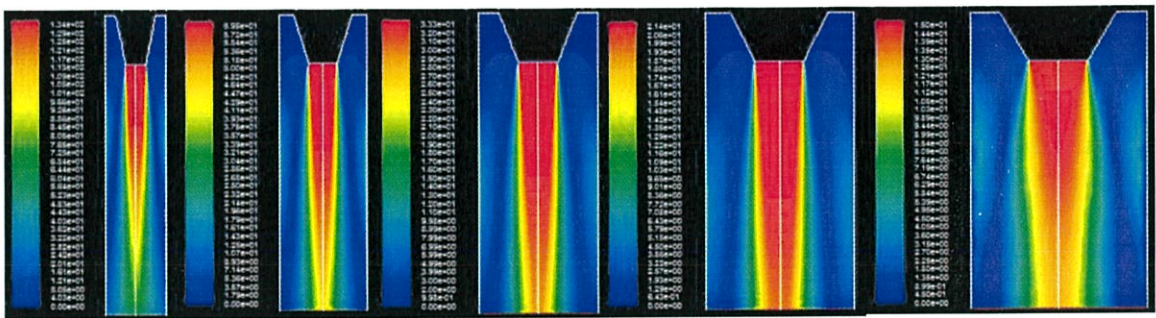
(ก) แผนผังความเร็ว



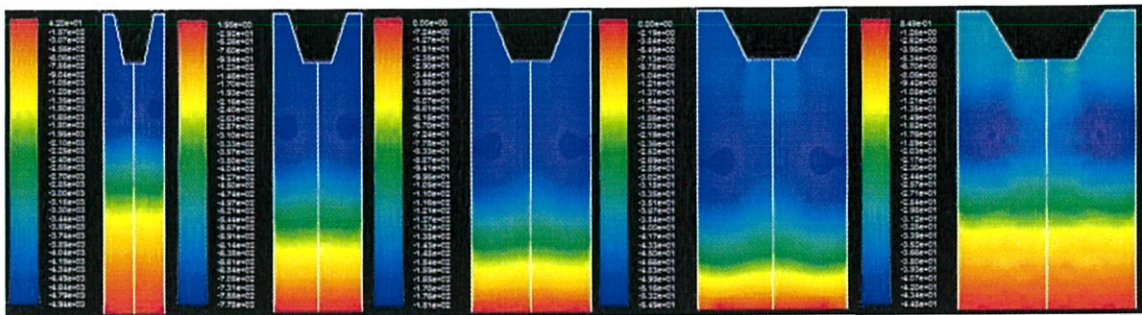
(ข) แผนผังความดัน

รูปที่ 4.6 แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและที่ D_j เท่ากับ 4,6,8,10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ

- $Q = 6 \text{ m}^3/\text{hr}$, $D_j = 4,6,8,10$ และ 12 mm , $D_c = 3D_j$, $L_c = 60 \text{ mm}$

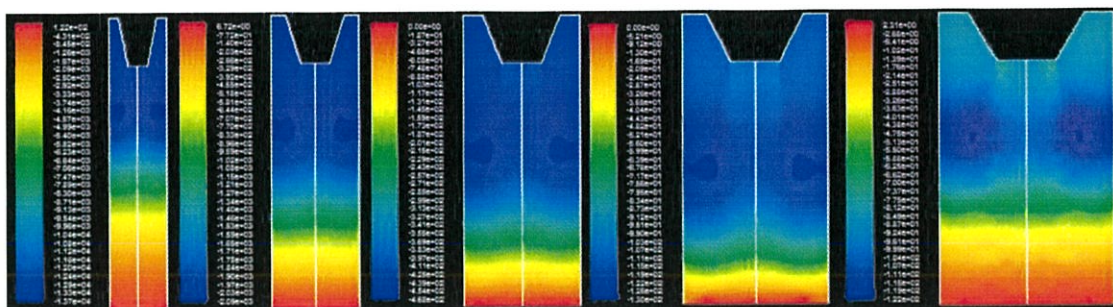


(ก) แผนผังความเร็ว



(ข) แผนผังความดัน

รูปที่ 4.7 แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและขนาด D_j เท่ากับ 4,6,8,10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ



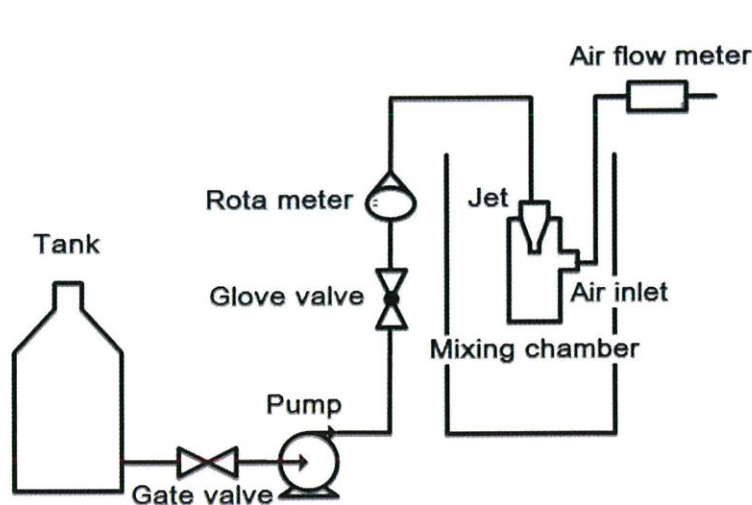
(ข) แผนผังความดัน

รูปที่ 4.9 แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและขนาด D; เท่ากับ 4,6,8,10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ

4.2 ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

การออกแบบเจ็ทเหนี่ยวนำอากาศได้ออกแบบตามวิธีการออกแบบ โดยแยกส่วนของการออกแบบชุดทดลองหัวฉีดเหนี่ยวนำออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ [20] คือ ขั้นตอนการออกแบบความยาวห้องผสม และขั้นตอนการออกแบบขนาดของทางเข้าอากาศ ชุดทดลองหัวฉีดเหนี่ยวนำนี้ถูกติดตั้งที่ความสูงเดียวกันทุกครั้งที่เปลี่ยนค่าการทดลอง โดย อุปกรณ์ทุกชิ้นถูกติดตั้งให้ไม่มีการเคลื่อนไหว และกำหนดจุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ตายตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.10



(ก)

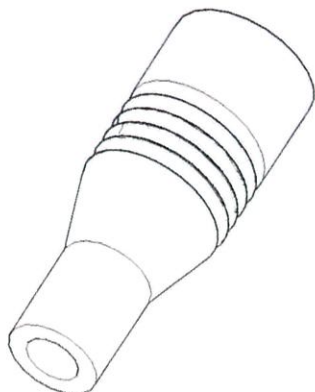


(ข)

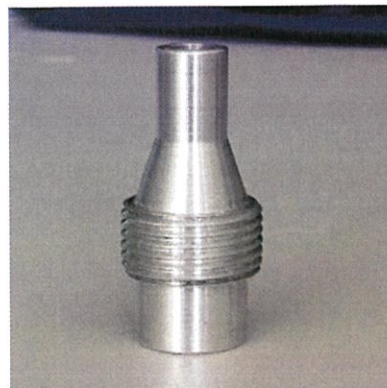
รูปที่ 4.10 (ก) แผนผังโครงสร้างชุดทดลอง, (ข) การติดตั้งชุดทดลองของจริง

4.2.1.1 หัวฉีดเหนียวนำอากาศ (Jet Head)

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดเหนียวนำอากาศที่นำมาใช้ในการทดลอง ถูกออกแบบให้มีขนาดเดียวที่ 6 มิลลิเมตร การออกแบบขนาดและสัดส่วนจะเป็นไปตามหลักมาตรฐาน ASME (American Society Mechanical Engineering) ดังแสดงในรูปที่ 4.11



(ก)

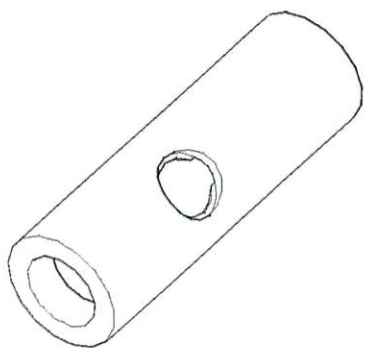


(ข)

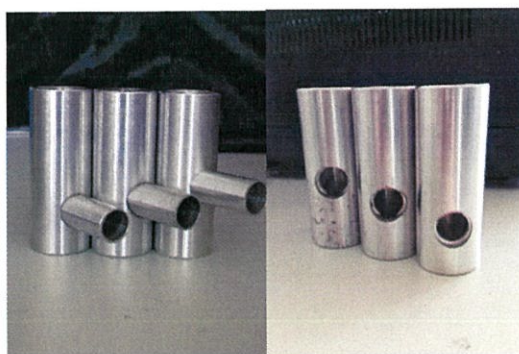
รูปที่ 4.11 (ก) แบบของหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวฉีดเจ็ทที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1.2 ห้องผสม (Mixing Chamber)

ห้องผสมที่ใช้ในโครงงานนี้จะมีทั้งหมด 6 แบบ ซึ่งการออกแบบจะเปลี่ยนแปลงระยะ และขนาดของทางเข้าอากาศอัตราส่วนที่เหมาะสมของความยาวห้องผสมต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดเหนียวนำ (L_c/D_j) มีค่าระหว่าง 4 ถึง 9 ซึ่งอัตราส่วนของห้องผสมที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 6 โดยมี ความยาวจากปลายหัวฉีดถึงทางออก 36 มิลลิเมตร โครงงานนี้ได้ออกแบบให้ทางเข้าอากาศอยู่ทางด้านข้างของห้องผสมและอยู่ห่างจากปลายหัวฉีด (เทียบจากจุดศูนย์กลางของทางเข้าอากาศ) เป็นระยะทาง 1, 2 และ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ($1D_j$, $2D_j$, $3D_j$) ซึ่งจะเป็น 6, 12 และ 18 มิลลิเมตร ตามลำดับโดยให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอากาศเป็น $2D_j$ (12 มิลลิเมตร) แสดงดังรูปที่ 4.12



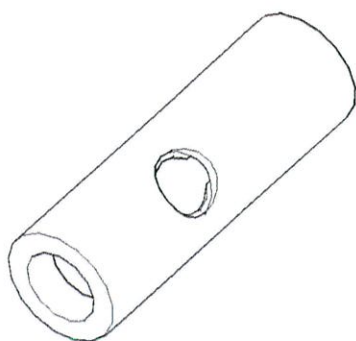
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) แบบของห้องผสมที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ห้องผสมขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

หลังจากทำการทดลองของขนาดห้องผสมที่ระยะ 6, 12 และ 18 มิลลิเมตร เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมหนึ่งตำแหน่งและนำตำแหน่งที่ได้มาศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศที่เหมาะสมโดยทำการสร้างห้องผสมที่มีขนาดรูอากาศเท่ากับ $1D_j$, $1.5D_j$, $2D_j$ และ $2.5D_j$ (6, 9, 12 และ 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ) ในที่นี้ขนาด $2D_j$ ทำการสร้างก่อนหน้านี้ดังนั้นจึงมีการสร้างห้องผสมเพิ่มอีกสามขนาดคือ $1D_j$, $1.5D_j$ และ $2.5D_j$ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



(ก)

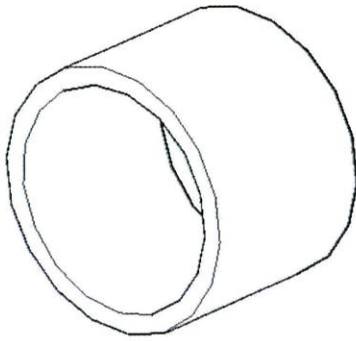


(ข)

รูปที่ 4.13 (ก) แบบของห้องผสมที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ห้องผสมขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1.3 หัวต่อท่ออากาศ (Air Inlet)

หัวต่อท่ออากาศเป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างทางเข้าอากาศกับสายยาง โดยทำหน้าที่ส่งต่อของไหลทุติยภูมิซึ่งก็คืออากาศในโครงการนี้ อากาศจะถูกดูดผ่านหัวต่อนี้ไปผสมกับของไหลปฐมภูมิคือน้ำในห้องผสม ในที่นี้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศจะมีทั้งหมด 4 ขนาด คือ $1D_j$, $1.5D_j$, $2D_j$ และ $2.5D_j$ ซึ่งมีหัวต่อท่ออากาศทั้งหมด 6 ชั้นคือ $1D_j$ 1 ชั้น, $1.5D_j$ 1 ชั้น, $2D_j$ 3 ชั้นและ $2.5D_j$ 1 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 (ก) แบบของรูอากาศที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวต่อท่ออากาศที่ใช้ในการทดลอง

4.2.2 ถังผสม (Mixing Tank)

ถังใสจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สังเกตลักษณะของกระแสเจ็ทที่ออกจากชุดหัวฉีดเหนี่ยวนำ รวมถึงลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้น มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร มีรูระบายน้ำ 6 รู มีมาตรวัดความจุในหน่วยลิตรที่ด้านข้างของถัง ฐานรองยึดติดกับโครงเหล็กที่ใช้รองรับถังด้วยน็อต โดยที่น้ำจะไหลเข้าจากด้านบนซึ่งเปิดออกสู่บรรยากาศของถังผสม และมีการระบายน้ำออกที่รูระบายน้ำด้านข้างที่สูงที่สุดทั้งสองรูเพื่อให้การทดลองอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State)



รูปที่ 4.15 ถังผสม (Mixing-Tank) ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.3 ระบบสูบน้ำ ท่อ และอุปกรณ์ต่างๆ (Water Pump, pipes and Tools)

ประกอบด้วยเครื่องส่งกำลังเพื่อสูบน้ำเข้าไปไหลเวียนในระบบ ท่อพีวีซี วาล์ว ข้อต่อ และสายยาง

4.2.3.1 เครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง (Centrifugal Water Pump, Wizz WCP130) กำลังขับ 1 Hp (745.6 Watt) แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ให้อัตราการไหลสูงสุดได้ 90l/min เหนดสูงสุด 32 เมตร



รูปที่ 4.16 เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลอง

4.2.3.2 วาล์ว(Valve)

วาล์ว เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการไหลของของไหล โดยการทดลองนี้ใช้วาล์ว 2 ชนิด

- Gate Valve

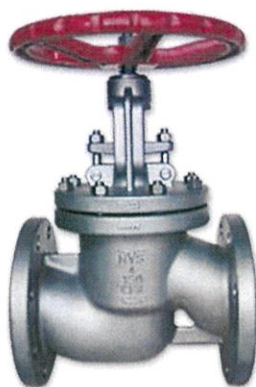
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปิดปิดน้ำที่จะถูกดูดเข้ามาไหลเวียนในระบบโดยปั้มน้ำ ถูกติดตั้งอยู่ระหว่างถังบรรจุน้ำและปั้มน้ำ สามารถป้องกันการไหลกลับของน้ำได้



รูปที่ 4.17 เกทวาล์ว

- Globe Valve

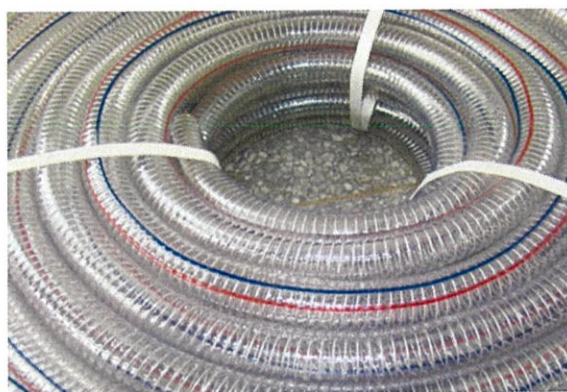
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของของไหลปฐุมภูมิ โดยจะถูกติดตั้งอยู่ก่อนเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 โกลบวาล์ว

4.2.3.3 สายยาง (Rubber Tube)

การทดลองนี้จะใช้สายยาง 2 ชนิด ชนิดแรกคือสายยางขนาดเล็ก เส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{3}{4}$ นิ้ว ใช้เพื่อเชื่อมต่อท่อพีวีซีกับหัวฉีดทั้งด้านทางเข้าปฐุมภูมิและทุติยภูมิ ชนิดที่สองคือสายยางขนาดใหญ่ ถูกต่อเข้ากับรูระบายน้ำที่สูงที่สุดของถังใสทั้งสองด้านเพื่อระบายน้ำออกสู่ถังบรรจุน้ำทำให้ระดับน้ำในการทดลองคงที่



รูปที่ 4.19 สายยางขนาดใหญ่

4.2.3.4 ชุดท่อพีวีซี (PVC pipes and joints)

ท่อพีวีซีที่บที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้ในการส่งผ่านน้ำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{3}{4}$ นิ้ว (19.05 เซนติเมตร) มีสีฟ้า เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ 90° 3 ชั้น และข้อเกลียวด้วยกาวเชื่อม



รูปที่ 4.20 ชุดท่อพีวีซี

4.2.4 เครื่องมือวัด (Measuring Equipment)

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำเข้าไปในระบบผ่านทางท่อพีวีซีใส และเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำที่ถูกสูบผ่านเครื่องส่งกำลังเข้าสู่ระบบ

4.2.4.1 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer)

เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นของบริษัท KIMO INSTRUMENT ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งใช้วัดความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 0.15-30 m/s ความละเอียดในการวัด 0.01 m/s ความแม่นยำในการวัด $\pm 3\%$ ทำการสอบเทียบ(Calibration)มาจากโรงงาน



รูปที่ 4.21 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer)

4.2.4.2 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Rota Meter)

เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในการทดลองใช้ของบริษัท Nitto Instruments Model Z-500, Series Z-5032 ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำบริเวณก่อนท่อทางเข้าปฐภูมิขณะทำการทดลอง โดยสามารถวัดอัตราการไหลของน้ำอยู่ในช่วง 10-65 LPM ที่ความดันสูงสุด 10 bar ช่วงอุณหภูมิจำกัดที่ 60 °C และมีค่าความแม่นยำ $\pm 5\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ

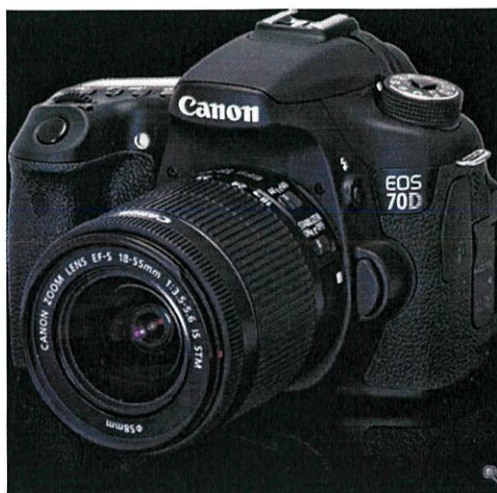
4.2.4.3 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Clamp on Power meter)

เป็นอุปกรณ์ในการวัดกำลังไฟฟ้า สามารถวัดค่าของ แอมป์ (Amp), โวลต์ (Volt), เพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor) และกำลัง (Power)



รูปที่ 4.23 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

4.2.5 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ (Canon EOS 7D)



รูปที่ 4.24 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ

4.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองชุดหัวฉีดนั้นต้องมีการติดตั้งชุดหัวฉีด ปรับอัตราการไหลต่างๆ รวมถึงการที่ทำให้น้ำในถังอยู่ในสภาวะคงที่นั้น ทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. ติดตั้งชุดหัวฉีดเหนี่ยวนำในถังผสมที่ตำแหน่ง 75 เซนติเมตร จากกันถึงแนวตั้งและอุณหภูมิในการติดตั้งอยู่ที่ 25 °C
2. บรรจุน้ำในถังผสมจนกระทั่งมีปริมาตร 0.287 ลูกบาศก์เมตร หรือที่ความสูงของระดับน้ำอยู่ที่ 55 เซนติเมตร จากกันถึงผสม และเปิดรูระบายน้ำเพื่อให้ระดับน้ำคงที่ (steady state)
3. ปรับอัตราการไหลของน้ำไปยังค่าที่ต้องการ เริ่มที่ 20.1 ลิตรต่อนาที
4. ต่อสายยางถ่ายน้ำสู่ถังเก็บ รอจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว
5. เริ่มทำการวัดค่าความเร็วของอากาศ โดยนับเอาค่าที่แสดงบนจอเครื่องวัดนานที่สุด และบ่อยครั้งที่ที่สุด
6. เปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเป็นค่า 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที และทำซ้ำตั้งแต่ 1 ถึง 5
7. เปลี่ยนตำแหน่งของรูอากาศเป็นจำนวนเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ได้แก่ ตำแหน่งของรูอากาศ (L) เป็น 1, 2 และ 3 เท่าของ เส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีด (D) และทำซ้ำตั้งแต่ 1 ถึง 6
8. เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูอากาศเป็นจำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางรูอากาศ (D_a) เป็น 1, 1.5, 2 และ 2.5 เท่า และทำซ้ำตั้งแต่ 1 ถึง 6
9. วัดกำลังของไฟฟ้าที่ใช้ด้วย Clamp-On Power Meter
10. ถ่ายภาพขนาดฟองอากาศทุกอัตราการไหลในข้อ 7 และทุกขนาดหัวฉีดในข้อ 8 และ 9 ด้วยกล้อง Canon EOS 7D เพื่อหาขนาดของฟองอากาศ

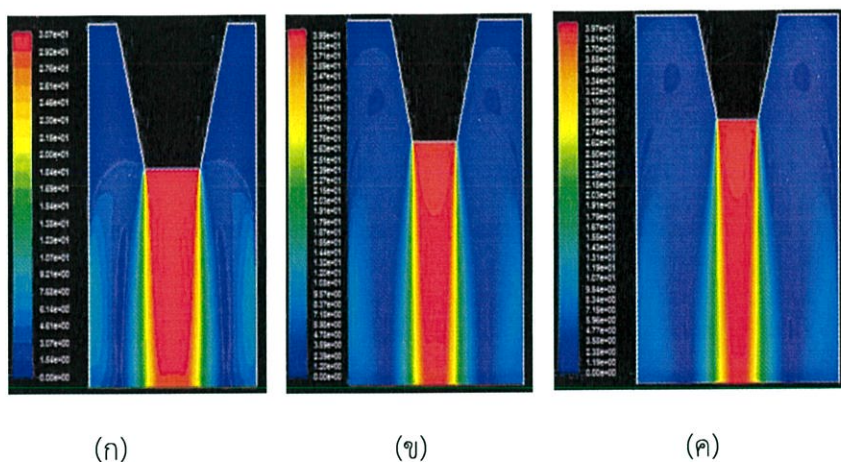
บทที่ 5

ผลการสร้างแบบจำลองและการทดลอง

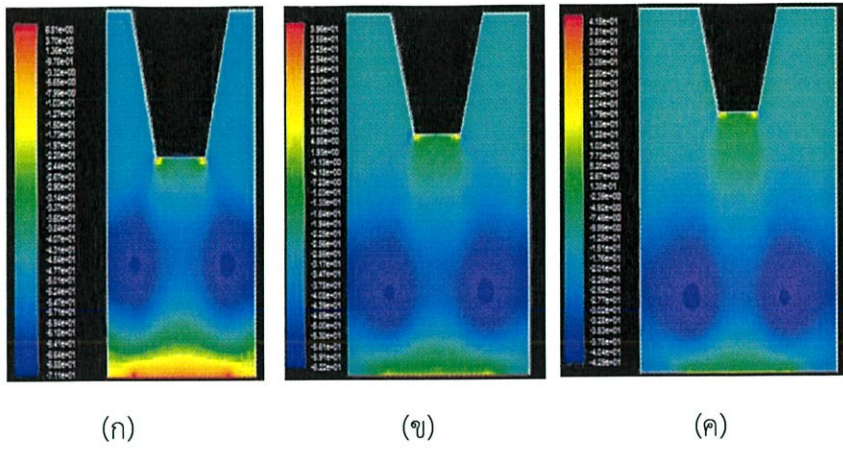
5.1 ผลการสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองทำขึ้นเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องผสม (D_c) และความยาวห้องผสม (L_c) โดยกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด (D_j) เป็น 6 มิลลิเมตรในทุกการสร้างแบบจำลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องผสม (D_c) กำหนดให้มีค่าเป็น $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และที่ความยาวของห้องผสม (L_c) มีค่าเป็น $3D_j$, $6D_j$ และ $9D_j$ ที่อัตราการไหล 20 ลิตรต่อนาที ผลการสร้างแบบจำลองสามารถแสดงเป็นแผนผังความเร็ว และแผนผังความดันที่ขนาดต่างๆ เพื่อดูพฤติกรรมการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นในการสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรมฟลูเอนท์ (Fluent)

ผลการสร้างแบบจำลองที่มีขนาดของความยาวของห้องผสม (L_c) เท่ากับ $3D_j$ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องผสม (D_c) มีค่าเท่ากับ $3D_j$, $4D_j$ และ $5D_j$ แสดงดังรูปที่ 5.1 และ 5.2

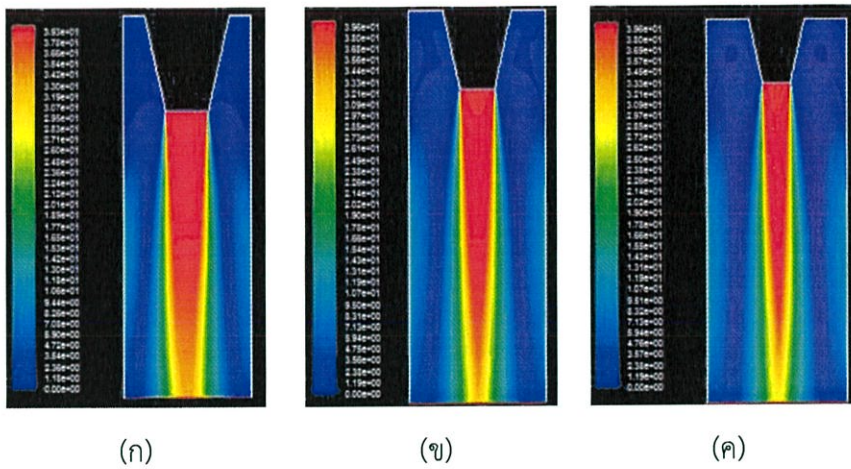


รูปที่ 5.1 แผนผังความเร็วเมื่อ L_c เท่ากับ $3D_j$ ที่ (ก) $D_c = 3D_j$, (ข) $D_c = 4D_j$ และ (ค) $D_c = 5D_j$

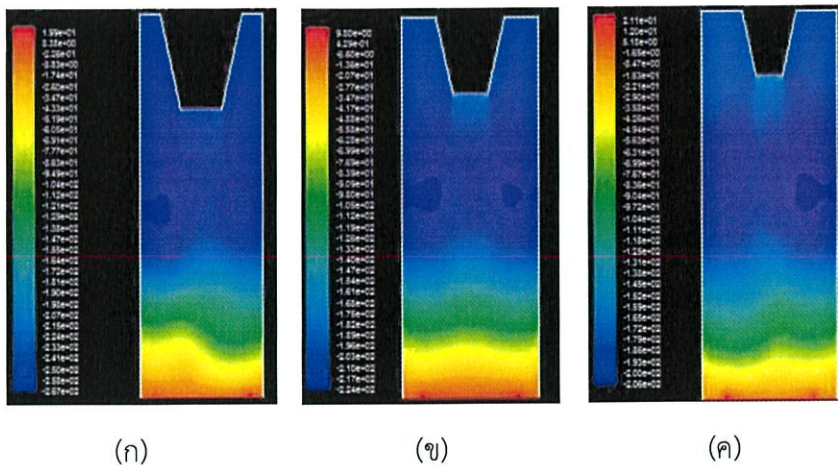


รูปที่ 5.2 แผนผังความดันเมื่อ L_c เท่ากับ $3D_j$ ที่ (ก) $D_c = 3D_j$, (ข) $D_c = 4D_j$ และ (ค) $D_c = 5D_j$

ผลการสร้างแบบจำลองที่มีขนาดของความยาวของห้องผสม (L_c) เท่ากับ $6D_j$ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของห้องผสม (D_c) มีค่าเท่ากับ $3D_j$, $4D_j$ และ $5D_j$ แสดงดังรูปที่ 5.3 และ 5.4

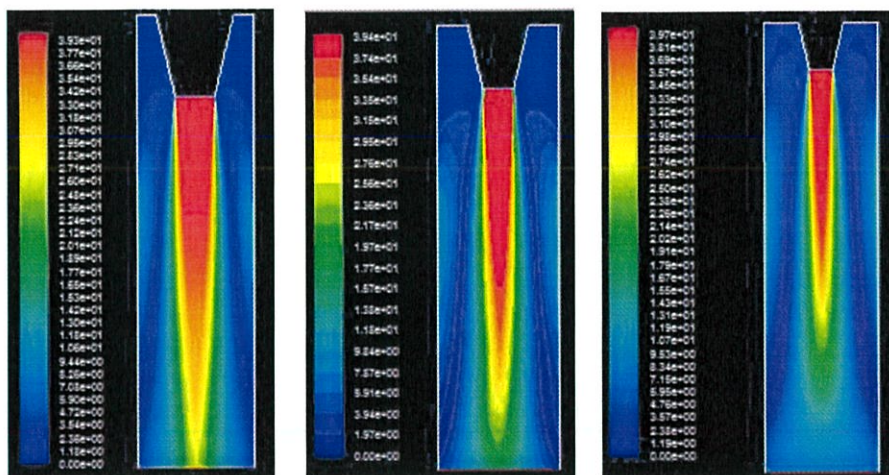


รูปที่ 5.3 แผนผังความเร็วเมื่อ L_c เท่ากับ $6D_j$ ที่ (ก) $D_c = 3D_j$, (ข) $D_c = 4D_j$ และ (ค) $D_c = 5D_j$



รูปที่ 5.4 แผนผังความดันเมื่อ L_c เท่ากับ $6D_j$ ที่ (ก) $D_c = 3D_j$, (ข) $D_c = 4D_j$ และ (ค) $D_c = 5D_j$

ผลการสร้างแบบจำลองที่มีขนาดของความยาวของห้องผสม (L_c) เท่ากับ $6D_j$ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของห้องผสม (D_c) มีค่าเท่ากับ $3D_j$, $4D_j$ และ $5D_j$ แสดงดังรูปที่ 5.5 และ 5.6

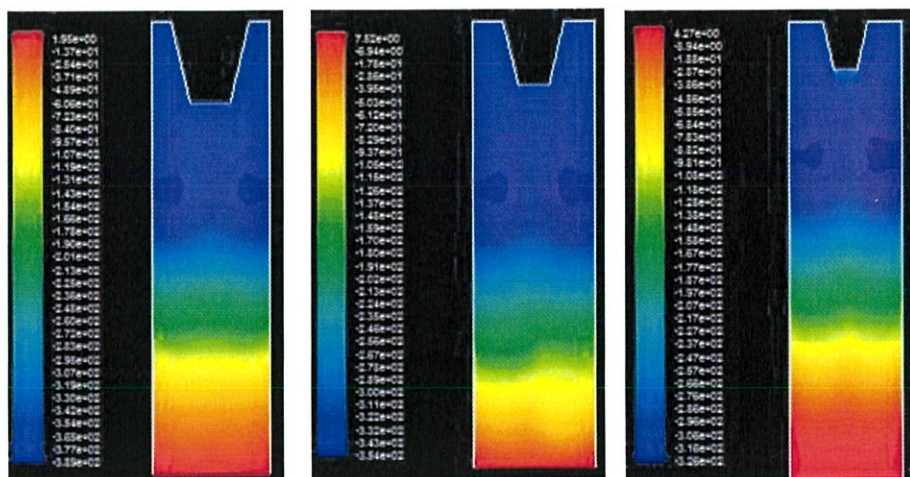


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.5 แผนผังความเร็วเมื่อ L_c เท่ากับ $9D_j$ ที่ (ก) $D_c = 3D_j$, (ข) $D_c = 4D_j$ และ (ค) $D_c = 5D_j$



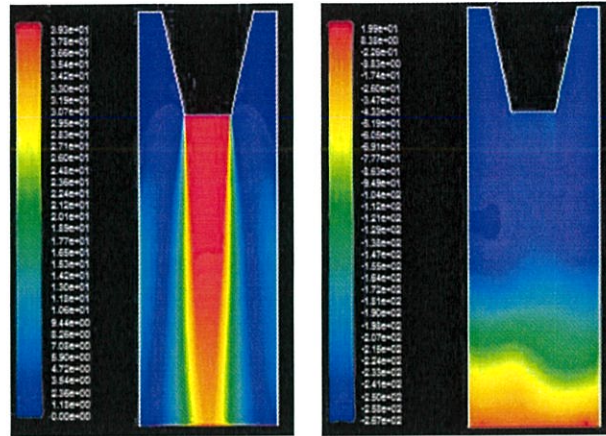
(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 5.6 แผนผังความดันเมื่อ L_c เท่ากับ $9D_j$ ที่ (ก) $D_c = 3D_j$, (ข) $D_c = 4D_j$ และ (ค) $D_c = 5D_j$

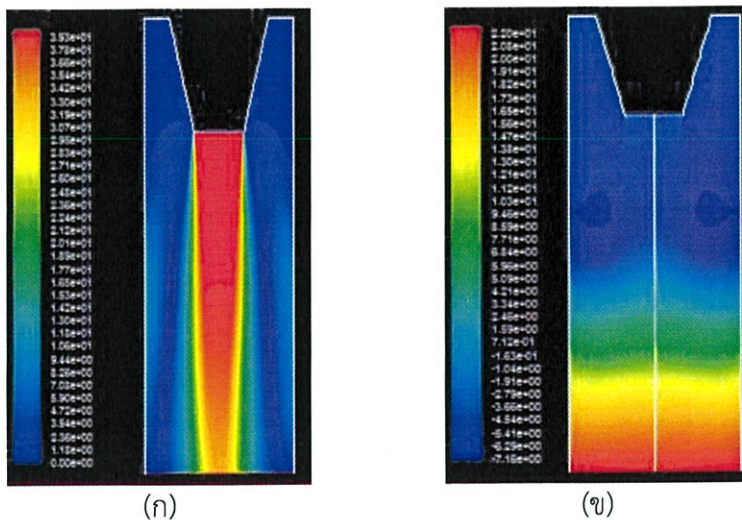
อัตราส่วนเชิงมิติที่เหมาะสมต่อการนำไปคำนวณต่อของเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวห้องผสม คือที่ $D_c = 3D_j$ และ $L_c = 6D_j$ เพราะเป็นช่วงขนาดที่มีความสมบูรณ์ของแกนกลาง (Core) และการกระจายตัวของเจ็ทโดยไม่เกิดการชนผนัง ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แผนผังความเร็ว (ซ้าย) และแผนผังความดัน (ขวา) ที่ D_c เท่ากับ $3D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$

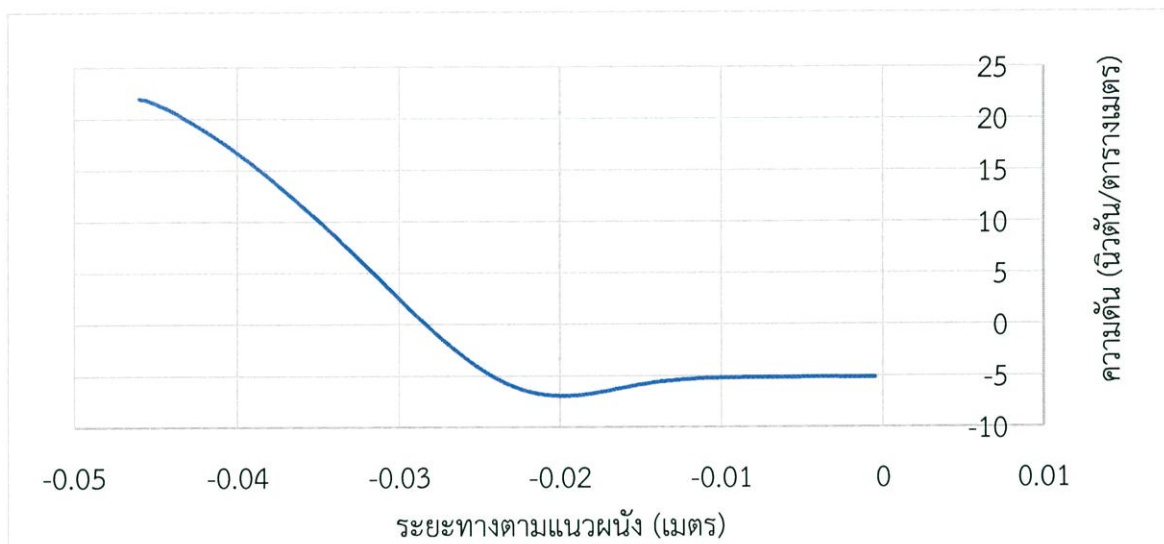
เมื่อได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวที่เหมาะสมของห้องผสมแล้ว การสร้างแบบจำลองในขั้นต่อไปถูกสร้างขึ้นเพื่อพิจารณาดำแหน่งของรูอากาศ (L_a) โดยกำหนดให้มีอัตราการไหลของน้ำทั้งหมด 4 ค่า คือ 20.10, 18.67, 17.24, 15.81 ลิตรต่อนาที ตำแหน่งที่เหมาะสมของรูอากาศสามารถวิเคราะห์ได้จากแผนผังความดัน ณ บริเวณที่มีความดันต่ำที่สุด

เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20.10 ลิตรต่อนาที แผนผังความดันและแผนผังความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 5.8

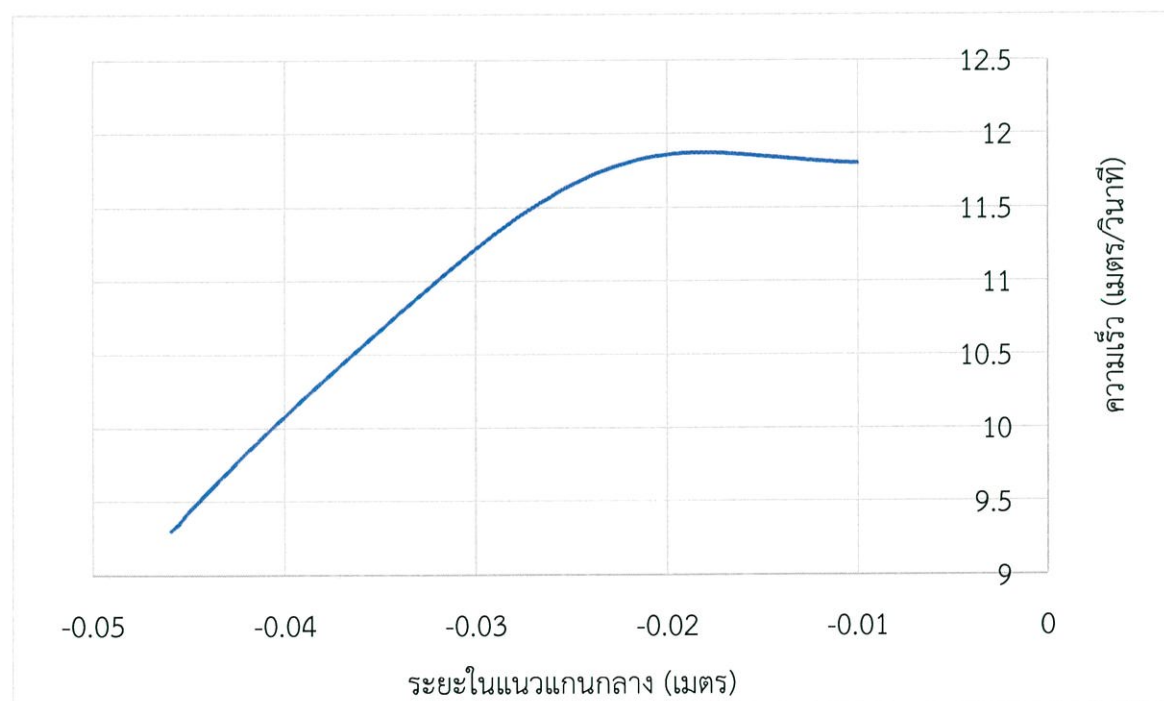


รูปที่ 5.8 (ก) แผนผังความเร็วและ (ข) แผนผังความดัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 20.10 ลิตรต่อนาที

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวผนังของห้องผสมและความเร็วเจ็ทที่แกนกลางต่อระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของน้ำเป็น 20.10 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ

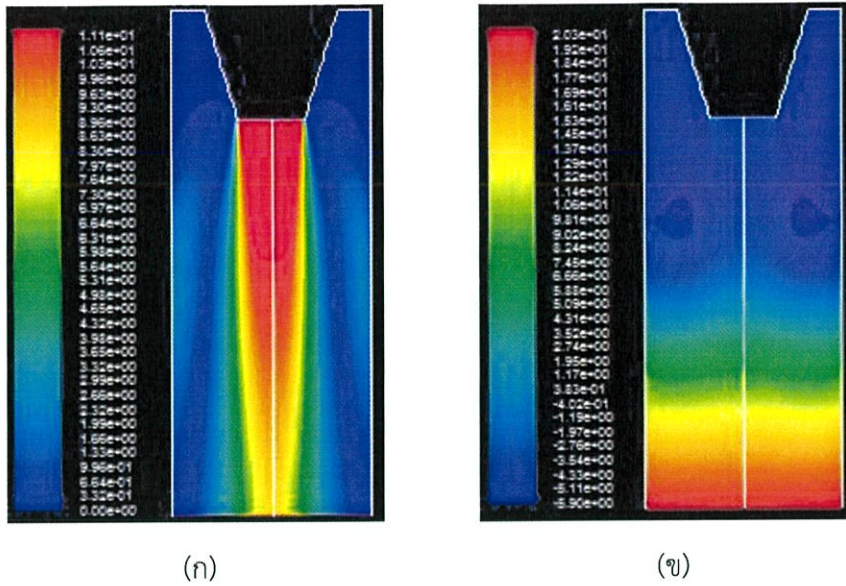


รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางตามแนวผนังเมื่ออัตราการไหลเป็น 20.10 ลิตรต่อนาที



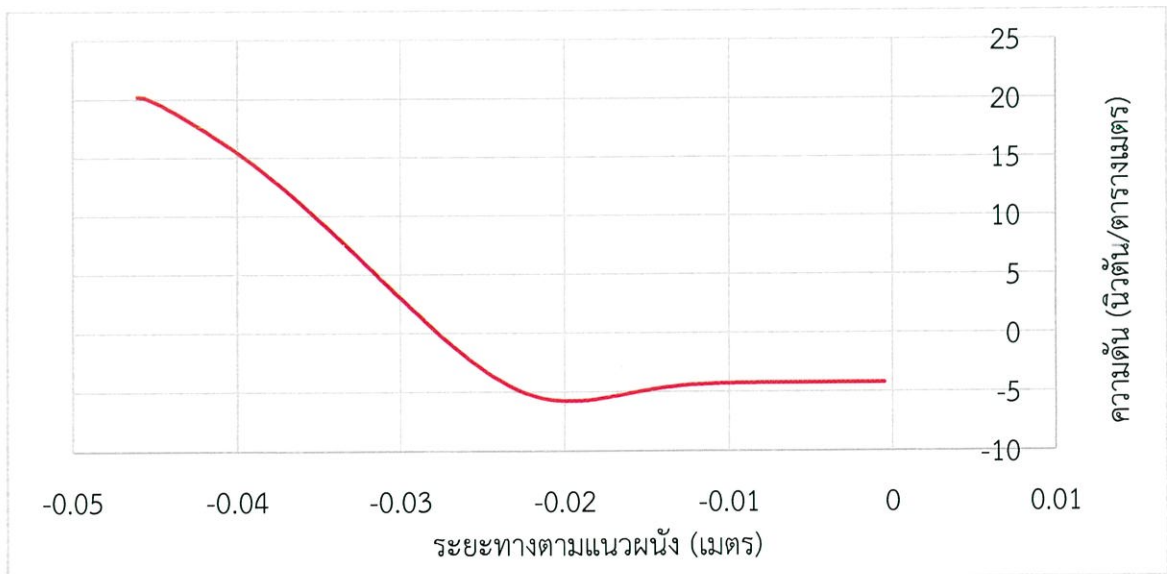
รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลเป็น 20.10 ลิตรต่อนาที

เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 18.6 ลิตรต่อนาที แผนผังความดันและแผนผังความเร็วแสดงได้ ดังรูปที่ 5.11

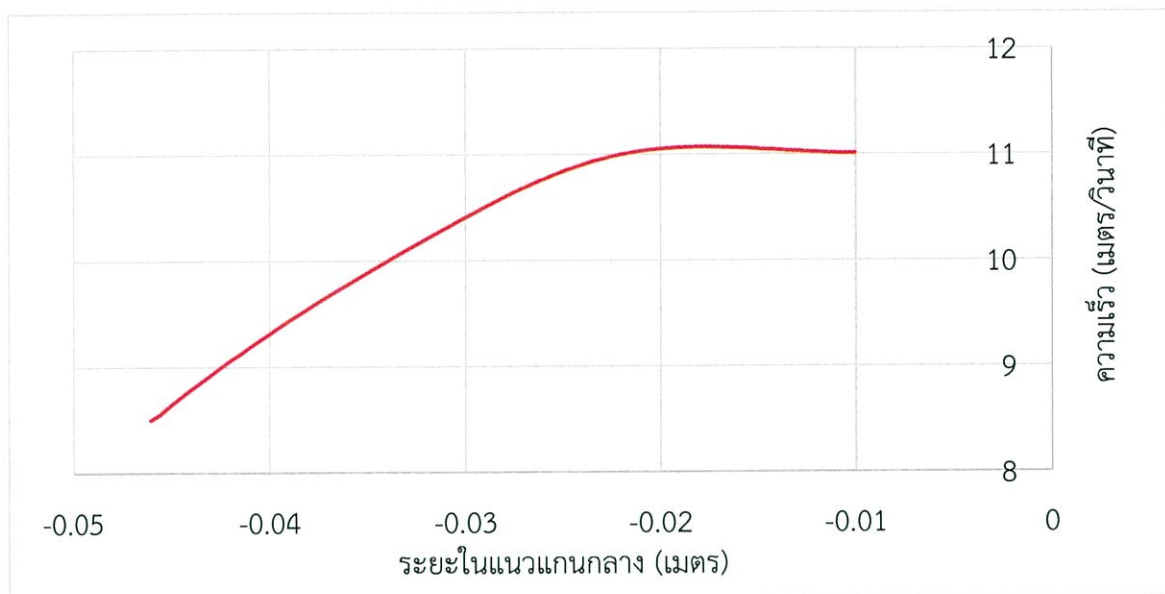


รูปที่ 5.11 (ก) แผนผังความเร็วและ (ข) แผนผังความดัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 18.67 ลิตรต่อนาที

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวผนังของห้องผสมและความเร็วเจ็ทที่แกนกลางต่อระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของน้ำเป็น 18.67 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ

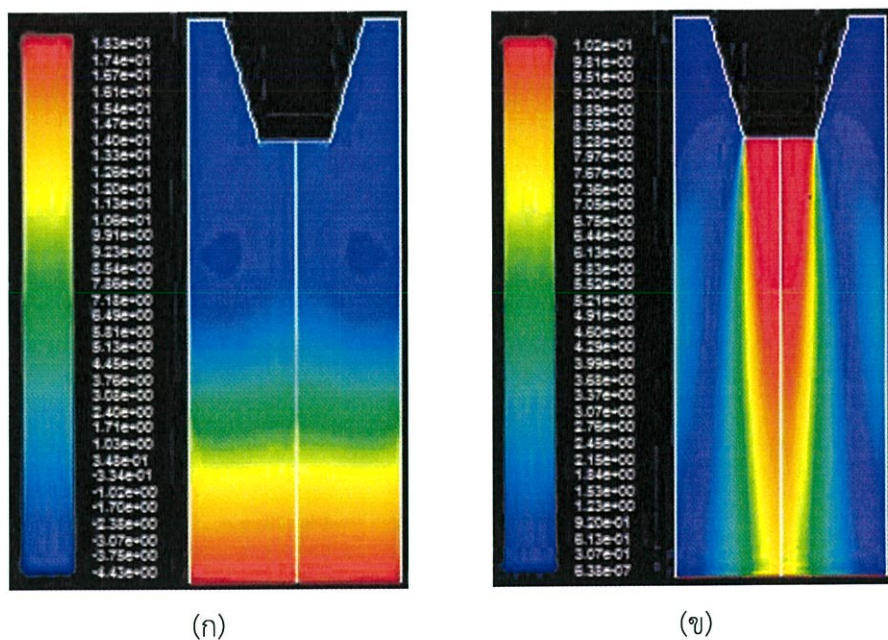


รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางตามแนวผนังเมื่ออัตราการไหลเป็น 18.67 ลิตรต่อนาที



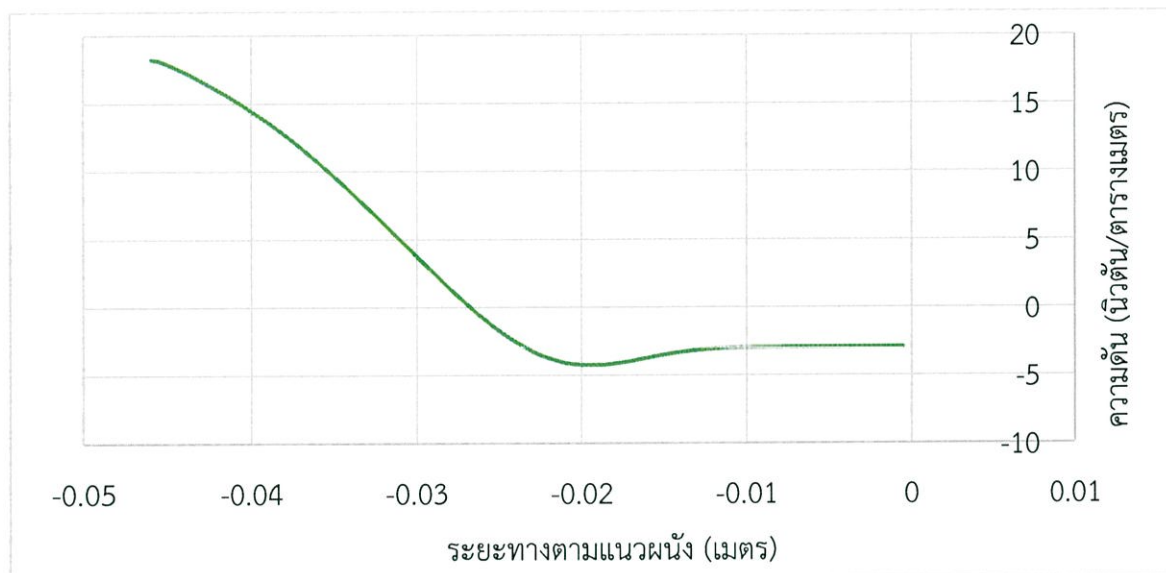
รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลเป็น 18.67 ลิตรต่อนาที

เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 17.24 ลิตรต่อนาที แผนผังความดันและแผนผังความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 5.14

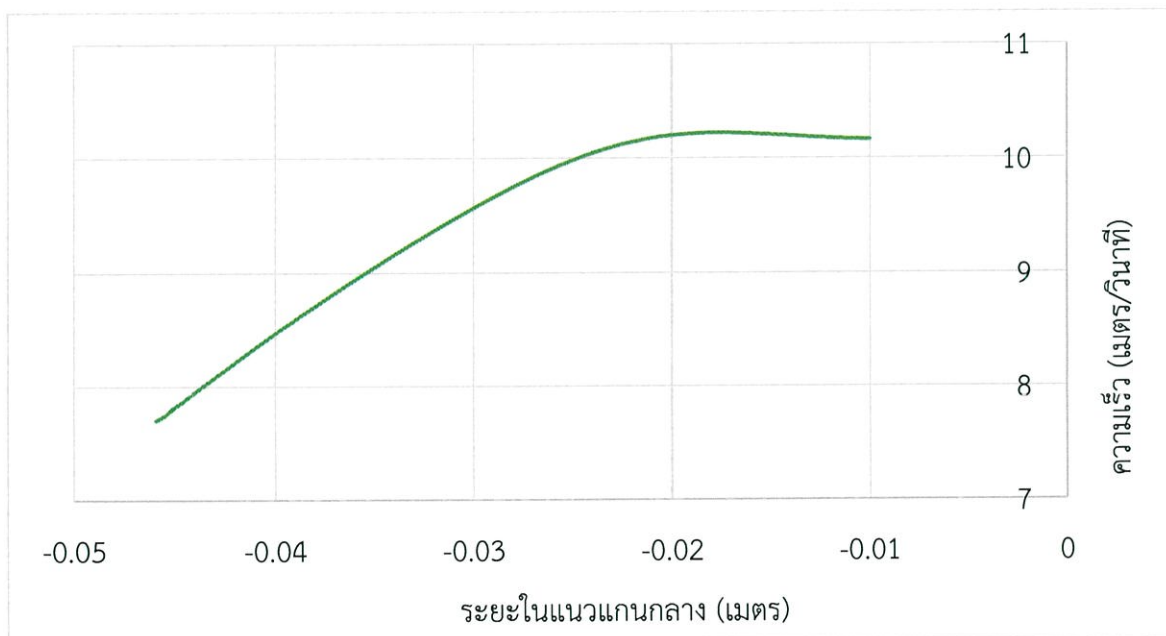


รูปที่ 5.14 (ก) แผนผังความเร็วและ (ข) แผนผังความดัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 17.24 ลิตรต่อนาที

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวมุขของห้องผสมและความเร็วเจ็ทที่แกนกลางต่อระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของน้ำเป็น 17.24 ลิตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ

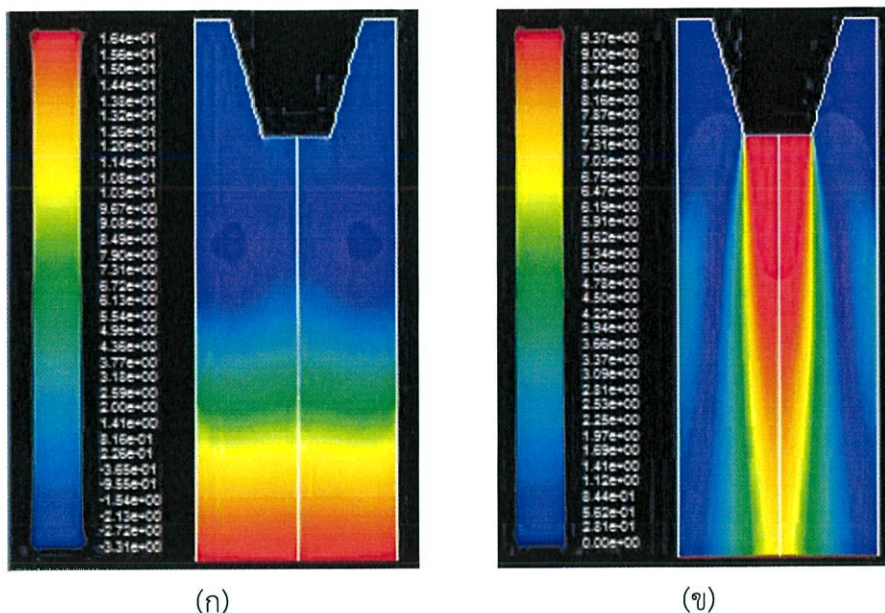


รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางตามแนวมุขเมื่ออัตราการไหลเป็น 17.24 ลิตรต่อวินาที



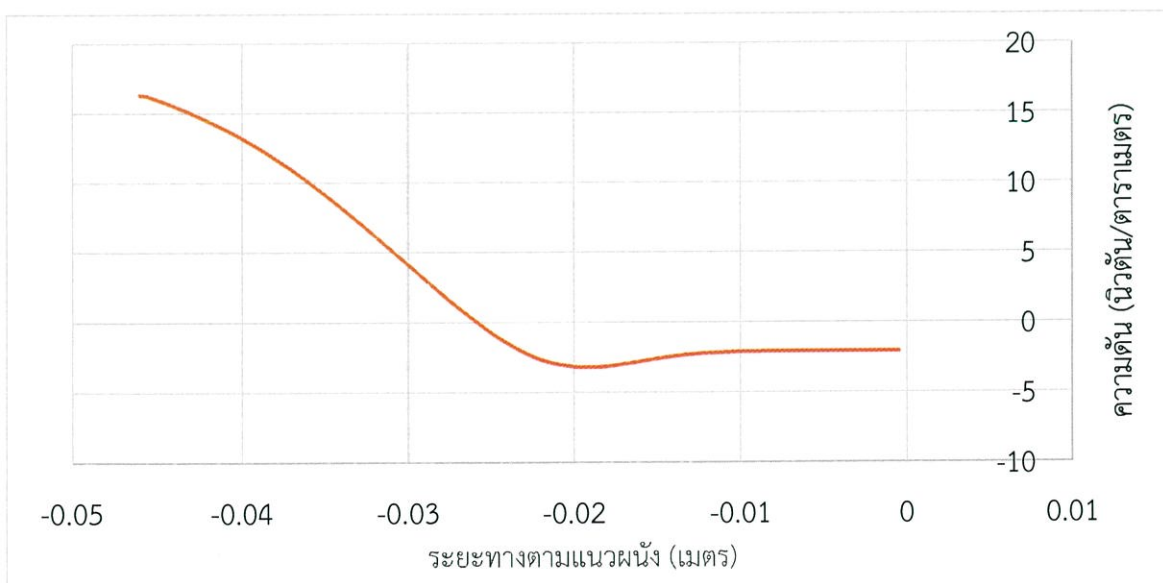
รูปที่ 5.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลเป็น 17.24 ลิตรต่อวินาที

เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 15.81 ลิตรต่อนาที แผนผังความดันและแผนผังความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 5.17

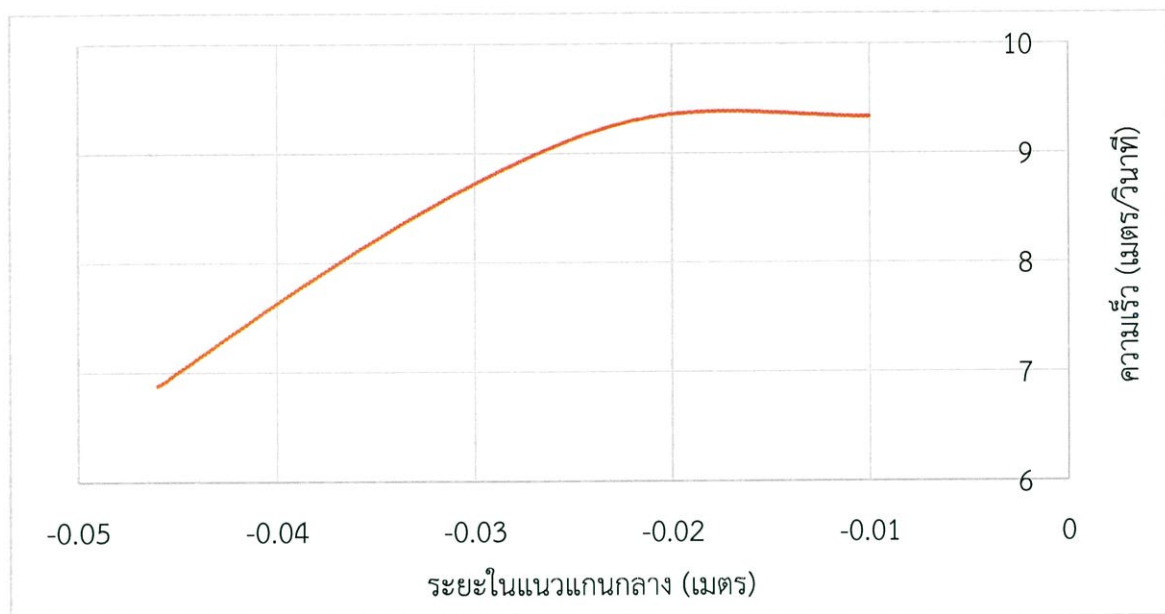


รูปที่ 5.17 (ก) แผนผังความเร็วและ (ข) แผนผังความดัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 15.81 ลิตรต่อนาที

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวผนังของห้องผสมและความเร็วเจ็ทที่แกนกลางต่อระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของน้ำเป็น 15.81 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 5.18 และ 5.19 ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลเป็น 15.81 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลเป็น 15.81 ลิตรต่อนาที

ตำแหน่งที่เหมาะสมของรูอากาศ (L_a) สามารถพิจารณาได้จากกราฟของความดันในทุกๆ อัตราการไหล จุดที่มีความดันต่ำที่สุดคือจุดที่มีระยะทางตามแนวผนังเป็น -0.02 เมตร ซึ่งก็คือ 12 มิลลิเมตร ($2D_j$) จากปลายหัวฉีดไม่ว่าในอัตราการไหลเท่าใดก็ตาม ดังนั้น ตำแหน่งของรูอากาศที่เหมาะสมคือ $2D_j$

อัตราการไหลของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการแบร์นูลลี (Bernoulli's Equation) ในแต่ละอัตราการไหลของน้ำ พิจารณาโดยให้จุดที่หนึ่งคือจุดที่มีความดันต่ำที่สุดตามแนวผนัง และจุดที่สองเทียบกับบรรยากาศ ความดัน ณ จุดที่หนึ่งที่ใช้คำนวณในสมการคือความดันที่ต่ำที่สุดที่ได้จากกราฟของอัตราการไหลนั้นๆ ขนาดของรูอากาศ (D_a) กำหนดให้เป็น $2D_j$ ขั้นตอนการคำนวณสามารถทำได้ดังวิธีการต่อไปนี้

จากสมการแบร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

$$\frac{P_1}{\rho_a g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho_a g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\rho_a g} + \frac{v_2^2}{2g} + (z_2 - z_1)$$

$$v_1^2 = 2g \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho_a g} + \frac{v_2^2}{2g} + (z_2 - z_1) \right) \quad (5.1)$$

และจาก

$$Q = Av \quad (5.2)$$

เมื่อนำสมการที่ (2) แทนในสมการที่ (1) ได้

$$\left(\frac{Q_1}{A_1}\right)^2 = 2g \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho_a g} + \frac{v_2^2}{2g} + (z_2 - z_1) \right) \quad (5.3)$$

เมื่อความดันที่จุดสองคือบรรยากาศ และ ความเร็วที่จุดสองมีค่าน้อยมาก ดังนั้น

$$\begin{aligned} \left(\frac{Q_1}{A_1}\right)^2 &= 2g \left(\frac{0 - P_1}{\rho_a g} + \frac{0}{2g} + (z_2 - z_1) \right) \\ Q_1 &= A_1 \sqrt{2g \left(\frac{-P_1}{\rho_a g} + (z_2 - z_1) \right)} \\ Q_{a,sim} &= A_1 \sqrt{2g \left(\frac{-P_1}{\rho_a g} + (z_2 - z_1) \right)} \end{aligned} \quad (5.4)$$

เมื่อพื้นที่หน้าตัดที่จุด 1 คือ

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D_a^2$$

กำหนดให้ $D_a = 2D_j = 12$ มิลลิเมตร จะได้ $A_1 = 0.000113$ ตารางเมตร และ $z_1 = z_2$ ฉะนั้นอัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการจำลองแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{a,sim} = 6.78 \sqrt{\frac{-2P_1}{\rho_a}} \quad (5.5)$$

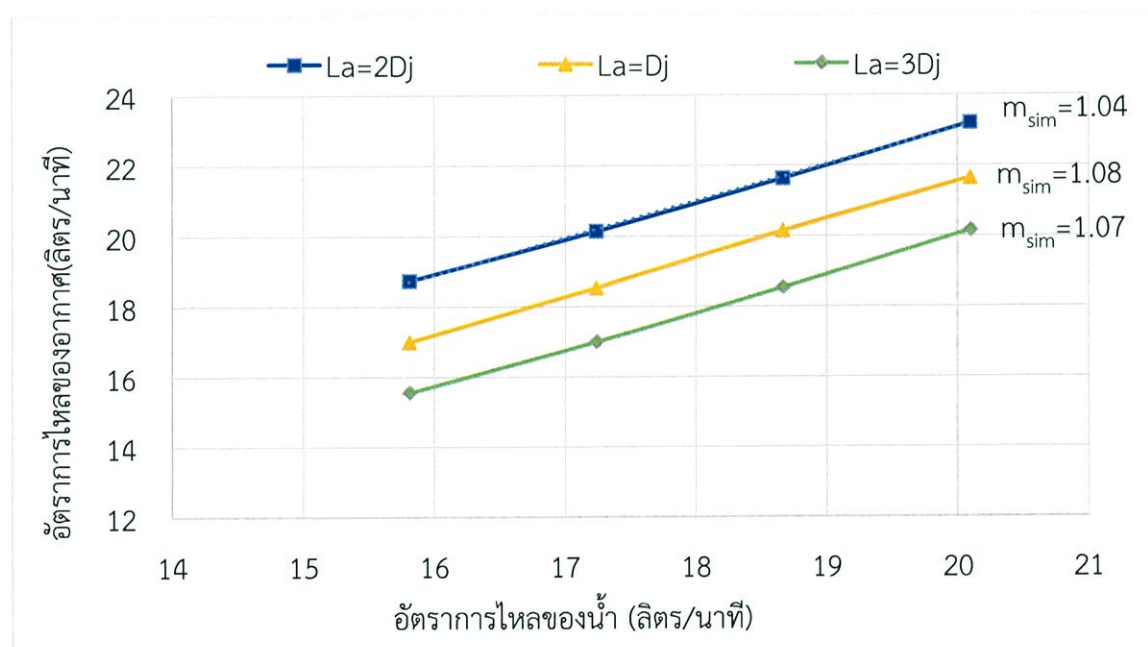
เมื่อ $Q_{a,sim}$ = อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการจำลอง (l/min)
 P_1 = ความดันที่ต่ำที่สุดที่ได้จากกราฟ ณ อัตราการไหลนั้นๆ (N/m²)
 ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ = 1.18 (kg/m³)

อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณ

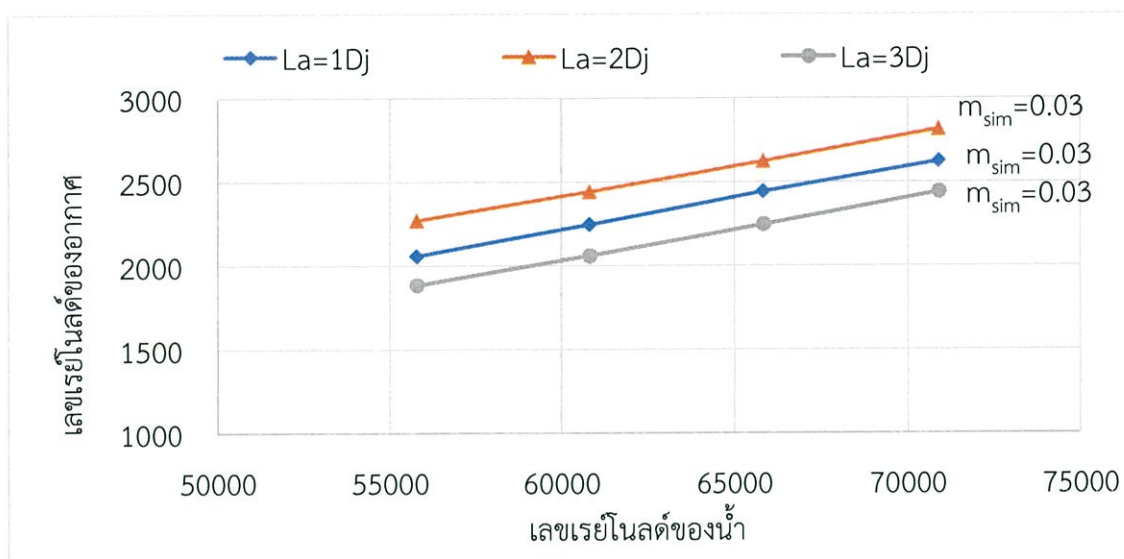
อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	อัตราการไหลของอากาศ (l/min)		
	$L_a = D_j$	$L_a = 2D_j$	$L_a = 3D_j$
20.1	21.63	23.2	20.14
18.67	20.14	21.63	18.53
17.24	18.53	20.14	16.99
15.81	16.99	18.74	15.55

อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ความดันต่ำสุดของอัตราการไหลแต่ละค่า เมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของรูอากาศ (L_a) เป็น $1D_j$, $2D_j$ และ $3D_j$ สามารถเขียนเป็นกราฟเทียบความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำได้ ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและอากาศจากการสร้างแบบจำลอง

ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลสามารถเปลี่ยนเป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติได้คือเลขเรย์โนลด์เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และนำไปใช้งานในสภาวะต่างๆ กราฟความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ของน้ำและอากาศแสดงดังรูปที่ 5.21

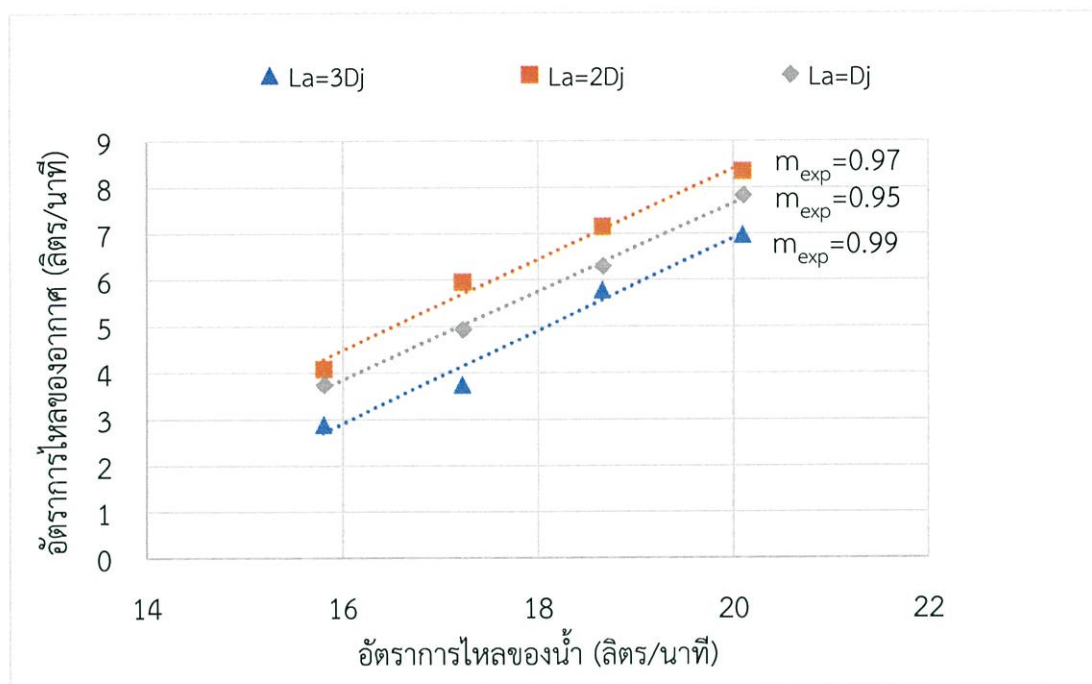


รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์น้ำและอากาศของ L_a ต่างๆที่ได้จากการจำลอง

กราฟที่ 5.20 และ 5.21 บ่งบอกว่าตำแหน่งของรูอากาศ (L_a) ที่ทำให้อัตราการไหลของอากาศมีค่ามากที่สุดคือ $2D_j$ รองลงมาเป็น $1D_j$ และ $3D_j$ ตามลำดับ แนวโน้มของความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง โดยที่คุณสมบัติของของไหลทั้งสองชนิดมีผลต่อความสามารถในการเหนี่ยวนำ ดังแสดงในกราฟของเลขเรย์โนลด์

5.2 ผลการทดลอง

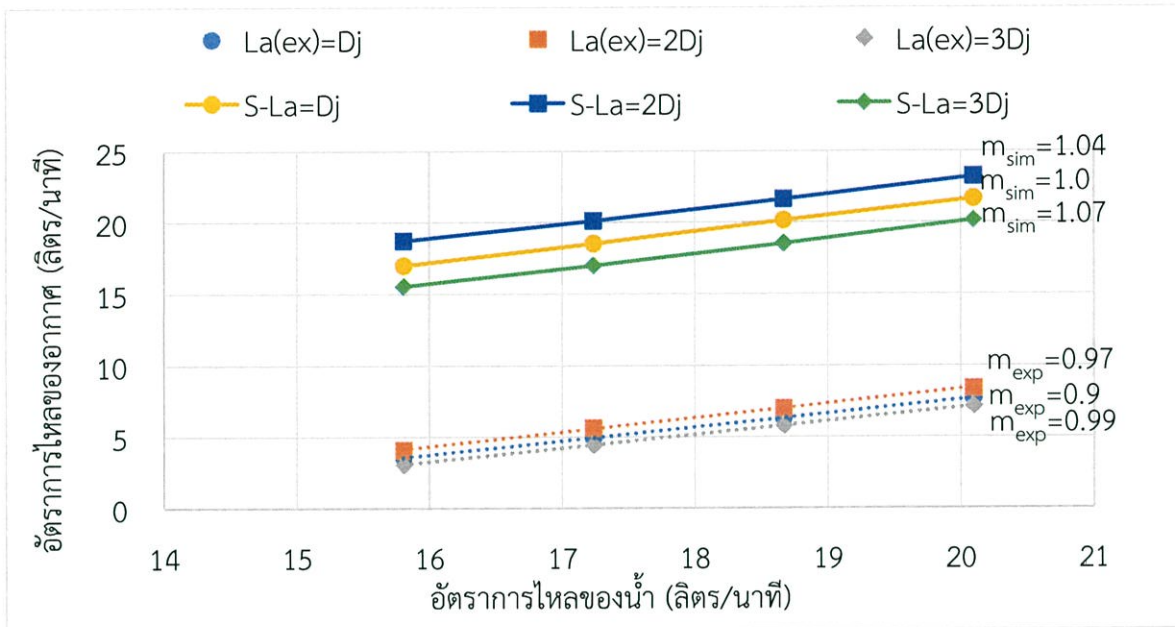
การทดลองของหัวฉีดขนาด 6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องผสมเท่ากับ 18 มิลลิเมตร ($D_c = 3D_j$) ความยาวห้องผสมเท่ากับ 36 มิลลิเมตร ($L_c = 6D_j$) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศเท่ากับ 12 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $1D_j$, $2D_j$ และ $3D_j$ เพื่อหาตำแหน่งรูอากาศที่เหมาะสมเมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.22 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศในหน่วย ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ L_a ต่างๆ จากการทดลอง

กราฟในรูปที่ 5.22 แสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งของรูอากาศ (L_a) เป็น $2D_j$ อัตราการไหลของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำมีค่าสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง และที่ตำแหน่งของรูอากาศเป็น $1D_j$ และ $3D_j$ ก็มีอัตราการไหลลดน้อยลงตามลำดับเช่นเดียวกัน

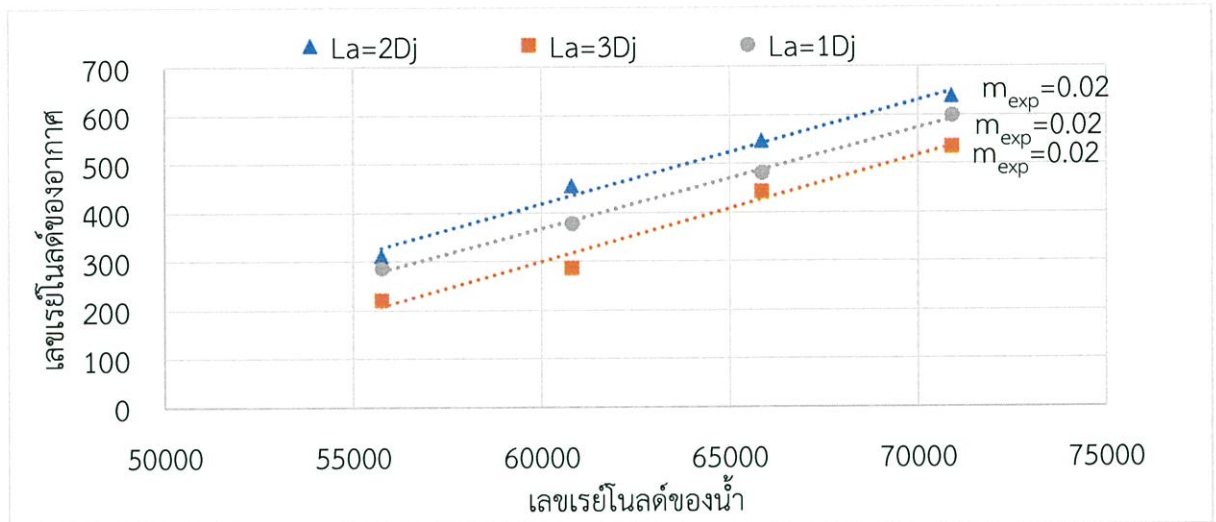
ค่าอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งของทางเข้าอากาศต่างๆเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศและน้ำของการทดลองและการสร้างแบบจำลองที่ตำแหน่งรูอากาศต่างๆ

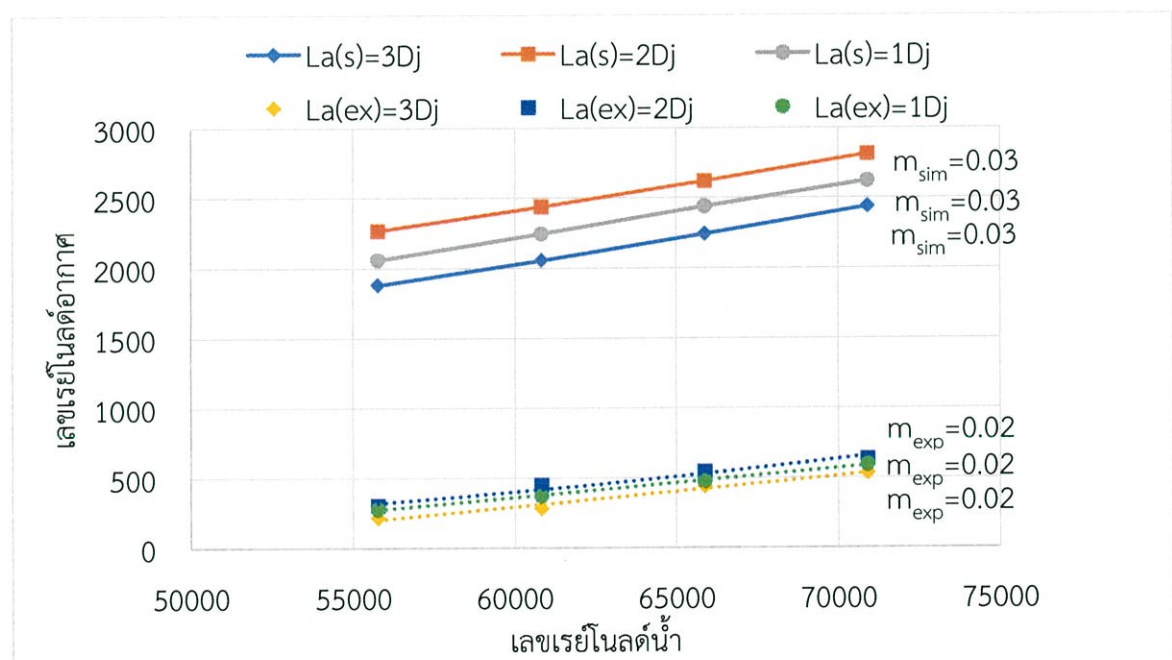
กราฟทุกเส้นในรูปที่ 5.23 มีแนวโน้มเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ความชันเฉลี่ยของกราฟจากการทดลอง ($m_{exp,avg}$) ในรูปที่ 5.23 มีค่าเป็น 0.97 และความชันเฉลี่ยของกราฟจากการสร้างแบบจำลอง ($m_{sim,avg}$) มีค่าเป็น 1.06 ค่าคลาดเคลื่อนของความชันเฉลี่ยระหว่างกราฟจากการสร้างแบบจำลองและกราฟจากการทดลองมีค่าเป็น 9.28% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ โดยมีตำแหน่งของรูอากาศ (L_a) ที่มีอัตราการไหลของอากาศที่ดีที่สุดคือ $2D_j$

ค่าอัตราการไหลของน้ำและอากาศสามารถเปลี่ยนไปเป็นตัวแปรไร้มิติได้คือเลขเรย์โนลด์ ซึ่งความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ของน้ำกับเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งรูอากาศ (L_a) เท่ากับ $1D_j$, $2D_j$ และ $3D_j$ แสดงดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์น้ำและอากาศที่ L_a ต่างๆจากการทดลอง

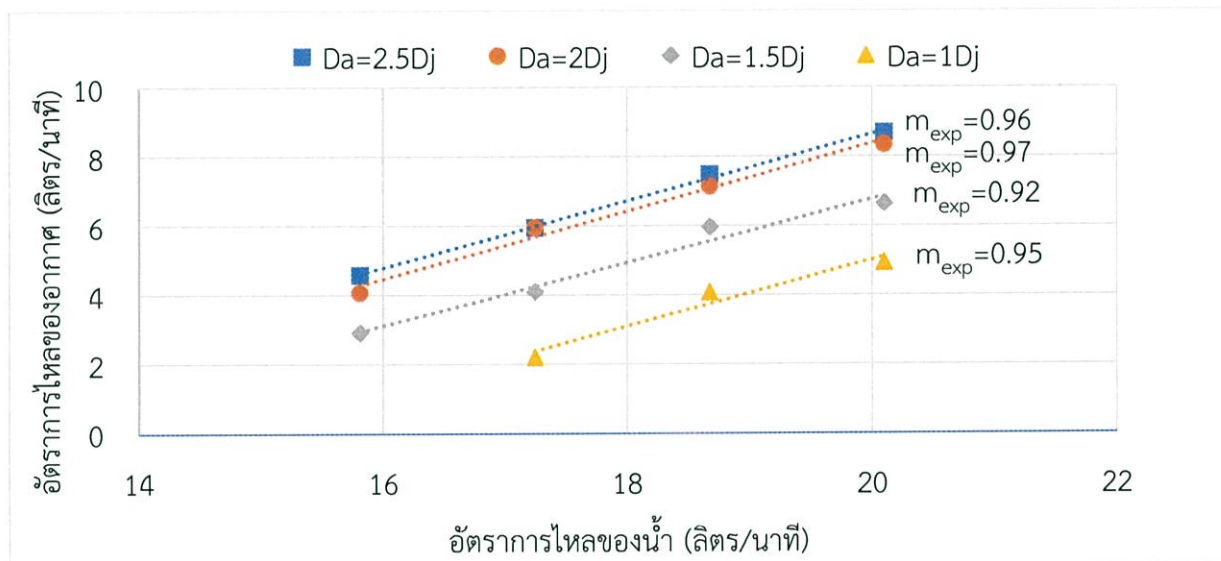
เลขเรย์โนลด์ของอากาศและน้ำที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งของทางเข้าอากาศต่างๆเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 กราฟเปรียบเทียบเลขเรย์โนลด์ของอากาศและน้ำของการทดลองและการสร้างแบบจำลองที่ตำแหน่งรูอากาศต่างๆ

แนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ของอากาศและน้ำบ่งชี้ให้เห็นว่าคุณสมบัติเฉพาะของของไหลทั้งสองชนิดส่งผลกระทบต่อความชันของกราฟ ทั้งความแตกต่างของความหนาแน่นและความแตกต่างของความหนืด

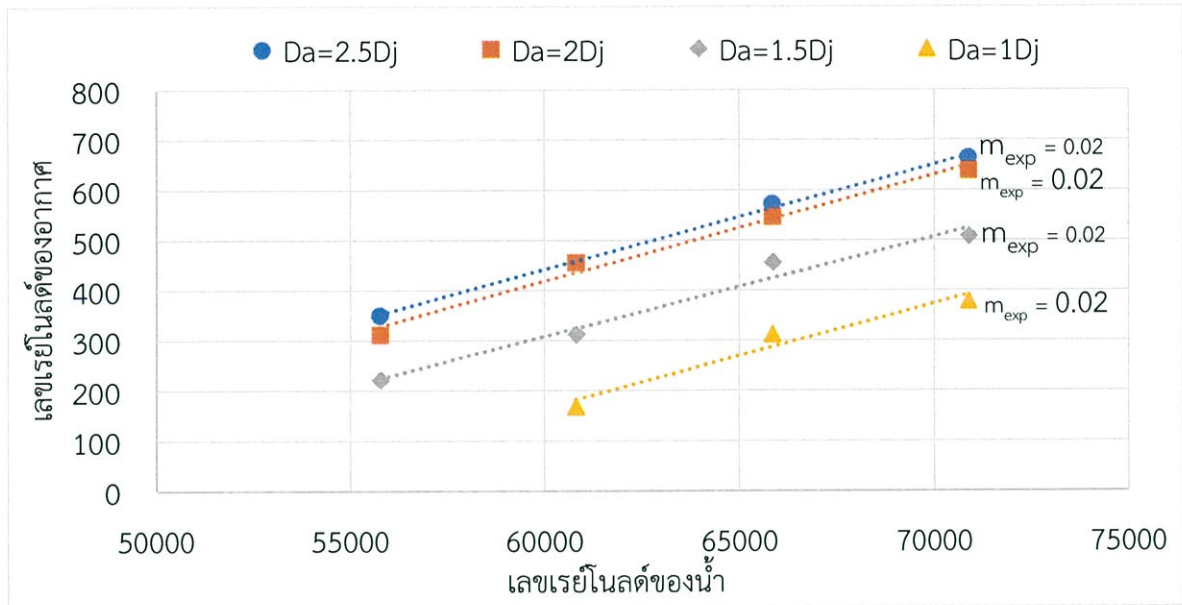
การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศ (D_a) ที่ดีที่สุดได้จากการทดลอง โดยกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (D_j) มีค่า 6 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของห้องผสม (D_c และ L_c) เป็น 18 มิลลิเมตร ($3D_j$) และ 36 มิลลิเมตร ($6D_j$) ตามลำดับ (จากรูปที่ 5.7) ตำแหน่งของรูอากาศอยู่ที่ 12 มิลลิเมตร ($2D_j$) จากปลายหัวฉีด (จากรูปที่ 5.23) อัตราการไหลเป็น 20.10, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที การทดลองนี้เป็นการเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศ (D_a) ไปทั้งหมด 4 ครั้ง คือ $1D_j$, $1.5D_j$, $2D_j$ และ $2.5D_j$ ผลการทดลองแสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ

กราฟข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศ (D_a) มีค่าเป็น $2.5D_j$ มีอัตราการไหลของอากาศสูงสุด กราฟทุกเส้นในรูปที่ 5.26 ยังคงมีแนวโน้มเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นอยู่ โดยที่ความชันเฉลี่ยของกราฟทั้ง 4 เส้นคือ 0.94 โดยที่ระยะห่าง (gap) ระหว่างกราฟแต่ละเส้นมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งที่กราฟของ $D_a = 2D_j$ และของ $D_a = 2.5D_j$ นั้นแทบไม่ห่างกัน จึงสามารถกล่าวได้ว่าจุดที่ $D_a = 2.5D_j$ นี้เป็นจุดที่มีอัตราการไหลสูงสุด ดังนั้นถึงแม้ว่าเราจะเพิ่มขนาดของรูอากาศให้ใหญ่ขึ้น อัตราการไหลของอากาศที่ได้อาจไม่ต่างกับที่ $2.5D_j$

ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำและอากาศที่ได้จากการทดลองที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศ (D_a) เท่ากับ $1D_j$, $1.5D_j$, $2D_j$ และ $2.5D_j$ สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติหรือเลขเรย์โนลด์ได้ ดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์น้ำและอากาศที่ D_a ต่างๆ

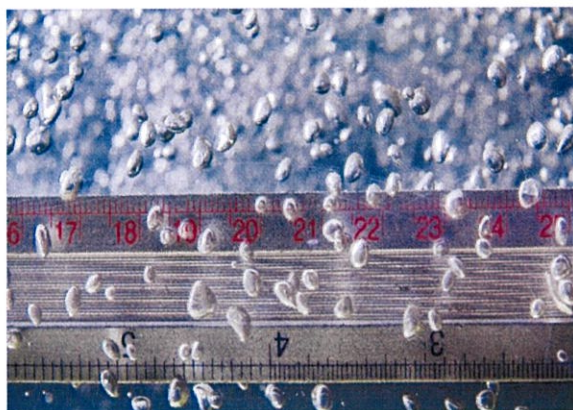
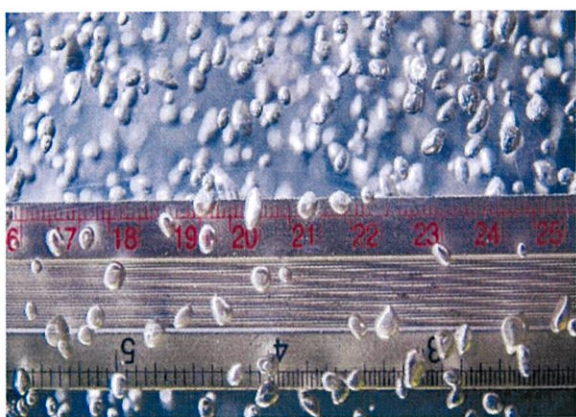
สมรรถนะการเติมอากาศแสดงในปริมาณของกิโลกรัมออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ทำการทดลองโดยหาปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบโดยใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Clamp on power meter) ผลของปริมาณการเติมอากาศแสดงดังตารางที่ 2 สมรรถนะการเติมอากาศสูงสุดคือ 0.36 กิโลกรัมออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ในระบบการเติมอากาศที่ใช้ในอุตสาหกรรม สมรรถนะการเติมอากาศมีค่าประมาณ 0.6-3.9 กิโลกรัมออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

ตารางที่ 2 อัตราการไหลของน้ำเทียบกับปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศ

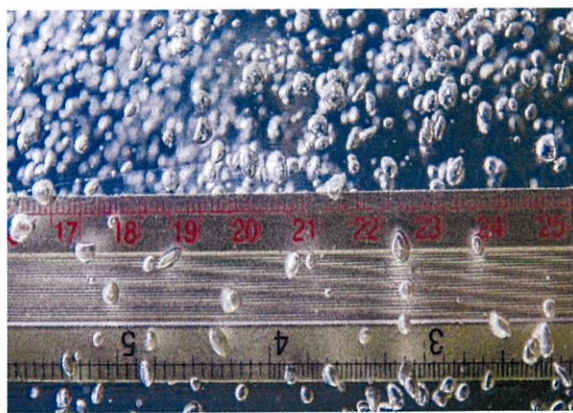
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/นาที)	สมรรถนะการเติมอากาศ ($\text{kgO}_2/\text{kW}\cdot\text{Hr.}$)
20.1	0.36
18.67	0.31
17.24	0.25
15.81	0.19

การถ่ายภาพฟองอากาศเพื่อดูขนาดฟองอากาศ ขนาดฟองอากาศส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ ดังนั้นการศึกษขนาดฟองอากาศจึงศึกษาโดยการถ่ายภาพด้วยกล้อง Canon EOS 7D ที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที ขนาดหัวฉีดที่ทำการถ่ายภาพคือ L_a เท่ากับ 1D_j, 2D_j, 3D_j และ D_a เท่ากับ 1D_j, 1.5D_j, 2D_j และ 2.5D_j

ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ 1D_j และอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 5.28 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ

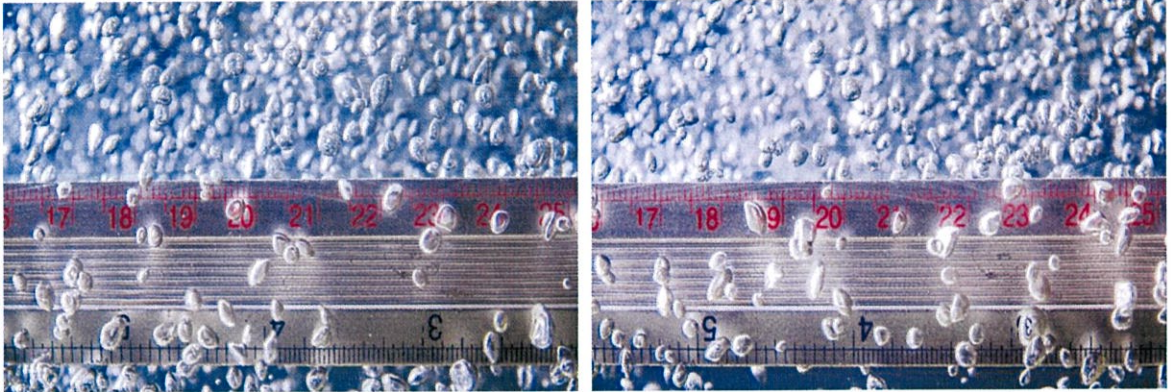


(ก) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 20.1 ลิตร/นาที (ข) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 18.67 ลิตร/นาที

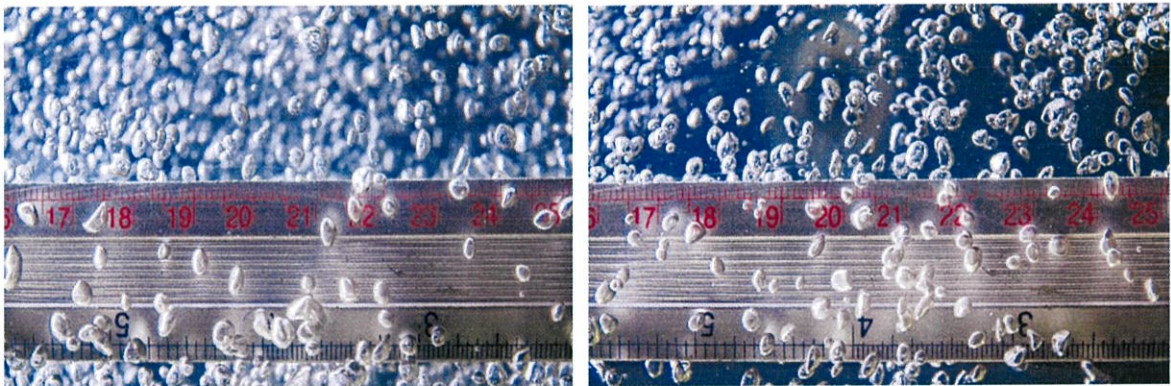


(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที (ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที
รูปที่ 5.28 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ 1D_j

ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $2D_j$ และอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 5.29 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ

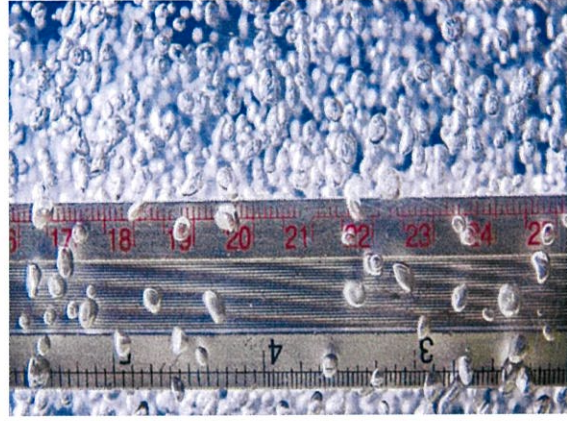
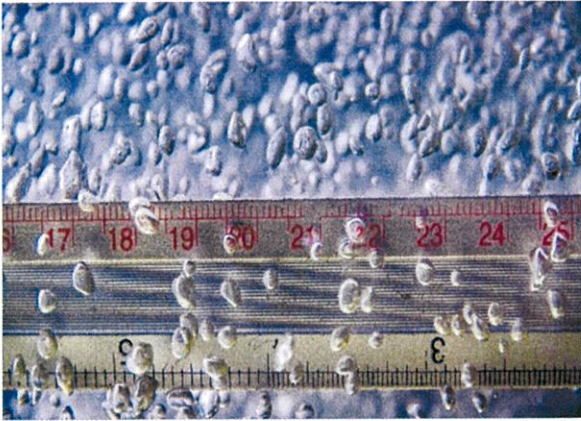


(ก) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 20.1 ลิตร/นาที (ข) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 18.67 ลิตร/นาที

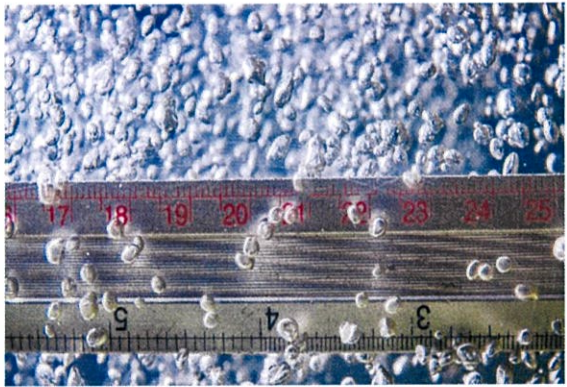
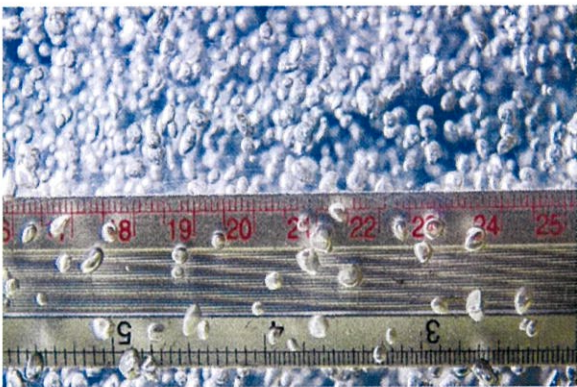


(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที (ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที
รูปที่ 5.29 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศ ที่ L_a เท่ากับ $2D_j$

ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $3D_j$ และอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตร/นาทีแสดงดังรูปที่ 5.30 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ

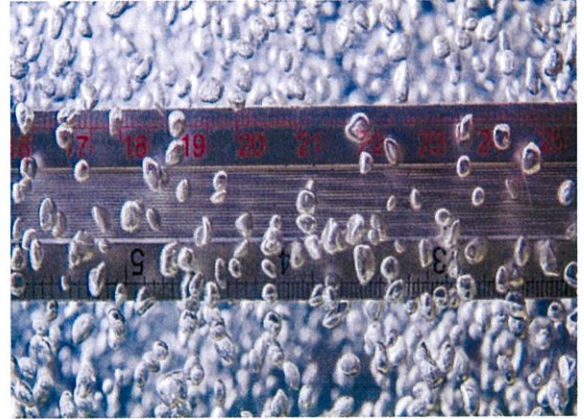
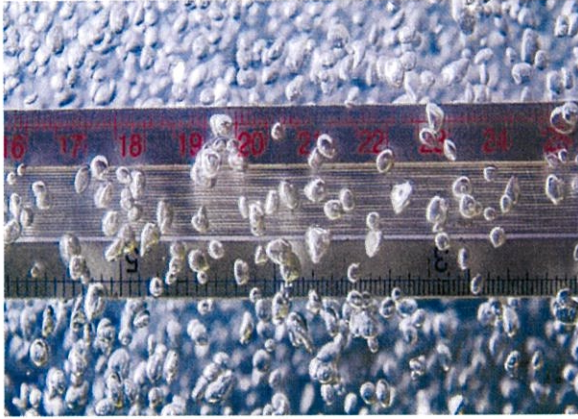


(ก) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 20.1 ลิตร/นาที (ข) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 18.67 ลิตร/นาที

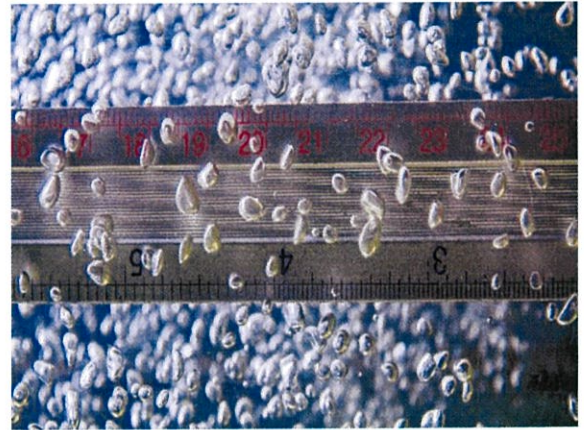
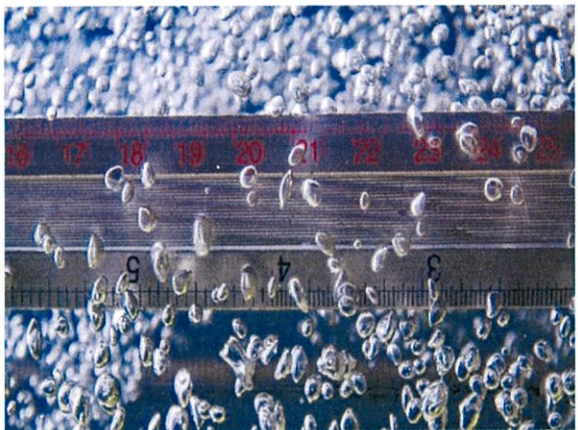


(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที (ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที
รูปที่ 5.30 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศ ที่ L_a เท่ากับ $3D_j$

ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1D_j$ และอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตร/นาทีแสดงดังรูปที่ 5.31 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ

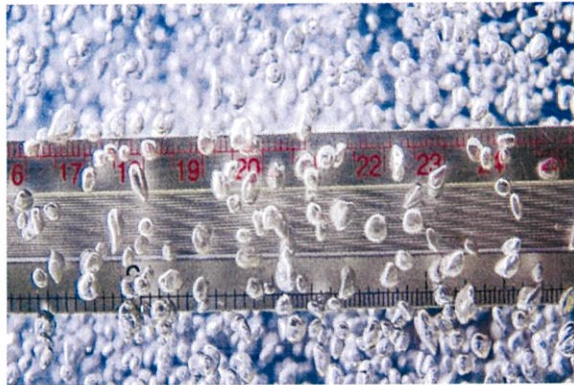
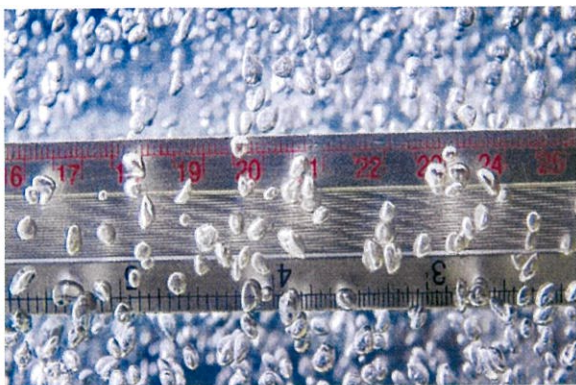


(ก) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 20.1 ลิตร/นาที (ข) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 18.67 ลิตร/นาที

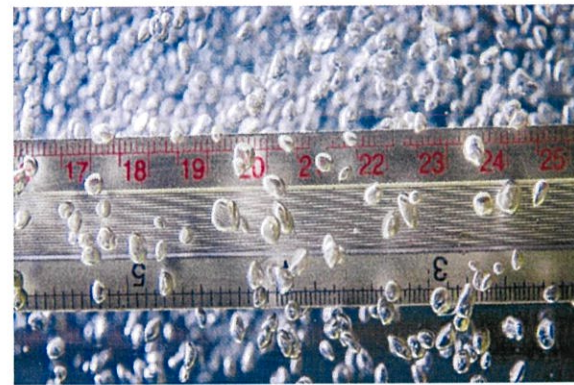
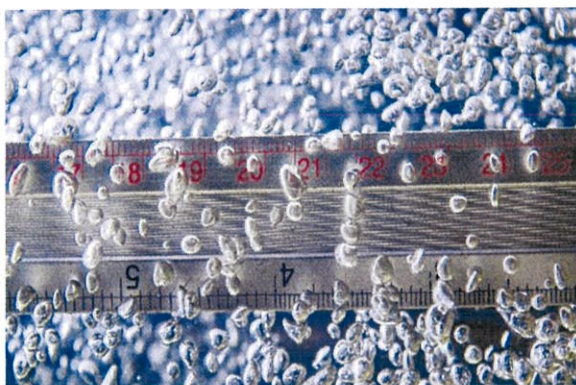


(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที (ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที
รูปที่ 5.31 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1D_j$

ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1.5D_j$ และอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตร/นาทีแสดงดังรูปที่ 5.32 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ

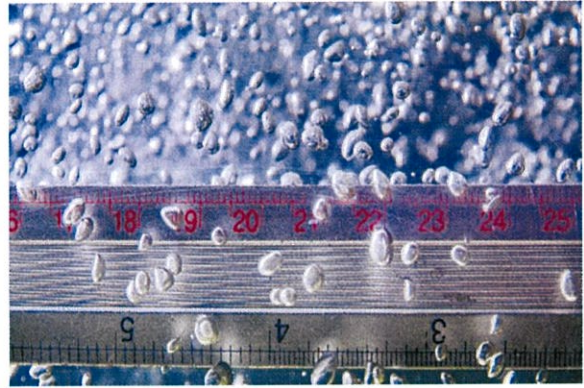
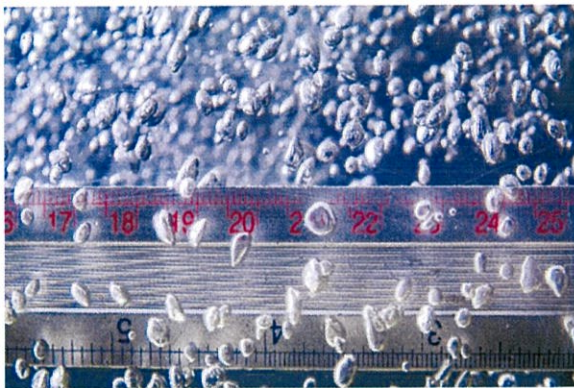


(ก) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 20.1 ลิตร/นาที (ข) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 18.67 ลิตร/นาที



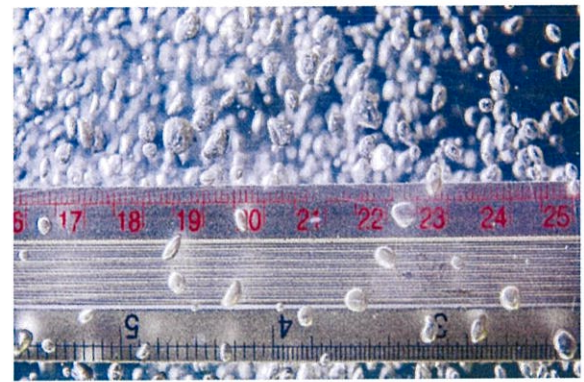
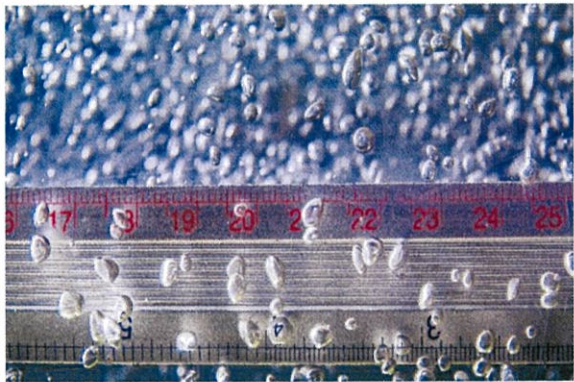
(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที (ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที
รูปที่ 5.32 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1.5D_j$

ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $2.5D_j$ และอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 5.33 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ



(ก) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 20.1 ลิตร/นาที่

(ข) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 18.67 ลิตร/นาที่



(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที่

(ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที่

รูปที่ 5.33 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $2.5D_j$

ขนาดฟองอากาศที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้อง Canon EOS 7D ได้ขนาดฟองอากาศของแต่ละอัตราการไหลที่ขนาดรูอากาศที่แตกต่างกันและที่ตำแหน่งรูอากาศที่แตกต่างกัน ผลคือขนาดฟองอากาศมีขนาดที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การสร้างแบบจำลองของหัวฉีดในโปรแกรมแกมบิท (Gambit) และ (Ansys Fluent)

ก1. Gambit

โปรแกรม Gambit เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง และกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองหลักๆมีทั้งหมด 3 ขั้นตอน

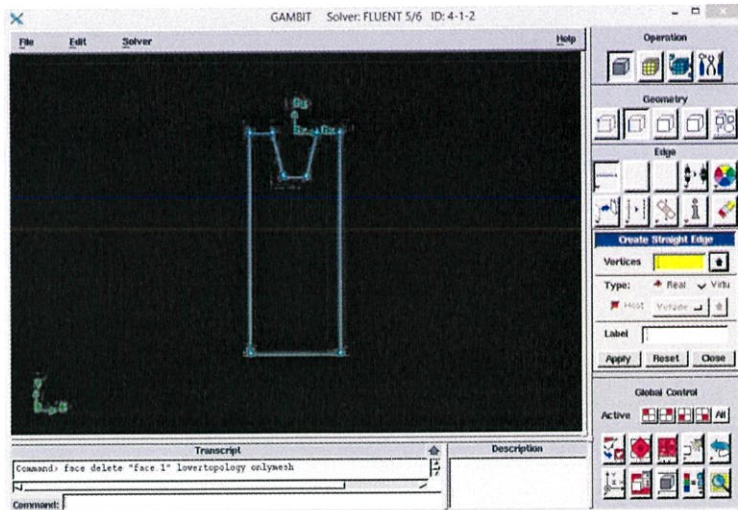
1. สร้างแบบจำลอง
2. สร้างขอบเขตย่อย (Mesh)
3. กำหนดขอบเขตของแบบจำลอง
4. Export แบบไปที่โปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)

สำหรับหน้าต่างของโปรแกรม Gambit แสดงในรูปที่ 1



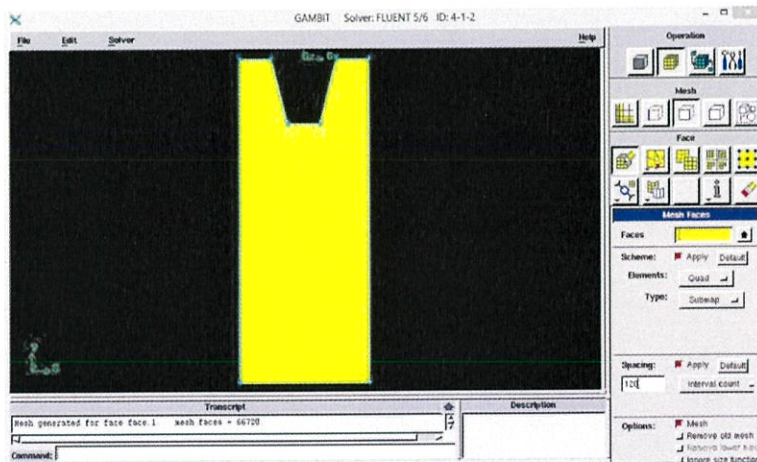
รูปที่ 1 หน้าตาของโปรแกรมแกมบิท (Gambit)

1. สร้างแบบจำลองโดยใช้คำสั่ง Vertex และ Edge เริ่มจากการสร้างจุดและตามด้วยเส้นดังรูปที่ 2



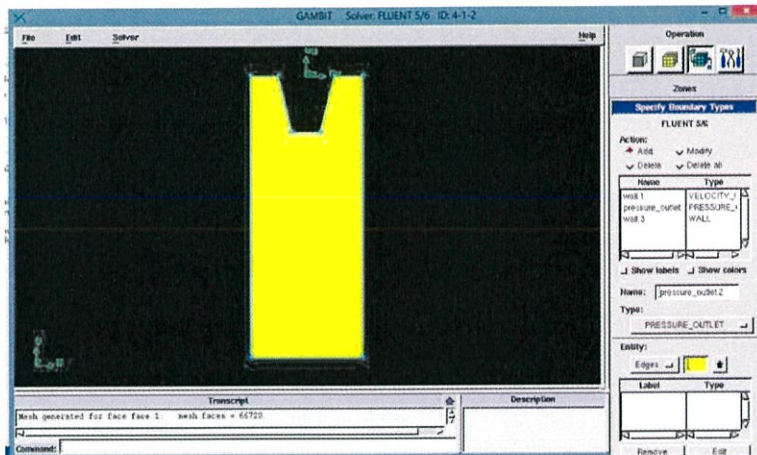
รูปที่ 2 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมแกมบิท (Gambit)

2. สร้างขอบเขตย่อย (Mesh) โดยเลือกที่ Mesh และเลือกคำสั่ง Face สร้างจำนวนของขอบเขตย่อยประมาณ 60000 – 80000 แสดงดังรูปที่ 3



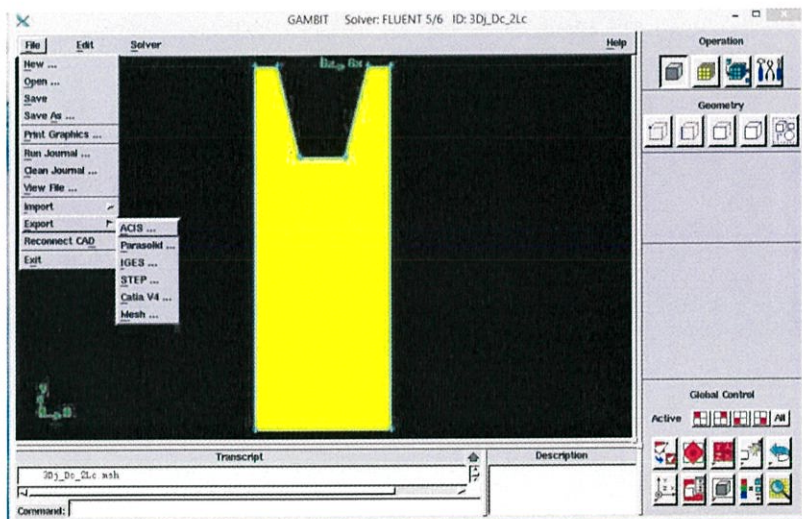
รูปที่ 3 การสร้างขอบเขตย่อยด้วยโปรแกรมแกมบิท (Gambit)

3. กำหนดขอบเขตของแบบจำลองโดยเริ่มที่ Zones และเลือก specify boundary types แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองโดยโปรแกรมแกมบิท (Gambit)

4. Export แบบไปที่โปรแกรมฟลูเอนท์ Fluent โดยเลือกที่ File > Export > Mesh



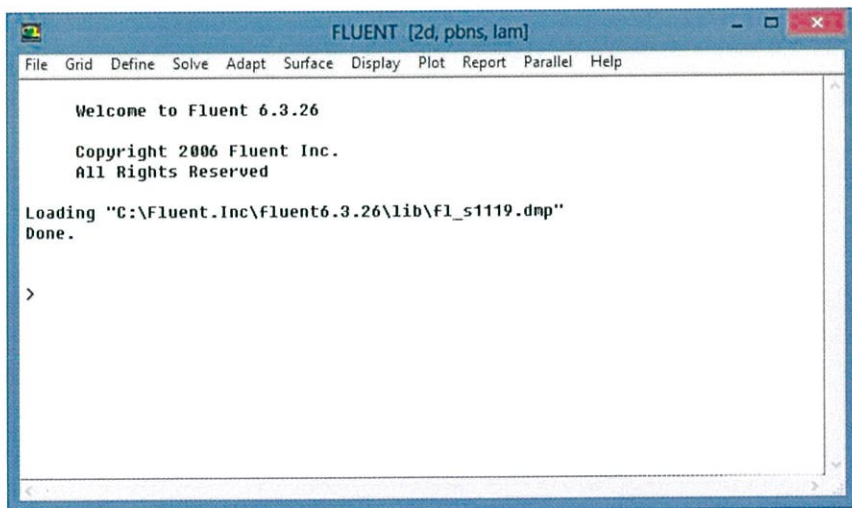
รูปที่ 5 การ Export แบบไปที่ โปรแกรมฟลูเอนท์ (Fluent)

ก2. Ansys Fluent

โปรแกรม Fluent เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ พฤติกรรมของของไหลสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการจำลองปรากฏการณ์จะคำนวณด้วยชุดสมการอนุรักษ์ คือ 1.สมการความต่อเนื่อง และ 2.สมการอนุรักษ์โมเมนตัม ขั้นตอนในการจำลองการไหลมีขั้นตอนดังนี้

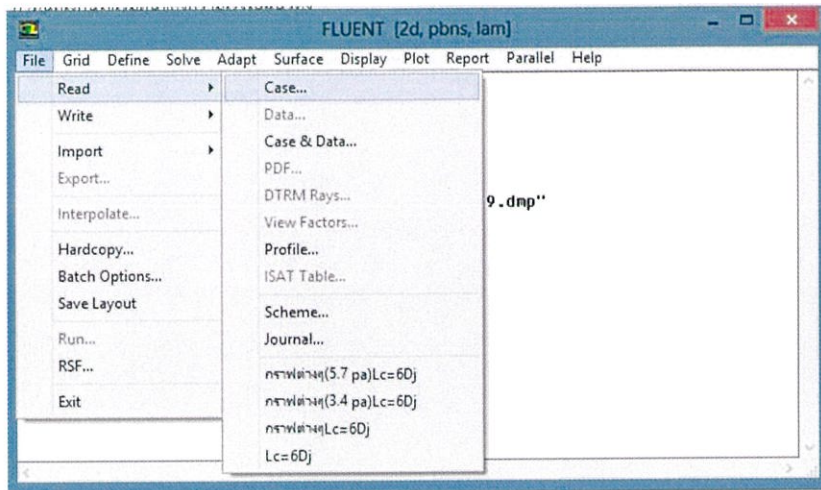
1. เปิด file.msh จากโปรแกรมแกมบิท (Gambit)
2. ตรวจสอบขอบเขตย่อย (Mesh)
3. กำหนดรูปแบบการไหล
4. กำหนดชนิดของของไหล
5. กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น
6. กำหนดเงื่อนไขของขอบ
7. กำหนดการคำนวณหาค่าตอบ
8. คำนวณ

สำหรับหน้าต่างของโปรแกรม Fluent 6.3.24 แสดงดังรูปที่ 6



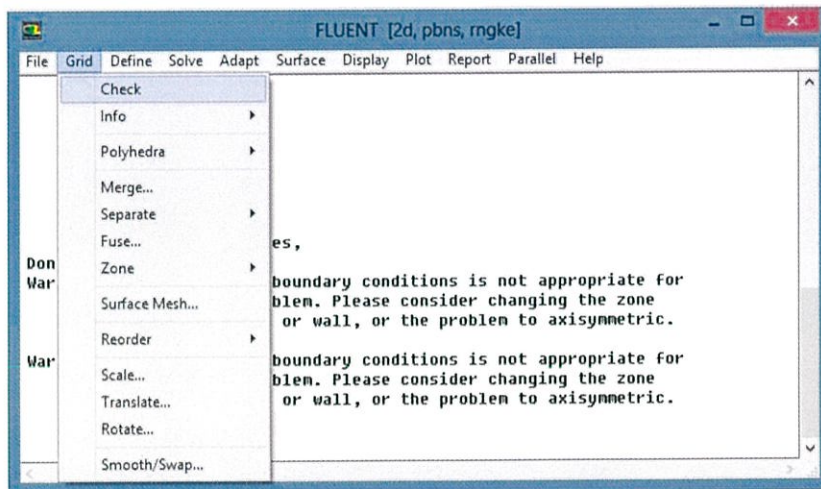
รูปที่ 6 หน้าตาของโปรแกรมฟลูเอิน Fluent 6.3.24

1. เปิด ไฟล์.msh จากโปรแกรมแกมบิท (Gambit) โดยเลือกที่ file > Read > Case ตามลำดับดังรูปที่ 7



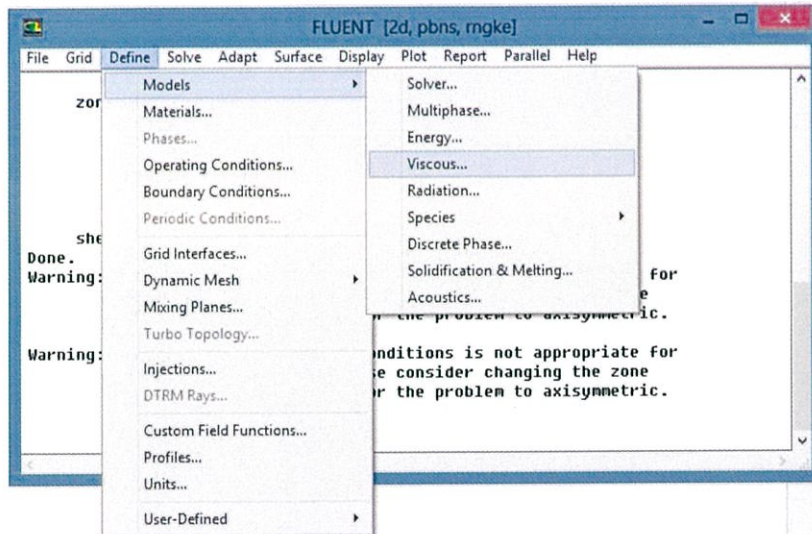
รูปที่ 7 การเปิด ไฟล์ จากโปรแกรมแกมบิท (Gambit) ในโปรแกรมฟลูเอิน Fluent

2. ตรวจสอบขอบเขตย่อย (Mesh) โดยเลือกที่ Grid > Check แสดงดังรูปที่ 8



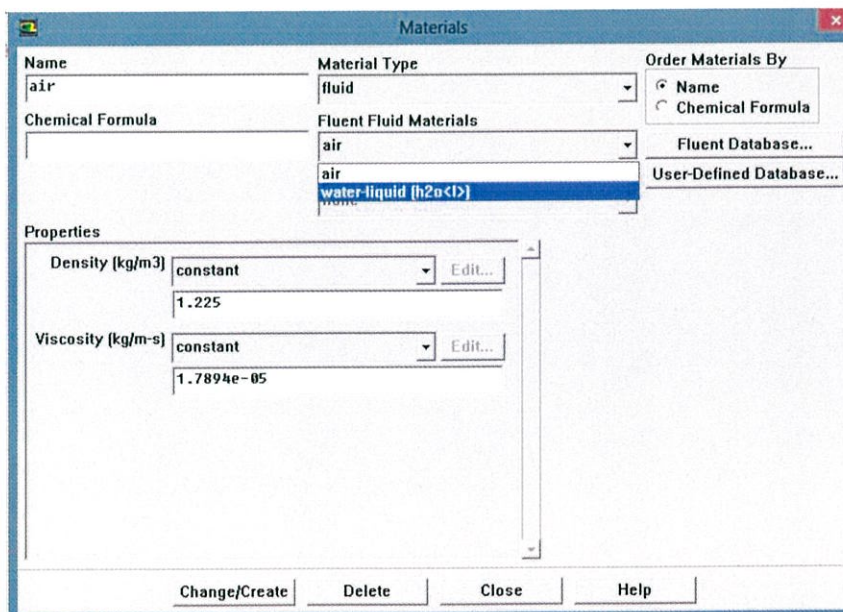
รูปที่ 8 การตรวจสอบขอบเขตย่อย (Mesh) ในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)

3. กำหนดรูปแบบการไหลเป็นการไหลแบบเทอวิวเลน (Turbulent) เลือกที่ Define> Models> Viscous แสดงดังรูปที่ 9



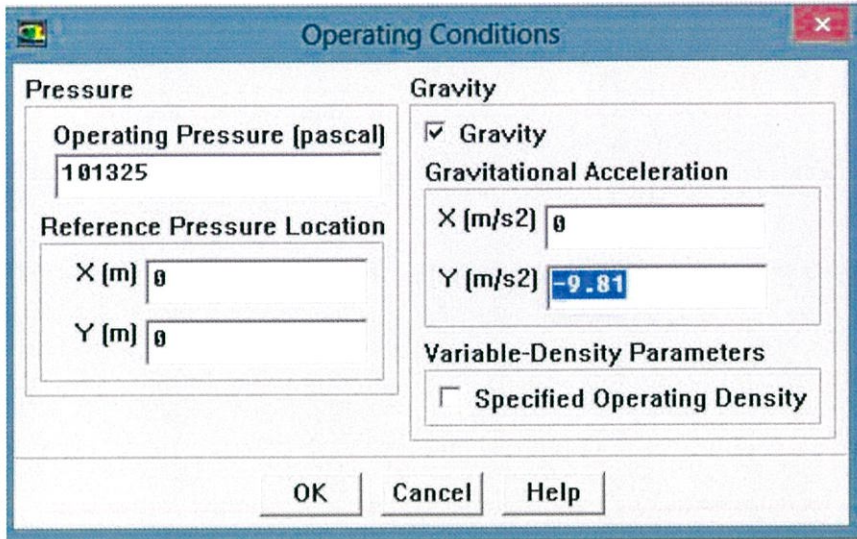
รูปที่ 9 การกำหนดรูปแบบการไหลในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)

4. กำหนดชนิดของของไหลเป็นน้ำ โดยเลือกที่ Define> Material > ชนิดของของไหลแสดงดังรูปที่ 10



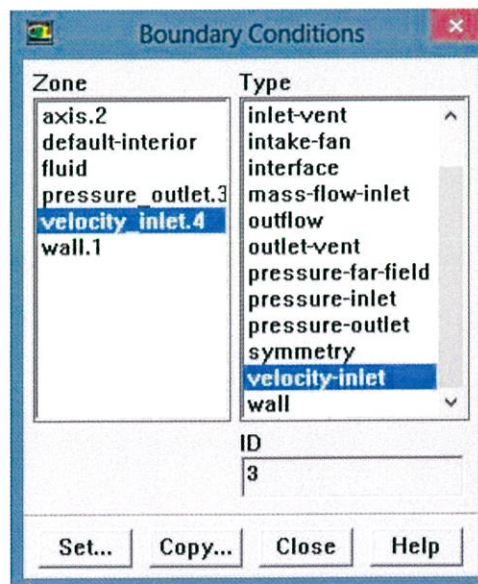
รูปที่ 10 การกำหนดชนิดของของไหลในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)

5. กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นคือ ความเร่งในแนวดิ่ง อุณหภูมิ และความดัน แสดงดังรูปที่ 11



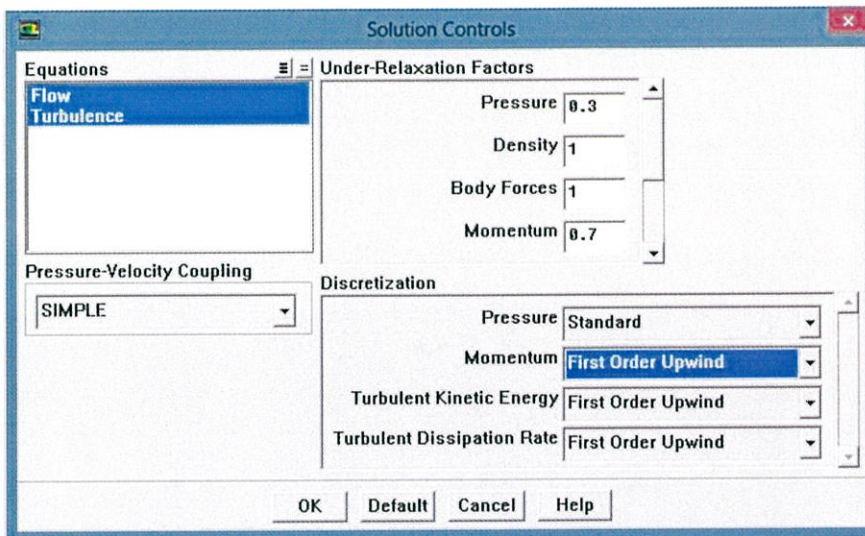
รูปที่ 11 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)

6. กำหนดเงื่อนไขของขอบคือความเร็วขาเข้าและความดันขาออก โดยเลือกที่ Define > Boundary condition แสดงดังรูปที่ 12



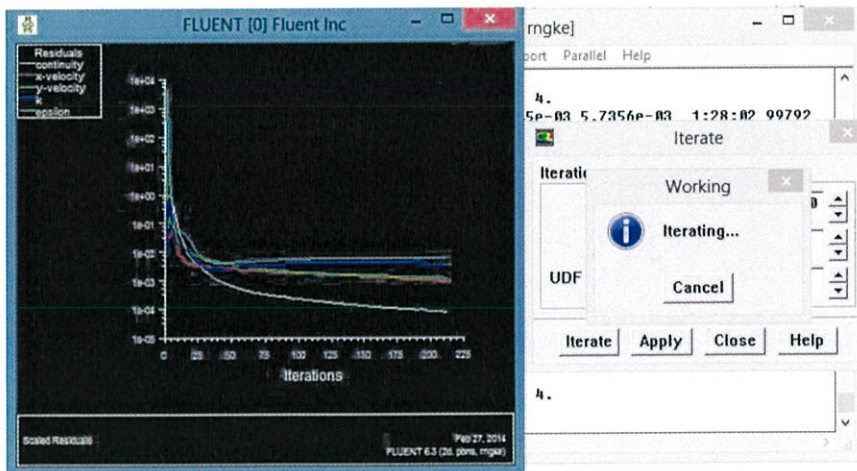
รูปที่ 12 การกำหนดเงื่อนไขของขอบในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)

7. กำหนดการคำนวณหาคำตอบเลือกที่ Solve> control> Solutions และเลือกเป็นแบบ Simple> First Order Upwind ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การกำหนดการคำนวณหาคำตอบในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)

8. คำนวณโดยเลือกที่ Solve> Iterate แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงการคำนวณในโปรแกรมฟลูเอิน (Fluent)

ภาคผนวก ข

ผลจากการจำลอง

ผลการจำลองที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที และ L_a เท่ากับ 1D_j, 2D_j และ 3D_j ความดันที่ได้จากการจำลองเทียบกับอัตราการไหลของน้ำแสดงข้อมูลดังตารางที่ ข1 และเมื่อนำความดันที่ได้มาคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศ แสดงดังตารางที่ ข2 และคำนวณหาเลขเรย์โนลด์ของน้ำและอากาศแสดงข้อมูลดังตารางที่ ข3

ตารางที่ ข1 ความดันที่ได้จากการจำลองเทียบกับอัตราการไหลของน้ำ

อัตราการไหลของน้ำ (l/m)	ความดัน (Pa)		
	$L_a = D_j$	$L_a = 2D_j$	$L_a = 3D_j$
20.1	6	6.9	5.2
18.67	5.2	6	4.4
17.24	4.4	5.2	3.7
15.81	3.7	4.5	3.1

ตารางที่ ข2 แสดงข้อมูลของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งรูอากาศต่างๆ

อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	อัตราการไหลของอากาศ (l/min)		
	$L_a = D_j$	$L_a = 2D_j$	$L_a = 3D_j$
20.1	21.63	23.2	20.14
18.67	20.14	21.63	18.53
17.24	18.53	20.14	16.99
15.81	16.99	18.74	15.55

ตารางที่ ข3 แสดงข้อมูลของเลขเรย์โนลด์อากาศและน้ำ

RE (น้ำ)	RE (อากาศ)		
	$L_a = 3D_j$	$L_a = 2D_j$	$L_a = 1D_j$
70912.52	2439.41	2810.05	2619.88
65867.51	2244.41	2619.88	2439.41
60822.48	2057.87	2439.41	2244.4
55777.46	1883.46	2269.84	2057.87

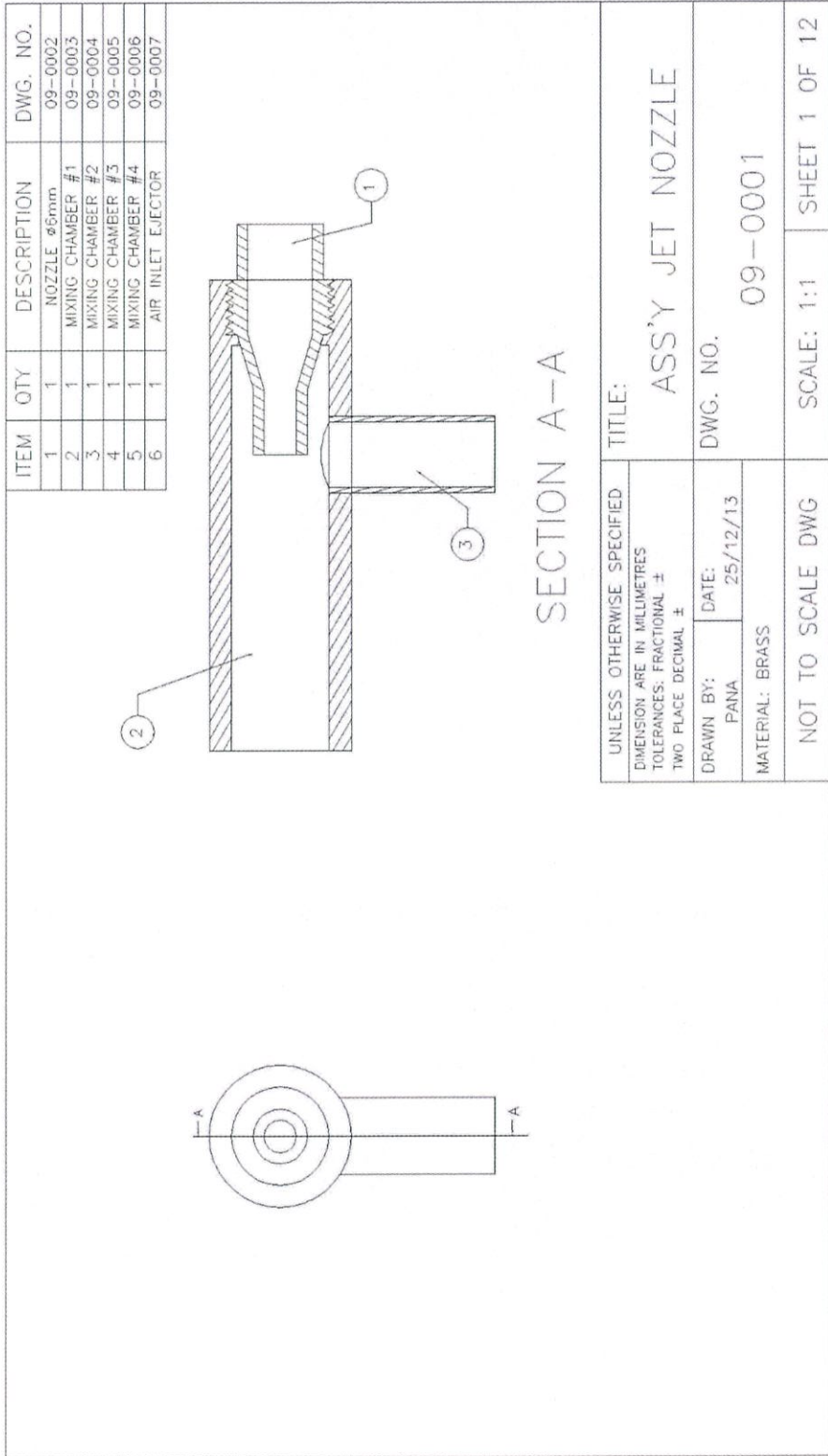
ภาคผนวก ค

การสร้างชุดหัวฉีดด้วยโปรแกรมออโตแคด (Auto cad)

ชุดหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองได้จากการสร้างชุดหัวฉีดจากอะลูมิเนียม การสร้างชุดหัวฉีดสร้างโดยใช้โปรแกรมออโตแคด (Auto cad) ในการออกแบบ พร้อมทั้งกำหนดขนาดและขนาดที่ออกแบบทั้งหมดแสดงดังนี้

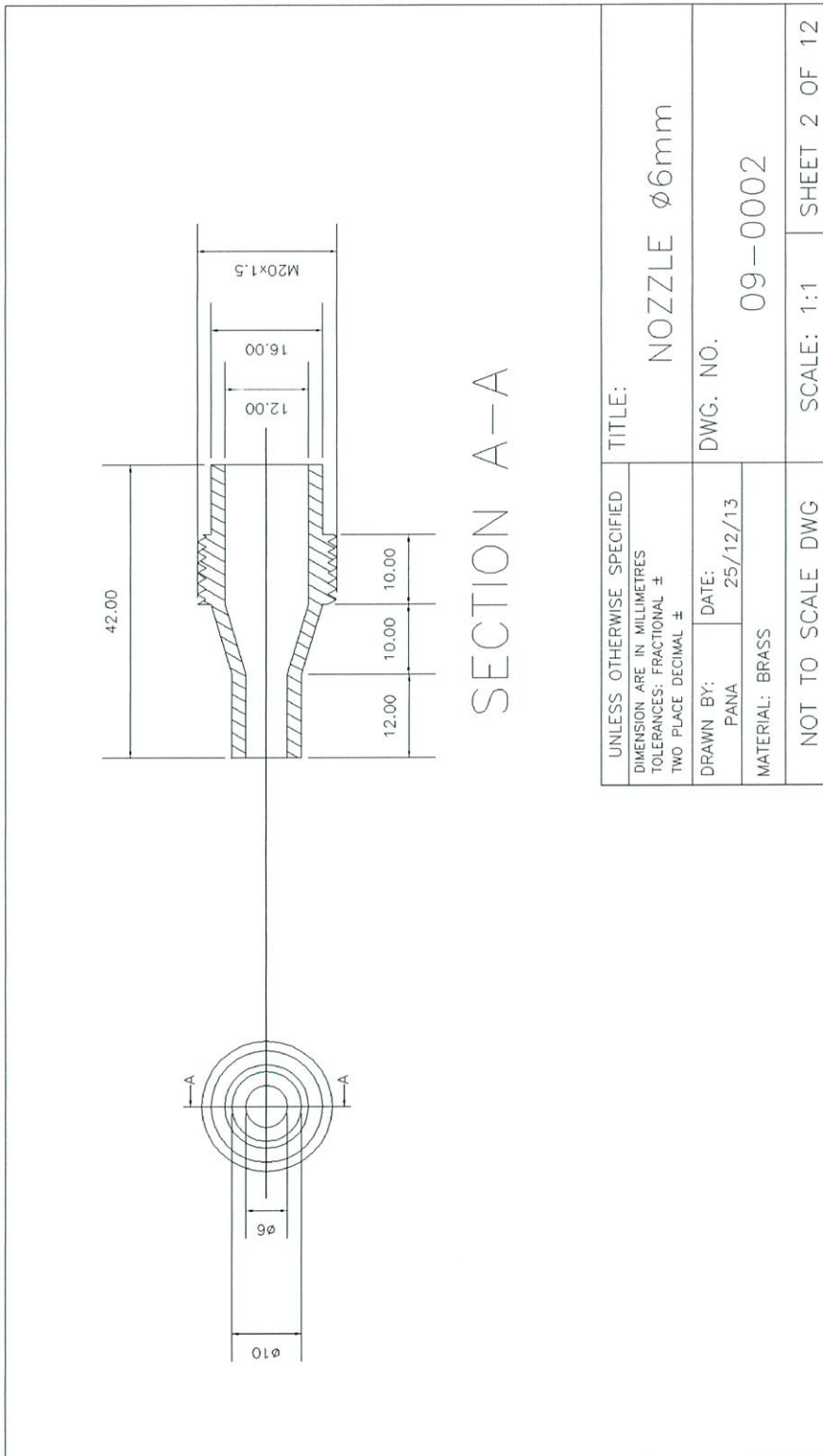
1. รูปแสดงชุดหัวฉีด
2. หัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายเท่ากับ 6 มิลลิเมตร
3. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ D_j หรือ 6 มิลลิเมตร และขนาดรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตร
4. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตร และขนาดรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตร
5. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $3D_j$ หรือ 18 มิลลิเมตร และขนาดรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตร
6. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตรและขนาดรูอากาศเท่ากับ $1D_j$ หรือ 6 มิลลิเมตร
7. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตรและขนาดรูอากาศเท่ากับ $1.5D_j$ หรือ 9 มิลลิเมตร
8. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตรและขนาดรูอากาศเท่ากับ $2.5D_j$ หรือ 15 มิลลิเมตร
9. ขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $1D_j$ หรือ 6 มิลลิเมตร
10. ขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $1.5D_j$ หรือ 9 มิลลิเมตร
11. ขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตร
12. ขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $2.5D_j$ หรือ 15 มิลลิเมตร

1. รูปแสดงชุดหัวฉีด แสดงดังรูปที่ 15



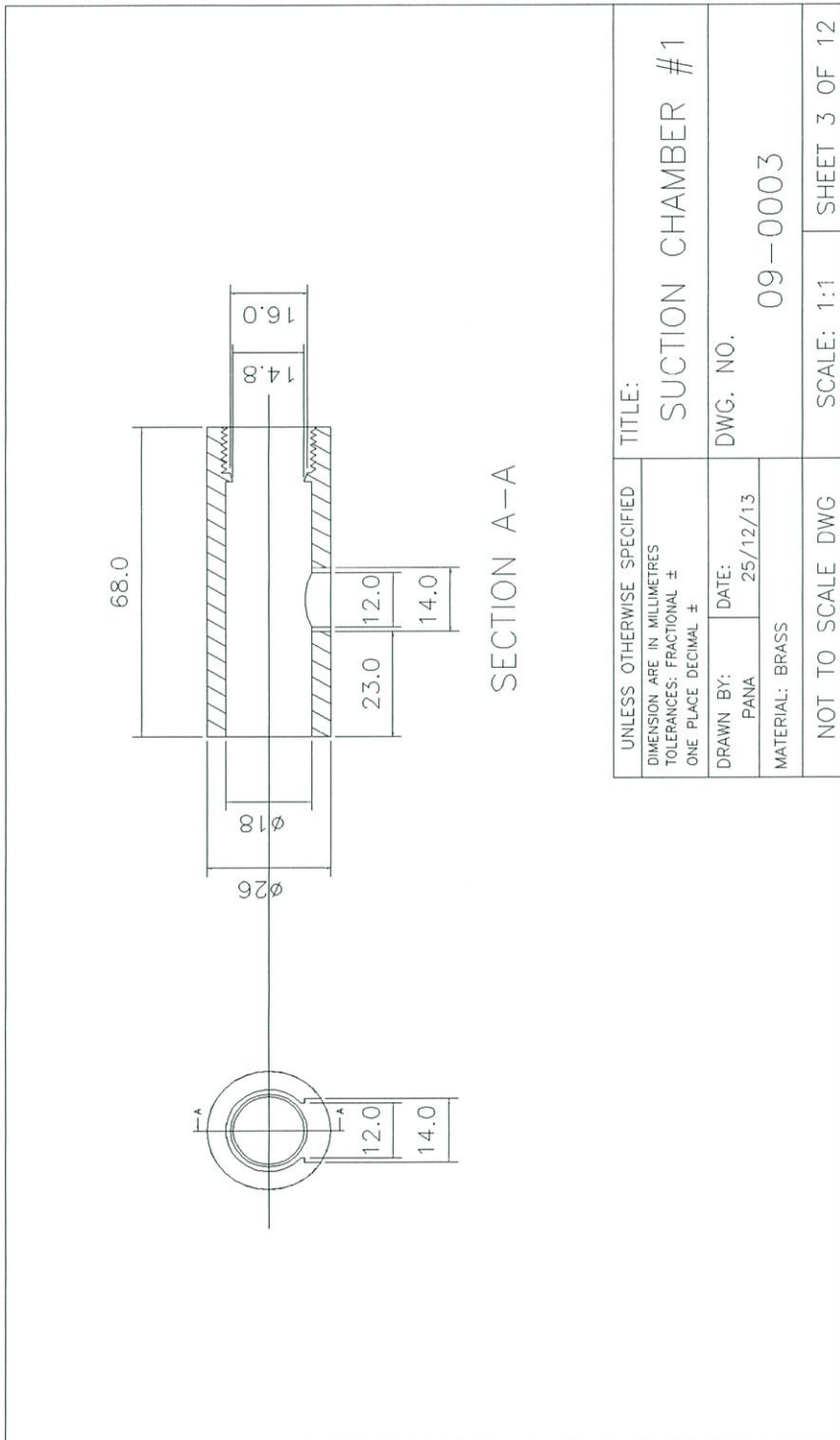
รูปที่ 15 แสดงแบบชุดหัวฉีดโดยโปรแกรม Auto cad

2. หัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายเท่ากับ 6 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 16



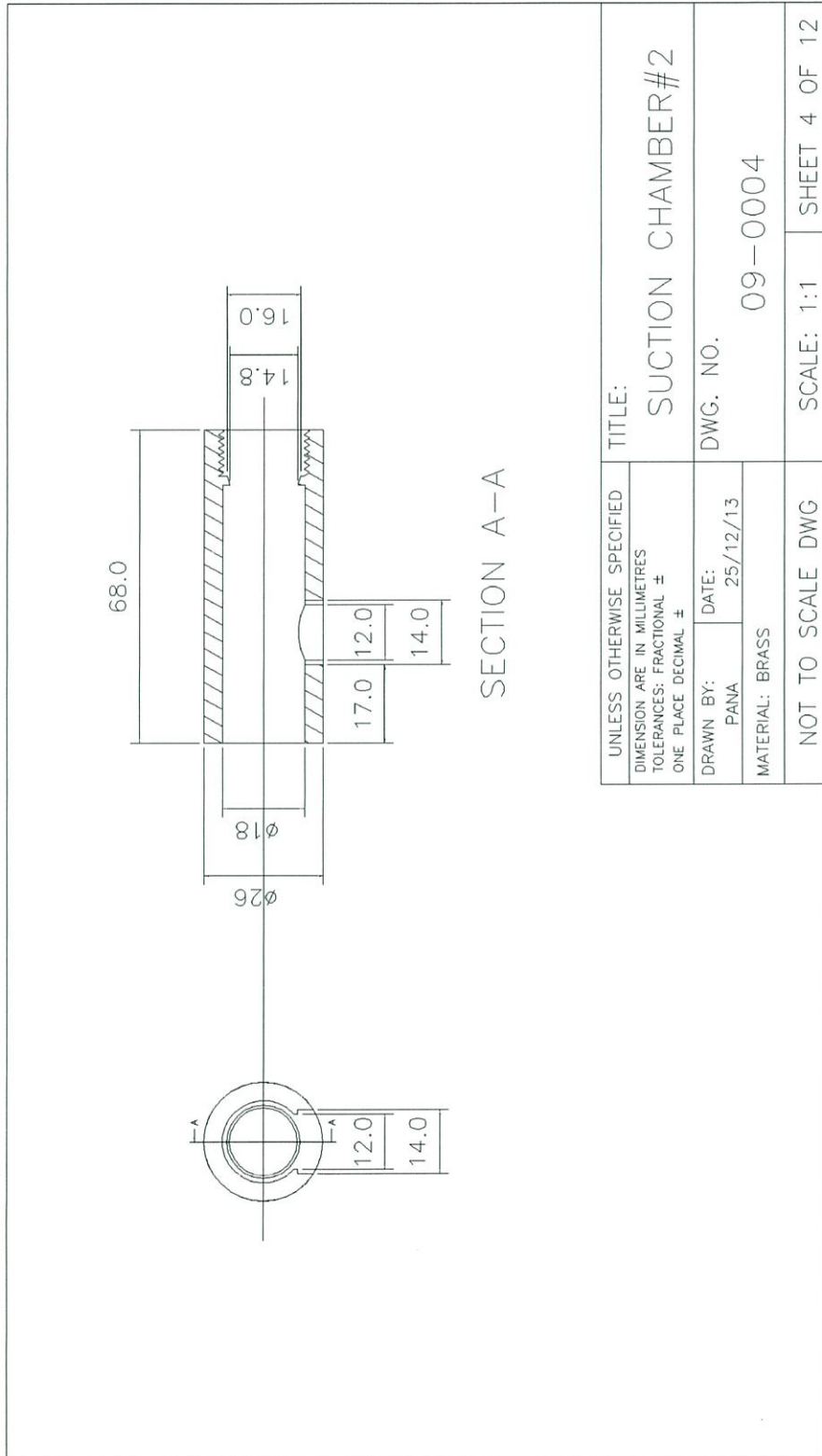
รูปที่ 16 แสดงแบบหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายเท่ากับ 6 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

3. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ D_j หรือ 6 มิลลิเมตร และขนาดรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตร แสดงดังรูป 17



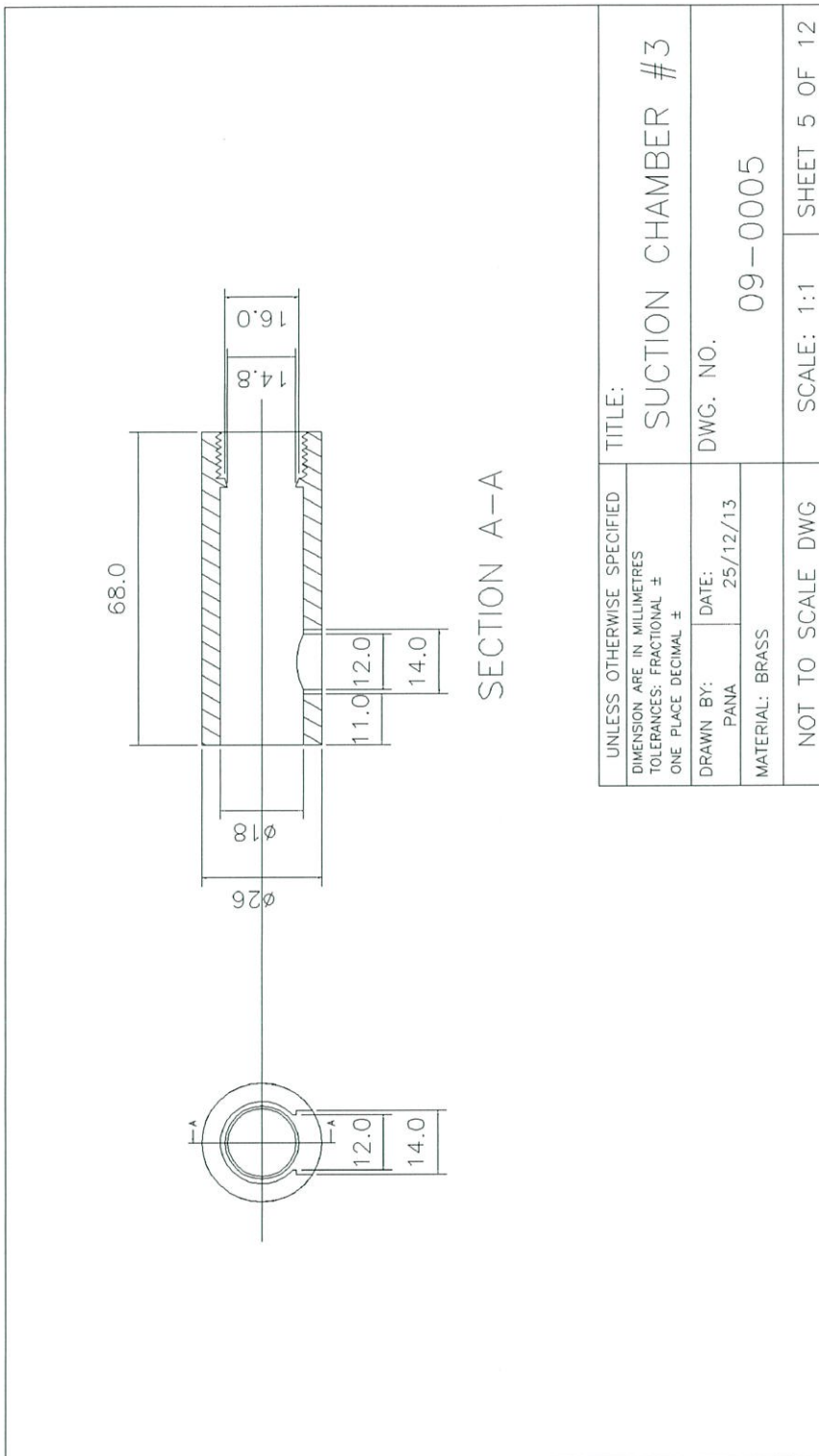
รูปที่ 17 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ D_j หรือ 6 มิลลิเมตร และขนาดรูอากาศเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

4. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 2D_j หรือ 12 มิลลิเมตร และขนาดรูอากาศเท่ากับ 2D_j หรือ 12 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 18



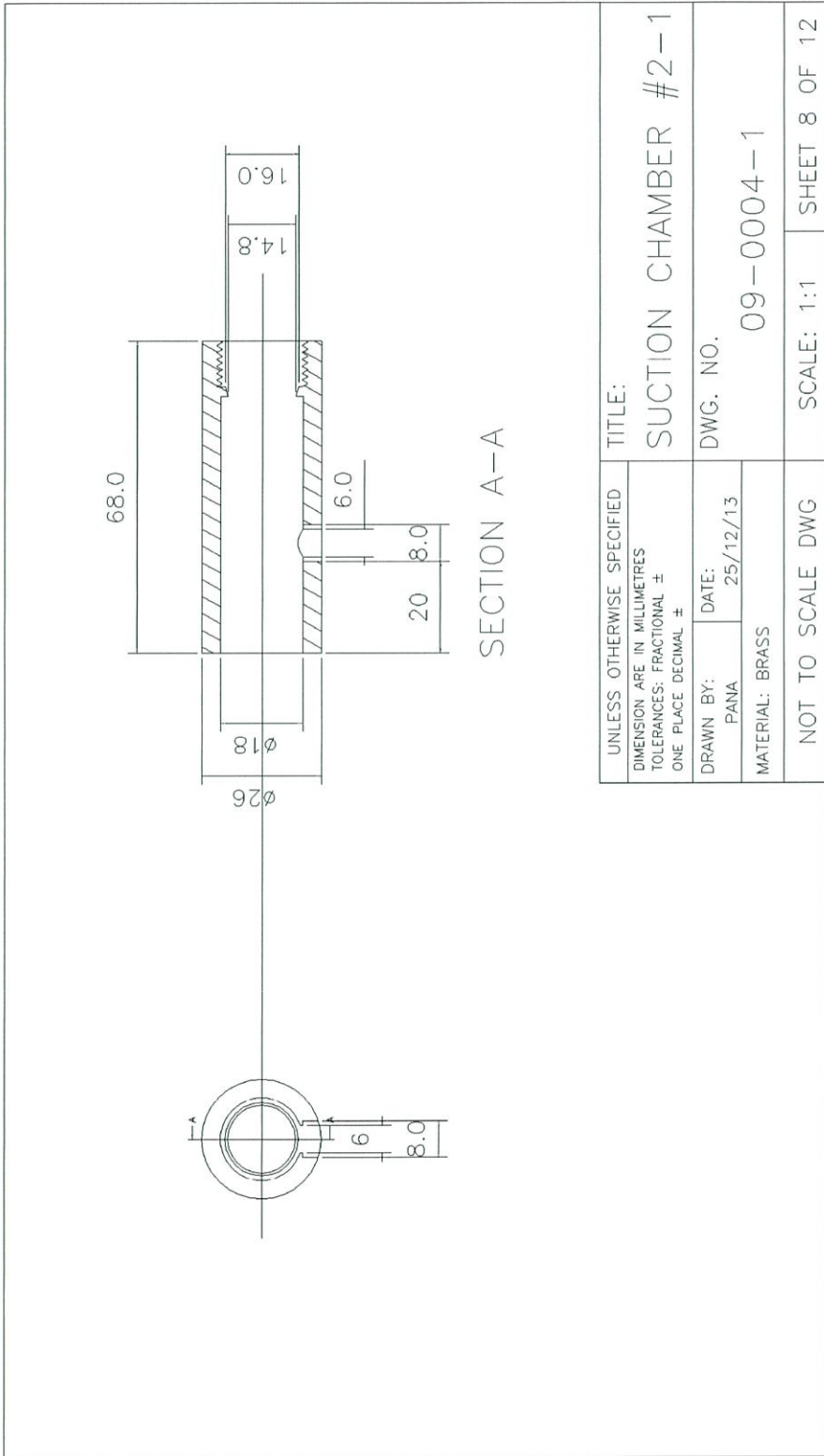
รูปที่ 18 แสดงแบบห้องผสมที่ตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 2D_j หรือ 12 มิลลิเมตร และขนาดรูอากาศเท่ากับ 2 D_j หรือ 12 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

5. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 3D; หรือ 18 มิลลิเมตร และขนาดรูอากาศเท่ากับ 2D; หรือ 12 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 19



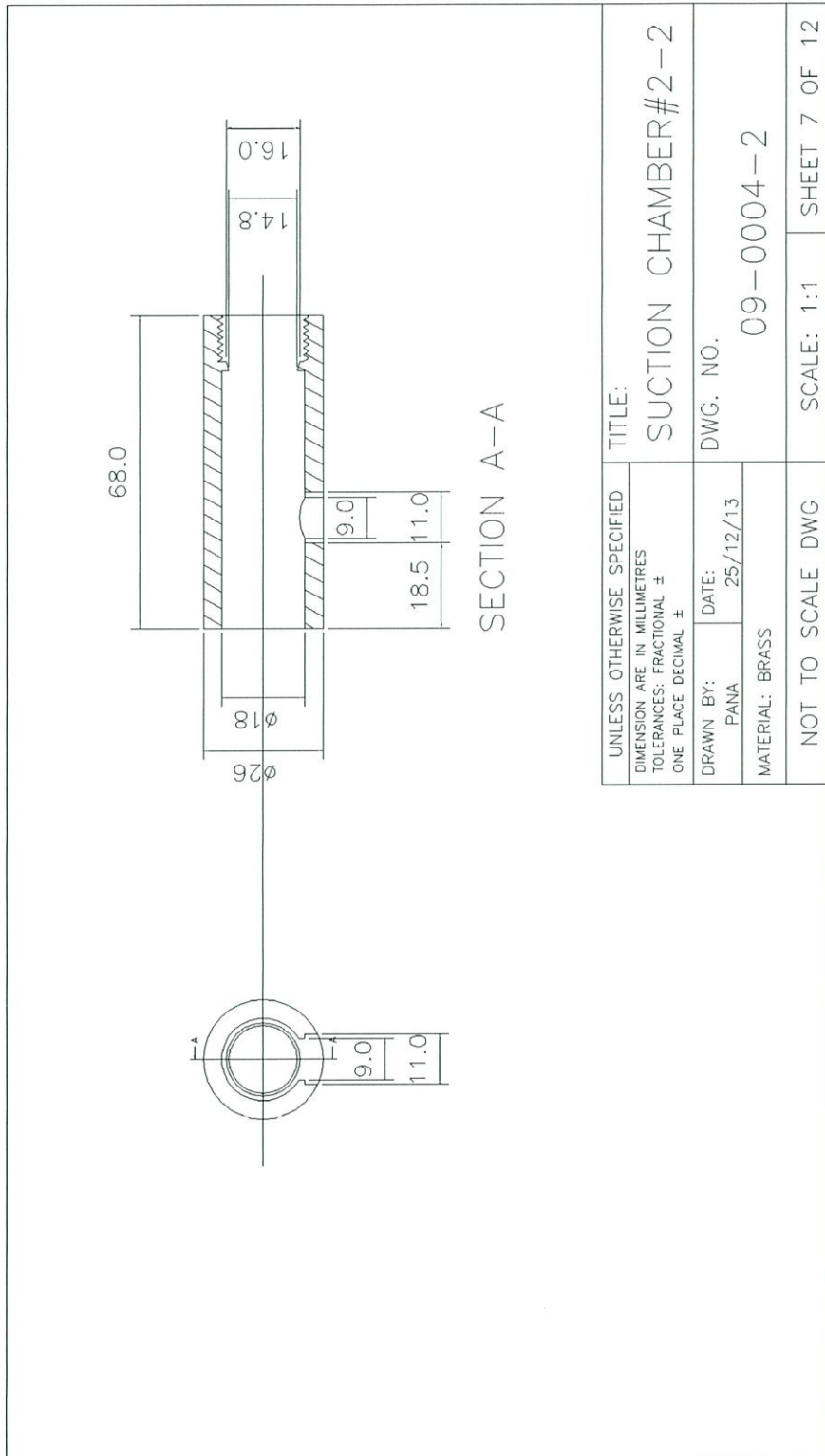
- รูปที่ 19 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 3D; หรือ 18 มิลลิเมตร และขนาดรูอากาศเท่ากับ 2D; หรือ 12 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

6. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 2D; หรือ 12 มิลลิเมตรและขนาดรูอากาศเท่ากับ 1D; หรือ 6 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 20



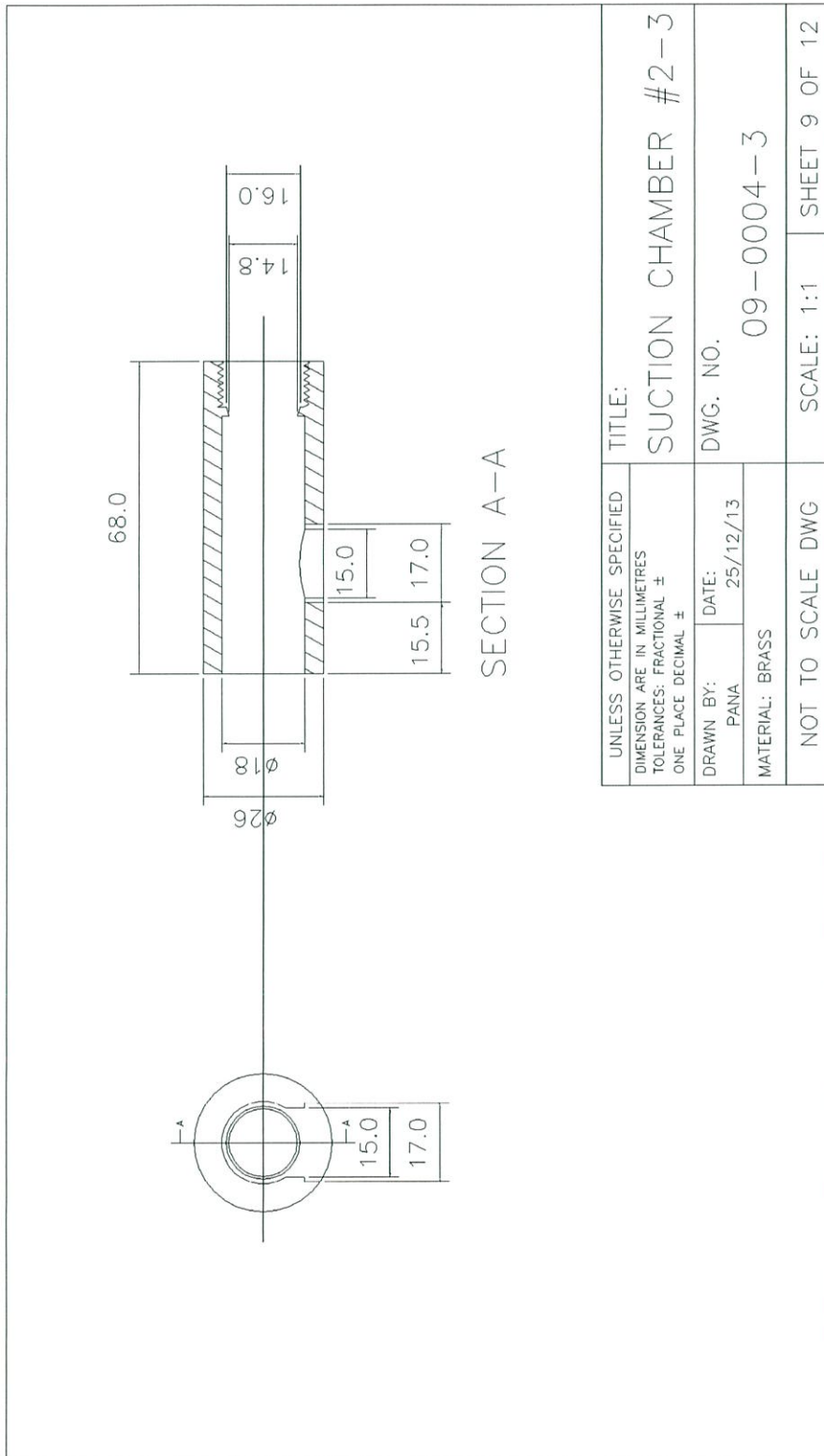
รูปที่ 20 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 2D; หรือ 12 มิลลิเมตรและขนาดรูอากาศเท่ากับ 1D; หรือ 6 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

7. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 2D_j หรือ 12 มิลลิเมตรและขนาดรูอากาศเท่ากับ 1.5D_j หรือ 9 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 21



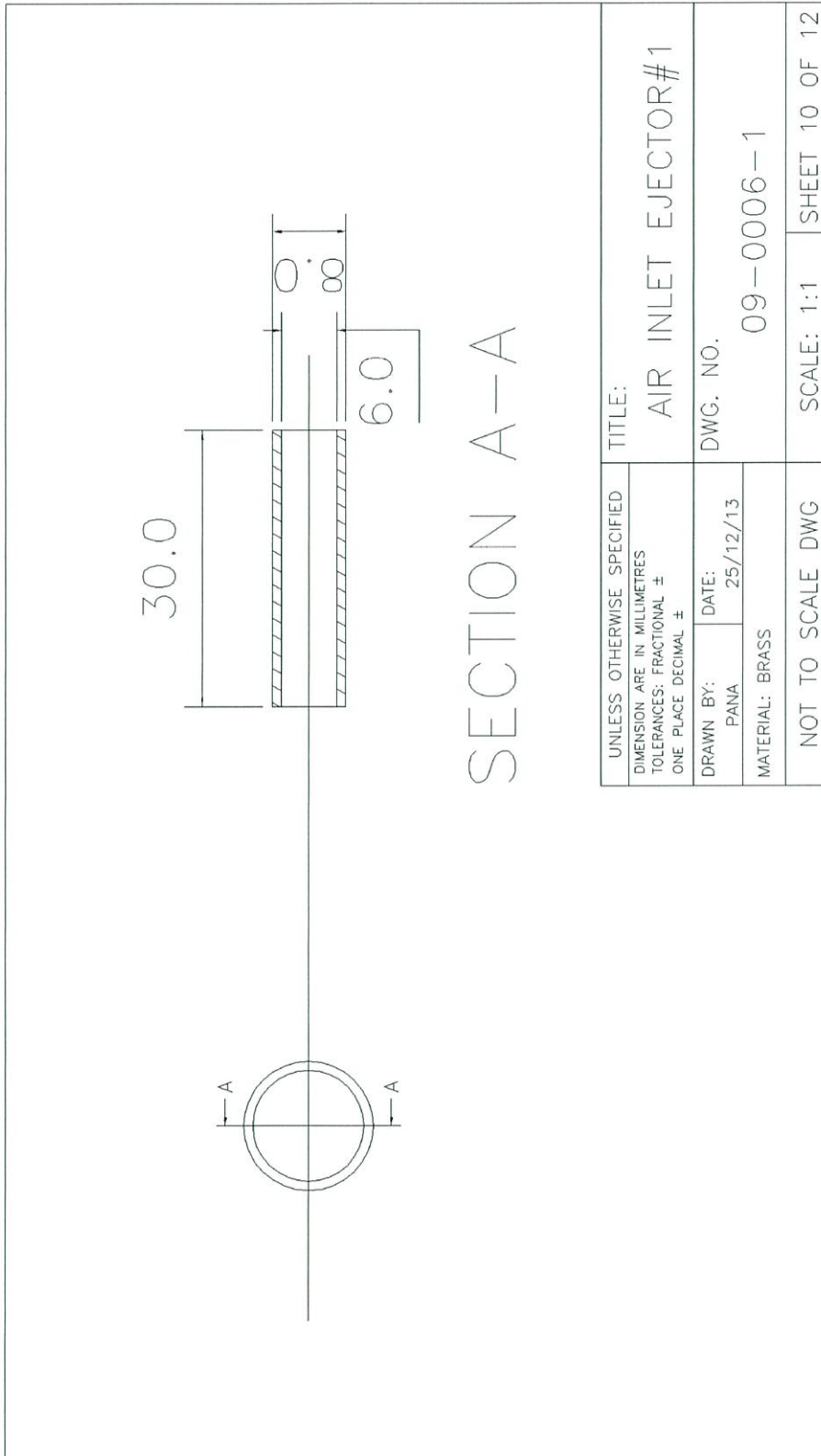
รูปที่ 21 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 2D_j หรือ 12 มิลลิเมตรและขนาดรูอากาศเท่ากับ 1.5D_j หรือ 9 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

8. ห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 2D_j หรือ 12 มิลลิเมตรและขนาดรูอากาศเท่ากับ 2.5D_j หรือ 15 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 22



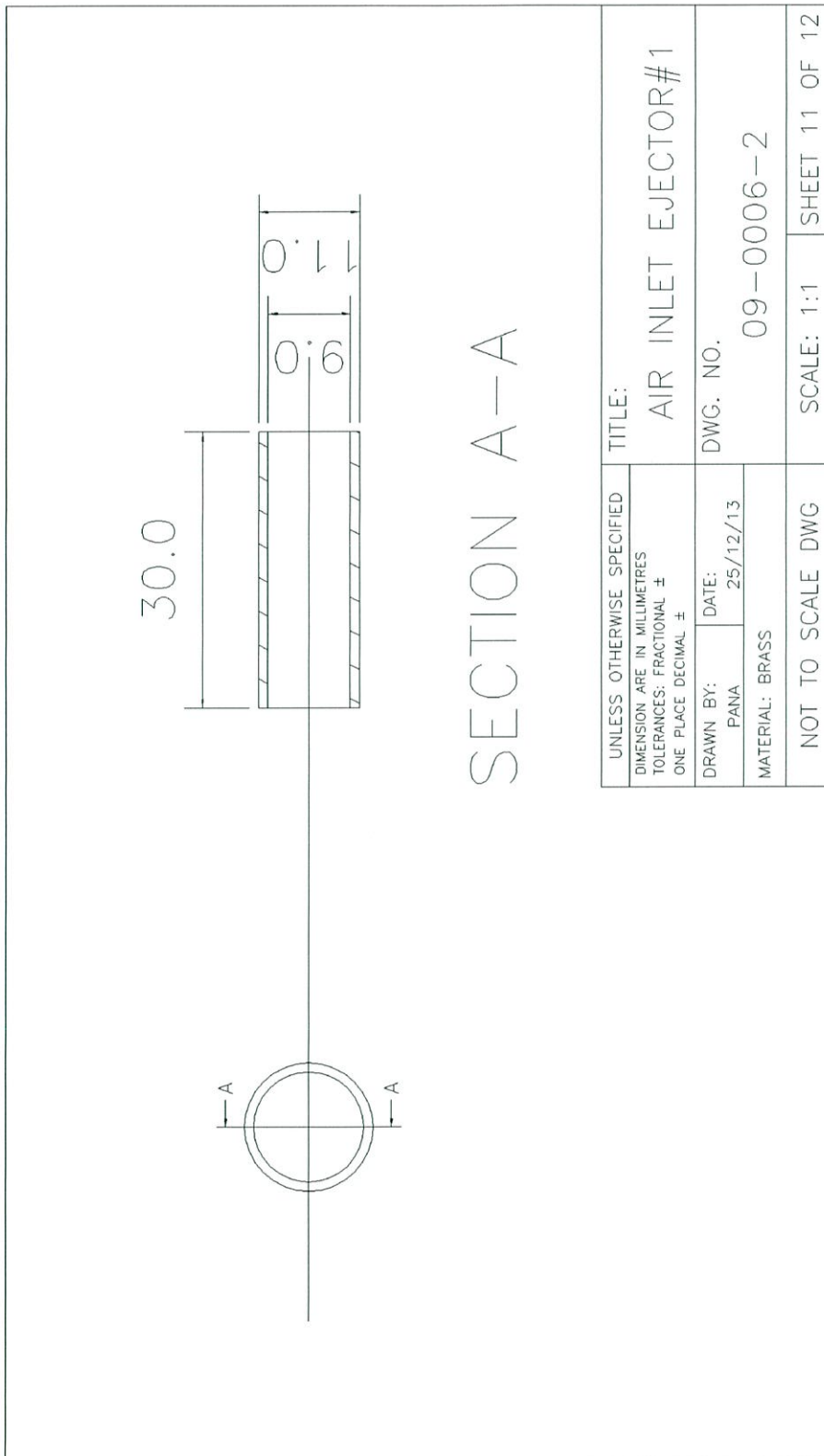
รูปที่ 22 แสดงแบบห้องผสมที่มีตำแหน่งรูอากาศเท่ากับ 2D_j หรือ 12 มิลลิเมตรและขนาดรูอากาศเท่ากับ 2.5D_j หรือ 15 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

9. ขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1D; หรือ 6 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 23



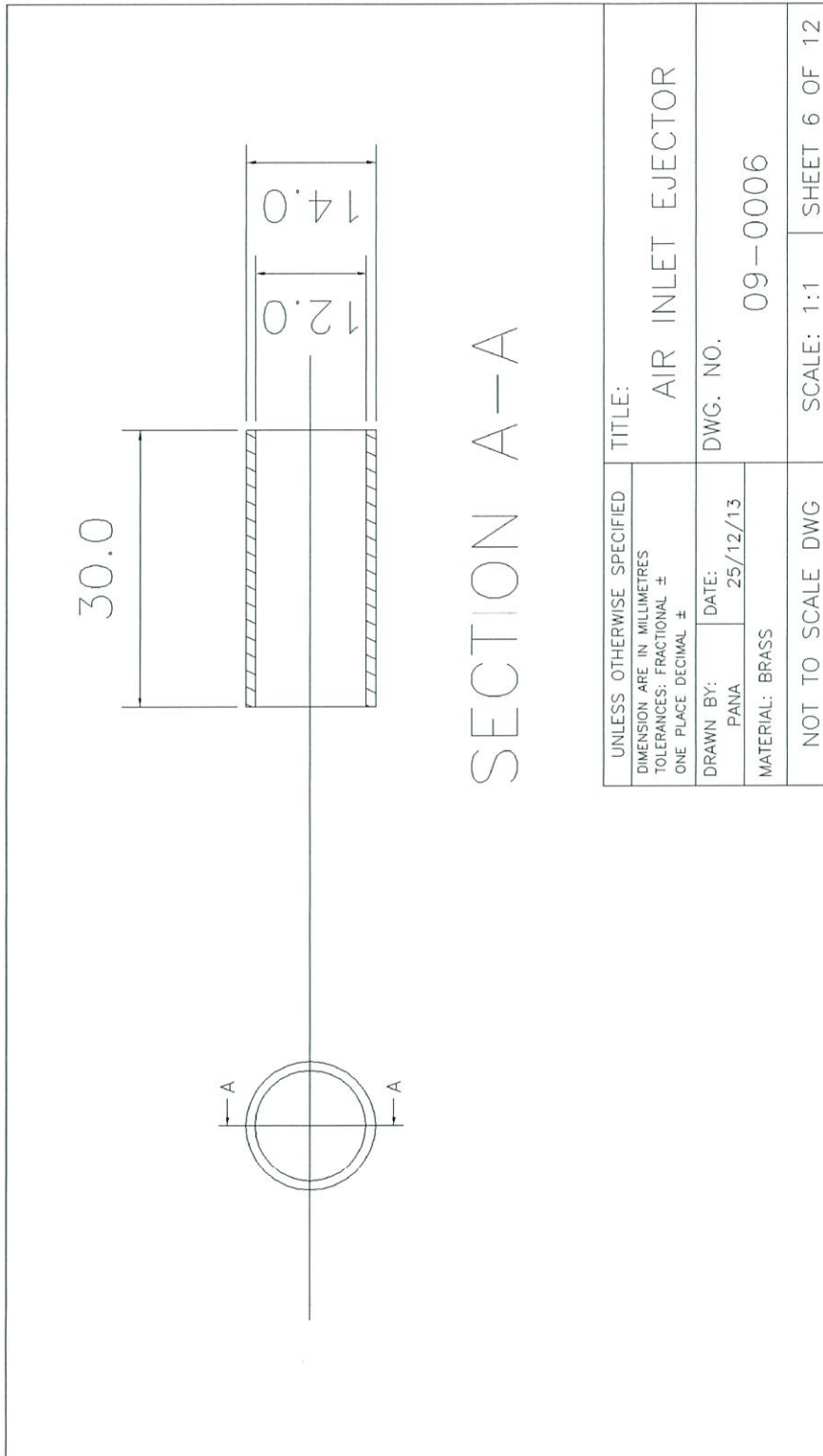
รูปที่ 23 แสดงแบบขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1D; หรือ 6 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

10. ขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5D; หรือ 9 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 24



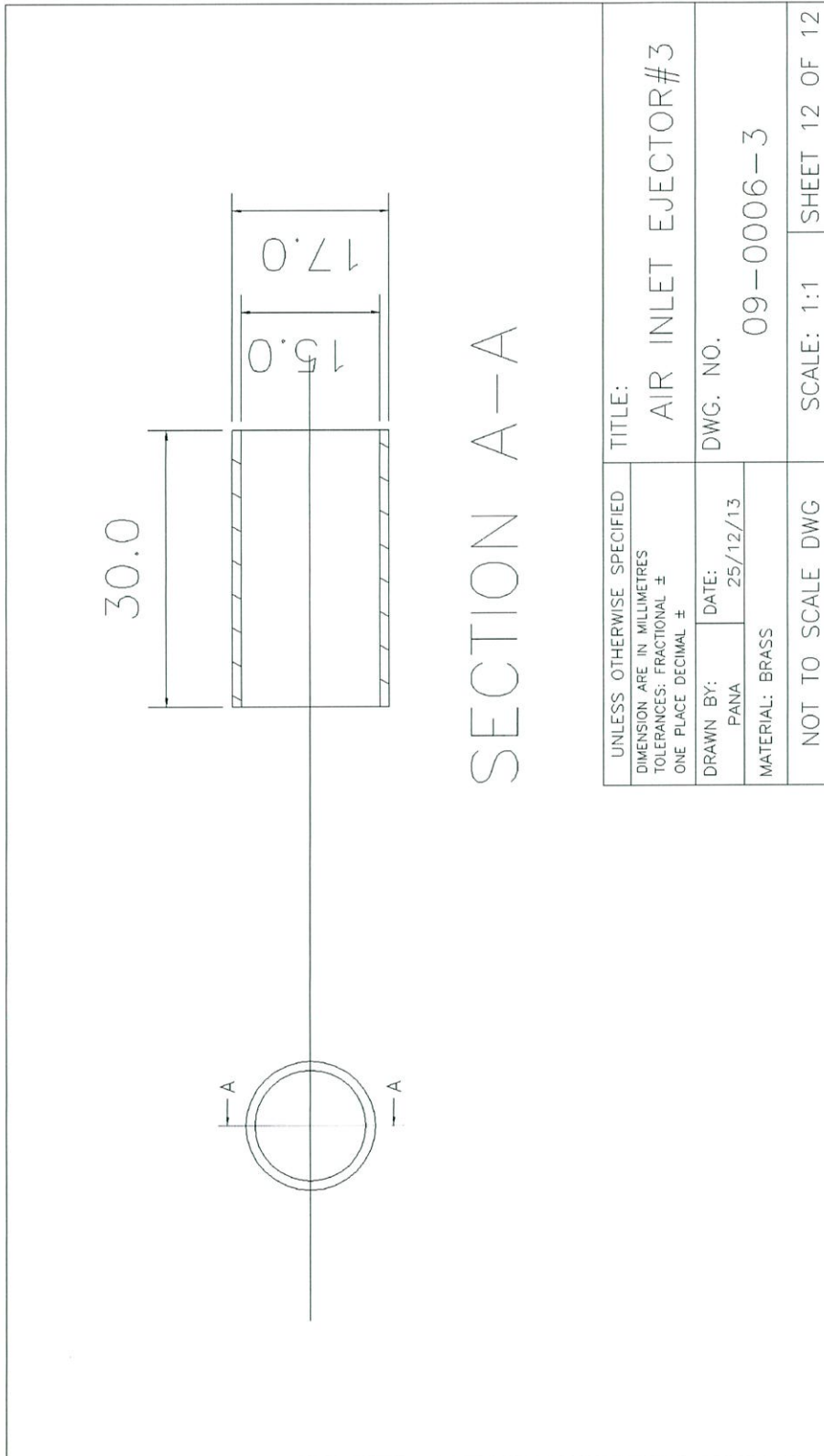
รูปที่ 24 แสดงแบบขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5D; หรือ 9 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

11. ขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 แสดงแบบขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ $2D_j$ หรือ 12 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto cad

12. ขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5D; หรือ 15 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 26



รูปที่ 26 แสดงแบบขนาดรูอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5D; หรือ 15 มิลลิเมตรโดยโปรแกรม Auto Cad

ภาคผนวก ง

ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที และ L_a เท่ากับ $1D_j$, $2D_j$ และ $3D_j$ แสดงข้อมูลความเร็วของอากาศที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงดังตารางที่ ง1 และอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณจากความเร็วแสดงดังตารางที่ ง2 เมื่อคำนวณเลขเรย์โนลด์ของอากาศเทียบกับเลขเรย์โนลด์ของน้ำแสดงข้อมูลดังตารางที่ ง3

ตารางที่ ง1 แสดงข้อมูลจากการวัดความเร็วของอากาศในการทดลองที่ L_a ต่างๆ

ค่าจากการทดลอง			
อัตราการไหลน้ำ (l/m)	$L_a = 3D_j$	$L_a = 2D_j$	$L_a = D_j$
	ความเร็ว (m/s)	ความเร็ว (m/s)	ความเร็ว (m/s)
20.1	0.41	0.49	0.46
18.67	0.34	0.42	0.37
17.24	0.22	0.35	0.29
15.81	0.17	0.24	0.22

ตารางที่ ง2 แสดงข้อมูลอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ L_a ต่างๆ

ค่าจากการทดลอง			
อัตราการไหลน้ำ (l/m)	$L_a = 3D_j$	$L_a = 2D_j$	$L_a = D_j$
	อัตราการไหลอากาศ (l/m)	อัตราการไหลอากาศ (l/m)	อัตราการไหลอากาศ (l/m)
20.1	6.97	8.33	7.82
18.67	5.78	7.14	6.29
17.24	3.74	5.95	4.93
15.81	2.89	4.08	3.74

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลของเลขเรย์โนลด์ของน้ำกับอากาศที่ L_a ต่างๆ

RE (น้ำ)	RE (อากาศ)		
	$L_a=3D_j$	$L_a=2D_j$	$L_a=1D_j$
70912.53	533.29	637.35	598.32
65867.49	442.24	546.3	481.26
60822.49	286.15	455.25	377.15
55777.47	221.12	312.17	286.15

ผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20.1, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อวินาทีที่ขนาด D_a เท่ากับ $1D_j$, $1.5D_j$, $2D_j$ และ $2.5D_j$ แสดงข้อมูลความเร็วของอากาศที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศที่อัตราการไหลต่างๆ ดังตารางที่ 4 และอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณจากความเร็วแสดงดังตารางที่ 5 เมื่อคำนวณเลขเรย์โนลด์ของอากาศเทียบกับเรย์โนลด์ของน้ำแสดงข้อมูลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลจากการวัดความเร็วของอากาศในการทดลองที่ D_a ต่างๆ

ตารางการทดลองขนาดรูอากาศ				
อัตราการไหลน้ำ (l/m)	$D_a=2.5D_j$	$D_a=2D_j$	$D_a=1.5D_j$	$D_a=1D_j$
	ความเร็วอากาศ (m/s)	ความเร็วอากาศ (m/s)	ความเร็วอากาศ (m/s)	ความเร็วอากาศ (m/s)
20.1	0.51	0.49	0.39	0.29
18.67	0.44	0.42	0.35	0.24
17.24	0.35	0.35	0.24	0.13
15.81	0.27	0.24	0.17	

ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ

ตารางการทดลองขนาดรูอากาศ				
อัตราการไหลน้ำ (l/m)	$D_a=2.5D_j$	$D_a=2D_j$	$D_a=1.5D_j$	$D_a=1D_j$
	อัตราการไหลอากาศ (l/m)	อัตราการไหลอากาศ (l/m)	อัตราการไหลอากาศ (l/m)	อัตราการไหลอากาศ (l/m)
20.1	8.67	8.33	6.63	4.93
18.67	7.48	7.14	5.95	4.08
17.24	5.95	5.9	4.08	2.21
15.81	4.59	4.08	2.89	

ตารางที่ ๖ แสดงข้อมูลของเลขเรย์โนลด์ของน้ำกับอากาศที่ D_a ต่างๆ

RE (น้ำ)	RE (อากาศ)			
	$D_a = 2.5D_j$	$D_a = 2D_j$	$D_a = 1.5D_j$	$D_a = 1D_j$
70912.53	663.36	637.35	507.27	377.21
65867.49	572.31	546.3	455.25	312.17
60822.49	455.25	455.25	312.17	169.09
55777.47	351.19	312.17	221.12	

ผลจากการวัดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบโดยใช้ Clamp-On power meter เพื่อหาสมรรถนะการเติมอากาศแสดงข้อมูลดังตารางที่ ๗

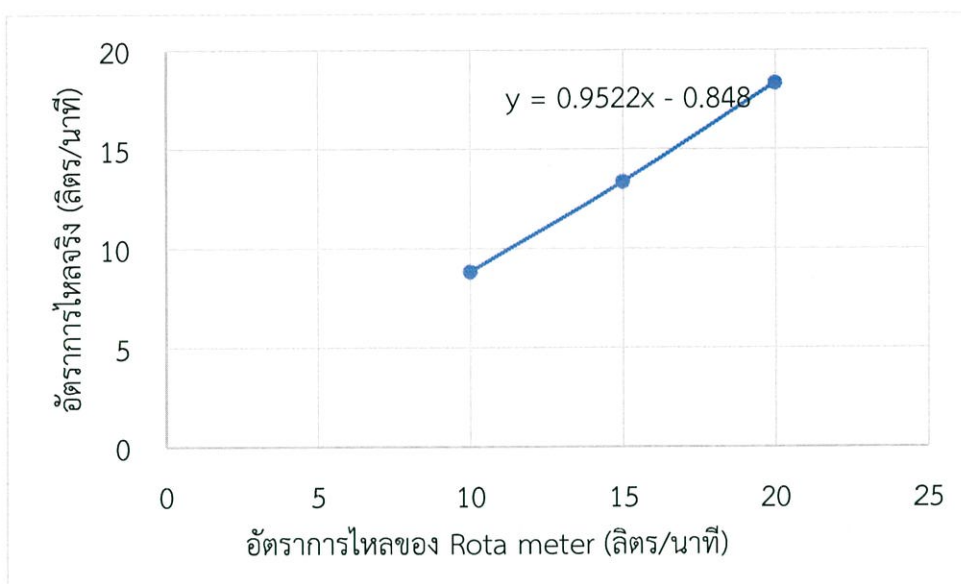
ตารางที่ ๗ แสดงข้อมูลของปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศ

อัตราการไหลอากาศ (l/min)	Voltage	Amp	PF	กำลัง (KW)	ปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศ (kgO ₂ /kW.Hr)
8.67	217	1.643	0.98	349.40	0.36
7.48	217	1.632	0.98	347.06	0.31
5.95	217	1.617	0.98	343.87	0.25
4.59	217	1.608	0.98	341.95	0.19

การใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำต้องมีการเทียบวัดหาความแม่นยำของเครื่องมือ ตารางที่ ๘ แสดงข้อมูลการเทียบวัดของเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ และกราฟในการเทียบวัดดังรูปที่ 27

ตารางที่ ๘ แสดงข้อมูลการเก็บค่าของเวลาในการเทียบวัดของ Rota meter

Q(rota)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	ตำแหน่ง
10	33	32	35.83	33.73	35.03	34.22	34.56	34.55	33.91	34.61	เวลา (s)
15	22.21	22.48	22.03	22.51	22.13	23.03	22.33	22.86	22.63	22.9	
20	16.31	16.6	15.93	16.69	16.33	16.05	16.33	16.45	16.38	16.91	



รูปที่ 27 กราฟการเทียบวัดของ Rota meter