รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว

Dimension Ratio of Inducing Jet for Gas-Liquid Mixing

นางสาวณัตวิภา เจียระไนวชิระ

b00274602
RC00204

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว” ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนโครงการวิจัยงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 ทางคณะผู้จัดทำ และศึกษาขอขอบคุณการสนับสนุนในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

ผศ.ดร.ณัตวิภา เจียระไนวชิระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว
แหล่งเงิน โครงการวิจัยงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556
จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2555 ถึง 30 กันยายน 2556

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร. ณัตวิภา เจียระไนวชิระ
หน่วยงานต้นสังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนี่ยวนำต่ออัตราการดูดอากาศเข้ามาในห้องผสม โดยนำเป็นของไหลหลักถูกฉีดผ่านหัวฉีดด้วยความเร็วสูงทำให้ความดันรอบๆบริเวณหัวฉีดลดลงและเหนี่ยวนำอากาศซึ่งเป็นของไหลรองจากภายนอกเข้ามาผสมกับของเหลวดังกล่าวโดยไม่ต้องใช้เครื่องอัดอากาศ การสร้างแบบจำลองอัตราการไหลของของไหลด้วยโปรแกรมคำนวณพฤติกรรมการไหลของของไหลและทำการเปรียบเทียบกับชุดทดลองจริงที่ออกแบบตามแบบจำลอง อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ มีทั้งหมด 4 ค่า คือ 20.10, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที ผลที่ได้คือค่าอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดที่ทำให้อัตราการดูดอากาศมีค่าสูงที่สุด และสมรรถนะการดูดอากาศในรูปของมวลออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Dimension Ratio of Inducing Jet for Gas-Liquid Mixing
Researcher: Asst. Prof. Nuthvipa Jayranaiwachira
Faculty: Engineering **Department:** Mechanical Engineering

Abstract

By injecting high velocity water as the primary fluid through the vertical down-flow ejector, the pressure around the ejector is dropped and entrained the surrounding air to mix with the liquid. In this work, effects of dimension ratios of liquid jet ejector to the air suction rate were investigated. The Computational Fluid Dynamics (CFD) models have been used to obtain the results and validated with experiments. Dimensions of ejector are studied in terms of nozzle diameter (Dj), diameter (Dc) and length (Lc) of mixing chamber, air inlet diameter (D a) and position of air inlet referred to nozzle edge (La). Both simulation and experimental results show that dimension ratios which give the highest air suction rate with every water flow rates are Dc=3Dj, Lc=6Dj, La=2Dj and Da=2.5Dj. According to these dimension ratios, the performance of the ejector in air inducing are 0.36, 0.31, 0.25 and 0.19 kg air/kW-h at water flow rates of 20.10, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง IX
สารบัญรูป X
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาของโครงงาน 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 1
1.4 ขอบเขตของโครงงาน 2
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม 3
2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎี 3
2.1.1 ลักษณะเฉพาะของเจ็ท 3
2.1.2 พฤติกรรมของเจ็ท 3
2.1.2.1 เจ็ทอิสระ (Free Jets) 3
2.1.2.2 ความยาวเจ็ท 4
2.1.3 ผลกระทบจากตัวแปรต่างๆต่อการกระจายตัวของเจ็ท 4
2.1.3.1 ผลกระทบจากความปั่นป่วน 4
2.1.3.2 ผลกระทบจากความหนืด 4
2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ 5
2.2.1 การออกแบบและการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม 5
2.2.2 การออกแบบและการสร้างชุดทดลอง 5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6
3.1 ทฤษฎีเจ็ท 6
3.1.1 โครงสร้างและการพัฒนาของเจ็ทอิสระ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อการกระจายของเจ็ท 8
3.1.2.1 รูปแบบของความเร็วเจ็ท ณ ปลายหัวฉีด 8
3.1.2.2 รูปทรงของหัวฉีด 9
3.1.2.3 ครึ่งความกว้างและจุดกำเนิดเสมือนของเจ็ท 10
3.1.2.4 ความไม่เสถียรของเจ็ท 11
3.1.2.5 ความต่อเนื่องของโครงสร้าง 11
3.1.2.6 การกระจายตัวแบบอุณหภูมิคงที่และไม่คงที่ 12
3.1.2.7 การจำลองตัวเอง 12
3.1.2.8 บทบาทของผนังด้านข้างต่อกระแสเจ็ท 13
3.1.2.9 มาตราส่วนความยาวของความปั่นป่วน 13
3.2 ทฤษฎีการเติมอากาศและการถ่ายเทมวลระหว่างฟองอากาศและน้ำ 14
3.2.1 หลักการคำนวณมวลสารที่ถูกถ่ายเท 15
3.2.2 ปัจจัยที่ทำให้ออกซิเจนในน้ำมีมากหรือน้อย 18
3.3 รูปแบบไร้มิติของสมการการขนถ่ายของไหล 19
3.3.1 กฎอนุรักษ์มวล (กฎความต่อเนื่อง) 20
3.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม 21
3.4 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล 22
3.4.1 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล 22
3.4.1.1 ขั้นก่อนประมวลผล 22
3.4.1.2 ขั้นประมวลผล 22
3.4.1.3 ขั้นแสดงผล 23
3.4.2 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล 23
3.4.2.1 ความเข้ากันได้ 23
3.4.2.2 เสถียรภาพการคำนวณ 23
3.4.2.3 การลู่เข้าของผลเฉลย 24
3.4.2.4 การอนุรักษ์ 24
3.4.2.5 ความจำกัดขอบ 24
3.4.2.6 ความเสมือนจริง 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2.7 ความหนาแน่น 24
3.4.3 รูปแบบการจัดวางกริด 25
3.4.4 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข 26
3.4.4.1 แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง 26
3.4.4.2 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง 27
3.4.4.3 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง 27
3.4.4.4 แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติค 29
3.4.5 การดิสเครทไทต์สมการควบคุม 30
3.4.6 การดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์มวล 30
3.4.7 ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการควบคุมในการไหลคงตัว 30
3.4.8 การจำลองโมเดลแบบปั่นป่วน 31
3.4.9 Renormalization-group (RNG) k-ε model 31
3.4.10 Mathematical Algorithm of the Renormalization k-ε model 32

บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองและชุดทดลอง 33
4.1 การสร้างแบบจำลอง 33
4.1.1 การสร้างรูปร่างหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) 33
4.1.2 การสร้างขอบเขตย่อยด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) 34
4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) 35
4.1.4 การกำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้น 35
4.1.5 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร และสภาวะการแก้ปัญหา 35
4.1.6 กรณีศึกษา 36
4.2 ชุดทดลองและวิธีการทดลอง 40
4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง 40
4.2.1.1 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ (Jet Head) 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1.2 ห้องผสม (Mixing Chamber) 41
4.2.1.3 หัวต่อท่ออากาศ (Air Inlet) 42
4.2.2 ถังผสม (Mixing Tank) 43
4.2.3 ระบบสูบน้ำ ท่อ และอุปกรณ์ต่างๆ (Water Pump, pipes and Tools) 43
4.2.3.1 เครื่องสูบน้ำ 43
4.2.3.2 วาล์ว(Valve) 44
4.2.3.3 สายยาง (Rubber Tube) 44
4.2.3.4 ชุดท่อพีวีซี (PVC pipes and joints) 46
4.2.4 เครื่องมือวัด (Measuring Equipment) 45
4.2.4.1 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer) 45
4.2.4.2 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Rota Meter) 46
4.2.4.3 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Clamp on Power meter) 46
4.2.5 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ (Canon EOS 7D) 47
4.3 วิธีการทดลอง 47

บทที่ 5 ผลการสร้างแบบจำลองและการทดลอง 48
5.1 ผลการสร้างแบบจำลอง 48
5.2 ผลการทดลอง 60

บทที่ 6 วิจารณ์และสรุปผลการทดลองและการจำลอง 69
6.1 วิจารณ์ผลการทดลองและการจำลอง 69
6.2 สรุปผลการทดลองและการจำลอง 69

เอกสารอ้างอิง 70

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การตีพิมพ์ที่ได้รับการเผยแพร่ 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

5.1 อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณ 59

5.2 อัตราการไหลของน้ำเทียบกับปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศ 65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	ลักษณะกระแสการไหลของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดพ่น	6
3.2	ตำแหน่งของจุดกำเนิดเสมือนและระยะครึ่งความกว้าง	10
3.3	ความปั่นป่วนในเจ็ท	11
3.4	พฤติกรรมของรูปแบบความเร็วของเจ็ทเมื่อมีผนังด้านข้าง	13
3.5	การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศสู่หยดน้ำ	14
3.6	การถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศสู่ของเหลวที่ห่อหุ้ม	14
3.7	แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ	25
3.8	รูปแบบการจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ	26
3.9	รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติคในปริมาณควบคุมแบบ 1 มิติ	27
4.1	(ก) แบบของชุดหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง	33
	(ข) ตัวแปรของระยะต่างๆ ในชุดทดลองหัวฉีด	33
4.2	แบบจำลองของชุดหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT)	34
4.3	(ก) รูปแบบของขอบเขตย่อยของชุดหัวฉีด, (ข) จำนวนขอบเขตย่อย	34
4.4	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของชุดหัวฉีด	35
4.5	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และที่ขนาด D_j เท่ากับ4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	37
4.6	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และที่ขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	38
4.7	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	38
4.8	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 8 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	39
4.9	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	40
4.10	(ก) แผนผังโครงสร้างชุดทดลอง, (ข) การติดตั้งชุดทดลองของจริง	40
4.11	(ก) แบบของหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวฉีดเจ็ทที่ใช้ในการทดลอง	41
4.12	(ก) แบบของห้องผสมที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ห้องผสมขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง	41
4.13	(ก) แบบของห้องผสมที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ห้องผสมขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.14	(ก) แบบของรูอากาศที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวต่อท่ออากาศที่ใช้ในการทดลอง	42
4.15	ถังผสม (Mixing-Tank) ที่ใช้ในการทดลอง	43
4.16	เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลอง	43
4.17	เกทวาล์ว	44
4.18	โกลบวาล์ว	44
4.19	สายยางขนาดใหญ่	45
4.20	ชุดท่อพีวีซี	45
4.21	เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer)	46
4.22	เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ	46
4.23	เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า	46
4.24	กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ	47
5.1	แสดงแผนผังความเร็วที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $3D_j$	49
5.2	แสดงแผนผังความดันที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และL_c เท่ากับ $3D_j$	49
5.3	แสดงแผนผังความเร็วที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$	50
5.4	แสดงแผนผังความดันที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$,$5D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$	50
5.5	แสดงแผนผังความเร็วที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $9D_j$	51
5.6	แสดงแผนผังความดันที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $9D_j$	51
5.7	แสดงถึงแผนผังความเร็ว (ซ้าย) และแผนผังความดัน (ขวา) ที่ D_c เท่ากับ $3D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$	51
5.8	(ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน ที่อัตราการไหล 20.1 ลิตรต่อนาที	52
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน	52
5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก	53
5.11	(ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน ที่อัตราการไหล 18.67 ลิตรต่อนาที	53
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน ที่ที่อัตราการไหล 18.67 ลิตรต่อนาที	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก	54
5.14	(ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน ที่อัตราการไหล 17.24 ลิตรต่อนาที	55
5.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน ที่อัตราการไหล 17.24 ลิตรต่อนาที	55
5.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก	56
5.17	(ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน ที่อัตราการไหล 15.81 ลิตรต่อนาที	56
5.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน ที่อัตราการไหล 15.81 ลิตรต่อนาที	57
5.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก	57
5.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและอากาศ	60
5.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์น้ำและอากาศของ L_a ต่างๆ ที่ได้จากการจำลอง	60
5.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ อัตราการไหลของอากาศที่ L_a ต่างๆ	61
5.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับ อัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ	62
5.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์น้ำและอากาศที่ L_a ต่างๆ	62
5.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์น้ำและอากาศที่ D_a ต่างๆ	63
5.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำ กับอัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ	64
5.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์น้ำและอากาศที่ D_a ต่างๆ	64
5.28	(ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $1D_j$	66
5.29	(ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $2D_j$	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.30	(ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $3D_j$	67
5.31	(ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1D_j$	68
5.32	(ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1.5D_j$	68
5.33	(ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $2.5D_j$	69

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน

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

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

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนี่ยวนำต่อสมรรถนะการผสมระหว่างของเหลวและก๊าซ

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของการผสมระหว่างของเหลวและก๊าซ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดที่เหมาะสมที่สุดในการผสมของของของเหลวและก๊าซ

1.3.2 สามารถนำไปใช้กับการเติมอากาศหรือโอโซนในถังปิดสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย

1.3.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมเครื่องผสมแก๊สกับของเหลวและสามารถปรับขนาดตามการใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของโครงงาน

1.4.1 ของเหลวหลักที่ใช้ในการศึกษาคือน้ำที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ และก๊าซที่ถูกเหนี่ยวนำคืออากาศที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ

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

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

1.4.6 ประสิทธิภาพของหัวฉีดเหนี่ยวนำวัดจากอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ที่ถูกดูดเข้าไปยังห้องผสม และทำการคำนวณแปลงเป็นกรัมของออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ของปั๊ม และประสิทธิภาพการผสมได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายของลำฟองอากาศที่เกิดขึ้นในถังเติมอากาศ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีเจ็ท

ทฤษฎีเจ็ทเป็นทฤษฎีหลักที่ใช้ในการคำนวณและคาดเดาแนวโน้มในโครงงานวิจัยนี้ การศึกษาและทบทวนวรรณกรรมต่างๆจึงมุ่งเน้นไปยังวรรณกรรมที่เกี่ยวกับทฤษฎีเจ็ทเป็นหลักโดยสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 ลักษณะเฉพาะของเจ็ท

การไหลแบบปั่นป่วนถูกนำมาพิจารณาเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือช่วยในการกระจายตัวของของไหลชนิดหนึ่งไปสู่อีกชนิดหนึ่งและเพื่อสร้างพื้นที่ที่เกิดการสัมผัสกัน สำหรับการถ่ายเทมวลระหว่างของเหลวและก๊าซส่วนมากนั้น การกระจายตัวของของไหลชนิดหนึ่งไปสู่อีกชนิดเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง ตัวอย่างเช่น ความเร็วของเจ็ท ความแตกต่างของความดัน รูปทรงของหัวฉีด อุณหภูมิของของไหลทั้งสองชนิด และคุณสมบัติของของไหลต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ความเค้นที่ผิวสัมผัส ความดันไอ เป็นต้น

การกระจายตัวของเจ็ทได้ถูกศึกษาโดยนักวิจัยจำนวนมากเป็นเวลานับศตวรรษ โดยเพลโต [7] กล่าวไว้ว่าการกระจายตัวของเจ็ทมีระยะเท่ากับ 2π เท่าของรัศมีหัวฉีด เรย์ลี่ [7] อธิบายว่าความไม่เสถียรของพลศาสตร์ของไหล (Hydrodynamic Instability) มีผลต่อการกระจายตัวของเจ็ท เวเบอร์ [8] ได้ศึกษาผลกระทบจากความหนาแน่นของของไหลรอบนอกเจ็ทและความหนืด นอกเหนือจากนั้น โทโมติกะ [9] อธิบายถึงอัตราส่วนที่ดีที่สุดของความหนืดของของไหลรอบนอกและของเจ็ทที่ทำให้เจ็ทมีอัตราการขยายตัวสูงที่สุด แชนดราเซคาร์ [10] อธิบายความหนืดของเจ็ทไว้อย่างละเอียดเช่นเดียวกับความหนาแน่น ซึ่งในการวิจัยของเรย์ลีไม่ได้พิจารณาในส่วนนี้ และได้พิสูจน์ด้วยกรรมวิธีทางคณิตศาสตร์ว่าเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น อัตราการกระจายตัวของเจ็ทลดลง

2.1.2 พฤติกรรมของเจ็ท

2.1.2.1 เจ็ทอิสระ (Free Jets)

เจ็ทอิสระที่ออกจากหัวฉีดทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของไหลรอบนอก เป็นผลให้เจ็ทมีความเร็วลดลงและขยายตัวกว้างขึ้น โมเมนตัมทั้งหมดซึ่งถูกอนุรักษ์อยู่ในรูปของโมเมนตัมของเจ็ทจะถ่ายเทไปยังของไหลที่ถูกเหนี่ยวนำ เจ็ทที่มีเลขเรย์โนลด์สูงกว่า 2000 ให้พิจารณาเป็นเจ็ทอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 ความยาวเจ็ท

เจ็ทความเร็วสูงที่ออกจากหัวฉีดถ้าพิจารณาจากบริเวณปลายหัวฉีดนั้น มีเอกลักษณ์ที่แตกต่างกันในระยะทางต่างๆ ดังต่อไปนี้

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

2.1.3 ผลกระทบจากตัวแปรต่างๆต่อการกระจายตัวของเจ็ท

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของเจ็ทมีมาก ทั้งความดันที่สภาวะแวดล้อม ผลกระทบจากความปั่นป่วนของเจ็ท ความหนืดของของไหลทั้งในเจ็ทและของไหลรอบนอก เป็นต้น ผลกระทบดังกล่าวได้อธิบายในหัวข้อต่อไปนี้

2.1.3.1 ผลกระทบจากความปั่นป่วน

คุณสมบัติของเจ็ทนั้นมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับการก่อตัวขึ้นของความปั่นป่วนที่ปลายหัวฉีดเป็นอย่างมาก เฟียท์และวู [11] ยืนยันเรื่องนี้โดยการเปลี่ยนแปลงสภาวะที่ปลายหัวฉีด ซึ่งได้ผลคืออัตราการผสมเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของความปั่นป่วนของเจ็ทเพิ่มขึ้น และนำเสนอการวิเคราะห์สำหรับเจ็ทปั่นป่วนโดยสมบูรณ์

2.1.3.2 ผลกระทบจากความหนืด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 เพื่อสร้างสมการคาดเดาค่าการไหลเข้าของอากาศ โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติการบีบอัดของอากาศ ค่าความดันที่เสียไปในของไหลสองเฟส และพลังงานที่เสียไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่หน้าตัด ยูโทโมะและคณะ [3] ได้ศึกษารูปแบบของการถ่ายเทมวลของของไหลสองชนิดคือแก๊สและของเหลว (อากาศและน้ำ ตามลำดับ) โดยใช้การจำลอง 3 มิติด้วยโปรแกรม CFD โดยกำหนดตัวแปรควบคุมคือ อัตราส่วนของอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำในช่วง 0.2-1.2 อัตราส่วนของความยาวท่อต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดในช่วง 4-10 โดยผลสรุปออกมาว่าที่อัตราส่วนของความยาวท่อผสมต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดมีค่า 5.5 ความสามารถในการถ่ายเทมวลเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ ในขณะที่ที่อัตราส่วนของความยาวท่อผสมต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดมีค่า 4.0 ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลเชิงปริมาตรมีค่าสูงที่สุดที่ค่าอัตราการไหลของอากาศต่อน้ำมีค่าเป็น 0.6

2.2.2 การออกแบบและการสร้างชุดทดลอง

ชุดทดลองที่ถูกออกแบบมาในโครงงานนี้ทำขึ้นโดยพิจารณาให้มีสรรถนะการเติมอากาศสูงที่สุด และมีพลังงานที่สูญเสียไปน้อยที่สุด เบย์ล่าร์ [6] ได้ทำการทดลองเพื่อหาผลกระทบของขนาดและอัตราส่วนเชิงมิติของท่อเวนทูรี่ต่ออัตราการเติมฟองอากาศ โดยมุมของหัวฉีดที่มีการสูญเสียความดันผ่านหัวฉีดน้อยที่สุดคือ 21 องศา (ASME MFC-3M-1989) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราการไหลของอากาศผ่านท่อเวนทูรี่ต่ออัตราการไหลของน้ำมีค่าสูงที่สุด เมื่ออัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของฐานหัวฉีด จำลอง ปราบแก้ว [15] กล่าวถึงค่าอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดและห้องผสมที่มีสมรรถนะดีที่สุดนั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองรูปแบบห้องผสมในโครงงานนี้ คือ ความยาวของห้องผสมนั้นมีค่าเป็น 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

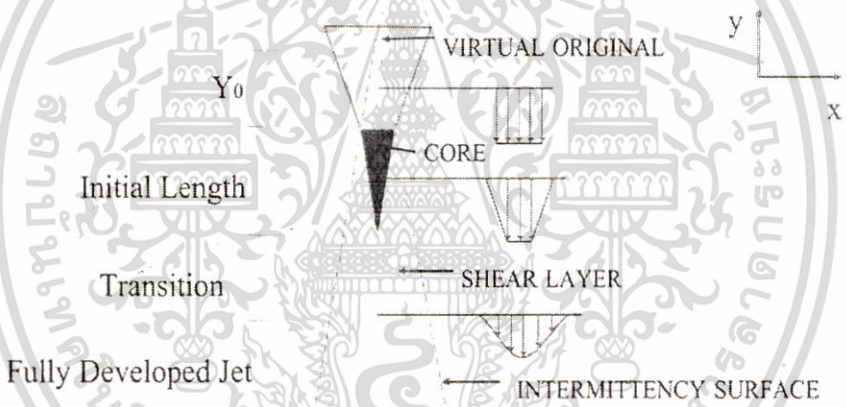
บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีเจ็ท

3.1.1 โครงสร้างและการพัฒนาของเจ็ทอิสระ

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



รูปที่ 3.1 ลักษณะกระแสการไหลของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดพ่น

ลักษณะของของไหลในแต่ละบริเวณสามารถอธิบายได้ ดังนี้

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

<u>บริเวณที่ 2</u>: บริเวณเปลี่ยนแปลง (The transition zone) เจ็ทพยายามสร้างรูปร่างการไหลเป็นวงกลม เป็นบริเวณที่ความเร็วเส้นแกนกลางเริ่มเสื่อมและลดลง ความเร็วที่ลดลงนั้นสามารถประมาณค่าเป็นฟังก์ชั่นแปรผันตรงกับ $x^{-0.5}$ โดย x คือระยะห่างจากปลายหัวฉีดในแนวเส้นแกนกลาง บริเวณนี้เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงระยะ $6D_j$ ถึง $20D_j$ และทราบกันว่าเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาการผสมเมื่อชั้นความเค้นจากทั้งสองด้านเริ่มบรรจบกัน

<u>บริเวณที่ 3</u>: บริเวณจำลองตัวเอง (The self similar zone) ในบริเวณนี้รูปร่างของความเร็วที่เส้นแกนกลางมีลักษณะคล้ายๆ กันในทุกๆ จุดบนระยะ x และความเร็วที่เส้นแกนกลางจะลดลงเป็นฟังก์ชั่นแปรผันตรงกับ x^{-1}

<u>บริเวณที่ 4</u>: บริเวณสลายตัว (The termination zone) ความเร็วที่เส้นแกนกลางของเจ็ทจะลดลงอย่างรวดเร็วในบริเวณนี้ ถึงแม้ว่ามีการศึกษาพฤติกรรมของของไหลในบริเวณนี้โดยนักวิจัยจำนวนมาก แต่กลไกของพฤติกรรมของของไหลในบริเวณนี้ยังคงไม่เป็นที่เข้าใจอย่างแท้จริง

ในบริเวณที่ 2 กระแสเจ็ทที่ถูกฉีดออกมามีพฤติกรรมในการสร้างรูปร่างการไหลเป็นวงกลม ความสัมพันธ์ของความเร็วเส้นแกนกลางของเจ็ทกับความเร็วเริ่มต้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{\bar{U}_x}{\bar{U}_0} = K\frac{\sqrt{A_0}}{x} \tag{3.1}$$

หรือ

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

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

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

A_0 = พื้นที่หน้าตัดของช่องจ่ายของไหล, (m^2)

x = ระยะห่างระหว่างช่องจ่ายอากาศถึงจุดสังเกต, (m)

$\dot{Q}_0$ = อัตราการไหลของของไหลที่จุดจ่าย, (m^3)

K = ค่าคงที่ตามสัดส่วน

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

เจ็ทขยายออกเนื่องจากมีการดึงของไหลรอบนอกเจ็ทมาผสม ของไหลเหนือบริเวณที่ 2 ถูกเหนี่ยวนำมาผสมกับของไหลปฐมภูมิ อัตราส่วนของปริมาตรสุทธิของกระแสเจ็ทต่อปริมาตรเริ่มต้นที่ระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใดๆจากปลายหัวฉีดหลักๆ แล้วขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเร็วเริ่มต้น $\overline{U}_0$ ต่อความเร็วปลายทาง $\overline{U}_x$ อัตราการเหนี่ยวนำ (Inducing ratio) คือ

$$\frac{\dot{Q}_x}{\dot{Q}_0} = C\frac{\overline{U}_0}{\overline{U}_x} \tag{3.3}$$

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

C = สัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำ (มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับกระแสอิสระแบบหน้าตัดกลม)

ในกระบวนการทางวิศวกรรมส่วนมากนั้น ความรู้ความเข้าใจในสามบริเวณแรกก็เพียงพอแล้ว เพราะความแตกต่างของความเร็วที่พื้นผิวของช่วงที่ไม่ต่อเนื่องระหว่างเจ็ทและสภาวะแวดล้อมมีมาก อันทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy) ซึ่งทำให้เกิดการผสมกันระหว่างของไหลหลักกับของไหลรอบนอกบริเวณด้านข้าง การผสมกันนี้ทำให้ของไหลภายในเจ็ทมีความเร็วลดลง ในขณะเดียวกันทำให้ของไหลรอบนอกเจ็ทมีความเร็วเพิ่มขึ้น 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)

สภาวะเริ่มต้นของเจ็ทส่งผลกระทบต่อการก่อตัวในกระแสการไหล รูปแบบของการไหลที่ปลายหัวฉีดโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ คือ แบบราบเรียบ (Laminar), เสมือนราบเรียบ (Nominally laminar), ถูกรบกวนอย่างมาก (Highly disturbed) และ ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ (Fully turbulent) กรณีการไหลแบบราบเรียบ ชั้นความเค้นมีรูปแบบแบบบลาสเซียส (Blassius's profile) ชั้นความเค้นที่ไม่มั่นคงเหนี่ยวนำให้เกิดความผันผวนขึ้น โดยความผันผวนนี้มีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของเจ็ท การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ปลายหัวฉีดในสภาวะต่างๆ สามารถกำหนดได้เป็น

- ค่าความหนาของการกระจัด (Displacement thickness), δ, คือระยะทางที่พื้นผิวของรูปแบบการไหลต้องเคลื่อนที่ไปในทิศตั้งฉากกับเวกเตอร์ปกติ จากระนาบอ้างอิงในกระแสของไหลไร้ความหนืดที่มีความเร็วเริ่มต้น $\overline{U}_0$ เพื่อให้อัตราการไหลคงเดิมดังที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวกับระนาบอ้างอิงในของไหลจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าความหนาโมเมนตัม (Momentum thickness), θ คือระยะทางที่พื้นผิวของรูปแบบการไหลต้องเคลื่อนที่ไปในทิศขนานกับเวกเตอร์ของระนาบอ้างอิง เพื่อให้ผลรวมของโมเมนตัมมีค่าคงเดิม (จากกฎอนุรักษ์โมเมนตัม)

พารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถกำหนดค่าได้จากสมการต่อไปนี้

ความหนาของชั้นขอบเขต

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

ความหนาโมเมนตัม

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

สัดส่วนรูปร่าง (Shape factor)

$$H = \frac{\delta}{\theta} \tag{3.6}$$

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

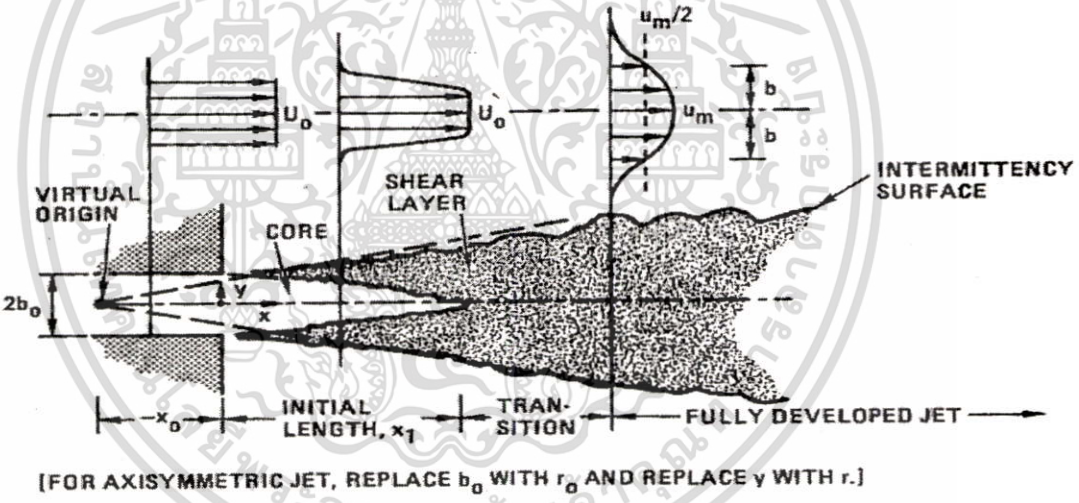
3.1.2.2 รูปทรงของหัวฉีด (Nozzle Geometry)

ลักษณะของกระแสเจ็ทได้รับผลกระทบอย่างมากจากรูปทรงของหัวฉีด และรูปแบบของผนังที่ล้อมรอบเจ็ท ฟังก์ชั่นค่าเฉลี่ยของความเร็วที่แกนกลางของเจ็ทแบบวงกลมกับแบบแผ่นนั้นต่างกัน โดยที่ฟังก์ชั่นของแบบวงกลมแปรผันตรงกับ x^{-1} ในขณะที่แบบแผ่นแปรผันตรงกับ $x^{0.5}$ ลักษณะเฉพาะของการเปลี่ยนแปลงของเจ็ทขึ้นอยู่กับลักษณะภาพตัดขวางของหัวฉีดด้วยเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหัวฉีดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อยาวสูง รูปทรงชนิดนี้ก่อให้เกิดปรากฏการณ์การสับเปลี่ยนแกน ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์นี้ มวลในแกนหลักและแกนรองจะสลับเปลี่ยนกันไปตลอดระยะแนวเส้นแกนกลาง สิ่งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการกระจายตัวที่แตกต่างกันของเจ็ทบริเวณด้านข้างทั้ง 2 ด้าน ซึ่งจะไม่เกิดในหัวฉีดแบบวงกลม รูปทรงของหัวฉีดมีผลอย่างมากในการนิยามรูปแบบของความเร็วเริ่มต้นของเจ็ท ออริฟิซ (Orifice) แบบขอบคมทำให้เกิดรูปแบบความเร็วเริ่มต้นแบบอานม้า (Saddle-backed profile) ในขณะที่รูปแบบแบบหมวกทรงสูง (Top hat profile) ได้จากหัวฉีดที่ขอบเรียบลื่น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ครึ่งหนึ่งของความกว้างของเจ็ทในแนวแกนตำแหน่งใดๆนิยามได้เป็น ระยะห่างระหว่างเส้นแกนกลางและระนาบทแยง โดยระนาบทแยงนี้คือระนาบที่ค่าเฉลี่ยของความเร็วตามแนวความกว้างที่ระยะนั้นๆมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วแนวเส้นแกนกลาง ครึ่งความกว้างนี้โดยปกติจะเพิ่มขึ้นด้วยฟังก์ชั่นเชิงเส้นตลอดระยะ x ยกเว้นในกรณีมีบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์การสลับแกนขึ้น ความชันของฟังก์ชั่นเชิงเส้นในทิศทางตามแนวแกนกลางเรียกว่าอัตราส่วนการกระจายตัว (Spread rate) ส่วนใหญ่แล้วค่าอัตราส่วนการกระจายตัวของเจ็ทแบบปั่นป่วนที่มีเลขเรย์โนลด์สูงๆ คือ 0.11 (ทำมุม 6 องศากับแนวแกน) ในขณะที่เจ็ทแบบราบเรียบมีค่าอัตราส่วนการกระจายตัวประมาณ 0.4 (ทำมุม 21 องศากับแนวแกน) จุดกำเนิดเสมือนของเจ็ทคือจุดที่เป็นเสมือนจุดกำเนิด (จุดยอด) ของรูปกรวยของเจ็ท ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของจุดกำเนิดเสมือนและระยะครึ่งความกว้าง

จุดกำเนิดเสมือนนี้ในบางครั้งอาจแตกต่างกับจุดกำเนิดตามรูปทรงเรขาคณิตและอาจอยู่ภายนอกหัวฉีดก็เป็นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของความเร็วของของไหลที่ปลายหัวฉีด จุดกำเนิดเสมือนนี้เกี่ยวข้องกับครึ่งความกว้างตามสมการต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ C_{2u}= จุดกำเนิดเสมือน (Virtual origin)

K_{2u}= อัตราส่วนการกระจายตัว (Spread ratio)

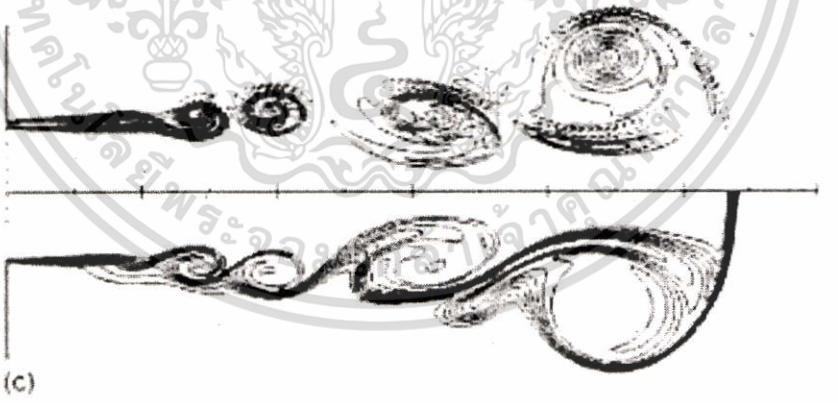
b_u = ครึ่งความกว้างของเจ็ท (Jet half width)

D_j = เส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีด (Nozzle diameter), (mm)

x = ระยะห่างจากปลายหัวฉีด, (mm)

3.1.2.4 ความไม่เสถียรของเจ็ท (Jet Instability)

เจ็ทที่ถูกอัดฉีดจากหัวฉีดนั้นมีการแกว่งของชั้นความเค้นขึ้นในกระแส โดยการแกว่งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบความเร็วเริ่มต้นของของไหลในบริเวณเหนือขึ้นไปจากระยะตามแนวแกนทั่วไป การแกว่งเหล่านี้จะม้วนตัวและสร้างกระแสหมุนวนซึ่งมีขนาดและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะในแนวแกน กระแสหมุนวนเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อการเหนี่ยวนำของไหลภายนอกเจ็ทมาผสมต่อของไหลหลักในเจ็ท ปฏิกิริยาของกระแสหมุนวนเหล่านี้มีผลยังให้การเปลี่ยนแปลงของกระแสไปเป็นแบบปั่นป่วน การศึกษาภาพการไหลของกระแสนั้นแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างแบบตายตัวระหว่างการสร้างกระแสแบบวงกลมและกระแสแบบไม่เป็นวงกลม การเกิดขึ้นของกระแสหมุนวนในชั้นความเค้นและการเปลี่ยนแปลงยิ่งยวดของกระแสราบเรียบไปเป็นกระแสปั่นป่วนแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความปั่นป่วนในเจ็ท

3.1.2.5 ความต่อเนื่องของโครงสร้าง (Coherent Structures)

โครงสร้างต่อเนื่องนิยามได้ตามมวลของของไหลแบบปั่นป่วนขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกัน รวมกับกระแสหมุนวนร่วมกันตลอดขอบเขตความยาว นั่นคือ ภายใต้ความผันผวนของกระแสหมุนวนแบบปั่นป่วนทั้ง 3 แกนนั้น มีการจัดวางส่วนประกอบของการหมุนวนซึ่งมีสภาวะร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Coherent) ตลอดทั้งโครงสร้าง การสร้างโครงสร้างต่อเนื่องในเจ็ทนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขสภาวะเริ่มต้น ดังนั้น การควบคุมจึงสามารถทำได้ ความถี่ของรูปแบบการหมุนวนในโครงสร้างนี้สามารถคำนวณได้ และสามารถควบคุมได้โดยการใช้การกระตุ้นด้วยคลื่นเสียง (Acoustic excitation) การกระตุ้นมูลฐานนี้ทำให้กระแสเปลี่ยนรูปไปในทางที่ทำให้กลไกการไหลแบบละเอียดถูกทำลายไป การไหลปั่นป่วนค่อยๆเสื่อมสลายลงตามระยะทางเนื่องด้วยการกระจายความหนืด ทำให้โครงสร้างต่อเนื่องนี้เพิ่มขึ้นและกระจายออก โครงสร้างเหล่านี้เริ่มก่อตัวขึ้นที่ชั้นความเค้นที่ไม่เสถียรอย่างมากบริเวณปากหัวฉีด จากนั้นจะเติบโตขึ้นโดยการรวมตัวกับของไหลรอบนอกจนถึงระยะ 20 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดในกระแสเจ็ท จากนั้นโครงสร้างเกิดการรวมตัวกันและสร้างเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้น แม้ในระยะที่ห่างจากปลายหัวฉีดมากๆ โครงสร้างเหล่านี้ก็ยังคงมีและสามารถระบุได้อยู่

3.1.2.6 การกระจายตัวแบบอุณหภูมิคงที่และไม่คงที่ (Isothermal and Non-isothermal Jet)

เจ็ทที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ (isothermal jet) คือกระแสเจ็ทซึ่งของไหลภายในเจ็ทและของไหลรอบๆมีอุณหภูมิเหมือนกัน ในอีกกรณีหนึ่ง เจ็ทที่อุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ (Non-isothermal jet) คือเจ็ทที่มีอุณหภูมิของของไหลหลักที่ออกจากปลายหัวฉีดกับอุณหภูมิของของไหลในสภาวะแวดล้อมไม่เท่ากัน เจ็ทที่มีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมออาจลอยตัวขึ้นหรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทเทียบกับอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมและปัจจัยอื่นๆ เมื่อค่าริชาร์ดสันนัมเบอร์มีค่าน้อยมากๆ อุณหภูมิของของไหลมีหน้าที่เป็นปริมาณสเกล่าร์พื้นฐานและผลกระทบจากแรงลอยตัวมีผลมากในกรณีนี้ พลศาสตร์ความไม่คงที่และการเกิดการปั่นป่วนถูกพิจารณาในอีกรูปแบบหนึ่งในกรณีของการไหลที่มีอุณหภูมิไม่คงที่นี้

3.1.2.7 การจำลองตัวเอง (Self Similarity)

การอนุรักษ์ตัวเองหรือจำลองตัวเองนั้น กล่าวกันว่าเกิดขึ้นเมื่อรูปแบบของความเร็วของการไหล (หรือปริมาณอื่นใด) สามารถทำให้สอดคล้องกันได้โดยมาตรสัดส่วนอย่างง่าย ซึ่งขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงลักษณะตามพิกัดเพียงพิกัดเดียว ผลที่ตามมาจากการอนุรักษ์นี้ คือสมการควบคุมของกระแสเจ็ทสามารถลดรูปลงได้ หรือพูดในอีกรูปแบบหนึ่งก็คือ กระแสอนุรักษ์เกิดขึ้นถ้ามีสมการที่เป็นผลคำตอบต่อสมการพลศาสตร์และเงื่อนไขขอบของของไหลนั้นๆ ซึ่งตลอดการเปลี่ยนแปลงของกระแส พจน์ทุกพจน์มีค่าที่เกี่ยวพันกันที่จุดซึ่งสัมพันธ์กัน ดังนั้น การอนุรักษ์นี้จึงเป็นการบอกว่ากระแสนี้ได้ไปถึงจุดที่สมดุลซึ่งค่าและผลกระทบทางพลศาสตร์ได้เปลี่ยนแปลงไปด้วยกัน และไม่จำเป็นต้องคำนวณหาองค์ประกอบทางพลศาสตร์อื่นซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของความเร็วเพียงเล็กน้อย ดังนั้นกระแสเจ็ทอนุรักษ์ คือสภาวะตามแนวเส้นซึ่งกระแสได้ถึงจุดที่โมเลกุลจัดเรียงตัวกันเรียบร้อยแล้ว สภาวะของกระแสอนุรักษ์มีหลายชนิดที่เป็นไปได้ อาทิเช่น 1) กระแสสามารถอนุรักษ์ตัวเองได้โดยสมบูรณ์ในทุกลำดับขั้นของช่วงที่มีการไหลแบบปั่นป่วน และทุกขนาดของการเคลื่อนที่และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

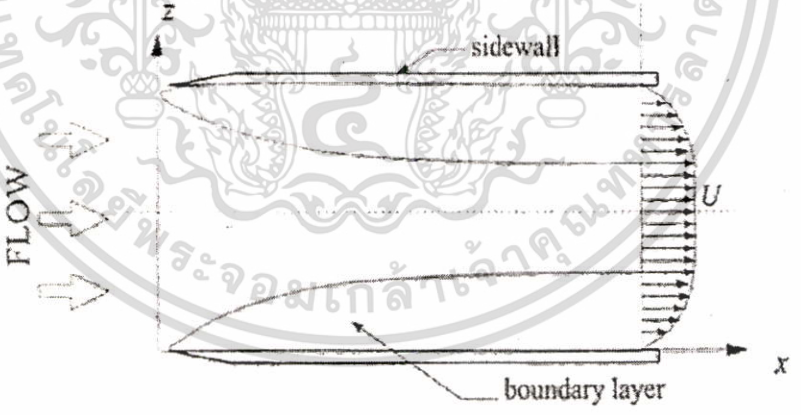
2) กระแสสามารถอนุรักษ์ตัวเองได้บางบริเวณ เพื่อให้เป็นไปตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัมหรือขึ้นอยู่กับความแน่นอนของลำดับในการไหลแบบปั่นป่วนหรือในมาตราส่วน ยกตัวอย่างเช่น สมการทั่วไปที่อธิบายกระแสเจ็ทที่ถึงจุดอนุรักษ์สำหรับความเร็วเฉลี่ยคือ

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

สมการนี้อธิบายได้ว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างความเร็วใดๆและความเร็วที่แกนกลางของระนาบทแยงจะเป็นฟังก์ชั่นของระยะตามแนวแกน y ต่อค่าความหนาของการกระจัดในแนวระนาบนั้นๆ

3.1.2.8 บทบาทของผนังด้านข้างต่อกระแสเจ็ท (Role of Side Walls in Jet Flow)

ผนังที่ถูกวางในระนาบขนานกับระนาบ x-y จะบีบและเปลี่ยนพฤติกรรมของการขยายตัวในสองมิติของเจ็ทโดยการป้องกันการเกิดการเหนี่ยวนำจากทางด้านข้าง ถึงแม้ว่าการบีบอัดในบริเวณใกล้เคียง ชั้นขอบเขตก็เริ่มเติบโตขึ้นที่บริเวณผนังด้านข้าง ดังนั้น การก่อตัวขึ้นของกระแสจะแตกต่างกันสำหรับเจ็ทระนาบที่ถูกฉีดผ่านหัวฉีดทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีผนังด้านข้างและไม่มีผนัง และถึงแม้ว่าการมีอยู่ของผนังสามารถยึดขอบเขตสองมิติ การเกิดชั้นขอบเขตที่ผนังด้านข้างนั้นก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของเจ็ทในพื้นที่ที่ห่างออกไป ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 พฤติกรรมของรูปแบบความเร็วของเจ็ทเมื่อมีผนังด้านข้าง

3.1.2.9 มาตราส่วนความยาวของความปั่นป่วน (Turbulent Length Scales)

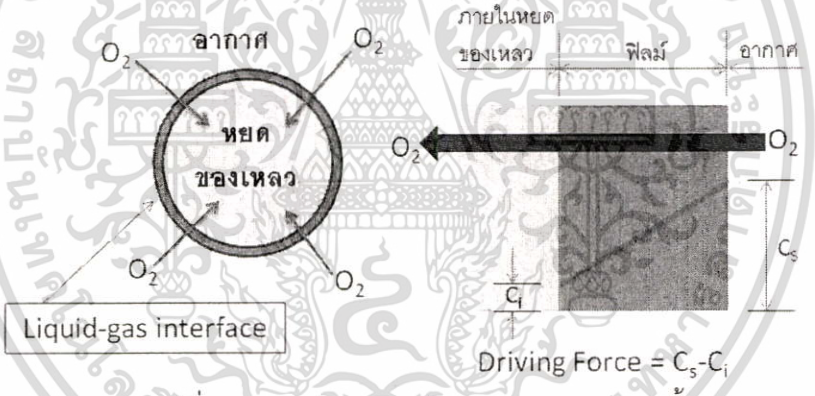
กระแสแบบปั่นป่วนประกอบด้วยกระแสวน (Eddy flow) ในหลายๆ ขนาดต่างๆ กัน พลังงานจลน์ของกระแสหลักถูกถ่ายทอดไปเป็นการเกิดขึ้นของกระแสวนที่ส่วนที่ใหญ่ที่สุดของการเคลื่อนที่ พลังงานในส่วนนี้ได้ถูกส่งผ่านไปยังมาตราส่วนที่เล็กกว่าและเล็กลงเรื่อยๆตลอดขั้นตอนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

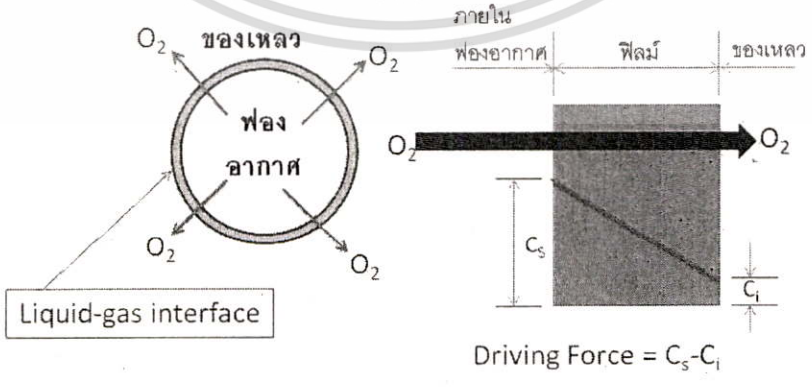
ไหลไร้ความหนืด เรียกว่าการยืดตัวของกระแสหมุนวน (Vortex stretching) ที่มาตราส่วนที่เล็กที่สุดนั้น พลังงานจลน์ของกระแสวนนี้ค่อยๆน้อยลงจนหายไปซึ่งเป็นผลมาจากความหนืด ในมาตราส่วนขนาดใหญ่ส่วนมากเป็นแบบไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Non-isotropic) และมีแนวโน้มไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่า อย่างไรก็ตาม สำหรับกระแสแบบปั่นป่วนหลายชนิด มาตราส่วนการเคลื่อนที่โดยละเอียดเป็นไปแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ค่าเฉลี่ยของขนาดของกระแสวนนี้เรียกว่าผลรวมมาตราส่วนความยาวขนาดของกระแสวนที่เล็กที่สุดซึ่งค่อยๆสลายไปนั้นเรียกว่า มาตราส่วนคอลโมโกรอฟ (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเติมอากาศหรือออกซิเจนให้กับน้ำทั้งสองวิธีขึ้นอยู่ปัจจัยต่อไปนี้

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

3.2.1 หลักการคำนวณมวลสารที่ถูกถ่ายเท

จากการถ่ายเทของออกซิเจนลงไปในน้ำ สามารถเขียนได้ในรูปสมการดังนี้

$$r_m = K_G A(C_S - C) \tag{3.9}$$

เมื่อ r_m = อัตราของการถ่ายเทมวลสาร, (kg/day)

K_G = ค่าสัมประสิทธิ์ในการกระจายของก๊าซ, (kg/(day.m^2.(mm/l)))

A = พื้นที่ผิวที่ก๊าซได้กระจาย, (m^2)

C_S = ความเข้มข้นอิ่มตัวของก๊าซในสารละลาย, (mg/l)

C = ความเข้มข้นของสารในสารละลาย, (mg/l)

จากสมการ (3.9) สมการเขียนใหม่ได้ในรูปสมการดังนี้

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

เมื่อ V = ปริมาตรของสารละลาย, (l)

เพราะฉะนั้น

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

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_La ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซ (ออกซิเจน) ค่า K_La นี้ขึ้นอยู่กับระบบการเติมอากาศ รูปร่างของถังเติมอากาศ ลักษณะของน้ำ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ โดยทั่วไปค่า K_La หาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ หรือในสนามจริง และจะไม่นิยมคำนวณหาค่า K_La โดยแยกออกเป็น K_L และ a เพราะค่า a เป็นค่าที่คำนวณหาได้ยากในทางปฏิบัติ จากสมการ (3.10) สามารถเขียนได้ใหม่เป็นสมการดังนี้

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

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

K_La= ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในการถ่ายเทก๊าซต่อวินาที

จากสมการที่ได้กล่าวมานำมาวิเคราะห์ต่อจะได้เป็น

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

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

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

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

$$ln\left[\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0}\right] = K_L at \tag{3.15}$$

ถ้าระบบมีของเหลวที่อิ่มตัวด้วยก๊าซ ทำให้ก๊าซถ่ายเทออกจากของเหลว ดังนั้นสมการเขียนใหม่ได้เป็น

$$ln\left[\frac{C_t - C_s}{C_0 - C_s}\right] = K_L\, at \tag{3.16}$$

จากหลักการข้างต้นสามารถนำมาใช้คำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องการเติมลงในน้ำทิ้ง โดยสมมติให้อัตราการเติมออกซิเจนลงไปในน้ำทิ้งมีค่าเท่ากับ $\frac{dm}{dt}$ จะได้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

กำหนดให้ประสิทธิภาพการของการเติมออกซิเจนลงไปในน้ำทิ้งเป็น (Aeration Efficiency, E)

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

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

M = อัตราการเติมออกซิเจนลงไปในน้ำทิ้ง, (g/s)

จะได้

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

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

กำหนดให้

$$\frac{dm}{dt} = V\frac{dC}{dt} = QdC \tag{3.22}$$

เมื่อ V= ปริมาตรของน้ำทิ้ง,(m^3)

Q= อัตราไหลเข้าของน้ำทิ้ง, (m^3/s)

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพจริงคือปริมาณอากาศที่เติมลงไปในน้ำทิ้ง หรือน้ำเสียจึงนิยมคูณด้วย 1.10 (1.1 = 1/0.9; 0.9 = ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำเสีย/ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำสะอาด ทำให้ปริมาณอากาศที่ต้องการเติมลงไปในน้ำทิ้ง 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 ยิ่งฟองอากาศมีพื้นที่สัมผัสมากและมีขนาดเล็กของอณูมาก ออกซิเจนก็ยิ่งมีโอกาสละลายน้ำได้สูง
3. ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ละลายในน้ำอยู่ก่อนแล้ว หากมีปริมาณก๊าซออกซิเจนละลายในน้ำอยู่ก่อนแล้ว มากจนเกือบจะถึงจุดอิ่มตัว อัตราการละลายของออกซิเจนใหม่ที่เติมลงในน้ำก็จะต่ำลง
4. พื้นผิวสัมผัสของน้ำ (ต่างจากข้อ 2) กรณีที่มีการพ่นน้ำออกแบบเหนือน้ำในลักษณะน้ำพุหรือน้ำตก เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำนั้น ยิ่งน้ำที่พ่นออกมามีพื้นผิวสัมผัสกับอากาศมากเท่าไหร่ ก็ยิ่งเพิ่มโอกาสการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างน้ำและอากาศมากขึ้นเท่านั้น
5. ปริมาณสารละลายต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ น้ำที่มีสารละลายต่างๆ ในระดับความเข้มข้นสูง จะส่งผลให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนลดต่ำลง
6. ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำและก๊าซออกซิเจน
7. ปริมาณและลักษณะสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบ่อเลี้ยง ปริมาณสารอินทรีย์ต่างๆที่อยู่ในบ่อเลี้ยงที่ต้องใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 รูปแบบไร้มิติของสมการการขนถ่ายของไหล (Dimensionless Forms of Fluid Transport Equations)

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

สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่องคือ

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

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

t = เวลา, (s)

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

$\bar{\nabla}$ = องค์ประกอบตามแนวแกน

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับของไหลอัดตัวได้คือ

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

เมื่อ $\frac{Dv}{Dt}$ = อนุพันธ์ของของไหล

P_{static} = ความดันสถิตย์, (Pa)

μ = ความหนืดของของไหล, (N.m)

∇^2 = กระบวนการลาปลาซ

K = ความหนืดบัลค์, (N.m)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, (m/s^2)

j = ทิศทางของกระแส

$\bar{B}$ = สนามของกระแสแม่เหล็ก

ผลกระทบของค่า K ต่อพลศาสตร์ของของไหลจะยากต่อการตรวจสอบและส่วนมากจะถูกมองข้ามไป และเนื่องจากไม่มีกระแสแม่เหล็ก พจน์สุดท้ายในสมการจึงตัดทิ้งได้ ทำให้สมการที่ 3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูง่ายขึ้นนั้น สามารถใช้ค่าความดันพลศาสตร์ (Dynamic Pressure) เพิ่มเข้ามาในการคำนวณแทนค่าความดันสถิตย์และความเร่งแรงโน้มถ่วงได้ ความสัมพันธ์ของพลศาสตร์ความดันสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\bar{\nabla} P_{dynamic} = \bar{\nabla} P_{static} - \rho \bar{g} \tag{3.30}$$

เมื่อ $P_{dynamic}$= พลความดัน, (Pa)

3.3.1 กฎอนุรักษ์มวล (กฎความต่อเนื่อง)

สมการทั่วไปของการไหลต่อเนื่องคือ

$$\frac{\partial \mathrm{b}}{\partial \mathrm{t}} + \bar{\nabla}(bv) = -\bar{\nabla}.f + B_V \tag{3.31}$$

เมื่อ b = ความเข้มข้นของปริมาณใดปริมาณหนึ่ง,(/m^3)

t =เวลา, (s)

$\bar{\nabla}$= ระบบองค์ประกอบ

$\mathcal{V}$ = ความเร็วของของไหล, (m/s)

f = ส่วนขยายของฟลักซ์ในปริมาณนั้น

$\mathrm{B_V}$ = อัตราของการเกิดขึ้นของปริมาณนั้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

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

จากการตัดพจน์ข้างต้น สมการความต่อเนื่องจะลดรูปได้ ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla}.(\rho v) = 0 \tag{3.32}$$

ในระบบจำลองแบบ 2 มิติ สมการความต่อเนื่องจะแสดงดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}) + \bar{\nabla}(\rho\bar{v}\bar{v}) = -\bar{\nabla}P + \bar{\nabla}.(\bar{\bar{\tau}}) + \rho\bar{g} \tag{3.34}$$

โดยที่ P= ความดันสถิตย์, (Pa)

$\bar{\bar{\tau}}$= เทนเซอร์ความเค้น, (J)

g= แรงต่อหนึ่งหน่วยเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, (m/s^2)

สำหรับการจำลองระบบแบบ 2 มิติในรูปสมมาตรนั้น สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในระบบพิกัดในแนวแกนและในแนวรัศมีจะแสดงดังสมการที่ 3.35 และ 3.36 ตามลำดับ

ระบบพิกัดฉาก

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}_x) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho\bar{v}_x\bar{v}_x) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho\bar{v}_r\bar{v}_x) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(2\frac{\partial\bar{v}_x}{\partial x} - \frac{2}{3}(\bar{\nabla}.\bar{v})\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\left(\frac{\partial\bar{v}_x}{\partial r} - \frac{\partial\bar{v}_r}{\partial x}\right)\right] \tag{3.35}$$

พิกัดแนวรัศมี

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{v}_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho\bar{v}_x\bar{v}_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho\bar{v}_r\bar{v}_r) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial\bar{v}_x}{\partial r} - \frac{\partial\bar{v}_r}{\partial x}\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial\bar{v}_r}{\partial r} - \frac{2}{3}(\bar{\nabla}.\bar{v})\right)\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-2\mu\frac{\bar{v}_r}{r^2}+\frac{2}{3}\frac{\mu}{r}(\bar{\nabla}.\bar{v}) + \rho\frac{{\bar{v}_z}^2}{r} \tag{3.36}$$

โดยที่

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

3.4 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

3.4.1 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

หากพิจารณาการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในมุมมองการโปรแกรม จะกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างของอัลกอลิธึมที่สามารถนำไปสู่การจำลองสภาวะการไหลได้ โปรแกรมคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลในเชิงพาณิชย์ ส่วนมากมีระบบที่ให้ผู้ใช้สามารถป้อนค่าต่างๆ ที่ต้องการแล้วจึงนำไปคำนวณโดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้ [16]

3.4.1.1 ขั้นก่อนประมวลผล

ขั้นก่อนประมวลผล (pre-processing) คือขั้นตอนเตรียมการ โดยระบุรายละเอียดของการกำหนดปัญหา และพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. กำหนดรูปทรง และระบุขนาดที่สนใจ เรียกว่า การกำหนดสนามการคำนวณ (computation domain)

2. กำหนดจำนวน และรูปแบบการจัดวางกริด (grid or mesh) ซึ่งคือการแบ่งสนามคำนวณออกเป็นปริมาณเล็กๆ รูปแบบการจัดแบ่ง และจัดวางกริด ขึ้นอยู่กับปัญหาที่พิจารณาการจัดที่เหมาะสมทำให้การหาผลเฉลยประมาณค่า (approximation solution) แม่นยำขึ้น

3. เลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เหมาะสมกับธรรมชาติของปัญหา เลือกโดยใช้องค์ความรู้ทางทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

4. กำหนดคุณสมบัติของของไหล เช่นพิจารณาอุณหภูมิอากาศของของไหล

5. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition)

3.4.1.2 ขั้นประมวลผลขั้นประมวลผล (solving) เป็นขั้นที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา

1. ประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าโดยหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน (มักใช้ในปัญหาแบบปั่นป่วน) สร้างเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย โดยรวมกับสมการควบคุมการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หาผลเฉลยวีค (weak solution) ของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง (weight residual) จากนั้นดิสเครทไทต์ โดยประมาณแต่ละเทอมความสัมพันธ์ด้วยแบบแผนวิธีที่เลือกไว้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นพีชคณิต

3. แก้สมการพีชคณิต ผลเฉลยที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยประมาณค่า

3.4.1.3 ขั้นแสดงผล

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

3.4.2 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเพื่อจำลองพฤติกรรมตามธรรมชาติ ควรตะหนักว่าธรรมชาติมีพฤติกรรมซับซ้อน ดังนั้นสิ่งที่พึงระมัดระวังอย่างยิ่งคือ ความถูกต้องของผลเฉลย ผลการคำนวณที่ดีเลิศ เป็นเพียงค่าประมาณที่ดีที่สุดเท่าที่มนุษย์สามารถหาคำตอบได้เท่านั้น ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นตรงคุณสมบัติของวิธีการคำนวณ คือปัจจัยบ่งบอกความเที่ยงตรงของผลเฉลยประมาณค่า เมื่อเทียบกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้น แบ่งได้หลายประการดังนี้

3.4.2.1 ความเข้ากันได้

ความเข้ากันได้ (consistency) หมายถึงความเหมือน (equivalent)ระหว่างสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย) และสมการพีชคณิตที่ผ่านหระบวนการดิสเครทไทต์ เมื่อระยะกริด (grid spacing) และ หรือค่าขั้นเวลา (time step) ลดลงไกล้ศูนย์โดยปกติเรียกความแตกต่างหลังจากกระบวนการดิสเครทไทต์ว่า ความผิดพลาดแบบทรานเคชัน (truncation error) ซึ่งลดลงเมื่อมีความเข้ากันได้มากขึ้น

3.4.2.2 เสถียรภาพการคำนวณ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.3 การลู่เข้าของผลเฉลย

ผลการคำนวณที่มีการลู่ข้าวของผลเฉลย (convergence) หมายถึงผลเฉลยประมาณค่ามีแนวโน้มเข้าใกล้ผลเฉลยแม่นตรง สำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น (nonlinear problem) ยากที่จะตรวจสอบการลู่เข้าของผลเฉลย เนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นตรงได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบทำได้ด้วยวิธีเปรียบเทียบผลการคำนวณที่มีระยะกริดลดลง กระทั่งผลเฉลยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะกริด (grid independent) เรียกได้ว่ามีคุณสมบัติการลู่ข้าวของผลเฉลยที่ดี

3.4.2.4 การอนุรักษ์

คุณสมบัติการอนุรักษ์ (conservation) เป็นคุณสมบัติที่มีอยู่ในกฎการอนุรักษ์เนื่องจากผลการคำนวณมาจากสมการควบคุม ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงมีคุณสมบัติดังนี้ด้วย โดยคุณสมบัติการอนุรักษ์เป็นจุดเด่นที่สำคัญของระเบียบวิธีปริมาณสืบเนื่อง กล่าวคือคำนึงถึงความสมดุลของการส่งถ่ายปริมาณข้ามขอบเขตที่พิจารณา เช่นรอบผิวปิดของปริมาตรเล็กๆที่แบ่งตามระยะกริดเป็นต้น

3.4.2.5 ความจำกัดขอบ

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

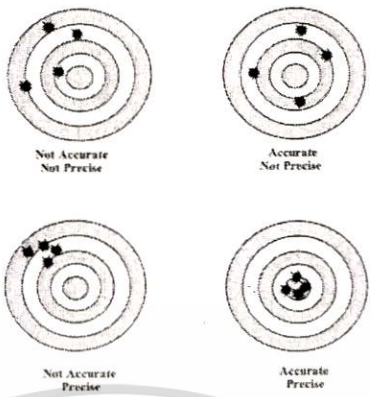
3.4.2.6 ความเสมือนจริง

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

3.4.2.7 ความหนาแน่น

บ่อยครั้งในงานทางวิศวกรรมกล่าวถึงความแน่นอน (accuracy) ซึ่งมักใช้สับสนกับความแม่นยำ (precision) พิจารณารูปที่ 3.7 แสดงความแตกต่างระหว่างแนวความคิดทั้งสองอย่างชัดเจน ตรงกลางเป้าเป็นเสมือนค่าแม่นตรง โดยเห็นได้ว่าความแน่นอนสูงหมายถึงค่าโดยเฉลี่ยไม่ต่างจากค่าแม่นตรง และความแม่นยำสูง หมายถึงค่าสวนใหญ่กระจายตัวน้อย ดังนั้นงานวิเคราะห์ทางวิศวกรรมจึงควรให้ความสำคัญกับความแน่นอน มากกว่าความแม่นยำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์ได้ถูกต้อง มีแนวโน้มกับสภาพความจริงมากขึ้น แต่ในงานออกแบบต้องการความผิดพลาดลดน้อยสุด จึงควรใช้ทั้ง 2 แนวคิดประกอบรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ

วิธีคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล แบ่งปัจจัยของความแน่นอนได้เป็น 3 ปัจจัยดังนี้

1. ความแน่นอนจากแบบจำลอง (modeling accuracy) เกิดจากความเสมือนจริงของแบบจำลอง เทียบกับพฤติกรรรจริงธรรมชาติ

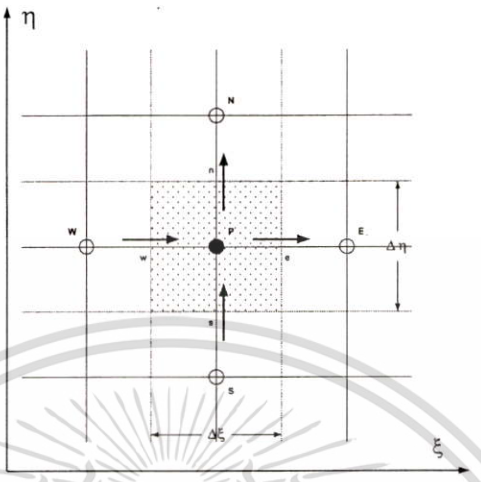
2. ความแน่นอนจากการดิสเครทไทต์ (discretization accuracy) เกิดจากความเข้ากันได้ของสมการพีชคณิต เทียบกับสมการควบคุม (สมการอนุพันธ์ย่อย)

3. ความแน่นอนจากการแก้สมการพีชคณิต (iteration accuracy) เกิดจากการลู่เข้าของผลเฉลยประมาณค่า เทียบกับผลเฉลยแม่นตรงของสมการพีชคณิต

3.4.3 รูปแบบการจัดวางกริด

รูปแบบการจัดวางกริดโดยทั่วไปแบ่งได้ 3 แบบคือ แบบโครงสร้างปกติ (structured grid) แบบกลุ่มโครงสร้าง (block structured grid) และแบบไม่เป็นโครงสร้าง (unstructured grid) เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจกระบวนการดิสเครทไทต์ในกระบวนการถัดไป จึงได้ใช้รูปแบบการวางกริดดังรูปที่ 3.8 (แบบโครงสร้างปกติ) และเพื่อความกระชับได้ดิสเครทไทต์กริด 2 มิติเท่านั้น ซึ่งสามารถขยายไปสู่กริด 3 มิติได้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 รูปแบบการจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ

จากรูปที่ 2 ตำแหน่ง P คือตำแหน่งโนด (node) ที่สนใจ ตัวอักษรพิมพ์เล็ก เช่น w, e แสดงถึงปริมาตรที่เข้า-ออกจากปริมาตรควบคุมที่แรเงา (cell volume) เช่น ความเร็ว เป็นต้น เรียกว่า ตำแหน่งผิวเซล (cell face) ลูกศรที่ปรากฏแสดงทิศเป็นบวกของปริมาณเวคเตอร์ที่ตำแหน่งผิวเซล รูปแบบลักษณะนี้เรียกว่า การจัดเรียงแบบตำแหน่งรวม (co-located arrangement) กล่าวคือ ปริมาณสเกลาร์ และเวคเตอร์มีตำแหน่งเดียวกัน (มวล ความเร็ว ความดัน)

3.4.4 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข

ปัจจุบันมีนักวิจัยที่คิดค้นแบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical scheme)มากมายซึ่งขอกล่าวถึงเฉพาะแบบแผนในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 4 แบบคือ

3.4.4.1 แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง

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

$$\varphi_e = (\varphi_P + \varphi_E)/2$$
$$\varphi_w = (\varphi_W + \varphi_P)/2$$
$$\varphi_n = (\varphi_P + \varphi_N)/2 \qquad (3.38)$$
$$\varphi_s = (\varphi_S + \varphi_P)/2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (3.38) เห็นได้ว่าใช้การประมาณค่าที่ผิวเซลล์ด้วยค่าที่ตำแหน่งโนด โดยถ่วงน้ำหนักโนดประชิด (adjacent node) เท่ากัน แบบแผนวิธีนี้จึงขึ้นอยู่กับระยะกริดเป็นสำคัญ ซึ่งระยะกริดที่ลดลง ทำให้ผลเฉลยมีความแน่นอนสูงขึ้น

3.4.4.2 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง

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

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

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

3.4.4.3 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง

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

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

สมการ (3.40) เป็นตัวอย่างแบบแผนในกรณีวิธี 1มิติ พิจารณาเฉพาะที่ผิวเซล e เมื่อ δ_{eP} แทนระยะห่างระหว่างผิวเซล e และโนดต้นลม P (เนื่องจาก $u_e > 0$) สำหรับกรณีแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งจะใช้เฉพาะเทอมแรกทางขวาของสมการ และแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสองนี้จะใช้สองเทอมแรกทางขวาของสมการ เทอม $\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_P$ คือ ความชันของเซลต้นลม ซึ่งประมาณโดยการเฉลี่ยถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักด้วยปริมาตรของเซลนั้น ดังสมการ (3.41) จากนั้นใช้ทฤษฎีของเกาส์ (Gauss theorem) จะเขียนได้ในสมการ (3.42) ดังนี้

$$(\frac{\partial \phi}{\partial x})_P = \frac{1}{\forall}\int \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) d\forall \tag{3.41}$$

$$(\frac{\partial \phi}{\partial x})_P = \frac{1}{\forall}\oint \phi \cdot \tilde{n} dA \tag{3.42}$$

เมื่อ $\forall$ แทนขนาดปริมาณของเซล A แทนพื้นที่ผิวเซลและ $\tilde{n}$ แทนเวคเตอร์ตั้งฉากกับผิวเซล สมการ (3.41) ทำการดิสเครทไทต์ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องใน 2 มิติ (กรณีที่มีการจัดวางกริดตามรูปที่ 3.8 จะลดรูปได้เป็น

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

จากสมการ (3.42) เมื่อ L แทนระยะความกว้างของเซลในแต่ละด้านตามตัวห้อย เช่น L_eแทนระยะความกว้างของผิวเซล e เป็นต้น และ A_P แทนพื้นที่เซลที่ตำแหน่งโนด P อยู่เช่น A_P มีค่าเท่ากับพื้นที่แรเงาในรูปที่ 3.8 เป็นต้น ซึ่งค่า ϕ ที่ผิวเซลต่างๆของสมการ (3.43) หาได้หลายวิธี แต่ในที่นี้เลือกใช้แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางดังสมการ (3.38) ดังนั้นสมการ (3.40) เขียนใหม่ได้ว่า

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

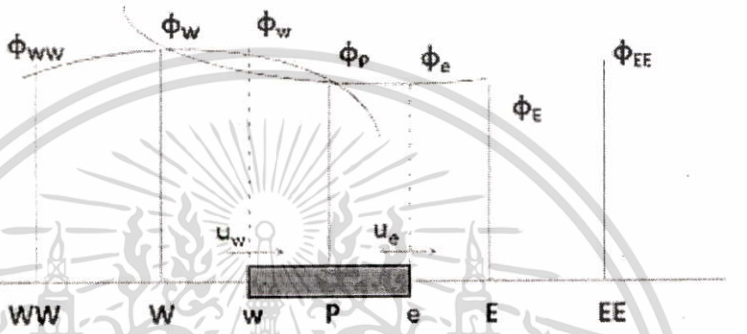
ในทำนองเดียวกันเมื่อ u_e<0 จะเขียนได้ดังสมการ (3.45) และสมการของ ϕ_w, ϕ_n, ϕ_s สามารถหาได้ด้วยสมการเดียวกัน ซึ่งไม่กล่าวถึงในรายละเอียด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4.4 แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติค

แบบแผนวิธีผลต่างคอดราติค (Quadratic upstream interpolation for convective kinetics differencing scheme, QUICK) เริ่มนำเสนอโดย Leonard (1988) เป็นแบบแผนวิธีที่ใช้โนด 3 ตำแหน่งในการประมาณค่าของแต่ละผิวเซล (2 โนดที่ต้นลม และ 1 โนดที่ท้ายลม) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติคในปริมาณควบคุมแบบ 1 มิติ

ตามรูปที่ 3 เมื่อ $u_w > 0$และ $u_e > 0$การประมาณค่า ϕ_w ที่ผิวเซล w จะใช้ค่าที่โนดต้นลม คือ WWและ W ประกอบกับที่โนดท้ายลมคือ W และ P ในทำนองเดียวกันกับการประมาณค่า ϕ_eที่ผิวเซล e จะใช้ค่าที่โนดต้นลมคือ W และ P ประกอบกับที่โนดท้ายลมคือ E ตามลำดับ

ด้วยหลักการความคล้ายคลึง กรณีที่ $u_w < 0$และ $u_e < 0$ การประมาณค่า ϕ_w ใช้โนด E และ Pประกอบกับโนด 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

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

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

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

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

แบบแผนวิธีผลต่างควอดาติคมีความแน่นอนอันดับสาม ซึ่งสูงกว่าทั้งแบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่งและสอง เป็นเทคนิคการผสมผสานความได้เปรียบของแบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลางและแบบแผนวิธีผลต่างต้นลม อย่างไรก็ตามแบบแผนวิธีผลต่างเข้าด้วยกัน กล่าวคือมีคุณสมบัติอนุรักษ์ และความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ากันได้มากกว่าแบบแผนวิธีผลต่างต้นลม อย่างไรก็ตามแบบแผนวิธีผลต่างอันดับสูง จะมีเงื่อนไขเสถียรภาพการคำนวณ (conditionally stable) เพิ่มขึ้น และคุณสมบัติจำกัดขอบลดลง

3.4.5 การดิสเครทไทต์สมการควบคุม

การคำนวณด้วยวิธีปริมาตรสืบเนื่อง ต้องหาผลเฉลยวีคของสมการควบคุมด้วยวิธีน้ำหนักตกค้าง โดยการเลือกใช้ 1 (unit) เป็นฟังก์ชั่นถ่วงน้ำหนัก (weight function) ผลที่ได้เป็นสมการอินทิกรัล (integral equation) บนขอบเขตปริมาตรควบคุมเล็กๆจากทฤษฎีของเกาส์ทำให้สามารถพิจารณาปริมาณที่ส่งถ่ายเข้า-ออก เฉพาะที่ขอบเขต เป็นตัวแทนทั้งปริมาตรได้ รวมเรียกว่าการดิสเครทไทต์สมการอนุพันธ์ย่อย โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไปโดยจะเป็นการดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์มวล

3.4.6 การดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์มวล

จากสมการอนุรักษ์มวลแบบไร้การอัดตัว จะได้ผลเฉลยวีคดังสมการ (3.50) และใช้ทฤษฎีของเก้าส์ จะได้สมการ (3.51)

$$\int \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d = 0 \tag{3.50}$$

$$\oint u_i \tilde{n} dA = 0 \tag{3.51}$$

เมื่อ A แทนพื้นที่ผิวเซล และ $\tilde{n}$ แทนเวคเตอร์ตั้งฉากกับผิวเซล จากสมการ (3.42) ให้ทำการดิสเครทไทต์ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องใน 2 มิติ (กรณีจัดวางกริดตามรูปที่ 3.8 จะได้สมการ (3.52) ซึ่งเรียกว่า สมการอนุรักษ์มวลแบบดิสเครทไทต์ เมื่อ L แทนระยะความกว้างของผิวเซลในแต่ละด้านตามตัวห้อย เช่น L_e แทนระยะความกว้างของผิวเซล e เป็นต้น

$$(uL)_e - (uL)_w - (uL)_n - (uL)_s = 0 \tag{3.52}$$

3.4.7 ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการควบคุมในการไหลคงตัว

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.8 การจำลองโมเดลแบบปั่นป่วน

กระแสของของไหลที่มีความเร็วและเลขเรย์โนลด์สูงจะเรียกว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) เนื่องจากกระแสเจ็ทเป็นการไหลแบบปั่นป่วน การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจึงถูกนำมาพิจารณาและใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของของไหลในโปรแกรมนี้

ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้น สนามความเร็วจะไม่คงที่ ความผันผวนนี้จะรวมเข้ากับปริมาณที่ส่งผ่านได้เช่น โมเมนตัม พลังงาน และความเข้มข้นเฉพาะ อย่างไรก็ตาม สมการของระบบที่ถูกต้องนั้นสามารถเป็นได้ทั้งแบบเฉลี่ยเวลาและเฉลี่ยผลรวมเพื่อทำการกำจัดความผันผวน สมการและตัวแปรต่างๆ ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อกระบวนการนี้

ในโปรแกรม Fluent มีแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน 5 รูปแบบ ดังนี้

(1) Spalart-Allmaras Model

(2) k-ε models

- Standard k-ε model
- Renormalization-group (RNG) k-ε model
- Realizable k-ε model

(3) k-ω models

- Standard k-ω model
- Shear-stress transport (SST) k-ω model

(4) Reynolds Stress Model (RSM)

(5) Large eddy simulation (LES) Model

เนื่องจากในโครงงานนี้ใช้รูปแบบของ Renormalization-group (RNG) k-ε model หลักการใช้งานและวิธีการคำนวณของโมเดลนี้จะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.4.9 Renormalization-group (RNG) k-ε model

เป็นรูปแบบจำลองที่มีความแม่นยำในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่กว้างโดยการใช้เทคนิคทางสถิติอย่างแม่นยำและมีความคล้ายคลึงกับ Standard k-ε model ซึ่งเป็นโมเดลมาตรฐานที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมีข้อดีที่เพิ่มขึ้นมาดังนี้

1. เพิ่มเติมเทอมลงในสมการของ ε ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำอย่างมากสำหรับกระแสที่มีความเครียดสูง
2. ผลกระทบของการไหลวนในกระแสปั่นป่วนได้ถูกนำมาคำนวณ เพิ่มความแม่นยำในกระแสที่มีการไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มีสูตรสำหรับเลขพลังค์ (Prandtl Numbers)สิ่งเหล่านี้จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณปริมาณต่างๆ ในการจำลองการไหลของกระแส แต่ทว่าการคำนวณจะกินเวลากว่าการใช้โมเดลแบบมาตรฐาน Standard k-ε model อยู่ค่อนข้างมาก

3.4.10 Mathematical Algorithm of the Renormalization k-ε model เมื่อค่า k คือพลังงานศักย์ปั่นป่วนและค่า ε คืออัตราการกระจายตัว สมการที่จะใช้คำนวณในโมเดลนี้มีดังต่อไปนี้

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

และ

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

โดยที่

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

เมื่อ t = เวลา, (s)

ρ = ความหนาแน่น, (kg/m^3)

k = พลังงานจลน์ปั่นป่วน, ((J.m^3)/kg)

v = ความเร็ว,(m/s)

x = ระยะห่าง,(m)

μ = ความหนืด, (kg/(m.s))

μ_t = ความหนืดปั่นป่วน, (kg/(m.s))

G_k = พลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากผลเฉลี่ยองค์ประกอบความเร็ว, (J)

G_b = พลังงานศักย์ปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว, (J)

ε = อัตราการกระจายตัว, ((J.m^3)/(kg.s))

Y_M = ค่าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการขยายพื้นที่อย่างผันผวนในกระแสปั่นป่วนบีบอัดได้ในการกระจายตัวทั้งหมด, (J)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้างแบบจำลองและการทดลอง

4.1 การสร้างแบบจำลอง

โครงงานเล่มนี้ 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 ตำแหน่งของรูอากาศโดยเริ่มจากปลายของหัวฉีดไปถึงจุดกึ่งกลางของรูปอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.1ข



(ก) (ข)

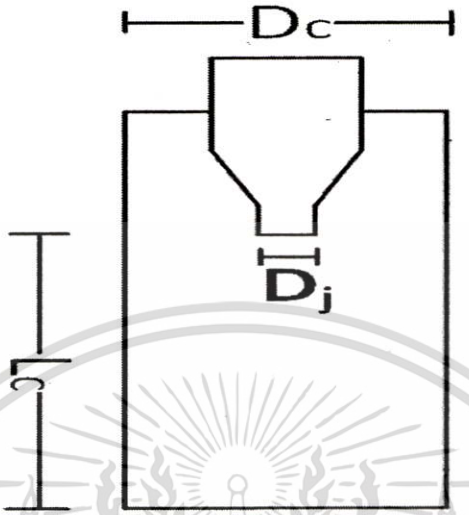
รูปที่ 4.1 (ก) แบบของชุดหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ตัวแปรของระยะต่างๆ ในชุดทดลองหัวฉีด

4.1.1 การสร้างรูปร่างหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT)

รูปแบบของชุดหัวฉีดที่สร้างด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) นั้นถูกสร้างแบบจำลองโดยให้แบบของชุดหัวฉีดเป็นแบบไม่มีรูอากาศ เนื่องจากโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) เป็นโปรแกรมที่สร้างแบบและกำหนดเงื่อนไขของชุดหัวฉีดก่อนส่งไปยังโปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS FLUENT) เพื่อทำการสร้างจำลองและคำนวณรูปแบบการไหล [21,22] การใช้โปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS FLUENT) นี้ไม่สามารถสร้างแบบจำลองการไหลของของไหลทั้งสองซึ่งก็คือน้ำและอากาศรวมกันได้ แต่สามารถจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

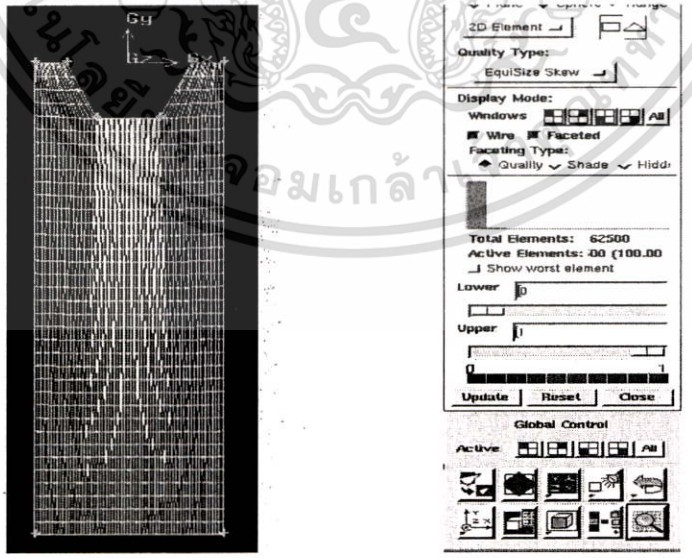
การไหลเฉพาะของไหลที่ออกจากหัวฉีด (น้ำ) ได้เท่านั้น ดังนั้นแบบที่ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) จึงไม่มีรูอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองของชุดหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT)

4.1.2 การสร้างขอบเขตย่อยด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT)

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



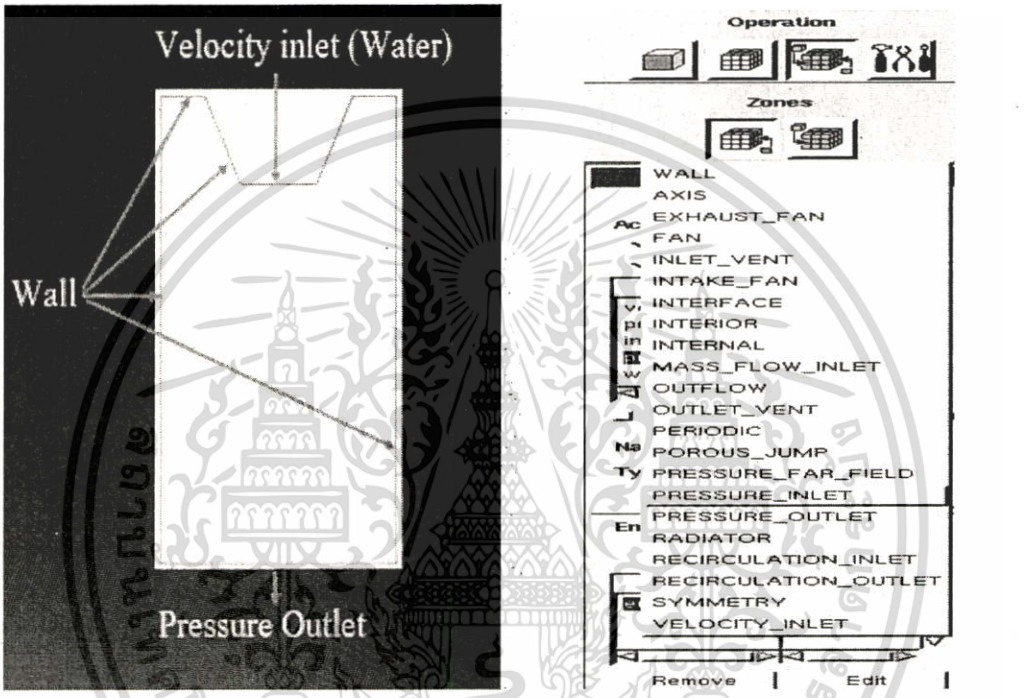
(ก) (ข)

รูปที่ 4.3 (ก) รูปแบบของขอบเขตย่อยของชุดหัวฉีด, (ข) จำนวนขอบเขตย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT)

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เป็นการกำหนดเงื่อนไขของการสร้างแบบจำลองเฉพาะในแต่ละด้านหรือแต่ละพื้นที่ประกอบด้วย (1) ความเร็วของของไหลปฐมภูมิ (น้ำ) ที่ออกจากหัวฉีดเข้าสู่ห้องผสมกำหนดเป็นVelocity inlet , (2) ทางออกของของไหลปฐมภูมิกำหนดเป็น 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 $^{\circ}$C) ที่สภาวะคงตัว (Steady State)

4.1.5 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร (Variable Condition) และสภาวะการแก้ปัญหา

โปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS FLUENT) เป็นการนำรูปแบบของชุดหัวฉีดที่มีการสร้างขอบเขตย่อยและกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจากโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) มาจำลอง ซึ่งมีการสร้างแบบการจำลองของชุดหัวฉีดหลายค่าแตกต่างกันออกไป การพิจารณาการสร้างแบบการจำลองเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในสภาวะคงตัว (Steady State) มีผนังที่ไม่เคลื่อนที่และไม่ลื่นไถลจึงใช้รูปแบบการคำนวณแบบ no-slip function ซึ่งรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน ใช้หลักการคำนวณในรูปแบบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแสวงหาประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Renormalization-group (RNG) k-ε modelซึ่งเป็นรูปแบบจำลองที่มีความแม่นยำในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่กว้างโดยการใช้เทคนิคทางสถิติอย่างแม่นยำ และมีความคล้ายคลึงกับ Standard k-ε model ซึ่งเป็นโมเดลมาตรฐานที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง

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

4.1.6 กรณีศึกษา

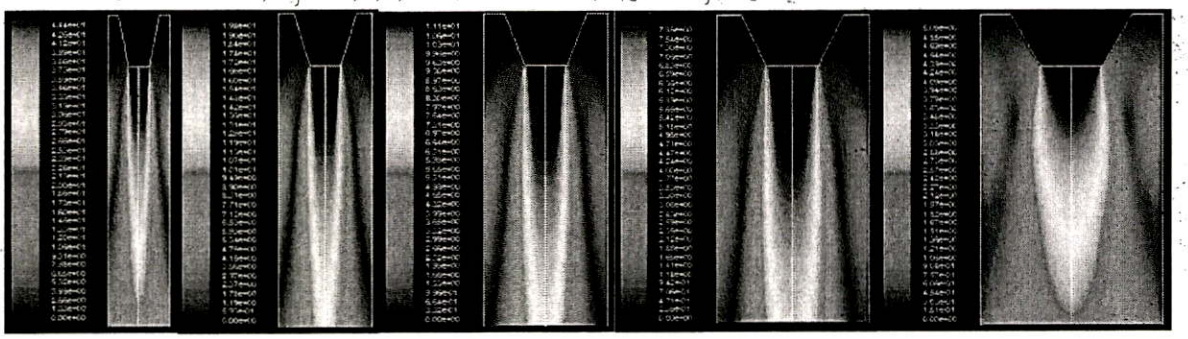
กรณีศึกษาที่ใช้ในการสร้างแบบการจำลองนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของของไหลปฐมภูมิที่ทางเข้า เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด (D_j) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องผสม (D_c) ความยาวของห้องผสม (L_c) ดังนี้

- 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)

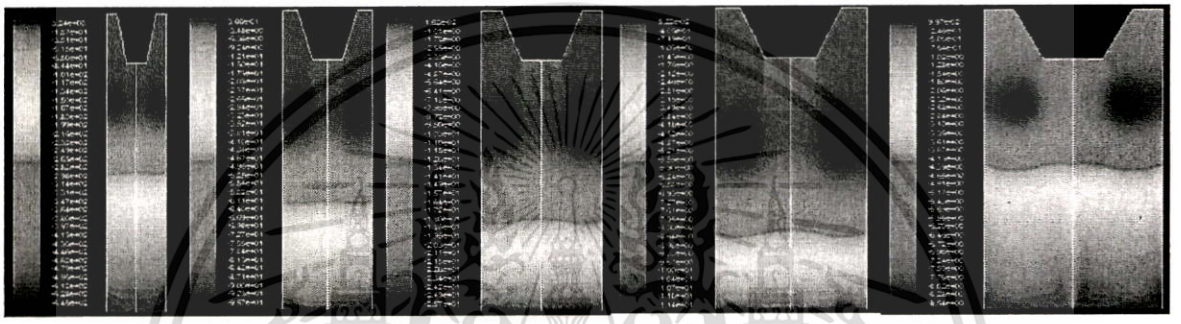
การศึกษาการสร้างแบบการจำลองการไหลของของไหลโดยใช้โปรแกรมแอนซิสฟลูเอนท์ (ANSYS FLUENT) และการศึกษารูปแบบการไหลของชุดหัวฉีดที่มีการสร้างแบบการจำลองของไหลสองชนิดที่ตัวแปรค่าต่างๆแสดงได้ดังรูป 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



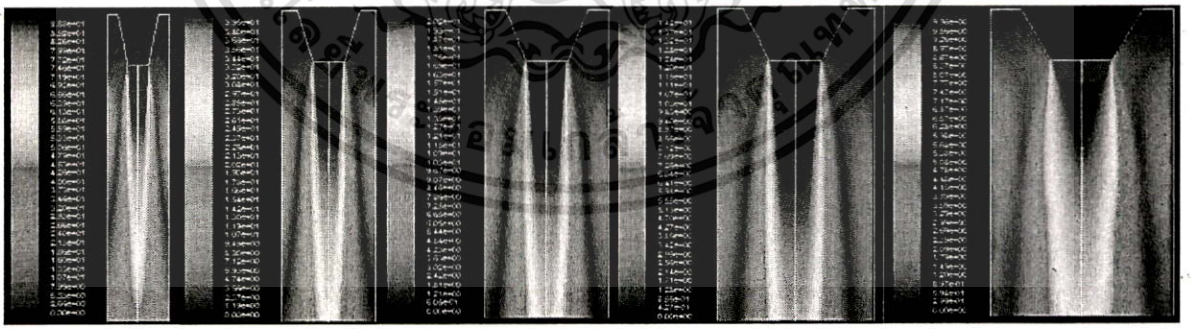
(ก) แผนผังความเร็ว



(ข) แผนผังความดัน

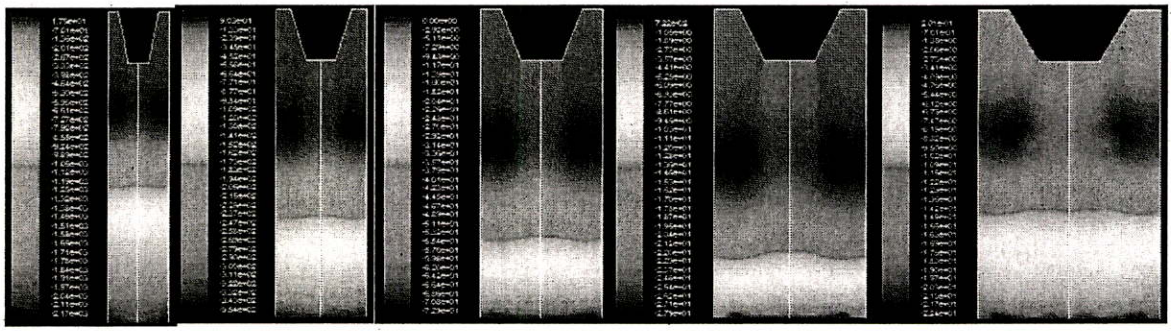
รูปที่ 4.5 แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและที่ D_j เท่ากับ 4,6,8,10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ

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



(ก) แผนผังความเร็ว

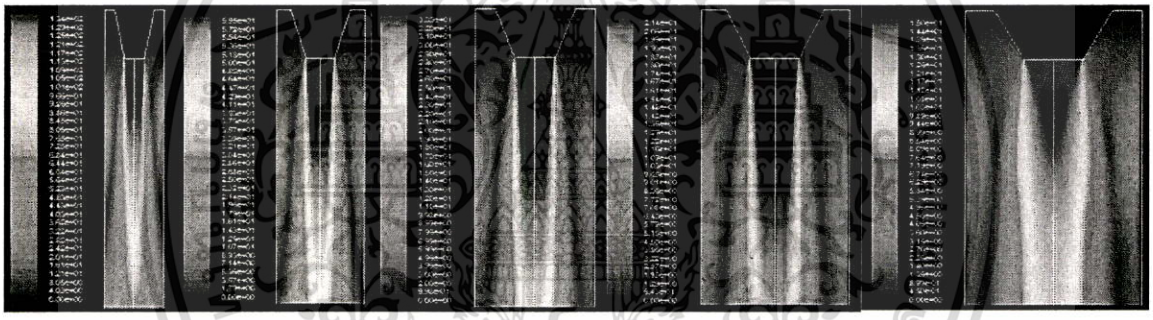
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



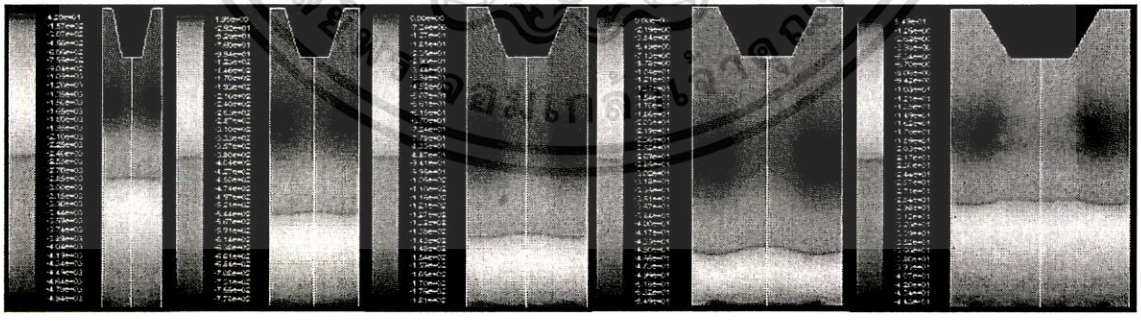
(ข) แผนผังความดัน

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

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



(ก) แผนผังความเร็ว

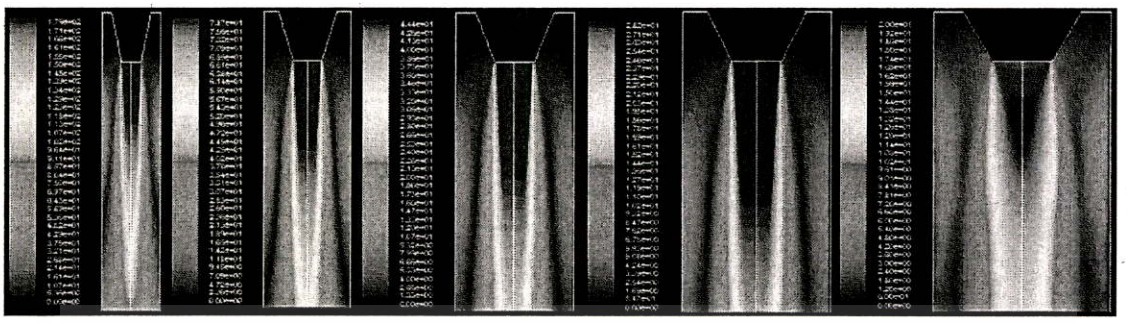


(ข) แผนผังความดัน

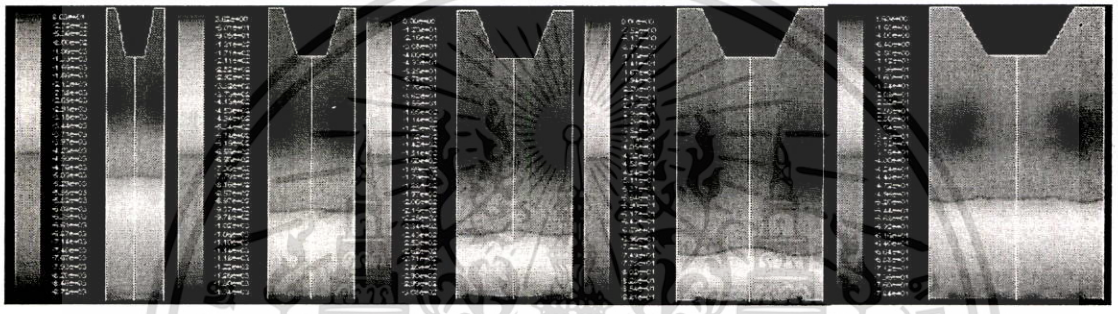
รูปที่ 4.7 แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและขนาด D_j เท่ากับ 4,6,8,10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



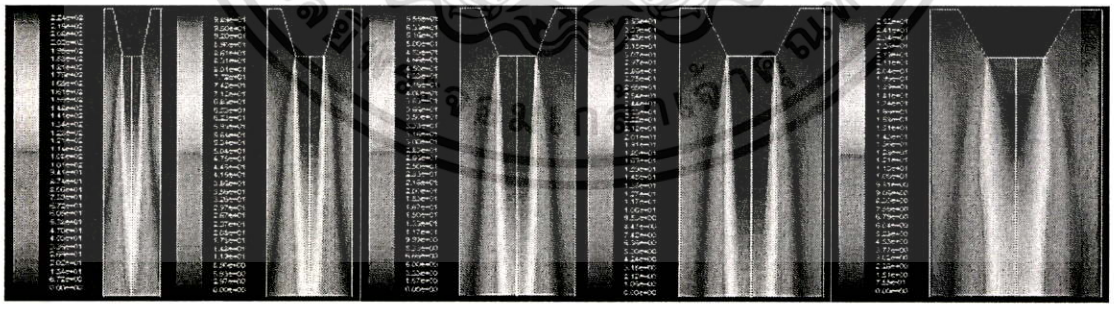
(ก) แผนผังความเร็ว



(ข) แผนผังความดัน

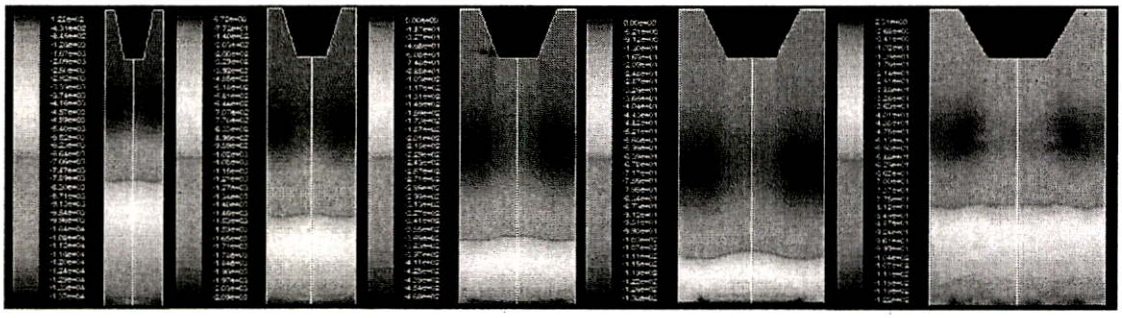
รูปที่ 4.8 แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 8 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและขนาด D_j เท่ากับ 4,6,8,10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ

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



(ก) แผนผังความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



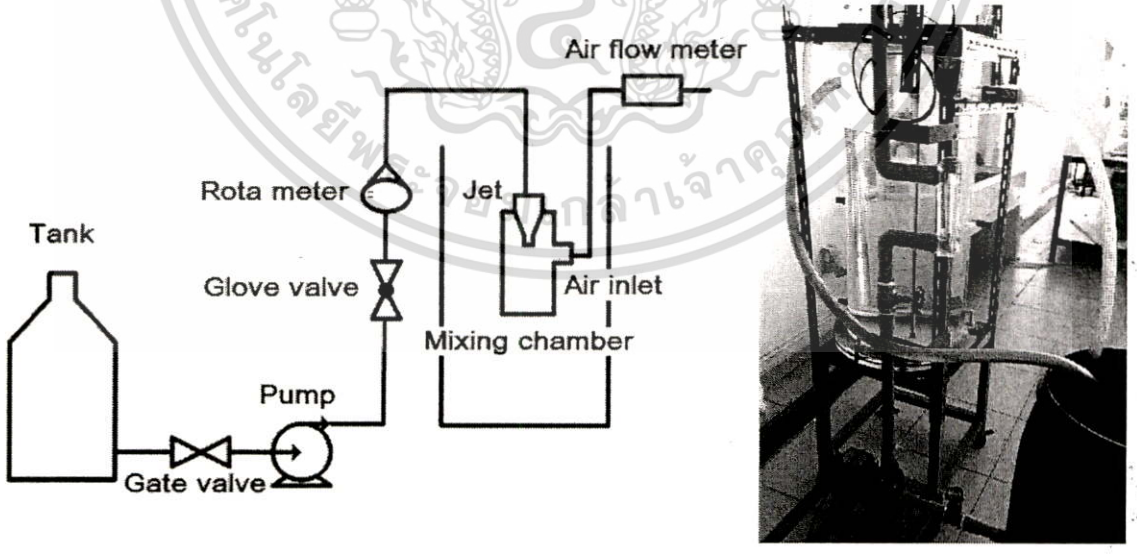
(ข) แผนผังความดัน

รูปที่ 4.9 แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและขนาด D_j 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



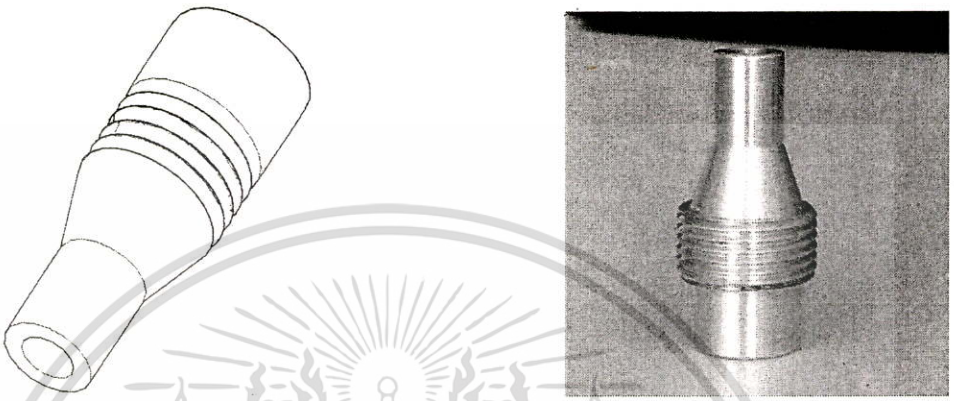
(ก) (ข)

รูปที่ 4.10 (ก) แผนผังโครงสร้างชุดทดลอง, (ข) การติดตั้งชุดทดลองของจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.1 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ (Jet Head)

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

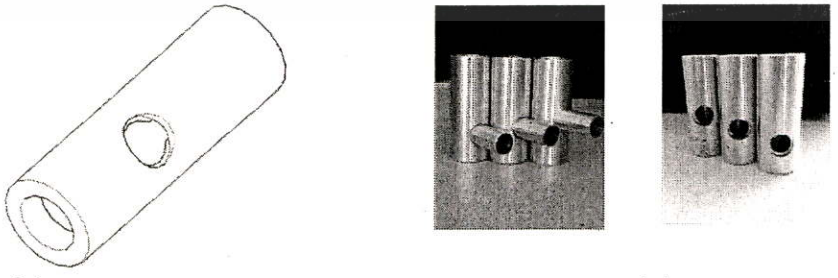


(ก) (ข)

รูปที่ 4.11 (ก) แบบของหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวฉีดเจ็ทที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1.2 ห้องผสม (Mixing Chamber)

ห้องผสมที่ใช้ในโครงงานนี้จะมีทั้งหมด 6 แบบ ซึ่งการออกแบบจะเปลี่ยนแปลงระยะและขนาดของทางเข้าอากาศอัตราส่วนที่เหมาะสมของความยาวห้องผสมต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดเหนี่ยวนำ (L_c/D_j) มีค่าระหว่าง 4 ถึง 9 ซึ่งอัตราส่วนของห้องผสมที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 6 โดยมีความยาวจากปลายหัวฉีดถึงทางออก 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)

หัวต่อท่ออากาศเป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างทางเข้าอากาศกับสายยางโดยทำหน้าที่ส่งต่อของไหลทุติยภูมิซึ่งก็คืออากาศในโครงงานนี้ อากาศจะถูกดูดผ่านหัวต่อนี้ไปผสมกับของไหลปฐมภูมิคือน้ำในห้องผสม ในที่นี้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศจะมีทั้งหมด 4 ขนาด คือ $1D_j$, $1.5D_j$, $2D_j$ และ $2.5D_j$ ซึ่งมีหัวต่อท่ออากาศทั้งหมด 6 ชิ้นคือ $1D_j$ 1 ชิ้น, $1.5D_j$ 1 ชิ้น, $2D_j$ 3 ชิ้นและ $2.5D_j$ 1 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14



(ก) (ข)

รูปที่ 4.14 (ก) แบบของรูอากาศที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวต่อท่ออากาศที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ถังผสม (Mixing Tank)

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



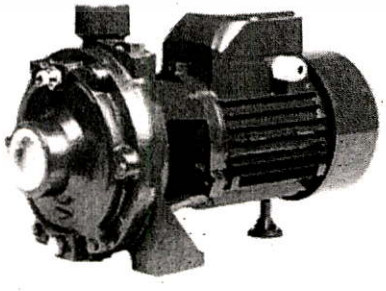
รูปที่ 4.15 ถังผสม (Mixing-Tank) ที่ใช้ในการทดลอง

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 0.5 Hp (370.6 Watt) แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ให้อัตราการไหลสูงสุดได้ 90l/min เฮดสูงสุด 22 เมตร



รูปที่ 4.16 เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 วาล์ว(Valve)

วาล์ว เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการไหลของของไหล

- Gate Valve

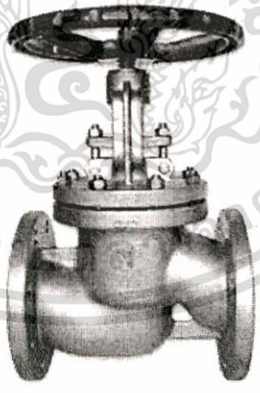
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปิดปิดน้ำที่จะถูกดูดเข้ามาไหลเวียนในระบบโดยปั๊มน้ำ ถูกติดตั้งอยู่ระหว่างถังบรรจุน้ำและปั๊มน้ำ สามารถป้องกันการไหลกลับของน้ำได้



รูปที่ 4.17 เกทวาล์ว

- Globe Valve

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของของไหลปฐมภูมิ โดยจะถูกติดตั้งอยู่ก่อนเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.18

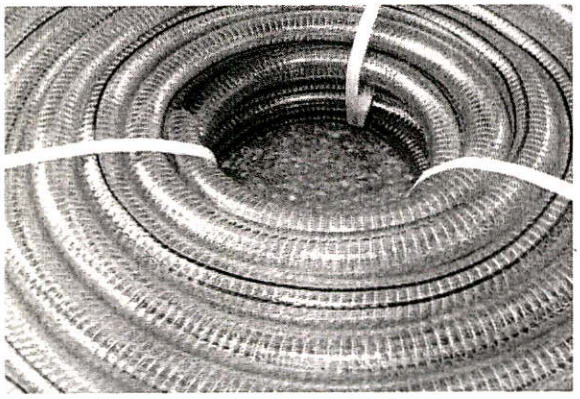


รูปที่ 4.18 โกลบวาล์ว

4.2.3.3 สายยาง (Rubber Tube)

การทดลองนี้จะใช้สายยาง2ชนิด ชนิดแรกคือสายยางขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง ¾ นิ้ว ใช้เพื่อเชื่อมต่อท่อพีวีซีกับหัวฉีดทั้งด้านทางเข้าปฐมภูมิและทุติยภูมิ ชนิดที่สองคือสายยางขนาดใหญ่ ถูกต่อเข้าที่รูระบายน้ำที่สูงที่สุดของทั้งใสทั้งสองด้านเพื่อระบายน้ำออกสู่ถังบรรจุน้ำทำให้ระดับน้ำในการทดลองคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 สายยางขนาดใหญ่

4.2.3.4 ชุดท่อพีวีซี (PVC pipes and joints)

ท่อพีวีซีทึบที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้ในการส่งผ่านน้ำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ¾ นิ้ว (19.05 เซนติเมตร) มีสีฟ้า เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ90° 3 ชิ้น และข้อเกลียวด้วยกาวเชื่อม



รูปที่ 4.20 ชุดท่อพีวีซี

4.2.4 เครื่องมือวัด (Measuring Equipment)

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำเข้าไปในระบบผ่านทางท่อพีวีซีใส และเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำที่ถูกสูบผ่านเครื่องส่งกำลังเข้าสู่ระบบ

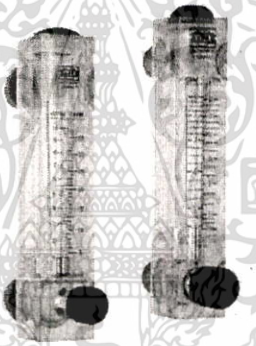
4.2.4.1 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นของบริษัท KIMO INSTRUMENT ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งใช้วัดความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 0.15-30 m/s ความละเอียดในการวัด 0.01 m/s ความแม่นยำในการวัด$\pm$3% ทำการสอบเทียบ(Calibration)มาจากโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



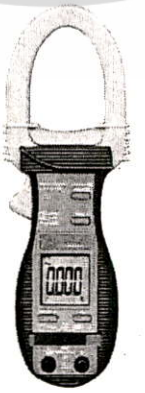
รูปที่ 4.21 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer)

4.2.4.2 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Rota Meter)เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในการทดลองใช้ของบริษัท Nitto Instruments Model Z-500, Series Z-5032 ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำบริเวณก่อนท่อทางเข้าปฐมภูมิขณะทำการทดลอง 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), เพาเวอร์แฟ็คเตอร์ (Power factor) และกำลัง (Power)



รูปที่ 4.23 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ (Canon EOS 7D)



รูปที่ 4.24 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ

4.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองชุดหัวฉีดนั้นต้องมีการติดตั้งชุดหัวฉีด ปรับอัตราการไหลต่างๆ รวมถึงการที่ทำให้น้ำในถังอยู่ในสภาวะคงที่นั้น ทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. ติดตั้งชุดหัวฉีดเหนี่ยวนำในถังผสมที่ตำแหน่ง 75 เซนติเมตร จากก้นถังแนวดิ่งและอุณหภูมิในการติดตั้งอยู่ที่ 25 $^{\circ}$C
2. บรรจุน้ำในถังผสมจนกระทั่งมีปริมาตร 0.287 ลูกบาศก์เมตร หรือที่ความสูงของระดับน้ำอยู่ที่ 55 เซนติเมตร จากก้นถังผสม และเปิดรูระบายน้ำเพื่อให้ระดับน้ำคงที่ (steady state)
3. ปรับอัตราการไหลของน้ำไปยังค่าที่ต้องการ เริ่มที่ 20.1 ลิตรต่อนาที
4. ต่อสายยางถ่ายน้ำสู่ถังเก็บ รอจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว
5. เริ่มทำการวัดค่าความเร็วของอากาศ โดยนับเอาค่าที่แสดงบนจอเครื่องวัดนานที่สุด และบ่อยครั้งที่สุด
6. เปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเป็นค่า 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที และทำซ้ำตั้งแต่ 1- 5
7. เปลี่ยนตำแหน่งของรูอากาศเป็นจำนวนเท่าของเส้นผาศูนย์กลางของหัวฉีด ได้แก่ ตำแหน่งของรูอากาศ (L_c) เป็น 1, 2 และ 3 เท่าของ เส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีด (D_j) และทำซ้ำตั้งแต่ 1 ถึง 6
8. เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูอากาศเป็นจำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางรูอากาศ (D_a) เป็น1, 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

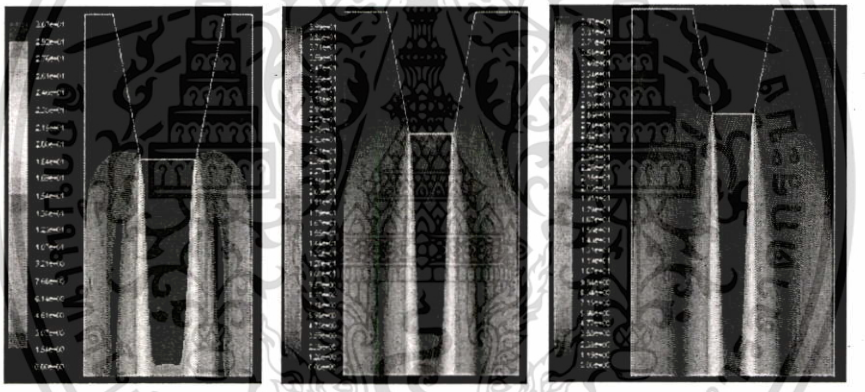
บทที่ 5

ผลการสร้างแบบจำลองและการทดลอง

5.1 ผลการสร้างแบบจำลอง

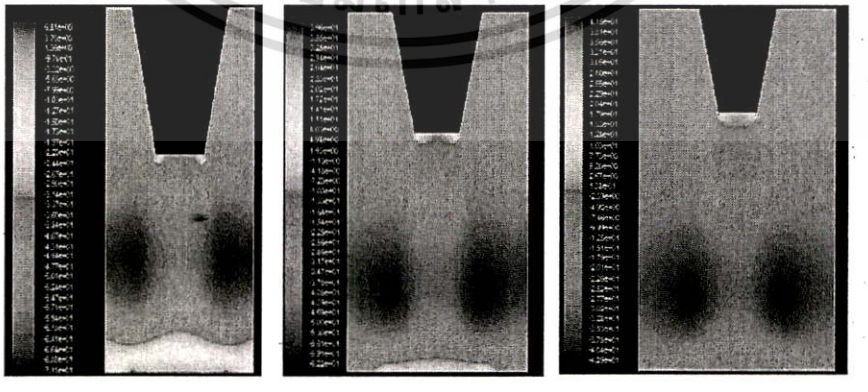
การสร้างแบบจำลองทำขึ้นเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องผสม (D_c) และความยาวห้องผสม (L_c) โดยกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด (D_j) เป็น 6 มิลลิเมตรในทุกการสร้างแบบจำลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องผสม (D_c) กำหนดให้มีค่าเป็น $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และที่ความยาวของห้องผสม (L_c) มีค่าเป็น $3D_j$, $6D_j$ 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



(ก) (ข) (ค)

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

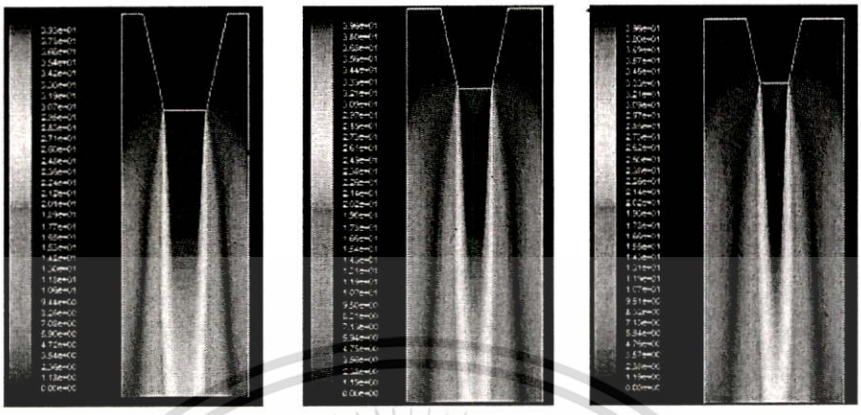


(ก) (ข) (ค)

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

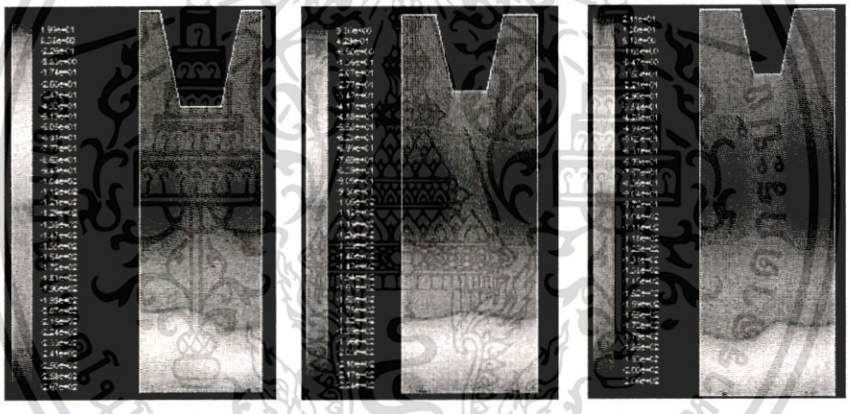
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



(ก) (ข) (ค)

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

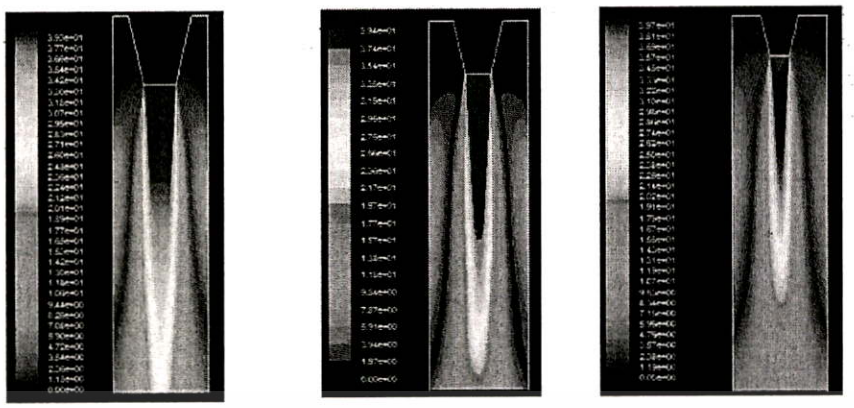


(ก) (ข) (ค)

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

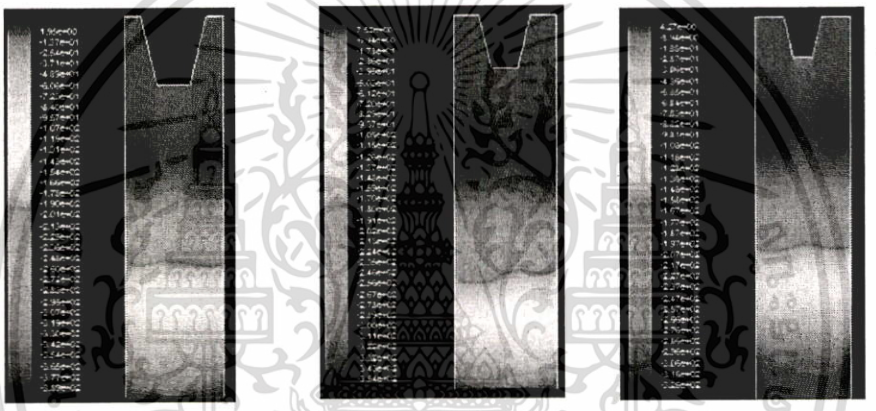
ผลการสร้างแบบจำลองที่มีขนาดของความยาวของห้องผสม (L_c) เท่ากับ $6D_j$ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องผสม (D_c) มีค่าเท่ากับ $3D_j$, $4D_j$ และ $5D_j$ แสดงดังรูปที่ 5.5 และ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข) (ค)

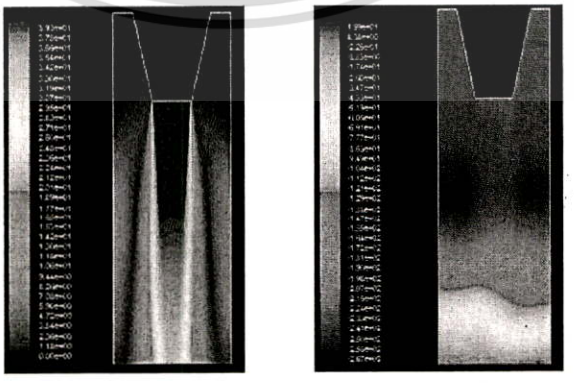
รูปที่ 5.5 แผนผังความเร็วเมื่อ L_c เท่ากับ $9D_j$ ที่ (ก) $D_c = 3D_j$, (ข) $D_c = 4D_j$ และ (ค) $D_c = 5D_j$



(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

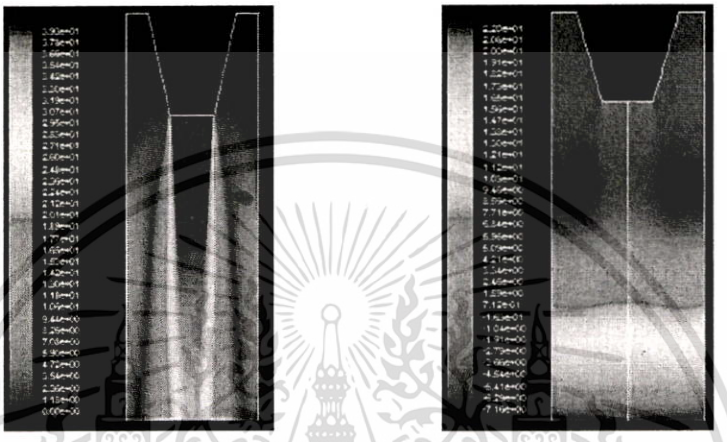


รูปที่ 5.7 แผนผังความเร็ว (ซ้าย) และแผนผังความดัน (ขวา) ที่ D_c เท่ากับ 3Dj และ L_c เท่ากับ $6D_j$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

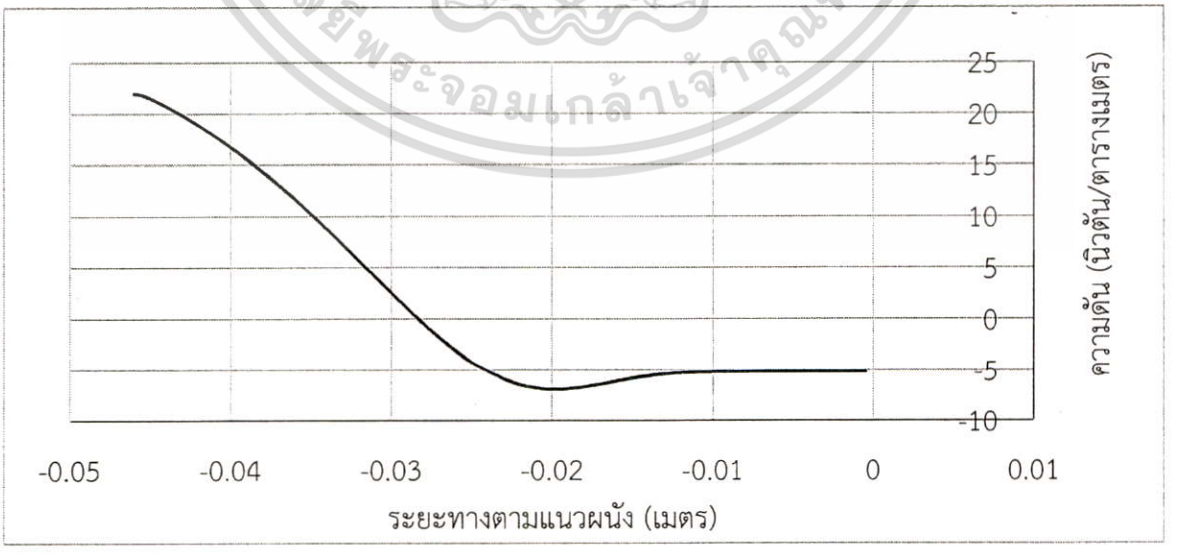
เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20.10 ลิตรต่อนาที แผนผังความดันและแผนผังค่วามเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



(ก) (ข)

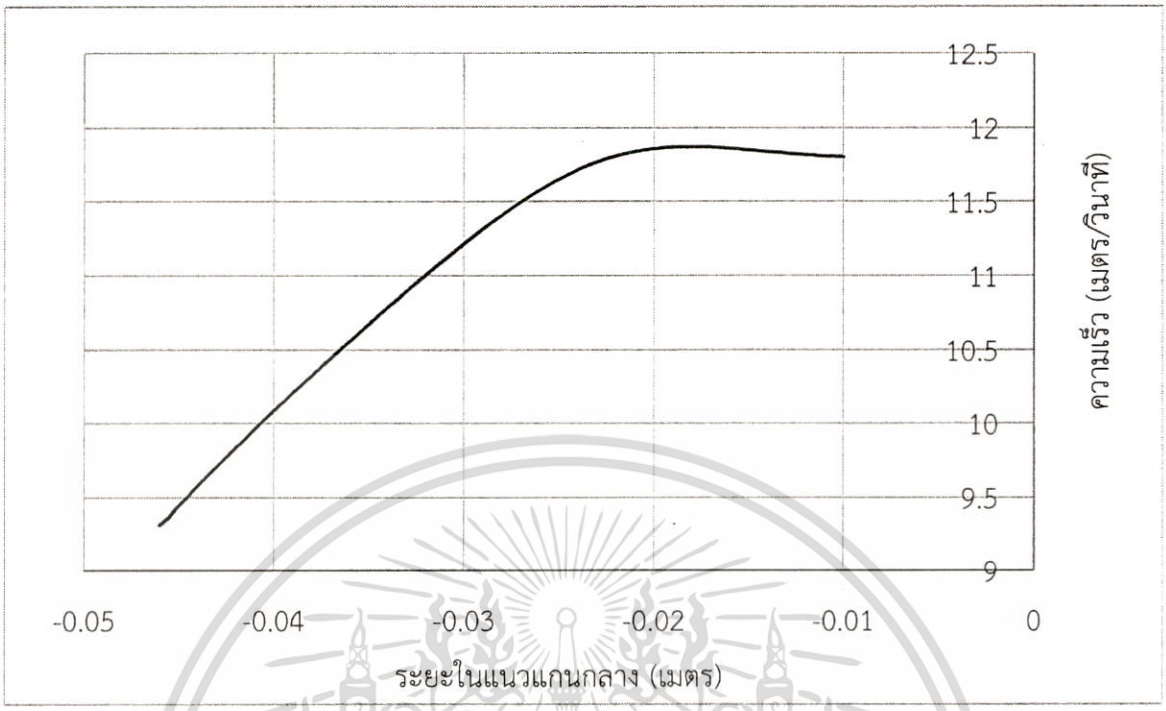
รูปที่ 5.8 (ก) แผนผังความเร็วและ (ข) แผนผังความดัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 20.10 ลิตรต่อนาที

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวผนังของห้องผสมและความเร็วเจ็ทที่แกนกลางต่อระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของน้ำเป็น 20.10 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ



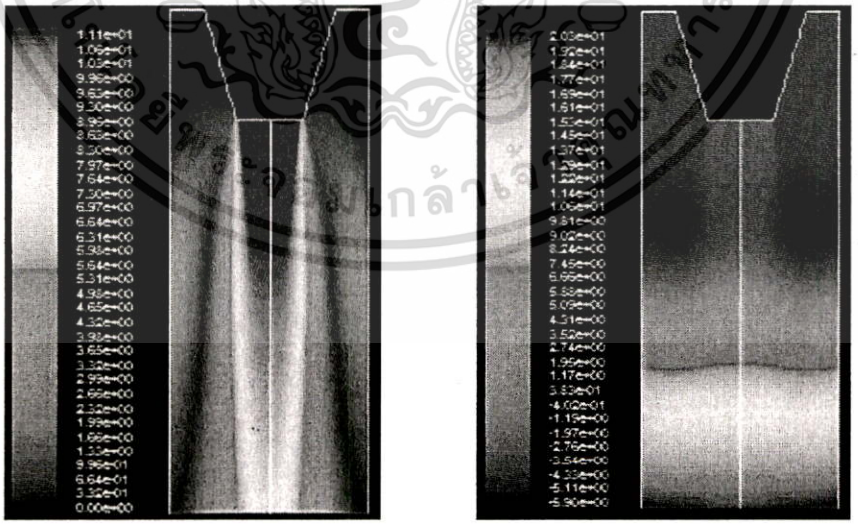
รูปที่ 5.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางตามแนวผนัง เมื่ออัตราการไหลเป็น 20.10 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีด เมื่ออัตราการไหลเป็น 20.10 ลิตรต่อนาที

เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 18.6 ลิตรต่อนาที แผนผังความดันและแผนผังความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 5.11

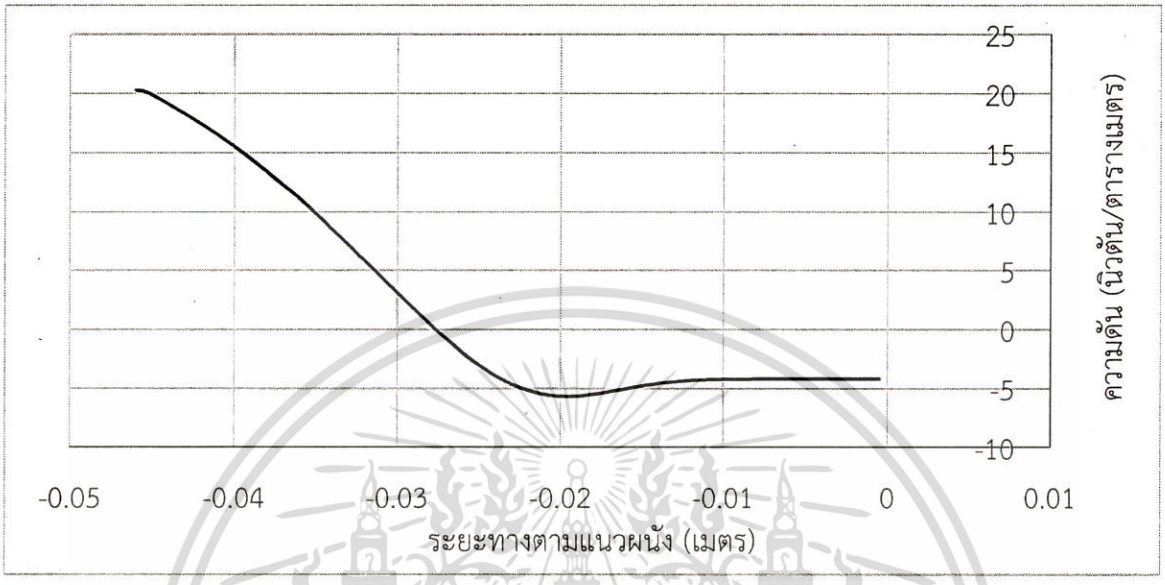


(ก) (ข)

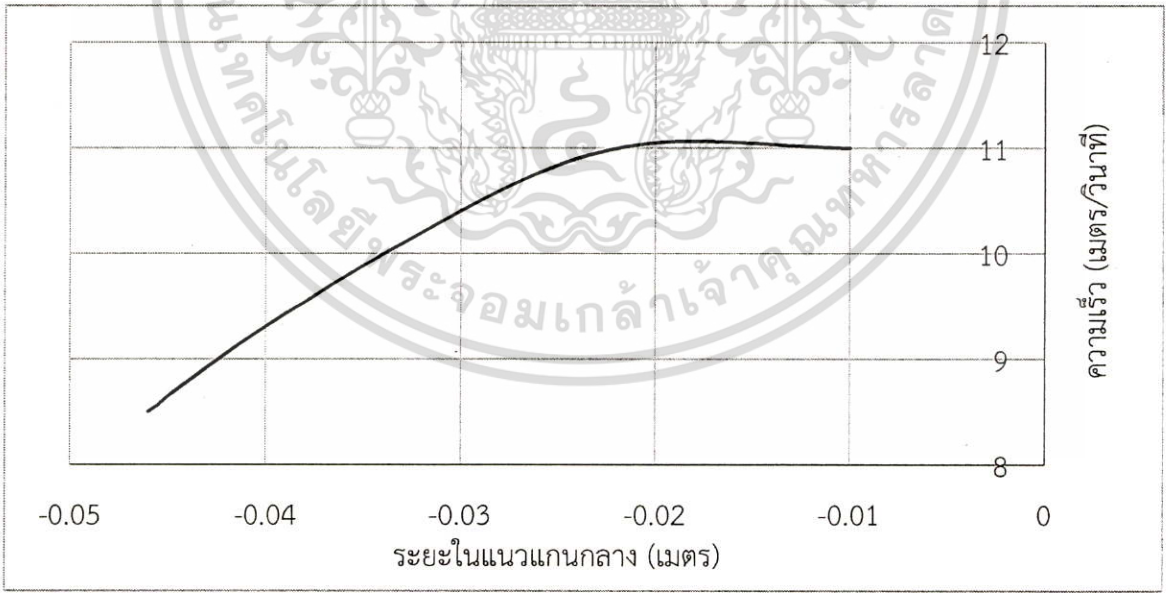
รูปที่ 5.11 (ก) แผนผังความเร็วและ (ข) แผนผังความดัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 18.67 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวผนังของห้องผสมและความเร็วเจ็ทที่แกนกลางต่อระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของน้ำเป็น 18.67 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ



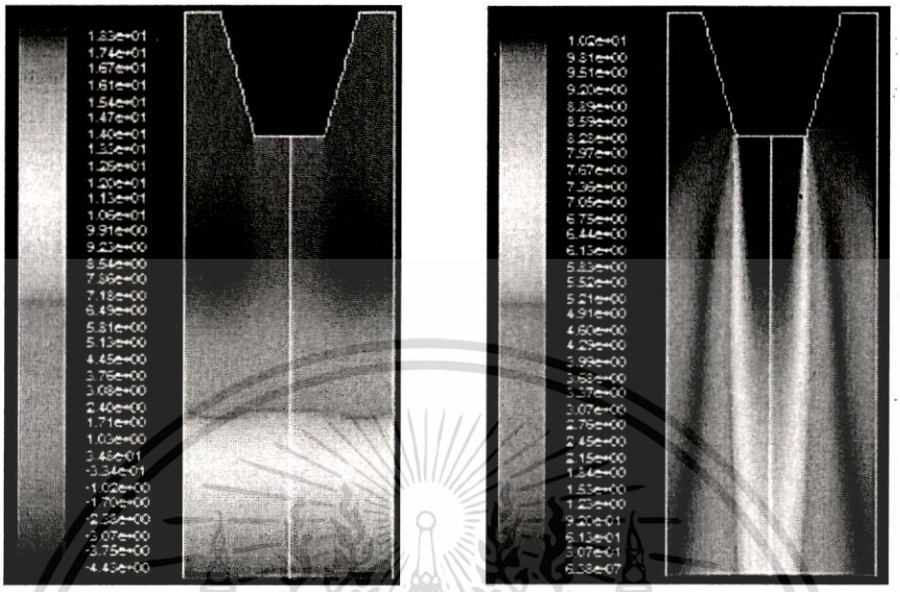
รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางตามแนวผนัง เมื่ออัตราการไหลเป็น 18.67 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีด เมื่ออัตราการไหลเป็น 18.67 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

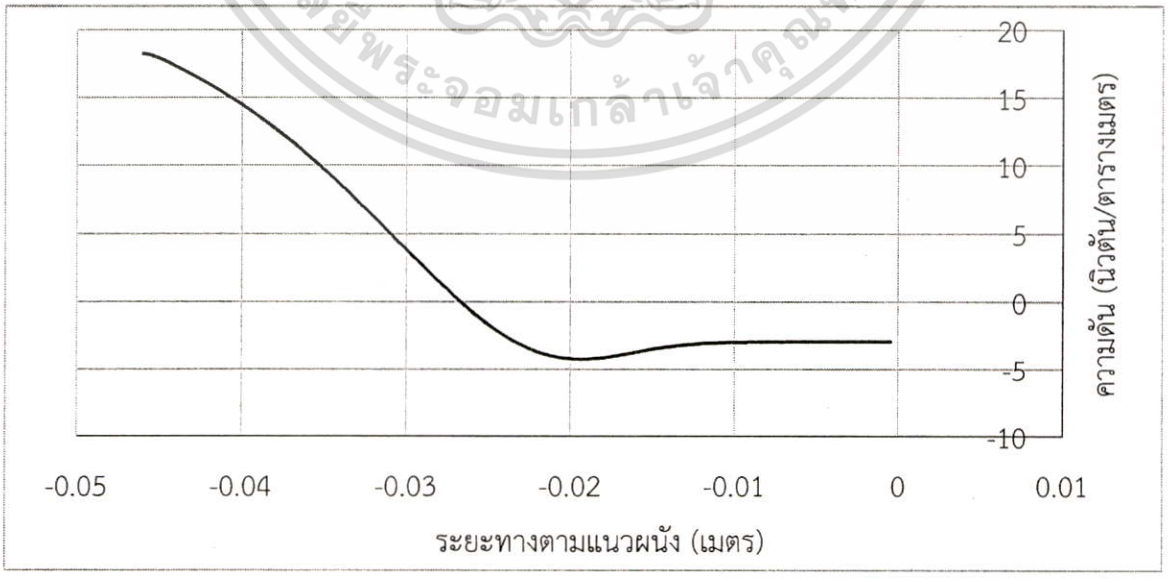
เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 17.24 ลิตรต่อนาที แผนผังความดันและแผนผังความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 5.14



(ก) (ข)

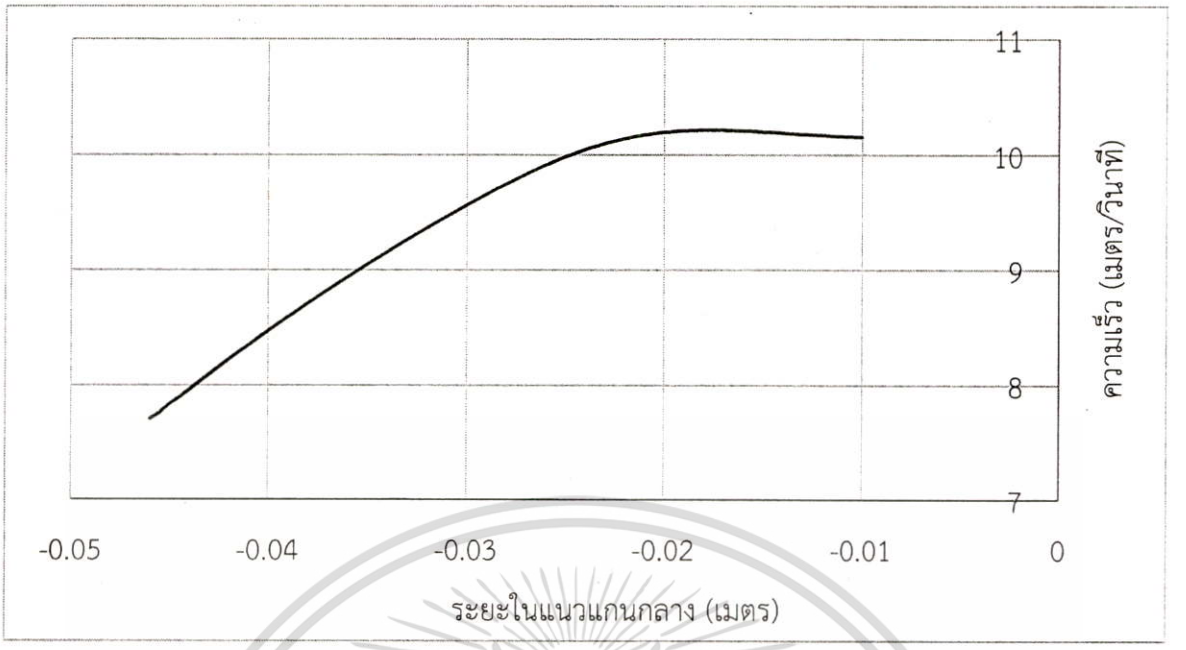
รูปที่ 5.14 (ก) แผนผังความเร็วและ (ข) แผนผังความดัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 17.24 ลิตรต่อนาที

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวผนังของห้องผสมและความเร็วเจ็ทที่แกนกลางต่อระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของน้ำเป็น 17.24 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ



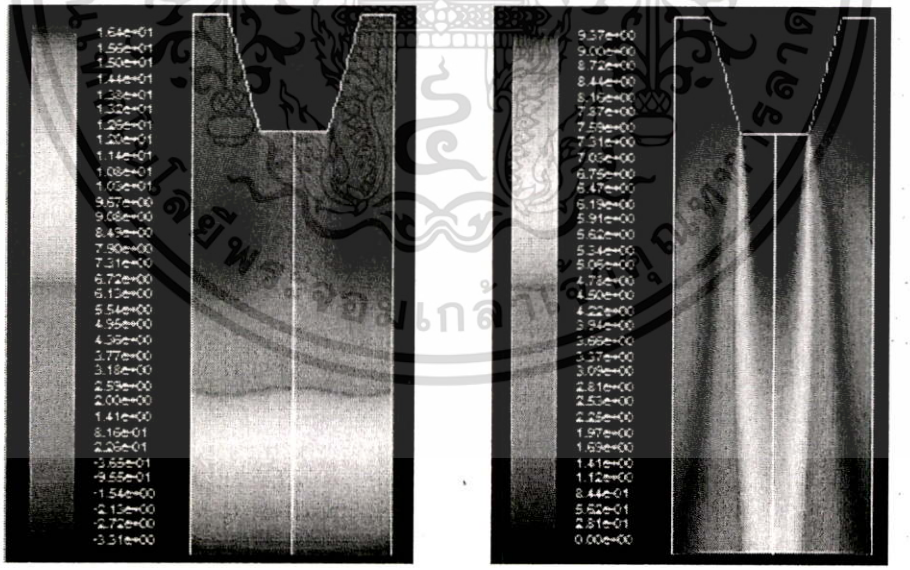
รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางตามแนวผนัง เมื่ออัตราการไหลเป็น 17.24 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีด เมื่ออัตราการไหลเป็น 17.24 ลิตรต่อนาที

เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 15.81 ลิตรต่อนาที แผนผังความดันและแผนผังความเร็วแสดงได้ดังรูปที่ 5.17

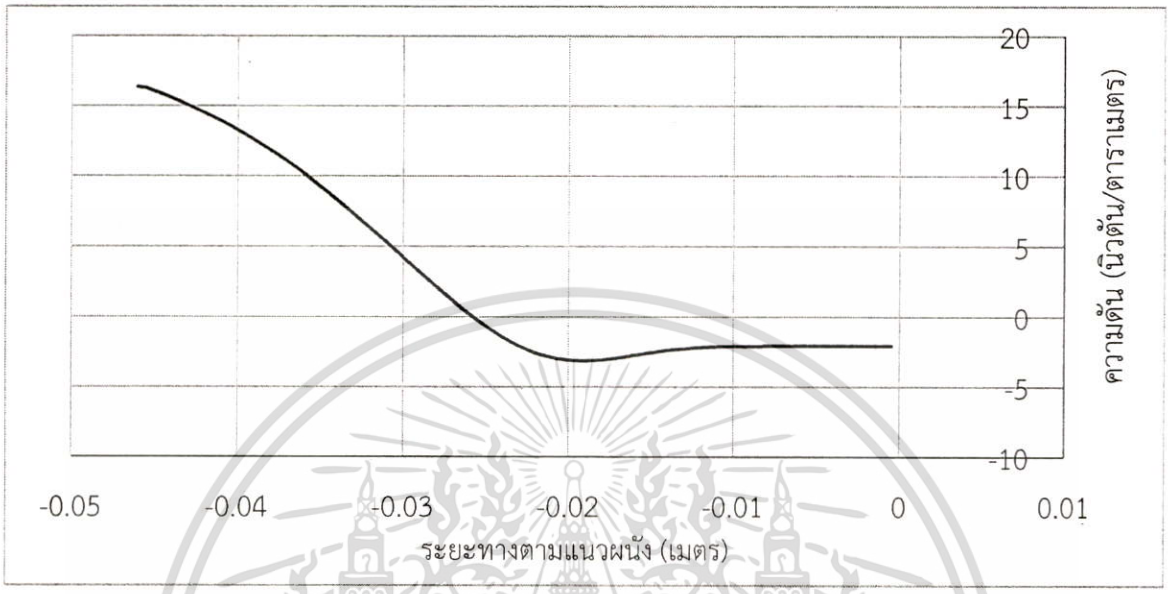


(ก) (ข)

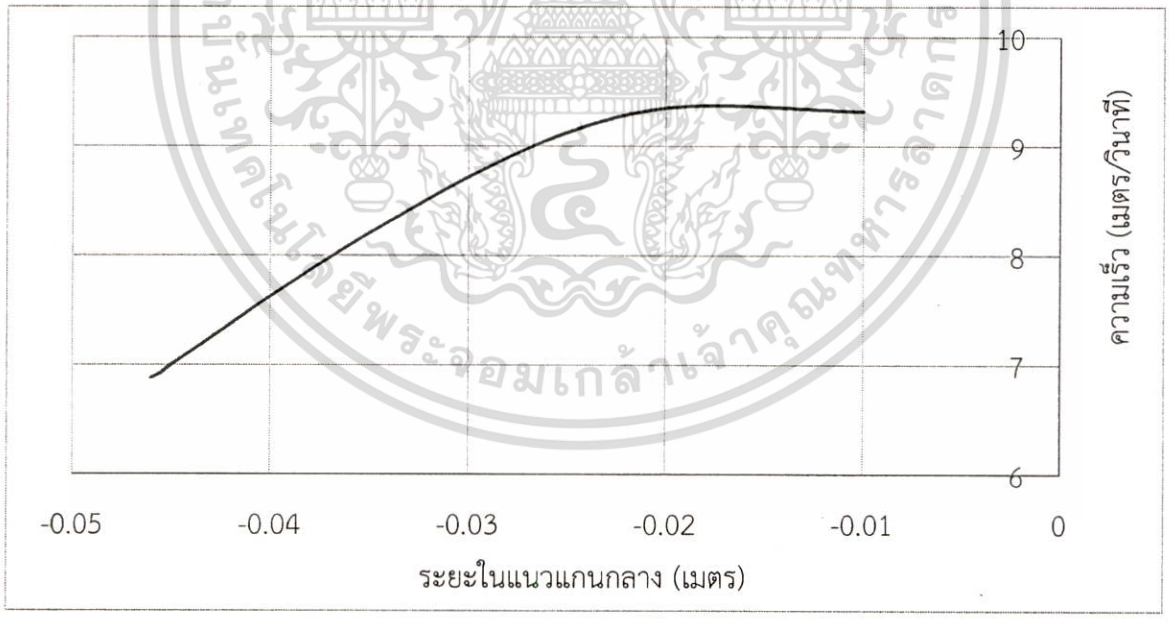
รูปที่ 5.17 (ก) แผนผังความเร็วและ (ข) แผนผังความดัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 15.81 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวผนังของห้องผสมและความเร็วเจ็ทที่แกนกลางต่อระยะทางจากปลายหัวฉีดเมื่ออัตราการไหลของน้ำเป็น 15.81 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 5.18 และ 5.19 ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีด เมื่ออัตราการไหลเป็น 15.81 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกนกลางของเจ็ทและระยะทางจากปลายหัวฉีด เมื่ออัตราการไหลเป็น 15.81 ลิตรต่อนาที

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

จากสมการแบร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

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

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

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

และจาก

$$Q = Av \tag{5.2}$$

เมื่อนำสมการที่ (2) แทนในสมการที่ (1) ได้

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

เมื่อความดันที่จุดสองคือบรรยากาศ และ ความเร็วที่จุดสองมีค่าน้อยมาก ดังนั้น

$$\left(\frac{Q_1}{A_1}\right)^2 = 2g\left(\frac{0 - P_1}{\rho_a g} + \frac{0}{2g} + (z_2 - z_1)\right)$$

$$Q_1 = A_1\sqrt{2g\left(\frac{-P_1}{\rho_a g} + (z_2 - z_1)\right)}$$

$$Q_{a,sim} = A_1\sqrt{2g\left(\frac{-P_1}{\rho_a g} + (z_2 - z_1)\right)} \tag{5.4}$$

เมื่อพื้นที่หน้าตัดที่จุด 1 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

เมื่อ $Q_{a,sim}$ = อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการจำลอง (l/min)

P_1 = ความดันที่ต่ำที่สุดที่ได้จากกราฟ ณ อัตราการไหลนั้นๆ (N/m^2)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ = 1.18 (kg/m^3)

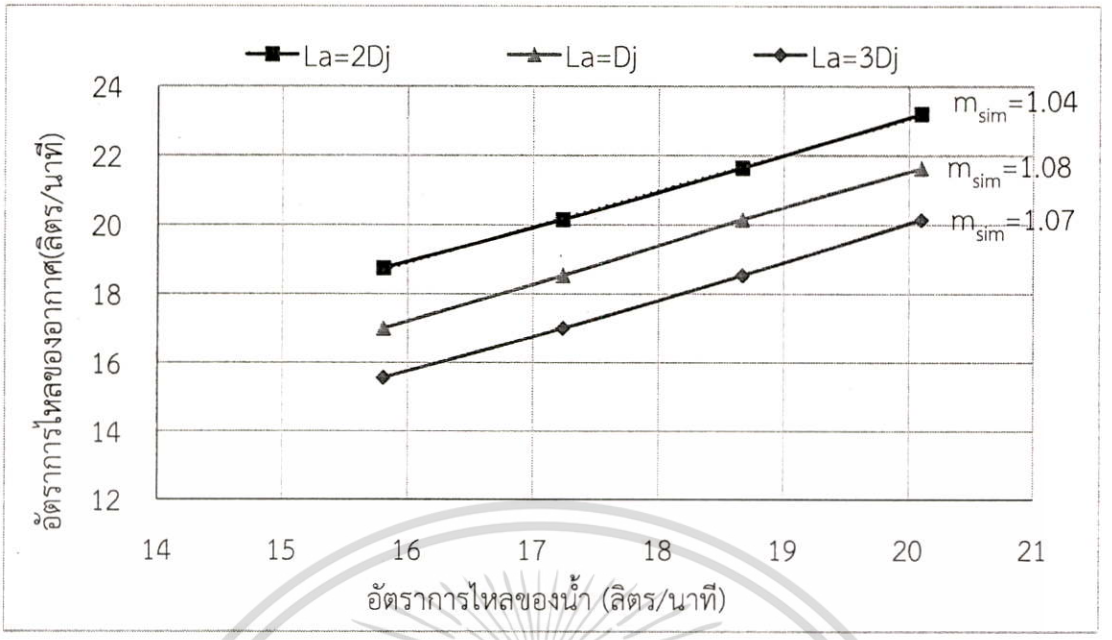
อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 5.1 อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณ

อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	อัตราการไหลของอากาศ (l/min)		
	L_a=Dj	L_a =2Dj	L_a =3Dj
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

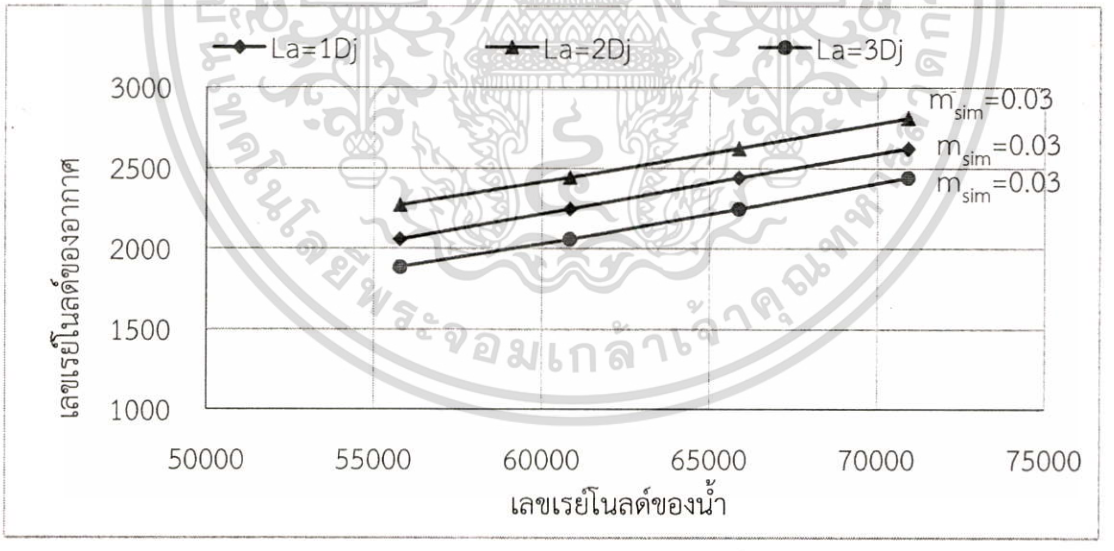
อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ความดันต่ำสุดของอัตราการไหลแต่ละค่าเมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของรูอากาศ (L_a) เป็น $1D_j$, $2D_j$ และ $3D_j$ สามารถเขียนเป็นกราฟเทียบความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำได้ ดังรูปที่ 5.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและอากาศจากการสร้างแบบจำลอง

ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลสามารถเปลี่ยนเป็นความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติได้คือเลขเรย์โนลด์เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และนำไปใช้งานในสภาวะต่างๆ กราฟความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ของน้ำและอากาศแสดงดังรูปที่ 5.21



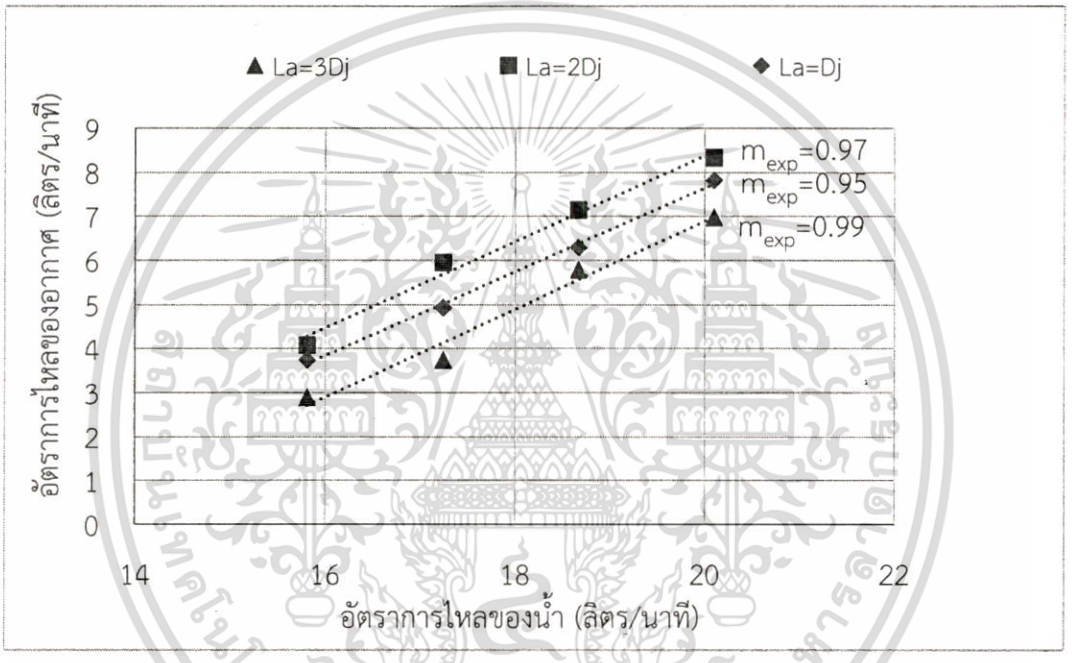
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์น้ำและอากาศของ L_a ต่างๆที่ได้จากการจำลอง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

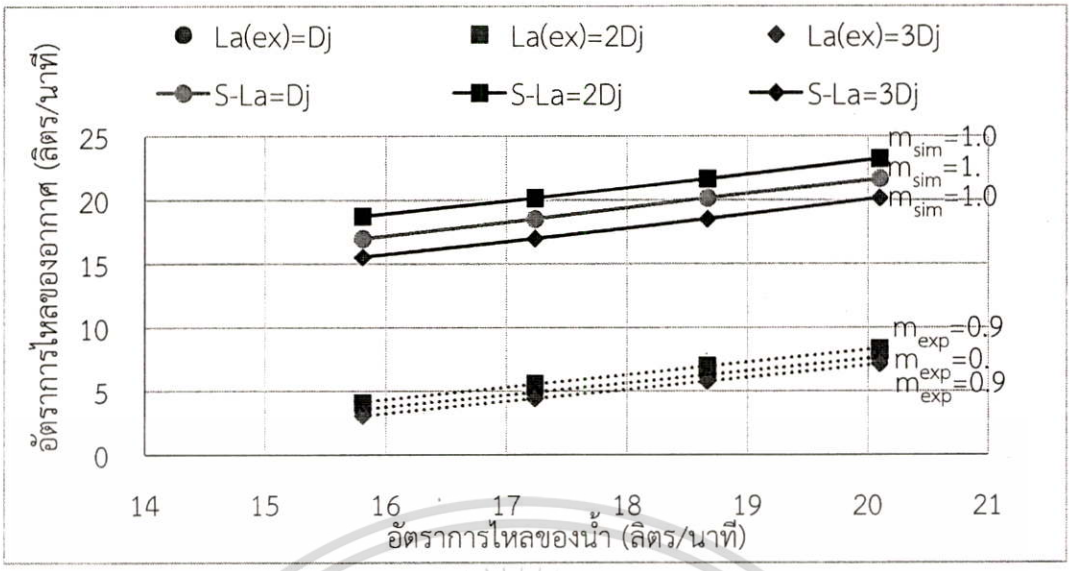


รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ L_a ต่างๆ จากการทดลอง

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

ค่าอัตราการไหลของอากาศต่ออัตราการไหลของน้ำที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งของทางเข้าอากาศต่างๆเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

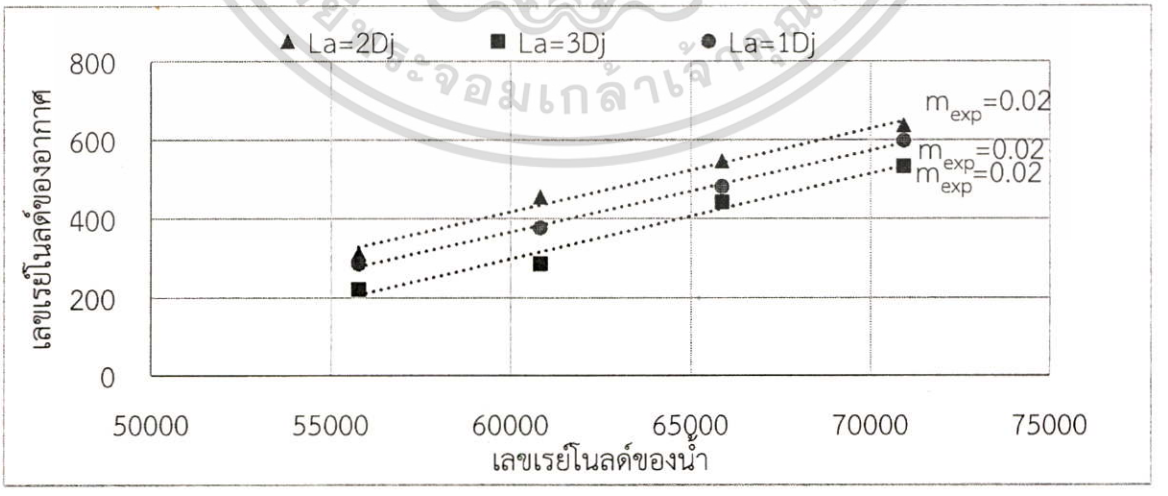
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศและน้ำของการทดลองและการสร้างแบบจำลองที่ตำแหน่งรูอากาศต่างๆ

กราฟทุกเส้นในรูปที่ 5.23 มีแนวโน้มเป็นฟังก์ชั่นเชิงเส้น 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 $2D_j$

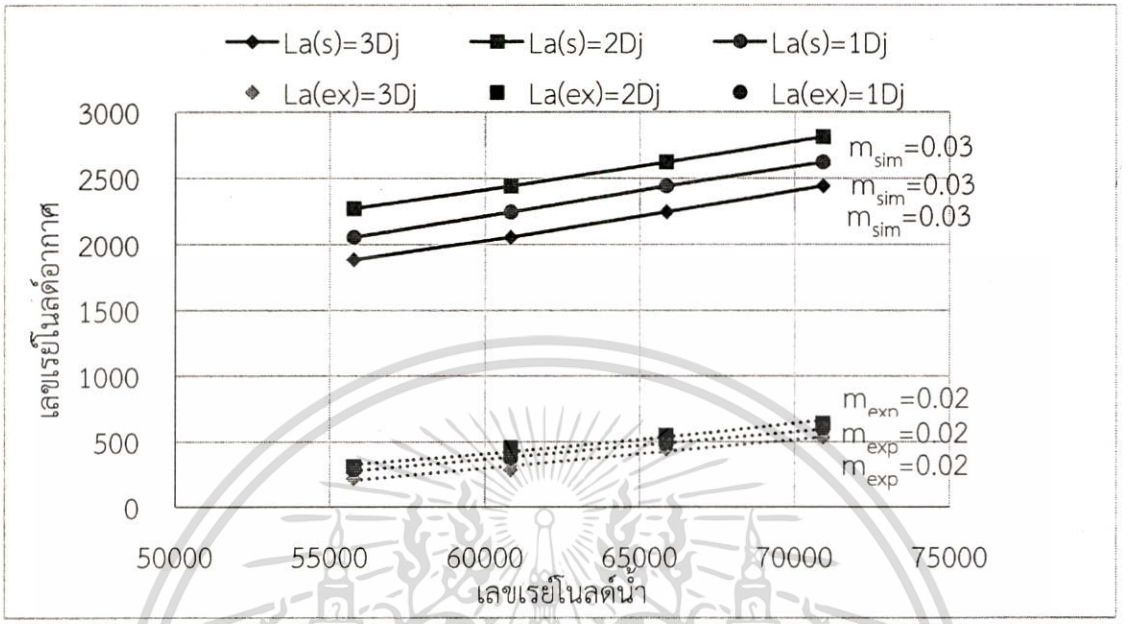
ค่าอัตราการไหลของน้ำและอากาศสามารถเปลี่ยนไปเป็นตัวแปรไร้มิติได้คือเลขเรย์โนลด์ ซึ่งความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ของน้ำกับเลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งรูอากาศ (L_a) เท่ากับ $1D_j$, $2D_j$ และ $3D_j$ แสดงดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์น้ำและอากาศที่ L_a ต่างๆจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขเรย์โนลด์ของอากาศและน้ำที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งของทางเข้าอากาศต่างๆเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.25

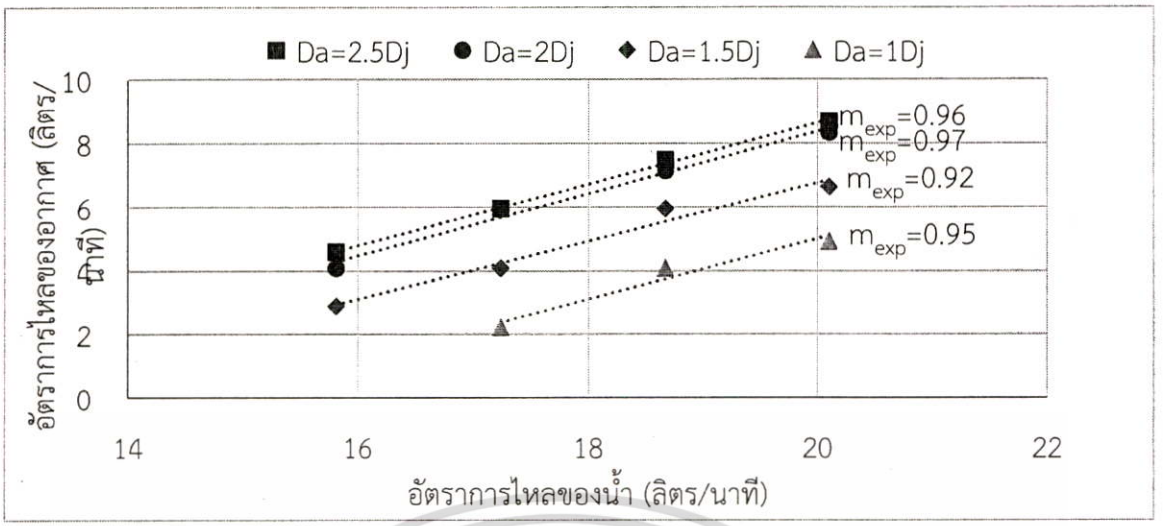


รูปที่ 5.25 กราฟเปรียบเทียบเลขเรย์โนลด์ของอากาศและน้ำของการทดลองและการสร้างแบบจำลองที่ตำแหน่งรูอากาศต่างๆ

แนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ของอากาศและน้ำบ่งชี้ให้เห็นว่าคุณสมบัติเฉพาะของของไหลทั้งสองชนิดส่งผลกระทบต่อความชันของกราฟ ทั้งความแตกต่างของความหนาแน่นและความแตกต่างของความหนืด

การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศ (D_a) ที่ดีที่สุดทำได้จากการทดลอง 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

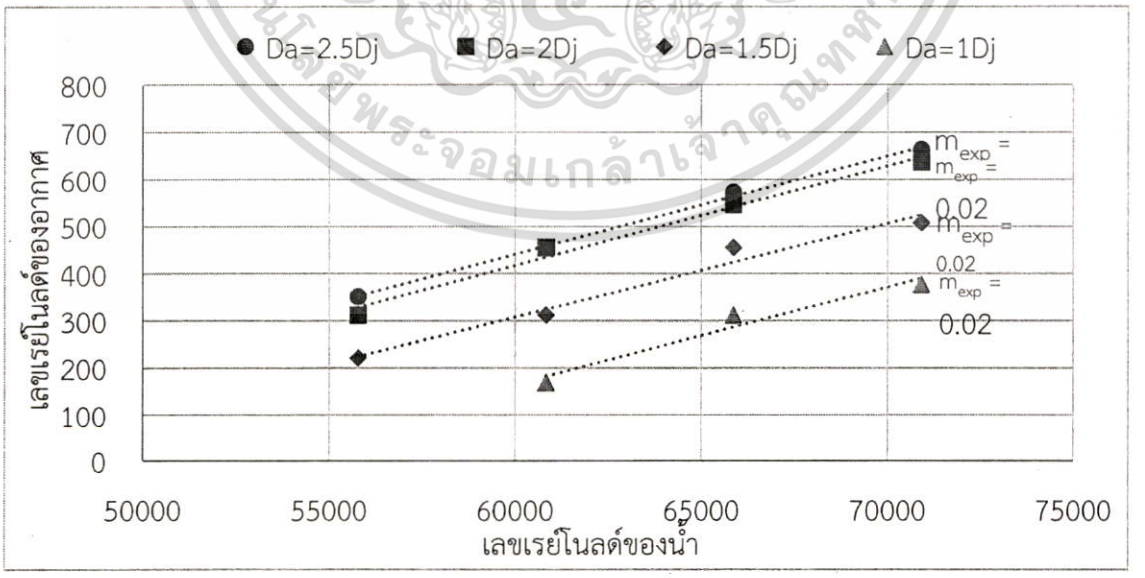
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับอัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ

กราฟข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูอากาศ (D_a) มีค่าเป็น $2.5D_j$ มีอัตราการไหลของอากาศสูงสุด กราฟทุกเส้นในรูปที่ 5.26 ยังคงมีแนวโน้มเป็นฟังก์ชั่นเชิงเส้นอยู่ 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 ดังนั้นถึงแม้ว่าเราจะเพิ่มขนาดของรูอากาศให้ใหญ่ขึ้นอัตราการไหลของอากาศที่ได้อาจไม่ต่างกับที่ $2.5D_j$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

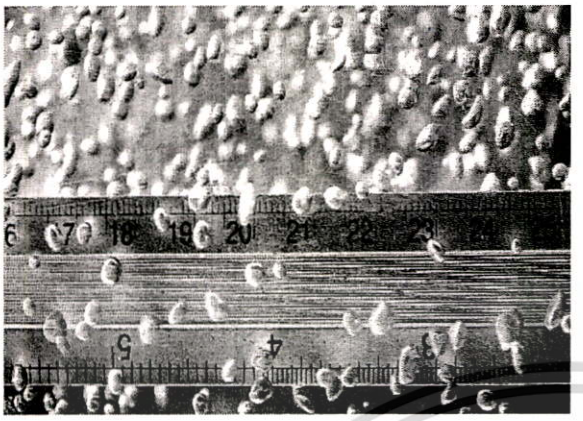
ตารางที่ 5.2 อัตราการไหลของน้ำเทียบกับปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศ

อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/นาที)	สมรรถนะการเติมอากาศ ($kgO_2/kW^*Hr.$)
20.1	0.36
18.67	0.31
17.24	0.25
15.81	0.19

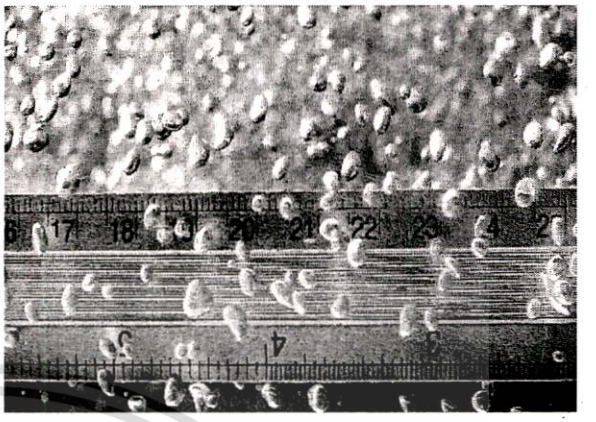
การถ่ายภาพฟองอากาศเพื่อดูขนาดฟองอากาศ ขนาดฟองอากาศส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ ดังนั้นการศึกษาขนาดฟองอากาการจึงศึกษาโดยการถ่ายภาพด้วยกล้อง Canon EOS 7D ที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20.1, 18.67,17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที ขนาดหัวฉีดที่ทำการถ่ายภาพคือ L_a เท่ากับ $1D_j$, $2D_j$, $3D_j$ และ D_a เท่ากับ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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

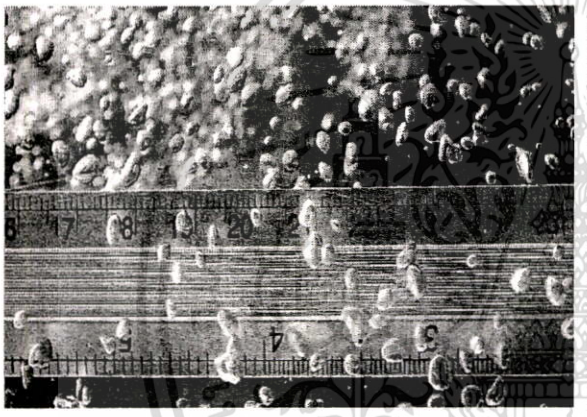
ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $1D_j$ และอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เท่ากับ 20.1, 18.67,17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 5.28 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ



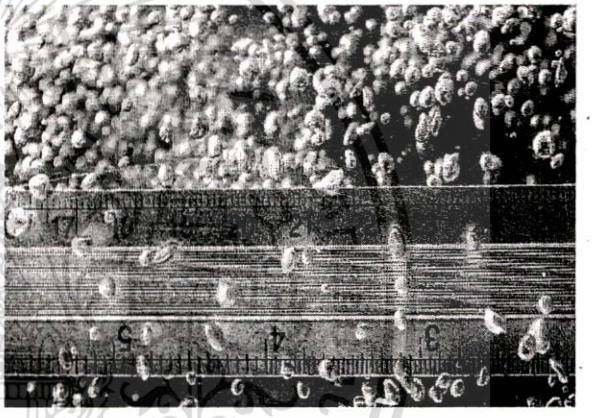
(ก) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 20.1 ลิตร/นาที



(ข) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 18.67 ลิตร/นาที



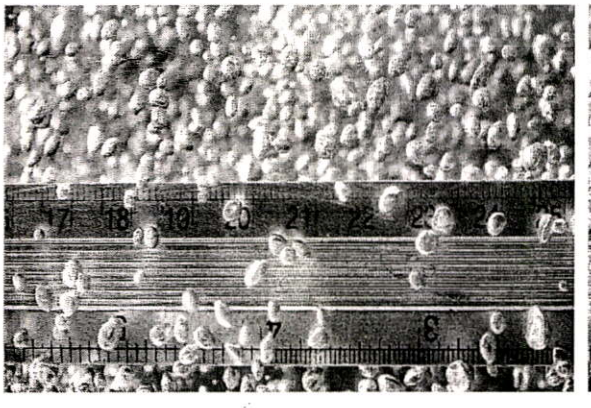
(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที



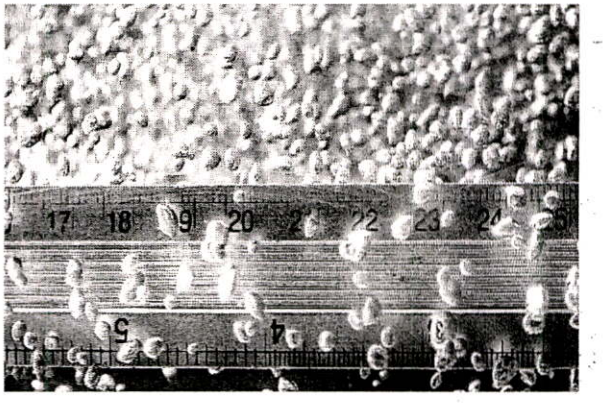
(ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที

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

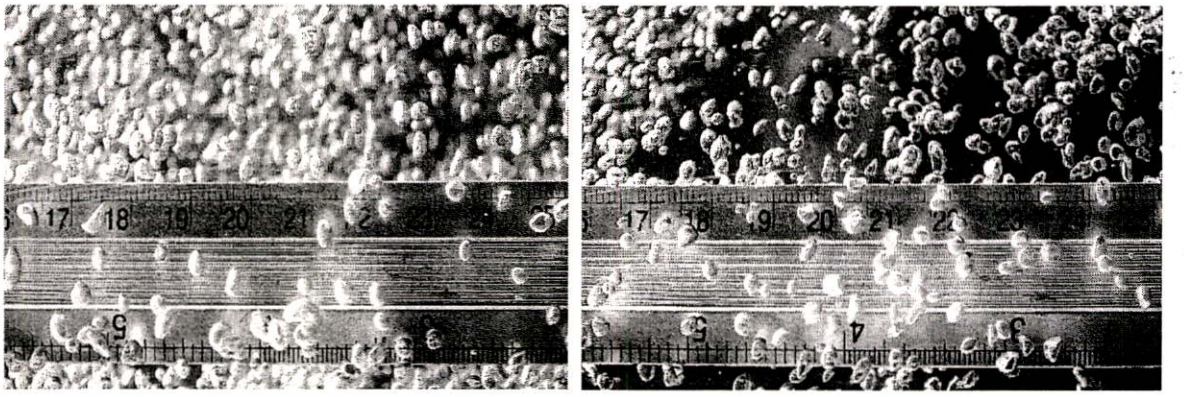


(ก) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 20.1 ลิตร/นาที



(ข) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 18.67 ลิตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



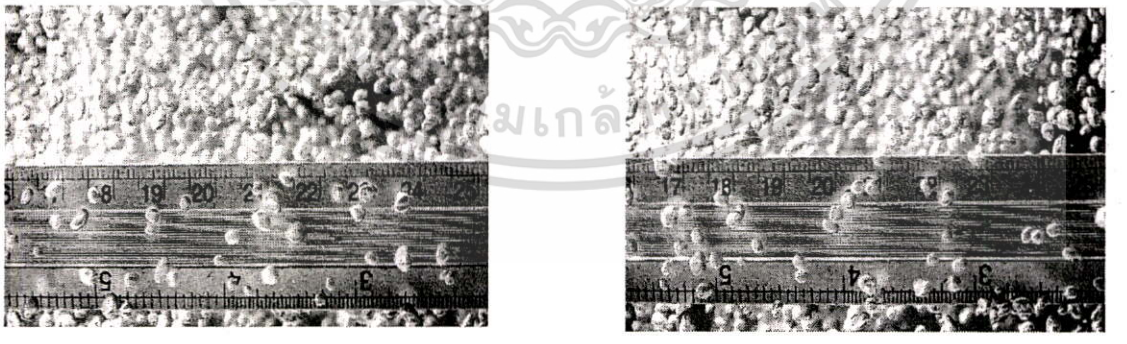
(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที (ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที

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 ลิตรต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 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

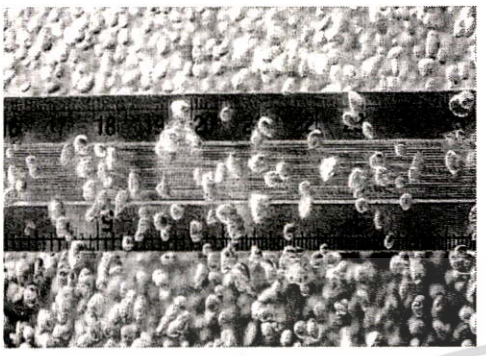


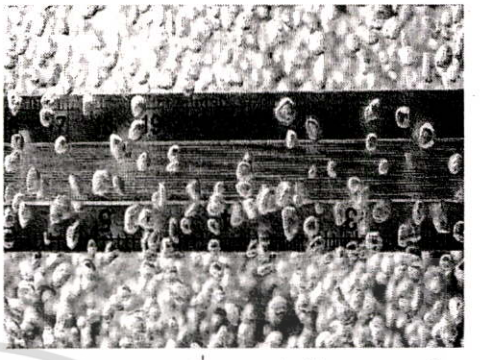
(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที (ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที

รูปที่ 5.30 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศ ที่ L_a เท่ากับ $3D_j$

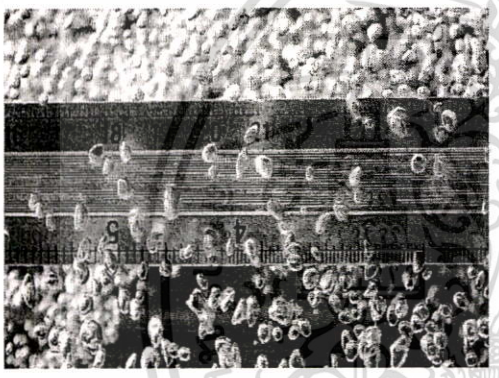
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

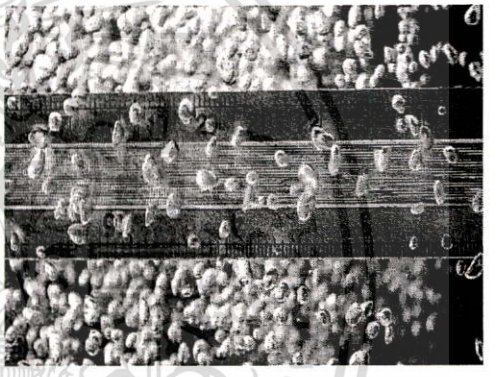
ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1D_j$ และอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เท่ากับ 20.1, 18.67,17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 5.31 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ





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

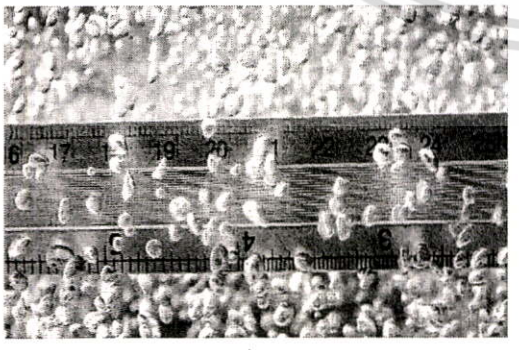


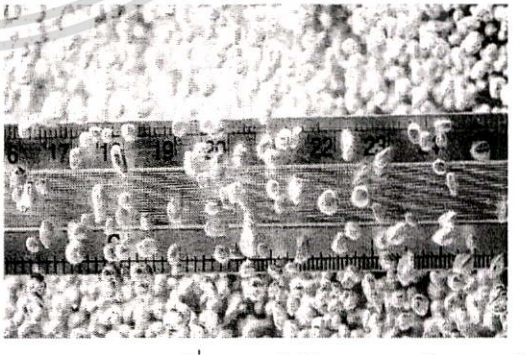


(ค) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 17.24 ลิตร/นาที (ง) ขนาดฟองอากาศที่ Q_w เท่ากับ 15.81 ลิตร/นาที

รูปที่ 5.31 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1D_j$

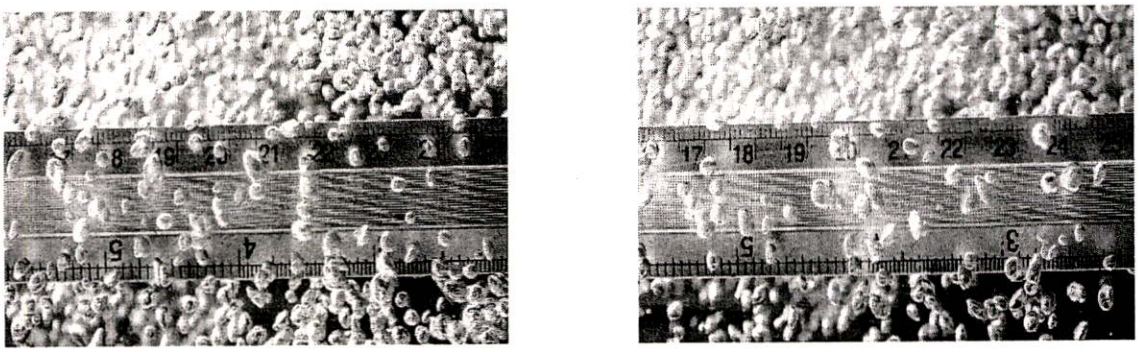
ภาพถ่ายขนาดฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1.5D_j$ และอัตราการไหลของน้ำ (Q_w) เท่ากับ 20.1, 18.67,17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาทีแสดงดังรูปที่ 5.32 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ





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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

ขนาดฟองอากาศที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้อง Canon EOS 7D ได้ขนาดฟองอากาศของแต่ละอัตราการไหลที่ขนาดรูอากาศที่แตกต่างกันและที่ตำแหน่งรูอากาศที่แตกต่างกัน ผลคือขนาดฟองอากาศมีขนาดที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

บทที่ 6

วิจารณ์และสรุปผลการสร้างแบบจำลองและทดลอง

6.1 วิจารณ์ผลการทดลองและการสร้างแบบจำลอง

จากผลการสร้างแบบจำลองเพื่อหาอัตราส่วนเชิงมิติที่เหมาะสมที่สุดของการเหนี่ยวนำอากาศเมื่อนำไปสร้างแบบทดลองพบว่าผลของการทดลองและผลการจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันโดยพิจารณาจากความชันของกราฟอัตราการไหลและเลขเรย์โนลด์ของน้ำและอากาศที่ได้จากการสร้างแบบจำลองและการทดลอง ซึ่งความชันเฉลี่ยของกราฟอัตราการไหลของการทดลองและการสร้างแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 8.9% ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด (D_c) และ ความยาวของห้องผสม (L_c) จากการจำลองที่ D_c เท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 เท่าของ D_j และ L_c เท่ากับ 3, 6 และ 9 เท่าของ D_j พบว่าขนาดที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาจากทฤษฎีของหัวฉีดคือ D_c เท่ากับ $3D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$ และเมื่อพิจารณาตำแหน่งรูอากาศ (L_a) ในการสร้างแบบจำลองที่ตำแหน่ง L_a เท่ากับ 1, 2 และ 3 เท่าของ D_j พบว่าตำแหน่งที่เกิดความดันต่ำสุดอยู่ที่ตำแหน่ง $2D_j$ และจากการทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอากาศ (D_a) ที่ขนาด 1, 1.5, 2 และ 2.5 เท่าของ D_j

6.2 สรุปผลการทดลองและการจำลอง

จากการทดลอง พบว่าอัตราการไหลของน้ำที่ 20.1, 18.7, 17.2 และ 15.8 ลิตรต่อนาที ให้อัตราการไหลเชิงมวลออกซิเจนต่อกำลังไฟฟ้าขาเข้าที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.36, 0.31, 0.25 และ 0.19 กิโลกรัมออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งอัตราการไหลที่ดีสุดในการเหนี่ยวนำอากาศได้แก่ อัตราการไหลของน้ำที่ 20.1 ลิตรต่อนาที อัตราส่วนเชิงมิติที่มีสรรถนะการเหนี่ยวนำอากาศดีที่สุดคือที่ $D_c = 3D_j$, $L_c = 6D_j$, $L_a = 2D_j$ และ $Da = 2.5D_j$

เมื่อเปรียบเทียบการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม (Ansys Fluent) พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำที่ 20.10, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที ให้อัตราการไหลเชิงมวลออกซิเจนต่อกำลังไฟฟ้าขาเข้าที่ดีที่สุดที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 20.10 ลิตรต่อนาที เช่นเดียวกันกับการทดลองและอัตราส่วนเชิงมิติก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

คุณสมบัติของของไหลหลักที่ใช้เหนี่ยวนำกับของไหลรองที่ถูกเหนี่ยวนำมีผลต่ออัตราการไหล พิจารณาได้จากกราฟของเลขเรย์โนลด์ซึ่งเป็นกราฟที่เปลี่ยนอัตราการไหลให้เป็นตัวแปรไร้มิติโดยมีการเพิ่มตัวแปรคือความหนาแน่นและความหนืดของของไหล จากกราฟพบว่าถ้าของไหลหลักมีความหนาแน่นสูงและมีความหนืดต่ำกว่าของไหลรองมากๆส่งผลให้เลขเรย์โนลด์ของของไหลรองมีค่าสูงขึ้น ซึ่งก็คือมีอัตราการไหลสูงขึ้นนั่นเอง

ภาพถ่ายฟองอากาศบ่งบอกว่า ฟองอากาศมีขนาดใกล้เคียงกันในทุกๆขนาดของหัวฉีดและในทุกๆอัตราการไหล ฟองอากาศมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 2-4 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นฟองอากาศขนาดเล็กที่เหมาะแก่ระบบการเติมอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Morchain, C. Maranges and C. Fonade, CFD Modelling of a Two – Phase Jet Aerator Under Influence of a Crossflow, Elsevier Science Ltd., 1999. 34(13): p. 3460-3472.

[2] A.H. Osman, et al., Experimental Analysis of High-Speed Air-Water Jet Flow in an Abrasive Water Jet Mixing Tube, Flow Measurement and Instrumentation, 2004: p.37-48.

[3] T. Utomo, et al., Investigation on Hydrodynamics and Mass Transfer Characteristics of a Gas–Liquid Ejector Using Three-Dimensional CFD Modeling, Journal of Mechanical Science and Technology: p. 1821-1829.

[4] T.Y. Amiri, J.S. Moghaddas and Y. Moghaddas, A Jet Mixing Study in Two Phases Gas- Liquid Systems, Chemical Engineering Research and Design, 2011: p. 352-366.

[5] C. Liao, Gas Ejector Modeling for Design and Analysis, 2008.

[6] A. Baylar, F. Ozkan, M. Unsal, Effect of Air Inlet Hole Diameter of Venturi Tube on Air Injection Rate, Journal of Civil Engineering, 2009: p. 489-492.

[7] J. Plateau and L. Rayleigh, The Plateau and Rayleigh Instability, Proceedings of the Royal Society of London, 1873-1878.

[8] G.S. Weber, Formation of Uniformly-Sized Droplets from Capillary Jet, 1931.

[9] S. Tomotika, On the Instability of a Cylindrical Thread of a Viscous Liquid Surrounded by Another Viscous Fluid, Mathematical and Physical sciences, 1935: p. 322-337.

[10] S. Chandrasekhar, Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability, Courier Dover Publications, 1961.

[11] G.M. Faeth, P.K. Wu, Structure and Breakup Properties of Sprays, 1995.

[12] R.D. Reitz, F.V. Bracco, Mechanism of Atomization of a Liquid Jet, Physics of Fluids, 1958-1988.

[13] N. Tamaki, M. Shimizu, Enhancement of the Atomization of a Liquid Jet by Cavitation in a Nozzle Hole, Atomization and Sprays, 2002: p. 125-137

[14] K. Palani, G. Veerapatharan, A Numerical Analysis of Novel Liquid-Gas Ejector, journal of engineering research and applications, 2013: p. 1644-1654.

[15] C. Prabkeao, Study on the Optimum Mixing Throat Length for Drive Nozzle Position of The Central Jet Pump.

[16] S. Watanawanavet, CFD Optimization Study of High-Efficiency Jet Ejectors, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] W. Zhang, Bubble Characteristics of Air-Bubbly Jets in Cross Flow, 2013.

[18] W. Khomwaingsa, Self-Inducing Aerator by Jet-Ejector, Mechanical engineering of KMITL, 2005.

[19] T.B. Lawson, Fundamental of Aquacultural Engineering.

[20] K.S. Agrawal, Modeling of Multi Nozzle Jet Ejector for Absorption with Chemical Reaction, 2012.

[21] M.L. Kim et al., Numerical and Experimental Investigation of Gas-Liquid Dispersion in an Ejector, Chemical Engineering Science, 2007: p. 7133-7139.

[22] Y. Han et al., Theoratical and Experimental Investigation on a Liquid-Gas Ejector Power Cycle Using Ammonia-Water, Technological Sciences, 2013: p2289-2298.

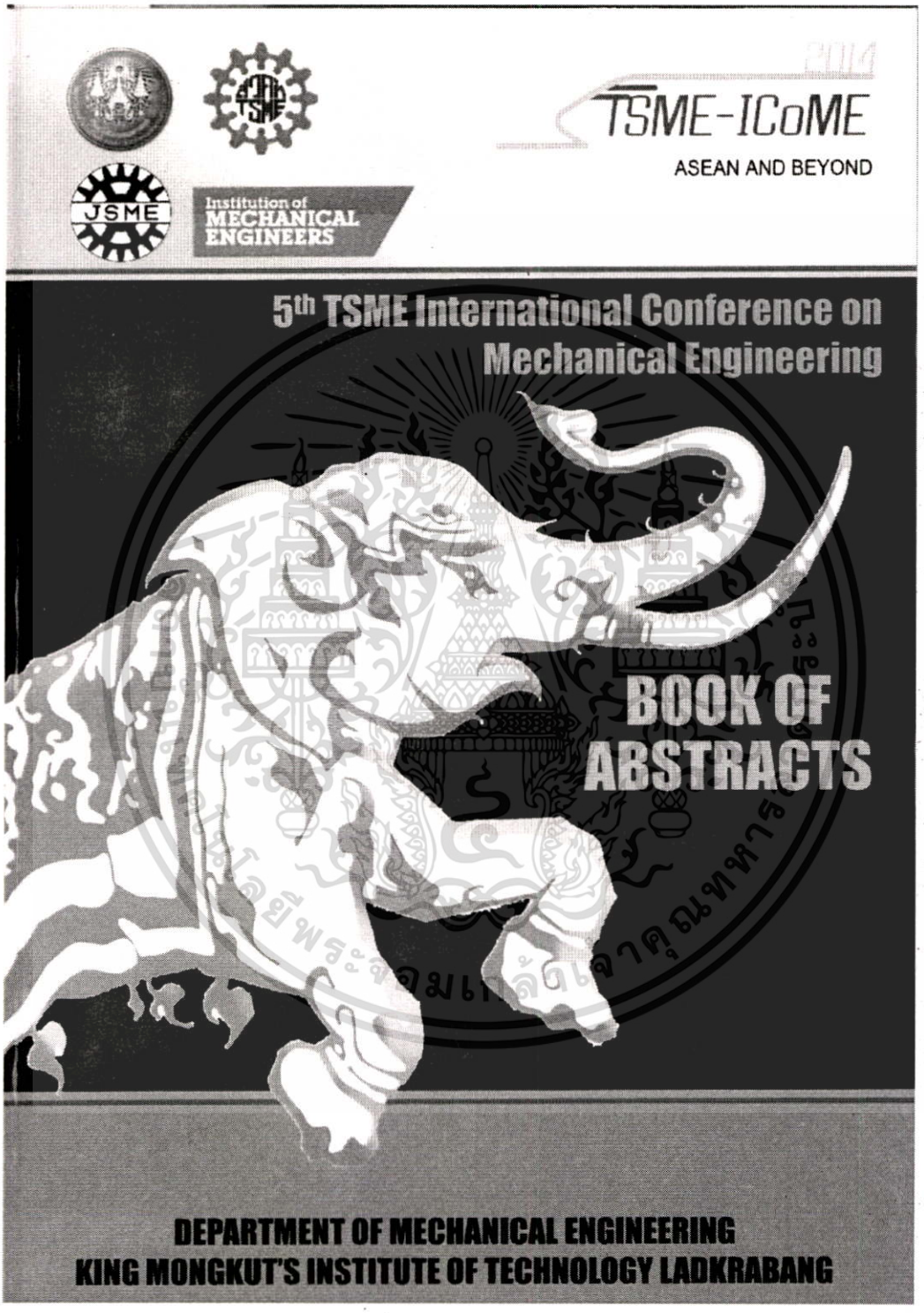
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การตีพิมพ์ที่ได้รับการเผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Page
AMM057	3-D Structural Analysis of an Electric Three-wheeled Vehicle Integrating with a Battery Switching System *Naren Chadhaiya, Anon Prueginya, Pariyaporn Lowtanichanan, Ekkarin Thammakumbutjit, Somsak Tabma, Mutagon Limpeeyakarn*	68
AMM058	New Applications of Woodceramics Originated from Waste Thai Hevea Wood *Dod Kaewdaek, Masahiro Sukkawa Toshihiro Okabe, Akito Takasaki*	69
AMM059	Estimation of Carbon Fiber Surface Energy using Standard Probe-Liquid Technique *Panthep Pattanawanidgul, Anil Jampeuch*	70
	Biomechanics: BME	
BME001	A Review of Computer Simulation of Spine Biomechanics for the Treatment of Scoliosis *Atthorl Jalalian, Ian Gibson, Eng Hock Tay, Gabriel Lai*	72
BME003	Effectiveness of Milled-insole in Plantar Pressure Reduction *Pongsak Wattanutinpong, Witoh Tawatsin, Monsak Pimsarn, Julamaree Poonsri*	73
BME005	Rubber Investigations for a Gastroscopy Training Kit *Decho Surangpimol, Atthakit Tongsakdee, Anchasa Pramuanjaroenkij*	74
	Computation and Simulation Techniques: CST	
CST001	Heat Conduction Analysis in Three-Dimensional Solid by Control Volume Finite Element Method *Passakorn Viswanosol*	76
CST004	Modeling of Double-ellipsoidal Heat Source for Submerged Arc Welding Process *Nakrabdorn Kraisitudomsook, Charnchai Sirikasemsuk*	77
CST005	Numerical Simulation of Heat Transfer Process in Oil-immersed Transformer *Pantat Tangnoy, Charnsaeng Sirikasemsuk*	78
CST006	Numerical Analysis for Dynamic Characteristics of Sphere Drop Test on Oil-based Clay Backing Material *Orapan Chaiemwong, Charnsaeng Sirikasemsuk*	79
CST007	Numerical Investigation on Heat and Water Transport in PEM Fuel Cell *Keereetut Sottanarak, Jarruwat Charoensuk*	80
CST008	Effect of Wheel Attack Angle on Flange Climb Derailment Criteria using Finite Element Method *Monsak Pimsarn, Suraphad Gangsuk*	81
CST010	Verification and CFD Modeling of Airflow and Temperature Distribution in Enclosed Space *Kraikit Silkkard, Keerati Suttakul, Preecha Wanaeng, Pongsak Wichaimaung*	82

		Page
CST011	A Molecular Dynamics Study of Proton Hopping in Polymer Electrolyte Membrane *Tatsuya Mabuchi, Takashi Tokumasu*	83
CST014	Simulation and Experiment on Effective Excitation of Mobile Phone Panels *Yoshitoki Kaibu, Shinya Handa, Yoshihiro Narita*	84
CST015	Optimization of Parison Thickness for Extrusion Blow Molding of a Rectangular Shape Bottle Using FEM and AI Technique *Kavisit Rojsaj, Chakrit Suvanjumrat*	85
CST020	Study of Rail Vehicle Dynamic Response: A Computational Approach *Bikron Hazarika, Monsak Pimsarn*	86
CST021	Dimension Ratio of Inducing Jet for Gas-liquid Mixing *Kaewta Kiratiwintakorn, Nuthapa Jayanawachira, Chinarak Thienpong*	87
CST022	A Study on Passenger Bus Superstructure Strength for Rollover Test *Suphachai Kongpet, Bowornsin Chaiwaiwan, Keerati Vikrairatna, Pattaramon Jongvivatsai*	88
CST023	Methane Jet Flame Simulation Using C++ Open Source Codes of Computational Fluid Dynamics Software *Pond Kamma, Chakrit Suvanjumrat*	89
CST024	Wave Forces on Large Cylindrical Structure Using CFD Simulation *Chanatha Nattasen, Somchai Chucheepsakul, Quangtuan Huynhthewong*	90
CST025	Exact Stiffness Matrix for Modified Strain-gradient Bars Embedded in Elastic Substrate Media: the Virtual Force Derivation *Siwhart Limkatanyu*	91
CST026	Description of User-defined Material Subroutine (UMAT) in LS-DYNA for Nonlinear Solid Mechanics *Anucha Promwungkwa, Passorn Simsiriwong*	92
	Dynamic systems, Robotics and Control: DRC	
DRC001	Robust Speed Control of a Single-cylinder Gasoline Engine *Pond Nyamsorn, Akenarong Jaiyong*	94
DRC002	A Robust Control with Adaptive Controller Output Reduction *Pond Nyamsorn*	95
DRC003	Quantitative Feedback Control of a Diesel Engine Throttle *Wichit Chaitavatpuphai, Suwapat Meecharoenpong*	96

The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering
17-19th December 2014, The Empress, Chiang Mai

TSME-ICoME
ASEAN AND BEYOND

CST021

Dimension Ratio of Inducing Jet for Gas-liquid Mixing

Keerati Kirasamutranon[1,*], Nuthvipa Jayranaiwachira[1] and Chinaruk Thianpong[1]

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
*Corresponding Author: pringles_note@hotmail.com

Abstract

By injecting high velocity water as the primary fluid through the vertical down-flow ejector, the pressure around the ejector is dropped and entrained the surrounding air to mix with the liquid. In this work, effects of dimension ratios of liquid jet ejector to the air suction rate were investigated. The Computational Fluid Dynamics (CFD) models have been used to obtain the results and validated with experiments. Dimensions of ejector are studied in terms of nozzle diameter (Dj), diameter (Dc) and length (Lc) of mixing chamber, air inlet diameter (Da) and position of air inlet referred to nozzle edge (La). Both simulation and experimental results show that dimension ratios which give the highest air suction rate with every water flow rates are Dc=3Dj, Lc=6Dj, La=2Dj and Da=2.5Dj. According to these dimension ratios, the performance of the ejector in air inducing are 0.36, 0.31, 0.25 and 0.19 kg air/kW-h at water flow rates of 20.10, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min, respectively.

Keywords: Ejector, Air suction volume, Pressure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering
17-19th December 2014, The Empress, Chiang Mai
TSME-ICoME
ASEAN AND BEYOND

CST021

DIMENSION RATIO OF INDUCING JET FOR GAS-LIQUID MIXING

Keerati Kirasamutranon, Nuthvipa Jayranaiwachira and Chinaruk Thianpong*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Abstract

By injecting high velocity water as the primary fluid through the vertical down-flow ejector, the pressure around the ejector is dropped and entrained the surrounding air to mix with the liquid. In this work, effects of dimension ratios of liquid jet ejector to the air suction rate were investigated. The Computational Fluid Dynamics (CFD) models have been used to obtain the results and validated with experiments. Dimensions of ejector are studied in terms of nozzle diameter (D_t), diameter (D_c) and length (L_c) of mixing chamber, air inlet diameter (D_a) and position of air inlet referred to nozzle edge (L_a). Both simulation and experimental results show that dimension ratios which give the highest air suction rate with every water flow rates are $D_c=3D_t$, $L_c=6D_t$, $L_a=2D_t$ and $D_a=2.5D_t$. According to these dimension ratios, the performance of the ejector in air inducing are 0.36, 0.31, 0.25 and 0.19 kg air/kW-h at water flow rates of 20.10, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min, respectively.

Keywords: Ejector, Air suction volume, Pressure

1. Introduction

An ejector is a device in which a high-pressure fluid jet is used to entrain low-pressure fluid. Fig. 1 shows a schematic drawing of typical ejector [1]. Which consists of four main components: one inlet for high-pressure water; another inlet for air/abrasive; a mixing chamber and a mixing tube. Due to their simple design and the absence of moving parts, ejectors are very reliable device having practically no maintenance cost and relatively low installation cost [2]. According to the Bernoulli's principle, when a motive fluid is pumped through the nozzle of a gas–liquid ejector at a high velocity, a low pressure region is created just outside the nozzle. A second fluid gets entrained into the ejector through this low pressure region. Ejectors are being used as a gas–liquid dispersion device for many purposes for a very long time in the chemical industries since it has high mass transfer and mixing rates.

Many CFD works have been carried out to determine the performance of ejectors [3, 4, 5, 6] but they are mainly focused on mono-phase (gas–gas or liquid–liquid) ejector except the study of Kandakure et al [7]. Some of them assumed the two-phase flow (water jet and air) is a homogeneous fluid, and hence non experimentations were conducted [8, 9]. Moreover, in the literature, there are a few experimental studies dealing with the behaviour of low-pressure water jet in the tube. For instance, Miller et al [10].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Therefore, in the present study, effects of dimension ratios of liquid jet ejector to the air suction rate were investigated. The Computational Fluid Dynamics (CFD) enables the prediction of local pressures in the ejectors and experiments the performance of the ejector in air induce

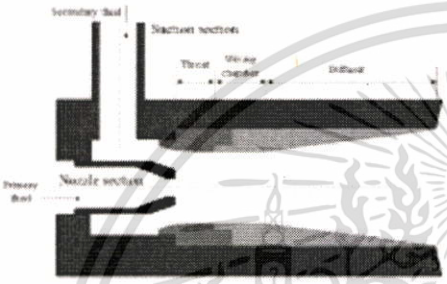


Fig. 1 Schematic diagram of a typical ejector [1]

2. Modeling approach and boundary condition

The commercial package, Gambit 2.4.6 and Fluent 6.3., are used as the grid generator and the CFD solver, respectively. Two-dimensional geometry was considered with the quadrilateral-meshing scheme.

The mesh and model were created in a two-dimension domain. The geometries of the computational domain of the modeled liquid ejectors were taken from those which were used in the experiment. The mesh was made of about 60,000-80,000 structured quadrilateral elements and adapted by the solution-adaptive mesh refinement as shown in Fig. 2

The continuous phase from the nozzle section is water. Since the volumetric flow rates of water through the nozzle are known, the inlet velocity was used as a boundary condition. The ejector outlet was considered at the outlet pressure. The no-slip boundary condition was enforced at the walls of the ejector. The solution was iterated until convergence was achieved, such that the residual for each equation fell below 10^{-5}.

A comprehensive model settings summary is reported in Table 1.

Table 1
Summary of the applied numerical settings.

Model settings	
Time dependence	Steady State
Viscous model	Turbulent
Turbulence model	Standard k-ε model
Numerical Settings	
Pressure	2nd order
Momentum	2nd order
Turbulent kinetic energy	2nd order
Turbulent dissipation rate	2nd order

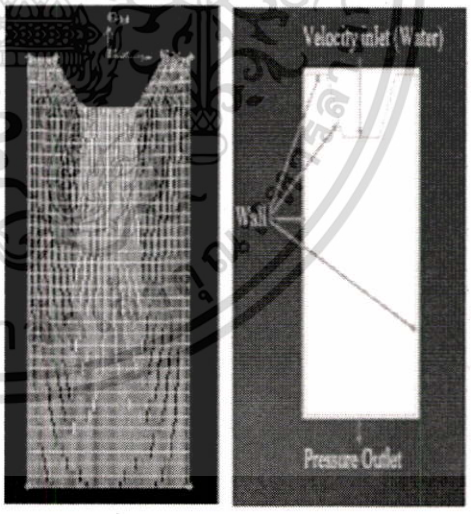


Fig. 2 Grid structures and boundary condition of the ejector CFD model.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering
17-19th December 2014, The Empress, Chiang Mai
TSME-ICoME ASEAN AND BEYOND
CST021

3. Experimental setup

The validation experiment is carried with an acrylic column of 0.40 m in diameter and 0.9 m in height (Fig 3(A)). The ejector made of Aluminum as shown in Fig. 3(B). The water flow rate was manually controlled with the help of a calibrated Rota meter show in Fig. 3(C) (Nitto Instruments Model Z-600 make with accuracy of 5%). The velocity of air flowing through the nozzle was varied over a wide range. The air flow rate was manually measure with the Thermo anemometer is shown in Fig. 3(D) Table 2 shows the various geometry parameters that were investigated.

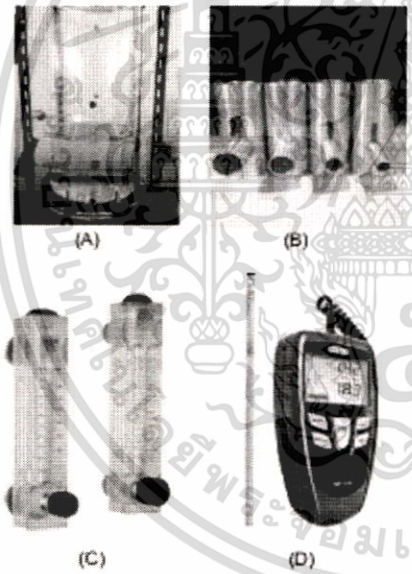


Fig. 3. (A) Acrylic column, (B) Ejector, (C) Rota meter, (D) Anemometer

Table 2

Dimensions of the ejector and parameters varied in the CFD and experiments

Parameter	Values
Nozzle inlet diameter D (mm)	12
Nozzle diameter D_j (mm)	6
Mixing chamber diameter D_c (mm)	$3D_j$, $4D_j$, $5D_j$
Mixing chamber length L_c (mm)	$3D_j$, $6D_j$, $9D_j$
Air inlet diameter D_a (mm)	$1D_j$, $1.5D_j$, $2D_j$, $2.5D_j$
Position of air inlet referred to nozzle edge L_a (mm)	$1D_j$, $2D_j$, $3D_j$
liquid velocity inlet (L/min)	15.81, 17.24, 18.67, 20.10

4. Results and discussion

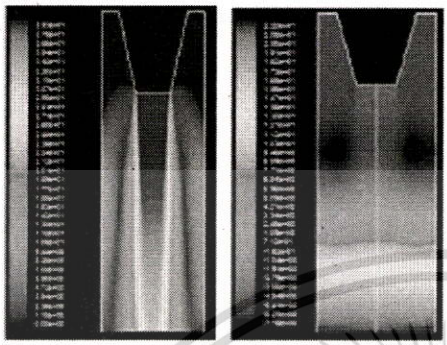
4.1 Numerical simulation results

The CFD, therefore, enables the prediction of local pressures in the ejectors, which are otherwise very difficult to measure.

Thus, for example, the ratio of nozzle (D_j) to mixing chamber is one of the important parameters for the ejector design. Interior flow regimes in the liquid ejector can be obtained from the CFD simulation. The performance of CFD simulation, the ratio of nozzle to mixing chamber D_c=3D_j L_c=6D_j is the best ratio. Due to the size integrity of the core jet and the distribution of the jet without into walls. The CFD results show that the expedient model is as shown in Fig 4(A) the contour of mixture velocity magnitude in high liquid velocity jet and Fig. 4(B) the contour of static pressure in the ejectors, for constant liquid flow rate of 20.10 L/min.

Comparison of CFD predicted pressure drop and velocity jet results for constant liquid flow rate of 20.10, 18.67, 17.24, 15.81 L/min., for the ratio of nozzle to mixing chamber D_c=3D_j L_c=6D_j.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(A) (B)

Fig. 4 CFD predicted (A) velocity magnitude (B) static pressure for D_c=3D_j L_c=6D_j, 20.10L/min.

The results show that the ratio of the nozzle diameter to the Mixing chamber diameter plays a crucial role in determining the hydro-dynamics and the performance of the ejectors.

As shown in Figs.5–6 shows the comparison of the predicted values of the ratio of nozzle to mixing chamber D_c=3D_j L_c=6D_j. Fig. 5 shows Comparisons of Pressure and Lengths of the wall. When a motive fluid through the nozzle at a velocity, a low pressure region is created just outside the nozzle, the distance from the wall 0.02 m. When the water flow rate is increase, the pressure in the ejector also a decrease.

As can be seen from the Fig. 6 shows the performance of the predicted values of velocity cores of jet and position of referred to nozzle edge. Moreover, a low pressure region is created just outside the nozzle, a velocity behind position 0.02 m. from center the ejector velocity drop.

Therefore, the CFD results (Figs.4–6) shows proper placement of the air hole points of low pressure in the ejector around the wall is -0.02 m., which is 12 mm. from nozzle all cases. So the appropriate ratio air hole is 2D_j.

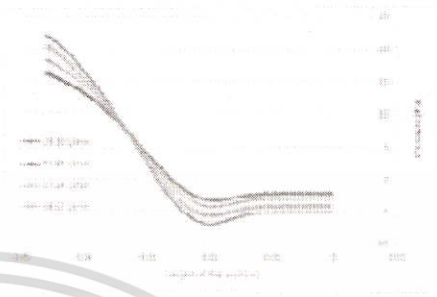


Fig. 5 Comparison of CFD predicted Pressure and lengths of the wall, The ratio of nozzle to mixing chamber D_c=3D_j L_c=6D_j at liquid flow rates of 20.10, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min, respectively.



Fig. 6 Comparison of CFD predicted velocity cores of jet and position of referred to nozzle edge. The ratio of nozzle to mixing chamber D_c=3D_j L_c=6D_j at liquid flow rates of 20.10, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min, respectively.

The pressure around the ejector is dropped and entrained the surrounding air, flow rate can be calculated from Bernoulli equation by considering the lowest pressure. Consequently, the pressure that use in calculation is the lowest pressure of the first point (Fig.5) and second point is atmospheric pressure. Air inlet diameter (D_a) is 2D_j

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From Bernoulli's Equation. (1)

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

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

$$v_1^2 = 2g\left(\frac{P_2 - P_1}{\rho_{air}g} + \frac{v_2^2}{2g} + (z_2 - z_1)\right) \quad (1)$$

$$Q = Av \quad (2)$$

Second equation set in First equation

$$(v_1)^2 = 2g\left[\frac{P_2 - P_1}{\rho_{air}g} + \frac{v_2^2}{2g} + (z_2 - z_1)\right] \quad (3)$$

When the second point is atmospheric pressure and dramatically low flow rate

$$Q_{air} = A_1 \sqrt{2g\left(\frac{P_2 - P_1}{\rho_{air}g} + (z_2 - z_1)\right)} \quad (4)$$

And D_a =12 mm., A= 0.0000113 m^2 and $z_1 = z_2$

$$Q_{air} = 6.78\sqrt{\frac{-P_1}{\rho_{air}}} \quad (5)$$

When

Q_{air} = Flow rate of air from calculation (l/min).

P_1 = the lowest pressure from the graph of flow rate (N/m^2), ρ_{air} = Density of air = 1.18 (kg/m^3)

Flow rate of air which obtains from calculation is shown in table 3 and flow rate of air is calculated from the lowest pressure of each flow rate. Therefore, when the position of hole air is changed (L_a) becomes $1D_j$, $2D_j$ and $3D_j$ therefore, it can show relationship with flow rate of water in Fig. 7 However, this relationship can changed to depend on independent variables by Reynolds number for easier consideration. In addition, this method can use in many conditions that is shown in Fig. 8.

According to Fig. 7 and 8 show the positions of holes air (L_a) that make flow rate of air is the highest at $2D_j$, $1D_j$ and $3D_j$ respectively. Moreover, the graph seems to be linear because ability of both fluids has an effect on ability of induction that is shown in Reynolds number's graph.

Table 3

Flow rate of air from calculation

Liquid flow rate (L/min)	Air flow rate (L/min)		
	L_a=1D_j	L_a=2D_j	L_a=3D_j
20.1	21.6	23.2	20.1
18.67	20.1	21.6	18.5
17.24	18.5	20.1	16.9
15.81	16.9	18.7	15.5



Fig. 7 The relationship between flow rate of water and air from calculation

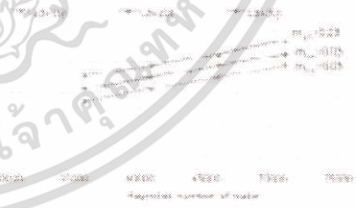


Fig. 8 The relationship between Reynolds numbers of water and air in L_a from calculation

4.2 Experimental results

The experiment tests with the 6 mm. injection and mixing chamber diameter 18 mm. (D_c= $3D_j$) mixing chamber length 36 mm. (L_c=$6D_j$) diameter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of hole air is 12 mm. and the position of hole air is $1D_j$, $2D_j$ and $3D_j$ for finding properly position of hole air when flow rate of water is 20.1, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min. The result of experiment is shown in Fig. 9. Consequently, it shows relationship between flow rate of water and air in L/min.



Fig. 9 Relationship between air flow rate and water flow rate at different L_a from experiment

It can be seen from the Fig. 9 that show the position of holes air (L_a) is $2D_j$ and air flow rate which is inducted is the highest flow rate. Therefore, it relates with the result of the model in Fig.7 and flow rate also drops at the position of holes air $1D_j$ and $3D_j$ respectively.

The ratio of air flow rate and water flow rate which obtains from experiment at different air inlets is compared the result with the result of the model in Fig. 10. Moreover, Reynolds number of air and water that get from experiment at different air inlets is also compared with the model in Fig. 11. The best way to find diameter of holes air (D_a) from experiment is specifying size of diameter injection (D_j) at 6mm., in addition, diameter and mixing chamber length (D_c and L_c) are 18 mm. ($3D_j$) and 36 mm. ($6D_j$) respectively.

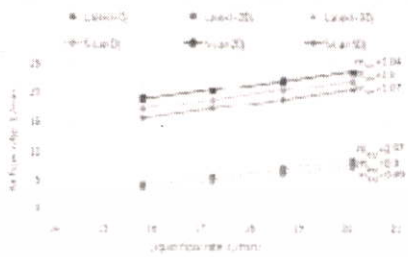


Fig. 10 The comparison between the experiment and the model of different holes air position in air flow rate and water flow rate



Fig. 11 The comparison between the experiment and the model of different holes air position in Reynolds number of air and water.

Lastly the position of holes air is 12 mm. ($2D_j$) from the end of injection (Fig. 10). The flow rates are 20.10, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min. Moreover, this experiment tests a change of diameter size of holes air (D_a) in 4 times ($1D_j$, $1.5D_j$, $2D_j$ and $2.5D_j$) that is shown in Fig. 12

The relationship between flow rate of air and water from experiment that is tested by different diameters of holes air (D_a) $1D_j$, $1.5D_j$, $2D_j$ and $2.5D_j$ show in relation with independent variables and Reynolds number in Fig. 13.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering
17-19th December 2014, The Empress, Chiang Mai
TSME-ICoME
ASEAN AND BEYOND
CST021

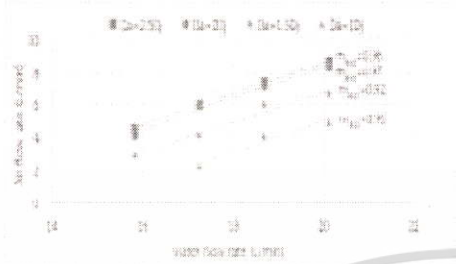


Fig. 12 The relationship between flow rate of water and air at different densities (D_a)

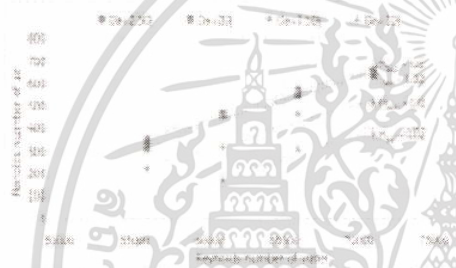


Fig. 13 The relationship between Reynolds number of water and air at different densities (D_a)

Capability of filling in air shows in unit of kilogram O_2 per kilowatt hour and it is tested by calculating quantity of power that spends on system and it is measured by clamp on power meter. As a result, the result of filling air is shown in the table 4 and the maximum capability of filling is 0.36 $kgO_2/kW_{watt}hr$. The system of filling air which uses in industry has ability number of filling air about 0.6-3.9 $kgO_2/kW_{watt}hr$.

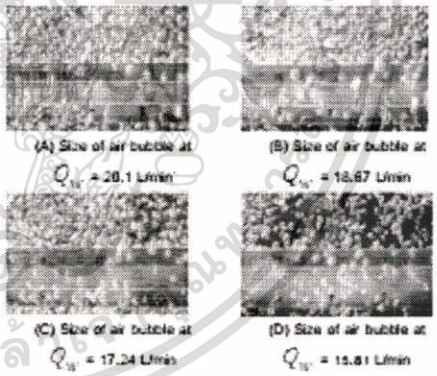
Taking a picture of air bubble for considering size of air bubble is essential because size of air bubble has influence on ventilating of water. Therefore, studying size of air bubble will be studied by taking a picture with a camera (Cannon EOS 7D) and water flow rate is 20.1, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min.

For example, size of air bubble at L_a is $2D_j$ and water flow rate (Q_w) is 20.1, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min. in figure 14 (A), (B), (C) and (D) respectively.

Table 4

Water flow rate compares with performance of the ejector in air

Water flow rate (L/min)	Performance of the ejector in air (kgO_2/kW*Hr.)
20.1	0.36
18.67	0.31
17.24	0.25
15.81	0.19



(A) Size of air bubble at Q_w = 20.1 L/min
(B) Size of air bubble at Q_w = 18.67 L/min
(C) Size of air bubble at Q_w = 17.24 L/min
(D) Size of air bubble at Q_w = 15.81 L/min

Fig. 14 (A), (B), (C) and (D) Size of air bubble at L_a =2D_j

Size of air bubble from taking a picture by a camera (Canon EOS 7D) obtain a lot of size of air bubble from different flow rate, air bubble and position of hole air. Therefore, size of air bubble has similar size about 2-3 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Conclusions

In the present work, water flow rate at 20.1, 18.7, 17.2 and 15.8 L/min give the best mass flow rate O_2/input of power electic at 0.36, 0.31, 0.25 and 0.19 $kg_{O_2}/kW_{input}.hr$ respectively. Moreover, the best of performance of the ejector in air is water flow rate at 20.1 L/min. and the best dimension ratio of performance of the ejector in air is D_c=3D_j, L_c=6D_j, L_a=2D_j and D_a =2.5D_j.

Moreover, in the model that creates at water flow rate 20.10, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min give the best mass flow rate O_2/input of power electic at water flow rate 20.10 L/mn as an experiment of the dimension ratio that is also the same way.

The ability of main fluid that uses performance of the ejector with unimportant fluid affects to flow rate. Consequently, it can be determined from graph of Reynolds number which can change flow rate to be independent variables by adding variables (density of fluid and viscosity). From the graph, if the main fluid has high density and a lot lower viscosity than unimportant fluid, it will cause Reynolds number of unimportant fluid to increase. As a result, it will increase flow rate too.

From the picture of air bubble, it shows similar size of air bubble in many sizes of injection and a lot of flow rate. Moreover, the size of air bubble is about 2-3 mm. as a result, it is small air bubble that works very well with the system of filling air.

6. References

[1] Havelka, P., Linek, K., Sinkle, J., Zahradnik, J., Fialova, M. (1997). Effect ofthe ejector configuration on the gas suction rate and gas hold-up in ejector loop reactors, Chemical Engineering Science, vol.52(11), *June 1997*, pp. 1701–1713.

[2] Aly, N.H., Karameldin, A., Shamloul, M.M. (1999). Modeling and simulation of steam jet ejectors, Desalination vol.123(1), *August 1999* , pp.1–8.

[3] Riffat, S.B., Omer, S.A. (2001). CFD modeling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid, International Journal of Energy Research vol.25(2), February 2001, pp.115–128.

[4] Ouzzane, M., Aidoun, Z. (2003). Model development and numerical procedure for detailed ejector analysis and design. Applied Thermal Engineering vol.23(18), December 2003 pp. 2337–2351.

[5] Rusly, E., Aye, L., Charters, W.W.S., Ooi, A. (2005). CFD analysis of ejector in combined ejector cooling system, International Journal of Refrigeration, vol.28(7), November 2005, pp.1092–1101.

[6] Sriveerakul, T., Aphornratana, S., Chunnanond, K. (2007). Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: part 1. Validation of the CFD results, International Journal of Thermal Science vol.46(8), August 2007, pp.812–822.

[7] Kandakure, M.T., Gaikar, V.G., Patwardhan, A.W. (2005). Hydrodynamic aspects of ejectors, Chemical Engineering Science, vol.60(22), November 2005, pp.6391–6402.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[8] Tazibt, A., Abriak, N, Parsy, F. (1996). Prediction of abrasive particle velocity in a high pressure water jet and effect of air on acceleration process, European Journal of Mechanics - B/Fluids, vol.15(4) pp. 527–543.

[9] Raissi, K. (1989). Mixing tube geometry influence on abrasive water jetflow, in: C. Gee (Ed.), Proc., 13th Int. Jet Cutting Tech-nol., BHRA Fluid Engineering, October 29–31, Italy.

[10] Miller, A L. (1989) The dynamics of multi-phaseflow in collimated jets, in: M.M. Vijay (Ed.), Proc. 5th American Water Jet Conf., August 29–31, Canada.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้