

ผลกระทบของห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิดภายในต่อการผสมระหว่างก๊าซและ
ของเหลว

THE EFFECT OF INTERNAL SPIRAL MIXING CHAMBER ON PERFORMANCE
OF MIXING GAS AND LIQUID



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

ผลกระทบของห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิดภายในต่อการผสมระหว่างก๊าซและ
ของเหลว

THE EFFECT OF INTERNAL SPIRAL MIXING CHAMBER ON PERFORMANCE
OF MIXING GAS AND LIQUID



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE EFFECT OF INTERNAL SPIRAL MIXING CHAMBER ON PERFORMANCE
OF MIXING GAS AND LIQUID



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลกระทบของห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิดภายในต่อการผสมระหว่างก๊าซและของเหลว
THE EFFECT OF INTERNAL SPIRAL MIXING CHAMBER ON PERFORMANCE OF
MIXING GAS AND LIQUID

ผู้จัดทำ

1. นางสาว พลอย สระพลอย รหัสประจำตัว 58010848
2. นาย ศุภกร เอื้อปัญญาจะศิลา รหัสประจำตัว 58011233
3. นางสาว สวรรยา เทียงตา รหัสประจำตัว 58011281


อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.ณัติวิภา เจียรนะนาวี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิดภายในต่อการผสมระหว่างก๊าซและของเหลว

นางสาวพลอย	สระพลอย	58010848
นายศุภกร	เอื้อปัญญาจะศิลา	58011233
นางสาวสวรรยา	เที่ยงดา	58011281
ผศ.ดร.ณัตวิภา เจียรระโนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2561		

บทคัดย่อ

การแก้ไขปัญหาน้ำเสียมีหลากหลายวิธีการด้วยกัน การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและการเพิ่มระยะเวลาการผสมระหว่างอากาศกับน้ำจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของอากาศกับน้ำและเพิ่มความสามารถในการเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาสู่ห้องผสมได้ ในการศึกษารูปแบบห้องผสมของน้ำและอากาศที่มาจากหัวฉีดเหนี่ยวนำ ห้องผสมถูกออกแบบและพัฒนาโดยการติดตั้งเกลียวบิดภายในห้องผสม (internal spiral mixing chamber) การออกแบบเกลียวบิดและความยาวที่เหมาะสมได้ถูกศึกษาใน 4 รูปแบบได้แก่ห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิด, ห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิด 180, 270 และ 360 องศา โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำ 7 ถึง 11 ลิตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่าห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิด 360 องศา ที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 11 ลิตรต่อนาที ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำเข้าสู่จุดอิมเมอร์ที่ 6.33 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เวลา 1560 วินาที ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (KLA) เท่ากับ 3.62 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (SOTR) และค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) ได้เท่ากับ $1.32 \times 10^{-3} \text{ kgO}_2 / \text{h}$ และ $0.94 \text{ kgO}_2 / \text{kWh}$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิด และผลการศึกษาการเหนี่ยวนำอากาศโดยหัวฉีดเหนี่ยวนำในทุกอัตราการไหลของน้ำพบว่าห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิดที่อัตราการไหลของน้ำ 11 ลิตรต่อนาที มีอัตราการเหนี่ยวนำอากาศมากที่สุด เท่ากับ 2.073 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ในการวิจัยนี้ได้นำค่าตัวแปรไร้มิติ L/G เข้ามาวิเคราะห์ในการหาสมรรถนะของหัวฉีดเหนี่ยวนำพบว่า ห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิด มีค่าตัวแปรไร้มิติ L/G เท่ากับ 0.318 ที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE EFFECT OF INTERNAL SPIRAL MIXING CHAMBER ON PERFORMANCE OF MIXING
GAS AND LIQUID

Ploy	Sraploy	58010848
Supakron	Auepanjasila	58011233
Sawanya	Thiangda	58011281

Asst.Prof.Dr.Nuthvipa Jayranaiwachira Advisor
Year 2019

ABSTRACT

The performance of mixing between gas-liquid and air induction rate were studied by using an internal spiral mixing chamber with an inductive jet. An internal spiral mixing chamber was designed in 4 forms: without an internal spiral mixing chamber, with an internal spiral twisted in 180, 270 and 360 degrees. The experiment in this study was operated at 7 to 11 LPM of water flow rate. The result found that, in 360 degrees internal spiral mixing chamber operated at 11 LPM of water flow rate has the best performance in mixing air and liquid. Its saturation point of oxygen concentration in the water equal to 6.33 mg/L and taking least of the time within 1560 seconds for reaching that point. A KLA coefficient, by using a mixing chamber with a 360-degree internal spiral inside has the highest value equal to 3.62 at 11 LPM of water flow rate. Calculation and analysis of Standard Oxygen Transfer rate (SOTR) and Standard aeration efficiency (SAE) have been done in this project. SOTR and SAE of 360 degree internal spiral mixing chamber operated at 11 LPM of water flow rate are equal to $1.32 \times 10^{-3} \text{ kgO}_2 / h$ and $0.87 \text{ kgO}_2 / \text{kWh}$ respectively. These values are much better comparing with mixing chamber without an internal spiral. The result in studying an air induction rate in each form of mixing chamber at every water flow rate found that, a mixing chamber without an internal spiral at 11 LPM of water flow rate has the best air induction rate equal to 2.073 cubic meters per second.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือการแนะนำแนวทางการแก้ไข ปัญหาและการสนับสนุนจากผศ.ดร.ณัฏวิภา เจียรระโนวชิระ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ซึ่งท่าน ได้ให้ข้อคิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัย ขอขอบคุณนายกิริติ กิรสมุทรานนท์ นักศึกษา ปริญญาเอกที่คอยช่วยเหลือทางด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการทำการทดลอง คำแนะนำในการทำงาน และคอยช่วยแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นอยู่เสมอ นายฉัตรเฉลิม แก้วชมภู นักศึกษา ปริญญาโทที่คอยให้ความช่วยเหลือด้านการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ให้คำปรึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณการทำวิจัย บิดาของนางสาวพลอย สระพลอย ที่ช่วยเหลือในการขนย้ายชุดทดลองและสนับสนุนอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการทดลอง รวมไปถึง ครอบครัวนายศุกร เอื้อปัญจะศิลา สำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่ที่อยู่อาศัยเพื่อทำการทดลองจนเสร็จ ลิ้น นอกจากนี้ขอขอบคุณท่านอาจารย์ประจำภาควิชาหลาย ๆ ท่าน เพื่อนร่วมรุ่นทุกคนที่คอยให้ กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษา เล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

พลอย สระพลอย
ศุกร เอื้อปัญจะศิลา
สวรรยา เทียงดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม.....	3
2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผสมกันของก๊าซและของเหลว.....	3
2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบของห้องผสม.....	4
2.3 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดเหนี่ยวนำ.....	5
2.4 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งติดตั้งเกลียวบิดภายในห้องผสม.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเจ็ท (Theory of Jets).....	7
3.1.1 โครงสร้างและการพัฒนาของลำเจ็ทอิสระ (Structure and Development of a free jet).....	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายของลำเจ็ท (Factors influencing jet spread)	8
3.2 ทฤษฎีเทอร์บูเลนต์เจ็ท (Turbulent jet Theory)	13
3.2 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ (Induction Theory)	19
3.3 ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two film theory)	19
3.4 ทฤษฎีการเติมอากาศ	22
3.4.1 หลักการทั่วไป	22
3.4.2 การคำนวณ	23
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย	24
4.1 หลักการออกแบบห้องผสม	24
4.2 ชุดทดลอง	27
4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง	27
4.2.2 ห้องผสม (Mixing Chamber)	28
4.2.3 ถังรับน้ำ (receive water tank)	28
4.2.4 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ	29
4.2.5 ระบบสูบน้ำและอุปกรณ์ท่อ	29
4.2.7 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32
4.3 วิธีกรทดลอง	33
4.4 การวัดความเร็วลม	33
4.5 การวัดกำลังไฟฟ้า	36
บทที่ 5 ผลการทดลอง	37
5.1 ผลการทดลองการเติมออกซิเจนในน้ำ	37
5.2 ผลการวัดความเร็วลม	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ.....	40
5.2.2 ผลการทดลองหัวฉีดเหนี่ยวนำ (Inductive Jet).....	41
5.3 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับปั๊ม	44
5.4 สรุปข้อมูลที่ได้จากการทดลอง.....	45
บทที่ 6	49
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	49
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 การคำนวณระยะต่างๆ จากทฤษฎีจี้ทป่นปวน	24
ตารางที่ 5.1 แสดงตำแหน่งการวัดลม	40
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าอัตราการเหนียวนำอากาศที่อัตราการไหลของน้ำค่าต่าง ๆ และค่าตัวแปรไร้มิติ	42
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าอัตราการไหลของน้ำ (L) เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ (G) และตัวแปรไร้มิติ (G/L).....	43
ตารางที่ 5.4 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์ไฟฟ้า, ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า..	44
ตารางที่ 5.5 แสดงข้อมูลจากผลการทดลองและสมรรถนะการเติมอากาศของห้องผสม	47



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของลำเจ็ทเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น.....	3
รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแฟกเตอร์ความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของท่อแบบต่าง ๆ	4
รูปที่ 2.3 แสดงแบบหัวฉีดเหนียวน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	5
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสถิตยกับระยะต่างๆภายในห้องผสม.....	6
รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางลำเจ็ทกับโปรไฟล์ความเร็ว	7
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของเจ็ท.....	10
รูปที่ 3.3 แสดงกระแสหมุนวนในชั้นแนวการเฉือนที่เปลี่ยนจากการไหลราบเรียบเป็นการไหลปั่นป่วนโดยฉับพลัน	10
รูปที่ 3.4 แสดงการไหลของเจ็ทที่มีผนังด้านข้าง	12
รูปที่ 3.5 แสดงถึงลำน้ำที่ออกมาจากหัวเจ็ท ฟุ้งตัวเข้ามาในน้ำที่อยู่นิ่งในถังเก็บน้ำ	13
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของเทอร์บูเลนซ์เจ็ทในบรรยากาศที่อยู่นิ่งแสดงถึงการกระจายของลำเจ็ทที่ขยายตัวกว้างออกไปตามระยะ x ที่ห่างจากหัวเจ็ทและรูปแบบความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ	14
รูปที่ 3.7 รูปแบบความเร็วของเทอร์บูเลนซ์เจ็ทแบบหัวกลม ที่มีเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 95500 เส้นประจะแสดงถึงครึ่งความกว้าง (the half-width, $r_{50\%}$).....	14
รูปที่ 3.8 กราฟความเร็ว ณ ตำแหน่งใดๆกับความเร็วมากที่สุดที่ตำแหน่งแกนกลางของหัวเจ็ทและรัศมีหัวเจ็ทของเทอร์บูเลนซ์เจ็ทแบบหัวกลมกับระยะครึ่งความกว้างของหัวเจ็ทที่มีเลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 10^5	15
รูปที่ 3.9 กราฟความเร็วเฉลี่ยที่ทางออกของหัวเจ็ทและความเร็วที่มากที่สุดที่ตำแหน่งแกนกลางของหัวเจ็ทกับระยะที่ตำแหน่งใดๆ ห่างจากปลายหัวเจ็ทและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจ็ท	16
รูปที่ 3.10 ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่มากที่สุดกับน้อยที่สุดที่เวลาเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหัวเจ็ท.....	17
รูปที่ 3.11 แสดงถึงแบบจำลองทฤษฎีสองฟิล์ม(Two film theory) ที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มของก๊าซและชั้นฟิล์มของของเหลว	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 แสดงกราฟปฏิกิริยาเคมีการลดและเพิ่มออกซิเจนในน้ำ	21
รูปที่ 4.1 ภาพเสกิตจากการคำนวณอย่างคร่าวๆ จากทฤษฎีเจ็ทปั่นป่วน	24
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างภาพตัดของขนาดเกลียวใบปิดภายในห้องผสม	25
รูปที่ 4.3 เกลียวใบปิดที่ติดตั้งภายในห้องผสมและภาพตัดตามแนวยาวของเกลียวใบปิด	25
รูปที่ 4.4 ห้องผสมพร้อมระยะที่ทำการติดตั้งใบปิดและห้องผสมที่ออกแบบโดยสมบูรณ์	26
รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพชุดทดลอง	26
รูปที่ 4.6 แสดงรูปชุดทดลองที่ใช้ในการทดลอง	27
รูปที่ 4.7 ถังรับน้ำ	27
รูปที่ 4.8 แสดงรูปหัวฉีดเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดลอง	28
รูปที่ 4.9 แสดงภาพของปั๊มที่ใช้ในการทดลอง	28
รูปที่ 4.10 (ก) บอลวาล์ว (ข) วาล์วปรับอัตราการไหล (Globe Valve)	29
รูปที่ 4.11 เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ	30
รูปที่ 4.12 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ	31
รูปที่ 4.13 เครื่องชั่งน้ำหนักสารเคมี	31
รูปที่ 4.14 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า	31
รูปที่ 4.15 เครื่องมือสำหรับวัดความเร็วลม	31
รูปที่ 4.16 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (ซ่าย) และสารโคบอลต์คลอไรด์ (ขวา)	32
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมภายในท่อกลม	34
รูปที่ 4.18 แสดงรูปแบบของความเร็วของของไหลภายในท่อกลม	34
รูปที่ 4.19 พื้นที่หน้าตัดของท่อกลมที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำโดยหัวฉีดเหนี่ยวนำ	34
รูปที่ 4.20 แสดงการวัดกำลังไฟของปั๊มโดยอุปกรณ์วัดไฟ	35
รูปที่ 4.21 หน้าจอแสดงผลของเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.1 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราไหลของน้ำ 7 ลิตรต่อนาที.....	36
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราไหลของน้ำ 8 ลิตรต่อนาที.....	37
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราไหลของน้ำ 9 ลิตรต่อนาที.....	37
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราไหลของน้ำ 10 ลิตรต่อนาที.....	38
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราไหลของน้ำ 11 ลิตรต่อนาที.....	40
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่ลดลงตามอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มมากขึ้น	41
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติ (G/L) และอัตราการไหลของน้ำในห้องผสมแต่ละ แบบ.....	42
รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมผลต่างค่าความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำกับเวลาของห้อง ผสมติดเกลียวบิด 360 องศา.....	44
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบข้อมูลจากผลการทดลองระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน กับอัตราการไหลของน้ำ.....	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการบำบัดมลพิษและน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือก่อนการนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อป้องกันการเกิดมลพิษ เช่น ฝุ่นละออง ก๊าซพิษต่าง ๆ ที่ไม่เพียงประสงค์ต่อสิ่งมีชีวิตโดยรอบและต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียไม่เพียงแต่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมเพียงเท่านั้นแต่ยังเกิดจากมนุษย์ที่มีการทิ้งเศษขยะหรือเศษอาหารลงในแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งส่งผลเสียต่อระบบนิเวศในน้ำและระบบทางเดินหายใจเนื่องจากมลพิษทางกลิ่น การแก้ไขปัญหาน้ำเสียมีหลากหลายวิธีซึ่งหัวใจการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียคือการเติมอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำ หากมีปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำสูงจะสามารถหมายความว่า การบำบัดน้ำเสียโดยการเติมอากาศบำบัดได้ดี ดังนั้นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและการเพิ่มระยะเวลาการผสมระหว่างอากาศและน้ำ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผสมได้ โดยการออกแบบห้องผสมให้มีความเหมาะสมและใช้การเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาภายในห้องผสมโดยใช้หัวฉีดเหนี่ยวนำซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานจากการใช้เครื่องอัดอากาศได้

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองใช้ห้องผสมแบบท่อติดเกลียวบิดภายใน เพื่อจุดประสงค์ที่จะเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาในห้องผสมได้มากขึ้นเนื่องจากไม่มีการขวางทางอากาศจากการใช้ใบพัดและช่วยให้เกิดการผสมกันระหว่างก๊าซและของเหลวภายในห้องผสม นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการล้นของน้ำออกนอกห้องผสมอีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของห้องผสมแบบท่อติดเกลียวบิดภายในต่อการผสมของก๊าซและของเหลว

1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราการเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาภายในห้องผสมของห้องผสมแบบท่อติดเกลียวบิดภายใน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

รูปแบบของห้องผสมจะมีการติดตั้งใบบิดภายในท่อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสม แต่เป็นการลดอัตราการเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาภายในห้องผสมเนื่องจากใบบิดขวางทางไหลของอากาศ ซึ่งโครงการวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบห้องผสมใหม่เป็นแบบติดตั้งเกลียวบิดภายในแทนการใส่ใบบิด เพื่อลดการขวางทางไหลของอากาศและยังคงมีสมรรถนะในการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ท่อติดเกลียวบิดภายใน คือ ท่อที่มีเกลียวบิดยื่นออกมาจากผนังท่อด้านใน ทำให้มีพื้นที่ผิวภายในมากกว่าเมื่อเทียบกับท่อที่มีผิวเรียบเปลือย (ท่อปกติมีภาคตัดขวางเป็นวงกลม) มีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่า และสามารถทำให้การไหลภายในท่อเป็นแบบปั่นป่วนได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังลดค่าความดันตกจากปั๊มที่ช่วยให้ของไหลผ่านเครื่องผสมได้น้อยลง และเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกเข้าสู่ของไหลได้มากขึ้น จากการศึกษาเรื่องเครื่องกวนในท่อ (static mixer) การผสม, การแพร่กระจาย, การดูดซึมของของไหล, การถ่ายเทความร้อน, การสัมผัสกันของเฟสของของไหลภายในท่อจะดีหรือไม่ดีนั้นขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของของไหลภายในท่อและค่าความดันตกที่ต้องน้อยเนื่องจากการใช้ปั๊มที่ช่วยให้ของไหลเคลื่อนผ่านท่อผสม โดยจะดูแนวโน้มจากการวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนและเวลาที่เข้าสู่ค่าอิ่มตัวจากการทดลอง เพื่อดูประสิทธิภาพในการเติมอากาศและประสิทธิภาพในการถ่ายเทของออกซิเจน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 กำหนดให้น้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นของไหลปฐมภูมิ และอากาศเป็นของไหลทุติยภูมิ

1.5.2 ห้องผสมมีความยาวขนาด $1.5 D_c$ ต่อ 1 ส่วน และมีทั้งหมด 6 ส่วน

1.5.3 เกลียวด้านในห้องผสมแต่ละส่วนมีองศาบิด 180, 270 และ 360 องศา

1.5.4 พิจารณาอัตราการไหลของน้ำคั่งที่ 10 ลิตรต่อนาที

1.5.5 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางห้องผสมมีขนาด $3 D_j$ และใช้หัวฉีดขนาด 6 มิลลิเมตร

1.5.6 รูปแบบของเกลียวบิดภายในมีภาคตัดขวางสามเหลี่ยม

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1.6.1 ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผสมของก๊าซและของเหลว

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบห้องผสม

1.6.3 ออกแบบและสร้างชุดทดลองให้มีความเหมาะสมและสะดวกต่อการใช้งาน

1.6.4 เขียนแบบจำลองห้องผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน

1.6.5 ทดสอบการทำงานของชุดทดลองและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

1.6.6 เริ่มการทดลองการเติมออกซิเจนในน้ำตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

1.6.7 วัดความเร็วลมที่เกิดขึ้นสำหรับการทดลอง

1.6.8 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์และสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

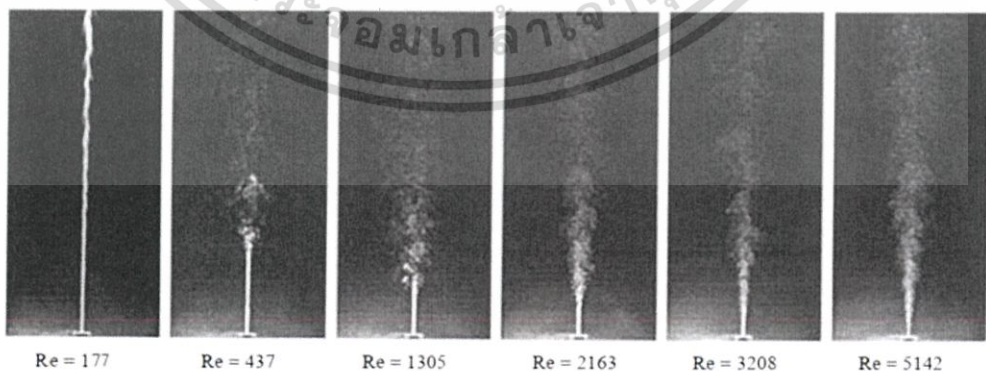
การทบทวนวรรณกรรม

2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสัมพันธ์ของก๊าซและของเหลว

Vishal Pralhad Bhaskar และ S.T. Patil ได้ทำการศึกษาดัชนีการผสมกันของของเหลวและก๊าซ โดยใช้ น้ำ และอากาศ เป็นของไหลทำงานและผสมกันผ่าน static mixer พบว่ายิ่งเลขเรย์โนลด์มีค่ามากดัชนีการผสมของของไหลจะมีค่ามาก ซึ่ง Zhang, Y.Liu ได้กล่าวไว้ว่าค่าความดันตกจะเป็นฟังก์ชันเลขชี้กำลังกับเลขเรย์โนลด์และเมื่อค่าความดันตกมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการผสมกันของก๊าซและของเหลวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

Yonggang Zhu ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการตกลงของน้ำโดยผ่านหัวเจ็ท ลงสู่สระน้ำ พบว่าการฉีดเจ็ทโดยที่ไม่มีอะไรขวางกั้น จะไม่สามารถจับกับอากาศได้ แม้ว่าเลขเรย์โนลด์จะมีค่ามาก

Adel Abdal-Rahman ทำการศึกษาข้อมูลผลกระทบของเงื่อนไขเริ่มต้นต่อการไหลของลำเจ็ทแบบปั่นป่วน สำหรับผลกระทบของเลขเรย์โนลด์ Abdal-Rahman กล่าวว่าในงานที่ถูกตีพิมพ์เกี่ยวกับการไหลของเจ็ทมีแนวโน้มตรงกันว่าถ้าเลขเรย์โนลด์ที่ทางออกของเจ็ทมีค่ามากกว่า 2000-3000 ความเร็วเฉลี่ยและการลดลงของความเร็วแกนกลางของลำเจ็ทที่มีการแผ่ออกในแนวรัศมีจะเป็นอิสระต่อเลขเรย์-โนลด์ นอกจากนี้ที่เลขเรย์โนลด์มากกว่า 500 ลำเจ็ทจะมีส่วนที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ โดยระยะการไหลแบบราบเรียบนี้จะลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น และที่เลขเรย์โนลด์มากกว่า 2000 ลำเจ็ทจะกลายเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในจุดที่ใกล้กับทางออกและอัตราการแผ่ของลำเจ็ทจะค่อย ๆ คงที่ ดังรูป



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของลำเจ็ทเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำอากาศเข้าไปผสมในลำเจตจะลดลงเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นถึง 10000 และมีค่าคงที่เมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นไปอีก

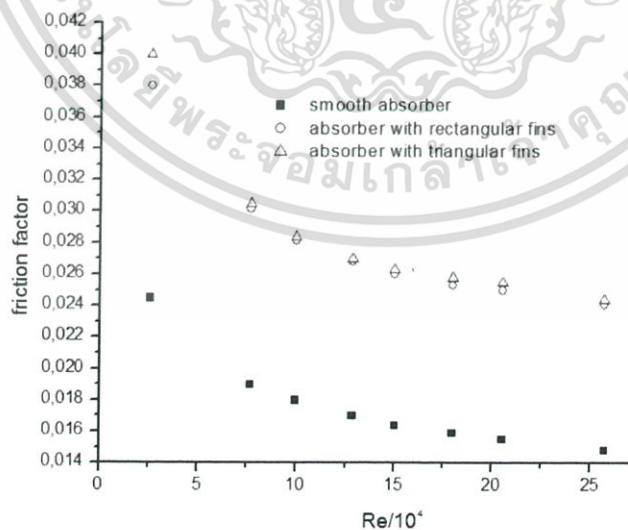
L.-K. Tseng, G. A. Ruff และ G. M. Faeth กล่าวว่าอัตราส่วนความหนาแน่นของก๊าซ-ของเหลวรวมถึงระดับความปั่นป่วนของการไหลมีผลอย่างมากต่อการผสม ซึ่งหากอัตราส่วนนี้มีค่ามากและระดับความปั่นป่วนมีมากจะส่งผลให้การผสมระหว่างแก๊ส-ของเหลวเร็วขึ้น

2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบของห้องผสม

Ava Mallesh และ P. Chandrashekar ได้ทำการศึกษารูปร่างของเกลียวบิดภายในท่อพบว่าหน้าตัดของเกลียวที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและลักษณะเกลียวที่เป็นเส้นเดี่ยวและถี่ (single fin with large number of turns) จะขัดขวางการไหลของอากาศมากกว่าแบบที่เป็นท่อเรียบและท่อติดเกลียวบิดแบบซิงเกิลเทิร์นที่มีหน้าตัดเดียวกัน

นายเชมชาติ บุญยะกาญจน และคณะได้ทำการศึกษารออกแบบห้องผสมโดยใช้ใบบิด helical static mixer พบว่าห้องผสมที่ติดตั้งใบบิดเหมาะสำหรับใช้ในการผสมที่อัตราการไหลต่ำและหากอัตราการไหลของน้ำมีค่าสูงห้องผสมที่ไม่ติดตั้งใบบิดจะให้การผสมที่ดีกว่า

Amina Benabderrahmane และคณะได้ศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติของไหลและรูปร่างของท่อแบบที่ติดครีبد้านในและแบบผิวเรียบต่อการถ่ายเทความร้อน พบว่าการใส่ครีบบนในสามารถเพิ่มเลขนัสเซิลท์ (Nusselt Number) ได้มากกว่าท่อแบบเรียบ นอกจากนี้รูปแบบของครีบนหน้าตัดสามเหลี่ยมมีแรงเสียดทานมากส่งผลให้เกิดการไหลแบบหมุนวน (swirling flow) ที่ดีกว่าท่อเรียบและครีบนหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแฟกเตอร์ความเสียดทานกับเลขเรย์โนลด์ของท่อแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหัวฉีดเหนียวน้ำ

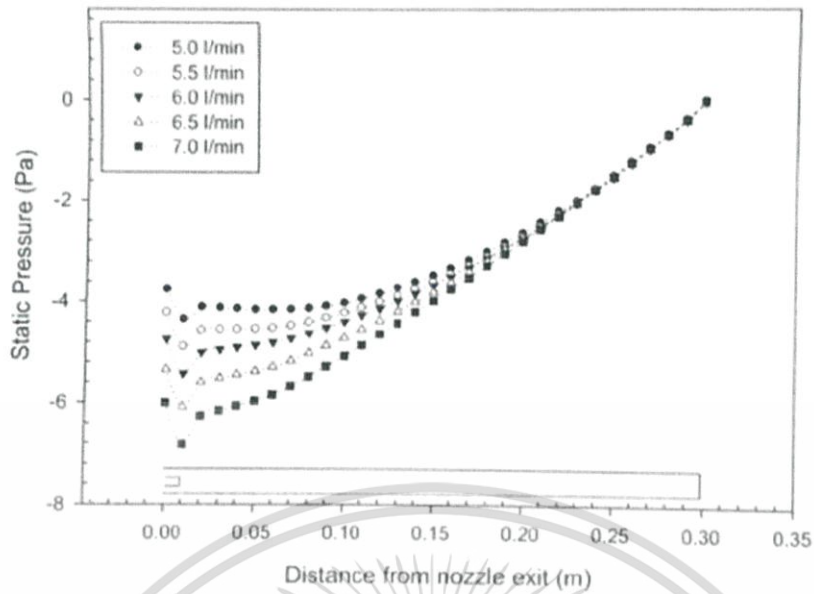
นายจิรพล เนียมพินิจสกุล และคณะ ได้ทำการศึกษาและออกแบบหัวฉีดเหนียวน้ำเพื่อใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว โดยใช้หัวฉีดขนาด 6 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวห้องผสมมีขนาด 3 และ 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ตามลำดับ เพราะเป็นช่วงขนาดที่มีความสมบูรณ์ของแกนกลาง (core) และการกระจายตัวของเจ็ทโดยไม่เกิดการชนผนัง นอกจากนี้ยังพบว่าตำแหน่งของรูอากาศที่ระยะ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดให้อัตราการไหลของอากาศมากที่สุด



รูปที่ 2.3 แสดงแบบหัวฉีดเหนียวน้ำที่ใช้ในการทดลอง

2.4 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งติดตั้งเกลียวปิดภายในห้องผสม

จากการศึกษาการคำนวณเชิงตัวเลขเกี่ยวกับความดันที่ระยะต่างๆในห้องผสมของนายกิริติ กิรสมุทรานนท์ ที่อัตราการไหลของน้ำ (L) เท่ากับ 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 และ 7.0 ลิตรต่อนาที พบว่าในทุกอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันรอบๆ กระแสเจ็ทมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับความดันที่ทางเข้าของอากาศ (101,325 Pa) หรือ เท่ากับบรรยากาศ จึงมีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับทางเข้าอากาศ และค่าความดันลดมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อห่างจากปลายหัวฉีดมากขึ้น ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสถิตกับระยะต่างๆภายในห้องผสม

การลดลงของความดันอากาศภายในหัวฉีดเหนี่ยวนำมีลักษณะดังกล่าวเนื่องจากกระแสเจ็ทจากปลายหัวฉีดทำให้ของไหลไหลด้วยความเร็วและเฉือนอากาศบริเวณโดยรอบของกระแสเจ็ท ทำให้บริเวณโดยรอบเจ็ทมีความดันลดลง การลดลงของความดันทำให้เกิดการเหนี่ยวนำอากาศโดยรอบทางเข้าห้องผสมซึ่งมีความดันสูงกว่าเข้าสู่ห้องผสมที่มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ และบริเวณความดันที่ลดลงต่ำที่สุดที่บริเวณปลายหัวฉีดหลังจากนั้นปรับตัวเพิ่มขึ้นและคงที่ที่ระยะ 12 มิลลิเมตร หรือระยะเป็นสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด $2D_j$

บทที่ 3

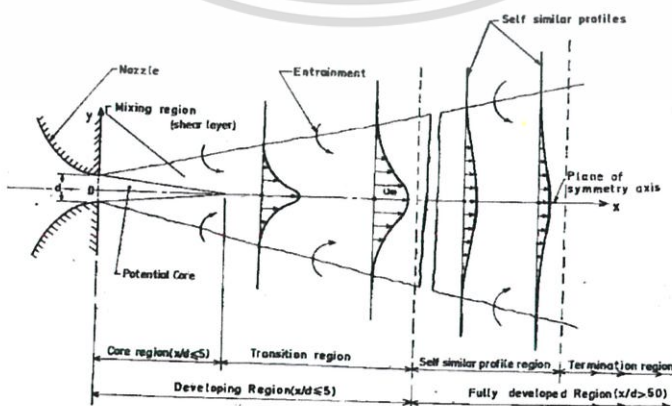
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเจ็ท (Theory of Jets)

เจ็ทได้ถูกศึกษาพฤติกรรมอย่างกว้างขวางจากการทดลองและการวิจัยมากกว่า 60 ปี เจ็ทแบบหัวกลมและแบบแบนราบได้ถูกใช้งานหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในกระบวนการการอบแห้ง, ม่านอากาศในกระบวนการทำความเย็นภายในห้อง, กระบวนการทำความร้อนหรือกระบวนการหมุนเวียนอากาศ จากกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นนี้การคำนึงถึงอัตราการแพร่กระจายของหัวฉีดเจ็ทและพลังงานจลน์ที่ตำแหน่งแกนกลางของเจ็ทนั้นจะเป็นตัวแปรสำคัญในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการผสมของของไหล บริเวณชั้นแนวเฉือน ซึ่งเป็นบริเวณที่ของไหลที่ชั้นบรรยากาศโดยรอบจะมาผสมกับของไหลที่ออกมาจากเจ็ทมากที่สุด ดังนั้นการเข้าใจปรากฏการณ์ของของไหลที่บริเวณชั้นแนวเฉือนตลอดแนวการพัฒนาลำเจ็ทมีความสำคัญอย่างมากในการศึกษาทฤษฎีเจ็ท

3.1.1 โครงสร้างและการพัฒนาของลำเจ็ทอิสระ (Structure and Development of a free jet)

เจ็ทอิสระ คือลำเจ็ทที่ไม่มีขอบเขตที่ถูกขับเคลื่อนโดยผลต่างของความดันไปยังสู่บรรยากาศรอบนอก โดยที่ไม่มีผนังหรือสิ่งกีดขวางระหว่างลำเจ็ทและบรรยากาศ ชั้นขอบเขตบริเวณทางออกของเจ็ทจะเป็นบริเวณที่ชั้นแนวเฉือนเป็นอิสระซึ่งจะเกิดการผสมผสานกันระหว่างของไหลจากหัวเจ็ทและบรรยากาศโดยรอบ ดังนั้นอัตราการไหลโดยมวลของเจ็ทจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในทิศทางที่ลำเจ็ทพุ่งออกไป ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะนำไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและความเร็วที่ตำแหน่งแกนกลางของลำเจ็ทนั้นจะลดลงเรื่อยๆตามระยะทางที่ห่างออกไปจากหัวเจ็ท โครงสร้างของการไหลของเจ็ทอิสระถูกศึกษาอย่างกว้างขวางโดยนักวิจัยและจากงานวิจัยของแอสเฮเร่ (ASHRAE) ได้กล่าวไว้ว่าโครงสร้างของเจ็ทอิสระแบ่งออกเป็น 4 บริเวณที่สัมพันธ์กับรูปแบบของความเร็วที่มีความเร็วที่ตำแหน่งแกนกลางลดลงตามระยะทางที่ห่างจากหัวเจ็ท ดังรูป



รูปที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางลำเจ็ทกับโปรไฟล์ความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณที่ 1 บริเวณลู่อู่เข้า : จะเรียกช่วงนี้ว่า แกนหลักของเจ็ท (potential core) ณ จุดนี้ ความเร็วที่จุดกึ่งกลางของโปรไฟล์ความเร็วจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของหัวเจ็ท บริเวณลู่อู่เข้านี้ส่วนมากจะมีระยะ 4-6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด

บริเวณที่ 2 บริเวณที่เริ่มเปลี่ยนแปลง : ที่บริเวณนี้ความเร็วที่จุดกึ่งกลางของโปรไฟล์ความเร็วจะเริ่มลดลง ความเร็วที่ลดลงนี้สามารถประมาณได้เป็นสัดส่วน $x^{-0.5}$ (x คือระยะทางในแนวแกนจากปลายหัวเจ็ท) บริเวณนี้จะเกิดขึ้นที่ระยะตั้งแต่ 6-20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเจ็ท ยิ่งไปกว่านั้น บริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่เกิดการผสมผสานกันเนื่องจากชั้นแนวการเฉือนของของไหลที่ออกมาจากหัวเจ็ทและบรรยากาศโดยรอบมาบรรจบกัน

บริเวณที่ 3 บริเวณการจำลองตัวเอง : บริเวณนี้โปรไฟล์ความเร็วจะมีรูปร่างที่คล้ายกันที่ทุกระยะในช่วงนี้ แต่ความเร็วที่จุดกึ่งกลางของรูปแบบความเร็วจะลดลงโดยประมาณเป็นสัดส่วน x^{-1}

บริเวณที่ 4 บริเวณช่วงสิ้นสุด : บริเวณนี้ความเร็วที่จุดกึ่งกลางของตำแหน่งหัวเจ็ทจะลดลงอย่างรวดเร็ว นักวิจัยหลายคนได้ทำการศึกษารอบนี้กันอย่างกว้างขวาง แต่คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของบริเวณนี้ก็ยังไม่เป็นที่เข้าใจมากนัก

สรุปได้อย่างคร่าวๆว่า สามบริเวณแรกของโครงสร้างลำเจ็ทอิสระอากาศรอบลำเจ็ทจะเข้ามาผสมกับของไหลที่ออกมาจากหัวเจ็ทและในบริเวณที่สี่ลำของไหลเหล่านี้จะสลายตัวโดยมีทิศทางจากภายในสู่ภายนอก ในทางวิศวกรรมการศึกษาพฤติกรรมของลำเจ็ทอิสระสามบริเวณแรกจำเป็นอย่างมาก เพราะเมื่อความเร็วของไหลในแนวแกนหลักและบรรยากาศโดยรอบที่มาบรรจบแตกต่างกันมากๆ จะก่อให้เกิดกระแสไหลวนปั่นป่วนเอ็ดดี้ขนาดใหญ่ (eddy flow) ทำให้เกิดการผสมอย่างรุนแรงในแนวยาว จากการผสมของของไหลในลักษณะนี้จะทำให้ลำเจ็ทมีความเร็วลดลงแต่ความเร็วของของไหลในบรรยากาศรอบนอกที่เข้ามาจะเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการผสมผสานที่ดีในกระแสหลักซึ่งจะทำให้ความกว้างของลำเจ็ทเพิ่มมากขึ้น

3.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายของลำเจ็ท (Factors influencing jet spread)

มีหลากหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความกว้างของลำเจ็ท อาทิเช่น รูปแบบความเร็วที่ทางออกของหัวเจ็ท, รูปร่างหัวเจ็ท, เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) และอุณหภูมิของของไหลที่ทางออกของหัวเจ็ท ต่อไปนี้จะเป็นการอธิบายสั้นๆเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาของลำเจ็ทในช่วงต่างๆ

3.1.2.1 โปรไฟล์ของความเร็วที่ทางออกของหัวเจ็ท (Inlet Velocity Profile)

เงื่อนไขเริ่มต้นของเจ็ทจะมีอิทธิพลต่อการพัฒนารูปร่างของการไหลในทิศทางการไหลเสมอ รูปร่างของการไหลที่ปากทางเข้าของเจ็ทโดยทั่วไปแล้วจะแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ 1) การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) 2) การไหลเสมือนแบบราบเรียบ (nominally laminar flow) 3) การไหลแบบถูกรบกวนอย่างรุนแรง (highly disturbed flow) 4) การไหลแบบปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ (fully

turbulent flow) การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วนแบบสมบูรณ เป็นเงื่อนไขที่ถูกจำกัดของการไหลแต่การไหลเหมือนแบบราบเรียบและการไหลแบบถูกรบกวนอย่างรุนแรง จะเป็นการไหลที่พบเจอโดยทั่วไป รูปแบบความเร็วเฉลี่ยที่ชั้นแนวการเฉือนที่บริเวณใกล้ๆ หัวเจ็ทจะมีรูปร่างเหมือนรูปแบบบลาสเซียส (Blassius profile) ในการไหลแบบราบเรียบแนวชั้นการเฉือนที่หัวเจ็ทจะเกิดความไม่เสถียรเกิดขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดความผันผวนมากที่สุดที่บริเวณขอบของเจ็ท ตัวแปรเงื่อนไขที่ทางออกของเจ็ทมีดังนี้

$$\text{ความหนาระยะการกระจัด (Displacement Thickness) } \delta = \int_{-\infty}^{\infty} \left(1 - \frac{U}{U_{\infty}}\right) dy \quad (3.1)$$

$$\text{ความหนาโมเมนตัม (Momentum Thickness) } \theta = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U}{U_{\infty}} \left(1 - \frac{U}{U_{\infty}}\right) dy \quad (3.2)$$

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์รูปร่าง (Shape Factor) } H = \frac{\delta}{\theta} \quad (3.3)$$

ค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างจะมีค่าเท่ากับ 2.5 สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปากทางออกของเจ็ทและ 1.4 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างที่อยู่ระหว่างช่วงนี้ก็คือจะอยู่ในช่วงการไหลแบบทรานซิชัน (transition flow)

3.1.2.2 รูปร่างของหัวฉีดเจ็ท (Nozzle Geometry)

อิทธิพลที่มีผลกระทบต่อการไหลของของไหลที่ออกจากหัวเจ็ทที่สำคัญมากอีกอย่างหนึ่งนั่นก็คือรูปร่างของหัวฉีดเจ็ท ความเร็วเฉลี่ยของหัวเจ็ทแบบกลมกับหัวเจ็ทแบบแบนราบจะแตกต่างกัน ความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งแกนกลางของหัวเจ็ทแบบกลมที่ออกมาจากหัวฉีดจะเป็นฟังก์ชันของ x^{-1} ในขณะที่หัวเจ็ทแบบแบนราบจะมีความเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งแกนกลางเป็นฟังก์ชันของ $x^{-0.5}$ ในการไหลแบบทรานซิชันตัวแปรในการไหลต่างๆก็จะขึ้นกับรูปร่างการหัวฉีดเจ็ทเช่นเดียวกัน รูปร่างของหัวฉีดที่มีรูปร่างปลายแหลมอาจจะทำให้โปรไฟล์ความเร็วเริ่มต้นมีรูปร่างคล้ายรูปแบบความเร็วอานม้า (saddle-backed profile) ในขณะที่รูปร่างของหัวฉีดมีรูปร่างเล็กและมน โปรไฟล์ความเร็วจะเป็นแบบทรงหมวกสูง (top hat profile)

3.1.2.3 เลขเรย์โนลด์ของเจ็ท (Jet Reynolds Number)

เลขเรย์โนลด์ของเจ็ทแบบแบนราบจะถูกเขียนได้ในรูปของ ความกว้างของหัวฉีดเจ็ท (d), ความเร็วเฉลี่ย (U_0) สัมประสิทธิ์ค่าความหนืดไคเนมาติก (ν) ได้เป็น

$$Re = \frac{U_0 d}{\nu} \quad (3.4)$$

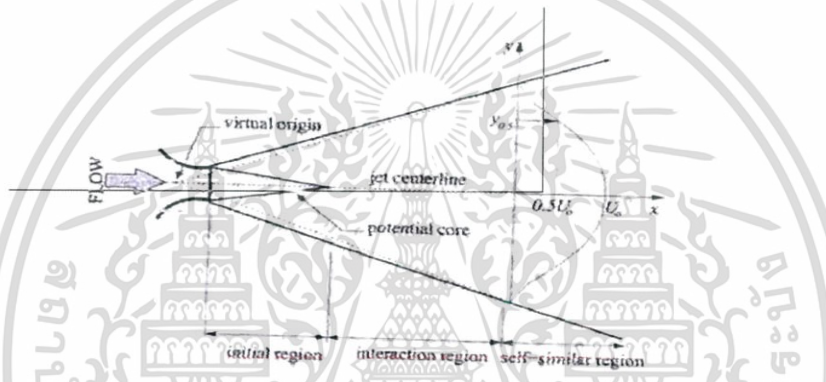
ถ้าเจ็ทเป็นแบบคอนทัวร์แบนราบโปรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยจะมีรูปร่างเป็นแบบทรงหมวกสูง และความเร็วเฉลี่ยจะมีค่าเข้าใกล้ค่าความเร็วที่ตำแหน่งแกนกลางของหัวฉีดเจ็ทที่ทางออก โดยทั่วไปแล้วเลขเรย์โนลด์ใดๆสามารถหาได้จากตำแหน่งครึ่งความกว้าง (Half Width of the Jet) และความเร็วที่ตำแหน่งแกนกลางของหัวฉีดเจ็ท ณ จุดใดๆ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปได้ดังนี้

$$Re_{b_u} = \frac{U_c b_u}{\nu} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.4 ตำแหน่งครึ่งความกว้างและจุดกำเนิดเสมือน (Half Width and Virtual Origin of the Jet)

ครึ่งหนึ่งของความกว้างเจ็ทที่ตำแหน่งใดๆ คือระยะที่วัดจากแกนกลางของตำแหน่งหัวเจ็ทกับระยะที่ความเร็วเฉลี่ยมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความเร็วที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของหัวฉีด ครึ่งหนึ่งของความกว้างเจ็ทโดยปกติแล้วจะเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับระยะ x ที่ห่างออกไปจากทางออกของปากเจ็ท ยกเว้นบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์สลับแกนขึ้น ความชันของเส้นตรงของครึ่งความกว้างเจ็ทจะมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งคืออัตราการกระจายตัว (spread rate) โดยปกติแล้วอัตราการกระจายตัวของเจ็ทที่มีเลขเรย์โนลด์สูงๆหรือมีการไหลแบบปั่นป่วนนั้น อัตราการกระจายตัวจะมีค่าเท่ากับ 0.11 ในขณะที่เจ็ทที่มีการไหลแบบราบเรียบจะมีค่าอัตราการกระจายตัวประมาณ 0.4 จุดกำเนิดเสมือนคือจุดที่กำเนิดลำของไหลของเจ็ท ดังที่แสดงในรูป



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการกระจายตัวของเจ็ท

จุดกำเนิดเสมือนอาจจะแตกต่างกันไปตามรูปร่างของเจ็ท อาจจะอยู่ในหรือนอกเจ็ทก็ได้ ขึ้นอยู่กับรูปร่างขอบเขตที่ปากทางออกของเจ็ท จุดกำเนิดเสมือนจะสัมพันธ์กับระยะครึ่งความกว้างของเจ็ทดังนี้

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

เมื่อ C_{2u} คือตำแหน่งจุดกำเนิดเสมือน

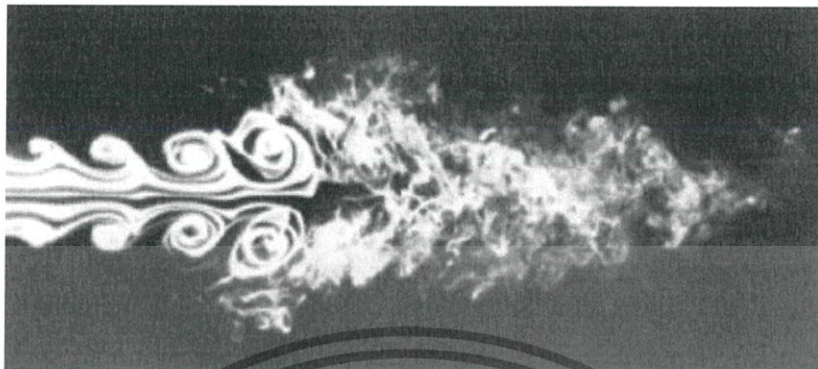
K_{2u} คืออัตราการแพร่กระจายของเจ็ท

b_u คือระยะครึ่งความกว้างเจ็ท

3.1.2.5 ความไม่เสถียรภาพของเจ็ท (Jet Instabilities)

ความไม่เสถียรภาพของเจ็ทจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของความเร็วเริ่มต้นของเจ็ท ที่ตำแหน่งเหนือแกนกลางของเจ็ทของไหลจะเริ่มสั้นและแกว่งที่บริเวณชั้นแนวการเฉือนการสั่นนี้จะแกว่งขึ้นลงและหมุนก่อให้เกิดเป็นกระแสมุขวน (vortices) ซึ่งกระแสมุขวนนี้จะมีขนาดและความแข็งแรงมาก

ขึ้นตามระยะแกว่งยาวที่ห่างออกไปจากทางออกเจ็ท กระแสหมุนวนนี้จะมีอิทธิพลต่อการผสมระหว่าง
บรรยากาศและของไหลจากหัวเจ็ท ซึ่งในแนวของกระแสหมุนวนนี้ก็จะมีการชนกันของกระแสหมุนวน
ด้วยตัวเอง ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้จะทำให้การไหลเปลี่ยนไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ดังรูป



รูปที่ 3.3 แสดงกระแสหมุนวนในชั้นแนวการเฉือนที่เปลี่ยนจากการไหลราบเรียบเป็นการไหลปั่นป่วน
โดยฉับพลัน

3.1.2.6 ความต่อเนื่องของโครงสร้างลำเจ็ท (Coherent Structures)

โครงสร้างแบบต่อเนื่อง คือการรวมตัวกันของมวลการไหลแบบปั่นป่วนและกระแสหมุนวน
ซึ่งกระแสหมุนวนนี้จะถูกจัดวางองค์ประกอบอย่างเป็นระเบียบ โดยที่โครงสร้างแบบต่อเนื่องจะติดกัน
ไปทั้งโครงสร้าง การพัฒนาของโครงสร้างต่อเนื่องในเจ็ทนี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นที่สามารถควบคุม
ได้, สามารถหาความถี่ในการก่อตัวของโครงสร้างต่อเนื่องและควบคุมได้โดยการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียง
(acoustic excitation) ซึ่งการกระตุ้นนี้จะทำให้กระแสเปลี่ยนรูปร่างของโครงสร้างไปในทิศทางที่ทำให้
ให้กลไกการสร้างการไหลแบบละเอียดถูกทำลายไปเนื่องจากความหนืดได้สลายตัวออกไป การไหล
แบบละเอียดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนนี้จะลดลงทำให้โครงสร้างต่อเนื่องขยายใหญ่มากยิ่งขึ้น
โครงสร้างต่อเนื่องจะเริ่มต้นพัฒนาโครงสร้างที่บริเวณชั้นแนวการเฉือนใกล้ปากทางออกของเจ็ทและ
จะขยายเข้าไปในชั้นบรรยากาศรอบข้างเป็นระยะทางประมาณ 20 เท่าของขนาดหัวฉีดเจ็ท ยิ่ง
ระยะห่างจากหัวฉีดในแกว่งยาวมากเท่าใดโครงสร้างต่อเนื่องก็ยังมีขนาดใหญ่ขึ้นเท่านั้น

3.1.2.7 การกระจายตัวของไอโซเทอร์มอลเจ็ทและที่ไม่เป็นแบบไอโซเทอร์มอลเจ็ท (Isothermal and Non- isothermal Jet Spreading)

ไอโซเทอร์มอลเจ็ทคือเจ็ทที่มีลำของไหลที่ออกมาจากหัวฉีดเจ็ทมีอุณหภูมิเท่ากับบรรยากาศ
โดยรอบ ในทางกลับกันเจ็ทแบบที่ไม่ใช่ไอโซเทอร์มอลเจ็ทคือเจ็ทที่มีลำของไหลที่ออกมาจากหัวฉีด
เจ็ทมีอุณหภูมิแตกต่างจากบรรยากาศโดยรอบโดยที่เจ็ทชนิดนี้อาจจะเป็นเจ็ทที่มีปรากฏการณ์แรง
ลอยตัวหรือไม่ก็ได้ ในกรณีที่เลขริชาร์ดสัน (Richardson number) น้อยมากๆ อุณหภูมิของของไหลที่
ออกมาจากหัวเจ็ทนั้นจะไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์แรงลอยตัว ในการคำนึงถึงความไม่
เสถียรภาพทางพลศาสตร์ของของไหลและแนวการพัฒนาเป็นการไหลแบบปั่นป่วนนั้นในเจ็ทแบบที่
ไม่ใช่ไอโซเทอร์มอลจะมีวิธีที่ศึกษาแตกต่างออกไปจากไอโซเทอร์มอลเจ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.8 การจำลองตัวเอง (Self-Similarity)

การจำลองตัวเองจะเกิดขึ้นเมื่อรูปแบบของความเร็วมีรูปแบบที่สอดคล้องกัน โดยค่าสัดส่วนอย่างง่ายที่ขึ้นอยู่กับพิกัดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพียงพิกัดเดียว สมการการอนุรักษ์การจำลองตัวเองของเจ็ทนั้นสามารถลดรูปให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้และยิ่งไปกว่านั้นสมการอนุรักษ์การจำลองตัวเอง ถ้าจะมีคำตอบของสมการนั้น สมการพลศาสตร์ของของไหลและขอบเขตของคำตอบของการไหลตลอดทั้งการไหลนั้นๆ จะต้องมีค่าที่สัมพันธ์กันที่ตำแหน่งสอดคล้องกัน ดังนั้นสมการการอนุรักษ์การจำลองตัวเองจะบ่งบอกได้ว่าการไหลนั้นเข้าสู่จุดสมดุลที่คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของของไหลนั้นๆจะส่งอิทธิพลซึ่งกันและกันตลอดทั้งการไหล โดยไม่จำเป็นต้องมีการจัดการคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในการไหลเพิ่มเติม กล่าวได้ว่าการจำลองตัวเองนั้นจะเป็นสภาวะที่คงตัวและจะเกิดหลังจากการจัดเรียงตัวของกระแสการไหลได้เสร็จสิ้นแล้ว

สภาวะของการจำลองตัวเองสามารถมีได้หลากหลายรูปแบบ เช่น 1) กระแสการไหลสามารถเป็นกระแสที่เป็นการอนุรักษ์การจำลองตัวเองได้อย่างเต็มรูปแบบ (fully self-preserving) ที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนในทุกๆจุดของกระแส 2) กระแสการไหลสามารถเป็นกระแสที่เป็นการอนุรักษ์การจำลองตัวเองได้บางส่วน (partially self-preserving) ซึ่งกระแสการไหลนี้จะขึ้นอยู่กับสมการการอนุรักษ์โมเมนตัมเพียงอย่างเดียวหรือขึ้นอยู่กับการจัดเรียงของกระแสในสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนตัวอย่างสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการจำลองตัวเองของเจ็ทที่กระแสการไหลมีความเร็วของการไหลเป็นความเร็วเฉลี่ย สามารถเขียนได้ดังนี้

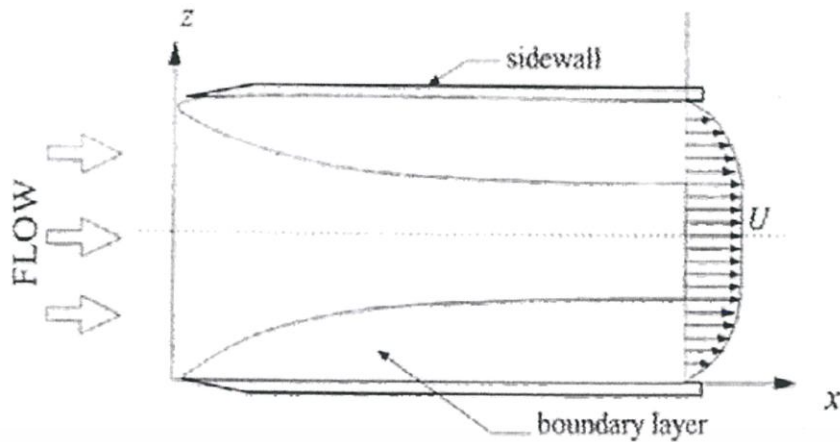
$$\frac{U}{U_c} = f\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (3.7)$$

เมื่อ U และ U_c คือความเร็ว ณ ตำแหน่งใดๆ และความเร็วที่จุดกึ่งกลางของหัวฉีดเจ็ท

δ คือ ความกว้างของลำเจ็ท ณ จุดใดๆ ตลอดแนวกระแสการไหล

3.1.2.9 บทบาทของผนังด้านข้างต่อกระแสของการไหลของเจ็ท (Role of Side Walls in Jet Flow)

ผนังด้านข้างที่ถูกนำมาวางอยู่ในแนวระนาบ $x-y$ จะส่งผลถึงพฤติกรรมของขอบเขตสองมิติของลำเจ็ท โดยการขัดขวางการเหนี่ยวนำบรรยากาศรอบข้างเข้ามาผสมกับของไหลที่ออกมาจากหัวฉีดเจ็ท โดยขอบเขตของการไหลจะเริ่มจากผนังเข้ามา



รูปที่ 3.4 แสดงการไหลของเจ็ทที่มีผนังด้านข้าง

ดังนั้นรูปแบบการพัฒนาของกระแสการไหลของเจ็ทแบบแบนราบที่ผ่านหัวฉีดรูปสี่เหลี่ยมแบบมีผนังด้านข้างกับไม่มีผนังด้านข้างจะแตกต่างกัน การมีผนังด้านข้างนั้นสามารถขยายขอบเขตสองมิติของลำเจ็ทได้ ซึ่งการขยายขอบเขตนี้น่าสนใจมากต่อการพิจารณา เพราะจะส่งผลกระทบต่อการพัฒนาของลำเจ็ทตลอดแนวยาวต่อไป

3.1.2.10 มาตราส่วนความยาวของความปั่นป่วน (Turbulent Length Scales)

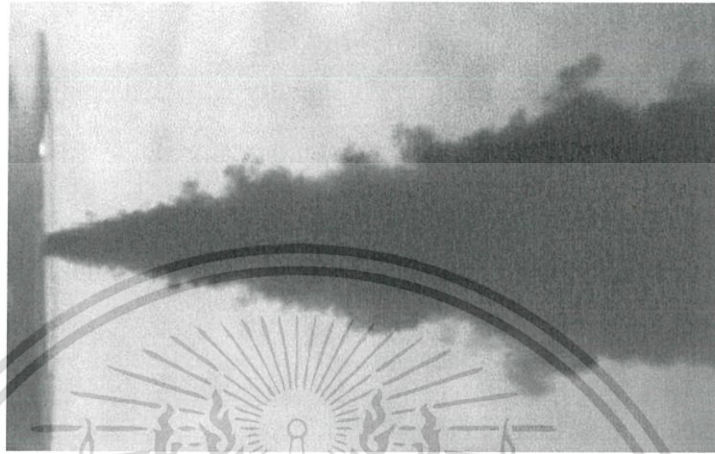
กระแสการไหลที่การไหลแบบปั่นป่วนและมีกระแสไหลวนเอ็ดดี้ที่มีขนาดแตกต่างกันนั้นพลังงานจลน์จากกระแสน้ำหลักจะเปลี่ยนไปเป็นกระแสไหลวนเอ็ดดี้ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ปรากฏการณ์ที่พลังงานจลน์นี้จะอยู่ในรูปพลังงานที่มีมาตราส่วนเล็กลงเรื่อยๆ เนื่องจากความหนืด เรียกว่า การยืดตัวของกระแสไหลวน (vortex stretching) ที่มาตราส่วนพลังงานขนาดเล็กพลังงานจลน์ของกระแสไหลวนเอ็ดดี้จะกระจายตัวออกเนื่องจากความหนืด การเคลื่อนตัวของพลังงานจลน์มาตราส่วนขนาดใหญ่ส่วนมากจะมีการเคลื่อนที่แบบไม่เท่ากันทุกทิศทางในทิศทางหนึ่งๆ เสมอ อย่างไรก็ตามการไหลแบบปั่นป่วนส่วนมากที่มาตราส่วนพลังงานจลน์เล็กและละเอียดจะเป็นการเคลื่อนที่แบบเท่ากันทุกทิศทาง ค่าขนาดเฉลี่ยของกระแสไหลวนเอ็ดดี้จะเรียกว่าผลรวมขนาดมาตราส่วนความยาว ค่าขนาดเฉลี่ยที่เล็กที่สุดของกระแสไหลวนเอ็ดดี้ที่เกิดจากการกระจายตัวจะเรียกว่า มาตราส่วนคอลโมโกรอฟ (Kolmogorov scale) ส่วนค่าขนาดเฉลี่ยของกระแสไหลวนที่มีขนาดกลางลงมาจะเรียกว่ามาตราส่วนไมโครเทเลอร์ (Taylor micro-scale)

3.2 ทฤษฎีเทอร์บูเลนต์เจ็ท (Turbulent jet Theory)

เมื่อใดที่ของไหลชนิดหนึ่งได้เคลื่อนที่เข้าไปในของไหลที่อยู่หนึ่งอีกชนิดหนึ่งสถานะเดียวกันของไหลทั้งสองนี้จะเกิดความเร็วเฉือนที่แนวที่ของไหลทั้งสองสัมผัสซึ่งกันและกัน ก่อให้เกิดการผสมแบบปั่นป่วน ในธรรมชาติปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นได้หลายเหตุการณ์ เช่น แม่น้ำไหลเข้ามาในทะเลสาบขนาดใหญ่ เป็นต้น ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดอีกตัวอย่างหนึ่งนั่นก็คือการฉีดของหัวเจ็ท

เข้าสู่บรรยากาศผ่านท่อยาวที่ใช้กันในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปในการปล่อยของไหลลงสู่แม่น้ำ, ลำคลอง หรือมหาสมุทร

คุณสมบัติของการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของขอบเขตของการไหลและชนิดของแรงที่มากระทำต่อของไหลซึ่งค่อนข้างจะซับซ้อน ในที่นี่เราจะกำหนดขอบเขตของการศึกษาในกรณีขั้นพื้นฐาน คือลำเจ็ทไหลเข้าไปในของไหลที่อยู่นิ่ง

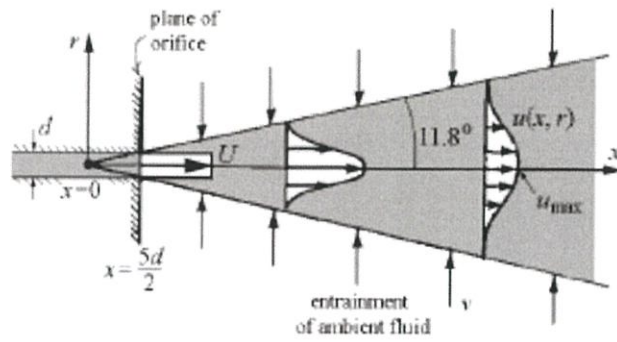


รูปที่ 3.5 แสดงถึงลำน้ำที่ออกมาจากหัวเจ็ท พุ่งตัวเข้ามาในน้ำที่อยู่นิ่งในถังเก็บน้ำ

จากการทดลองของการฉีดของไหลจากหัวเจ็ทเข้าไปในของไหลที่อยู่นิ่งที่ความหนาแน่นเท่ากันจะเห็นได้ว่า ปรากฏการณ์การไหลแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้หัวฉีดเจ็ท อีกนัยหนึ่งสามารถพูดได้ว่า รัศมีลำของไหลที่ฉีดออกมาจากหัวเจ็ทจะเป็นสัดส่วนแปรผันโดยตรงกับระยะที่ห่างออกมาจากตำแหน่งหัวฉีดเจ็ท ยิ่งไปกว่านั้น มุมที่ของไหลไหลออกมาจากหัวฉีดนั้นจะเท่าเดิมเสมอ โดยที่ไม่คำนึงถึงธรรมชาติหรือชนิดของของไหลและปัจจัยอื่นๆ เช่น ขนาดของหัวเจ็ท หรือ ความเร็วที่ทางออกของหัวเจ็ท มุมที่กล่าวถึงนี้จะเรียกว่า “มุมสากล (Universal angle)” ซึ่งจะเท่ากับ 11.8 องศา วัดจากแกนกลางของตำแหน่งหัวฉีดเจ็ท ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างรัศมีของลำของไหลที่ออกจากหัวเจ็ท (R) และระยะที่ห่างออกมาจากตำแหน่งหัวฉีด (x) ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นก็คือค่า $\tan(11.8)$ จะมีค่าประมาณเท่ากับ $1/5$

$$R(x) = \frac{1}{5}x \quad (3.8)$$

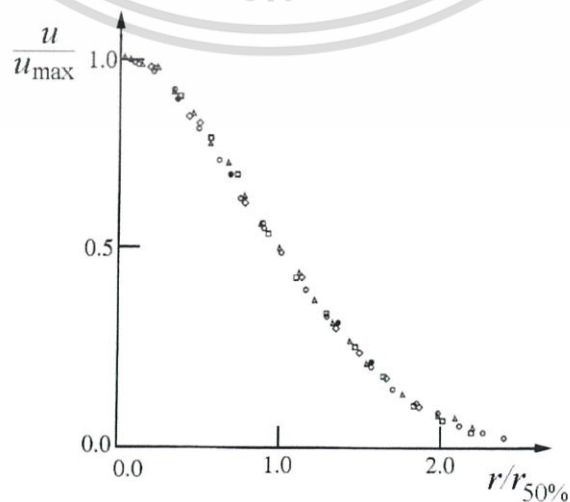
แต่จากความเป็นจริงแล้วนั้น รัศมีของลำของไหลที่ออกมาจากหัวเจ็ทที่ตำแหน่งเริ่มต้นจะไม่เท่ากับ 0 แต่จะเท่ากับขนาดของหัวฉีดของเจ็ท ซึ่งจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดเจ็ท ดังนั้น ระยะ x จึงไม่ได้วัดตั้งแต่ตำแหน่งที่ทางออกของหัวฉีดเจ็ท แต่วัดจากระยะที่เท่ากับ $5d/2$ เข้าไปในท่อหัวฉีดเจ็ท (d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจ็ท) ตำแหน่งนี้เราจะให้ชื่อว่า “จุดกำเนิดเสมือน (virtual source)”



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของเทอร์บูเลนซ์เจ็ทในบรรยากาศที่อยู่นิ่งแสดงถึงการกระจายของลำเจ็ทที่ขยายตัวกว้างออกไปตามระยะ x ที่ห่างจากหัวเจ็ทและรูปแบบความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 3.7 รูปแบบความเร็วของเทอร์บูเลนซ์เจ็ทแบบทวมกลม ทวมเสกเวเลนดท์เท่ากับ 95500 เส้นประจะแสดงถึงครึ่งความกว้าง (the half-width, $r_{50\%}$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 กราฟความเร็ว ณ ตำแหน่งใดๆกับความเร็วมากที่สุดที่ตำแหน่งแกนกลางของหัวเจ็ท และรัศมีหัวเจ็ทของเทอร์บูเลนซ์แบบหัวกลมกับระยะครึ่งความกว้างของหัวเจ็ทที่มีเลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 10^5

จากกราฟ ความปั่นป่วนที่ค่าเรย์โนลด์ (Reynolds number) ต่างๆ เผยให้เห็นว่า ความเร็วของลำของไหลจากหัวเจ็ทจะขึ้นอยู่กับกฎการจำลองตัวเอง (similarity) นั่นก็คือหน้าตัดของลำของไหลมีรูปร่างที่คล้ายกัน ต่างกันที่ความกว้างของหน้าตัดของลำของไหล และ รูปแบบความเร็ว (velocity profile) ซึ่งจะมีรูปร่างเหมือนการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian Shape) หรือรูประฆังคว่ำ (bell curve) สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$u(x, r) = u_{\max} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.9)$$

เมื่อ x คือระยะที่วัดจากจุดกำเนิดเสมือนถึงตำแหน่งใดๆที่เราสนใจ, r คือ ระยะรัศมีที่วัดจากแกนกลางของตำแหน่งหัวฉีดเจ็ทถึงตำแหน่งใดๆในแนวที่ตั้งฉากการไหล, คือความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งแกนกลางของตำแหน่งหัวฉีดเจ็ท และ $\sigma(x)$ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งจะสัมพันธ์กับการกระจายตัวของรูปแบบความเร็ว (velocity profile) บนแนวแกนกลางของตำแหน่งหัวฉีดเจ็ท โดย 4σ จะเท่ากับความกว้างของการกระจายตัวของรูปแบบความเร็ว ซึ่งจะครอบคลุม 95% ของพื้นที่ใต้โค้งแนวเส้นรูปแบบความเร็ว ซึ่งค่านี้จะมีค่าเท่ากับ สองเท่าของคาร์รัสมิของลำของไหลที่ออกมาจากหัวฉีดเจ็ท ณ ตำแหน่งใดๆเป็นระยะ x ดังนั้น $\sigma = x/10$ นำไปสู่การเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$u(x, r) = u_{\max} \exp\left(-\frac{50r^2}{x^2}\right) \quad (3.10)$$

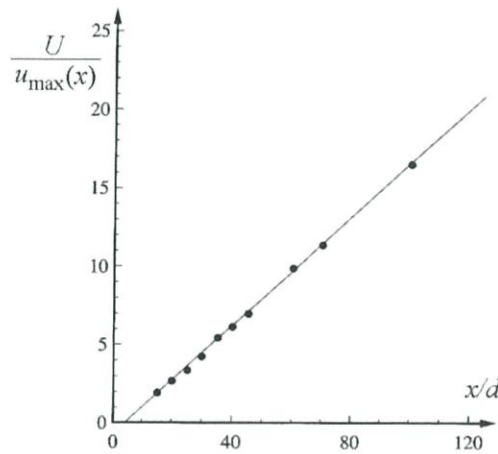
เมื่อลำของไหลพุ่งเข้าสู่ของไหลที่อยู่นิ่ง โมเมนตัมที่เกิดขึ้นในที่นี้คือโมเมนตัมของตัวเอง และการที่ไม่มีแรงภายนอกมากกระทำก็บ่งบอกถึง โมเมนตัมฟลักซ์ในแนวหน้าตัดของลำเจ็ทจะคงที่ตลอด ซึ่งความหมายของโมเมนตัมฟลักซ์ก็คือโมเมนตัมต่อปริมาตร นั่นก็คือ ρu (ρ = ความหนาแน่นของของไหลและ u = ความเร็วของของไหล) คูณกับความเร็ว u ที่หน้าตัดของลำเจ็ท จึงได้สมการของโมเมนตัมเป็น

$$\int_0^{\infty} \rho u^2 2\pi r dr = \rho U^2 \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.11)$$

โดย U คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ทางออก และ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางคือหัวฉีด หลังจากอินทิเกรตสมการด้านบนแล้วเราจะได้ความเร็วสูงสุด

$$u_{\max} = \frac{5d}{x} U \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 กราฟความเร็วเฉลี่ยที่ทางออกของหัวเจ็ทและความเร็วที่มากที่สุดที่ตำแหน่งแกนกลางของหัวเจ็ทกับระยะที่ตำแหน่งใดๆ ห่างจากปลายหัวเจ็ทและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจ็ท

อีกนัยหนึ่งกล่าวได้ว่าความเร็ว ณ ตำแหน่งแกนกลางตามแนวยาวของตำแหน่งหัวฉีดเจ็ทจะลดลงตามระยะ x ที่เพิ่มขึ้นจากจุดกำเนิดเสมือน จากการสังเกตกราฟที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นฟังก์ชันเส้นตรง ความเร็วสูงสุดของของไหลจะสัมพันธ์กับความเร็วเฉลี่ย ดังสมการ

$$\bar{u} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{\infty} u 2\pi r dr = \frac{u_{\max}}{2} = \frac{5d}{2x} U \quad (3.13)$$

ฟลักซ์ของอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Q) จะไม่คงที่ตลอดลำของไหลที่ฉีดจากหัวเจ็ท เพราะมีการผสมระหว่างของไหลที่ออกจากหัวฉีดและของไหลที่อยู่นิ่งในบรรยากาศรอบข้าง โดยฟลักซ์ของอัตราการไหลเชิงปริมาตรจะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นฟังก์ชันเส้นตรง ซึ่งสามารถเขียนออกมาเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q = \int_0^{\infty} u 2\pi r dr = \frac{\pi}{50} u_{\max} x^2 = \frac{\pi}{10} d U x \quad (3.14)$$

อัตราการผสมระหว่างของไหลที่ฉีดออกมาจากหัวเจ็ทและของไหลที่อยู่นิ่งในบรรยากาศ (E) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟลักซ์ของอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะ x ได้ดังนี้

$$E = \frac{dQ}{dx} = \frac{\pi d U}{10} \quad (3.15)$$

จากอัตราการผสมระหว่างของไหลที่ฉีดออกมาจากหัวเจ็ทและของไหลที่อยู่นิ่งในบรรยากาศ เราสามารถหาความเร็วการผสมได้ นั่นก็คือ ความเร็วในแนวรัศมีที่จำเป็นในการดำเนินการผสม จากกฎการอนุรักษ์ปริมาตร

$$dQ = v dA \quad (3.16)$$

v คือ ความเร็วที่ใช้ในการผสมของของไหล, $dA = 2\pi R dx$ คือพื้นที่ตามแนวยาวลำเจ็ท ณ ตำแหน่งใดๆ แทน R ในตัวแปรของ x และ dA ลงไป จะได้สมการ

$$\frac{dQ}{dx} = 2\pi R v = \frac{2\pi x v}{5} \quad (3.17)$$

อินทิเกรตสมการข้างต้นนี้เราจะได้ สมการที่ใช้ในการหาความเร็วของการผสมดังนี้

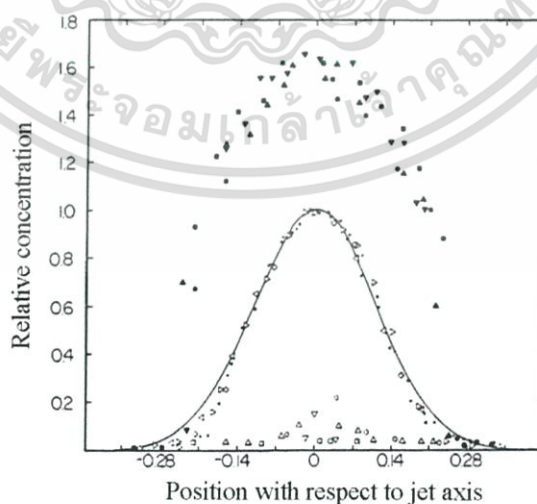
$$v = \frac{Ud}{4x} = \frac{u_{\max}}{20} = 0.10\bar{u} \quad (3.18)$$

จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของเจ็ท อาทิเช่น ความกว้างของลำของของไหลที่ออกมาจากหัวเจ็ท ความเร็วเฉลี่ย ความเร็วในการผสม หรือความเร็วในการผันผวน คุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของเจ็ทในทิศทางตามแนวยาวจะนำไปสู่จะนำไป คุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่แตกต่างกันในแต่ละทิศทางที่ต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากความเร็วของการผันผวนที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นในแนวแกน ความเร็วแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในทิศทางนี้จะใช้สัญลักษณ์ u^* ซึ่งเป็นค่าของความเร็วในการผันผวนในแนวแกนเฉลี่ยยกกำลังสอง (root mean square of axial-velocity fluctuations) ความเร็วนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามแนวแกนยาวระยะ x และระยะ r ที่วัดจากแกนกลางของหัวเจ็ท ค่าจะมีค่าประมาณเท่ากับ 0.25-0.28 ที่ระยะห่างออกมาจากแนวแกนกลางของหัวเจ็ทถึงระยะปลายขอบของลำของไหลที่ออกมาจากหัวเจ็ท ค่าจะเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุดซึ่งทำให้เห็นว่าการปั่นป่วนของลำของของไหลจากเจ็ทยังเกิดขึ้นอยู่แม้ว่าความเร็วเฉลี่ยของลำของของไหลจะลดลงในทางตรงกันข้ามทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวของของไหลความเร็วเฉลี่ยยกกำลังสองจะเหลือเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วในแกนยาว

เมื่อลำของของไหลที่ออกจากเจ็ทประกอบด้วยสารปนเปื้อนการผสมของของไหลจากหัวเจ็ทกับบรรยากาศโดยรอบจะเจือจางลงความเข้มข้นของสารปนเปื้อนก็จะลดลงตามระยะ x จากหัวหัวฉีดสมมติให้รูปแบบของความเข้มข้นในของไหลเป็นรูปร่างโค้งระฆังคว่ำ (Gaussian curve) ซึ่งจะคล้ายกับรูปแบบของความเร็วของลำเจ็ท จะได้สมการความเข้มข้นของของไหลที่เปลี่ยนไปตามระยะ x ดังนี้

$$c(x, r) = c_{\max} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) = c_{\max} \exp\left(-\frac{50r^2}{x^2}\right) \quad (3.19)$$

เมื่อ $c(x, r)$ คือค่าการผสมที่มีสารเจือปนเข้มข้นที่สุดที่ตำแหน่งแกนกลางของหัวฉีดเจ็ท ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของระยะ x



รูปที่ 3.10 ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่มากที่สุดกับน้อยที่สุดที่เวลาเฉลี่ย ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหัวเจ็ท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎอนุรักษ์จำนวนสารปนเปื้อนในลำของของไหลที่ถ่ายเทโดยเจ็ท ณ บรรยากาศใดๆ เป็น

$$\int_0^{\infty} c u 2\pi r dr = c_0 U \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.20)$$

คือ c_0 ความเข้มข้นเฉลี่ยที่หัวฉีด อินเทกตรสมการข้างต้นจะได้เป็น ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในลำของไหลที่ถ่ายเทโดยเจ็ทที่มากที่สุด ดังนี้

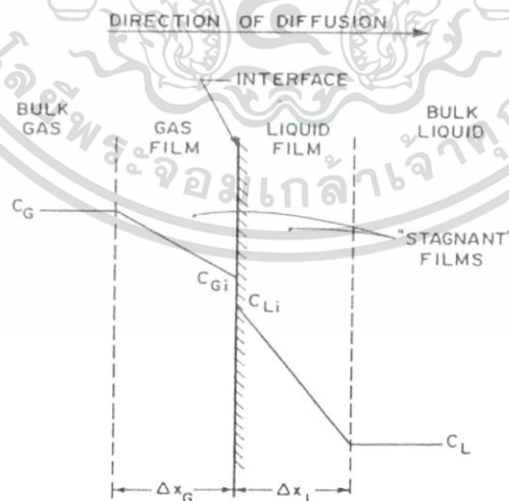
$$c_{\max} = \frac{5d}{x} c_0 \quad (3.21)$$

3.2 ทฤษฎีการเหนี่ยวนำ (Induction Theory)

ปรากฏการณ์เหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในเครื่องหัวฉีดเหนี่ยวนำ (ejector) โดยของไหลปฐมภูมิ (primary fluid) ที่มีความดันสูงจะเข้าสู่หัวฉีด (Nozzle) และขยายตัวออกที่ทางออกของหัวฉีด ความดันสถิตย์ของของไหลปฐมภูมิจะเปลี่ยนเป็นความเร็วและทำให้ความดันที่ห้องผสมต่ำลง เกิดการเหนี่ยวนำของไหลทุติยภูมิ (secondary fluid) รอบข้างหัวฉีดเข้ามาผสมกับของไหลปฐมภูมิที่ความดันคงที่ ของไหลปฐมภูมิจะเริ่มขยายตัวจากความดันเริ่มต้นไปจนถึงความดันที่เท่ากับความดันของของไหลทุติยภูมิกระบวนการขยายตัวของของไหลปฐมภูมินั้นจะเริ่มจากความเร็วมืดเริ่มต้นที่ทางเข้าหัวฉีดซึ่งมีความเร็วที่น้อยมากๆ ไปจนถึงความเร็วที่มากโดยระหว่างกระบวนการผสมกันนี้ความเร็วของของไหลปฐมภูมิจะลดลงในขณะที่ของไหลทุติยภูมิจะเพิ่มมากขึ้น

3.3 ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two film theory)

ทฤษฎีสองฟิล์มเป็นทฤษฎีที่แพร่หลายอย่างมากในการศึกษาการถ่ายเทมวลของอากาศและน้ำ ซึ่งสมมติฐานว่ามีฟิล์มนิ่งสองฟิล์มอยู่ระหว่างผิวสัมผัสระหว่างแหล่งน้ำและอากาศ



รูปที่ 3.11 แสดงถึงแบบจำลองทฤษฎีสองฟิล์ม (Two film theory) ที่ประกอบด้วยชั้นฟิล์มของก๊าซและชั้นฟิล์มของของเหลว

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสของออกซิเจนกับของเหลวจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การถ่ายเทออกซิเจนจากบริเวณบรรยากาศเข้าสู่ชั้นฟิล์มของออกซิเจน
2. การถ่ายเทออกซิเจนจากชั้นฟิล์มของออกซิเจนเข้าสู่ชั้นฟิล์มของของเหลวผ่านชั้นกลางระหว่างเฟส
3. การถ่ายเทออกซิเจนจากชั้นฟิล์มของของเหลวเข้าสู่ภายในของของเหลว

แบบจำลองมาตรฐานของการวัดการถ่ายเทออกซิเจนประกอบด้วยสมการสมดุลมวล (Mass balance equation) โดยความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในของเหลวจะเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไปโดยสมมติฐานว่ามีการผสมกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งค่าความสัมพันธ์ของกระบวนการแพร่ของออกซิเจนในของเหลวนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์จากกฎของฟิค (Fick's Law) ที่กล่าวไว้ว่าฟลักซ์เชิงมวลต่อหน่วยพื้นที่ขององค์ประกอบหนึ่งเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความเข้มข้น

$$J_{O_2} = \frac{D}{\Delta x} \Delta C \quad (3.22)$$

เมื่อ J คือฟลักซ์มวลหรืออัตราการไหลมวลต่อช่วงระยะเวลาการไหลของของไหลชนิดหนึ่ง $\left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right)$

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในชั้นฟิล์ม $\left(\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}\right)$

ΔC คือความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างออกซิเจนและของเหลว (mg/l)

Δx คือความหนาของชั้นฟิล์มของออกซิเจนและของเหลว (mm)

โดยค่า $\frac{D}{\Delta x}$ เรียกโดยรวมว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของชั้นฟิล์ม หรือค่า K

ซึ่งสมการ (3.22) สามารถเขียนในแต่ละชั้นฟิล์มได้ดังนี้

$$J_{O_2} = k_G (C_G - C_{Gi}) \quad (3.23)$$

$$J_{O_2} = k_L (C_L - C_{Li}) \quad (3.24)$$

โดยค่า k_G และ k_L คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของชั้นก๊าซและของเหลวตามลำดับ โดยความเข้มข้นของผิว 2 ผิว เมื่อเข้าสู่สมดุล ฟลักซ์มวลสามารถเขียนได้เป็นดังสมการดังนี้

$$J_{O_2} = k_L (C_s - C) \quad (3.25)$$

เมื่อนำสมการที่ได้มาจัดรูป จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$N = k_L A (C_s - C) \quad (3.26)$$

เมื่อ N คือมวลของออกซิเจนที่ถูกถ่ายเทต่อ 1 หน่วยเวลา (mg/s)

k_L คือสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทก๊าซผ่านชั้นฟิล์มของของเหลว $\left(\frac{\text{mg}}{(\text{s})(\text{mm}^2)(\text{mg/l})}\right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A คือพื้นที่ผิวของชั้นฟิล์มอากาศและน้ำ (mm^2)

C_s คือค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้ที่สภาวะคงตัว (mg/l)

C คือค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้ในแต่ละช่วงเวลา (mg/l)

จากสมการที่ (3.26) เมื่อนำมาจัดรูปจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{N}{V} = \frac{dC}{dt} = k_L \frac{A}{V} (C_s - C) \quad (3.27)$$

เมื่อ V คือปริมาตรของสารละลาย (l)

$\frac{dC}{dt}$ คือค่าความเข้มข้นของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลา (mg/l.s)

$\frac{A}{V} = a$ ซึ่งก็คือ พื้นที่ผิวจำเพาะ (mm^2/l)

เมื่อกำหนดให้ค่า $k_L a$ คือสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลโดยรวม

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad (3.28)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.28 โดยอยู่ในช่วง $C = C_0$ ที่เวลา $t=0$ และ $C = C_t$ ที่เวลา t ใดๆ จะได้ว่า

$$\frac{1}{t} \ln \left[\frac{C_s - C_0}{C_s - C_t} \right] = k_L a \quad (3.29)$$

จัดรูปสมการที่ (3.29) จะได้ว่า

$$\frac{C_s - C_0}{C_s - C_t} = e^{(k_L a)t} \quad \text{หรือ} \quad \frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = e^{-(k_L a)t} \quad (3.30)$$

นำสมการที่ (3.16) มา take log

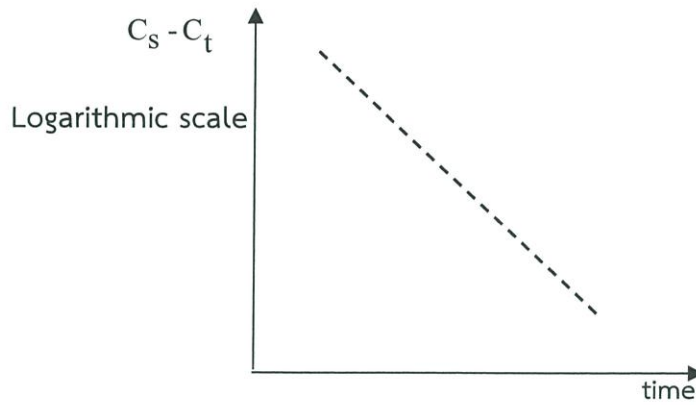
$$\log \left[\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} \right] = \log \left[e^{-k_L a t} \right]$$

$$\log(C_s - C_t) - \log(C_s - C_0) = -\frac{k_L a t}{2.303}$$

$$\log(C_s - C_t) = \log(C_s - C_0) - \frac{k_L a t}{2.303} \quad (3.31)$$

เมื่อนำมาเทียบกับสมการเส้นตรง $Y=MX+C$ โดยให้แกน Y เป็นค่า $\log(C_s - C_t)$ และแกน X เป็นเวลาจะได้รับความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

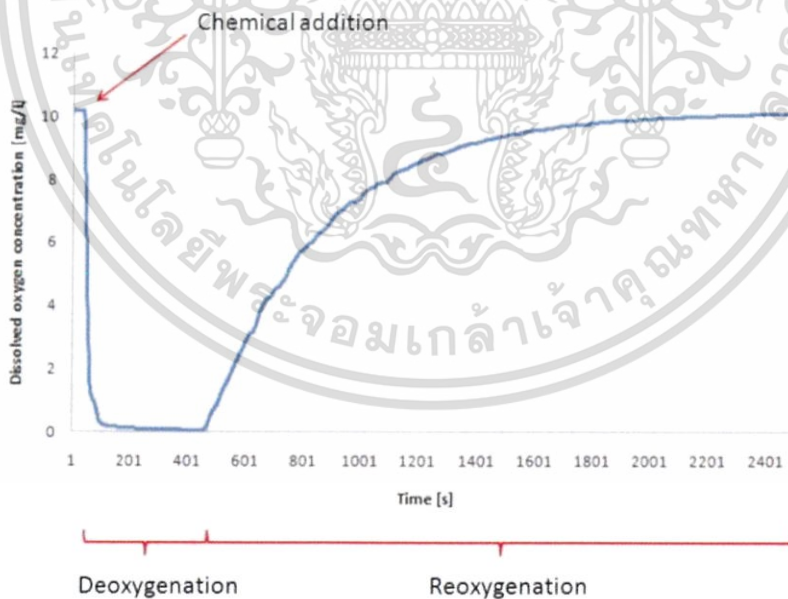


ซึ่งค่าความชัน (Slope) จะเท่ากับ $\frac{k_L a}{2.303}$

3.4 ทฤษฎีการเติมอากาศ

3.4.1 หลักการทั่วไป

ก่อนที่จะเริ่มวัดการถ่ายเทของออกซิเจนต้องมีการใส่ปฏิกิริยาเคมีเพื่อลดค่าออกซิเจนในน้ำ (Deoxygenation) ซึ่งหมายถึงการนำออกซิเจนที่สามารถละลายในน้ำได้ออกและค่าออกซิเจนในน้ำจะกลายเป็นศูนย์ ต่อมาเราจะนำวิธีการเติมอากาศ (aeration) มาเพิ่มค่าออกซิเจนที่สามารถละลายในน้ำได้ (Reoxygenation) ดังรูป



รูปที่ 3.12 แสดงกราฟปฏิกิริยาเคมีการลดและเพิ่มออกซิเจนในน้ำ

จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าหลังจากที่เติมสารเคมีเพื่อเริ่มกระบวนการลดค่าออกซิเจนในน้ำ (Deoxygenation) ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่สามารถละลายในน้ำได้จะค่อยๆ ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเมื่อผ่านกระบวนการเติมอากาศ (aeration) ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่สามารถละลายในน้ำได้ (Reoxygenation) จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่จุดอิ่มตัว

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการลดค่าออกซิเจนในน้ำ (Deoxygenation) จะใช้โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ในการทำปฏิกิริยาและใช้โคบอลคลอไรด์ (CoCl_2) เป็นตัวเร่ง ดังสมการ



3.4.2 การคำนวณ

การคำนวณสมรรถนะของการเติมอากาศจะมีอยู่ 2 ค่า ดังนี้

1. อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (standard oxygen transfer rate)
2. ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard aeration efficiency)

โดยทุกค่าจะต้องคำนวณโดยใช้น้ำอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศที่ 1 atm นั่นก็คือ 760 mmHg

การปรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยทั่วไปอุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐานคือ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นหากต้องการปรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจะใช้สมการ ดังนี้

$$k_L a_{(20)} = k_L a_{(T)} \times \theta^{(20-T)} \quad (3.32)$$

เมื่อ $k_L a_{(20)}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานที่อุณหภูมิ 20 °C (min^{-1})

$k_L a_{(T)}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะที่อุณหภูมิ T °C (min^{-1})

T คืออุณหภูมิของน้ำ (°C)

θ คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของการเติมอากาศ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่า $\theta = 1.024$

3.1.2.1 อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (standard oxygen transfer rate)

$$\text{SOTR} = k_L a_{(20)} \times C_{s(20)} \times V \quad (3.33)$$

เมื่อ V คือปริมาตรน้ำ (l)

$k_L a_{(20)}$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศที่ 1 atm) (min^{-1})

$C_{s(20)}$ คือค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในสารละลายที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศที่ 1 atm) (mg/l)

3.1.2.2 ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard aeration efficiency)

เป็นการอธิบายถึงการถ่ายเทออกซิเจนต่อ 1 หน่วยของกำลังที่ใส่เข้าไป โดยคำนวณได้ดังนี้

$$\text{SAE} = \frac{\text{SOTR}}{P_i} \quad (3.34)$$

เมื่อ SOTR คืออัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (kg/h)

P_i คือ กำลังที่ใส่เข้าไป (kw)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 หลักการออกแบบห้องผสม

จากการอ้างอิงทฤษฎีเจ็ทปั่นป่วน (turbulent jet theory) กล่าวไว้ว่า ที่ระยะความยาวของลำของไหลเท่ากับ 20 เท่าของขนาดหัวเจ็ท ($20 D_j$) นับตั้งแต่ปากของหัวเจ็ทจะมีสถานะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนแบบสมบูรณ์ แต่ในความเป็นจริงแล้วนั้นเราจะวัดระยะความยาวลำน้ำที่ออกมาจากหัวเจ็ทจากจุดที่เรียกว่า “จุดกำเนิดเสมือน (virtual origin)” มีระยะเท่ากับ $5 D_j/2$ วัดจากทางเข้าหัวเจ็ทเข้าไปด้านในหัวเจ็ท

ตัวอย่างการคำนวณ

จากหัวเจ็ทของนายจिरพลที่มีขนาดเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ดังนั้นความยาวลำของไหลทั้งหมดที่ออกมาจากหัวเจ็ทที่มีสถานะปั่นป่วนแบบสมบูรณ์ตามทฤษฎีจะเท่ากับ

$$20 D_j = 120 \text{ มิลลิเมตร}$$

ตำแหน่งจุดกำเนิดเสมือน จากทฤษฎี turbulent jet ที่กล่าวไปข้างต้นนั้น คือ

$$5 D_j/2 = 5 \times 6/2 = 15 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น ระยะของลำของไหลที่เริ่มมีสถานะปั่นป่วนวัดจากปากทางเข้าหัวเจ็ทที่มีจุดกำเนิดที่จุดกำเนิดเสมือน (กำหนดให้เป็นตัวแปร X) จะเท่ากับ $120 - 15 = 105$ มิลลิเมตร

จากทฤษฎี กล่าวไว้ว่า รัศมีลำของไหลจากแนวแกนกลางของตำแหน่งหัวเจ็ทในแนวตั้งฉากกับลำของไหลจะเท่ากับ

$$R = 1/5X = (1/5) \times 105 = 21 \text{ มิลลิเมตร}$$

ตารางที่ 4.1 การคำนวณระยะต่างๆ จากทฤษฎีเจ็ทปั่นป่วน

ระยะ $n D_j$ ใดๆ	ระยะจากจุดกำเนิดเสมือน (X) (มิลลิเมตร)	รัศมีลำของไหล (R) (มิลลิเมตร)
$20 D_j$	105	21
$19 D_j$	99	19.8
$18 D_j$	93	18.6
$17 D_j$	87	17.4
$16 D_j$	81	16.2
$15 D_j$	75	15
$14 D_j$	69	13.8
$13 D_j$	63	12.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

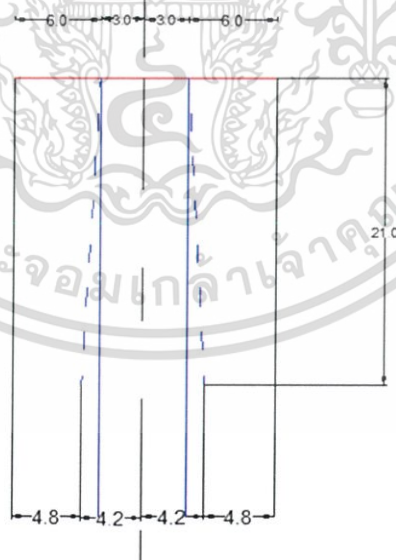
12 D_j	57	11.4
11 D_j	51	10.2
10 D_j	45	9
9 D_j	39	7.8
8 D_j	33	6.6
7 D_j	27	5.4
6 D_j	21	4.2

จากทฤษฎีเครื่องผสมแบบคงที่ (static mixer) กล่าวไว้ว่าความยาวของ 1 องค์ประกอบห้องผสมที่เหมาะสมจะเท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องผสม (D_c) และจำนวนองค์ประกอบที่เหมาะสมแก่การผสมจะเท่ากับองค์ประกอบ 6 องค์ประกอบ จากการอ้างอิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องผสมที่เหมาะสมแก่การผสมมากที่สุดของนายจิรพล เท่ากับ 18 มิลลิเมตร ดังนั้น

ความยาว 1 องค์ประกอบของห้องผสม = $1.5 D_c = 1.5 \times 18 = 27$ มิลลิเมตร

ความยาวห้องผสม ทั้งหมด 6 องค์ประกอบ = $27 \times 6 = 162$ มิลลิเมตร

จากข้อมูลที่ได้รวบรวมมาทั้งหมด คณะผู้จัดทำได้ทำการเลือกระยะ $6 D_j$ ที่มีขนาดของลำของไหลเท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร ระยะ 21 มิลลิเมตรจากปากทางออกของหัวฉีดมาทำการออกแบบรูปแบบห้องผสมที่เหมาะสมกับการทดลอง

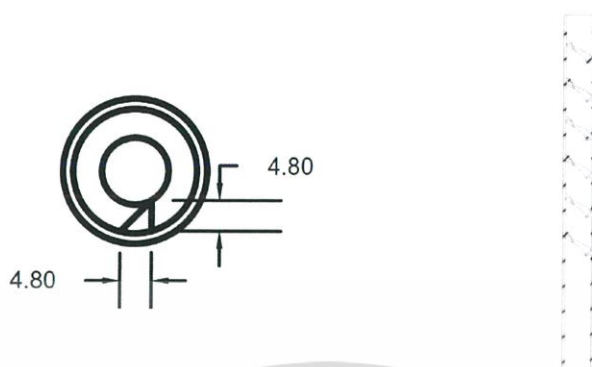


รูปที่ 4.1 ภาพสเก็ตจากการคำนวณอย่างคร่าวๆ จากทฤษฎีเจ็ทปั่นป่วน

จากระยะลำของไหลที่อ้างอิงมาจากทฤษฎีเจ็ทปั่นป่วนที่คำนวณออกมานั้นมีรัศมีห่างจากตำแหน่งแกนกลางตำแหน่งหัวเจ็ทเป็นระยะเท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร และจะเหลือระยะที่เหลืออยู่ระหว่างลำของไหลกับผนังของท่อผสมเท่ากับ 4.8 มิลลิเมตร ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกขนาดเกลียวใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บิตหน้าตัดสามเหลี่ยมยื่นออกมาจากผนังท่อผสมเป็นระยะ 4.8 มิลลิเมตร มาสร้างท่อผสมที่จะนำมาทดลองในการวิจัยในครั้งนี้

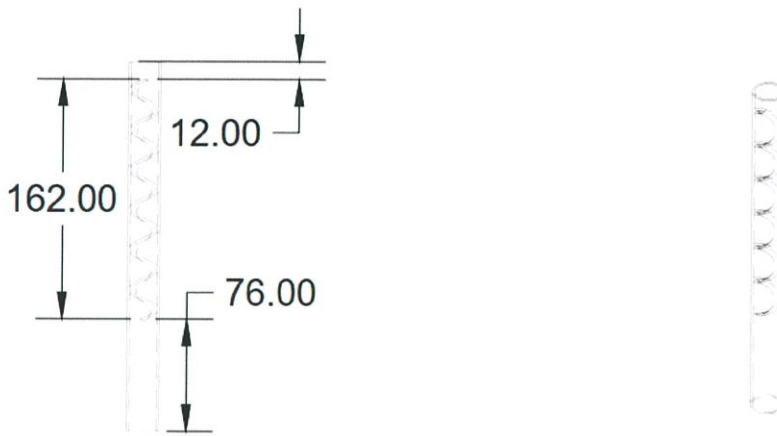


รูปที่ 4.2 ตัวอย่างภาพตัดของขนาดเกลียวไบบิตภายในห้องผสม



รูปที่ 4.3 เกลียวไบบิตที่ติดตั้งภายในห้องผสมและภาพตัดตามแนวยาวของเกลียวบิต

จากงานวิจัยของนาย กิรติ กิรสมุทรานนท์ พบว่า ที่ตำแหน่งปลายหัวฉีดความดันภายในห้องผสมจะต่ำที่สุดและเกิดการเหนี่ยวนำของอากาศได้ดีที่สุดอ้างอิงจากทฤษฎีเหนี่ยวนำอากาศ (induction theory) และที่ระยะ 12 มิลลิเมตร ซึ่งเท่ากับ 2 เท่าของขนาดหัวเจ็ท ($2 D_j$) ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ โดยที่ตำแหน่งของปลายหัวเจ็ทจะอยู่ที่ระยะ 10 มิลลิเมตรห่างจากทางเข้าห้องผสม ทางคณะผู้จัดทำจึงติดตั้งเกลียวไบบิตในท่อผสมที่ระยะ 12 มิลลิเมตรห่างจากทางเข้าท่อผสม



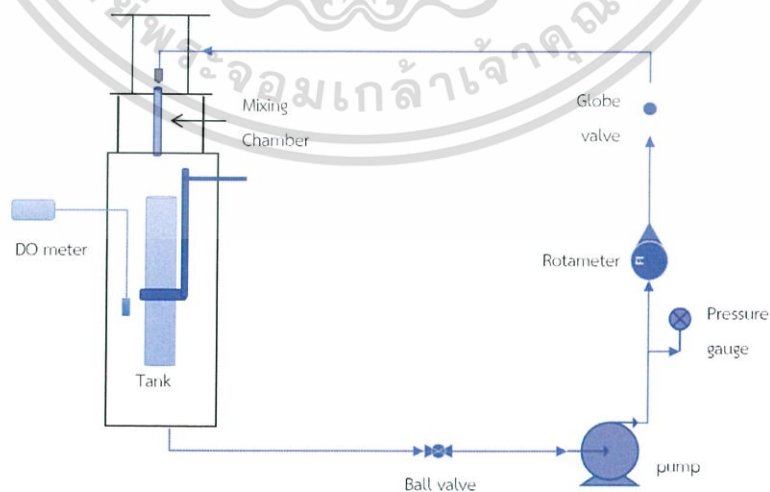
รูปที่ 4.4 ห้องผสมพร้อมระยะที่ทำการติดตั้งไบบิตและห้องผสมที่ออกแบบโดยสมบูรณ์

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 คณะผู้จัดทำได้เลือกกระยะการติดไบบิตและเริ่มติดตั้ง ตามที่ได้กล่าวอ้าง ห้องผสมมีระยะทั้งหมด 162 มิลลิเมตร นับจากตำแหน่งที่เริ่มติดตั้งเกลียวไบบิต โดยไบบิตที่ติดตั้งนั้น บิตตัว 360 องศา 1 เกลียว และทางคณะผู้จัดทำได้ สร้างห้องผสมรูปแบบอื่นเพิ่มโดยการติดตั้งเกลียวไบบิตที่ บิตตัว 270, 360 และติดตั้งในลักษณะที่คล้ายกับที่กล่าวมาข้างต้นนี้

4.2 ชุดทดลอง

4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

ชุดทดลองได้ถูกออกแบบให้ผู้ทดลองสามารถใช้ในการทดลองได้อย่างเหมาะสมและไม่ซับซ้อนต่อการใช้งาน ซึ่งต้องมีการคำนึงถึงส่วนที่จะใช้ในการติดตั้งห้องผสมจะต้องสามารถถอดและเปลี่ยนห้องผสมได้ เนื่องจากมีรูปแบบของห้องผสมที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลองและส่วนอื่นของชุดทดลองถูกติดตั้งไม่ให้เกิดการเคลื่อนไหว ดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงรูปชุดทดลองที่ใช้ในการทดลอง

4.2.2 ห้องผสม (Mixing Chamber)

ห้องผสมได้ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลวงและมีการติดตั้งครีบกวนภายในหน้าตัดสามเหลี่ยม โดยเปลี่ยนมุมด้านที่ปะทะกับลำเจ็ทเป็น 30, 45 และ 60 องศา ในแต่ละองศาปะทะจะมีมุมบิดของเกลียวที่แตกต่างกัน 3 แบบคือ 180, 270 และ 360 องศา

4.2.3 ถังรับน้ำ (receive water tank)

ถังรับน้ำที่ใช้มีขนาดความจุ 60 ลิตร ภายในถังรับน้ำประกอบไปด้วยท่อพีวีซีขนาด 3 นิ้ว ติดตั้งสูงจากกันถึงเท่ากับระยะ d ของท่อพีวีซี และด้านบนห่างจากปลายท่อผสมเป็นระยะ $0.5d - d$



รูปที่ 4.7 ถังรับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 หัวฉีดเหนียวนำอากาศ

หัวฉีดเหนียวนำที่ใช้ในการทดลองใช้หัวฉีดขนาด 6 มิลลิเมตร ซึ่งได้อ้างอิงมาจากนายจิรพล เนียมพินิจสกุล และคณะ ที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบหัวฉีดเหนียวนำเพื่อใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว



รูปที่ 4.8 แสดงรูปหัวฉีดเหนียวนำที่ใช้ในการทดลอง

4.2.5 ระบบสูบน้ำและอุปกรณ์ท่อ

4.2.5.1 เครื่องสูบน้ำ (Pump)

ปั้มน้ำหอยโข่งรุ่น FAIR-130-DC (Centrifugal Pumps) ขนาด 220 โวลท์ กำลัง 0.5 แรงม้า อัตราการไหลสูงสุด 110 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.9 แสดงภาพของปั้มน้ำที่ใช้ในการทดลอง

4.2.5.2 วาล์ว (Valve)

ในชุดการทดลองจะประกอบด้วย วาล์ว 2 ชนิด คือ 1. Globe Valve ใช้ปรับอัตราการไหล และ 2. Ball Valve ใช้เพื่อเปิด-ปิดทางการไหลของของไหลในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) บอลวาล์ว (ข) วาล์วปรับอัตราการไหล (Globe Valve)

4.2.6 เครื่องมือวัด (Measuring instrument)

4.2.6.1 โรตاميเตอร์ (rotameter)

เป็นอุปกรณ์ใช้วัดการไหล (flow measurement) ที่สามารถใช้วัดการไหลของน้ำโดยใช้ของ rotameter model LZT-M-15 ซึ่งสามารถวัดอัตราการไหลอยู่ในช่วง 2-18 ลิตรต่อนาที ทนอุณหภูมิได้สูงสุด 60 องศาเซลเซียส และทนแรงดันได้สูงสุด 0.9 เมกะพาสคาล



รูปที่ 4.11 เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ

4.2.6.2 เครื่องมือวัดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved Oxygen Meter)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved Oxygen Meter) บริษัท YSI EcoSense ซึ่งสามารถแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความอิ่มตัวของออกซิเจน หรือ ppm (part per million) และค่าอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

4.2.6.3 เครื่องชั่งน้ำหนักสารเคมี (Electronic Compact Scale)

เป็นเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล 500g x 0.01g รุ่น SF-400c ใช้ชั่งปริมาณสารเคมีโซเดียมซัลไฟด์และโคบอลต์คลอไรด์



รูปที่ 4.13 เครื่องชั่งน้ำหนักสารเคมี

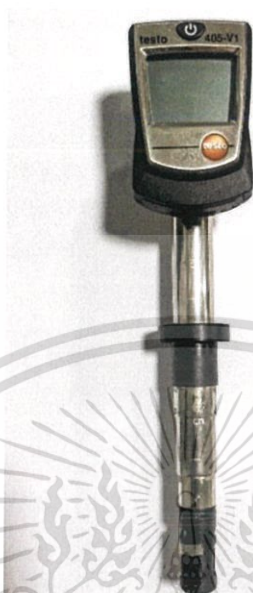
รูปที่ 4.14 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

4.2.6.4 เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้า (Clamp on power meter)

อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าของกระแสไฟฟ้า (Amp), ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt), ตัวประกอบกำลัง (Power factor: PF) และกำลังของไฟฟ้า (kw) โดยใช้ของบริษัท YOGOKAWA model CW121 สำหรับวัดกำลังไฟฟ้าจริงที่ป้อนใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6.5 เครื่องวัดความเร็วลมแบบหัววัดลวดความร้อน (Hot wire Anemometer)
 อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วลมชนิดแบบหัววัดลวดความร้อน (Hot wire Anemometer)
 Model Testo 405 v1 โดยช่วงวัดการไหลอากาศอยู่ในที่ 0-10 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.15 เครื่องมือสำหรับวัดความเร็วลม

4.2.7 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีนี้ถูกนำมาใช้เพื่อปรับค่าออกซิเจนให้เป็นศูนย์ก่อนที่จะเริ่มทำการทดลองโดยประกอบด้วยสาร 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2SO_3) และโคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.16 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (ซ้าย) และสารโคบอลต์คลอไรด์ (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วิธีการทดลอง

1. ตวงน้ำไว้ในถังเก็บเพื่อใช้ในการทดลอง
2. วัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่ใช้ จากนั้นปรับปริมาณออกซิเจนในน้ำให้ต่ำกว่า 0.3 ppm โดยการเติมสารโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2SO_3) ตามปริมาณออกซิเจนในน้ำแต่ละครั้ง และเติมโคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) เพื่อใช้เร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น
3. ถ่ายน้ำที่มีปรับปริมาณออกซิเจนจากถังเก็บปริมาตร 40 ลิตรลงในถังรับน้ำของชุดทดลอง
4. เปิดปั๊มและปรับอัตราการไหลของน้ำให้อยู่ที่ 10 ลิตรต่อนาที น้ำจะถูกฉีดโดยหัวฉีดเหนือวนำผ่านห้องผสมที่ไม่มีเกลียวภายใน โดยจะเกิดการเหนียวนำอากาศรอบข้างเข้ามาผสมกับลำเจ็ทที่ถูกฉีดออกมา ทำให้เกิดการเติมอากาศในน้ำ
5. นำดีไอมิเตอร์มาวัดปริมาณออกซิเจนในถังรับน้ำของชุดทดลองและเริ่มเก็บค่าทุกๆ 1 นาที จนค่าเข้าใกล้จุดอิ่มตัวของออกซิเจน
6. ทำการถ่ายน้ำในถังออก
7. นำค่าที่บันทึกไว้มาพลอตกราฟลอการิทึมของค่าความแตกต่างความเข้มข้นของออกซิเจน ($C_s - C_t$) ณ จุดอิ่มตัว กับเวลาใดๆ เทียบกับเวลา (T) ซึ่งจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$)
8. คำนวณอัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน (standard oxygen transfer rate) และประสิทธิภาพการเติมอากาศ (Standard aeration efficiency)
9. เปลี่ยนห้องผสมเป็นแบบมีเกลียวบิดภายใน และทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ 2 ถึง 8 ตามลำดับ

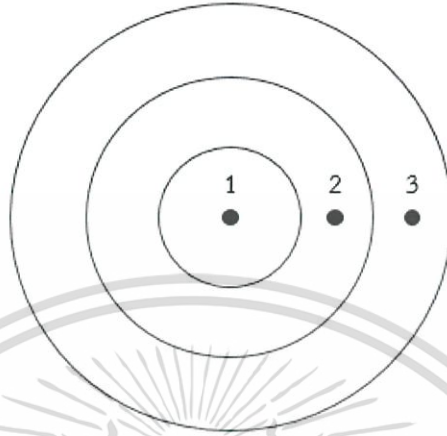
4.4 การวัดความเร็วลม

เครื่องวัดความเร็วลมแบบหัววัดลวดความร้อน ใช้หลักการวัสดุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะถ่ายเทความร้อนเมื่อมีลมที่อุณหภูมิต่ำกว่ามาปะทะ หัววัดชนิดนี้ทำมาจากลวดความร้อน โดยตัวเครื่องจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับลวดความร้อนและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา ซึ่งการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ลวดความร้อนนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วลม หัววัดชนิดนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก จึงเหมาะกับการวัดความเร็วลมที่มีค่าต่ำๆ ในช่วง 0-5 เมตรต่อวินาทีโดยลมที่วัดจะต้องสะอาดและมีอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส

สำหรับวิธีการวัดความเร็วลมนั้นตำแหน่งวัดความเร็วลมที่เหมาะสมภายในท่อกลม ควรวัดที่ตำแหน่งที่มีระยะความยาวเท่ากับ 10 เท่าของขนาดท่อที่มีแนวตรงก่อนจุดวัดและ 4 เท่าของขนาดท่อหลังจุดวัด ซึ่งจุดนี้จะทำให้ความเร็วภายในท่อสงบเหมาะกับการวัดซึ่งอ้างอิงมาจากหนังสือคู่มือของเครื่องมือวัดชนิดนี้

ในการทดลองวัดความเร็วลมของอากาศที่ถูกเหนียวนำโดยหัวฉีดเหนียวนำ ใช้ท่อกลมขนาด 2 นิ้ว (5.08 เซนติเมตร) เจาะรูที่ท่อขนาดเท่ากับหัวProbeของเครื่องมือวัดลม hot wire เป็นระยะ

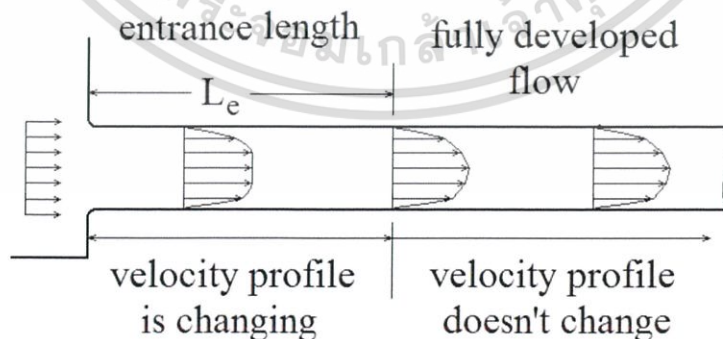
10 d , วัดจากปลายท่อด้านบน เมื่อ d , คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเหนียวน้ำ และมีระยะหลังจากรูเจาะวัดลมถึงหัวฉีดเหนียวน้ำ เป็นระยะ $16d$, ตำแหน่งของการวางหัววัดความเร็วของเครื่องมือวัดลมแบบหัววัดลวดความร้อนภายในท่อกลม ในแนวระนาบของท่อ จะแบ่งเป็น 3 จุดดังรูป



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งการวัดความเร็วลมภายในท่อกลม

ตำแหน่งของหัววัดอยู่ในแนวระนาบตำแหน่งตั้งฉากกับทิศทางลม ที่ระยะ 0.85, 1.27, 2.12 เซนติเมตร ตามลำดับวัดจากจุดศูนย์กลางของท่อกลม อ่านค่าความเร็วลมในหน่วยเมตรต่อวินาที ในแต่ละจุดที่อธิบายไปข้างต้นที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 7, 8, 9, 10 และ 11 ลิตรต่อนาที สำหรับห้องผสมที่ไม่ติดเกลียวบิด, ห้องผสมติดเกลียวบิด 180, 270 และ 360 องศา จากนั้นทำการวัดค่าความเร็วลมที่อ่านได้เพื่อไปคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ได้ในลำดับถัดไป

ที่ตำแหน่งการวัดลมในท่อกลมผิวเรียบที่ระยะ $10d$, จากปลายท่อรูปแบบความเร็ว (velocity profile) ของการไหลของอากาศจะเป็นรูปแบบการไหลที่พัฒนาแบบเต็มที่ (fully developed flow) ทำให้รูปแบบความเร็วของลมที่ตำแหน่งนี้มีรูปร่างคงตัว



รูปที่ 4.18 แสดงรูปแบบของความเร็วของของไหลภายในท่อกลม

การวัดความเร็วลมที่ตำแหน่งเป็นระยะเท่ากับ 0.85, 1.27, 2.12 เซนติเมตร วัดจากจุดศูนย์กลางของท่อกลมนั้นตามลำดับนั้น เปรียบเสมือนการวัดความเร็วที่ตำแหน่งที่จุดกึ่งกลางของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบความเร็วของของไหลภายในท่อกลมและตำแหน่งที่มีความเร็วลดลงมาจากจุดกึ่งกลางตามลำดับจนเข้าใกล้ 0 เมตรต่อวินาที ที่ผนังของท่อกลม สมมติให้รูปแบบความเร็วต่อไปนี้เป็นแบบสมมาตร (symmetry profile)

จากสมการการคำนวณอัตราการไหลของของไหล

$$G = AV \quad (4.1)$$

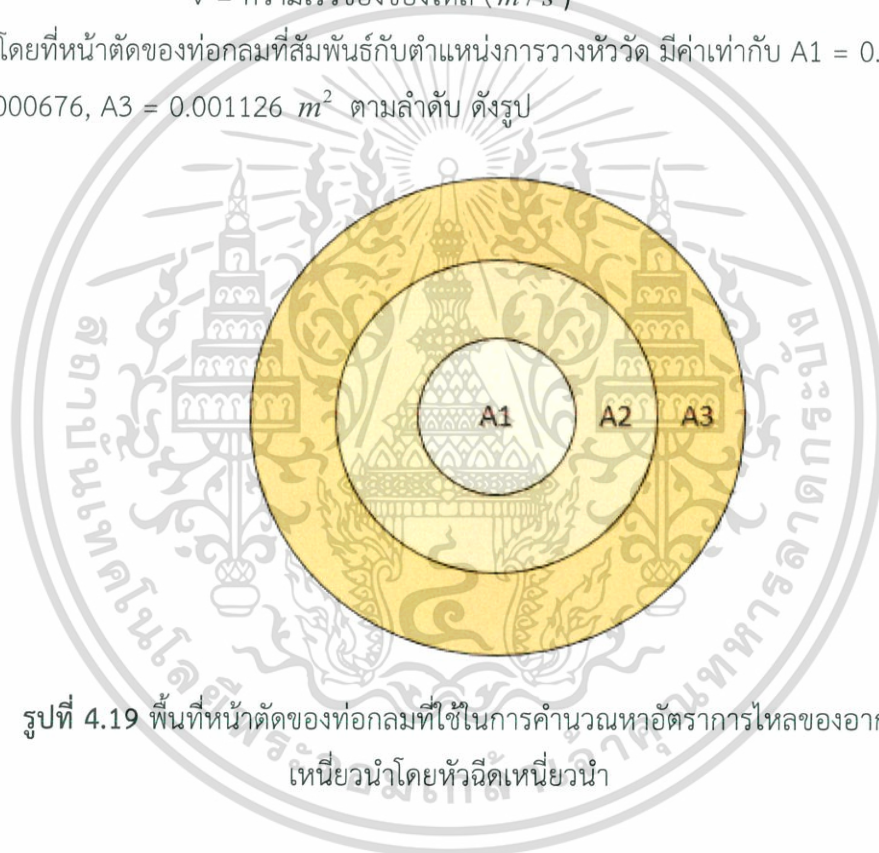
โดยที่

G = อัตราการไหลของของไหล (m^3 / s)

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อกลม (m^2)

V = ความเร็วของของไหล (m / s)

โดยที่หน้าตัดของท่อกลมที่สัมพันธ์กับตำแหน่งการวางหัววัด มีค่าเท่ากับ $A1 = 0.000225$, $A2 = 0.000676$, $A3 = 0.001126 \text{ m}^2$ ตามลำดับ ดังรูป



รูปที่ 4.19 พื้นที่หน้าตัดของท่อกลมที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำโดยหัวฉีดเหนี่ยวนำ

4.5 การวัดกำลังไฟฟ้า

การวัดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั้มน้ำจะวัดจากมอเตอร์ของปั้มน้ำ เนื่องจากมอเตอร์เป็นตัวรับกำลังไฟฟ้าจากไฟบ้านและส่งกำลังให้กับใบพัดในตัวเรือนปั้มน้ำหมุนเพื่อขับเคลื่อนของไหลให้ไหลวนในระบบ



รูปที่ 4.20 แสดงการวัดกำลังไฟของปั้มน้ำโดยอุปกรณ์วัดไฟ

จากรูปที่ 4.20 ในการวัดไฟจำเป็นต้องนำคลิปหนีบที่สายไฟทั้งสองเส้น (คลิปหนีบสีดำและสีแดงในรูป) สำหรับวัดความต่างศักย์ และใช้แคลมป์คล้องที่สายไฟเพียง 1 เส้น สำหรับไฟฟ้า 1 เฟส เพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าและนำสายทั้งหมดนี้เชื่อมต่อเข้ากับหน้าจอแสดงผล เมื่อปั้มน้ำเริ่มทำงานหน้าจอแสดงผลของเครื่องมือวัดจะแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์, ตัวประกอบกำลัง และกำลังไฟฟ้า (kw, kwh)



รูปที่ 4.21 หน้าจอแสดงผลของเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า

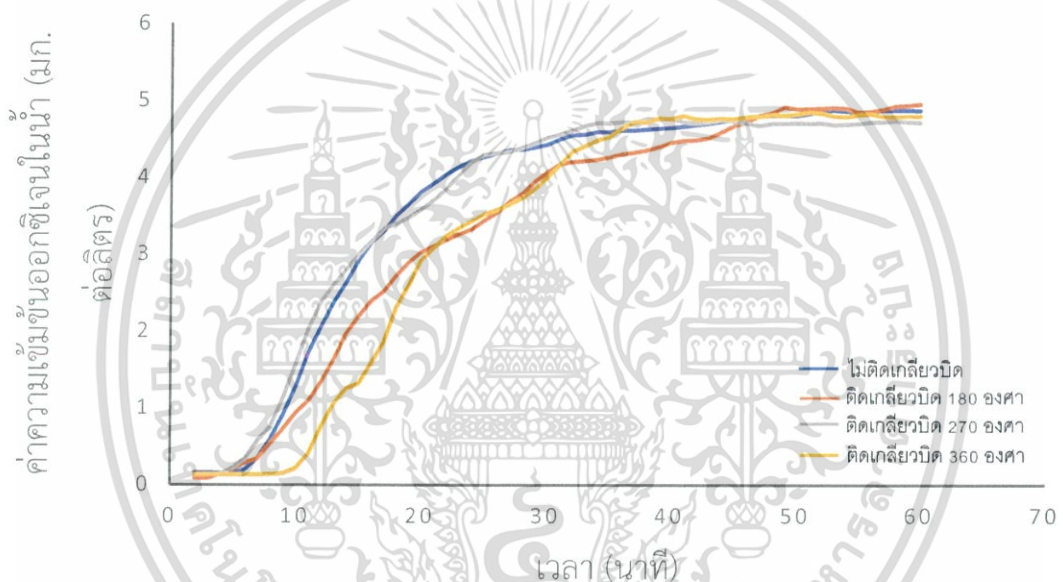
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

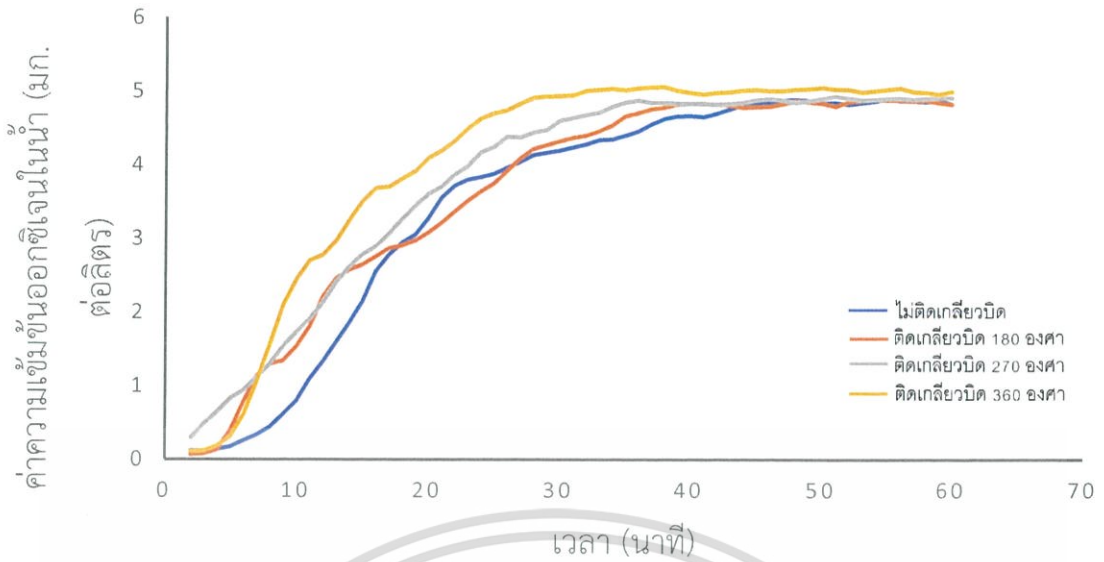
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเติมอากาศในน้ำด้วยหัวฉีดเหนี่ยวนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ห้องผสมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร ความยาว 250 มิลลิเมตร ในการทดลองได้ใช้ห้องผสมทั้งหมด 4 แบบ ได้แก่ห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิดและห้องผสมติดตั้งเกลียวบิดที่มีองศาบิดเท่ากับ 180, 270 และ 360 องศา โดยในห้องผสมแต่ละแบบจะทดลองที่อัตราการไหลของน้ำ 5 ค่า คือ 7, 8, 9, 10 และ 11 ลิตรต่อนาที

5.1 ผลการทดลองการเติมออกซิเจนในน้ำ



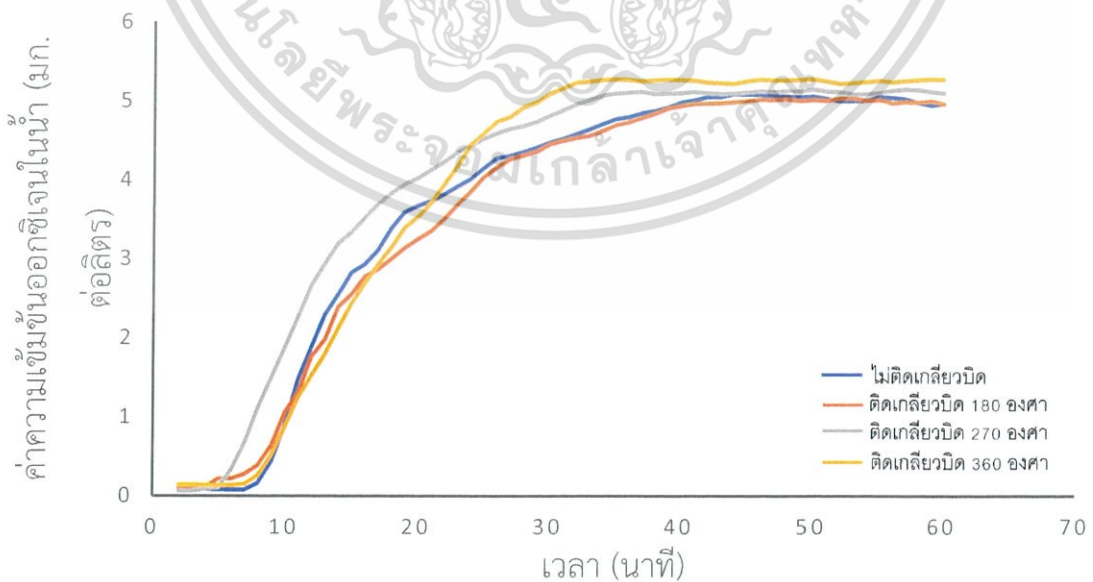
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 7 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 5.1 กราฟค่าความเข้มข้นออกซิเจนของห้องผสมแต่ละแบบที่อัตราการไหลของน้ำ 7 ลิตรต่อนาทีพบว่าห้องผสมติดตั้งเกลียวบิด 360 องศาให้ผลของการผสมที่ดีที่สุด ซึ่งเข้าสู่จุดอิ่มตัวที่เวลา 2460 วินาที ใกล้เคียงกับห้องผสมติดตั้งเกลียวบิด 270 องศาที่ใช้เวลาในการเข้าสู่จุดอิ่มตัว 2400 วินาที



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 8 ลิตรต่อนาที

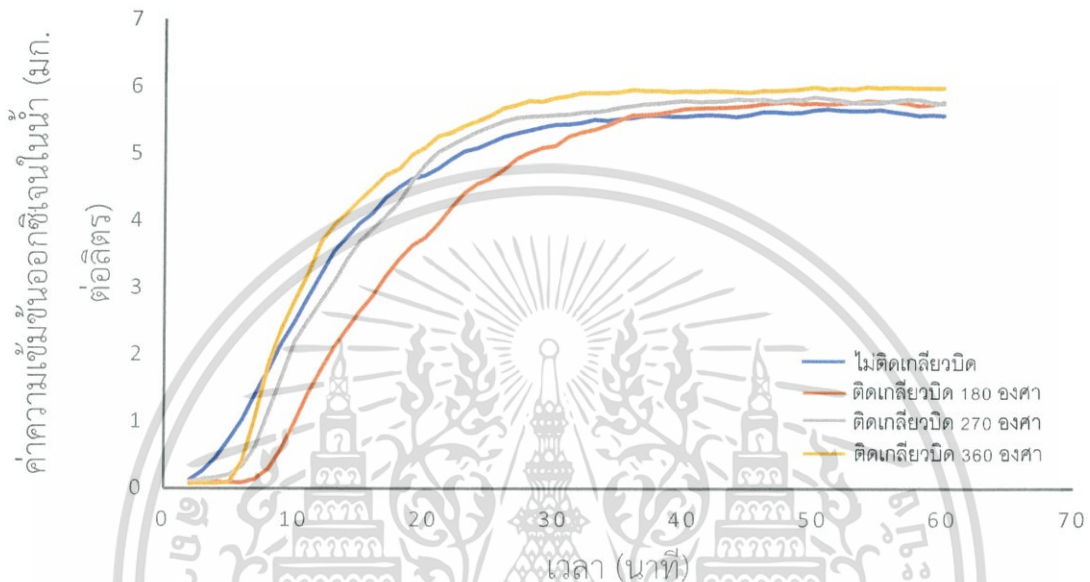
จากรูปที่ 5.2 กราฟค่าความเข้มข้นออกซิเจนของอัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที พบว่าห้องผสมติดเกลียวบิต 360 องศาเข้าสู่จุดอิ่มตัวเร็วกว่าห้องผสมแบบอื่น ๆ โดยใช้เวลา 1800 วินาที ในขณะที่ห้องผสมแบบไม่ติดเกลียวบิต, ห้องผสมติดเกลียวบิต 180 และ 270 องศา ใช้เวลาในการเข้าสู่จุดอิ่มตัว 2820, 2220 และ 2100 วินาที ตามลำดับ โดยรวมแล้วผลของการเติมออกซิเจนในน้ำนั้นมากขึ้นกว่าอัตราการไหล 7 ลิตรต่อนาที โดยที่ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำที่อัตราการไหลนี้มีค่ามากกว่าอัตราการไหลของน้ำ 7 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 9 ลิตรต่อนาที

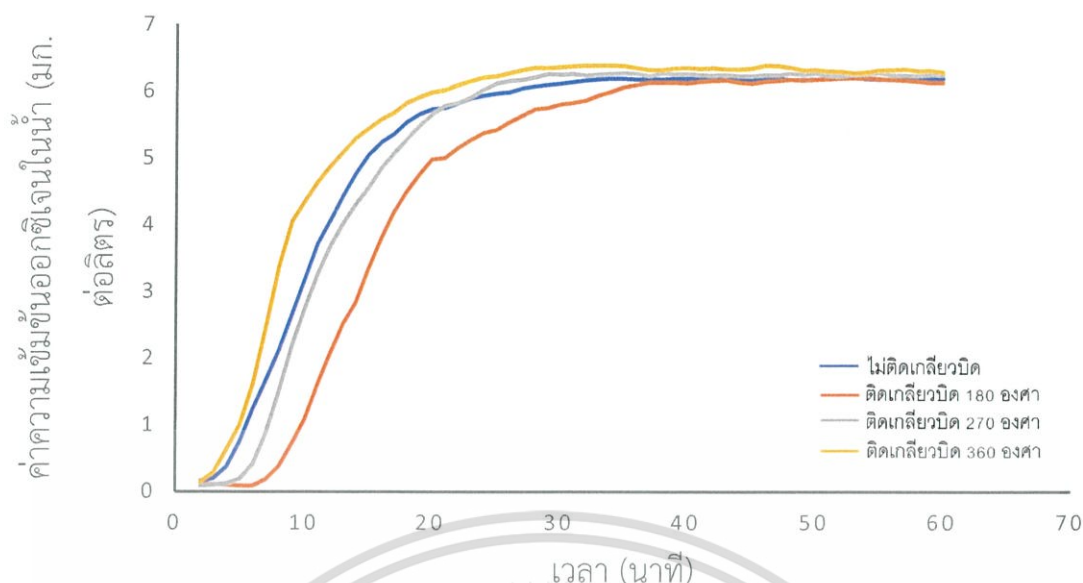
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3 กราฟค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราการไหล 9 ลิตรต่อนาที พบว่าการเติมออกซิเจนของห้องผสมไม่ติดเกลียวบิตมีค่าใกล้เคียงกับห้องผสมติดเกลียวบิต 180 องศา มาก ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่จุดอิ่มตัวมีค่าเท่ากันที่ 2580 วินาที และใช้เวลาน้อยลงเมื่อใช้ห้องผสมติดเกลียวบิต 270 และ 360 องศาที่ใช้เวลา 2100 และ 1920 วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราไหลของน้ำ 10 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 5.4 กราฟค่าความเข้มข้นออกซิเจนที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที พบว่าการเติมออกซิเจนของห้องผสมติดเกลียวบิต 360 องศา ยังคงให้ผลที่ดีที่สุด ค่าความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำถึงจุดอิ่มตัวเร็วที่สุด โดยใช้เวลาเข้าสู่จุดอิ่มตัวเท่ากับ 1860 วินาที และห้องผสมติดเกลียวบิต 180 องศา ใช้เวลามากที่สุดคือ 2400 วินาที



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่อัตราการไหลของน้ำ 11 ลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 5.5 กราฟค่าความเข้มข้นออกซิเจนที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที พบว่าการเพิ่มของออกซิเจนในห้องผสมติดเกลือวัด 360 องศา ยังคงให้ผลดีกว่าห้องผสมแบบอื่น ๆ ที่อัตราการไหลเดียวกัน โดยใช้เวลาเข้าสู่จุดอิ่มตัวเร็วที่สุดที่ 1560 วินาที

5.2 ผลการวัดความเร็วลม

5.2.1 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่ห้องผสมติดเกลือวัด 360 องศา อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 11 ลิตรต่อนาที โดยที่ตำแหน่งการวัดลมอ้างอิงตามหัวข้อที่ 4.4.1 ตามลำดับตารางที่ 5.1 แสดงตำแหน่งการวัดลม

ตำแหน่งการวัดลม	ความเร็วของลมที่เหนี่ยวนำโดยท่อผสมติดเกลือวัด 360 องศา ที่อัตราการไหลของน้ำ 11 ลิตรต่อนาที (m/s)
1	0.2625
2	0.2025
3	0.1175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการอัตราการไหลของของไหล

$$G = AV \quad (4.1)$$

โดยที่

G = อัตราการไหลของของไหล (m^3 / s)

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อกลม (m^2)

V = ความเร็วของของไหล (m / s)

พื้นที่หน้าตัดในท่อกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว ที่ตำแหน่งทั้งสามมีค่าเท่ากับ 0.000225, 0.000676, 0.001126 m^2 ดังที่อ้างอิงในหัวข้อที่ 4.4.1 ตามลำดับ

จากสมการ (5.1) จะได้ว่า

อัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งที่ 1 (G) = $0.000225 \times 0.2625 = 0.0000591 \text{ } m^3 / s$

อัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งที่ 2 (G) = $0.000676 \times 0.2025 = 0.000137 \text{ } m^3 / s$

อัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งที่ 3 (G) = $0.001126 \times 0.1175 = 0.0001323 \text{ } m^3 / s$

อัตราการไหลของอากาศทั้งท่อกลม = อัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งที่ 1
+ อัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งที่ 2
+ อัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งที่ 3
= $0.0003284 \text{ } m^3 / s$

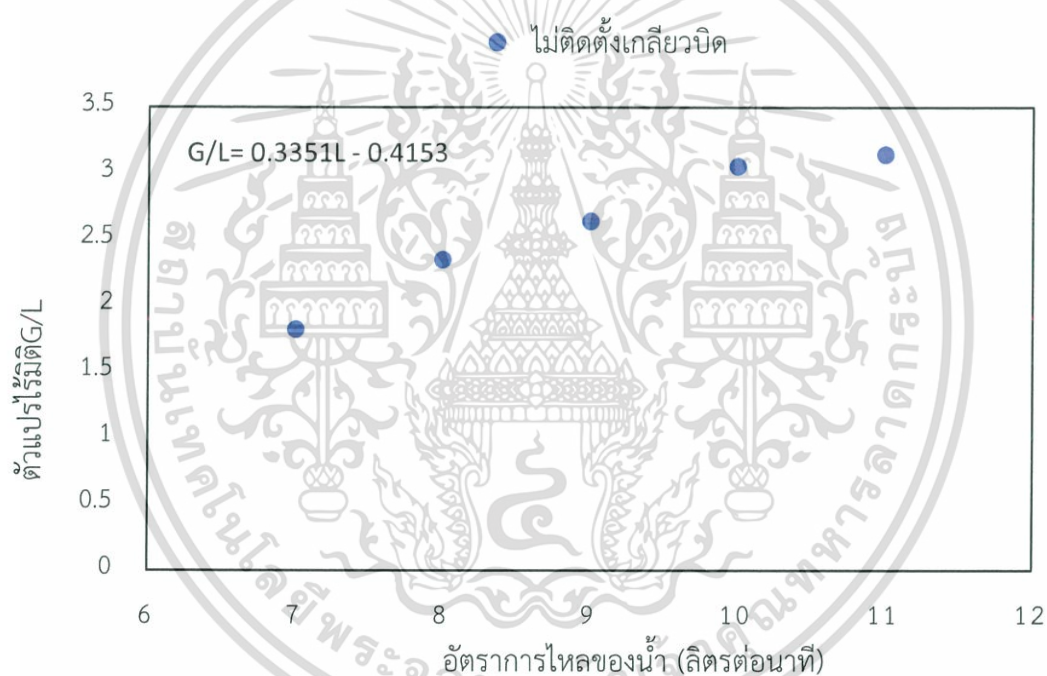
อัตราการไหลของอากาศในห้องผสมติดเกลียวบิดในรูปแบบอื่นๆ สามารถทำได้ในรูปแบบเดียวกันกับการคำนวณข้างต้นนี้

5.2.2 ผลการทดลองหัวฉีดเหนียวน้ำ (Inductive Jet)

จากการทดลองหัวฉีดเหนียวน้ำ ที่อัตราการไหลของน้ำ 7, 8, 9, 10 และ 11 ลิตรต่อนาทีกับห้องผสมที่ไม่ได้ติดตั้งเกลียวบิดภายใน พบว่าเกิดการเหนียวน้ำของอากาศเข้ามาภายในห้องผสมเนื่องจากความดันภายในห้องผสมต่ำลงตามทฤษฎีการเหนียวน้ำของหัวฉีดเหนียวน้ำ (Jet Turbulent Theory) การเหนียวน้ำอากาศเข้ามาภายในห้องผสมของหัวฉีดเหนียวน้ำสามารถคำนวณให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติ (G/L) ระหว่างอัตราการไหลของอากาศ (G) ที่เหนียวน้ำเข้ามาภายในห้องผสม กับอัตราการไหลของน้ำ (L) โดยค่า G/L เป็นตัวแปรสำคัญที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของหัวฉีดเหนียวน้ำ

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าอัตราการเหนี่ยวนำอากาศที่อัตราการไหลของน้ำค่าต่าง ๆ และค่าตัวแปรไร้มิติ

อัตราการไหลของน้ำ (LPM)	อัตราการไหลของอากาศ (G) (m^3 / hr)	ตัวแปรไร้มิติ (G/L)
7	0.764	1.819
8	1.127	2.348
9	1.425	2.639
10	1.832	3.054
11	2.073	3.141



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่ลดลงตามอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มมากขึ้น

จากตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.5 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำมากขึ้น อัตราการเหนี่ยวนำอากาศก็จะมากขึ้น โดยที่ตัวแปรไร้มิติ G/L มีค่าแนวโน้มที่มากขึ้น เนื่องจากอัตราการเหนี่ยวนำอากาศ (G) ที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำ (L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าอัตราการไหลของน้ำ (L) เทียบกับอัตราการไหลของอากาศ (G) และตัวแปรไร้มิติ (G/L)

อัตราการไหลของน้ำ (LPM)	อัตราการไหลของอากาศ (m^3/h)				ตัวแปรไร้มิติ (G/L)			
	ท่อเปล่า	ท่อติดเกลียวบิด			ท่อเปล่า	ท่อติดเกลียวบิด		
		180°	270°	360°		180°	270°	360°
7	0.764	0.655	0.563	0.387	1.819	1.559	1.341	0.922
8	1.127	0.867	0.835	0.620	2.348	1.807	1.740	1.292
9	1.425	1.196	1.088	0.833	2.639	2.214	2.015	1.543
10	1.832	1.498	1.307	0.997	3.054	2.496	2.179	1.662
11	2.073	1.611	1.490	1.182	3.141	2.441	2.257	1.790



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติ (G/L) และอัตราการไหลของน้ำในห้องผสมแต่ละแบบ

จากตารางที่ 5.2 ในห้องผสมไม่ติดเกลียวบิด, ห้องผสมติดเกลียวบิด 180, 270 และ 360 องศา แนวโน้มของอัตราการเหนี่ยวนำอากาศที่เข้ามาภายในห้องผสมจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น และจากการทดลองการวัดอัตราการเหนี่ยวนำอากาศโดยหัวฉีดเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าห้องผสมที่ไม่ได้ติดตั้งเกลียวบิดภายในอัตราการเหนียวนำอากาศจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.073 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 11 ลิตรต่อนาที เมื่อเทียบกับห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิด 180, 270 และ 360 องศา ที่อัตราการไหลของน้ำเดียวกัน อัตราการเหนียวนำของอากาศจะมีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 1.611, 1.490 และ 1.182 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากในห้องผสมที่ไม่ได้ติดตั้งเกลียวบิดภายในไม่เกิดการขวางการเหนียวนำของอากาศรอบข้างของลำน้ำที่ออกมาจากหัวฉีดเหนียวนำและค่าของตัวแปรไร้มิติ G/L จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในทุกๆรูปแบบของห้องผสมเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น นั่นคืออัตราการไหลของอากาศที่เหนียวนำเข้ามาในห้องผสมที่ไม่ได้ติดตั้งเกลียวบิด ที่อัตราการไหลของน้ำ 11 ลิตรต่อนาที มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.141 และมีแนวโน้มลดลงในห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิด 270, 180 และ 360 องศา เท่ากับ 2.441, 2.257 และ 1.790 ตามลำดับ

5.3 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับปั๊ม

ตารางที่ 5.4 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์ไฟฟ้า, ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า

ชนิดห้องผสม	อัตราการไหลของน้ำ (LPM)	กระแสไฟฟ้า (Amp)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า (kw)
ห้องผสมไม่ติดตั้งเกลียวบิด	7	0.64	226.7	0.95	0.138
	8	0.63	225.4	0.964	0.137
	9	0.63	223.5	0.97	0.136
	10	0.63	223.7	0.971	0.137
	11	0.63	223.7	0.972	0.138
ห้องผสมติดตั้งเกลียวบิดภายใน 180°	7	0.63	225.0	0.957	0.137
	8	0.63	224.6	0.962	0.136
	9	0.63	224.8	0.964	0.137
	10	0.64	225.0	0.966	0.138
	11	0.64	225.8	0.966	0.140
ห้องผสมติดตั้งเกลียวบิดภายใน 270°	7	0.64	227.2	0.951	0.137
	8	0.64	227.0	0.956	0.138
	9	0.64	227.1	0.96	0.140
	10	0.64	227.1	0.962	0.140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	11	0.64	225.4	0.965	0.140
ห้องผสมติด	7	0.63	224.3	0.956	0.135
	8	0.64	225.8	0.956	0.137
เกลียวบิด	9	0.63	224.5	0.962	0.137
ภายใน 360°	10	0.64	225.4	0.962	0.139
	11	0.64	226.0	0.963	0.140

จากตารางที่ 5.3 ห้องผสมไม่ติดเกลียวบิด, ห้องผสมติดเกลียวบิด 180, 270 และ 360 องศาของทุกอัตรการไหล ให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอยู่ในช่วง 0.136-0.140 กิโลวัตต์

5.4 สรุปข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

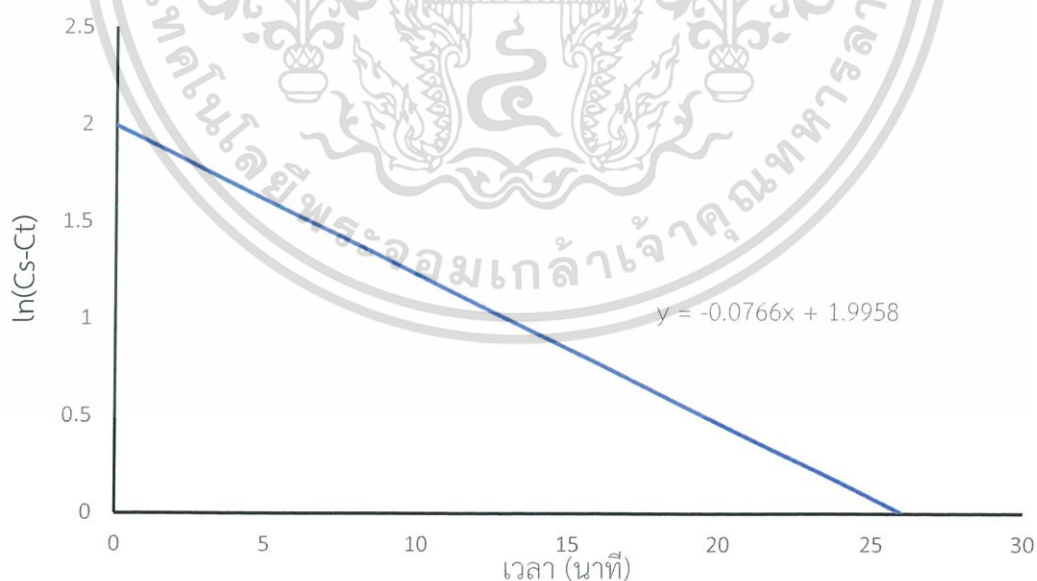
5.4.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของออกซิเจน ($k_L a$)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากวิธีที่เรียกว่า Log-deficit method หรือเรียกว่าการประมาณค่าแบบวิธีสองตัวแปร ซึ่งสมการที่เขียนได้จะอยู่ในรูปเส้นตรง ดังสมการ (3.32)

$$\ln(C_s - C_t) = \ln(C_s - C_0) - k_L a t$$

เมื่อแกน Y คือ $\ln(C_s - C_t)$ แกน X คือ เวลา (t)

โดยความสัมพันธ์ของกราฟที่ได้เมื่อพิจารณาที่ห้องผสมติดเกลียวบิด 360 องศา ที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที แสดงดังรูป



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมผลต่างค่าความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำกับเวลาของห้องผสมติดเกลียวบิด 360 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.7 พบว่าค่าความชันของกราฟเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) โดยมีค่าเท่ากับ 0.0766 ต่อนาที หรือ 4.596 ต่อชั่วโมง จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ณ อุณหภูมิ 30 องศา มาปรับค่าให้เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิมาตรฐาน (ASCE, 2007) ได้ดังต่อไปนี้

$$k_{L a(20)} = k_{L a(T)} \times \theta^{(20-T)} \quad \text{เมื่อ } \theta = 1.024$$

$$k_{L a(20)} = 4.596 \times 1.024^{(20-30)}$$

$$k_{L a(20)} = 3.625 \text{ ต่อชั่วโมง}$$

พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของออกซิเจนที่มาตรฐาน ($k_L a$) โดยมีค่าเท่ากับ 0.060 ต่อนาที หรือ 3.625 ต่อชั่วโมง

5.3.2 การคำนวณหาค่า อัตราการถ่ายเทของออกซิเจนที่มาตรฐาน (Standard oxygen transfer rate: SOTR) ได้จากสมการ (3.34)

$$SOTR = k_L a_{(20)} \times C_{s(20)} \times V$$

$$SOTR = 3.625 \times 9.1 \times 40$$

โดยจะได้ค่าอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนที่มาตรฐาน (Standard oxygen transfer rate: SOTR) เท่ากับ 1319.72 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง หรือ 0.00131972 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

5.3.3 การคำนวณหาค่า ประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (Standard aeration efficiency: SAE)

สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.35)

$$SAE = \frac{SOTR}{P_i} \times 100$$

ค่า P_i คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับปั๊มซึ่งวัดได้เท่ากับ 0.14 กิโลวัตต์ จะได้

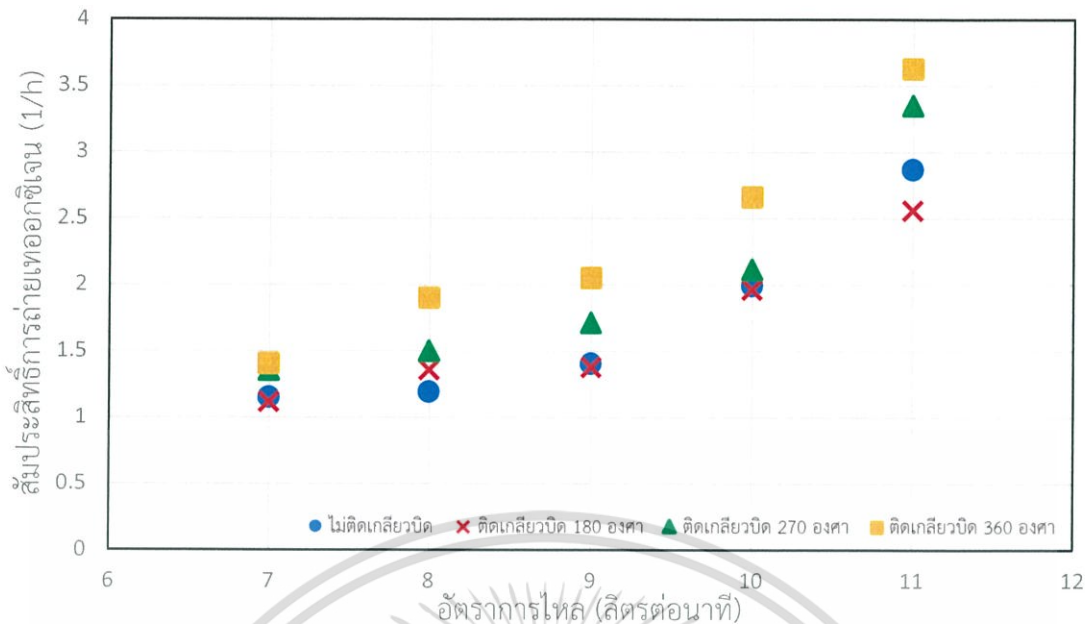
$$SAE = \frac{0.001219794}{0.14} \times 100 = 0.94 \text{ กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง}$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน, อัตราการถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐานและประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐานของห้องผสมและอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ได้แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.5 แสดงข้อมูลจากผลการทดลองและสมรรถนะการเติมอากาศของห้องผสม

อัตรา การไหล ของน้ำ (ลิตรต่อ นาทีก)	รูปแบบของ ห้องผสม	ค่าความ เข้มข้น ออกซิเจน อิ่มตัว (มก.ต่อ ลิตร)	เวลาที่ เข้าสู่ จุด อิ่มตัว (วินาที)	สัมประสิทธิ์ การถ่ายเท ออกซิเจน ($k_L a_{20}$) (h^{-1})	อัตราการ ถ่ายเท ออกซิเจน มาตรฐาน (SOTR) $\times 10^{-3}$ (kgO_2 / h)	ประสิทธิภาพ การเติมอากาศ มาตรฐาน (SAE) (kgO_2 / kWh)
7	ไม่มีเกลียวบิด	4.85	2760	1.15	0.42	0.30
	180°	4.91	2820	1.12	0.41	0.30
	270°	4.71	2400	1.35	0.49	0.34
	360°	4.80	2460	1.40	0.51	0.37
8	ไม่มีเกลียวบิด	4.86	2640	1.24	0.45	0.33
	180°	4.83	2220	1.36	0.49	0.36
	270°	4.88	2100	1.50	0.54	0.39
	360°	5.01	1800	1.89	0.69	0.50
9	ไม่มีเกลียวบิด	5.03	2580	1.40	0.51	0.38
	180°	5.00	2460	1.42	0.51	0.38
	270°	5.12	2100	1.71	0.62	0.44
	360°	5.26	1920	2.05	0.74	0.54
10	ไม่มีเกลียวบิด	5.60	2100	1.99	0.72	0.53
	180°	5.75	2400	1.96	0.71	0.52
	270°	5.79	2100	2.28	0.83	0.59
	360°	5.96	1860	2.66	0.97	0.69
11	ไม่มีเกลียวบิด	6.19	1920	2.87	1.04	0.76
	180°	6.16	2100	2.64	0.96	0.68
	270°	6.25	1800	3.35	1.22	0.87
	360°	6.33	1560	3.62	1.32	0.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบข้อมูลจากผลการทดลองระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมาตรฐาน กับอัตราการไหลของน้ำ

จากรูปที่ 5.8 และตารางที่ 5.4 พบว่าการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ($k_L a$) กับอัตราการไหลของน้ำในห้องผสมไม่ติดเกลียวบิต, ติดเกลียวบิต 180, 270 และ 360 องศา เมื่อเปรียบเทียบที่ห้องผสมแบบเดียวกัน แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่ามากขึ้น เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของน้ำเดียวกันพบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 7, 8, 9, 10 และ 11 ลิตรต่ออนาที ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของห้องผสมติดเกลียวบิต 360 องศา จะมีค่ามากที่สุด เท่ากับ 1.40, 1.89, 2.05, 2.66 และ 3.62 รองลงมาคือห้องผสมติดเกลียวบิต 270 องศา ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 1.35, 1.50, 1.71, 2.28 และ 3.35 ตามลำดับ ห้องผสมไม่ติดเกลียวบิตมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเท่ากับ 1.15, 1.24, 1.40, 1.99 และ 2.87 ตามลำดับ ห้องผสมติดเกลียวบิต 180 องศา มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเท่ากับ 1.12, 1.36, 1.42, 1.96 และ 2.64 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของห้องผสมแต่ละแบบมีค่ามากขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 5.4 แนวโน้มของค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน (SAE) ที่บ่งชี้ประสิทธิภาพการเติมอากาศต่อกำลังไฟที่ใช้ในปั๊มหยอโข่งนั้น พบว่าแนวโน้มของค่า SAE จะคล้ายกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 11 ลิตรต่ออนาที ค่า SAE ของห้องผสมติดเกลียวบิต 360 องศา จะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.94 ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ห้องผสมเดียวกัน

บทที่ 6

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิดต่อการผสมกันของก๊าซและของเหลว โดยเปรียบเทียบห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิด ติดเกลียวบิด 180, 270 และ 360 องศาในอัตราการไหลตั้งแต่ 7 ถึง 11 ลิตรต่อนาที ซึ่งแสดงออกมาในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของออกซิเจนมาตรฐาน, อัตราการถ่ายเทของออกซิเจนมาตรฐานและประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน โดยงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการเหนี่ยวนำอากาศโดยใช้หัวฉีดเหนี่ยวนำ ในรูปของตัวแปรไร้มิติ L/G

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของห้องผสมที่ติดตั้งเกลียวบิดต่อการผสมกันของก๊าซและของเหลว โดยใช้ห้องผสมเป็นท่อที่มีการติดตั้งเกลียวบิดภายในต่างกันสามแบบ และห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิดภายใน จากการทดลองที่แสดงถึงผลของการเติมอากาศที่แตกต่างกันของห้องผสมในแต่ละแบบที่แต่ละอัตราการไหล ซึ่งผลของห้องผสมติดตั้งเกลียวบิด 360 และ 270 องศาให้ผลที่ดีกว่าห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิดในทุกอัตราการไหล ส่วนห้องผสมติดตั้งเกลียวบิด 180 องศาให้ผลที่ใกล้เคียงกับห้องผสมไม่ติดตั้งเกลียวบิดในทุกอัตราการไหล เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของน้ำและอากาศในห้องผสมไม่ติดตั้งเกลียวบิดและห้องผสมติดตั้งเกลียวบิด 180 องศาที่มีค่าใกล้เคียงกัน และทำให้อัตราการไหลของอากาศระหว่างห้องผสมสองแบบนี้มีค่าใกล้เคียงกันอีกด้วย ผลของอัตราการไหลของอากาศจะมากขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ที่อัตราการไหลเท่ากัน อัตราการไหลของอากาศก็จะลดลงตามพื้นที่ภายในห้องผสมที่มากขึ้นตามเกลียวบิดที่อ้อมมากขึ้น กล่าวคือห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิดภายใน, ห้องผสมติดตั้งเกลียวบิด 180, 270, 360 องศา อัตราการไหลของอากาศจะลดลงตามลำดับ เนื่องจากเกิดการขัดขวางการเหนี่ยวนำอากาศจากการติดตั้งเกลียวบิด เข้ามาภายในห้องผสมนั่นเอง แนวโน้มของค่า L/G จะลดลงในอัตราการไหลน้ำที่เพิ่มขึ้น ในทุกรูปแบบของห้องผสม และมีแนวโน้มที่มากขึ้นจากห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวบิด, ติดตั้งเกลียวบิด 180 องศา, 270 องศา, 360 องศา ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศมากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ ค่า L/G ต่ำๆแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของหัวฉีดที่ใช้ปริมาณของของเหลวน้อยแต่เหนี่ยวนำอากาศได้ในปริมาณที่มากกว่า และในทางกลับกัน ค่า L/G สูงๆแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการเหนี่ยวนำที่ต่ำลง

จากการศึกษาผลทดลองความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปจนถึงจุดอิ่มตัวต่อเวลาพบว่าห้องผสมติดตั้งเกลียวบิดชนิด 360 องศา ที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที ให้การผสมที่ดีที่สุด โดยใช้เวลาเข้าถึงจุดอิ่มตัว 1560 วินาที โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทของออกซิเจนที่มาตรฐาน ($k_L a$) เท่ากับ 0.06041 ต่อนาที หรือ 3.62 ต่อชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนที่มาตรฐาน (Standard oxygen transfer rate: SOTR) เท่ากับ 1319.72 มิลลิกรัมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง หรือ 0.00131972 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและมีประสิทธิภาพการเติมอากาศมาตรฐาน 0.94 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศที่ถูกเหนี่ยวนำโดยหัวฉีดเหนี่ยวนำ พบว่า ห้องผสมที่ไม่ติดตั้งเกลียวใบปิดจะเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาได้มากที่สุด เท่ากับ 2.073 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 11 ลิตรต่ออนาที และ มีค่า L/G น้อยที่สุด เท่ากับ 0.318



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เขมชาติ บุณยะกาญจน, เขิญชาญ ขาวซัง และฤทธิเศก บุญโชคหิรัญเมธา. (2558). การออกแบบห้องผสมสำหรับชุดหัวฉีดเหนียวนำในหอบำบัดอากาศแบบเปียก, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Khem Chatbunyakanchana, CheonChan Khaosan and Rittsek Boonchokhiranmetha. (2558). Design of mixing chamber for liquid-gas ejector in wet scrubber, Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [3] จิรพล เนียมพินิจกุล, ณัฐพล พาโคกทม และพนา สุขเจริญ. (2556). อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนียวนำเพื่อใช้ในการผสมแก๊สและของเหลว, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] Adel Abdel-Rahman. (2010). A review of effects of initial and boundary conditions on turbulent jets, Mechanical Engineering, Beirut Arab University, Beirut, Lebanon.
- [5] Amina Benabderrahmane, Miloud Aminallah, Samir Laouedj, Abdelylah Benazza, J.P. Solano. Heat transfer enhancement in a parabolic trough solar receiver using longitudinal fins and nanofluids, Laboratory of Reactive Systems and Materials, Djillali Liabes University, Sidi Bel Abbès, Algeria.
- [6] Ava Mallesh. (2015). CFD analysis of a tube with different internal fin profiles, Mechanical Engineering, Jawaharlal Nehru Technological University Hyderabad Kukatpally, Hyderabad, Telangana state, India.
- [7] L.-K. Tseng, G.A. Ruff, G.M. Faeth. (1991). Effects of gas density on the structure of liquid jets in still gases, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- [8] Vishal Pralhad Bhaskar, S.T. Patil. (2017). Performance of mixing efficiency and residence time distribution of static mixer in liquid-liquid and gas-liquid mixture, Tatyasaheb Kore College of engineering and technology, Warananagar, Kolhapur, Maharashtra.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลจากผลจากทดลองการเติมอากาศ

ตารางที่ ก1 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมไม่ติดเกลียวบิดที่อัตราการไหล 7 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.15	31	4.53
1	0.16	32	4.61
2	0.16	33	4.54
3	0.15	34	4.63
4	0.15	35	4.61
5	0.15	36	4.61
6	0.30	37	4.63
7	0.59	38	4.64
8	0.90	39	4.65
9	1.25	40	4.66
10	1.71	41	4.69
11	2.23	42	4.71
12	2.25	43	4.72
13	2.65	44	4.77
14	3.00	45	4.78
15	3.12	46	4.82
16	3.35	47	4.81
17	3.44	48	4.81
18	3.72	49	4.81
19	3.80	50	4.82
20	3.92	51	4.88
21	4.05	52	4.90
22	4.15	53	4.86
23	4.22	54	4.84
24	4.28	55	4.87
25	4.31	56	4.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26	4.36	57	4.89
27	4.41	58	4.87
28	4.32	59	4.88
29	4.45	60	4.87
30	4.52		

ตารางที่ ก2 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมไม่ติดเกลียวบิดที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.08	31	4.34
1	0.13	32	4.30
2	0.14	33	4.38
3	0.08	34	4.37
4	0.20	35	4.46
5	0.24	36	4.54
6	0.33	37	4.66
7	0.45	38	4.69
8	0.54	39	4.64
9	0.86	40	4.67
10	0.98	41	4.66
11	1.44	42	4.77
12	1.57	43	4.86
13	1.78	44	4.82
14	2.24	45	4.84
15	2.43	46	4.89
16	3.01	47	4.91
17	2.91	48	4.86
18	2.92	49	4.87
19	3.33	50	4.80
20	3.58	51	4.88
21	3.76	52	4.80
22	3.81	53	4.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23	3.83	54	4.95
24	3.87	55	4.89
25	3.94	56	4.78
26	4.08	57	4.95
27	4.12	58	4.86
28	4.21	59	4.82
29	4.17	60	4.81
30	4.21		

ตารางที่ ก3 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมไม่ติดเกลือยวบิดที่อัตราการไหล 9 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.10	31	4.56
1	0.09	32	4.65
2	0.09	33	4.73
3	0.09	34	4.76
4	0.08	35	4.83
5	0.08	36	4.82
6	0.08	37	4.90
7	0.08	38	4.92
8	0.35	39	4.95
9	0.88	40	5.09
10	1.46	41	5.00
11	2.08	42	5.07
12	2.11	43	5.09
13	2.68	44	5.11
14	2.86	45	5.06
15	2.35	46	5.08
16	2.99	47	5.06
17	3.39	48	5.04
18	3.77	49	5.07
19	3.62	50	5.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20	3.62	51	4.95
21	3.96	52	4.97
22	3.87	53	5.09
23	3.91	54	4.97
24	4.25	55	5.10
25	4.27	56	5.07
26	4.31	57	4.92
27	4.35	58	4.96
28	4.41	59	4.97
29	4.47	60	4.98
30	4.54		

ตารางที่ ก4 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมไม่ติดเกลียวบิดที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.09	31	5.49
1	0.10	32	5.50
2	0.18	33	5.56
3	0.52	34	5.44
4	0.68	35	5.56
5	1.00	36	5.61
6	1.39	37	5.55
7	1.83	38	5.55
8	2.13	39	5.57
9	2.56	40	5.55
10	2.78	41	5.61
11	3.23	42	5.59
12	3.58	43	5.53
13	3.83	44	5.56
14	3.86	45	5.67
15	4.21	46	5.65
16	4.29	47	5.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17	4.54	48	5.62
18	4.69	49	5.67
19	4.66	50	5.68
20	4.68	51	5.67
21	5.00	52	5.62
22	5.08	53	5.66
23	5.03	54	5.66
24	5.14	55	5.66
25	5.33	56	5.58
26	5.28	57	5.58
27	5.30	58	5.57
28	5.47	59	5.61
29	5.42	60	5.55
30	5.41		

ตารางที่ ก5 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมไม่ติดเกลียวบิดที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.11	31	6.17
1	0.26	32	6.19
2	0.11	33	6.19
3	0.24	34	6.20
4	0.78	35	6.18
5	1.23	36	6.17
6	1.73	37	6.20
7	2.07	38	6.18
8	2.59	39	6.19
9	3.32	40	6.20
10	3.67	41	6.17
11	4.14	42	6.19
12	4.39	43	6.17
13	4.79	44	6.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14	5.12	45	6.21
15	5.23	46	6.17
16	5.36	47	6.19
17	5.50	48	6.18
18	5.74	49	6.17
19	5.72	50	6.20
20	5.74	51	6.21
21	5.79	52	6.19
22	5.92	53	6.20
23	5.97	54	6.18
24	5.92	55	6.17
25	6.02	56	6.19
26	6.03	57	6.20
27	6.09	58	6.19
28	6.10	59	6.18
29	6.11	60	6.20
30	6.15		

ตารางที่ ก6 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 180 องศาที่อัตราการไหล 7 ลิตรต่อนาที

เวลา (นา.ต.อ.น.)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นา.ต.อ.น.)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.09	31	4.21
1	0.08	32	4.22
2	0.09	33	4.23
3	0.09	34	4.26
4	0.24	35	4.30
5	0.27	36	4.35
6	0.36	37	4.32
7	0.39	38	4.40
8	0.87	39	4.47
9	0.93	40	4.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10	1.02	41	4.48
11	1.35	42	4.49
12	1.65	43	4.58
13	1.90	44	4.69
14	2.36	45	4.77
15	2.32	46	4.72
16	2.50	47	4.94
17	2.72	48	4.87
18	2.95	49	4.95
19	3.01	50	4.87
20	3.12	51	4.88
21	3.19	52	4.96
22	3.25	53	4.89
23	3.35	54	4.86
24	3.39	55	4.80
25	3.58	56	4.93
26	3.65	57	4.94
27	3.82	58	4.93
28	3.90	59	4.96
29	4.13	60	4.98
30	4.19		

ตารางที่ ก7 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 180 องศาที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.04	31	4.42
1	0.04	32	4.40
2	0.12	33	4.57
3	0.08	34	4.66
4	0.22	35	4.77
5	0.90	36	4.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6	1.24	37	4.81
7	1.27	38	4.84
8	1.39	39	4.84
9	1.37	40	4.83
10	1.84	41	4.86
11	2.22	42	4.79
12	2.59	43	4.79
13	2.59	44	4.77
14	2.56	45	4.82
15	2.80	46	4.79
16	2.92	47	4.88
17	2.88	48	4.94
18	2.93	49	4.75
19	3.11	50	4.82
20	3.21	51	4.83
21	3.33	52	4.94
22	3.57	53	4.87
23	3.64	54	4.87
24	3.70	55	4.91
25	3.90	56	4.86
26	4.15	57	4.84
27	4.23	58	4.93
28	4.28	59	4.76
29	4.31	60	4.78
30	4.39		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก8 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 180 องศาที่อัตราการไหล 9 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.07	31	4.50
1	0.09	32	4.53
2	0.09	33	4.66
3	0.14	34	4.69
4	0.08	35	4.76
5	0.42	36	4.76
6	0.15	37	4.86
7	0.26	38	4.92
8	0.76	39	4.96
9	0.91	40	4.94
10	1.51	41	5.00
11	1.49	42	4.97
12	2.30	43	4.96
13	2.14	44	5.04
14	2.74	45	5.00
15	2.78	46	5.02
16	2.81	47	5.02
17	3.01	48	5.04
18	3.19	49	4.95
19	3.22	50	5.06
20	3.34	51	5.02
21	3.50	52	5.04
22	3.69	53	5.05
23	3.87	54	4.94
24	4.00	55	5.06
25	4.23	56	4.93
26	4.26	57	4.99
27	4.31	58	5.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28	4.37	59	4.98
29	4.41	60	4.88
30	4.58		

ตารางที่ ก9 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 180 องศาที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อ นาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.10	31	5.38
1	0.10	32	5.32
2	0.10	33	5.38
3	0.09	34	5.58
4	0.09	35	5.57
5	0.09	36	5.59
6	0.09	37	5.60
7	0.25	38	5.63
8	0.54	39	5.69
9	1.02	40	5.71
10	1.42	41	5.66
11	1.83	42	5.70
12	2.08	43	5.72
13	2.42	44	5.69
14	2.64	45	5.74
15	2.87	46	5.81
16	3.12	47	5.74
17	3.52	48	5.79
18	3.63	49	5.72
19	3.74	50	5.77
20	3.88	51	5.74
21	4.26	52	5.77
22	4.46	53	5.80
23	4.52	54	5.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24	4.68	55	5.73
25	4.68	56	5.80
26	4.92	57	5.75
27	5.17	58	5.62
28	4.98	59	5.84
29	5.12	60	5.85
30	5.25		

ตารางที่ ก10 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 180 องศาที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.10	31	5.87
1	0.12	32	5.93
2	0.12	33	6.01
3	0.10	34	6.05
4	0.09	35	6.12
5	0.09	36	6.13
6	0.09	37	6.15
7	0.38	38	6.12
8	0.66	39	6.13
9	1.12	40	6.12
10	1.50	41	6.20
11	2.20	42	6.17
12	2.55	43	6.13
13	2.80	44	6.11
14	3.14	45	6.12
15	4.06	46	6.22
16	4.16	47	6.15
17	4.34	48	6.17
18	4.97	49	6.19
19	4.93	50	6.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20	5.05	51	6.20
21	5.03	52	6.21
22	5.38	53	6.20
23	5.41	54	6.19
24	5.36	55	6.18
25	5.51	56	6.17
26	5.76	57	6.15
27	5.64	58	6.14
28	5.80	59	6.11
29	5.82	60	6.15
30	5.80		

ตารางที่ ก11 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิต 270 องศาที่อัตราการไหล 7 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.07	31	4.62
1	0.16	32	4.69
2	0.18	33	4.71
3	0.07	34	4.73
4	0.16	35	4.68
5	0.42	36	4.76
6	0.43	37	4.71
7	0.88	38	4.83
8	0.97	39	4.75
9	1.56	40	4.73
10	2.22	41	4.69
11	2.32	42	4.70
12	2.61	43	4.77
13	2.88	44	4.79
14	2.91	45	4.65
15	3.22	46	4.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16	3.38	47	4.71
17	3.41	48	4.73
18	3.40	49	4.68
19	3.63	50	4.72
20	3.72	51	4.72
21	3.78	52	4.69
22	4.04	53	4.66
23	4.28	54	4.74
24	4.29	55	4.71
25	4.33	56	4.72
26	4.34	57	4.76
27	4.34	58	4.74
28	4.49	59	4.68
29	4.52	60	4.74
30	4.54		

ตารางที่ ก12 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิต 270 องศาที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อ นาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.09	31	4.65
1	0.28	32	4.72
2	0.52	33	4.78
3	0.66	34	4.89
4	0.78	35	4.88
5	1.05	36	4.87
6	0.99	37	4.79
7	1.30	38	4.88
8	1.62	39	4.85
9	1.70	40	4.79
10	1.88	41	4.86
11	2.15	42	4.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12	2.37	43	4.82
13	2.73	44	4.90
14	2.77	45	4.93
15	2.87	46	4.87
16	3.06	47	4.85
17	3.29	48	4.82
18	3.46	49	4.94
19	3.61	50	4.95
20	3.75	51	4.91
21	3.76	52	4.87
22	4.10	53	4.89
23	4.09	54	4.92
24	4.32	55	4.91
25	4.32	56	4.90
26	4.51	57	4.87
27	4.29	58	4.94
28	4.52	59	4.93
29	4.61	60	4.87
30	4.67		

ตารางที่ ก13 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 270 องศาที่อัตราการไหล 9 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.06	31	4.92
1	0.06	32	5.06
2	0.06	33	5.08
3	0.06	34	5.07
4	0.16	35	5.15
5	0.08	36	5.10
6	0.79	37	5.10
7	1.17	38	5.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8	1.42	39	5.13
9	1.94	40	5.11
10	2.32	41	5.12
11	2.58	42	5.08
12	3.12	43	5.09
13	3.14	44	5.13
14	3.36	45	5.12
15	3.52	46	5.14
16	3.69	47	5.10
17	3.88	48	5.16
18	3.95	49	5.13
19	4.02	50	5.17
20	4.11	51	5.09
21	4.26	52	5.10
22	4.33	53	5.08
23	4.46	54	5.09
24	4.51	55	5.15
25	4.60	56	5.17
26	4.67	57	5.14
27	4.68	58	5.12
28	4.71	59	5.10
29	4.83	60	5.09
30	4.92		

ตารางที่ ก14 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 270 องศาที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.08	31	5.59
1	0.07	32	5.67
2	0.13	33	5.63
3	0.23	34	5.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	0.13	35	5.79
5	0.25	36	5.71
6	0.62	37	5.75
7	0.98	38	5.81
8	1.85	39	5.78
9	2.20	40	5.79
10	2.56	41	5.77
11	2.77	42	5.80
12	3.07	43	5.80
13	3.43	44	5.86
14	3.75	45	5.75
15	3.88	46	5.84
16	4.02	47	5.78
17	4.31	48	5.83
18	4.53	49	5.82
19	4.96	50	5.89
20	5.02	51	5.76
21	5.11	52	5.76
22	5.27	53	5.78
23	5.33	54	5.75
24	5.39	55	5.77
25	5.51	56	5.88
26	5.57	57	5.80
27	5.54	58	5.75
28	5.57	59	5.76
29	5.58	60	5.75
30	5.59		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก15 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิต 270 องศาที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.07	31	6.26
1	0.07	32	6.23
2	0.13	33	6.27
3	0.11	34	6.29
4	0.14	35	6.26
5	0.32	36	6.26
6	0.78	37	6.20
7	1.54	38	6.35
8	2.24	39	6.25
9	2.82	40	6.20
10	3.22	41	6.28
11	3.74	42	6.24
12	4.11	43	6.23
13	4.25	44	6.22
14	4.57	45	6.24
15	4.86	46	6.27
16	5.12	47	6.23
17	5.24	48	6.31
18	5.48	49	6.23
19	5.71	50	6.26
20	5.80	51	6.22
21	5.86	52	6.21
22	5.83	53	6.33
23	6.04	54	6.25
24	6.21	55	6.27
25	6.13	56	6.22
26	6.15	57	6.25
27	6.26	58	6.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28	6.24	59	6.28
29	6.30	60	6.24
30	6.23		

ตารางที่ ก16 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 360 องศาที่อัตราการไหล 7 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.14	31	4.32
1	0.14	32	4.50
2	0.14	33	4.41
3	0.14	34	4.54
4	0.14	35	4.64
5	0.14	36	4.74
6	0.14	37	4.78
7	0.14	38	4.65
8	0.14	39	4.89
9	0.18	40	4.76
10	0.34	41	4.76
11	0.71	42	4.77
12	1.22	43	4.74
13	1.22	44	4.80
14	1.31	45	4.76
15	1.42	46	4.81
16	2.01	47	4.83
17	2.14	48	4.82
18	2.77	49	4.79
19	2.87	50	4.88
20	3.13	51	4.88
21	3.25	52	4.76
22	3.33	53	4.77
23	3.45	54	4.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24	3.52	55	4.82
25	3.59	56	4.81
26	3.63	57	4.76
27	3.75	58	4.82
28	3.83	59	4.84
29	3.99	60	4.75
30	4.20		

ตารางที่ ก17 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิต 360 องศาที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.11	31	4.98
1	0.11	32	5.07
2	0.11	33	5.01
3	0.13	34	5.03
4	0.31	35	5.02
5	0.49	36	5.09
6	1.03	37	5.06
7	1.66	38	5.03
8	2.01	39	4.95
9	2.63	40	4.97
10	2.72	41	4.97
11	2.76	42	5.01
12	2.88	43	5.00
13	3.29	44	5.04
14	3.61	45	5.03
15	3.64	46	4.96
16	3.81	47	5.03
17	3.66	48	5.09
18	3.98	49	4.99
19	4.11	50	5.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20	4.21	51	5.02
21	4.28	52	4.98
22	4.50	53	4.98
23	4.70	54	5.07
24	4.69	55	5.03
25	4.71	56	5.04
26	4.84	57	4.92
27	4.96	58	4.99
28	4.94	59	4.97
29	4.89	60	5.04
30	4.97		

ตารางที่ ก18 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิต 360 องศาที่อัตราการไหล 9 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.14	31	5.25
1	0.14	32	5.23
2	0.13	33	5.27
3	0.14	34	5.31
4	0.13	35	5.26
5	0.13	36	5.24
6	0.14	37	5.26
7	0.17	38	5.30
8	0.46	39	5.27
9	0.94	40	5.24
10	1.22	41	5.28
11	1.58	42	5.20
12	1.76	43	5.21
13	2.03	44	5.26
14	2.58	45	5.30
15	2.70	46	5.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16	2.80	47	5.24
17	3.27	48	5.30
18	3.38	49	5.28
19	3.54	50	5.26
20	3.68	51	5.22
21	3.91	52	5.19
22	4.25	53	5.29
23	4.36	54	5.26
24	4.73	55	5.24
25	4.68	56	5.23
26	4.81	57	5.31
27	4.91	58	5.27
28	5.05	59	5.26
29	5.00	60	5.29
30	5.24		

ตารางที่ ก19 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 360 องศาที่อัตราการไหล 10 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.05	31	5.95
1	0.06	32	5.92
2	0.10	33	5.87
3	0.08	34	5.94
4	0.05	35	5.96
5	0.17	36	5.97
6	0.98	37	5.91
7	2.07	38	5.95
8	2.54	39	5.93
9	2.58	40	5.94
10	3.31	41	5.93
11	3.74	42	5.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12	3.99	43	5.93
13	4.08	44	5.90
14	4.29	45	5.94
15	4.57	46	6.00
16	4.63	47	5.90
17	4.85	48	5.97
18	4.86	49	6.03
19	5.25	50	5.99
20	5.17	51	5.89
21	5.36	52	6.06
22	5.42	53	5.94
23	5.46	54	6.00
24	5.57	55	6.02
25	5.67	56	5.98
26	5.79	57	5.98
27	5.72	58	6.02
28	5.86	59	5.97
29	5.78	60	5.98
30	5.87		

ตารางที่ ก20 ข้อมูลการเติมอากาศของห้องผสมติดเกลียวบิด 360 องศาที่อัตราการไหล 11 ลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้นออกซิเจน (มก.ต่อลิตร)
0	0.10	31	6.4
1	0.12	32	6.39
2	0.22	33	6.37
3	0.51	34	6.41
4	1.18	35	6.37
5	1.32	36	6.27
6	2.38	37	6.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7	3.76	38	6.37
8	4.05	39	6.34
9	4.38	40	6.35
10	4.678	41	6.34
11	4.89	42	6.37
12	5.10	43	6.29
13	5.29	44	6.34
14	5.50	45	6.42
15	5.53	46	6.41
16	5.71	47	6.33
17	5.80	48	6.33
18	5.96	49	6.28
19	5.96	50	6.36
20	6.03	51	6.27
21	6.10	52	6.26
22	6.19	53	6.29
23	6.22	54	6.31
24	6.22	55	6.35
25	6.26	56	6.31
26	6.36	57	6.34
27	6.34	58	6.28
28	6.36	59	6.31
29	6.36	60	6.27
30	6.38		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ข้อมูลจากการวัดความเร็วลม

ตารางที่ ข1 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดความเร็วลมของห้องผสมไม่ติดเกลียวบิด

อัตราการไหลของน้ำ (LPM)	ความเร็วลม (m/s)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
7	0.178	0.130	0.075
8	0.228	0.188	0.120
9	0.272	0.232	0.158
10	0.318	0.285	0.218
11	0.348	0.308	0.258

ตารางที่ ข2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดความเร็วลมของห้องผสมติดเกลียวบิด 180 องศา

อัตราการไหลของน้ำ (LPM)	ความเร็วลม (m/s)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
7	0.158	0.125	0.055
8	0.205	0.155	0.080
9	0.235	0.205	0.125
10	0.272	0.250	0.165
11	0.295	0.248	0.190

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดความเร็วลมของห้องผสมติดเกลียวบิด 270 องศา

อัตราการไหลของน้ำ (LPM)	ความเร็วลม (m/s)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
7	0.165	0.122	0.032
8	0.212	0.160	0.068
9	0.248	0.190	0.105
10	0.270	0.235	0.128
11	0.292	0.265	0.150

ตารางที่ ข4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดความเร็วลมของห้องผสมติดเกลียวบิด 360 องศา

อัตราการไหลของน้ำ (LPM)	ความเร็วลม (m/s)		
	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3
7	0.138	0.080	0.020
8	0.172	0.135	0.038
9	0.208	0.165	0.065
10	0.235	0.178	0.092
11	0.262	0.202	0.118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้