

การศึกษาและพัฒนาใบกวนแบบท่อกลวงในถังเติมอากาศ  
STUDY AND DEVELOPMENT OF HOLLOW STIRRER IN AERATOR

มานพ มาสมทบ  
MANOP MASOMTOB

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและพัฒนาใบกวนแบบท่อกวลงในถังเติมอากาศ

STUDY AND DEVELOPMENT OF HOLLOW STIRRER IN AERATOR

มานพ      มาสมทบ  
MANOP    MASOMTOB

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

74495

- 2 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**STUDY AND DEVELOPMENT OF HOLLOW STIRRER IN AERATOR**

**MANOP MASOMTOB**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและพัฒนาใบกวนแบบท่อกวลงในถังเดิมอากาศ
นักศึกษา	นายมานพ มาสมทบ
รหัสนักศึกษา	46060414
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.วิภา เจียรระโนวชิระ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนารูปทรงของใบพัด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเดิมอากาศได้น้ำ โดยใช้วิธีการทดลองเชิงเปรียบเทียบ ในการออกแบบรูปทรงใบพัดของเครื่องเดิมอากาศ ให้สามารถดึงอากาศลงสู่ได้น้ำ โดยอาศัยหลักการของความแตกต่างความดันด้านหลังใบพัดที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ส่งผลให้เกิดการไหลของอากาศไปสู่ด้านหลังใบพัดก่อเกิดเป็นฟองอากาศ และเกิดการละลายของออกซิเจนในน้ำ ความดันบรรยากาศที่มาชดเชยความดันหลังใบพัด จะทำให้ความแตกต่างของความดันด้านหน้าและด้านหลังใบพัดลดน้อยลง การใช้กำลังในการขับเคลื่อนใบพัดน้อยลงตามไปด้วย โดยใบพัดที่ทำการออกแบบได้นำมาทดสอบ เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจน และประสิทธิภาพการเดิมอากาศ ซึ่งทำการทดลองที่ความเร็วรอบ 1300, 1375, 1450, 1525 และ 1600 รอบต่อนาที ที่ระดับการจมของใบพัด 0.57 เมตร และใช้ปริมาณน้ำ 46 ลิตร ตลอดจนการทดลองอุณหภูมิของน้ำถูกควบคุมไว้ประมาณ 28-32 องศาเซลเซียส และมีการควบคุมไม่ให้เกิดการหมุนวนของโพรงอากาศที่ผิวหน้า (vortex) ซึ่งผลที่ได้คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนสูงสุด  $101.114 \text{ hr}^{-1}$  ที่ความเร็วรอบ 1300 rpm และประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลของออกซิเจนสูงสุด  $1.306 \text{ kg O}_2/\text{m}^3/\text{kW}$  ที่ความเร็วรอบ 1600 rpm ของรูปทรงใบพัด N-233

จากการทดลองจะพบว่าความเร็วรอบส่งผลโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจน และประสิทธิภาพการเดิมอากาศ ความเร็วรอบสูงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนสูง ในทางกลับกันประสิทธิภาพการเดิมอากาศต่ำ เนื่องจากความเร็วรอบสูงขึ้นการใช้กำลังงานในการขับเคลื่อนจะสูงตาม

<b>Thesis</b>	Study and Development of Hollow Stirrer in an Aerator
<b>Student</b>	Mr.Manop Masomtob
<b>Student ID</b>	46060414
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr.Jaruwat Charoensuk
<b>Thesis Assistant Advisor</b>	Dr.Vipa Jayranaiwachira

### **ABSTRACT**

The main objective of this research is to design and develop the geometry of the aerator's hollow stirrer to achieve the higher efficient aeration by means of comparative test. The design concept utilized the difference between the pressure at back of the stirrer and the atmospheric pressure which causes air flow into the water, lead to the occurring of bubbles and the dissolving of oxygen into the water. Furthermore, the compensated pressure at the back of the stirrer blade causes the lower pressure difference over the stirrer blade, hence lower power needed in order to drive the stirrer. In this study, the various types of the hollow stirrer were tested in order compare the overall mass transfer of oxygen and the aeration efficiencies. The experiments were set at the speed of 1300, 1375, 1450, 1525 and 1600 rpm, 0.57 meters from free surface and volume 46 liters. The water temperature was controlled at 28-32 °c. Moreover, the occurring of the vortex at water surface was eliminated using buffer plates. The overall mass transfer of oxygen maximum is 101.114 hr<sup>-1</sup> at 1300 rpm of N-233. The aeration efficiency maximum is 1.306 kg O<sub>2</sub>m<sup>3</sup>/kW at 1600 rpm of N-233

Test results revealed that the overall mass transfer of oxygen and the aeration efficiency depend on the stirrer speed. Higher stirrer speed provides higher overall mass transfer of oxygen. However, the lower aeration efficiency according to the more power needed to drive the motor.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.จรรวดีตร เจริญสุข และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.วิภา เจริญระโนวชิระ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คุณแสวง เกิดประทุม นักวิชาการ 9.ฝ่ายวิศวกรรม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.) ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทดสอบ

ขอขอบพระคุณ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (Thailand Institute of Scientific and Technological Research, TISTR) ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณมณฑา เพื่อนๆ ที่คอยให้คำปรึกษาช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์ชุดทดสอบและทดลองที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ชมรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และน้องๆ ในชมรมที่ให้การช่วยเหลือและเป็นเพื่อนในยามราตรี สำหรับในงานวิจัยนี้

สำหรับคุณงานความดีอันที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

มานพ มาสมทบ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนในการศึกษา.....	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 งานวิจัยของ Beatriz Cancino และคณะ.....	4
2.1.2 งานวิจัยของ Kristian Kramer และ Willi H. Hager.....	11
2.2 ระบบเดิมอากาศ.....	13
2.2.1แบบตัวกระจายอากาศ.....	13
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานในงานวิจัย.....	30
3.1 การไหลผ่านวัตถุจม.....	30
3.1.1 แรงต้านการไหล.....	30
3.1.2 แรงต้านทานการไหลในแนวขนานของทิศทางการไหล.....	31
3.1.3 แรงต้านทานการไหลในแนวตั้งฉากของทิศทางการไหล.....	33
3.2 การออกแบบและการคำนวณใบพัด.....	35

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การบำบัดน้ำเสีย.....	36
3.3.1 ความต้องการออกซิเจน.....	37
3.3.2 ความตึงผิว.....	37
3.3.3 หลักการเติมอากาศและการถ่ายเทมวลระหว่างฟองอากาศกับน้ำ.....	38
3.3.4 ทฤษฎีการถ่ายเทออกซิเจน.....	40
3.3.5 ปัจจัยที่ทำให้ให้ออกซิเจนในน้ำมีมากหรือน้อย.....	44
บทที่ 4 การออกแบบและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	46
4.1 รูปทรงของใบพัดที่ใช้ในการทดลอง.....	46
4.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง .....	47
4.2.1 เครื่องทดสอบ.....	47
4.2.2 เครื่องมือวัด.....	49
4.2.3 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด.....	53
4.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ.....	54
บทที่ 5 วิธีการทดลองและผลการทดลอง.....	55
5.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	55
5.2 ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพ.....	56
5.3 การศึกษาตัวแปรในเบื้องต้น.....	59
5.4 ผลการทดลอง.....	63
5.4.1 ผลกระทบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะที่ก้าน ใบพัด.....	67
5.4.2 ผลกระทบของความเร็วรอบของใบพัด.....	71
5.4.3 ผลกระทบของจำนวนรูเจาะที่ก้าน ใบพัด.....	76
5.5 การวิเคราะห์จากหน่วย.....	80
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
บรรณานุกรม.....	85

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	86
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	105

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงขนาดรูปทรงของใบพัดแบบแผ่นเรียบ(Flat Rotors).....	5
2.2 สรุปหลักเกณฑ์และผลในการออกแบบใบพัด Kinetic 3.....	8
2.3 สรุปขนาดรูปทรงใบพัดของงานวิจัยที่ผ่านมา.....	9
2.4 ค่าที่ได้จากการทดลองของใบพัดจำนวน 23 ใบพัด.....	10
2.5 แสดงค่าประสิทธิภาพของใบพัดที่ใช้ในการทดสอบ.....	10
2.6 ข้อมูลอัตราการไหลของอากาศผ่านตัวกระจายอากาศแบบแผ่นงาน.....	18
2.7 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบ Nonporous diffusers.....	21
2.8 สมรรถภาพของตัวกระจายอากาศแบบต่างๆ.....	23
2.9 วิธีการทำความสะอาดตัวกระจายอากาศ.....	25
2.10 ปัจจัยที่ใช้ในการเลือกเครื่องเป่าอากาศประเภท Rotary Displacement และ Centrifugal Blowers.....	26
3.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหลของรูปทรงต่างๆ $Re \geq 10^3$ .....	34
3.2 ความเข้มข้นอิมิตัวของออกซิเจนในน้ำภายใต้ความดันบรรยากาศ.....	42
4.1 แสดงขนาดรูปทรงของใบพัดในแต่รูปทรง.....	47
5.1 ตัวอย่างผลการทดลองของความเข้มข้นของออกซิเจนที่เวลาเปลี่ยนไป.....	56
5.2 ตัวอย่างค่าความขาดแคลนของออกซิเจนในน้ำที่เวลาผ่านไป.....	58
5.3 ผลเปรียบเทียบการทดลอง.....	62
5.4 ผลการทดลองของประสิทธิภาพเปรียบเทียบรูปทรงใบพัดเมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบ.....	64
5.5 ค่าผลการทดลองสำหรับการคำนวณสมการ.....	82

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรูปทรงและขนาดของเครื่องทดสอบ.....	5
2.2 รูปทรงของใบพัดแบบแผ่นเรียบ.....	5
2.3 แสดงขนาด และรูปทรงใบพัด German1.....	6
2.4 แสดงขนาด และรูปทรงใบพัด German2. ....	7
2.5 แสดงรูปทรงใบพัด Conrad.....	7
2.6 แสดงขนาดใบพัด Kinetic 1 $\beta_1 = 21^\circ$ .....	8
2.7 แสดงขนาดใบพัด Kinetic 2 $\beta_1 = 26^\circ$ .....	8
2.8 รูปทรงใบพัด Kinetic 3.....	8
2.9 แสดงขนาดใบพัด Kinetic 3.....	9
2.10 แสดงเครื่องทดสอบการไหลความเร็วสูงในรางที่มีความยาว 14 เมตร.....	11
2.11 ความเร็วพองอากาศในน้ำนิ่งที่เป็นฟังก์ชันกับขนาดพอง.....	12
2.12 ลักษณะทั่วไปของตัวกระจายอากาศแบบ Fine bubble.....	14
2.13 ลักษณะทั่วไปของตัวกระจายอากาศแบบ Medium bubble.....	15
2.14 ลักษณะทั่วไปของการกระจายอากาศแบบ Coarse bubble.....	16
2.15 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบแผ่น (Plate Diffusers) .....	17
2.16 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบท่อ (Tube Diffusers) .....	18
2.17 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบห่มกยอดกลม (Dome Diffusers) .....	19
2.18 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบแผ่นจาน (Disc Diffusers) .....	20
2.19 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบไม่ใช่รูพรุนเล็ก (Nonporous diffusers) .....	21
2.20 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบอื่นๆ.....	22
2.21 การจัดวางตัวกระจายอากาศในถังเดิมอากาศ.....	26
2.22 ประเภทต่างๆ ของเครื่องเป่าอากาศและเครื่องอัดอากาศ.....	27
2.23 เครื่องเป่าอากาศแบบ Rotary Positive Displacement และ Centrifugal Blowers.....	28
3.1 การไหลในแนวตั้งฉากของทิศทางการไหล.....	33
3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทาน โดยที่อัตราส่วนสำหรับแผ่นเรียบเปลี่ยนแปลงที่ การไหล.....	33
3.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหล สำหรับวงกลมทรงกระบอกเรียบ โดยเป็นฟังก์ชันกับ เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์.....	34

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	แรงภายใน โมเลกุลที่บริเวณผิวของของเหลว.....38
3.5	ออกซิเจนถ่ายเทจากอากาศให้กับหยดน้ำขนาดเล็กที่เกิดจากการดีน้ำของเครื่องเติมอากาศ.....38
3.6	ออกซิเจนถ่ายเทจากฟองอากาศให้กับน้ำที่ห่อหุ้ม.....39
3.7	การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว.....40
4.1	แสดงรูปทรงใบพัดในมุมมองด้านบน.....46
4.2	แสดงรูปทรงใบพัดในมุมมองด้านข้าง.....46
4.3	มอเตอร์.....48
4.4	อินเวอร์เตอร์.....48
4.5	ถังพลาสติกใสและแผ่นกัน.....49
4.6	เครื่องมือวัดรอบ.....50
4.7	เครื่องมือวัดการละลายตัวออกซิเจน.....50
4.8	จอแสดงผลของมวต.....51
4.9	กราฟแสดงการเปรียบเทียบมวตที่จอแสดงผลเทียบกับมวตที่เกิดขึ้นจริง.....51
4.10	โพลดเซลล์.....51
4.11	เครื่องมือวัดความเร็วลม.....52
4.12	เครื่องมือวัดผลต่างความดันแบบดิจิตอล.....52
4.13	กล่องถ่ายภาพ.....53
4.14	เครื่องฉายแสงตัดระนาบ.....53
4.15	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด.....54
4.11	สาร โซเดียมซัลไฟท์.....54
4.12	สาร โคบอลต์คลอไรด์.....54
5.1	กราฟแสดงความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำเทียบกับเวลา .....57
5.2	กราฟ Semi-Log ของค่าความขาดแคลนออกซิเจนเทียบกับเวลา.....58
5.3	แสดงลักษณะรูปทรงของใบพัดใช้ความดันหลังใบพัด.....59
5.4	แสดงลักษณะรูปทรงของใบพัดใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง.....60
5.5	แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับความเร็วยรอบแบบใช้ความดันหลังใบพัด.....60
5.6	แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับกำลังที่ใช้แบบใช้ความดันหลังใบพัด.....61
5.7	แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับความเร็วยรอบแบบใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง.....61

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 แสดงความสัมพันธ์ข้อัตรากการไหลเชิงมวลกับกำลังที่ใช้ แบบใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง.....	62
5.9 แสดงลักษณะรูปทรงของใบพัด.....	63
5.10 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับกำลังงานที่จำนวนรูเจาะ 4 รู.....	67
5.11 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับกำลังงานที่จำนวนรูเจาะ 5 รู.....	67
5.12 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับกำลังงานที่จำนวนรูเจาะ 6 รู.....	68
5.13 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่จำนวนรูเจาะ 4 รู.....	68
5.14 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่จำนวนรูเจาะ 5 รู.....	69
5.15 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่จำนวนรูเจาะ 6 รู.....	69
5.16 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับประสิทธิภาพที่จำนวนรูเจาะ 4 รู.....	70
5.17 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับประสิทธิภาพที่จำนวนรูเจาะ 5 รู.....	70
5.18 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับประสิทธิภาพที่จำนวนรูเจาะ 6 รู.....	71
5.19 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับความเร็วรอบของใบพัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 2 มิลลิเมตร.....	71
5.20 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับความเร็วรอบของใบพัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 3 มิลลิเมตร.....	72
5.21 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับความเร็วรอบของใบพัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 4 มิลลิเมตร.....	72
5.22 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 2 มิลลิเมตร.....	73
5.23 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 3 มิลลิเมตร.....	73
5.24 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 4 มิลลิเมตร.....	74
5.25 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 2 มิลลิเมตร.....	74
5.26 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 3 มิลลิเมตร.....	75
5.27 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 4 มิลลิเมตร.....	75

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.28	กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1300 rpm.....76
5.29	กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1450 rpm.....76
5.30	กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1600 rpm.....77
5.31	กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1300 rpm.....77
5.32	กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1450 rpm.....78
5.33	กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1600 rpm.....78
5.34	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1300 rpm.....79
5.35	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1450 rpm.....79
5.36	กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1600 rpm.....80

# บทที่ 1

## บทนำ

น้ำเป็นสิ่งสำคัญในการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต การบำบัดน้ำเสียก่อนที่จะระบายสู่แหล่งน้ำ จึงมีความจำเป็นต้องกระทำเพื่อรักษาแหล่งน้ำตามธรรมชาติ เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุด การเติมอากาศเป็นกระบวนการส่วนหนึ่ง ในการบำบัดน้ำเสียแบบแอโรบิก ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายมลสารในน้ำ โดยที่อุปกรณ์ที่ใช้ในการเติมอากาศในปัจจุบัน มีหลายรูปแบบ เช่น เครื่องกวนกลผิวน้ำ การพ่นฟองอากาศผ่านหัวแพร่กระจาย เครื่องเติมอากาศแบบเจ็ท และเครื่องเติมอากาศแบบวอเตอร์เจ็ท เป็นต้น ซึ่งต้องใช้ความรู้ความเข้าใจในการจัดการ จึงเกิดแนวความคิดที่ว่าทำอย่างไรจะลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้น จึงได้ทำการศึกษา และวิจัยอุปกรณ์เติมอากาศ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศที่สามารถใช้พลังงานต่ำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในงานวิจัยนี้จะเน้นปัญหาไปที่น้ำเสียที่เกิดจากสารเคมีจากโรงงานย้อมสีผ้า โดยทำการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานย้อมผ้า ซึ่งสามารถนำน้ำเสียที่บำบัดแล้ว นำกลับไปใช้งานกับโรงงานย้อมสีผ้าใหม่ได้อีกครั้ง ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณน้ำเสียออกสู่ระบบและยังเป็นการลดปริมาณน้ำดีจากภายนอกเข้าสู่ระบบ จะเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าน้ำดี แต่ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะตกอยู่กับค่าใช้จ่ายของพลังงานที่เสียไปในการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์ในการบำบัดน้ำเสียในแง่ของการใช้พลังงาน จึงได้ทำการศึกษาและวิจัยไบโพลีเมอร์ไอโซนที่สามารถเติมไอโซนลงในได้น้ำ โดยมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาตัวแปรการเติมอากาศโดยใช้ไบโพลีเมอร์ไอโซน และทำการออกแบบพัฒนาไบโพลีเมอร์ไอโซนได้น้ำ จากนั้นทำการทดลองในเชิงวิทยาศาสตร์ เพื่อตรวจสอบรูปทรงไบโพลีเมอร์ไอโซน มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจนและประสิทธิภาพในการเติมอากาศสูงเท่าไร โดยจุดประสงค์ที่ทำการศึกษาในเชิงพัฒนาไบโพลีเมอร์ไอโซนได้น้ำ เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำไปประยุกต์ใช้พัฒนาเครื่องเติมไอโซน หรืออุตสาหกรรมการผสมแก๊สกับของเหลว ให้มีความเหมาะสมทั้งทางวิศวกรรมและทางเศรษฐศาสตร์

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในกระบวนการเติมอากาศได้น้ำโดยใช้ใบกวนนั้น ถ้าสามารถลดความแตกต่างของความดันด้านหน้าและความดันด้านหลังของใบพัดได้ จะส่งผลต่อการลดกำลังที่ใช้ในการขับใบพัด ซึ่งทำได้โดยใช้ความดันของบรรยากาศที่มีความดันสูงกว่าความดันหลังใบพัด เข้าไปชดเชยความดันด้านหลังของใบพัดที่มีค่าความดันต่ำกว่า ให้มีค่าความดันที่สูงขึ้น และผลพลอยได้จะได้ฟองอากาศที่ละเอียด เนื่องจากฟองที่ออกมาจากด้านหลังใบพัด ถูกใบพัดที่ตามมาตีฟองให้แตกละเอียดมากขึ้น ทำให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำเพิ่มขึ้น และฟองอากาศที่เล็กลงทำให้ความเร็วในการลอยตัวน้อยลงตาม ส่งผลให้ประสิทธิภาพของใบพัดเพิ่มขึ้นตาม

### 1.4 แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

แนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นออกแบบใบพัด โดยวิธีการตั้งสมมุติฐานในการลดความแตกต่างของความดันด้านหน้าและด้านหลังใบพัด โดยอาศัยทฤษฎีการไหลผ่านวัตถุกลม เพื่อลดกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนใบพัด จากนั้นทำการศึกษาเชิงทดลองเพื่อตรวจสอบสมมุติฐานว่าถูกต้องหรือไม่ ซึ่งเป็นแนวความคิดสำหรับงานวิจัยนี้ เพื่อหาองค์ความรู้ในทางวิทยาศาสตร์

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาและทดสอบในเบื้องต้นผลของประสิทธิภาพในการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำ
2. ใช้อากาศที่มีปริมาณออกซิเจนอยู่ 21 เปอร์เซ็นต์
3. ออกแบบพัฒนาใบพัดใหม่ที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า
4. นำใบพัดที่ออกแบบใหม่มาทดสอบหาประสิทธิภาพ โดยปรับเปลี่ยนขนาดรูเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 , 3 และ 4 mm เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 10 และ 12.5 mm และปรับเปลี่ยนจำนวนรูเจาะ 4 , 5 และ 6 รู
5. ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยน ความเร็วรอบของใบพัด 1300 , 1375 , 1450 , 1525 และ 1600 รอบ ที่ปริมาณน้ำ 46 ลิตร

### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยที่ผ่านเกี่ยวข้องกับกระบวนการเติมอากาศแบบต่างๆ รวมทั้งปัญหา ข้อจำกัด และอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
2. ศึกษาทฤษฎีการไหล, ทฤษฎีการถ่ายเทมวล และหลักการคำนวณต่างๆ
3. ทำการทดสอบในขั้นเบื้องต้น เพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำ

4. ศึกษารูปแบบการไหลด้วยวิธี Visualization
5. ทำการออกแบบและดัดแปลงใบพัดใหม่เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
6. ทำการทดลองหาประสิทธิภาพของใบพัดที่ออกแบบใหม่ โดยปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับใบพัดที่มีอยู่แล้ว
7. นำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และนำผลที่ได้มาคำนวณหาสมการประสิทธิภาพของใบพัด

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
2. ลดปริมาณน้ำเสียที่มีสารเคมีผสมอยู่ ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต
3. สามารถนำน้ำเสียที่ทำการบำบัดนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อลดต้นทุนของการใช้น้ำดี
4. สามารถนำไปประยุกต์กับอุตสาหกรรมเครื่องผสมแก๊สกับของเหลว

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมา โดยงานวิจัยที่ผ่านมาจะกล่าวถึงการออกแบบพัฒนาไบพัดเติมอากาศเพื่อให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำ และงานวิจัยอีกส่วนหนึ่งจะกล่าวถึงการศึกษาของความเร็วของฟองอากาศในการลอยตัว ซึ่งในงานวิจัยทั้งสองรูปแบบนี้จะเป็นข้อมูลที่ช่วยในงานวิจัยที่ศึกษา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมอากาศได้น้ำ

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายตัวของออกซิเจน แบบใช้ไบพัดเติมอากาศ สำหรับประเทศไทยยังไม่ค่อยมีการค้นคว้าการเติมอากาศได้น้ำโดยใช้ไบพัดมากนัก แต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ได้มีนักวิจัยต่างประเทศมากมาย ทำการศึกษาค้นคว้าในการเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศด้วยวิธีการมากมาย ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเป็นข้อมูลที่ช่วยในงานวิจัยในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศได้น้ำของงานวิจัยนี้ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมา รวม 3 บทความ ซึ่งเป็นบทความของต่างประเทศ

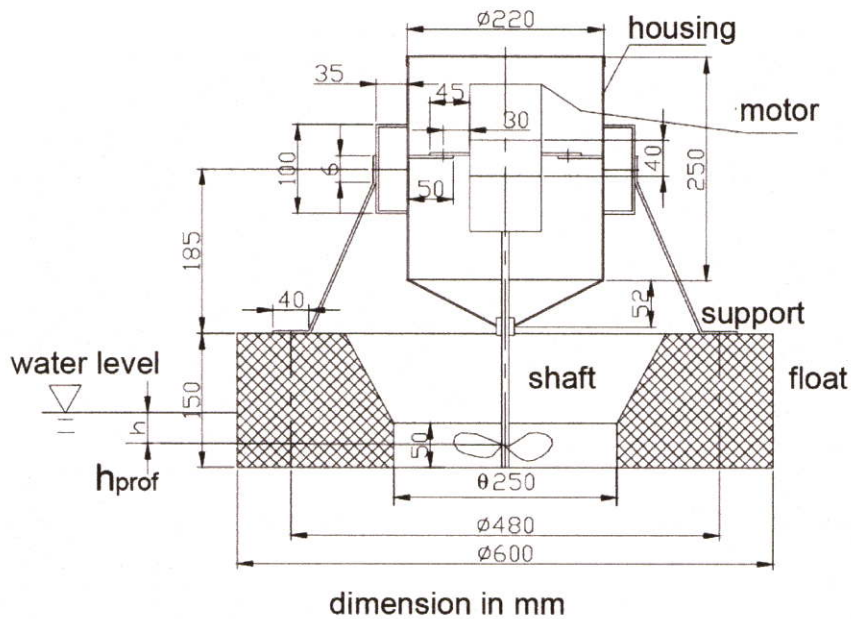
##### 2.1.1 งานวิจัยของ Beatriz Cancino และคณะ

ได้ทำการศึกษาออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศบนผิวน้ำโดยใช้ไบพัดกระทำที่ผิวน้ำ เกิดการกระจายตัวของน้ำเพื่อไปสัมผัสกับอากาศที่มีออกซิเจน โดยเนื้อหาของงานวิจัยของ Beatriz Cancino ทำการศึกษาดูด้วยกันอยู่ 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การพัฒนาออกแบบไบพัดในการเติมอากาศบนผิวน้ำ[3]

ส่วนที่ 2 การประเมินประสิทธิภาพการเติมอากาศบนผิวน้ำโดยใช้ไบพัด[4]

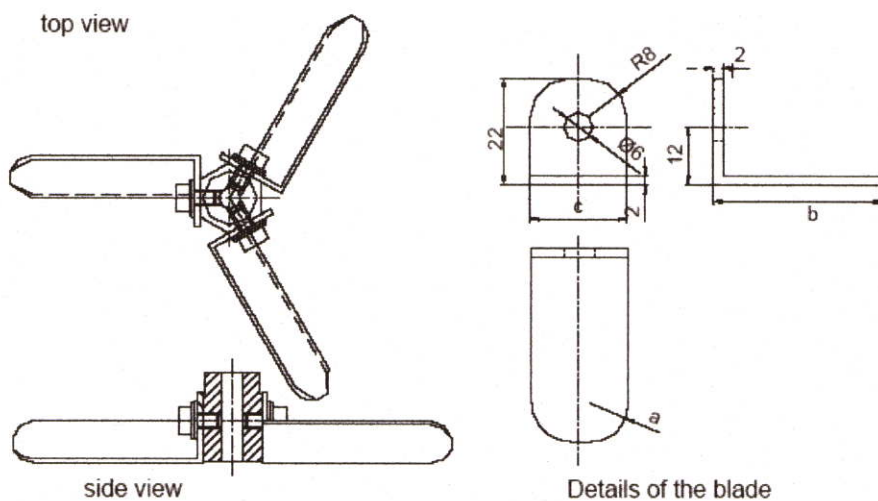
**ส่วนที่ 1.** ในเป็นส่วนแรกทีกล่าวถึงการออกแบบไบพัด และรูปทรงของไบพัด ที่ใช้ในการเติมอากาศแบบผิวน้ำ เพื่อให้เกิดการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำ ซึ่งได้ทำการออกแบบไบพัดมาแล้วนำไปทำการทดสอบของเนื้อหาในส่วนที่ 2. ของงานวิจัยของ Beatriz Cancino และคณะ เพื่อทำการคำนวณหาประสิทธิภาพของการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำ และหาสัมประสิทธิ์การถ่ายมวลของออกซิเจน ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนเนื้อหาของเนื้อหาในส่วนที่ 2. ต่อไป



รูปที่ 2.1 แสดงรูปทรงและขนาดของเครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบที่นำมาทดสอบรูปทรงใบพัดแบบผิวน้ำ จะเป็นแบบทุ่นลอยน้ำซึ่งมีมอเตอร์ตรงกับใบพัด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1

ใบพัดแบบแผ่นเรียบ ดังแสดงดังรูป 2.2 มุมทางเข้าทางออกของใบพัดเท่ากัน โดยที่ขนาดต่างของรูปทรงใบพัดจะแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงรูปทรงของใบพัดไว้ 4 แบบ โดยที่จะปรับเปลี่ยนรัศมีปลายใบ ความยาวใบพัด และความกว้างของใบพัด

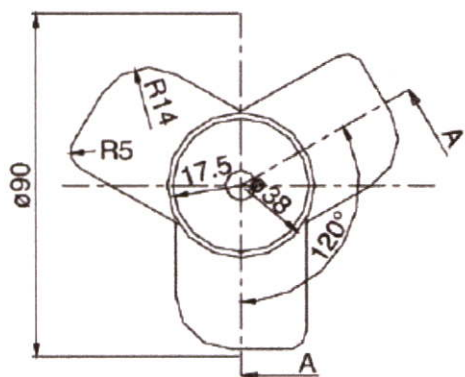


รูปที่ 2.2 รูปทรงของใบพัดแบบแผ่นเรียบ (Flat Rotors)

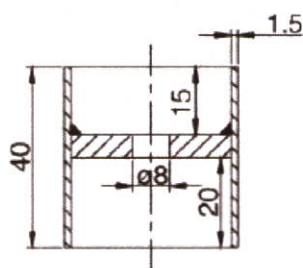
ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดรูปทรงของใบพัดแบบแผ่นเรียบ(Flat Rotors)

Rotor	a (mm)	b (mm)	c (mm)
Flat 1	8	70	20
Flat 2	8	50	20
Flat 3	3	35	35
Flat 4	3	50	35

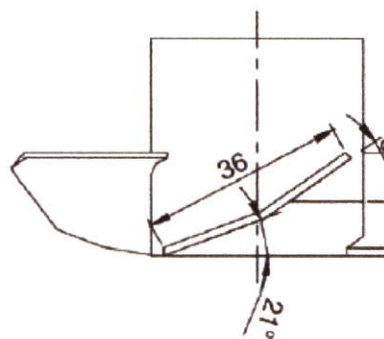
ใบพัด German1 และ German2 เป็นการออกแบบโดยใช้แรงหนีศูนย์กลางของของเหลว โดยที่มุมทางออกของ German1 มีค่าเท่ากับ 36 องศา และมุมทางออกของ German2 มีค่าเท่ากับ 74 องศา ซึ่งแสดงรูปทรงใบพัดดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4



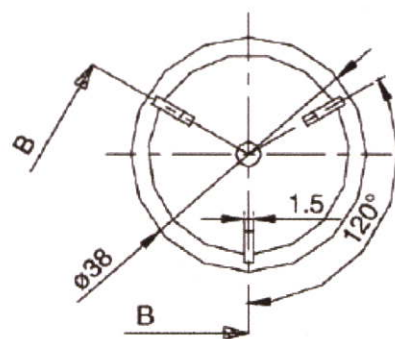
Details of the rotor's body



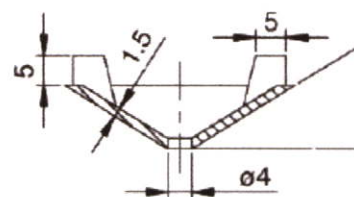
View A-A



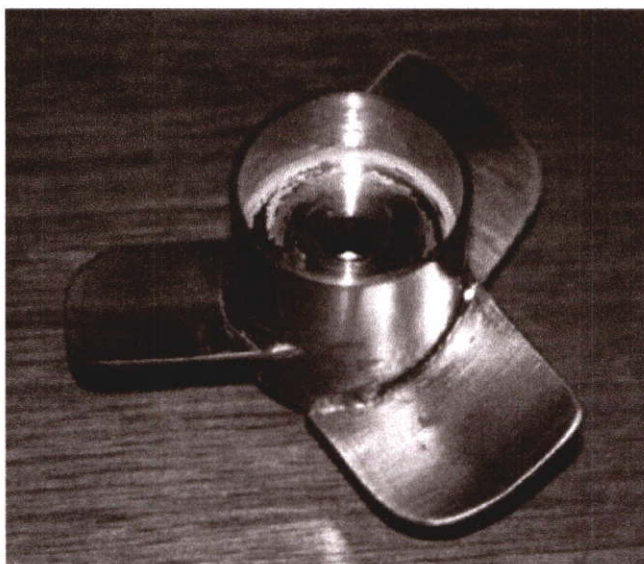
Top view of the bottom con



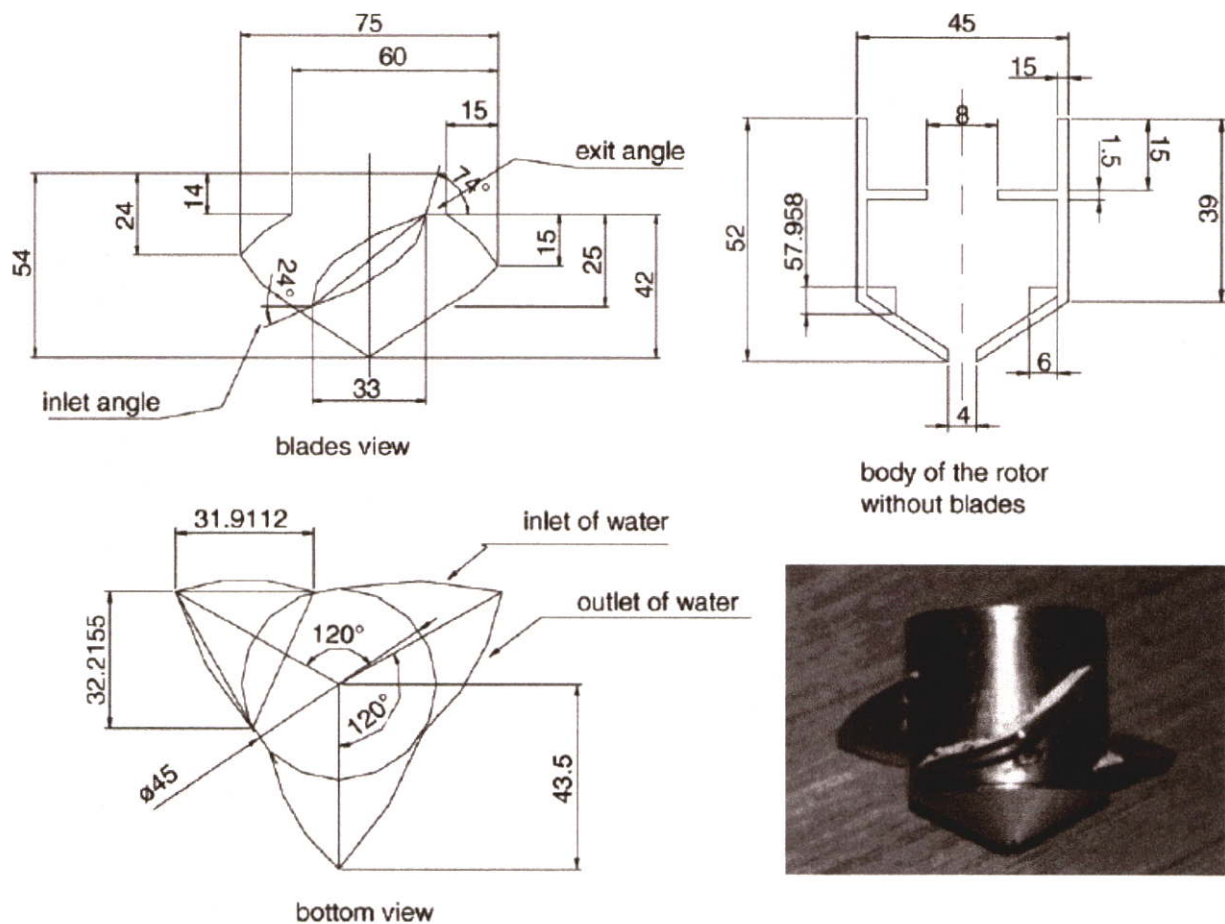
Bottom cone: details



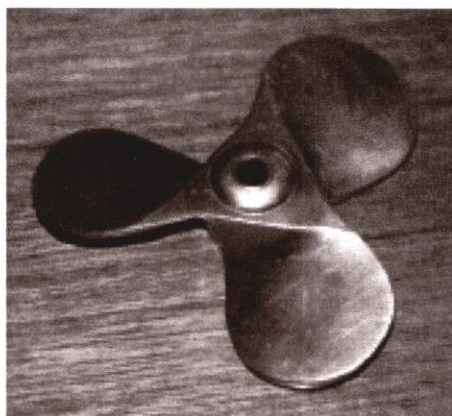
View B-B



รูปที่ 2.3 แสดงขนาด และรูปทรงใบพัด German1.



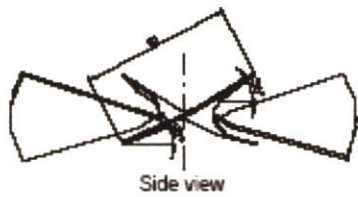
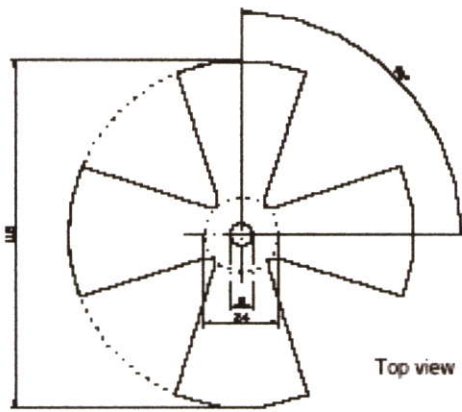
รูปที่ 2.4 แสดงขนาด และรูปทรงใบพัด German2.



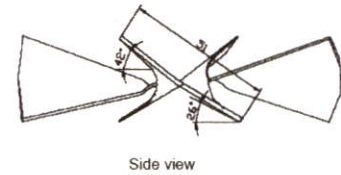
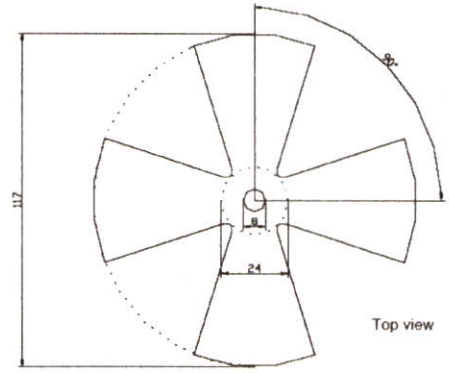
รูปที่ 2.5 แสดงรูปทรงใบพัด Conrad

ใบพัดแบบ Kinetic 1 เป็นการออกแบบที่ใช้มุมทางเข้าทางออกเหมือนกับ German1 ต่างที่จำนวนใบพัดเป็น 4 ดังแสดงในรูปที่ 2.6

ใบพัดแบบ Kinetic 2 เป็นการออกแบบที่ใช้มุมทางเข้าทางออกที่แตกต่างจากใบพัดอื่น แต่ยังคงใช้จำนวนใบพัดเท่ากับใบพัดแบบ Kinetic 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.7



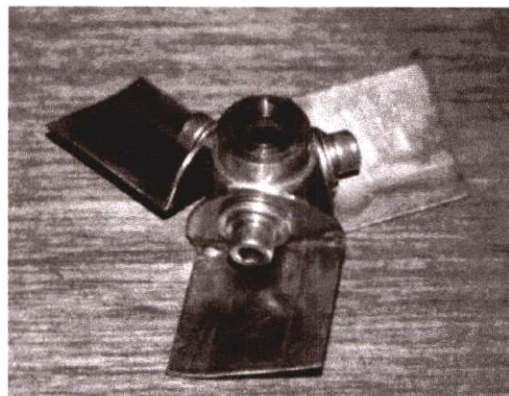
รูปที่ 2.6 แสดงขนาดใบพัด Kinetic 1  $\beta_1 = 21^\circ$



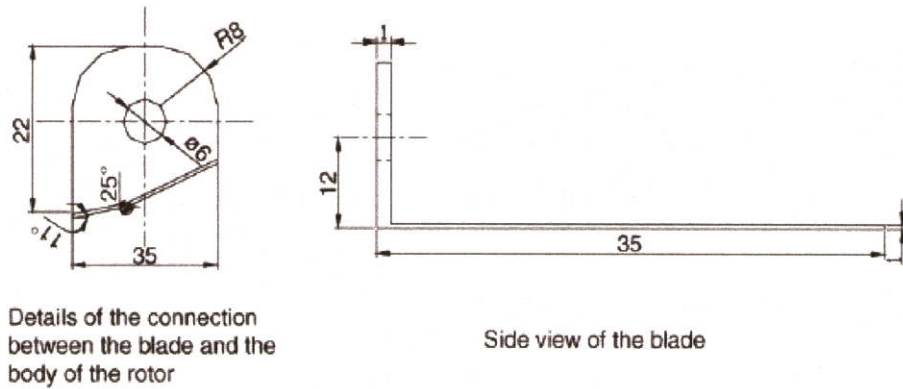
รูปที่ 2.7 แสดงขนาดใบพัด Kinetic 2  $\beta_1 = 26^\circ$

ตารางที่ 2.2 สรุปหลักเกณฑ์และผลในการออกแบบใบพัด Kinetic 3

Design steps	Results
1. Height of thrown water	0.5 m
2. Flow of water thrown by aerator	$0.009 \text{ m}^3/\text{s}$
3. $n$	1500 rpm
4. $n_s$ (specific speed)	12,360
5. Amount of paddles	3
6. Exit angle $\beta_2$	$27.5^\circ > \beta_2 > 15^\circ$
7. Exit angle for the tests	$\beta_2 = 25^\circ$
8. Approximate speed constant, $K_u$ (Stepanoff, 1993)	$K_u \approx 2.2$
9. Approximate value of $D_r$	$D_r = 0.09 \text{ m}$
10. Correct of value $D_r$	$D_r = 0.094 \text{ m}$
11. Head coefficient $\psi$ (Stepanoff, 1993)	$\psi = 0.098$
12. $K_u$	$K_u = 2.26$
13. Inlet angle $\beta_1$ and velocities (by drawing Euler's velocity triangle)	$\beta_1 \approx 11^\circ$
14. $P/k$ ratio: theoretical power/constant power of the pump	$P \approx 291 \text{ W}$



รูปที่ 2.8 รูปทรงใบพัด Kinetic 3



รูปที่ 2.9 แสดงขนาดใบพัด Kinetic 3

ใบพัด Kinetic 3 ข้อมูลของการออกแบบรูปทรงใบพัดนี้จะแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 รูปทรงใบพัดและขนาดของใบพัด แสดงดังรูปที่ 2.8 และ รูปที่ 2.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 สรุปขนาดรูปทรงใบพัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

Type of rotor	Inlet angle ( $i$ ), exit angle ( $o$ )	Width and length of paddle (mm)	Number of paddles	Total diameter (mm)
Flat 1	$i = o$ (tested angles: 30°, 45°, 60°, 70°)	20, 70	3	166
Flat 2	$i = o$ (tested angles: 30°, 45°, 60°, 70°)	20, 50	3	126
Flat 3	$i = o$ (tested angles: 30°, 45°, 60°, 70°)	35, 35	3	92
Flat 4	$i = o$ (tested angles: 30°, 45°, 60°, 70°)	35, 50	3	120
German 1	$i = 21^\circ; o = 36^\circ$	–	3	90
German 2	$i = 24^\circ; o = 74^\circ$	–	3	87
Conrad	$i = 25^\circ; o = 12^\circ$	–	3	104
Kinetic 1	$i = 21^\circ; o = 35^\circ$	–	4	118
Kinetic 2	$i = 26^\circ; o = 42^\circ$	–	4	117
Kinetic 3	$i = 11^\circ; o = 25^\circ$	35, 35	3	94 ( $\pm$ )

ส่วนที่ 2. ในส่วนนี้เป็นเนื้อหาส่วนหนึ่งในสามส่วน ที่นำใบพัดที่ถูกทำการออกแบบจากใน ส่วนที่ 1. นำมาทดสอบเพื่อประเมินหาประสิทธิภาพการเติมอากาศบนผิวน้ำ โดยใช้ใบพัดที่นำมาทำการทดลองเป็นจำนวน 23 ใบพัด โดยแบ่งตาม มุมทางเข้าและทางออกของใบพัด และเปอร์เซ็นต์การจมของใบพัด

จากการออกแบบใบพัดชื่อ “Kinetic 3” โดยใช้บรรทัดฐานของปั๊มการไหลในแนวแกน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 94 มิลลิเมตร โดยมีมุมทางเข้า 11 องศา และมุมทางออก 25 องศา ได้ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $1.769 \text{ kg O}_2 / \text{kWh}$  ที่มาตรฐานอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส (SAE =  $1.805 \text{ kg O}_2 / \text{kWh}$ ) และการออกแบบใบพัด “Conrad” โดยใช้บรรทัดฐานอื่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104 มิลลิเมตร มีมุมทางเข้า 25 องศา และมุมทางออก 12 องศา ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงสุดที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ  $3.249 \text{ h}^{-1}$  ส่วนค่าประสิทธิภาพการเติมอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ของใบพัดต่างๆ ดูได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าที่ได้จากการทดลองของใบพัดจำนวน 23 ใบพัด

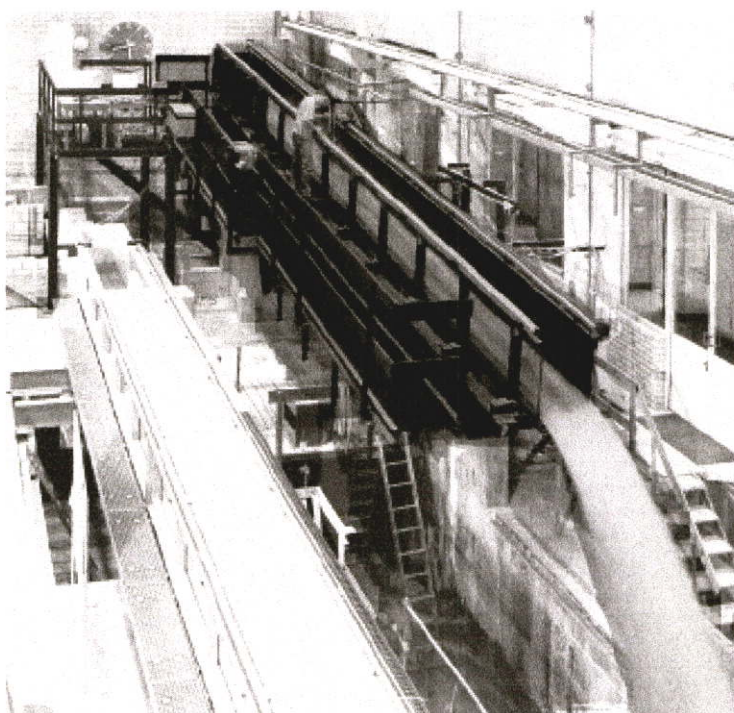
Kind of rotor	Angle (°)	% Immersion	$k_L a$ ( $h^{-1}$ )	Temperature (°C)	rpm	Power (W)	$Q/P$ ( $m^3/s W$ )
Flat 1**	60	58	1.6299	17.4	930	108	12.925
Flat 1*	45	62	2.1721	19.4	1670	109.8	17.9
Flat 2	45	164	2.7854	20.4	1110	79.04	20.769
Flat 3	45	124	1.9919	19.6	1900	51.03	21.037
Flat 3	45	152	2.6088	19.9	1880	58.56	23.604
Flat 3	60	140	2.4225	19.9	1850	65.34	20.439
Flat 3	70	109	2.445	19.6	1820	77.19	25.072
Flat 4	30	172	2.3019	18.6	1820	71.34	21.113
Flat 4	30	228	2.5989	18.6	1780	85.4	32.122
Flat 4	45	124	2.846	15.7	1760	87.12	21.067
Flat 4	45	152	3.3734	21.8	1630	109.35	25.950
Flat 4**	60	77	1.7375	16.2	1720	79.2	47.512
Flat 4*	60	110	2.5032	21.7	1610	124.8	19.253
Kinetic 1	21°, 35°	69	1.3483	22.5	1910	53.24	22.204
Kinetic 1	21°, 35°	96	1.863	19.9	1870	68.32	31.572
Kinetic 1	21°, 35°	119	2.7513	19.8	1810	77.44	N/A
Kinetic 2	26°, 42°	68	1.8256	19.8	1860	70.47	17.491
Kinetic 2	26°, 42°	94	2.7291	19.7	1800	87.84	23.748
Kinetic 2	26°, 42°	233	2.6438	19.5	1750	104.06	40.121
Kinetic 3	11°, 25°	92	1.6721	22.5	2020	24.6	38.477
Conrad	25°, 12°	238	3.918	17.9	1720	93.6	75.61
German 1	21°, 36°	235	3.1472	17.9	1670	110.4	76.11
German 2	24°, 74°	174	3.5138	17.9	1680	88.8	79.70

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าประสิทธิภาพของใบพัดที่ใช้ในการทดสอบ

Kind of rotor	Angle (°)	Immersion (%)	$k_L a_{10}$ ( $h^{-1}$ )	$OTR_{10}$ ( $g/m^3 h$ )	$Q/P$ ( $m^3/s kW$ )	$AE_{10}$ ( $kg/kWh$ )	$AE_{20}$ ( $kg/kWh$ )
Flat 1**	60	58	1.268	15.440	0.012925	0.525	0.535
Flat 1*	45	62	1.738	19.622	0.0179	0.679	0.693
Flat 2	45	164	2.177	24.573	0.020769	1.181	1.206
Flat 3	45	124	1.586	17.909	0.021037	1.299	1.326
Flat 3	45	152	2.063	23.29	0.023604	1.511	1.542
Flat 3	60	140	1.916	21.627	0.020439	1.324	1.351
Flat 3	70	109	1.947	21.983	0.025072	0.940	0.959
Flat 4	30	172	1.877	21.193	0.021113	1.129	1.152
Flat 4	30	228	2.119	23.928	0.032122	1.065	1.087
Flat 4	45	124	2.17	24.504	0.021067	1.041	1.062
Flat 4	45	152	2.55	28.789	0.025950	1.027	1.048
Flat 4**	60	77	1.5	16.934	0.047512	0.791	0.807
Flat 4*	60	110	1.897	21.413	0.019253	0.669	0.683
Kinetic 1	21°, 35°	69	1.002	11.317	0.022204	0.840	0.857
Kinetic 1	21°, 35°	96	1.473	16.632	0.031572	0.974	0.994
Kinetic 1	21°, 35°	119	2.181	24.62	N/A	1.208	1.233
Kinetic 2	26°, 42°	68	1.447	16.337	0.017491	0.881	0.899
Kinetic 2	26°, 42°	94	2.168	24.48	0.023748	1.059	1.081
Kinetic 2	26°, 42°	233	2.11	23.827	0.040121	0.87	0.888
Kinetic 3	11°, 25°	92	1.24	14.035	0.038477	1.769	1.805
Conrad	25°, 12°	238	3.249	36.677	0.07561	1.450	1.480
German 1	21°, 36°	235	2.609	29.461	0.07611	0.987	1.008
German 2	24°, 74°	174	2.913	32.893	0.07970	1.371	1.399

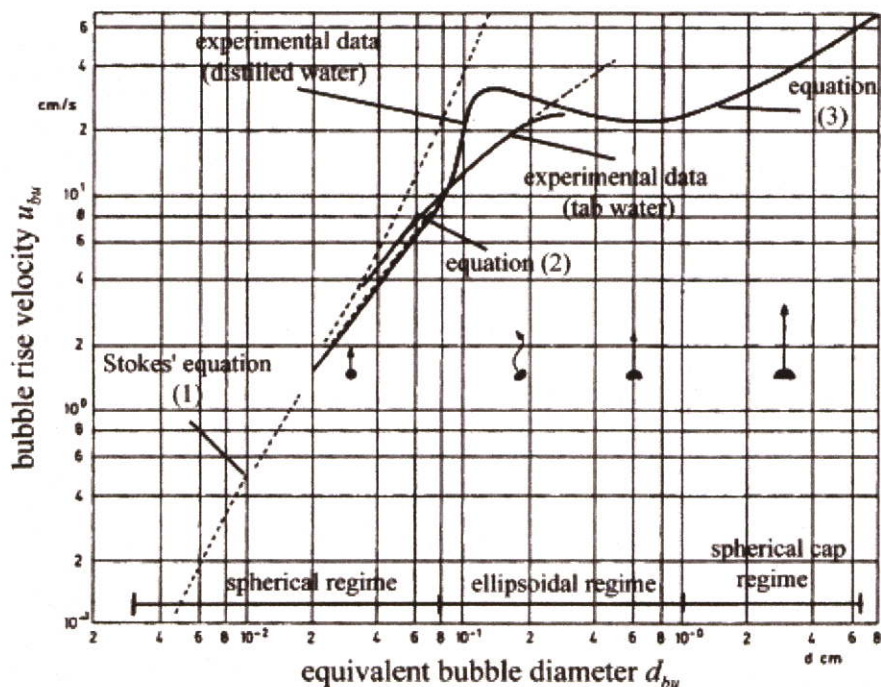
## 2.1.2 งานวิจัยของ Kristian Kramer และ Willi H. Hager [6]

ได้ทำการศึกษาการไหลผ่านทางลาดเอียง หากความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ จะพบว่า การลอยตัวของฟองอากาศจะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองเป็นหลัก และอิทธิพลพื้นฐานจาก แรงลอยตัว ความหนืด และแรงตึงผิว ในการไหลที่ความเร็วสูงจะมีแรงที่มากระทำกับฟองอากาศ สูงขึ้นตาม ซึ่งการไหลที่มีความเร็วสูงยังไม่มีการศึกษามากนัก เนื่องจากยังขาดเครื่องมือที่ใช้ในการวัด ดังนั้นงานวิจัยของ Kristian Kramer และ Willi H. Hager ได้ทำการศึกษาศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของอากาศในการไหลด้วยความเร็วสูงในรางที่มีความยาว 14 เมตร ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงเครื่องทดสอบการไหลความเร็วสูงในรางที่มีความยาว 14 เมตร

ความเร็วการลอยตัวของฟองอากาศในขณะน้ำอยู่นิ่ง จะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองอากาศ เป็นหลัก ซึ่งในงานวิจัยของ Kristian Kramer และ Willi H. Hager จะสมมุติให้รูปทรงของ ฟองอากาศให้เป็นทรงกลม เนื่องจากรูปทรงของฟองอากาศในความเป็นจริงจะมีรูปทรงที่ไม่ แน่นนอนค่อนข้างยากต่อการศึกษา จึงสมมุติให้รูปทรงทรงของฟองอากาศเป็นทรงกลม ซึ่งง่ายต่อ การพิจารณาสามารถหาความเร็วของฟองอากาศจากรูปที่ หรือสามารถคำนวณความเร็วอากาศได้ จากสมการ 2.1 ,2.2 ,2.3 และ 2.4 โดยที่  $\rho_a$  คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ,  $\rho_w$  คือ ค่าความ หนาแน่นของน้ำ และ  $d_{bu}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศในน้ำ



รูปที่ 2.11 ความเร็วฟองอากาศในน้ำนิ่งที่เป็นฟังก์ชันกับขนาดฟอง(Haberman and Morton, 1956)

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของฟองอากาศในน้ำ  $d_{bu} < 0.068$  mm (Falvey, 1980)

$$u_{bu} = \frac{2}{9} \frac{d_{bu}^2 g}{\nu} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \quad (2.1)$$

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของฟองอากาศในน้ำ  $0.068$  mm  $< d_{bu} < 0.80$  mm (Comolet, 1979)

$$u_{bu} = \frac{1}{18} \frac{d_{bu}^2 g}{\nu} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \quad (2.2)$$

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของฟองอากาศในน้ำ  $0.80$  mm  $< d_{bu} < 10$  mm (Kobus, 1991).

Comolet (1979)

$$u_{bu} = \sqrt{0.52 g d_{bu} + 2.14 \frac{\sigma_t}{\rho_w d_{bu}}} \quad (2.3)$$

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของฟองอากาศในน้ำ  $d_{bu} = 10$  mm (Falvey, 1980)

$$u_{bu} = \sqrt{g d_{bu}} \quad (2.4)$$

จะเห็นได้ว่าการออกแบบใบพัดที่กล่าวข้างต้น จะเป็นใบพัดแบบเติมอากาศบนผิวน้ำ ซึ่งน้ำที่บริเวณใต้น้ำที่ลึกลงไปที่ยังไม่ได้รับปริมาณออกซิเจน และไม่มีโอกาสที่จะขึ้นมารับออกซิเจนที่ผิวน้ำ เนื่องจากออกซิเจนได้เข้าไปแทนที่น้ำบนผิวน้ำ ทำให้น้ำที่อยู่บริเวณผิวน้ำมีความหนาแน่นน้อย ดังนั้นงานวิจัยจะทำการออกแบบใบพัดที่สามารถเติมอากาศบริเวณใต้น้ำ โดยปกติการเติมอากาศใต้น้ำมีวิธีการมากมาย ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียต่างกันไป แต่ในการออกแบบใบพัดของงานวิจัยนี้ จะเป็นการรวมข้อโดดเด่นของวิธีการเติมอากาศในแต่ละวิธี โดยเครื่องเติมอากาศสามารถเติมอากาศบริเวณใต้น้ำ และมีการกวนอากาศให้ผสมกับน้ำ เพื่อให้เกิดการละลายตัวที่ดีขึ้น ฟองอากาศที่เกิดจากบริเวณใต้น้ำ จะลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำโดยที่ความเร็วจะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองอากาศ ในขณะที่ฟองอากาศลอยตัวสู่ผิวน้ำ จะมีเวลาที่มีการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนอีก เมื่อน้ำบริเวณใต้น้ำรับปริมาณออกซิเจน ค่าความหนาแน่นของน้ำจะลดลง ทำให้เกิดการลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ ส่วนน้ำที่ยังไม่ได้รับปริมาณออกซิเจนจะจมลงสู่ใต้น้ำ

## 2.2 ระบบเติมอากาศ

ในการเติมอากาศลงไปใต้น้ำเสียจะใช้เครื่องเติมอากาศ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ (1) แบบตัวกระจายอากาศ (Diffused Aeration) (2) แบบตีน้ำ (Mechanical Aeration) และ (3) แบบใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (High – purity Oxygen) ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายในรายละเอียดของเครื่องเติมอากาศประเภทต่างๆ พร้อมประกอบและการออกแบบระบบเครื่องเติมอากาศพร้อมทั้งถังเติมอากาศด้วย

### 2.2.1 แบบตัวกระจายอากาศ (Diffused Aeration)

ระบบเติมอากาศแบบใช้ตัวกระจายอากาศ ซึ่งอาศัยหลักการให้อากาศที่เกิดจากเครื่องเป่าอากาศ หรือเครื่องสูดอากาศทำการพ่นหรือเป่าลงใต้น้ำเสีย โดยอาศัยตัวกระจายอากาศเป็นตัวจ่ายอากาศ โดยมากอากาศที่ถูกพ่นลงไปใต้น้ำจะมีลักษณะเป็นฟองอากาศ ซึ่งจะมีขนาดฟองอากาศขนาดต่างๆ ได้แก่ขนาดเล็ก (Fine bubble) ขนาดกลาง (Medium bubble) และขนาดใหญ่ (Coarse bubble) โดยจะได้อธิบายตัวกระจายอากาศที่ทำให้มีฟองอากาศขนาดต่างๆ พร้อมข้อมูลออกแบบด้วย

สำหรับการกระจายตัวอากาศ (Diffusers) ยังสามารถถูกแบ่งประเภทต่างๆ ได้อีกลักษณะคือ พิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของตัวกระจายอากาศ โดยได้แบ่งเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้ (1) แบบรูพรุนเล็ก (Porous diffusers) (2) แบบไม่ใช่รูพรุนเล็ก (Nonporous diffusers) (3) แบบอื่นๆ ซึ่งจะได้อธิบายเป็นหัวข้อๆ ต่อไปพร้อมข้อมูลออกแบบด้วย

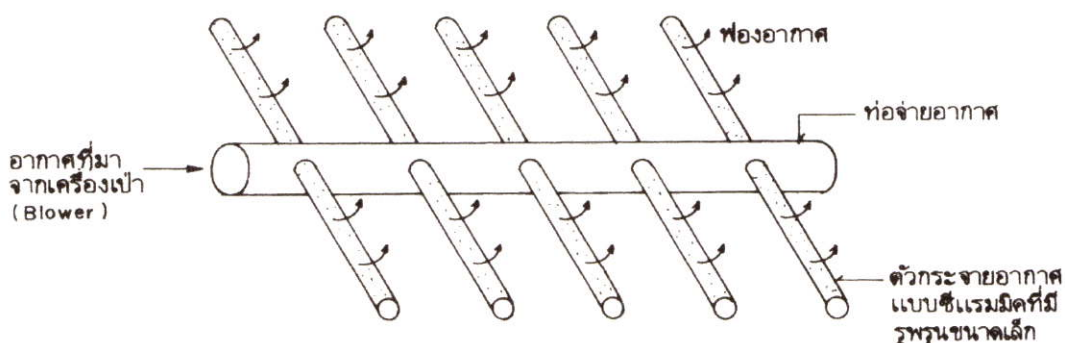
จากแบ่งประเภทต่างๆ ของตัวกระจายอากาศ (Diffused Aeration) พบว่าหนังสือบางเล่มได้แบ่งจากขนาดฟองอากาศ และหนังสือบางเล่มได้แบ่งจากลักษณะทางกายภาพของตัวกระจายอากาศ แต่หนังสือเล่มนี้จะขอแสดงการแบ่งประเภทของตัวกระจายอากาศทั้งสองลักษณะเพื่อให้

ผู้อ่านได้เข้าใจเป็นอย่างดีเกี่ยวกับตัวกระจายอากาศ ต่อไปนี้จะได้อธิบายประเภทต่างๆ ของตัวกระจายอากาศ สมรรถภาพของตัวกระจายอากาศ การจัดวางตัวกระจายอากาศในถังเดิมอากาศ เครื่องเป่าอากาศ ระบบท่อจ่ายอากาศ สรุปขั้นตอนในการออกแบบระบบตัวกระจาย

**1.ประเภทของตัวกระจายอากาศ** ตัวกระจายอากาศสามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ลักษณะคือ แบ่งตามขนาดฟองอากาศและแบ่งตามลักษณะทางกายภาพ โดยจะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไปนี้

### ก.แบ่งตามขนาดฟองอากาศ

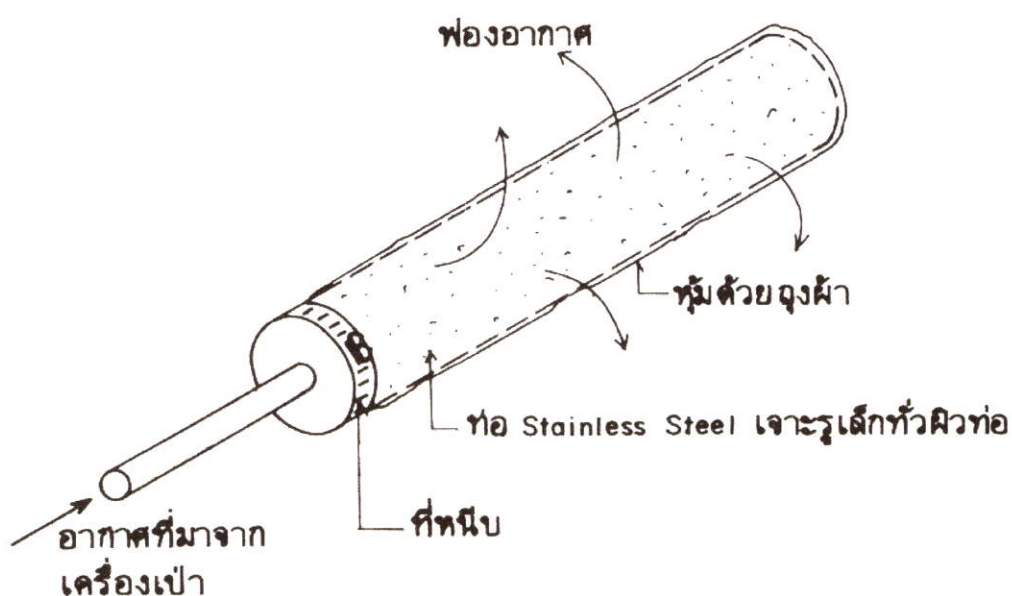
**ขนาดเล็ก (fine bubble)**ตัวกระจายอากาศจะมีรูพรุนขนาดรูจะเล็กมากอาจมีลักษณะเป็นแผ่น เป็นท่อ หรือเป็นหมวกยอดกลม(Dome) ซึ่งทำจาก Silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ )หรือ Aluminum Oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) โดยมีวัสดุยึดประสานพวกซีแรมมิก(Ceramic)เป็นตัวยึดประสานเป็นรูปร่างที่ต้องการ ตัวกระจายอากาศแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 10 ถึง 30% มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณสภาวะมาตรฐาน(น้ำประปาที่  $20^\circ\text{C}$  ณ ความดันหนึ่งบรรยากาศ ) เท่ากับ 1.2 ถึง 2.0  $\text{kg O}_2/\text{kW.hr}$  ขนาดของฟองอากาศจะมีขนาด 2.0 – 2.5 mm โดยทั่วไปตัวกระจายอากาศแบบนี้จะออกแบบให้สามารถจ่ายอากาศได้ในอัตรา 0.1-0.4  $\text{m}^3/\text{min}$  ต่อหัวข้อดีของตัวกระจายอากาศแบบนี้คือ สามารถทำการกวนน้ำได้ทั่วถึงกัน สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศที่พ่นเข้าไปในน้ำได้หรือน้อยตามต้องการ และประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนที่สูง สำหรับข้อเสียคือมีราคาแพงทั้งวัสดุและค่าบำรุงรักษา และควรติดตั้งเครื่องกรองอากาศด้วยเพื่อป้องกันการอุดตันในรูพรุนนั้น รูปลักษณะทั่วไปของตัวกระจายอากาศได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะทั่วไปของตัวกระจายอากาศแบบ Fine bubble

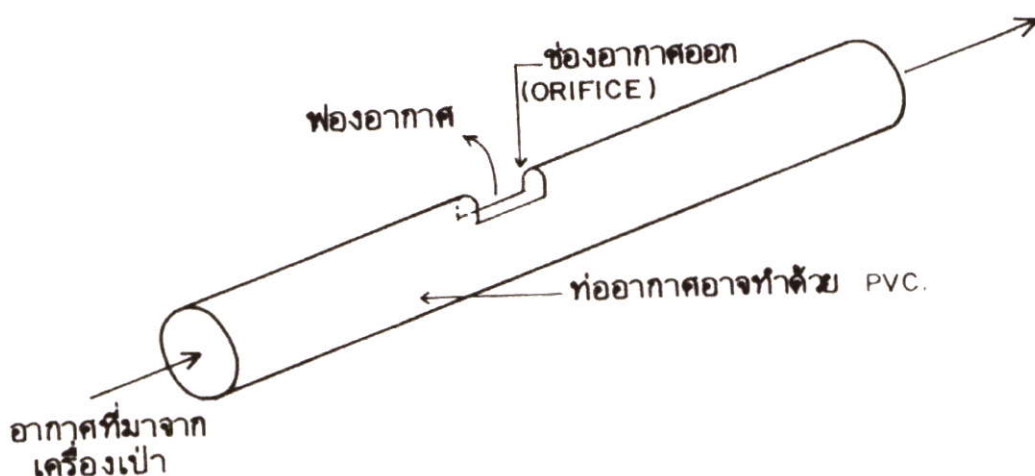
**ขนาดกลาง (Medium bubble)** ตัวกระจายอากาศจะมีรูพรุนขนาดรูจะมีขนาดกลาง โดยมากจะมีลักษณะเป็นท่อ ซึ่งทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) เจาะเป็นรูๆ และหุ้มด้วย

ถุงผ้ามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 7.5 cm และมีความยาวท่อเท่ากับ 61 cm ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.13 ตัวกระจายอากาศแบบนี้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 6 ถึง 15 % มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 1.0 ถึง 1.6 kg O<sub>2</sub>/kW.hr มีขนาดของฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 mm เล็กน้อย ข้อดีของตัวกระจายอากาศแบบนี้คือสามารถทำการกวนน้ำให้ทั่วถึงได้ดี ค่าบำรุงรักษาต่ำโดยเพียงแค่เปลี่ยนถุงผ้าที่หุ้มท่อเท่านั้น สำหรับข้อเสียคือมีราคาแพงทั้งวัสดุและค่าบำรุงรักษา และควรติดตั้งเครื่องกรองอากาศด้วยเพื่อป้องกันการอุดตันในรูพรุนและช่วยยืดอายุการใช้งาน



รูปที่ 2.13 ลักษณะทั่วไปของตัวกระจายอากาศแบบ Medium bubble

**ขนาดใหญ่ (Coarse bubble)** ตัวกระจายอากาศจะมีรูที่มีขนาดใหญ่กว่าของ ขนาดเล็ก และขนาดกลาง อาจมีลักษณะเป็นท่อ หรือเป็นหมวกยอดกลม (Dome) ตัวกระจายอากาศแบบนี้มี ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่าของ ขนาดเล็ก และขนาดกลาง โดยมีค่าประสิทธิภาพ ในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 4 – 8 % มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน(น้ำประปาที่ 20 °C ณ ความดันบรรยากาศ) เท่ากับ 0.6 ถึง 1.2 kg O<sub>2</sub>/kW.hr มีขนาดของฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 mm ข้อดีของตัวกระจาย อากาศแบบนี้คือไม่ค่อยมีปัญหาเรื่องการอุดตัน ดังนั้น ค่าใช้จ่ายใน การบำรุงรักษามีค่าต่ำ ไม่จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องกรองอากาศ สำหรับของเสียคือมีราคาแพง มี ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนต่ำมาก ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบนี้ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 2.14



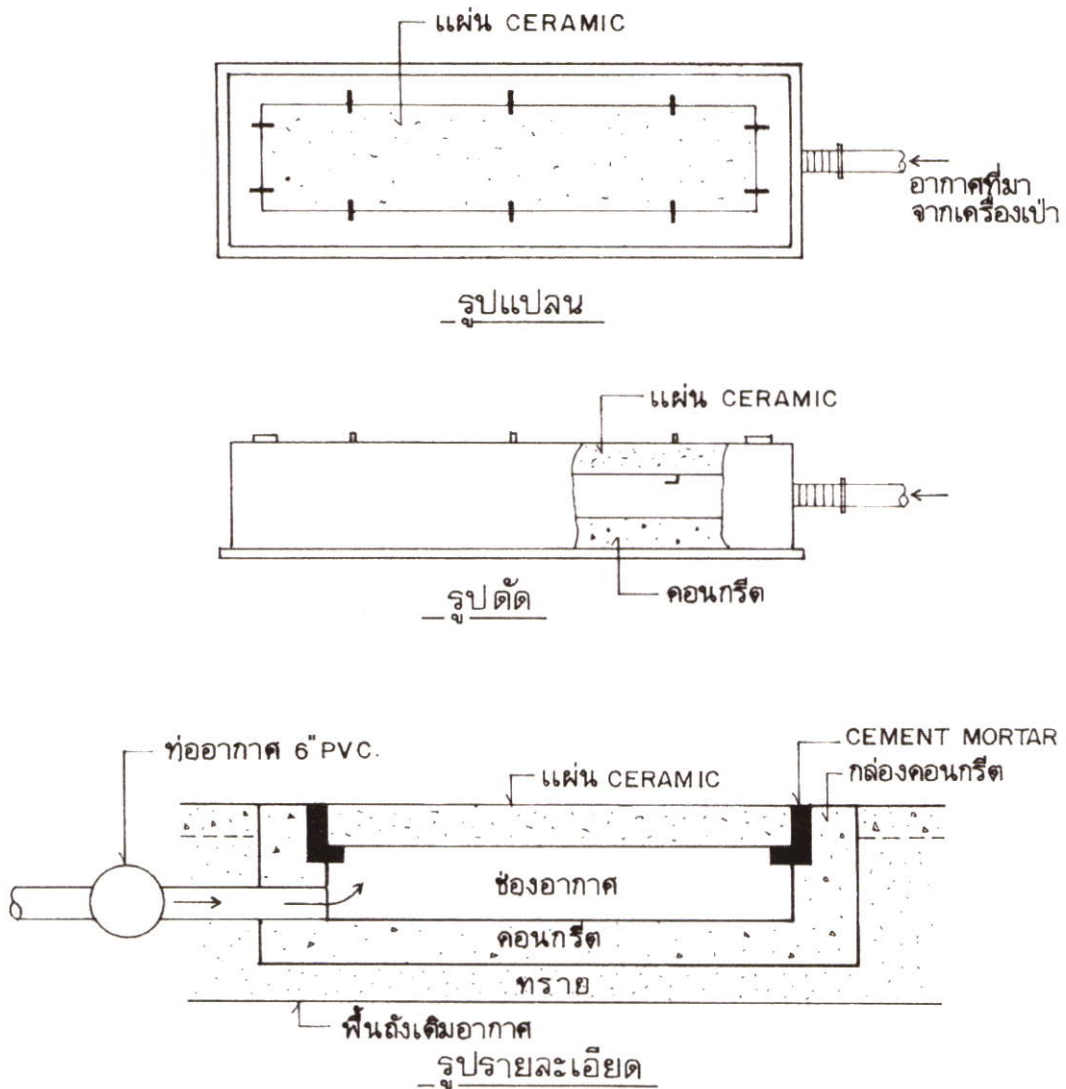
รูปที่ 2.14 ลักษณะทั่วไปของการกระจายอากาศแบบ Coarse bubble

#### ข.แบ่งตามลักษณะทางกายภาพ

**แบบรูพรุนเล็ก (porous diffusers)** ตัวกระจายอากาศแบบรูพรุนเล็กมีรูปลักษณะต่างๆ ได้แบบแผ่น (Plate diffusers) แบบท่อ (Tube diffusers) แบบหมวก (Dome diffusers) และแบบจานแผ่น (Disc diffusers) ตัวกระจายนี้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 6 – 30 % มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานเท่ากับ 1.0 – 2.0 kg O<sub>2</sub>/kW.hr ต่อไปนี้จะอธิบายในรายละเอียดของแบบต่างๆ

**แบบแผ่น (Plate diffusers)** ตัวกระจายอากาศแบบแผ่นอยู่ในกลุ่มของแบบรูพรุนเล็กมีลักษณะเป็นแผ่น Ceramic สีเหลืองขนาดกว้าง 30 cm ยาว 30 cmหนา 25 – 38 mm โดยมากจะทำจาก Silica หรือ Aluminum Oxide ที่มี Ceramic เป็นตัวยึดประสาน ตัวกระจายอากาศแบบนี้จะยึดติดกับพื้นของถังเติมอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.15 แผ่นกระจายจะถูกออกแบบจัดวางตำแหน่งที่เหมาะสมเป็นกลุ่มๆ โดยมีท่ออากาศเดินไปยังแต่ละกลุ่ม ซึ่งจะมิว่าล้วยควบคุมเปิดปิดของแต่ละกลุ่ม ข้อเสียของระบบนี้คือมีปัญหาการกระจายตัวของอากาศไปยังแต่ละกลุ่มอาจไม่เท่ากัน ไม่สะดวกในการถอดขึ้นมาบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนแผ่นเนื่องจากได้ถูกยึดกับพื้นถังเติมอากาศ มีความยุ่งยากมากในการเพิ่มตัวกระจายอากาศในถังเติมอากาศนี้ ไม่นิยมใช้กันมากนัก สำหรับข้อดีคือมีการกระจายตัวอากาศแบบแผ่นคือประสิทธิภาพในการถ่ายเทของออกซิเจนสูงและมีอายุการใช้งานนาน

**แบบท่อ (Tube diffusers)** ตัวกระจายอากาศแบบท่ออยู่ในกลุ่มของแบบรูพรุนเล็กมีลักษณะเป็นท่อ ซึ่งทำจาก Aluminum Oxide หรือพวก HDPE (High Density Polyethylene) หรือพวก Styrene – acrylonitrile copolymer โดยอาจเป็นของแข็ง (Rigid) หรือแบบโค้งงอได้ (Nonrigid) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ตัวกระจายอากาศแบบท่อแข็งนี้ โดยทั่วไปมีขนาดยาว 50 – 60 cm มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 6.5 – 2.5 mm แบบผิว HDPE จะมีความหนา 6.4 mm

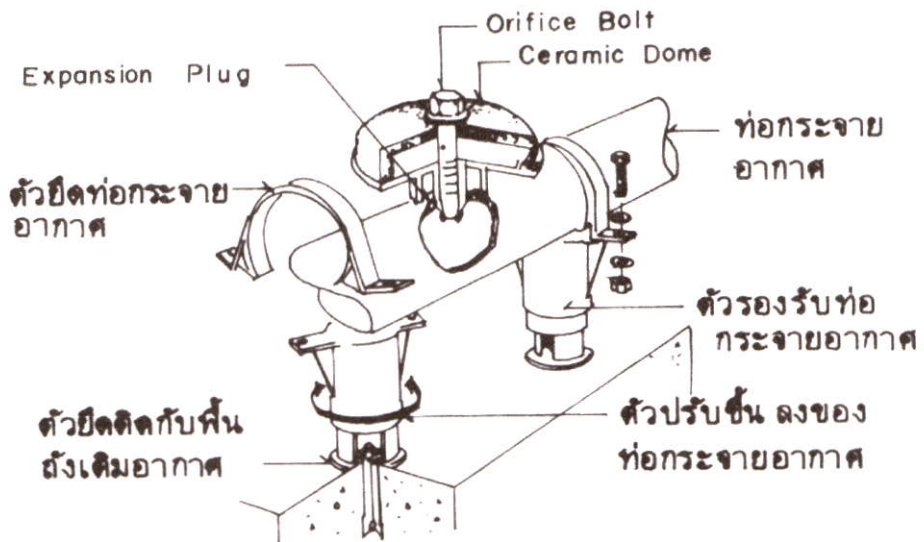
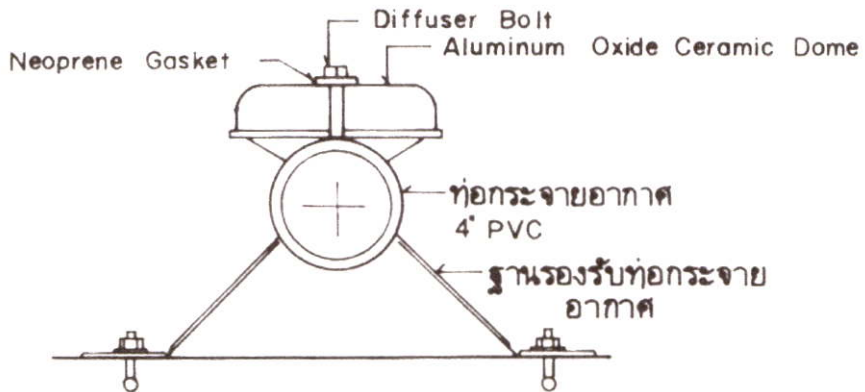
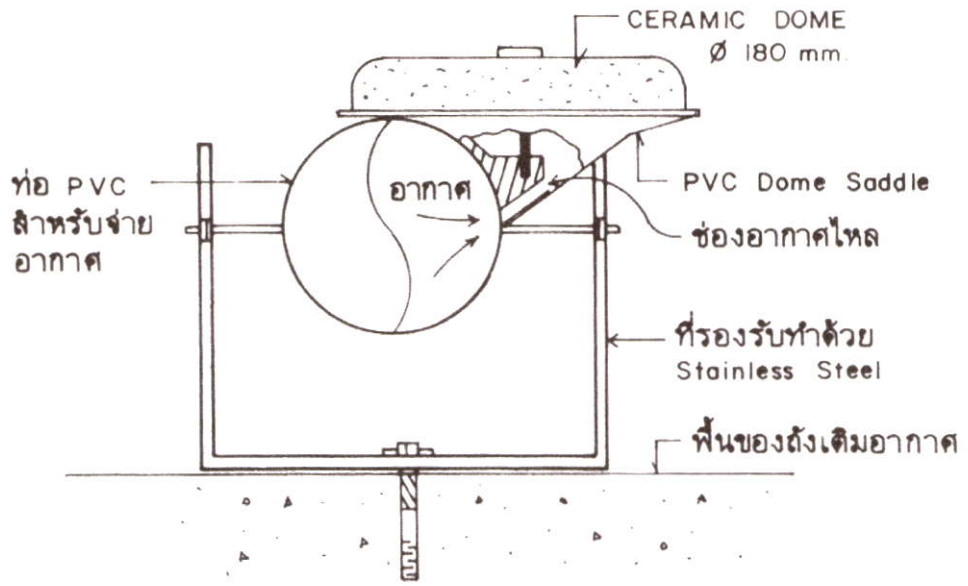


รูปที่ 2.15 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบแผ่น (Plate Diffusers)

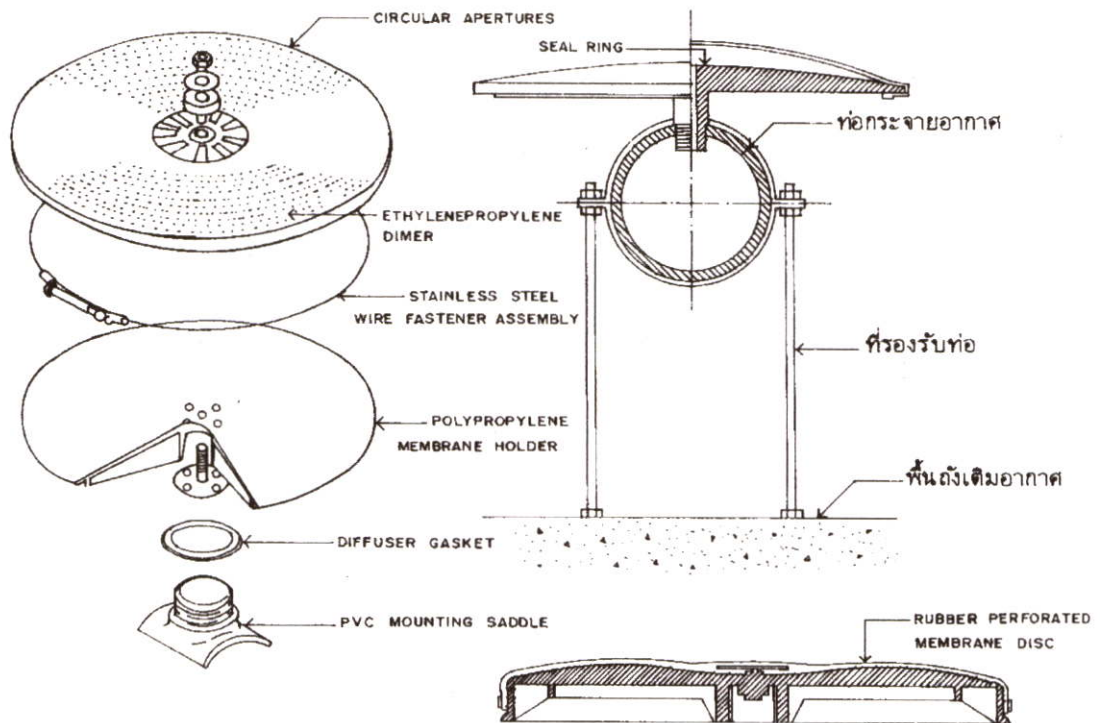
แบบผิว Styrene – acrylonitrile จะมีความหนา 15 mm และแบบผิว ceramic จะมีความหนา 9.5 – 12.7 mm สำหรับตัวกระจายตัวอากาศแบบท่อโค้งงอได้นี้โดยทั่วไปจะเป็นพวก HDPE มีขนาดความยาวถึง 90 cm มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 25 mm และมีความหนาประมาณ 3 mm โดยทั่วไปตัวกระจายอากาศแบบท่อที่มีความยาว 50 – 60 cm สามารถออกแบบให้มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.5 – 4.7 ลิตรต่อวินาทีต่อตัวกระจายอากาศหนึ่งตัว

**แบบหวมกยอคกลม(Dome diffusers)** ตัวกระจายอากาศแบบหวมกยอคกลมอยู่ในกลุ่มของแบบรูพรุนเล็กมีลักษณะเป็นหวมกกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 18 ซม. มีความหนาประมาณ 38 มม. มีแผ่นกระจายอากาศ (Media) บริเวณของขอบรอบๆ หวมกและบริเวณส่วนผิวบนของหวมก ซึ่งมีความหนาประมาณ 15 มม. และ 19 มม. ตามลำดับ โดยทำด้วย Aluminum Oxide ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบหวมกยอคกลมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 ซึ่งตัวกระจาย





รูปที่ 2.17 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบหมวกยอดกลม (Dome Diffusers)



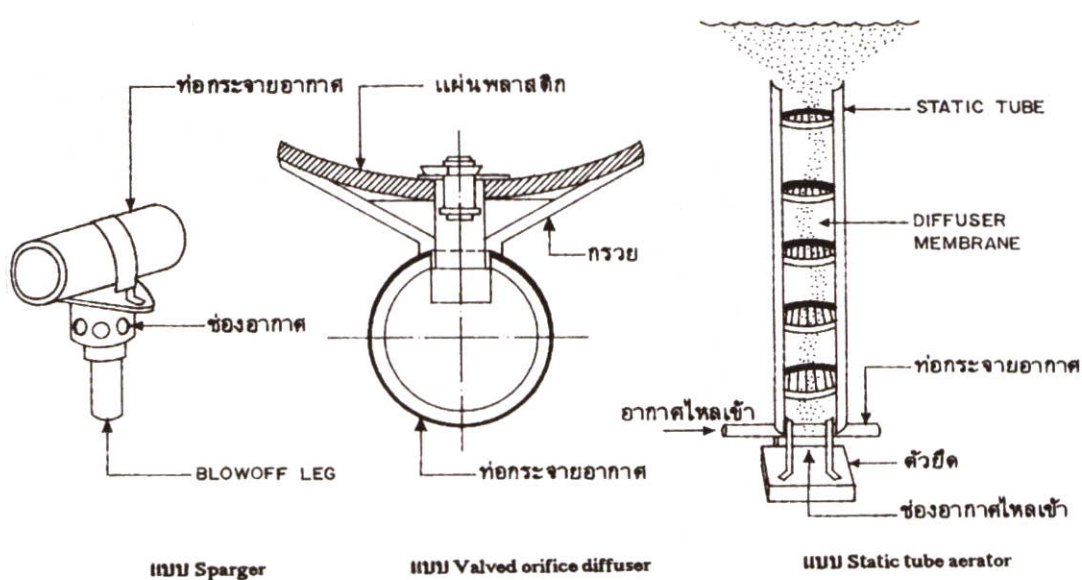
รูปที่ 2.18 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบแผ่นงาน (Disc Diffusers)

**แบบไม่ใช่รูพรุนเล็ก (Nonporous diffusers)** ตัวกระจายอากาศแบบ Nonporous diffusers มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่พวก ได้แก่พวก Fixed, Orifice พวกValved orifice พวกstatic tubes พวกPerforated hose ซึ่งจะได้อธิบายสรุปไว้ในตารางที่ 2.7 และในรูปที่ 2.19 ได้แสดงรูปลักษณะอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ Spargers, Valved orifice diffuser และ static tube aerator ตัวกระจายแบบนี้จะมีฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่าของแบบรูพรุนเล็ก ดังนั้นจึงเป็นแบบที่มีประสิทธิภาพในการเติมอากาศต่ำกว่าแบบรูพรุนเล็ก แต่มีข้อดีคือราคาถูกกว่าและบำรุงรักษาต้องการน้อยกว่าสำหรับแบบ Static tube aerator อากาศที่ถูกกระจายเข้าไปในตัวกระจายอากาศจะเข้าไปในส่วนล่างของแท่งซึ่งมีความสูงตั้งแต่ 0.50 ถึง 1.25 ม. โดยภายในตัวแท่งมีตัวหักเหติดตั้งเป็นช่วงๆ เพื่อเพิ่มการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำเสีย การกวนของระบบนี้จะเปรียบเสมือนกับเครื่องสูบน้ำแบบ Airlift ในการติดตั้ง Static tube aerator โดยทั่วไปจะติดตั้งในลักษณะเป็นแถวๆ ทั่วบริเวณพื้นตั้งเติมอากาศ สำหรับตัวกระจายแบบไม่ใช่รูพรุนเล็กนี้จะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 4 – 8 % มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 0.6 – 1.0 กก.  $O_2$ /(กิโวลต์.ชม.) ยกเว้นของแบบ Static tube aerator ที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 7 – 10% มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 1.2 – 1.6 กก.  $O_2$ /(กิโวลต์.ชม.)

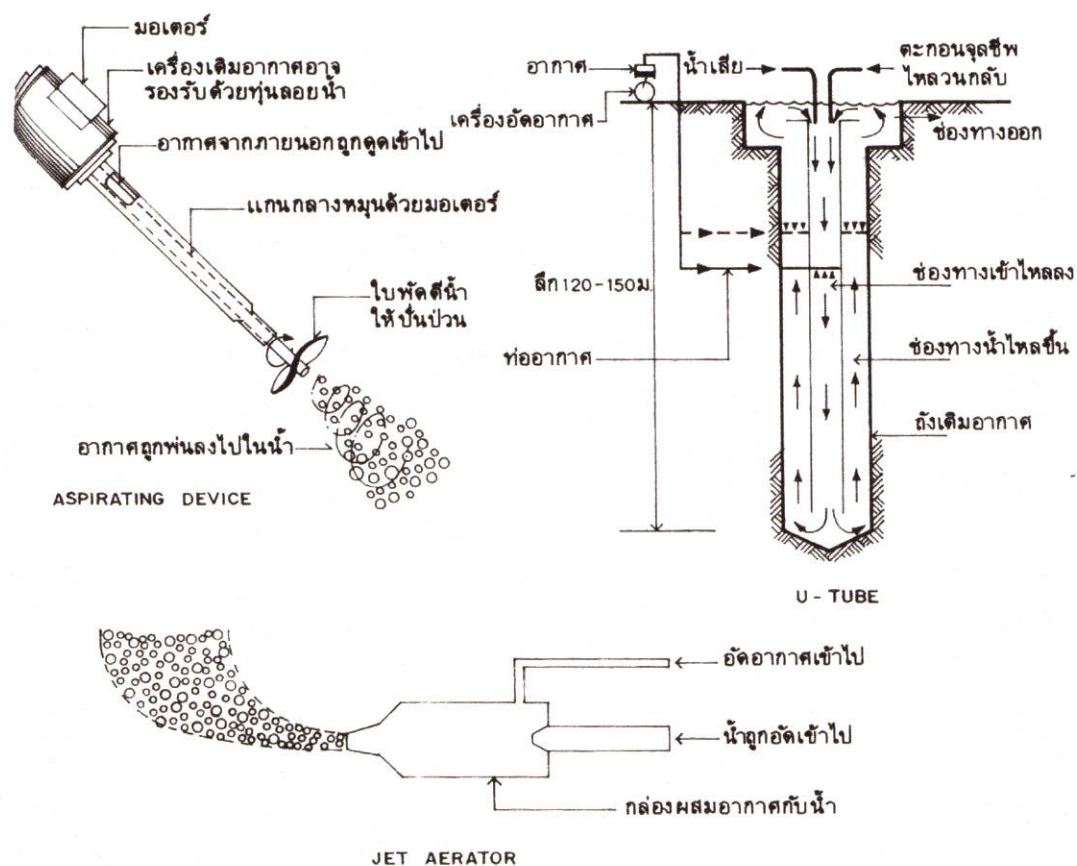
ตารางที่ 2.7 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบ Nonporous diffusers

ชนิดของตัวกระจายอากาศ	ลักษณะของตัวกระจายอากาศ
Fixed Orifice แบบ Perforated piping แบบ Spargers แบบ Slotted tube	ท่อกระจายอากาศที่มีรูเล็กตลอดตามยาวของท่อ อาจเป็นท่อ PVC, PE ฯลฯ เป็นตัวกระจายอากาศทำด้วยพลาสติกและติดตั้งกับท่อกระจายอากาศ ท่อกระจายอากาศถูกเจาะเป็นช่องแฉกและยาว (slot) มักทำด้วย Stainless Steel
Valved Orifice	ตัวกระจายอากาศแบบนี้จะมี check valve เพื่อไม่ให้เกิดน้ำไหลเข้าไปขณะที่ปิดเครื่องจ่ายอากาศ โดยตัวกระจายอากาศจะติดตั้งเข้ากับท่อกระจายอากาศ
Static Tubes	ตัวกระจายอากาศจะตั้งอยู่บนพื้นดั้งเดิมอากาศในแนวตั้ง ทำหน้าที่เหมือนกันกับเครื่องสูบน้ำแบบ Airlift
Perforated Hose	ตัวกระจายอากาศแบบนี้เป็นท่อยาวและอ่อนที่มีรูเล็กตลอดตามยาวของท่อ และจะยึดติดกับพื้นดั้งเดิมอากาศ

แบบอื่นๆ ตัวกระจายอากาศแบบอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวได้แก่พวก Jet พวก Aspirating และพวก U-tube พร้อมทั้งได้แสดงในรูปลักษณะไว้ในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบไม่ใช่รูพรุนเล็ก (Nonporous diffusers)



รูปที่ 2.20 ลักษณะของตัวกระจายอากาศแบบอื่นๆ

**2.สมรรถภาพของตัวกระจายอากาศ** การพิจารณาเลือกใช้ตัวกระจายอากาศควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน โดยมีปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

- 1) ชนิด ขนาด รูปร่างของตัวกระจายอากาศ
- 2) อัตราการไหลของอากาศที่พ่นเข้าไปในน้ำ
- 3) ความลึกของน้ำที่ต้องการพ่นอากาศเข้าไป
- 4) ขนาดรูปร่าง กว้าง ยาว ลึก ของถัง
- 5) การเลือกตำแหน่งของตัวกระจายอากาศบนพื้นถังเติมอากาศ
- 6) ลักษณะของน้ำเสีย
- 7) ขนาดของฟองอากาศ
- 8) การปั่นป่วนของน้ำในถังเติมอากาศ

ตัวกระจายอากาศที่ได้กล่าวถึงมาแล้ว ได้ถูกนำมาหาสมรรถภาพของตัวกระจายอากาศแต่ละตัวในน้ำสะอาด ที่สภาวะมาตรฐาน (น้ำประปาที่ 20 องศาเซลเซียส ณ ความดันหนึ่งบรรยากาศ) โดยผลของการหาสมรรถภาพได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วยค่าอัตราการไหลของอากาศต่อตัวกระจายอากาศ ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน ณ ระดับความลึกต่างๆ

ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำ ของตัวกระจายอากาศจะมีค่าลดลง เนื่องจากสิ่งสกปรกต่างๆ เกาะบริเวณผิวช่องกระจายอากาศ ซึ่งโดยมากจะมาจากเมือกจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ต่างๆ ที่เป็นตะกอน หรือเศษหินดินทรายต่างๆ และอาจเนื่องจากเกิดจากอูคตันขึ้นภายในตัวกระจายอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุที่เกิดขึ้นมาจากสิ่งสกปรกในอากาศ โดยปราศจากการติดตั้งเครื่องกรองอากาศ ดังนั้นจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องกรองอากาศ และจำเป็นต้องหมั่นทำความสะอาดตัวกระจายอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำ

ในการพิจารณาข้อมูลที่ได้รับในตารางที่ 2.8 นี้ ซึ่งใช้สำหรับการเติมอากาศลงไปใต้น้ำที่สะอาด ณ สภาพมาตรฐานเท่านั้น เพราะลักษณะของน้ำเสียจะมีผลอย่างมากต่อการถ่ายออกซิเจนลงไปใต้น้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบเติมอากาศแบบที่ใช้ตัวกระจายอากาศ ยกตัวอย่างเช่น พวกผงซักฟอก พวกตะกอนละลายในน้ำและพวกตะกอนแขวนลอยต่างๆ พวกเหล่านี้อาจทำให้ขนาดและรูปร่างของฟองอากาศเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจจะมีผลต่อประสิทธิภาพของการเติมอากาศลงไปใต้น้ำ โดยทั่วไปค่า สำหรับระบบเติมอากาศแบบมีฟองอากาศขนาดเล็กจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.9

ตารางที่ 2.8 สมรรถภาพของตัวกระจายอากาศแบบต่างๆ

ชนิดของตัวกระจายอากาศ	อัตราการไหลของอากาศผ่านตัวกระจายอากาศ (ลบ.ม/(นาท.ตัวกระจายอากาศ))	ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำ (%) ณ สภาพมาตรฐานของระดับน้ำลึกต่าง ๆ		
		8 ม.	4.5 ม.	6.0 ม.
แบบแผ่นจาน Ceramic-Grid	0.01 - 0.10	20-25	25-40	31-41
แบบหมวกกลม Ceramic-Grid	0.01-0.07	16-26	27-39	28-47
แบบแผ่น Ceramic-Grid	0.60-1.50 <sup>ก</sup>	-	26-33	-
แบบท่อพลาสติกแข็งที่มีรูพุนเล็ก				
Grid	0.07-0.11	-	28-32	-
Dual spiral roll	0.08-0.31	10-16	17-28	21-32
Single spiral roll	0.06-0.34	10-15	13-25	22-25
แบบท่อพลาสติกโค้งงอได้ที่มีรูพุนเล็ก				
Grid	0.03-0.20	-	26-36	-
Single spiral roll	0.06-0.20	-	19-37	-
แบบ Perforated membrane tubes				
Grid	0.03-0.11	14-18	22-29	29-35
Quarter points	0.06-0.17	13-15	19-24	24-29
Single spiral roll	0.06-0.17	7-11	15-19	21-28
แบบ Jet aeration				
Side header	1.50-8.50	-	15-24	-
แบบ ไม่ใช้รูพุนเล็ก				
Dual spiral roll	0.09-0.28	-	12-13	-
Mid-width	0.12-1.27	-	10-13	-
Single spiral roll	0.28-1.00	-	9-12	-

<sup>ก</sup> มีหน่วยเป็น ลบ.ม./(คร.ม.ตัวกระจายอากาศ.นาท.)

ในการออกแบบควบคุมระบบเดิมอากาศในถังเดิมอากาศ ที่มีตะกอนแขวนลอยจุลชีพ และมี BOD ของน้ำเสียผสมกันอยู่ จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบและผู้ควบคุมระบบเดิมอากาศ เพื่อให้ได้ปริมาณอากาศที่เดิมเข้าไป เหมาะสมคือ ต้องมีปริมาณอากาศที่เดิมลงไปไม่มากหรือน้อยเกินไป และไม่ควรนำข้อมูลปริมาณอากาศที่เดิมลงไปในถังเดิมอากาศของโรงบำบัดน้ำเสียอื่น ๆ มาใช้โดยตรงเพราะมีปัจจัยอื่นๆ อีกมากมายที่จะไม่เหมือนกับของโรงบำบัดน้ำเสียที่กำลังออกแบบหรือกำลังควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียอยู่ก็ตาม จากเอกสารหลายแหล่งพบว่าในบางครั้งการเพิ่มปริมาณอากาศมากขึ้น ลงไปในถังเดิมอากาศหรือเพิ่มการหมุนเวียนของน้ำให้เร็วขึ้น อาจทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลดลงก็ได้ ซึ่งอาจมาจากสาเหตุที่ว่าฟองอากาศที่อยู่ในถังเดิมอากาศมีเวลาเก็บกักสั้นกว่า พร้อมทั้งขนาดของฟองใหญ่กว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวรวมของฟองอากาศน้อยกว่า

สำหรับการทำความสะอาดตัวกระจายอากาศควรหมั่นทำสม่ำเสมอเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเติมอากาศอย่างสูงสุดที่ควรจำเป็น วิธีการทำความสะอาดตัวกระจายอากาศมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับการทำงานและชนิดของตัวกระจายอากาศ ในตารางที่ 2.9 ได้แสดงวิธีการทำความสะอาดตัวกระจายอากาศ

**3.การจัดวางตัวกระจายอากาศในถังเดิมอากาศ** การจัดวางตัวกระจายอากาศในพื้นที่เดิมอากาศมีความสำคัญมากต่อการเติมอากาศ การจัดวางตัวกระจายอากาศในถังเดิมอากาศต้องการให้การกวนน้ำที่พอเพียงทั่วทั้งถัง โดยการจัดวางตัวกระจายแบบต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.19 ระยะห่างระหว่างตัวกระจายอากาศเพื่อให้มีเพียงพอกับการเดินไปทำการบำรุงรักษาตัวกระจายอากาศแต่ละตัวได้สะดวก โดยปกติระยะห่างระหว่างขอบถึงขอบของตัวกระจายอากาศควรมีอย่างต่ำ 50 ซม.

**4.เครื่องเป่าอากาศ** เครื่องเป่าอากาศมีด้วยกันหลายประเภท ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ก่อนที่จะเริ่มอธิบายในรายละเอียดของเครื่องเป่าอากาศจะได้สรุปความหมายของคำต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

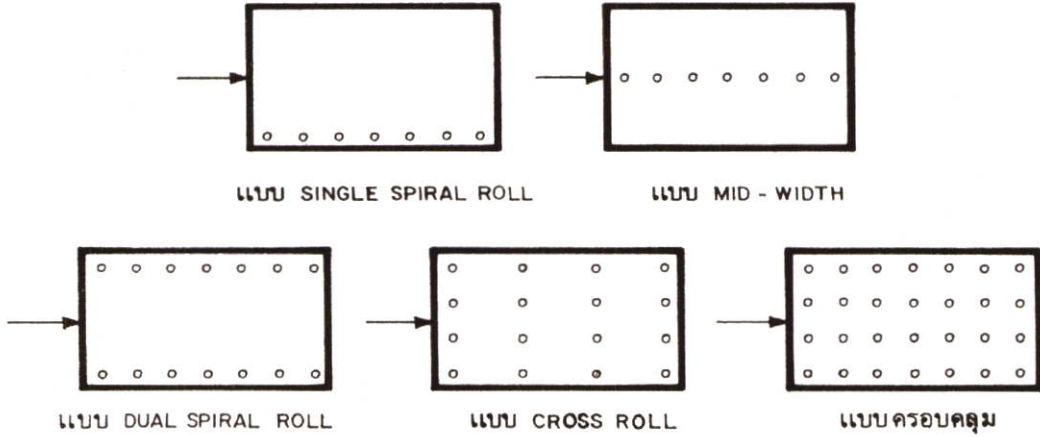
**เครื่องเป่าอากาศ (blower)** คือเครื่องที่ทำให้อากาศมีความดันถึง 1.0 ความดันบรรยากาศหรือประมาณ 15 ปอนด์ต่อ ตร.นิ้ว

**พัดลม (Fan)** คือเครื่องที่ทำให้อากาศมีความดันสูงถึง 0.14 ความดันบรรยากาศ หรือประมาณ 2 ปอนด์ต่อ ตร. นิ้ว

**เครื่องอัดอากาศ (Compressor)** คือเครื่องที่ทำให้อากาศมีความดันมากกว่า 1.0 ความดันบรรยากาศหรือมากกว่า 15 ปอนด์ต่อ ตร.นิ้ว

ตารางที่ 2.9 วิธีการทำความสะอาดตัวกระจายอากาศ

วิธีการทำความสะอาดตัวกระจายอากาศ	รายละเอียด
<p><b>แบบถอดออกมาทำความสะอาด :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>การนำมาเผาอบใหม่</li> <li>การใช้ Silicate-phosphorus ล้าง</li> <li>การใช้ค่างล้าง</li> <li>การใช้กรดล้าง</li> <li>การใช้ผงซักฟอกล้าง</li> <li>การใช้น้ำที่มีแรงดันสูงฉีด</li> </ul>	<p>ใช้ความร้อนสูงเหมือนกับกระบวนการผลิต มีราคาแพง พวก Hydroxides ต่าง ๆ พวกสารละลาย HCl 14% แช่ไว้ 30 นาที พวกผงซักฟอก พวกน้ำยาล้างจาน ฯลฯ แช่ไว้จนสะอาด ใช้แรงดัน 4 บรรยากาศ</p>
<p><b>แบบทำความสะอาดในดั้งเดิมอากาศ</b> <b>โดยหยุดการทำงานชั่วคราว:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>การใช้กรดล้าง</li> <li>การใช้เปลวไฟ</li> <li>การใช้น้ำที่มีแรงดันสูงและค่าฉีด</li> <li>การหยุดการเติมน้ำเสียเข้าดั้งเดิมอากาศ Sandblasting</li> <li>การใช้คลอรีนล้าง</li> <li>การใช้ไอน้ำล้าง</li> <li>การใช้น้ำมันเบนซินล้าง</li> <li>การทำให้แห้ง Ultrasonic</li> </ul>	<p>ใช้ HCl 14% ฉีดเข้าไปตามด้วยฉีดน้ำหรือไอน้ำด้วย แรงดันสูง ใช้เปลวไฟทำความสะอาดแต่ละตัวกระจายอากาศ ใช้น้ำที่มีแรงดันสูงและค่าฉีดสลับกันไป (&gt; และ &lt; 4 บรรยากาศ) เพื่อให้เกิดสภาวะ Endogenous ใช้วิธีฉีดดูโดยอาศัยทราย ใช้คลอรีนฉีดเข้าไปเพื่อทำความสะอาด ใช้ไอน้ำฉีดเข้าไปเพื่อทำความสะอาด ใช้น้ำมันเบนซินล้างตัวกระจายอากาศ ทำให้แห้งโดยการเป่าลมร้อน ใช้ความถี่ระดับที่สูงมาก ๆ</p>
<p><b>แบบทำความสะอาดในดั้งเดิมอากาศโดย</b> <b>ไม่ต้องหยุดการทำงาน :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>การใช้กรดฉีดล้าง</li> <li>การใส่เป่าอากาศแบบสูง-ต่ำ สลับกันไป</li> </ul>	<p>ใช้กรด HCl หรือกรดฟอร์มิก (Formic acid) ฉีด ผสมไปกับอากาศประมาณ 30 นาที ใส่เป่าอากาศที่มีอัตราไหลสูงของอากาศประมาณ 5 นาที แล้วจึงปรับอัตราไหลลงสู่สภาพปกติ ทำสลับ กันไปหรืออาจใช้การฉีดก๊าซ HCl เข้าช่วยด้วย</p>



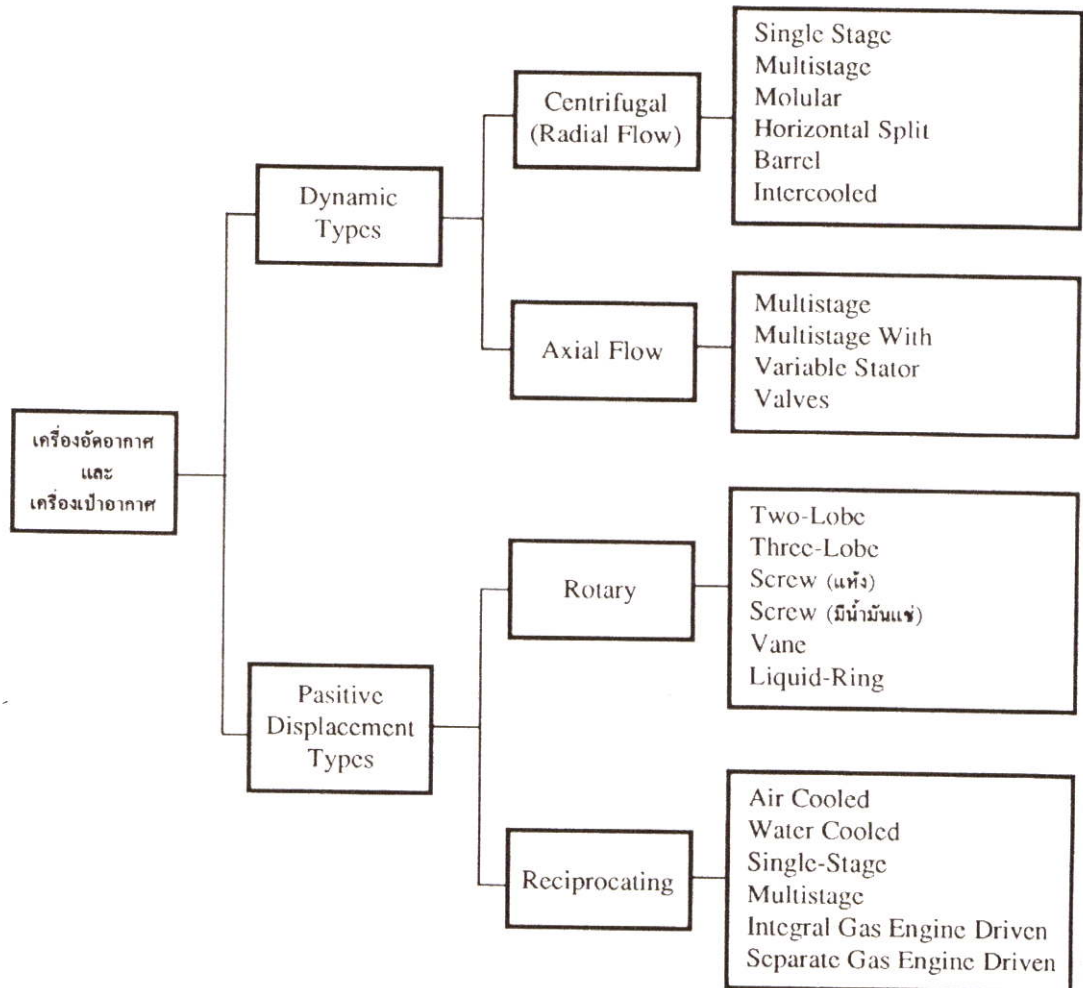
รูปที่ 2.21 การจัดวางตัวกระจายอากาศในถังเติมอากาศ

ตารางที่ 2.10 ปัจจัยที่ใช้ในการเลือกเครื่องเป่าอากาศประเภท Rotary Displacement และ Centrifugal Blowers

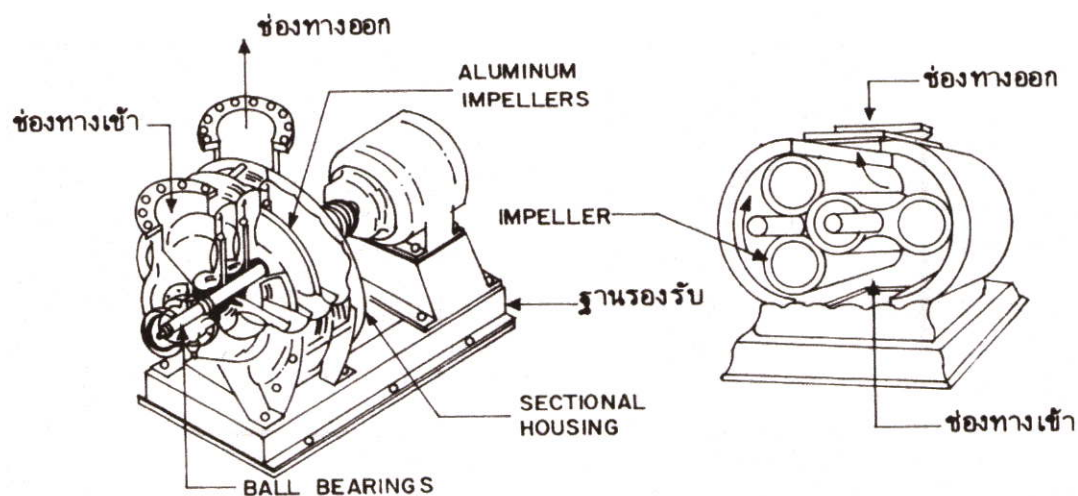
ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการเลือกใช้	ประเภท Rotary Displacement Units	ประเภท Centrifugal Blowers
1. ระดับความดันอากาศที่ใช้	มากกว่า 0.50 ความดันบรรยากาศ (8 psi)	0.45-0.60 ความดันบรรยากาศ (7-9 psi)
2. อัตราการไหลของอากาศที่ใช้	น้อยกว่า 85 ลบ.ม.ต่อนาที	มากกว่า 85 ลบ.ม.ต่อนาที
3. การควบคุมอัตราการไหลของอากาศ	ใช้ควบคุมความเร็วหมุนของเครื่องเป่าอากาศ	ใช้วาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศ
4. ประสิทธิภาพการทำงาน	มีสูงกว่า	มีต่ำกว่า
5. ระดับความดันมีช่วงกว้าง	มีช่วงกว้างกว่า	มีช่วงแคบมาก
6. ขณะทำงานมีเสียงรบกวน	มีเสียงรบกวนมาก	มีเสียงรบกวนน้อย
7. ความต้องการฐานรองรับเครื่อง	ต้องออกแบบป้องกันการสั่นสะเทือน	มีขนาดฐานรองรับเล็กกว่า
8. ระดับความดันลดลง	ไม่มีปัญหา	อาจเกิดขึ้นเมื่อเกิดการอุดตันในตัวกระจายอากาศ
9. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา	มีต่ำกว่า	มีสูงกว่า
10. ราคาเครื่อง	มีสูงกว่า	มีต่ำกว่า
11. ระดับน้ำในถังเติมอากาศมีคงที่	เหมาะสมน้อยกว่า	เหมาะสมมากกว่า
12. ระดับน้ำในถังเติมอากาศเปลี่ยนแปลง เช่น ระบบ Sequencing Batch Reactor (SBR)	เหมาะสมมากกว่า	เหมาะสมน้อยกว่า
13. ความยุ่งยากในการทำงาน	มีมากกว่า	มีน้อยกว่า

โดยทั่วไประบบเติมอากาศสำหรับถังเติมอากาศ ต้องการความดันของอากาศประมาณ 0.65 – 1.0 ความดันบรรยากาศ (10-15 ปอนด์ต่อ ตร.นิ้ว) ดังนั้นเมื่อพิจารณาจะพบว่าต้องการเครื่องเป่าอากาศ (Blower) ในการเติมอากาศ ซึ่งนิยมใช้ประเภท Rotary positive displacement units หรือประเภท Centrifugal units ทั้งแบบ Single stage และ Multiple stage ดังแสดงในรูปที่ 2.21 สำหรับความสามารถในการเป่าอากาศของ Rotary positive displacement blowers และ Centrifugal blowers จะอยู่ในช่วง 0.12 – 1416 ลบ.ม ต่อ นาที และ 14.4 – 4248 ลบ.ม ต่อ นาที ตามลำดับตารางที่ 2.10 ได้แสดงปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการเลือกเครื่องเป่าอากาศของทั้งสองประเภท

ข้างต้น เพื่อให้ได้เครื่องเป่าอากาศที่เหมาะสมกับงาน ลักษณะการทำงานของเครื่องเป่าอากาศแบบ Rotary Positive Displacement Unit สามารถเพิ่มความดันสูงๆ ขึ้นในขณะที่อัตราการไหลของอากาศมีคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งแตกต่างกับแบบ Centrifugal unit ที่สามารถเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยในขณะที่ค่าความดันอากาศมีค่าคงที่หรือค่อนข้างลดลงเล็กน้อยในระดับหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ สำหรับแบบ Centrifugal blower จะมีลักษณะที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากับค่าความดันที่เพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศที่ไหลเข้ากับค่าแรงม้าที่ต้องการใช้ เมื่อได้กล่าวมามากแล้วพอสรุปได้ว่า เครื่องเป่าอากาศประเภท Rotary Positive Displacement เหมาะกับโรงงานน้ำเสียขนาดเล็กกว่า มีปริมาณอากาศที่ต้องการใช้น้อยกว่า 85 ลบ.ม ต่อนาที แต่ต้องการความดันอากาศที่สูงกว่าหรือมีช่วงระดับความดันที่แปรเปลี่ยนกว้างกว่าของประเภท Centrifugal



รูปที่ 2.22 ประเภทต่างๆ ของเครื่องเป่าอากาศและเครื่องอัดอากาศ



แบบ Centrifugal Blowers

แบบ Rotary Positive Displacement

รูปที่ 2.23 เครื่องเป่าอากาศแบบ Rotary Positive Displacement และ Centrifugal Blowers

**5. ท่ออากาศ** ท่ออากาศในระบบเดิมอากาศแบบใช้ตัวกระจายอากาศประกอบด้วยท่อเมนวาล์ว มิเตอร์วัดอัตราการไหลของอากาศและอื่นๆ ที่ใช้จ่ายอากาศไปตามจุดต่างๆ ภายในถังเดิมอากาศ โดยอาศัยเครื่องเป่าอากาศ ซึ่งระบบทั้งหมดนี้ได้แสดงไว้ในภาพที่ ท่ออากาศควรใช้วัสดุของท่อที่สามารถรับแรงต่างๆที่เกิดขึ้นได้ สามารถป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากการใช้พวกสารละลาย ล้างท่ออากาศ เช่น พวก HCl ฯลฯ วัสดุของท่ออากาศที่นิยมใช้กันมากคือ ท่อเหล็กคาร์บอน ท่อเหล็กสแตนเลส ท่อพลาสติกไฟเบอร์กลาส (Fiberglass reinforced plastic, FRP) ท่อ High Density Polyethylene (HDPE) และท่อ Polyvinyl Chloride (PVC) โดยทั่วไปท่ออากาศที่ติดตั้งอยู่ภายนอกถังเดิมอากาศนิยมใช้ท่อที่สามารถทนทานต่อแรงกระแทก และต่อดินฟ้าอากาศ ซึ่งได้แก่ท่อ FRP ท่อเหล็กต่างๆ เป็นต้น สำหรับท่ออากาศที่ติดตั้งอยู่ภายในถังเดิมอากาศอาจเลือกใช้ท่อเหล็กสแตนเลส ท่อ PVC หรือท่อ HDPE ซึ่งเป็นท่อที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

หลักการในการออกแบบขนาดท่ออากาศ ควรพิจารณาค่าสูญเสียความดัน (Headloss) และค่าระดับน้ำลึกที่ตัวกระจายอากาศจุ่มอยู่ในน้ำของระบบจ่ายอากาศดังต่อไปนี้

1. ท่ออากาศในระบบท่อจ่ายอากาศ (Pipings)
2. เครื่องกรองอากาศ (Air filter)
3. เครื่องจำกัดเสียง (Silencers)
4. ระบบท่อสำหรับเครื่องเป่าอากาศพร้อมวาล์วต่างๆของเครื่อง ได้แก่ Check valves, Butterfly valves, Relief valves, ข้อต่อท่อต่างๆ ฯลฯ
5. ตัวกระจายอากาศต่างๆ
6. ระดับน้ำลึกที่ตัวกระจายอากาศจุ่มอยู่ในน้ำ

เมื่อทราบค่าสูญเสียความดันทั้งหมด รวมทั้งความดันของน้ำลึกที่ตัวกระจายอากาศจุ่มอยู่ในน้ำก็จะสามารถทราบได้ว่าต้องมีความดันที่เป่าอากาศลงไปในน้ำเท่าใด โดยทั่วไปแล้วค่า

สูญเสียความดันของตัวกระจายอากาศ (รวมถึงความดันน้ำลึกด้วย) สำหรับค่าสูญเสียความดันของตัวกระจายอากาศแบบรูฟุ้งอากาศออก (Fine pore diffuser) จะมีประมาณ 23 – 38 ซม. และของพวกท่ออากาศที่ติดตั้งบริเวณถังเติมอากาศควรมีค่าสูญเสียความดันน้อยกว่า 4 ซม. เพราะถ้ามีมากเกินไปกว่า 4 ซม. อาจทำให้การกระจายอากาศภายในถังไม่สม่ำเสมอ

สำหรับความยาวของท่ออากาศที่ติดตั้งก่อนและหลังมิเตอร์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Upstream และ Downstream ) ควรมีประมาณ 10 เท่า และ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออากาศตามลำดับ

เนื่องจากความดันที่จะให้ในท่ออากาศจะมีไม่เกิน 0.70 ความดันบรรยากาศ (10 ปอนด์ ตร.นิ้ว) ทำให้สามารถเลือกใช้ท่อที่มีน้ำหนักเบาได้ ในการออกแบบหาขนาดท่ออากาศควรพิจารณาเลือกความเร็วของอากาศที่ไหลในท่อให้เหมาะสม

### บทที่ 3

## ทฤษฎีพื้นฐานในงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งจะแบ่งเป็นสองส่วนด้วยกัน คือการไหลผ่านวัตถุจม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหากลศาสตร์ของไหล และการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการเติมอากาศ

### 3.1 การไหลผ่านวัตถุจม

เป็นการไหลที่เกิดจากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ ระหว่างวัตถุของแข็งที่จมอยู่ในของไหล โดยที่ของไหลกระทบพื้นผิวของแข็งทำให้เกิดแรง ซึ่งแรงที่กระทำเกิดทั้งแรงตั้งฉากและแรงขนาน ในที่นี้สามารถที่จะพิจารณา แรงที่กระทำกับพื้นผิวรวมนี้ได้  $\vec{F}$  ถ้าวัตถุเคลื่อนที่ผ่านของไหลที่มีความหนืด จะมีแรงเกิดขึ้น 2 แบบคือแรงเฉือนและแรงที่เกิดจากความดันที่กระทำกับวัตถุ

$$\vec{F} = \int_{\text{body surface}} d\vec{F} = \int_{\text{body surface}} d\vec{F}_{\text{shear}} + \int_{\text{body surface}} d\vec{F}_{\text{pressure}} \quad (3.1)$$

ผลลัพธ์ของแรง  $\vec{F}$  ประกอบด้วยทิศทางขนานและทิศทางตั้งฉากการเคลื่อนที่ แรงที่เกิดจากทิศทางที่ขนานการไหลเรียกว่าแรงต้าน  $F_D$  และแรงที่เกิดจากทิศทางตั้งฉากเรียกว่าแรงยก  $F_L$  ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

$$d\vec{F}_{\text{shear}} = \vec{\tau}_w dA$$

และ

$$d\vec{F}_{\text{pressure}} = -pd \vec{A}$$

#### 3.1.1 แรงต้านการไหล (Drag)

แรงต้านการไหลเป็นส่วนหนึ่งของแรงกระทำกับวัตถุ ในทิศทางที่ขนานของการเคลื่อนที่ ซึ่งจำเป็นต้องได้ผลการทดลองเป็นข้อมูลในการอ้างอิงทางกลศาสตร์ของไหล เราพิจารณาปัญหาของการหาแรงต้านการไหล  $F_D$  ของทรงกลมเรียบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$  ที่เคลื่อนที่ผ่านของไหลที่มีความหนืด เป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ซึ่งมีความเร็ว  $V$  โดยที่ของไหลมีค่าความหนาแน่น  $\rho$  และความหนืด  $\mu$  แรงต้านการไหล  $F_D$  สามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันได้ดังนี้

$$F_D = f_1(d, V, \mu, \rho) \quad (3.2)$$

การประยุกต์ทฤษฎีของ Buckingham Pi ผลลัพธ์ 2 มิติ สามารถแสดงในรูปแบบของตัวแปรได้ ดังนี้

$$\frac{F_D}{\rho V^2 d^2} = f_2\left(\frac{\rho V d}{\mu}\right)$$

ในที่  $d^2$  มาจากพื้นที่หน้าตัด ( $A = \pi d^2 / 4$ ) เราสามารถเขียนในรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\frac{F_D}{\rho V^2 A} = f_3\left(\frac{\rho V d}{\mu}\right) = f_3(Re) \quad (3.3)$$

จากสมการ 3.3 ใช้ได้กับการไหลทรงกลมและใช้กับการไหลในของไหลอัดตัวไม่ได้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์ (Reynolds number) ที่กระทำกับรูปทรงของวัตถุ สัมประสิทธิ์ของค่าแรงต้านทานการไหล  $C_D$  (Drag coefficient) โดยมีนิยามดังนี้

$$C_D \equiv \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (3.4)$$

ซึ่งผลรวมของแรงต้านทานการไหลที่เกิดขึ้นเกิดจากผลรวมของแรงต้านทาน เนื่องจากเสียดทานและแรงต้านทานที่เกิดจากความดัน อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้านทานก็ยังเป็นฟังก์ชันของค่าเรย์โนลด์ (Reynolds number)

### 3.1.2 แรงต้านทานการไหลในแนวขนานของทิศทางการไหล (Friction Drag)

ในที่นี้การไหลจะเป็นการพิจารณา ในกรณีที่มีความดันที่กระทำกับพื้นผิวที่ตั้งฉากการไหล เป็นศูนย์ ดังนั้นแรงต้านทานการไหลจะมีค่าเท่ากับแรงต้านทานการไหลที่เกิดจากแรงเสียดทาน ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$F_D = \int_{\text{plate surface}} \tau_w dA$$

และ

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} = \frac{\int_{ps} \tau_w dA}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (3.5)$$

โดยที่  $A$  เป็นพื้นผิวที่สัมผัสกับของเหลว ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานการไหล จะขึ้นอยู่กับค่าความเค้นที่กระทำกับพื้นผิว

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ (Laminar) ที่ไหลผ่านพื้นผิวกับแผ่นเรียบ ค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนมีค่าดังนี้

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad (3.6)$$

สัมประสิทธิ์แรงต้านการไหล ในกรณีมีความเร็วการไหลเท่ากับ  $V$  ความยาวแผ่นเรียบ  $L$  และความกว้าง  $b$  เมื่อเราแทนสมการ 3.6 ในสมการ 3.5 จะได้

$$C_D = \frac{1}{A} \int_A 0.664 Re_x^{-0.5} dA = \frac{1}{bL} \int_0^L 0.664 \left(\frac{V}{\nu}\right)^{-0.5} x^{-0.5} b dx$$

$$C_D = \frac{1.33}{\sqrt{Re_x}} \quad (3.7)$$

สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ (Turbulent) ที่มีการไหลผ่านพื้นผิวกับแผ่นเรียบ ค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนมีค่าดังนี้

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{0.0594}{Re_x^{1/5}} \quad (3.8)$$

แทนค่าของสมการ 3.8 ในสมการ 3.5 จะได้

$$C_D = \frac{1}{A} \int_A 0.0594 Re_x^{-0.2} dA = \frac{1}{bL} \int_0^L 0.0594 \left(\frac{V}{\nu}\right)^{-0.2} x^{-0.2} b dx$$

$$C_D = \frac{0.0742}{Re_x^{1/5}} \quad (3.9)$$

สำหรับสมการ 3.9 ใช้ในกรณี  $5 \times 10^5 < Re_L < 10^7$

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหล มีการปรับปรุงแก้ไขได้ดังสมการนี้

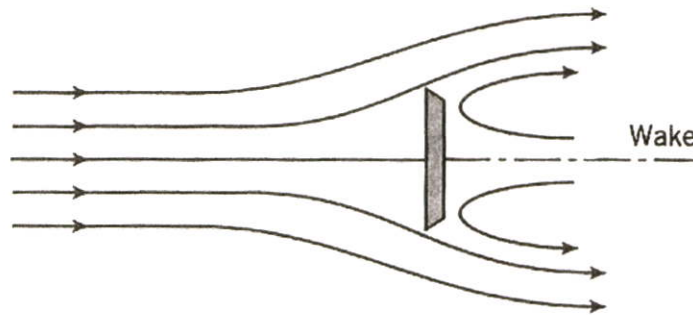
$$C_D = \frac{0.0742}{Re_x^{1/5}} - \frac{1740}{Re_L} \quad (5 \times 10^5 < Re_L < 10^7) \quad (3.10)$$

หรือใช้สมการ

$$C_D = \frac{0.455}{(\log Re_L)^{2.58}} - \frac{1610}{Re_L} \quad (5 \times 10^5 < Re_L < 10^9) \quad (3.11)$$

### 3.1.3 แรงต้านทานการไหลในแนวตั้งฉากของทิศทางการไหล (Pressure Drag)

ในการไหลแนวตั้งฉากทิศทางการไหลซึ่งแสดงในรูป 2.1 จะไม่มีค่าความเค้นเฉือนมากระทำ เพราะฉะนั้นแรงต้านการไหล จะเกิดเนื่องจากความดันที่มากกระทำ ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

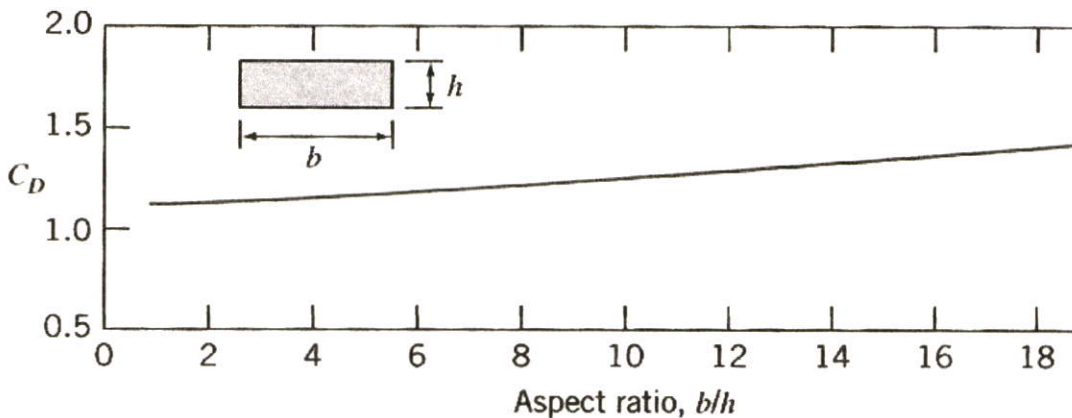


รูปที่ 3.1 การไหลในแนวตั้งฉากของทิศทางการไหล

$$F_D = \int_{\text{surface}} p dA$$

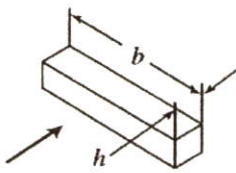




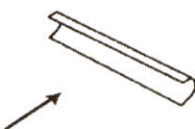
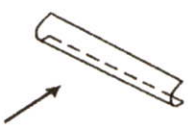
ในการคำนวณหาแรงต้านที่เกิดในแนวตั้งฉาก จะขึ้นอยู่กับรูปทรงที่ของไหลไหลผ่านซึ่งสามารถหาค่าของ  $C_D$  ของรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าจากรูป 2.2 และรูปทรงต่างจากราง 2.1 แล้วนำค่า  $C_D$  แทนในสมการ 3.12 เพื่อหาค่า  $F_D$

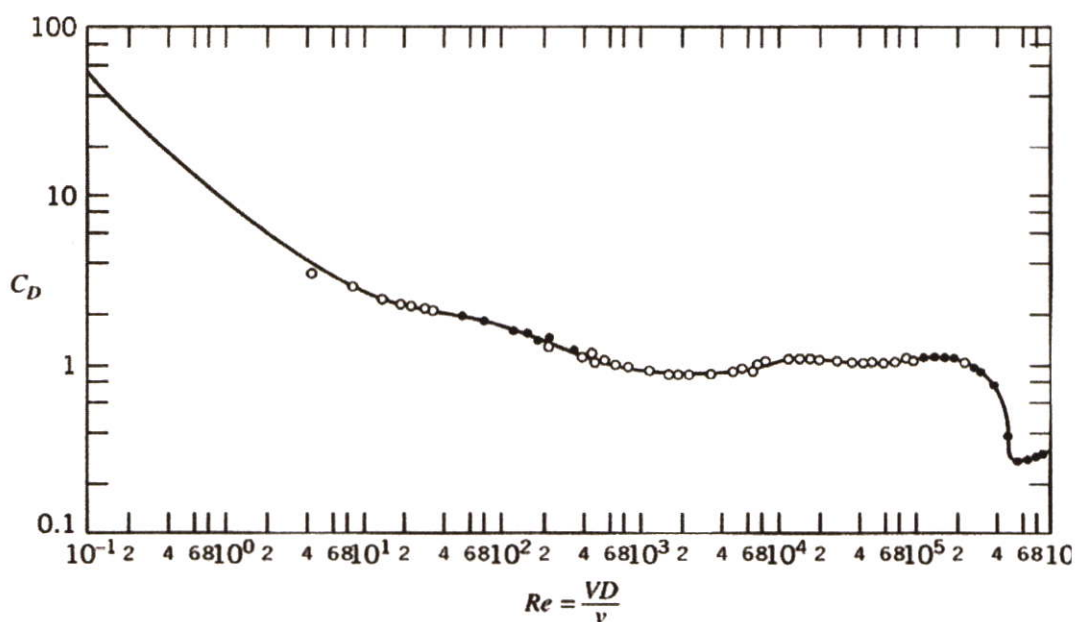
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานโดยที่อัตราส่วนสำหรับแผ่นเรียบ เปลี่ยนแปลงที่การไหล  $Re_h > 1000$

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหลของรูปทรงต่างๆ  $Re \geq 10^3$

Object	Diagram	$C_D(Re \geq 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ 2.05 $b/h = 1$ 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20
Hemisphere (open end facing flow)		1.42
Hemisphere (open end facing downstream)		0.38
C-section (open side facing flow)		2.30
C-section (open side facing downstream)		1.20



รูปที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการไหลสำหรับวงกลมทรงกระบอกเรียบ โดยเป็นฟังก์ชันกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์

ในงานวิจัยนี้จะเน้นทั้งแรงด้านการไหลที่เกิดแรงเสียดทานและความดัน ซึ่งลักษณะการไหลจะเป็นการไหลผ่านทรงกระบอก ค่า  $C_D$  หาได้จากรูป 2.3 โดยที่กราฟมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_D$  และค่า  $Re$  ซึ่งใบพัดในงานวิจัยนี้ความเร็วจะผันแปรตามระยะรัศมี ทำให้ค่าเรย์โนลด์ต้องแปรผันตามค่ารัศมีเช่นกัน

### 3.2 การออกแบบและการคำนวณใบพัด

ในส่วนการออกแบบใบพัดนี้จะใช้ทฤษฎีเนื้อหาของบพนี้ที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังที่ใช้ในการขับใบพัดและความดันที่เกิดหลังใบพัด ซึ่งความดันด้านหลังใบพัดที่เกิดขึ้น จะมีค่าความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ในการคำนวณค่าที่ได้นั้นเป็นการประมาณค่าอย่างคร่าวๆ ซึ่งการค่ากำลังที่ใช้ในการขับใบพัดจริงจะได้มาจากการทดลองซึ่งจะมีความแม่นยำมากกว่า

$$F = F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho A V^2$$

$$dF = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho V^2 (Ddr) \quad (3.13)$$

โดยที่ค่าแรงต้านทานการไหล  $C_D$  และค่าความเร็ว  $V$  ขึ้นอยู่กับรัศมีของใบพัดและความเร็วเชิงมุม โดยสามารถแสดงได้สมการดังนี้

$$V = r\omega = r \left( \frac{2\pi N}{60} \right) \quad (3.14)$$

เมื่อนำสมการที่ 3.14 แทนในสมการ 3.13 จะได้

$$dF = \frac{1}{2} \cdot C_D \{r\} \cdot \rho (r\omega)^2 (Ddr)$$

สมมติให้  $C_D \{r\}$  มีค่าคงที่เพราะฉะนั้น  $C_D \{r\} = C_D$

$$F = \int dF = \frac{1}{2} \rho \omega^2 D \int_{r_1}^{r_2} C_D \cdot r^2 dr \quad (3.15)$$

คำนวณหาจุดศูนย์กลางแรงที่กระทำกับใบพัด โดยการอินทิเกรตหาจุดศูนย์กลางที่แรงกระทำได้ ดังสมการนี้

$$\bar{r} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r \cdot dF}{\int_{r_1}^{r_2} dF} = \frac{\frac{1}{2} \rho \omega^2 D \int_{r_1}^{r_2} C_D \cdot r^3 dr}{\frac{1}{2} \rho \omega^2 D \int_{r_1}^{r_2} C_D \cdot r^2 dr} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} C_D \cdot r^3 dr}{\int_{r_1}^{r_2} C_D \cdot r^2 dr} \quad (3.16)$$

เพราะฉะนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นกับใบพัดที่กระทำกับหนึ่งก้านใบพัดมีค่าเท่ากับ

$$T = F \cdot \bar{r} \quad (3.17)$$

เนื่องจากใบพัดมี 4 ก้านใบพัด จึงต้องนำ 4 คูณในสมการ 3.16 จะได้

$$T = 4F \cdot \bar{r} \quad (3.18)$$

เพราะฉะนั้นกำลังที่ใช้ในการขับใบพัดในทางทฤษฎี สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.19

$$P = \frac{2\pi TN}{60} \quad (3.19)$$

$P$  กำลังที่ใช้ในการขับใบพัด

$T$  แรงบิดของใบพัด

$N$  ความเร็วรอบของใบพัด

เราจะพบว่าในการคำนวณหา กำลังที่เกิดจากใบพัดในสมการ 3.19 นี้ เป็นการคำนวณที่ได้จากทางทฤษฎี โดยที่มีตัวแปรเพียงบางส่วนของที่ส่งผลต่อกำลังที่ใช้ในการขับใบพัด ซึ่งในทางปฏิบัติยังมีตัวแปรอื่นที่ส่งผลกับกำลังที่ใช้ในการขับใบพัดอีก แต่การคำนวณหา กำลังที่ใช้ในการขับใบพัดนั้น เป็นแนวทางที่ดีในการเลือกขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับใบพัดที่เหมาะสม ซึ่งในการหาค่ากำลังที่ใช้ในการขับใบพัดจริงสามารถหาได้จากการทดลองได้

### 3.3 การบำบัดน้ำเสีย

การเติมอากาศที่ใช้ในระบบกำจัดแบบ Aerated Lagoons และแบบ Activated sludge นั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบคือ ระบบฟองอากาศ (Diffused-Air Aeration) และระบบเครื่องมือกล (Mechanical Aeration) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ระบบ Turbine แล้วระบบ surface Aeration ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นการผสมผสานระหว่าง ระบบฟองอากาศ และระบบเครื่องมือกล โดยเน้นศึกษาการเติมอากาศโดยใช้ใบพัดเพื่อสร้างความดันหลังใบพัด ให้เกิดเป็นความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศ ส่งผลให้ความดันของบรรยากาศของอากาศที่มีค่าที่สูงกว่า ทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศไหลออกสู่หลังใบพัดเกิดเป็นฟองอากาศขึ้น

### 3.3.1 ความต้องการออกซิเจน (Oxygen Demand)

น้ำที่ส่วนใหญ่มีสิ่งสกปรกหลายชนิด ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายออกซิเจนได้ ดังนั้นเมื่อระบายน้ำทิ้งลงในแม่น้ำจึงเป็นเหตุให้ ปริมาณสารละลายออกซิเจนในลำน้ำลดน้อยลง ในการกำจัดน้ำทิ้งประเภทนี้ จึงต้องกำจัดสิ่งสกปรกที่ต้องการออกซิเจนให้มีปริมาณน้อยลงตาม มาตรฐานที่กำหนด

สิ่งสกปรกที่ต้องการออกซิเจนมีทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ แต่ที่พบมากที่สุดเป็นสารอินทรีย์ สิ่งสกปรกเหล่านี้อาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆคือ

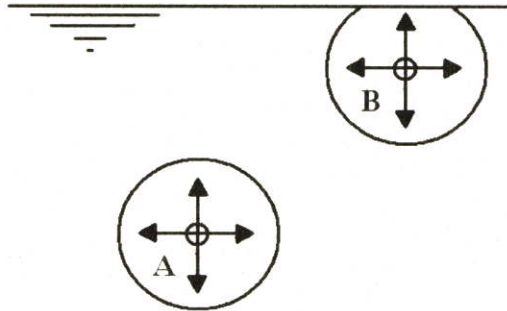
- 1) สารอินทรีย์ที่ไม่มีในโตรเจน ได้แก่สารอินทรีย์ซึ่งมีแต่คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น แป้ง น้ำตาล ไฮโดรคาร์บอน ฯลฯ สารอินทรีย์เหล่านี้ส่วนมากจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารได้โดยใช้ออกซิเจนไปทำปฏิกิริยาชีวเคมีกับสารอินทรีย์ให้ได้พลังงานในการดำรงชีวิต
- 2) สารประกอบไนโตรเจน ได้แก่สารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น โปรตีน และสารประกอบอนินทรีย์พวกไนเตรต ( $NO_2^-$ ) และแอมโมเนีย ( $NH_4^+$ ) สารเหล่านี้เป็นอาหารของแบคทีเรียบางพวก ซึ่งจะใช้ออกซิเจนไปทำปฏิกิริยากับสารพวกนี้ได้เป็นสารประกอบไนเตรด และพลังงาน
- 3) สารประกอบอนินทรีย์ สารประกอบอนินทรีย์บางชนิด เช่น เฟอร์รัส ( $Fe^{++}$ ) ซัลไฟด์ และซัลไฟท์ ( $SO_3^-$ ) สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำได้โดยตรง มีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพียงไม่กี่ชนิดที่มีสารประกอบชนิดนี้

เนื่องจากสิ่งสกปรกในน้ำทิ้งมีหลายชนิดปะปนกัน การวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของสิ่งสกปรกแต่ละชนิดจึงทำได้ยาก ในทางปฏิบัติจึงหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการทำปฏิกิริยากับสิ่งสกปรกปริมาณออกซิเจนที่ได้เรียกว่าความต้องการของออกซิเจน (Oxygen Demand) ของน้ำทิ้งนั้น ความต้องการของออกซิเจนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับวิธีการหา ที่ใช้กันมากได้แก่ BOD (biochemical oxygen demand), COD (chemical oxygen demand), TOD (total oxygen demand), ThOD (theoretical oxygen demand) และการหาปริมาณคาร์บอนของสารอินทรีย์ที่เรียกว่า TOC (total organic carbon)

### 3.3.2 ความตึงผิว (Surface Tension)

การพิจารณาโมเลกุลของของเหลวที่อยู่ในเนื้อของเหลว เช่น ที่จุด A ในรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าโมเลกุลนี้มีโมเลกุลของของเหลวอื่นล้อมรอบอยู่ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่าง ๆ ที่ล้อมรอบอยู่ จะอยู่ในสภาวะสมดุล แต่สำหรับโมเลกุลของของเหลวที่อยู่บริเวณผิวอิสระ ซึ่งมีส่วนหนึ่งสัมผัสกับอากาศและอีกส่วนหนึ่งจมอยู่ในของเหลว เช่น ที่จุด B เนื่องจากไม่มีโมเลกุลของของเหลวด้านบน ทำให้แรงดึงดูดของโมเลกุลเกิดขึ้นเฉพาะด้านล่าง ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับผิวของของเหลวเข้าหาเนื้อของของเหลว แต่เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใต้วงน้ำของ

ของเหลวจะทำให้เกิดชั้นของฟิล์ม (Imaginary Film) ชั้นที่ผิวของของเหลว ซึ่งทำให้ผิวของของเหลวถูกดึงให้ตั้งอยู่เสมอ และความตึงผิวนี้จะทำให้ทนต่อแรงภายนอกขนาดเล็ก ๆ ที่มากระทำได้

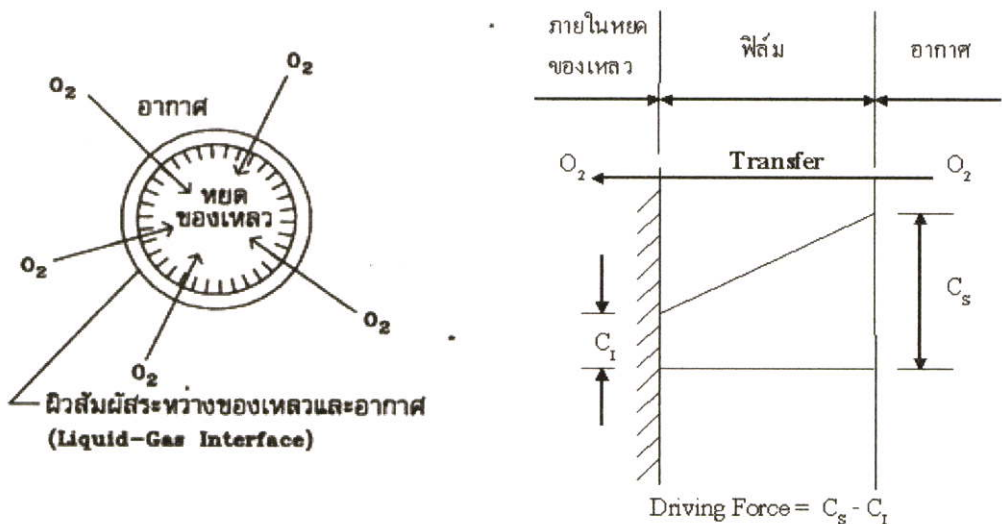


รูปที่ 3.4 แรงภายในโมเลกุลที่บริเวณผิวของของเหลว

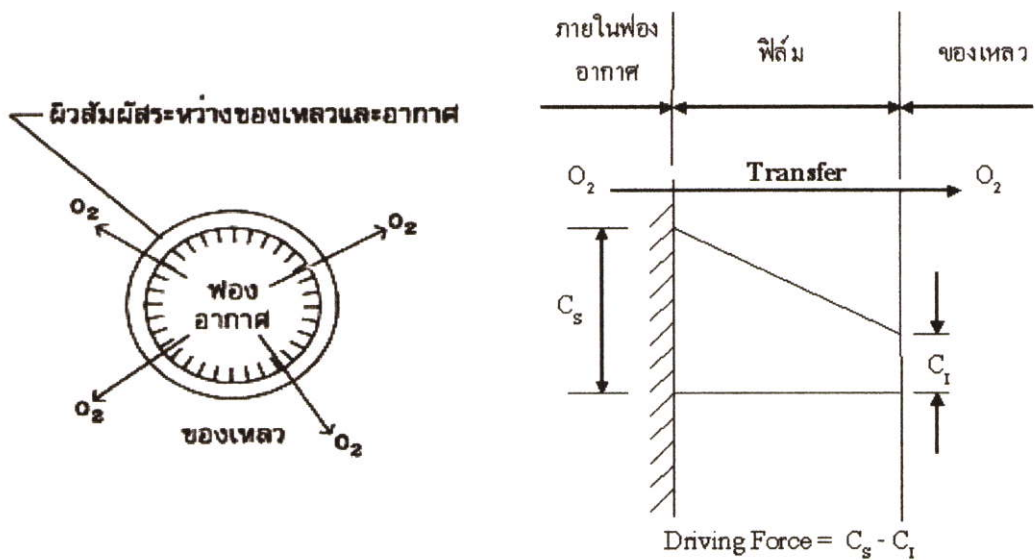
เนื่องจากความตึงผิวขึ้นอยู่กับแรงยึดเกาะ (Cohesion) โดยตรง ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของของเหลวเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ค่าความตึงผิวลดลงได้ นอกจากนี้ความตึงผิวยังขึ้นอยู่กับชนิดของของไหลที่สัมผัสอยู่กับผิวของของเหลว นั่นซึ่งโดยปกติอากาศ ความตึงผิวของน้ำที่สัมผัสอยู่กับอากาศมีค่าตั้งแต่ประมาณ  $0.0075 \text{ kg f/m}$  ที่อุณหภูมิ  $19^\circ\text{C}$  ถึง  $0.006 \text{ kg f/m}$  ที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$

### 3.3.3 หลักการเติมอากาศและการถ่ายเทมวลระหว่างฟองอากาศกับน้ำ

การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศให้กับน้ำเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ ออกซิเจนอาจถ่ายเทจากอากาศให้กับหยดน้ำขนาดเล็ก ที่เกิดจากการตีน้ำของเครื่องเติมอากาศและออกซิเจนอาจถ่ายเทจากฟองอากาศให้กับน้ำที่ห่อหุ้ม ดังรูปที่ 3.5 และ รูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ออกซิเจนถ่ายเทจากอากาศให้กับหยดน้ำขนาดเล็กที่เกิดจากการตีน้ำของเครื่องเติมอากาศ



รูปที่ 3.6 ออกซิเจนถ่ายเทจากฟองอากาศให้กับน้ำที่ห่อหุ้ม

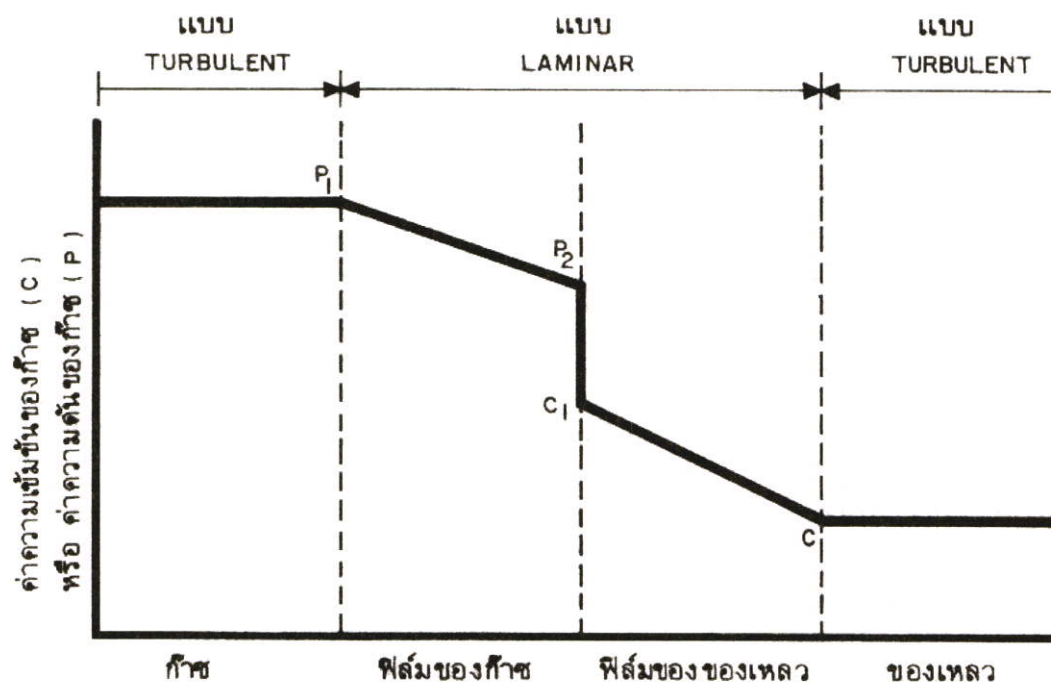
การเติมอากาศหรือออกซิเจนให้กับน้ำทั้งสองวิธีขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- ขนาดของหยดน้ำ
- ขนาดของฟองอากาศ
- ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศซึ่งแสดงออกในรูปแบบความดันย่อยของออกซิเจน (Partial Pressure of Oxygen)
- เวลาที่ใช้สัมผัสน้ำและอากาศ
- แรงสนับสนุนให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจน(ผลต่างระหว่างออกซิเจนอิ่มตัวและออกซิเจนละลายน้ำที่มีอยู่ในขณะทำการเติมอากาศ)

เนื่องจากการถ่ายเทออกซิเจนเกิดขึ้นผ่านผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ การทำให้หยดน้ำหรือฟองอากาศมีขนาดเล็ก จึงช่วยให้มีการถ่ายเทออกซิเจนได้ดี เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ

การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศ ทำให้ออกซิเจนสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น (ตามกฎของ Henry) เป็นผลทำให้แรงผลักดันการถ่ายออกซิเจนเพิ่มขึ้น ยิ่งความเข้มข้นออกซิเจนที่ละลายน้ำมีค่าต่ำ แรงสนับสนุนการถ่ายเทออกซิเจนยังมีค่ามาก ทำให้ต้องเติมออกซิเจนในอัตราสูง นั่นคือน้ำที่ขาดแคลนออกซิเจน จะรับการถ่ายเทออกซิเจนได้เร็ว ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีออกซิเจนอิ่มตัวจะไม่รับออกซิเจนจากอากาศเลย

ในปี คศ. 1924 ทฤษฎีของการเติมอากาศได้ถูกศึกษาวิจัยมาหลายลักษณะโดย Lewis และ Whitman จากเอกสารทางวิชาการของ Ind. Eng. Chem., Vol.16 หน้า 1215 ในหัวข้อ "Principle of Gas Adsorption" ได้อธิบายทฤษฎีการถ่ายเทของก๊าซ โดยพิจารณาเป็น 2 ชั้นคือ ชั้นของเหลว



รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว

และชั้นก๊าซ โดยก๊าซ (เช่น ออกซิเจน) จะซึมผ่านชั้นก๊าซและชั้นของเหลว จนกระทั่งถึงระดับลึกของของเหลว ซึ่งความเข้มข้นของก๊าซจะค่อย ๆ ลดลง ขณะที่ก๊าซได้ซึมผ่านชั้นก๊าซและชั้นของเหลว รูปที่ 3.7 ได้แสดงภาพการถ่ายเทของก๊าซ (ออกซิเจน) ซึมผ่านชั้นของเหลว โดยการแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของก๊าซ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

### 3.3.4 ทฤษฎีการถ่ายเทออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นแก๊สที่ละลายในน้ำได้น้อยมาก ความเข้มข้นอิ่มตัว (Saturated Concentration) ของออกซิเจนในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่ง สารละลายออกซิเจนในน้ำ (Dissolved Oxygen) เป็นดัชนีคุณภาพของน้ำที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง เพราะออกซิเจนเป็นธาตุที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ และป้องกันไม่ให้น้ำเน่าเหม็น ในการจำกัคน้ำทิ้งด้วยวิธีการทางชีววิทยา น้ำทิ้งจะต้องมีออกซิเจนพอเพียง นอกจากนี้การวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ จะหาเป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างคือ

- 1) เป็นปฏิภาคตรงกับความกดของบรรยากาศ ถ้าความกดคั่นสูง ออกซิเจนละลายน้ำได้มาก
- 2) เป็นปฏิภาคกลับกับอุณหภูมิของน้ำ ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูง ออกซิเจนจะละลายได้น้อยลง

3) เป็นปฏิภาคกลับกับความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำ ถ้าความเข้มข้นของเกลือแร่สูง ออกซิเจนจะละลายได้น้อย  
ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำ อาจประมาณได้จากสูตร

$$C_s = \frac{475 - 2.65S}{33.5 + T} \quad (3.23)$$

ในเมื่อ  $C_s$  ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจน, mg/L

$S$  ความเข้มข้นของเกลือแร่ (salinity), g/L

$T$  อุณหภูมิของน้ำ, °C

ถ้าน้ำที่ใช้ในการทดสอบ ไม่มีความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำจะใช้สมการ

$$C_{sT} = 2234.34 (T + 45.93)^{-1.31403} \quad (3.24)$$

$T$  คืออุณหภูมิของน้ำสำหรับการทดสอบ (°C)

$C_{sT}$  ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำที่อุณหภูมิ  $T$  (mg/L)

ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำที่อุณหภูมิ  $T$  สามารถหาจากตาราง 3.1

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศลงในน้ำ จะเป็นปฏิภาคตรงกับค่าความขาดแคลนออกซิเจน (oxygen Deficit) ของน้ำ ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นอิ่มตัวกับความเข้มข้นจริง ดังนั้นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทออกซิเจนกับความขาดแคลนออกซิเจนจึงเขียนได้เป็นการถ่ายเทมวลระหว่างอากาศและน้ำโดยมีสมการที่ใช้ (Treybal, 1980)

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad (3.25)$$

$C$  ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ (mg/L)

$C_s$  ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำ (mg/L)

$k_L a$  สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลทั้งหมด ( $h^{-1}$ )

$t$  เวลา (h)

ค่าของ  $k_L a$  จะขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของน้ำ (Turbulence) อุณหภูมิความกดดันของบรรยากาศและความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ในน้ำ

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำภายใต้ความดันบรรยากาศ

Temperature °C	Chloride Concentration in Water -mg/l					Difference per 100 mg Chloride
	0	5000	10000	15000	20000	
Dissolved Oxygen -mg/l						
0	14.6	13.8	13.0	12.1	11.3	0.017
1	14.2	13.4	12.6	11.8	11.0	0.016
2	13.8	13.1	12.3	11.5	10.8	0.015
3	13.5	12.7	12.0	11.2	10.5	0.015
4	13.1	12.4	11.7	11.0	10.3	0.014
5	12.8	12.1	11.4	10.7	10.0	0.014
6	12.5	11.8	11.1	10.5	9.8	0.014
7	12.2	11.5	10.9	10.2	9.6	0.013
8	11.9	11.2	10.6	10.0	9.4	0.013
9	11.6	11.0	10.4	9.8	9.2	0.012
10	11.3	10.7	10.1	9.6	9.0	0.012
11	11.1	10.5	9.9	9.4	8.8	0.011
12	10.8	10.3	9.7	9.2	8.6	0.011
13	10.6	10.1	9.5	9.0	8.5	0.011
14	10.4	9.9	9.3	8.8	8.3	0.010
15	10.2	9.7	9.1	8.6	8.1	0.010
16	10.0	9.5	9.0	8.5	8.0	0.010
17	9.7	9.3	8.8	8.3	7.8	0.010
18	9.5	9.1	8.6	8.2	7.7	0.009
19	9.4	8.9	8.5	8.0	7.6	0.009
20	9.2	8.7	8.3	7.9	7.4	0.009
21	9.0	8.6	8.1	7.7	7.3	0.009
22	8.8	8.4	8.0	7.6	7.1	0.008
23	8.7	8.3	7.9	7.4	7.0	0.008
24	8.5	8.1	7.7	7.3	6.9	0.008
25	8.4	8.0	7.6	7.2	6.7	0.008
26	8.2	7.8	7.4	7.0	6.6	0.008
27	8.1	7.7	7.3	6.9	6.5	0.008
28	7.9	7.5	7.1	6.8	6.4	0.008
29	7.8	7.4	7.0	6.6	6.3	0.008
30	7.6	7.3	6.9	6.5	6.1	0.008
31	7.5					
32	7.4					
33	7.3					
34	7.2					
35	7.1					
36	7.0					
37	6.9					
38	6.8					
39	6.7					
40	6.6					
41	6.5					
42	6.4					
43	6.3					
44	6.2					
45	6.1					
46	6.0					
47	5.9					
48	5.8					
49	5.7					
50	5.6					

ค่าของ  $k_L a$  ที่อุณหภูมิ  $T$  ( $^{\circ}C$ ) จะมีความสัมพันธ์กับค่า  $K_L a$  ที่อุณหภูมิ  $T_r$  ( $^{\circ}C$ ) ในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับอุณหภูมิที่แตกต่างกันออกไป เราสามารถใช้สมการการแปลงกลับเพื่อให้อยู่มาตรฐานอุณหภูมิเดียวกันได้ดังนี้ (Boyd, 1986 ; Pöpel, 1985)

$$k_L a_{T_r} = \frac{k_L a_T}{1.024^{(T-T_r)}} \quad (3.26)$$

จะเห็นได้ว่าสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทออกซิเจนได้จากค่า  $K_L a$  สำหรับ มาตรฐานทั่วไปในระบบเติมอากาศ จะวัดประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศในน้ำสะอาดเป็นน้ำหนักของออกซิเจนต่อหน่วยกำลังงานที่ใช้ภายในระยะเวลาหนึ่งชั่วโมง สมรรถนะของ Aerator จะมีมาตรฐานที่ใช้วัดที่อุณหภูมิมาตรฐานคือ

ประเทศเยอรมัน ใช้อุณหภูมิ  $10^{\circ}C$  (Wagner, 1997)

$$OTR_{10} = k_L a_{10} C_{s10}$$

ประเทศอเมริกา ใช้อุณหภูมิ  $20^{\circ}C$  (ASCE standard, 1992)

$$OTR_{20} = k_L a_{20} C_{s20}$$

$OTR_{10}$  อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $10^{\circ}C$  และความดัน 1 บรรยากาศ ( $g/m^3/h$ )

$OTR_{20}$  อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $20^{\circ}C$  และความดัน 1 บรรยากาศ ( $g/m^3/h$ )

เราจะได้ค่า  $C_{s10} = 11.29 mg/L$  และ  $C_{s20} = 9.09 mg/L$

ดังนั้นที่สภาวะการใช้งานจริงๆ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของระบบเติมอากาศจะมีค่าต่างจากค่าที่หาได้ภายใต้สภาวะมาตรฐาน ถ้าอุณหภูมิของน้ำทิ้ง สูงกว่า  $20^{\circ}C$  ( $10^{\circ}C$ ) และต้องการรักษาความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำทิ้งให้สูงกว่า  $0 mg/L$  ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะการใช้งานจะต่ำกว่าค่าที่สภาวะมาตรฐาน และคำนวณได้จากสมการสำหรับหาประสิทธิภาพของ Aerator คือ

$$AE_T = \frac{OTR_T V}{P} \quad (3.27)$$

$AE_T$  ประสิทธิภาพของ Aerator ที่อุณหภูมิมาตรฐาน

$V$  ปริมาตรของน้ำ ( $m^3$ )

$P$  กำลังงานที่ใช้ในการขับใบพัด (W)

โดยกำลังที่ใช้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{2\pi T n}{60} \quad (3.28)$$

$P$  กำลังงานที่ใช้ในการขับใบพัด(W)

$T$  แรงบิด (N.m)

$n$  ความเร็วรอบใบพัด (rpm)

ในการหาค่ากำลังที่ใช้ในการขับใบพัดนั้น การคำนวณหาค่ากำลังได้จากข้อมูลที่ได้จากการวัดแรงบิดที่ใช้ในการขับใบพัด และความเร็วรอบในขณะที่ใช้งาน โดยในขณะที่ทำการทดลองจะทดลองหาค่ากำลังที่ใช้ขณะแรงเสียดทาน ( $P_f$ ) จากนั้นจะทำการทดสอบกำลังเมื่อติดตั้งใบพัดร่วมกับแรงเสียดทาน ( $P_t$ ) จากนั้นจะนำกำลังที่ติดตั้งใบพัดลบออกด้วยกำลังจะได้กำลังที่เกิดขึ้นกับใบพัดจริง จะได้ว่าสมการ

$$P_{turbine} = P_t - P_f \quad (3.29)$$

$P_{turbine}$  กำลังที่ใช้ขับใบพัดจริง

$P_t$  กำลังทั้งหมดรวมทั้งแรงเสียดทานและใบพัด

$P_f$  กำลังที่เกิดจากแรงเสียดทาน

### 3.3.5 ปัจจัยที่ทำให้ออกซิเจนในน้ำมีมากหรือน้อย

ออกซิเจนในน้ำ จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับ

**อุณหภูมิของน้ำ** ออกซิเจนจะละลายในน้ำได้มากเมื่อน้ำมีอุณหภูมิต่ำและจะลดลงเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ตาราง ความสามารถในการละลายของก๊าซออกซิเจน ณ ระดับอุณหภูมิต่างๆ)

**พื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคออกซิเจน** ยิ่งฟองอากาศมีพื้นที่สัมผัสมากและมีขนาดเล็กของอนุภาค ออกซิเจนก็ยิ่งมีโอกาสละลายน้ำได้สูง

**ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ละลายในน้ำอยู่ก่อนแล้ว** หากมีปริมาณก๊าซออกซิเจนละลายในน้ำอยู่ก่อนแล้ว มากจนเกือบจะถึงจุดอิ่มตัว อัตราการละลายของออกซิเจนใหม่ที่เติมลงในน้ำก็จะต่ำลง

**พื้นที่ผิวสัมผัสของน้ำ** (ต่างจากข้อ 2) กรณีที่ผู้เลี้ยงสร้างให้บ่อเลี้ยงมีการพ่นน้ำออกแบบเหนือหน้าในลักษณะน้ำพุหรือน้ำตก เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำนั้น ยิ่งน้ำที่พ่นออกมา มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมากเท่าไร ก็ยิ่งเพิ่มโอกาสการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างน้ำและอากาศมากขึ้นเท่านั้น

**ปริมาณสารละลายต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ** น้ำที่มีสารละลายต่างๆ ในระดับความเข้มข้นสูง จะส่งผลให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนลดต่ำลง

**ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำและก๊าซออกซิเจน**

**ปริมาณและลักษณะสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบ่อเลี้ยง** ปริมาณสารอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในบ่อเลี้ยงที่ต้องใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย

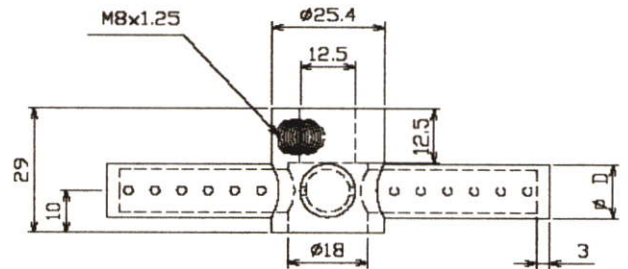
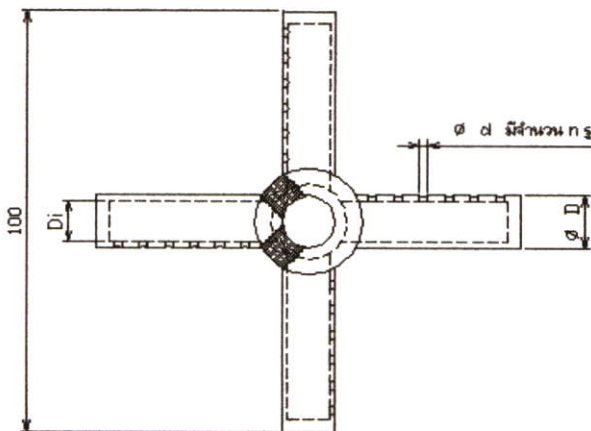
## บทที่ 4

### การออกแบบและอุปกรณ์ในการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงการออกแบบใบพัดผลิตฟองอากาศได้น้ำ โดยให้มีการใช้กำลังงานน้อย โดยอาศัยหลักการลดความดันหลังใบพัด ซึ่งปกติเมื่อใบพัดหมุนด้วยความเร็วรอบในระดับหนึ่ง จะก่อให้เกิดความดันต่ำที่บริเวณด้านหลังใบพัด โดยที่ความดันด้านหลังใบพัดนี้จะมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำความดันบรรยากาศที่มีความดันสูงกว่าความดันด้านหลังใบพัด มาลดความดันเพื่อให้เกิดความแตกต่างของความดันหน้าและความดันของหลังใบพัดน้อยลง ส่งผลให้กำลังที่ใช้ในการขับใบพัดมีค่าน้อยลงน้อยลงตาม สำหรับงานวิจัยนี้ การนำความดันบรรยากาศเข้ามาแทนที่จะมีมวลของอากาศ ก่อให้เกิดฟองอากาศ

#### 4.1 รูปทรงของใบพัดที่ใช้ในการทดลอง

การออกแบบใบพัดจะออกแบบใบพัดในลักษณะเดียว แต่จะศึกษาตัวแปรของขนาดของใบพัด ขนาดรูเจาะ จำนวนรูเจาะ และการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบใบพัด โดยจะควบคุมระดับการจมตัวลงของใบพัด ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบและตัวแปรอื่นๆ โดยลักษณะของใบพัดถูกแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ส่วนขนาดต่างๆของใบพัดจะถูกแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 แสดงรูปทรงใบพัดในมุมมองด้านข้าง

รูปที่ 4.1 แสดงรูปทรงใบพัดในมุมมองด้านบน

**ตารางที่ 4.1** แสดงขนาดรูปทรงของใบพัดในแต่ละรูปทรง

ชื่อรูปทรงใบพัด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ mm	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะท่อ mm	จำนวนรูเจาะ
N-111	10	2	4
N-112			5
N-113			6
N-121		3	4
N-122			5
N-123			6
N-131		4	4
N-132			5
N-133			6
N-211	12.5	2	4
N-212			5
N-213			6
N-221		3	4
N-222			5
N-223			6
N-231		4	4
N-232			5
N-233			6

## 4.2 การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

ในการศึกษาการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำ ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลองมีหลายชนิดประกอบเข้าด้วยกัน รายละเอียดต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

### 4.2.1 เครื่องทดสอบ

ในการทดลองจะใช้เครื่องทดสอบการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำประกอบด้วย Motor 3 phase, Inverter, Acrylic Tank และ buffer

**มอเตอร์ (Motor)** เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนปั๊มของเครื่องเติมอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เป็นมอเตอร์สามเฟส ½ Hp 1450 rpm



รูปที่ 4.3 มอเตอร์

**อินเวอร์เตอร์ ( Inverter)** เป็นอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยอินพุตไฟฟ้า 1 เฟส 220 V และเอาต์พุตออกเป็น 3 เฟส 220 V



รูปที่ 4.4 อินเวอร์เตอร์

**ถังพลาสติกใส (Acrylic Tank)** เป็นถังพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 290 mm ยาว 1000 mm หนา 5 mm ในการทดลองสามารถศึกษาพฤติกรรมของฟองอากาศได้น้ำด้วยตาเปล่าได้

**แผ่นกัน (Buffer)** เป็นแผ่นกันป้องกันการเกิดโพรงอากาศลงสู่ปั๊ม เนื่องจากปั๊มได้สร้างพลังงานจลน์การหมุนวนของน้ำในถัง Buffer จะลดพลังงานจลน์ของน้ำที่เกิด โดยทำจากวัสดุสแตนเลส



รูปที่ 4.5 ถังพลาสติกใสและแผ่นกั้น

#### 4.2.2 เครื่องมือวัด

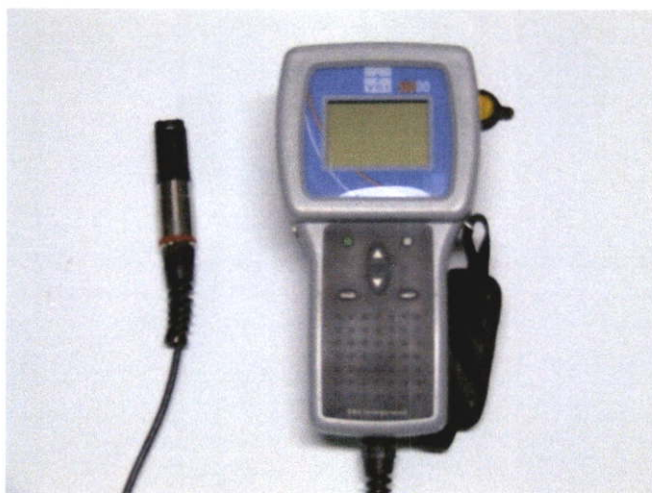
ในการทดลองจำเป็นต้องมีการเก็บข้อมูลจากการทดลอง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผล เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดที่ค่อนข้างมีแม่นยำ เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการทดลอง ซึ่งเครื่องมือวัดดังกล่าวประกอบด้วย Loadcell, DO Meter, Hot Wire and Digital Manometer

**เครื่องมือวัดรอบ (Technometer)** เป็นเครื่องมือวัดรอบของใบพัดจริงที่เกิดขึ้น โดยรับสัญญาณความถี่จากแสงที่สะท้อนกลับ และแบบสัมผัส เครื่องมือวัดรุ่น DIGICON DT-250TP



รูปที่ 4.6 เครื่องมือวัดครอบ

**เครื่องมือวัดการละลายตัวของออกซิเจน (Do Meter)** เป็นเครื่องวัดปริมาณการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำต่อน้ำหนึ่งลิตร มีหน่วยเป็น mg / l โดยที่เครื่องมือวัดตัวนี้สามารถวัดอุณหภูมิของน้ำ ในขณะที่ทำการวัดการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำ เครื่องมือวัดรุ่น YSI 550 DO

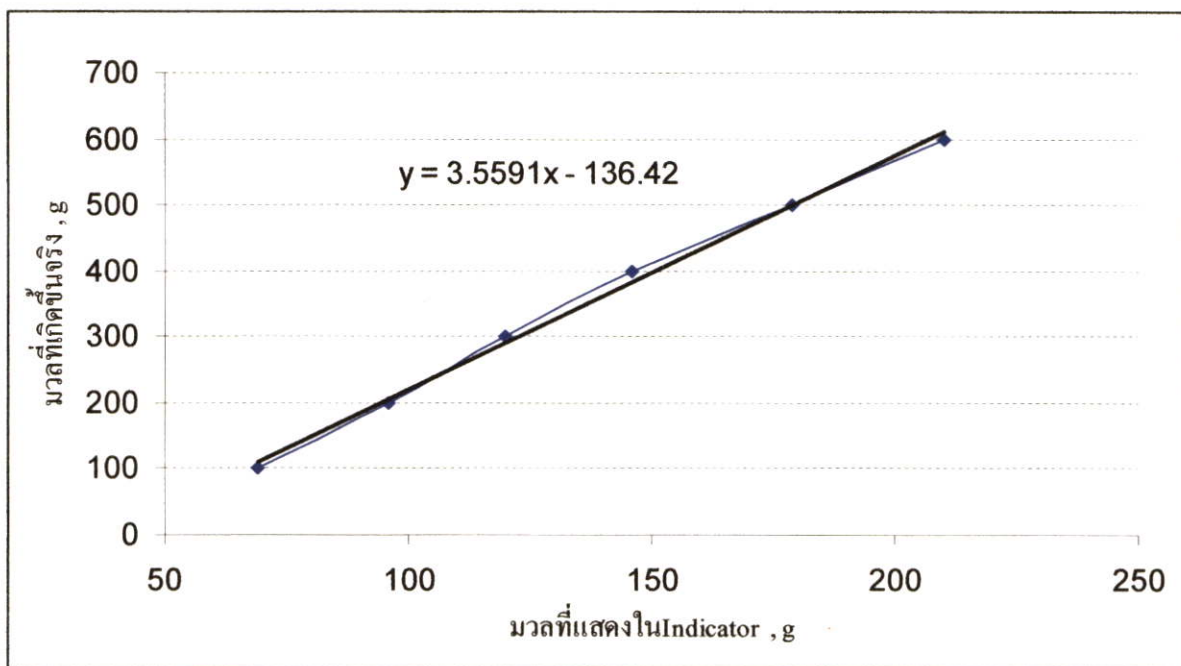


รูปที่ 4.7 เครื่องมือวัดการละลายตัวของออกซิเจน

**จอแสดงผลของมวล (Indicator)** เป็นอุปกรณ์ที่แสดงผลมวลเพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาแรงบิดของใบพัด แต่การที่จะนำค่าของจอแสดงผลของมวลมาใช้จะต้องเทียบค่าจากกราฟเทียบมวลดังรูปที่ 4.9 ยกตัวอย่างเช่น ค่าจอแสดงผล 120 กรัม นำค่า 120 แทนในสมการในรูปที่ 4.9จะได้  $3.5591 (120) - 136.42 = 290.672$  กรัม



รูปที่ 4.8 จอแสดงผลของมวล



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบมวลที่จอแสดงผลเทียบกับมวลที่เกิดขึ้นจริง

โหลดเซลล์ (Load Cell) เป็นอุปกรณ์วัดมวลที่มากกระทำ ซึ่งอยู่ในย่านการทำงาน 0 – 5 kg และตัวแสดงผลของ Load Cell สามารถแสดงผลละเอียดในหน่วยกรัม



รูปที่ 4.10 โหลดเซลล์

**เครื่องมือวัดความเร็วลม (Hot Wire)** เป็นเครื่องมือวัดความเร็วลม และสามารถวัดอุณหภูมิของอากาศในขณะที่ทำการวัด เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ที่ไหลออกจากใบพัด



**รูปที่ 4.11** เครื่องมือวัดความเร็วลม

**เครื่องมือวัดผลต่างความดันแบบดิจิตอล (Digital Manometer)** ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือวัดและเปรียบเทียบผลต่างความดันในรูปความสูงของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



**รูปที่ 4.12** เครื่องมือวัดผลต่างความดันแบบดิจิตอล

**กล้องถ่ายภาพ (Camera)** สามารถบันทึกภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว เพื่อบันทึกภาพพฤติกรรมการไหลของฟองอากาศที่เกิดขึ้น แล้วนำพฤติกรรมการไหลของการถ่ายภาพมาเทียบกับพฤติกรรมที่ได้จากการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งกล้องถ่ายภาพที่ใช้เป็นยี่ห้อ FUJIFILM รุ่น Fine Pix S5600 โดยมีขาตั้งเป็นตัวช่วยให้สามารถถ่ายภาพได้นิ่ง



รูปที่ 4.13 กล้องถ่ายภาพ

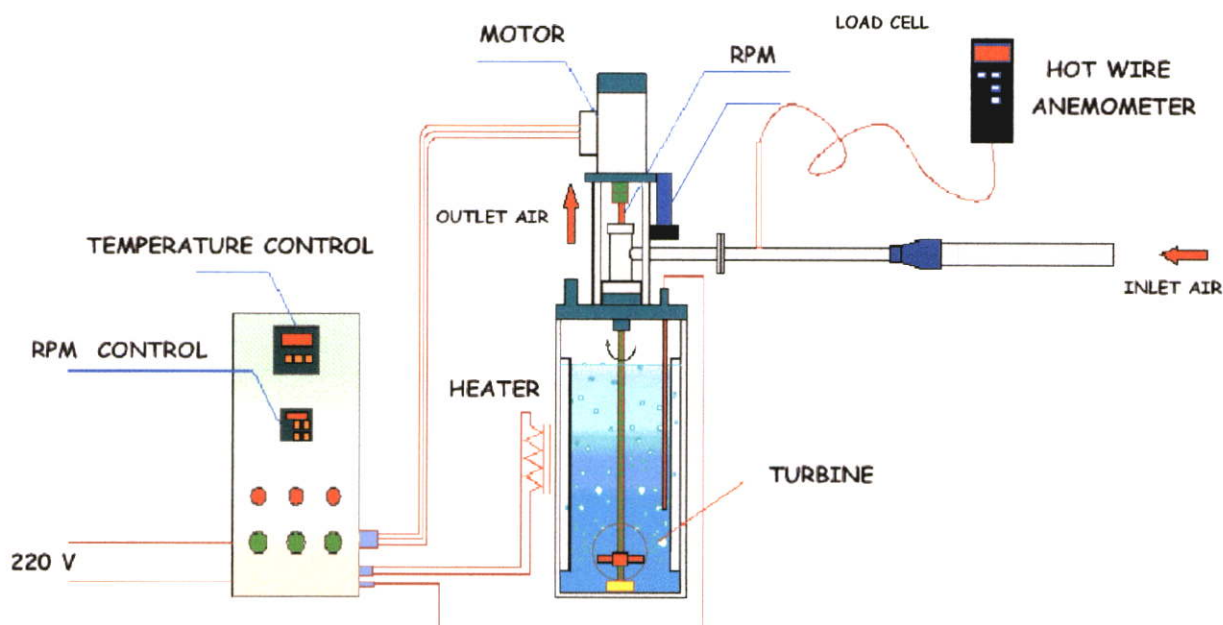
เครื่องฉายแสงตัดระนาบ (Slit Light Source) เป็นเครื่องที่ช่วยในการศึกษาพฤติกรรม การไหลของฟองอากาศ ทำงานโดยใช้หลักการยิงแสงสว่างเพื่อตัดระนาบของถังทดสอบ จะเห็น พฤติกรรมการไหลของฟองในระนาบที่ต้องการศึกษา และทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหว และ ภาพนิ่งสำหรับการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.14 เครื่องฉายแสงตัดระนาบ

#### 4.2.3 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด

ในการทดลองจำเป็นต้องเก็บค่าในผลในการทดลอง เช่น ความเร็วรอบ โพลด์เซลล์ เครื่องมือวัดความเร็ว ต่างๆ โดยมีเครื่องมือวัดที่มีการเทียบค่ามาตรฐานในทางวิศวกรรมที่ ยอมรับได้ เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ผลเพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของใบพัด และ ผลกระทบของรูปทรงของใบพัดที่ทำให้เกิดการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำที่ดี



รูปที่ 4.15 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด

#### 4.2.4 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพในการเติมอากาศนั้น จำเป็นต้องใช้สารเคมีช่วยในการทดสอบ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพ

สารโซเดียมซัลไฟท์ ( $Na_2SO_3$ ) ใช้สำหรับการละลายออกซิเจน ที่มีอยู่ในน้ำให้มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์

สารโคบอลท์คลอไรด์ ( $CoCl_2$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ลดระยะเวลาในการทดสอบ ในการทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำให้มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์



รูปที่ 4.11 สารโซเดียมซัลไฟท์



รูปที่ 4.12 สารโคบอลท์คลอไรด์

## บทที่ 5

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทดลอง รวมทั้งการนำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณ หาประสิทธิภาพ และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบสำหรับการวิเคราะห์ผล เพื่อหาว่าตัวแปรใดที่ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของไบโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น

#### 5.1 ขั้นตอนการทดลอง

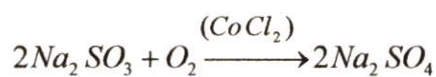
ในการทดลองจะทำการเก็บค่าจากการทดลอง เพื่อค่าที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนในการทำดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งเครื่องเติมอากาศลงในถังทดสอบ (Test Tank) แล้วเดินเครื่องเติมอากาศตามความเร็วรอบที่กำหนด เป็นเวลานาน 15 นาที เพื่อให้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำในถังมีค่าอิ่มตัว

2. วัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำในถังหลาย ๆ ครั้งทีหลาย ๆ จุดเทียบเคียงค่าที่ได้กับค่ามาตรฐานของปริมาณออกซิเจนอิ่มตัว

3. เติมสารประกอบโคบอลต์คลอไรด์ ( $CoCl_2$ ) ลงในน้ำโดยมีค่าความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์เป็น  $1.0\text{ mg/L}$  (ในที่นี้ใช้น้ำ 46 ลิตร)

4. เตรียมน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์ ( $Na_2SO_3$ ) ในถังเล็กอีกใบหนึ่ง ให้ปริมาณ โซเดียมซัลไฟท์เท่ากับ 1.25 เท่าของปริมาณที่ต้องใช้ตามทฤษฎีในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ โดยมีโคบอลต์คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังสมการ



5. หยุดเครื่องเติมอากาศ และเติมน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์ที่เตรียมไว้ลงในถังทดสอบ โดยระบายลงหลาย ๆ จุดรอบถังทดสอบ

6. เดินเครื่องเติมอากาศนานประมาณ 3 - 5 นาที เพื่อให้ น้ำในถังทดสอบผสมกับน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์โดยทั่วถึง

7. หยุดเครื่องเติมอากาศนานประมาณ 10-15 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลไฟท์กับออกซิเจนเกิดขึ้น โดยสมบูรณ์

8. เดินเครื่องเติมอากาศ 10-30 วินาที (ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ) และหยุดเครื่องรอเวลาประมาณ 5 นาที (เวลาที่คิดมาจากการลอยตัวของฟองอากาศหมดไป)

9. ทำการวัดความเข้มข้นของออกซิเจนด้วยเครื่องมือ(DO meter) โดยการวัดห่างจากด้านล่างของถัง 30 cm เพื่อเป็นการตรวจสอบหาค่าความขาดแคลนของออกซิเจนโดยนำค่าความเข้มข้นของออกซิเจนไปลบออกจากค่าความเข้มข้นอิ่มตัว

10. วัดค่าแรงที่กระทำกับ load cell

10. พล็อตค่าความขาดแคลนออกซิเจนกับเวลาแบบ Semi-Log จะได้เส้นตรง

11. ค่าความชัน (slope) ของเส้นตรงที่ได้คือค่า  $k_L a$  ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$k_L a = \frac{(\ln D_1 - \ln D_2) \cdot 60}{t_2 - t_1}$$

ในเมื่อ  $D_1, D_2$  ค่าความขาดแคลนออกซิเจนที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ตามลำดับ

$t_1, t_2$  เวลา, นาที

60 การเปลี่ยนหน่วยเวลาจากนาทีเป็นชั่วโมง

12. คำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศจากสมการ (4.11)

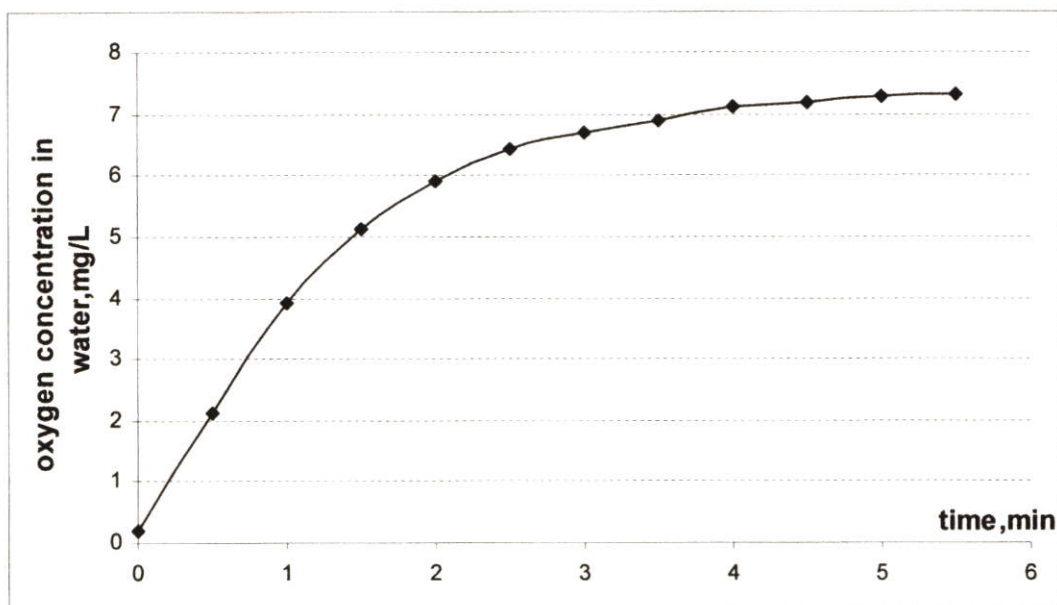
$$AE_{20} = \frac{k_L a_{20} \cdot C_{s20} \cdot V}{P}$$

## 5.2 ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพ

ในที่นี้จะเป็นการยกตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพของใบพัดในการเติมอากาศ ซึ่งผลที่ได้ดังแสดงในตารางเป็นผลการทดลองส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างผลการทดลองของความเข้มข้นของออกซิเจนที่เวลาเปลี่ยนไป

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของออกซิเจน, mg/L
0	0.19
0.5	2.13
1	3.92
1.5	5.13
2	5.91
2.5	6.43
3	6.71
3.5	6.90
4	7.12
4.5	7.2
5	7.28
5.5	7.32



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำเทียบกับเวลา

โดยขณะทำการทดสอบอุณหภูมิจนน้ำในถังทดสอบ  $31^{\circ}\text{C}$  มีความเร็วรอบมอเตอร์  $1300\text{ rpm}$  แรงบิดที่วัดได้  $0.208\text{ N.m}$  และใช้ปริมาณน้ำ  $0.046\text{ m}^3$

วิธีทำ คำนวณหาค่ากำลังที่ใช้ในการขับใบพัด

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{2\pi T n}{60} \\
 &= \frac{2\pi (0.208)(1300)}{60} \\
 &= 28.362\text{ N.m}
 \end{aligned}$$

ค่าความขาดแคลนของออกซิเจน หาได้จากนำค่าของปริมาณออกซิเจนอิ่มตัวของน้ำ ที่อุณหภูมิในการทดลองมาลบออกกับค่าปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจน เมื่อเวลาผ่านไปเช่น ความเข้มข้นของออกซิเจนอุณหภูมิตดลองที่  $31^{\circ}\text{C}$  มีค่าเท่ากับ

$$\text{แทนค่าในสมการ 3.24} \quad C_{st} = 2234.34(31 + 45.93)^{-1.31403} = 7.426\text{ mg/L}$$

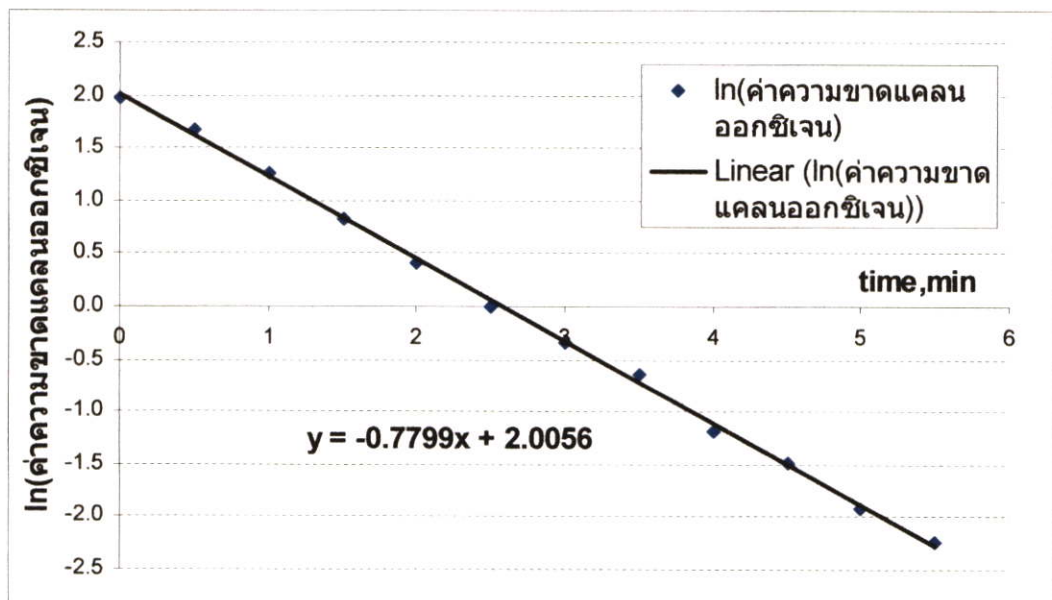
$$\text{ค่าความขาดแคลนของออกซิเจนที่เวลา 4 นาที} \quad 7.426 - 7.12 = 0.306\text{ mg/L}$$

นำค่ามาคำนวณหาค่าความขาดแคลนออกซิเจนในน้ำ ที่อุณหภูมิน้ำ  $31^{\circ}\text{C}$  และนำค่าความขาดแคลนออกซิเจนในน้ำมา  $\ln$  จะได้ค่าตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างค่าความขาดแคลนของออกซิเจนในน้ำที่เวลาผ่านไป

เวลา (นาที)	ความขาดแคลนออกซิเจน , $mg/L$	$\ln$ (ค่าความขาดแคลนออกซิเจน)
0	7.236	1.979
0.5	5.296	1.667
1	3.506	1.255
1.5	2.296	0.831
2	1.516	0.416
2.5	0.996	-0.004
3	0.716	-0.334
3.5	0.526	-0.642
4	0.306	-1.184
4.5	0.226	-1.487
5	0.146	-1.923
5.5	0.106	-2.243

นำค่าความขาดแคลนของออกซิเจนมาพล็อตผลเทียบกับเวลา ด้วยกราฟ Semi-Log ลากเส้นตรงดังในรูปที่ 5.1 เพื่อหาค่าของความชันของเส้นตรงซึ่งมีค่าเท่ากับ  $k_L a$  ซึ่งในรูปที่ เพราะฉะนั้นค่า  $k_L a = 0.7799 /min$



รูปที่ 5.2 กราฟ Semi-Log ของค่าความขาดแคลนออกซิเจนเทียบกับเวลา

เปลี่ยนค่า  $k_L a = 0.7799 / \text{min} \rightarrow k_L a = 46.964 / \text{hr}$

เปลี่ยนค่า  $k_L a$  ที่อุณหภูมิ  $31^\circ\text{C}$  เป็นค่า  $k_L a$  ที่  $20^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} k_L a_{Tr} &= \frac{k_L a_T}{1.024^{(T-Tr)}} \\ &= \frac{46.964}{1.024^{(31-20)}} \\ k_L a_{20} &= 36.179 \text{ hr}^{-1} \end{aligned}$$

คำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศจากสมการ

$$\begin{aligned} AE_{20} &= \frac{k_L a_{20} \cdot C_{s20} \cdot V}{P} \\ &= \frac{36.179(9.09)0.046}{66.29} \\ &= 0.228 \text{ kg } O_2 \text{ m}^3 / \text{kW} \end{aligned}$$

### 5.3 การศึกษาตัวแปรในเบื้องต้น

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาตัวแปรเบื้องต้น โดยทำการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบและระดับการจมของใบพัด โดยใช้ใบพัด 2 รูปแบบ คือ

**แบบใช้ความดันหลังใบพัด** เป็นรูปแบบที่คิดขึ้นมาใหม่ โดยใช้หลักการที่มีการเกิดขึ้นของ Wake ในการออกแบบ จากการทดลองเราพบว่าใบพัดแบบนี้ มีอัตราการไหลของอากาศที่ออกมาจากใบพัดต่ำกว่าแบบที่ 1. แต่กลับมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบที่ 1. เนื่องจากใบพัดแบบนี้มีการทำงานที่นอกจากแบบที่ 1. คือ ฟองอากาศ ที่ออกมาจากรูที่เล็กส่งผลทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็ก และยังคงถูกใบพัดที่ตามมาตีให้แตกเล็กลงอีก



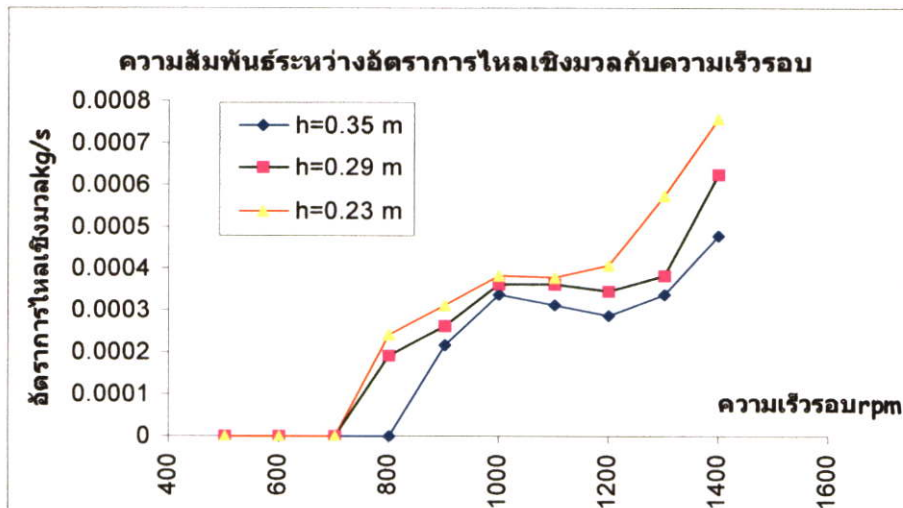
รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะรูปทรงของใบพัดใช้ความดันหลังใบพัด

แบบใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง เป็นแบบมาตรฐาน ที่มีอัตราการไหลของอากาศที่ออกมาจากใบพัดมาก แต่ มีประสิทธิภาพน้อยกว่าเนื่องจากมีขนาดของฟองที่โตกว่า

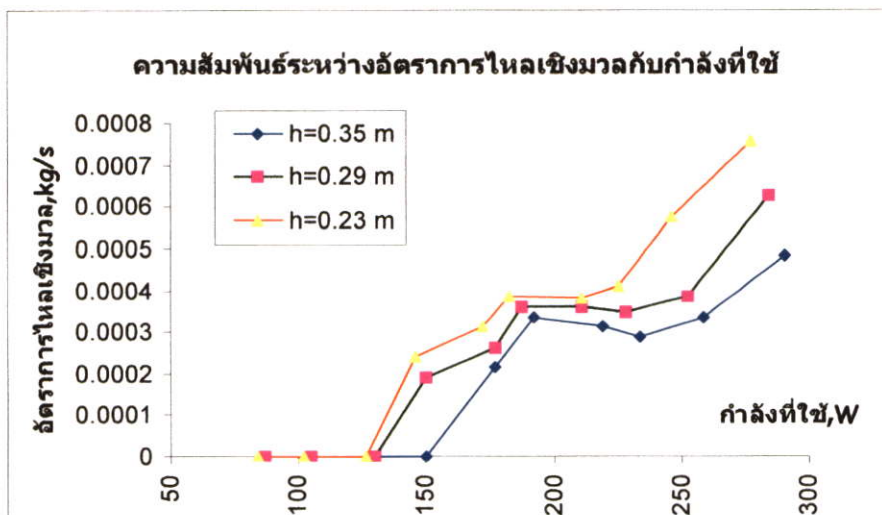


รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะรูปทรงของใบพัดใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง

จากการศึกษาโดยทำการทดลองจะพบว่าที่ระดับการจมที่น้อยที่สุด เป็นระดับการจมที่สามารถสร้างอัตราการไหลเชิงมวลมากกว่าระดับอื่น ในสภาวะความเร็วรอบเดียวกัน และ การใช้กำลังงานจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระดับที่ลึกกว่า เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบมากขึ้นเรื่อยๆ จนความเร็วของใบพัดที่ 1400 รอบ จะพบว่ากราฟมีแนวโน้มในการสร้างอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น แต่จากการทดลองที่ความเร็วรอบประมาณ 1000 รอบ เมื่อเทียบกับความเร็วรอบใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่า ความเร็วรอบประมาณ 1000 รอบ กลับสร้างอัตราการไหลเชิงมวลที่มากกว่า ซึ่งเป็นช่วงที่น่าสนใจ ซึ่งในขณะที่ทำการทดลองนั้นในช่วงความเร็วรอบประมาณ 1000 นี้ เครื่องจะมีการสั่นสะเทือนของเพลลา ซึ่งในช่วงที่เกิดการสั่นอาจเป็นตัวช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามการสั่นสะเทือนของเพลลา ในทางปฏิบัติเราต้องทำการหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือน เพราะว่าอาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์อื่นได้

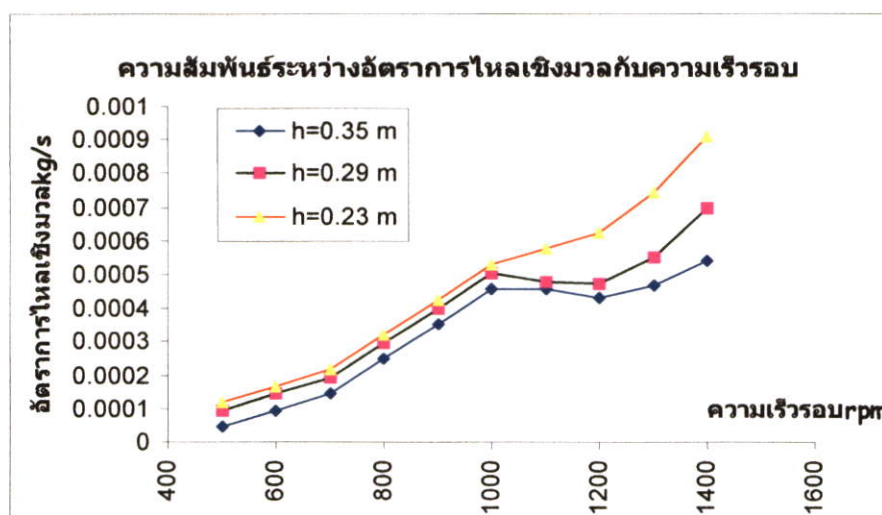


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับความเร็วรอบแบบใช้ความดันหลังใบพัด

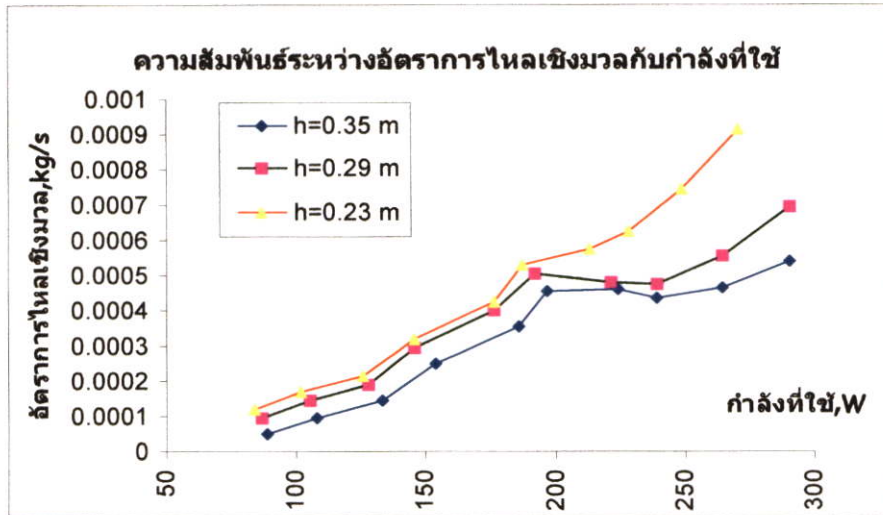


**รูปที่ 5.6** แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับกำลังที่ใช้แบบใช้ความดันหลังใบพัด

จากรูปที่ 5.5 ที่ความเร็วรอบช่วงตั้งแต่ 500 – 800 รอบต่อนาที จะพบว่าอัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากความเร็วของใบพัดยังไม่เพียงพอ จะทำให้ความดันด้านหลังใบพัดมีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบสูงขึ้น จะเห็นได้ว่ามีอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับใบพัดแบบใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง จากรูปที่ 5.7 จะพบว่าอัตราการไหลของอากาศของแบบนี้ จะเกิดขึ้นตั้งแต่ความเร็วรอบต่ำ ที่ความเร็วรอบสูงและระดับการจมของใบพัดเดียวกัน จะพบว่าใบพัดแบบใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง จะมีอัตราการไหลที่มากกว่าใบพัดแบบใช้ความดันหลังใบพัด



**รูปที่ 5.7** แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับความเร็วรอบแบบใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง



**รูปที่ 5.8** แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับกำลังที่ใช้ แบบใช้ความดันหลังใบพัด ร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง

**ตารางที่ 5.3** ผลเปรียบเทียบการทดลอง

ใบพัด	อัตราการไหลเชิงมวล	AE <sub>20</sub>
รูปแบบที่ 1.	น้อยกว่า	1.08
รูปแบบที่ 2.	มากกว่า	0.84

ในการพิจารณาว่าใบพัดแบบไหนมีประสิทธิภาพมากกว่านั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เลยว่าใบพัดแบบไหนดีกว่า ทั้งที่ใบพัดแบบใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลางมีการสร้างอัตราการไหลเชิงมวลดีกว่าก็ตาม แต่เมื่อเทียบกับกำลังงานที่ใช้ในการขับใบพัดกลับใช้กำลังมาก เพราะยังมีตัวแปรของขนาดของฟองที่ออกมาว่า มีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ ถ้าฟองขนาดเล็กจะมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำมากกว่า ซึ่งสามารถทำให้เกิดการถ่ายเทมวลได้ดีกว่า

ในการทดลองเพื่อหาตัวแปรเบื้องต้น รูปทรงของใบพัด ความเร็วรอบ ระดับการจมของใบพัด ขนาดของฟองอากาศ การสันสะท้อน ปริมาณของน้ำ และกำลังในการขับเคลื่อน จะมีผลโดยตรงกับอัตราการไหล ประสิทธิภาพ แต่อุณหภูมิในการทดสอบ ไม่ผลกระทบนอกจากมีสมการปรับเปลี่ยนค่า ให้ค่ากลับมาที่อุณหภูมิมาตรฐานในการทดสอบที่ 20 องศาเซลเซียส

## 5.4 ผลการทดลอง

ในการทดลองใช้ใบพัด 12 แบบ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูทางออกและจำนวนรูต่างกัน ดังแสดงรูปทรงของใบพัดดังตารางที่ 4.1 โดยที่อาศัยหลักการทำงานแบบใช้ความดันหลังใบพัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเท่ากัน 100 มิลลิเมตร และจำนวนก้านใบของใบพัด 4 ก้านเท่ากัน เป็นรูปแบบที่คิดขึ้นมาใหม่ ใช้ปริมาณน้ำในการทดสอบเท่ากันที่ 46 ลิตร และระดับการจมของใบพัดในขณะที่ทำการทดสอบเท่ากัน ในการทดสอบจะใช้เงื่อนไขในการทดลองเหมือนกัน แต่จะเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ จำนวนรูเจาะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้านใบ และความเร็วรอบของใบพัด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล, กำลังงานที่ใช้ และประสิทธิภาพในการเติมอากาศ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะรูปทรงของใบพัด

จากตารางที่ 5.4 เป็นตารางแสดงข้อมูลผลการทดลองของกำลังงานที่ใช้ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปริมาณออกซิเจนในน้ำ และประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลของออกซิเจน จะพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนมากที่สุด จะเป็นรูปแบบใบพัด N-233 ที่ความเร็วรอบ 1600 rpm และประสิทธิภาพสูงสุดที่รูปแบบใบพัด N-233 ที่ความเร็วรอบ 1300 rpm

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองของประสิทธิภาพเปรียบเทียบรูปทรงใบพัดเมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบ

ชื่อรูปทรงใบพัด	ความเร็วรอบ rpm	$kL_{a10}$	$kL_{a20}$	Power(w)	AE <sub>20</sub>
N-111	1300	21.047	26.681	27.531	0.405
	1375	29.072	37.982	43.156	0.368
	1450	37.097	47.026	54.431	0.361
	1525	42.072	55.015	65.000	0.354
	1600	47.047	59.640	70.231	0.355
N-112	1300	23.193	29.401	26.780	0.459
	1375	31.062	40.334	41.813	0.403
	1450	38.931	49.351	52.346	0.394
	1525	43.350	58.983	63.123	0.391
	1600	47.769	60.555	67.592	0.375
N-113	1300	24.398	30.929	25.369	0.510
	1375	32.033	40.607	38.467	0.441
	1450	39.668	50.285	50.235	0.419
	1525	44.122	55.931	59.789	0.391
	1600	48.576	61.577	66.984	0.384
N-121	1300	32.987	41.816	26.231	0.667
	1375	38.772	49.150	40.397	0.509
	1450	44.558	56.484	50.213	0.470
	1525	45.960	58.261	62.375	0.391
	1600	47.361	60.038	70.156	0.358
N-122	1300	36.890	46.763	24.269	0.806
	1375	43.589	55.255	38.500	0.600
	1450	50.288	63.747	50.213	0.531
	1525	54.638	69.262	59.239	0.489
	1600	58.988	74.776	65.897	0.474
N-123	1300	44.971	57.007	23.156	1.029
	1375	50.644	64.199	33.280	0.807
	1450	56.317	71.390	45.263	0.660
	1525	59.815	75.825	55.379	0.573
	1600	63.314	80.260	65.210	0.515

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

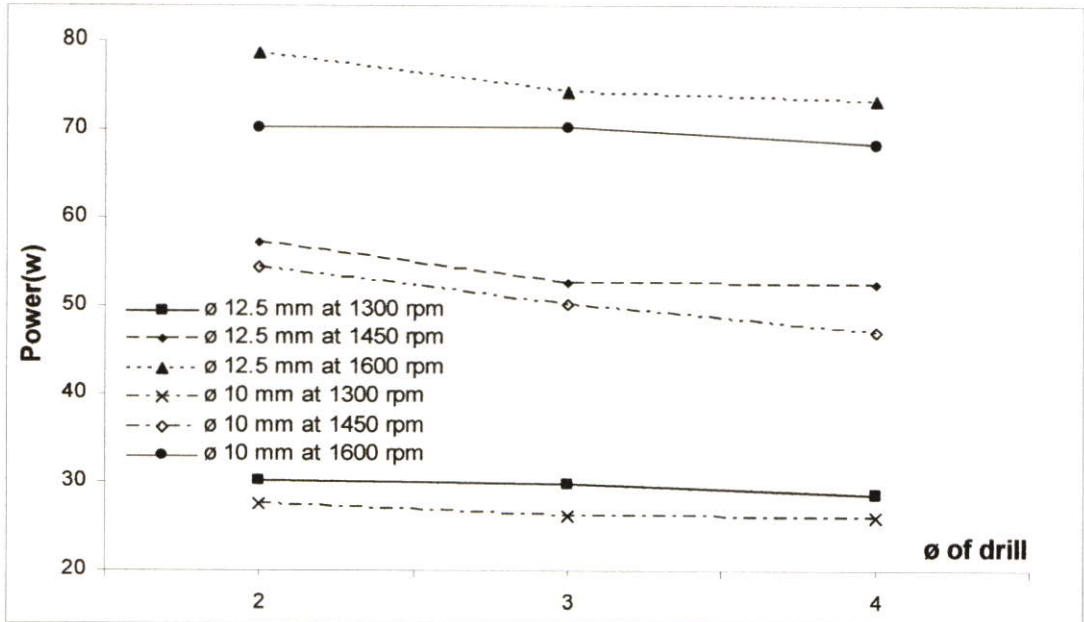
ชื่อรูปทรงใบพัด	ความเร็วรอบ rpm	$kL_{a10}$	$kL_{a20}$	Power(w)	AE <sub>20</sub>
N-131	1300	37.088	47.015	26.000	0.756
	1375	42.366	53.706	38.778	0.579
	1450	47.645	60.397	47.056	0.537
	1525	49.875	63.224	59.847	0.442
	1600	52.105	66.051	68.213	0.405
N-132	1300	37.801	51.234	23.124	0.926
	1375	46.716	59.845	36.446	0.687
	1450	55.631	68.456	45.268	0.632
	1525	59.079	73.859	55.789	0.554
	1600	62.527	79.262	63.214	0.524
N-133	1300	48.544	61.537	22.356	1.151
	1375	53.479	67.792	34.056	0.832
	1450	58.413	74.047	41.256	0.750
	1525	61.894	78.460	53.785	0.610
	1600	65.374	82.872	61.235	0.566
N-211	1300	23.566	29.873	30.120	0.415
	1375	33.916	42.993	43.701	0.411
	1450	44.266	56.113	57.212	0.410
	1525	51.556	65.354	68.547	0.399
	1600	58.845	74.595	80.123	0.389
N-212	1300	24.937	31.612	28.362	0.466
	1375	35.713	47.124	42.409	0.465
	1450	46.489	58.931	54.000	0.456
	1525	52.818	66.955	66.090	0.424
	1600	59.148	74.979	74.812	0.419
N-213	1300	26.775	33.941	27.236	0.521
	1375	37.135	47.074	41.457	0.475
	1450	47.495	60.207	53.253	0.473
	1525	55.985	70.969	65.205	0.455
	1600	64.475	81.731	74.687	0.458

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

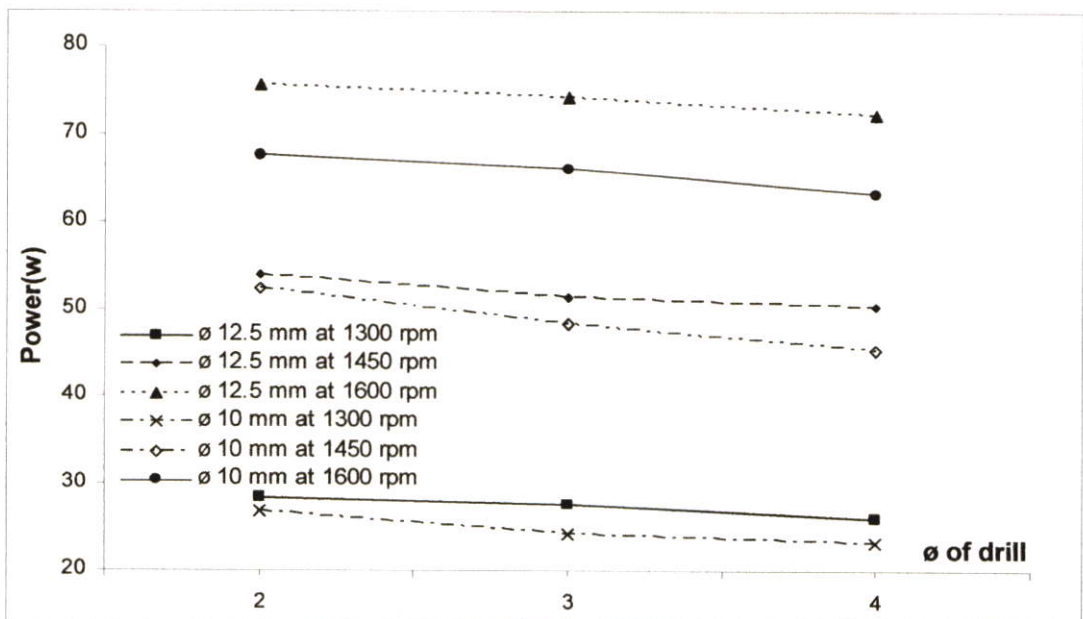
ชื่อรูปทรงใบพัด	ความเร็วรอบ rpm	$kL_{a10}$	$kL_{a20}$	Power(w)	AE <sub>20</sub>
N-221	1300	38.037	48.218	29.851	0.675
	1375	46.957	59.525	42.476	0.586
	1450	55.877	70.833	52.600	0.563
	1525	59.838	75.853	64.626	0.491
	1600	63.798	80.873	74.256	0.455
N-222	1300	44.026	55.809	27.600	0.846
	1375	56.274	71.336	40.594	0.735
	1450	68.523	86.863	53.371	0.681
	1525	77.764	98.577	63.982	0.644
	1600	87.005	110.292	74.210	0.621
N-223	1300	57.207	72.518	26.000	1.166
	1375	69.439	88.024	39.028	0.943
	1450	81.671	103.531	49.660	0.872
	1525	89.332	113.241	62.186	0.761
	1600	96.992	122.952	72.347	0.711
N-231	1300	43.601	55.271	28.523	0.810
	1375	57.321	72.662	41.694	0.729
	1450	71.040	90.054	52.364	0.719
	1525	80.214	101.684	64.030	0.664
	1600	89.389	113.314	73.256	0.647
N-232	1300	46.469	58.907	26.023	0.947
	1375	62.043	78.649	39.459	0.833
	1450	77.617	98.392	50.321	0.818
	1525	85.484	108.364	62.481	0.725
	1600	93.350	118.335	72.140	0.686
N-233	1300	62.971	79.825	25.560	1.306
	1375	74.888	94.932	37.012	1.073
	1450	86.806	110.039	45.948	1.001
	1525	93.960	119.108	58.337	0.854
	1600	101.114	128.177	68.256	0.785

#### 5.4.1 ผลกระทบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะที่ก้านใบพัด

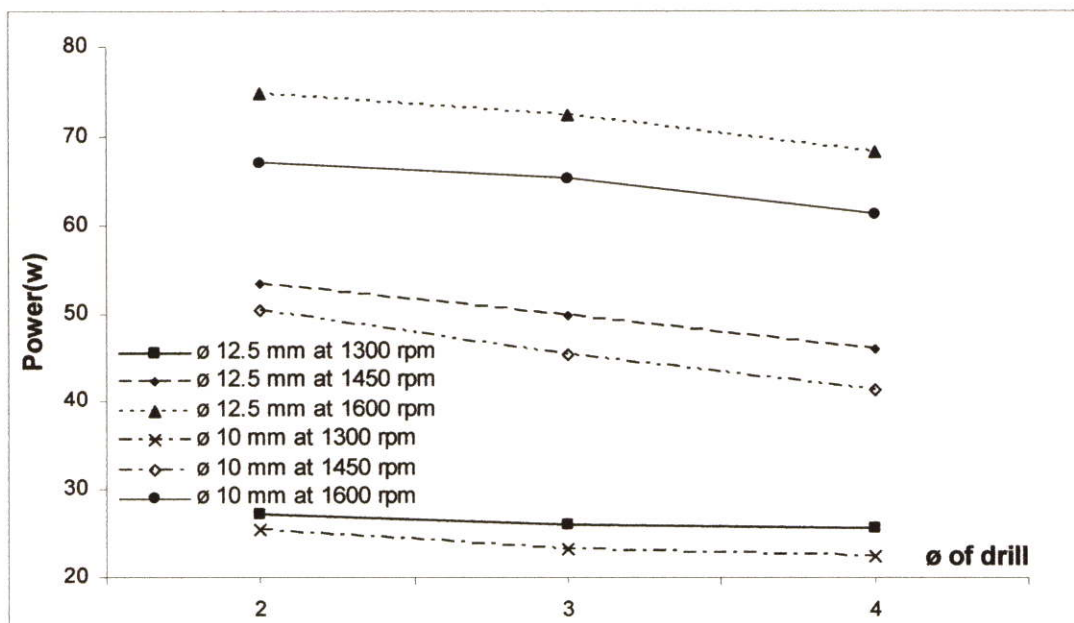
ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลกระทบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะที่ก้านใบพัด โดยนำค่าผลการทดลองจากตาราง 5.4 ฟล็อตเพื่อดูพฤติกรรม



รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับกำลังงานที่จำนวนรูเจาะ 4 รู

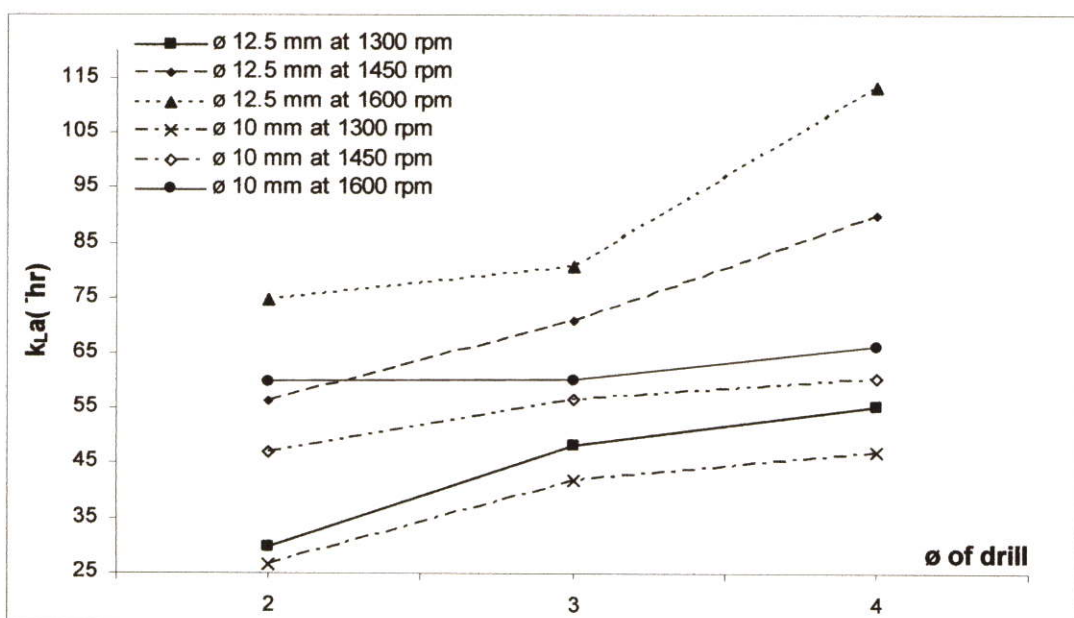


รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับกำลังงานที่จำนวนรูเจาะ 5 รู

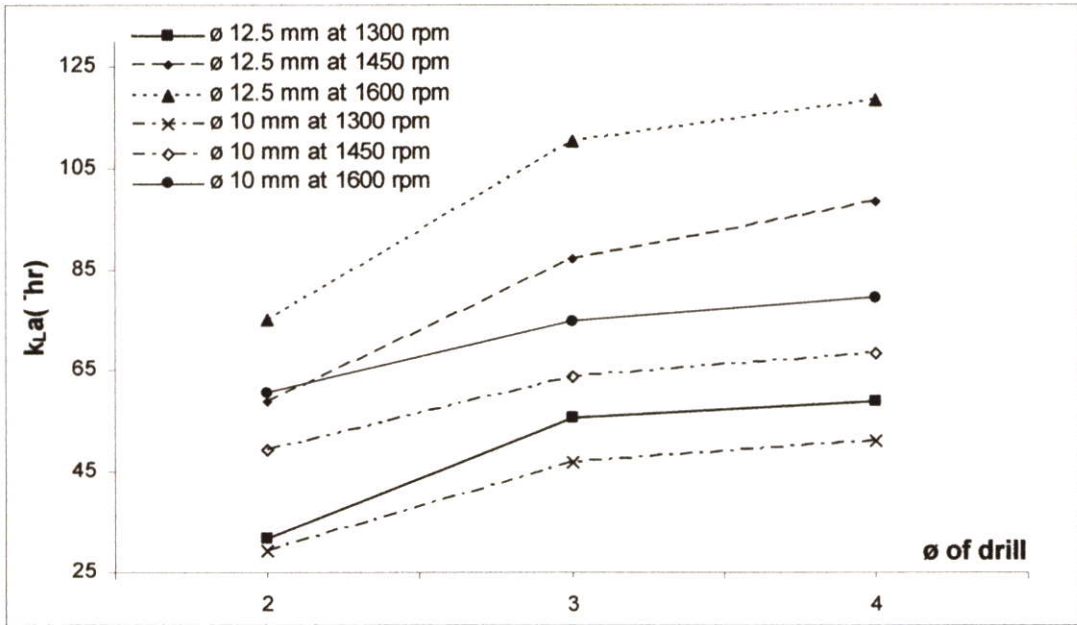


รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับกำลังงานที่จำนวนรูเจาะ 6 รู

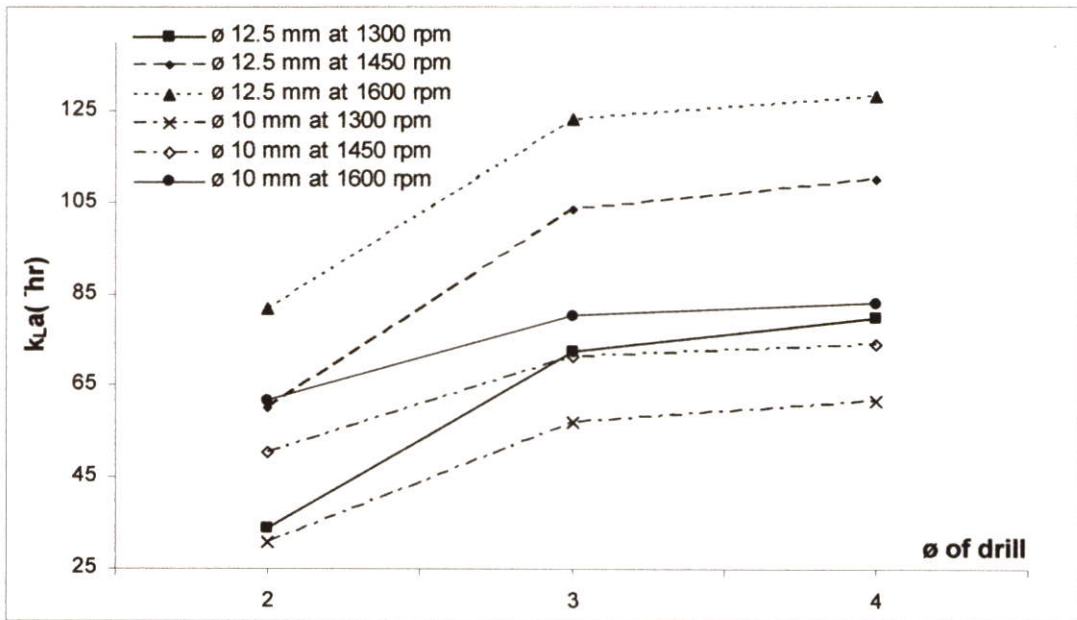
จากรูปที่ 5.10, รูปที่ 5.11 และ รูปที่ 5.12 จะพบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเพิ่มขึ้น การใช้กำลังงานของใบพัดจะน้อยลงตาม ที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ขณะที่ก้านของใบพัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าเดิม การใช้กำลังงานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของไหล ในเรื่องแรงต้านทานการไหล ความเร็วจะเป็นกำลังสองของแรงต้านทาน ถ้าความเร็วมากแรงต้านทานการไหลก็จะมากขึ้นตาม และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านใบพัดเพิ่มขึ้นจาก 10 มิลลิเมตร เป็น 12.5 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบของใบพัดเท่ากัน การใช้กำลังงานของก้านใบพัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร จะมีการใช้กำลังงานในการขับเคลื่อนมากกว่า ก้านใบพัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่จำนวนรูเจาะ 4 รู



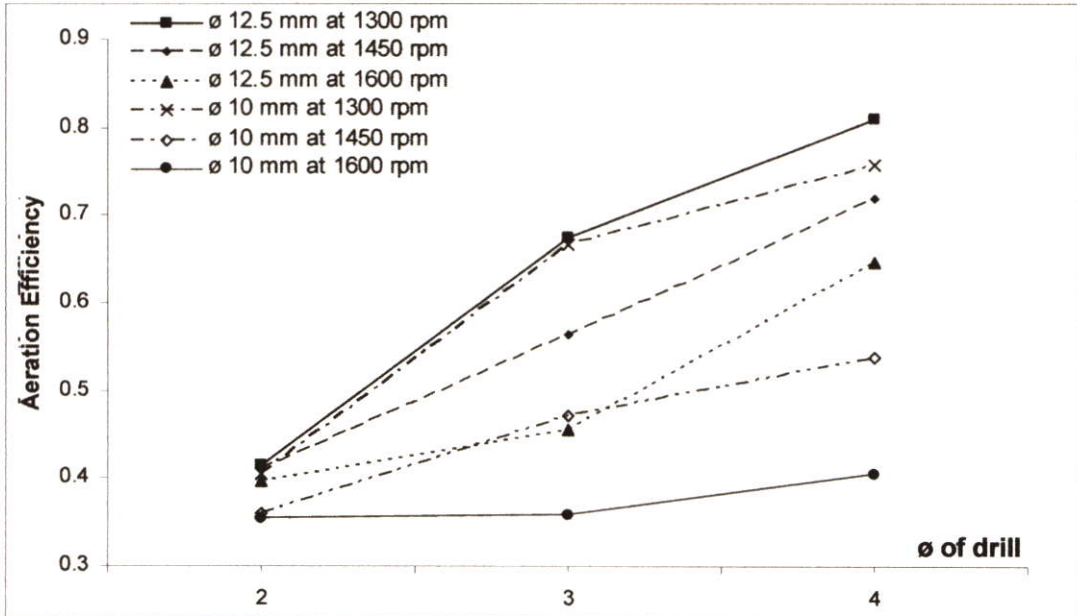
รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่จำนวนรูเจาะ 5 รู



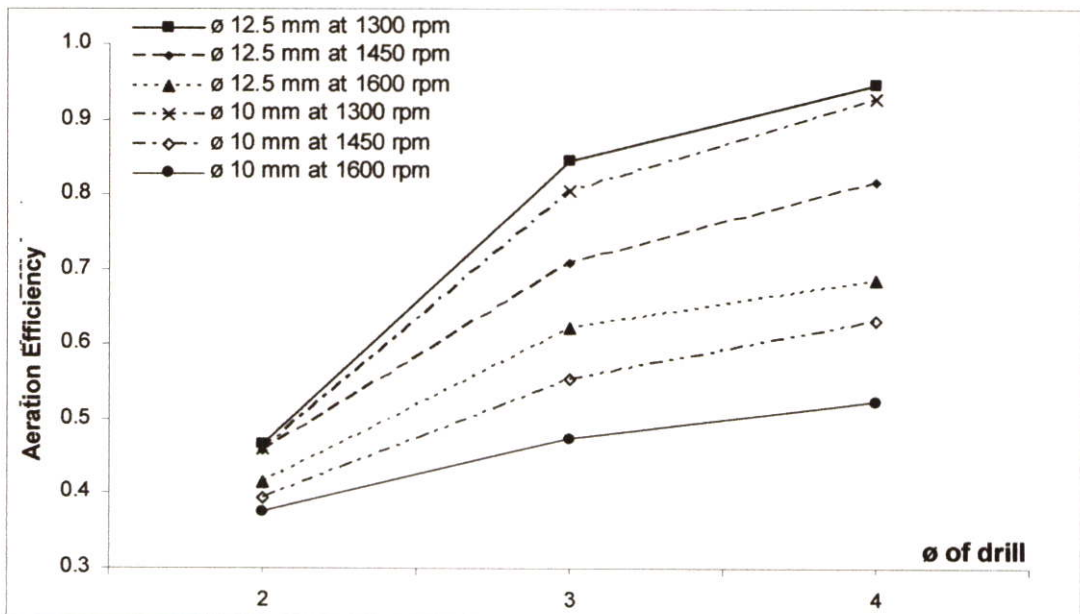
รูปที่ 5.15 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่จำนวนรูเจาะ 6 รู

จากรูปที่ 5.13, รูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 แสดงถึงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนจะแปรผันโดยตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นตาม จากกราฟจะพบว่าที่ความเร็วรอบที่สูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านใบ 12.5 มิลลิเมตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสูงกว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านใบ 10 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบของใบพัดเดียวกัน

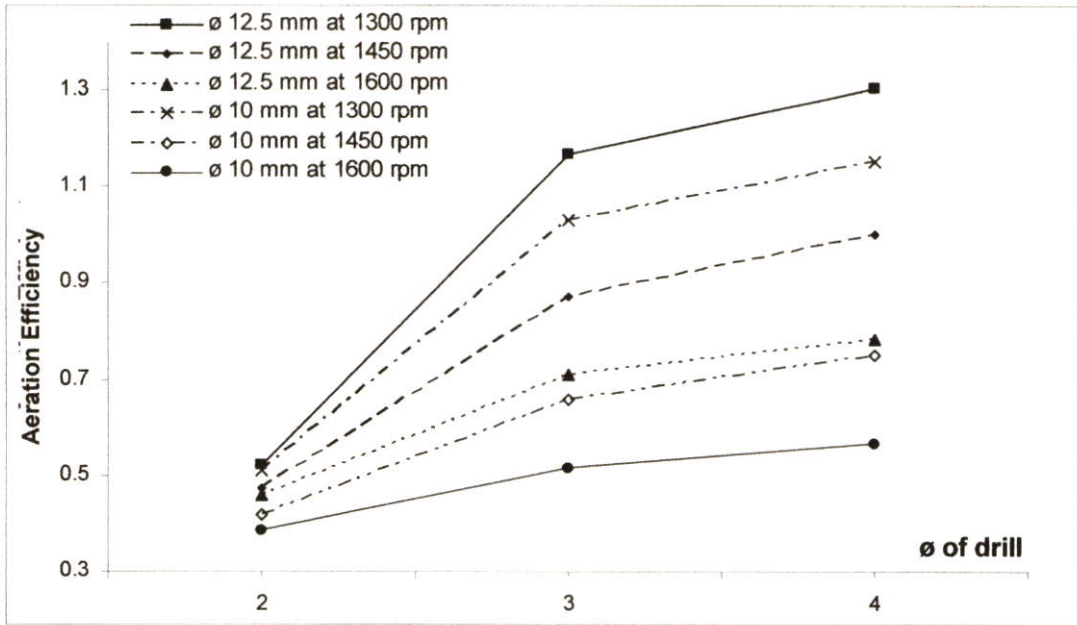
จากรูปที่ 5.16, รูปที่ 5.17 และรูปที่ 5.18 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศเพิ่มขึ้นตาม และที่ความเร็วรอบของใบพัดพัดเท่ากัน แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านใบพัดของ 12.5 มิลลิเมตร จะมีประสิทธิภาพมากกว่า แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านใบพัดของ 10 มิลลิเมตร จากกราฟจะสังเกตได้ว่าที่ความเร็วเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านใบพัดเท่าเดิม ประสิทธิภาพในการเติมอากาศจะสูงขึ้นตาม



รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับประสิทธิภาพที่จำนวนรูเจาะ 4 รู



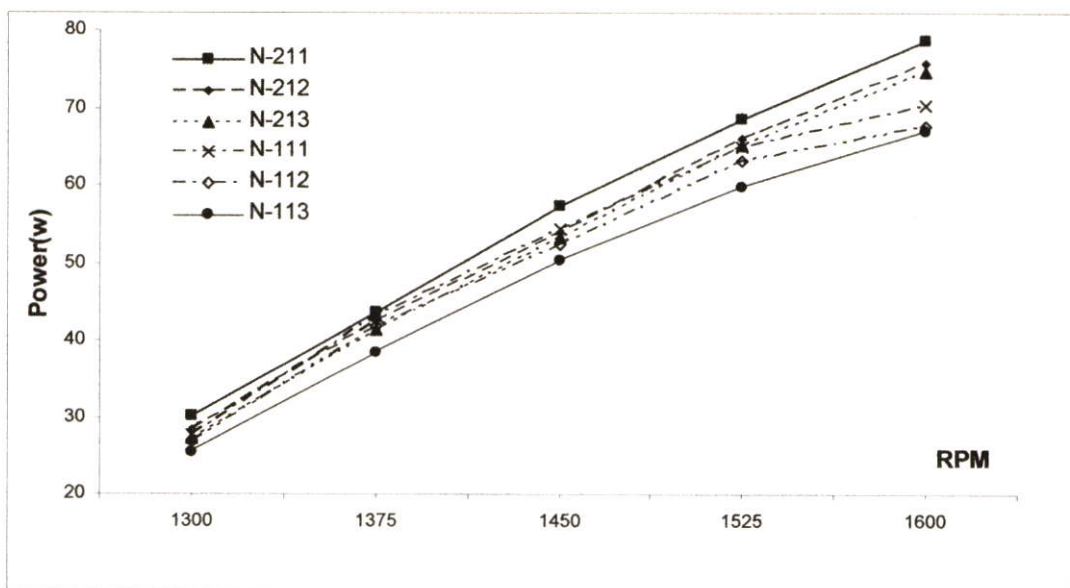
รูปที่ 5.17 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับประสิทธิภาพที่จำนวนรูเจาะ 5 รู



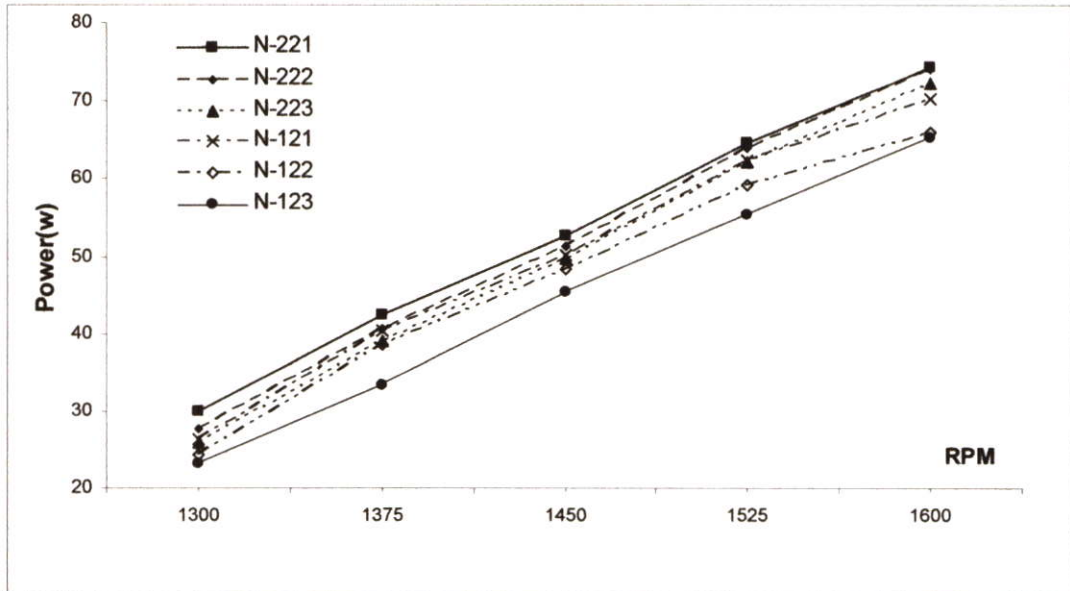
รูปที่ 5.18 กราฟเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะกับประสิทธิภาพที่จำนวนรูเจาะ 6 รู

#### 5.4.2 ผลกระทบของความเร็รรอบของใบพัด

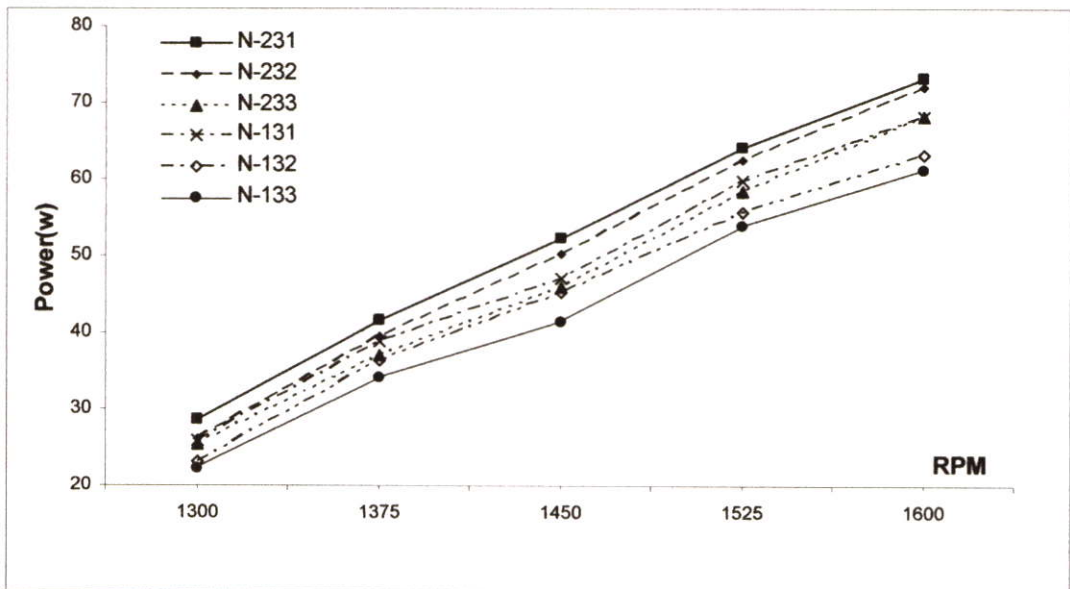
จากรูปที่ 5.19, รูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 เป็นกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็รรอบกับกำลังงานในการขับเคลื่อนใบพัด จะพบว่ากำลังงานจะแปรผันโดยตรงกับความเร็รรอบของใบพัด โดยที่ความเร็รรอบของใบพัดเพิ่มขึ้น อัตราการใช้กำลังงานจะเพิ่มขึ้น ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะเท่ากันและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านใบเท่ากัน จำนวนรูเจาะที่มากกว่าจะมีการใช้กำลังงานน้อยกว่า เช่น N-213 ที่มีจำนวนรูเจาะที่มากกว่า N-212 และ N-211 จะใช้กำลังงานน้อยกว่าตามลำดับ



รูปที่ 5.19 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับความเร็รรอบของใบพัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 2 มิลลิเมตร



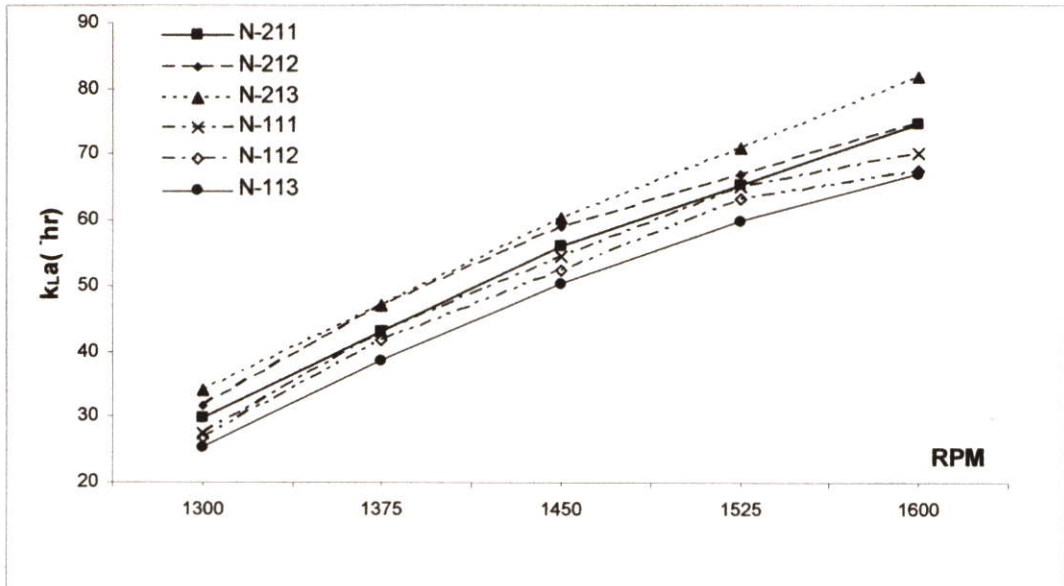
รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับความเร็วรอบของใบพัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รูเจาะ 3 มิลลิเมตร



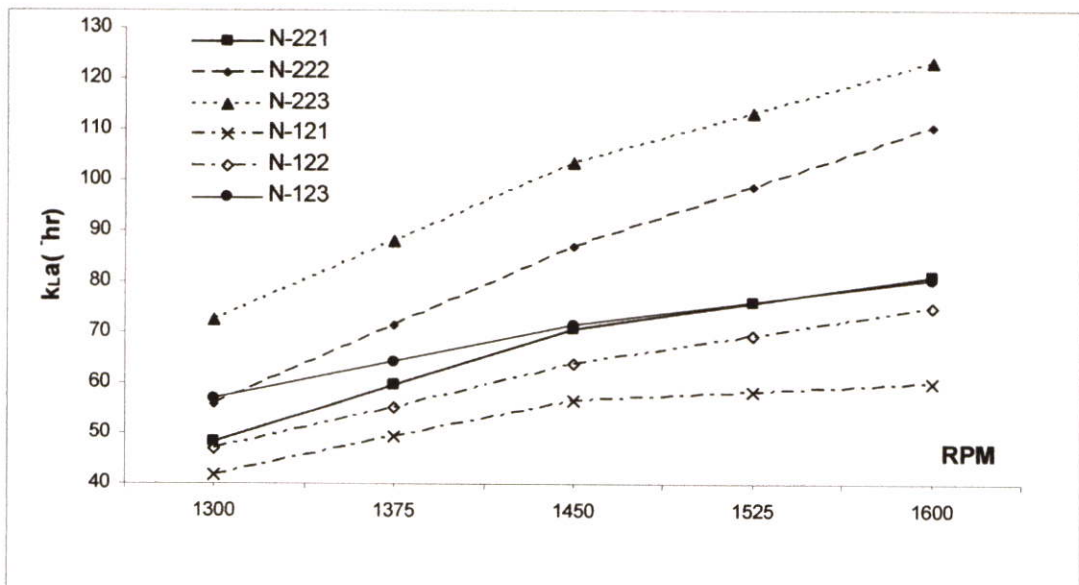
รูปที่ 5.21 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับความเร็วรอบของใบพัดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รูเจาะ 4 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 5.22 รูปที่ 5.23 และรูปที่ 5.24 แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่ความเร็วรอบของใบพัดเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเป็นตัวบ่งชี้การใช้เวลาในการทำให้ออกซิเจนอิ่มตัว โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลยิ่งมากการใช้เวลาจะน้อยลง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านใบของ 12.5 มิลลิเมตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมากกว่า 10 มิลลิเมตร ยกตัวอย่างเช่น รูปที่ 5.18 ใบพัด N-231, N-232, และ N-233 ซึ่งเป็นใบพัดที่มีขนาดเส้น

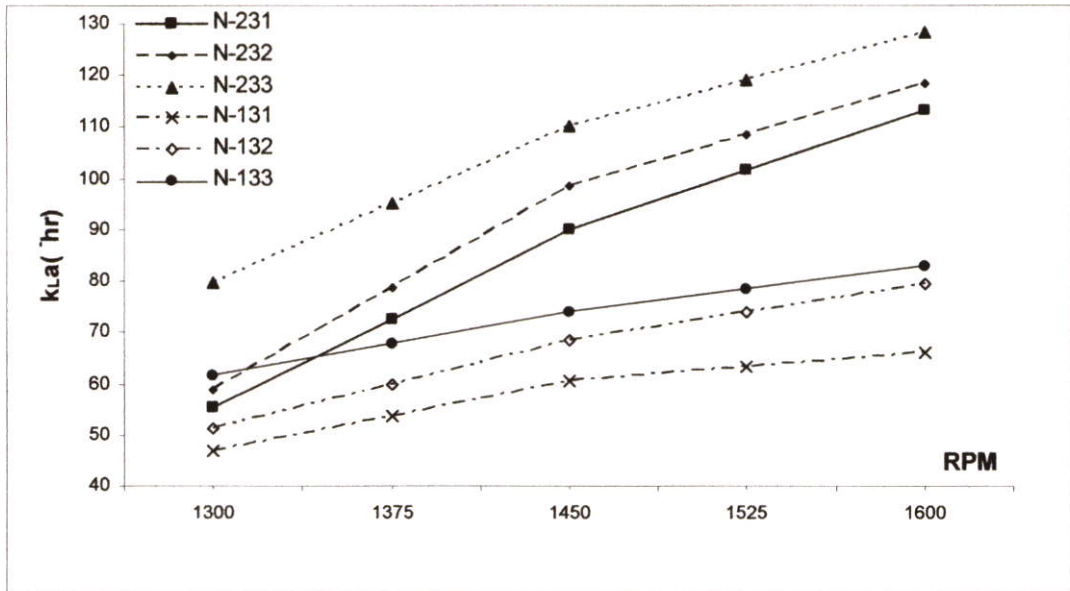
ผ่านศูนย์กลางก้านใบพัด 12.5 มิลลิเมตร จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่สูงกว่าใบพัด N-131, N-132 และ N-133 ซึ่งเป็นใบพัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้านใบพัด 10 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบ 1450 และ 1600 จะเห็นได้ชัดเจน และจากกราฟจะพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลยังแปรผันตามจำนวนรูเจาะ เช่น N-233 ที่มีจำนวนรูเจาะที่มากกว่า N-232 และ N-231 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมากกว่าตามลำดับ



รูปที่ 5.22 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 2 มิลลิเมตร

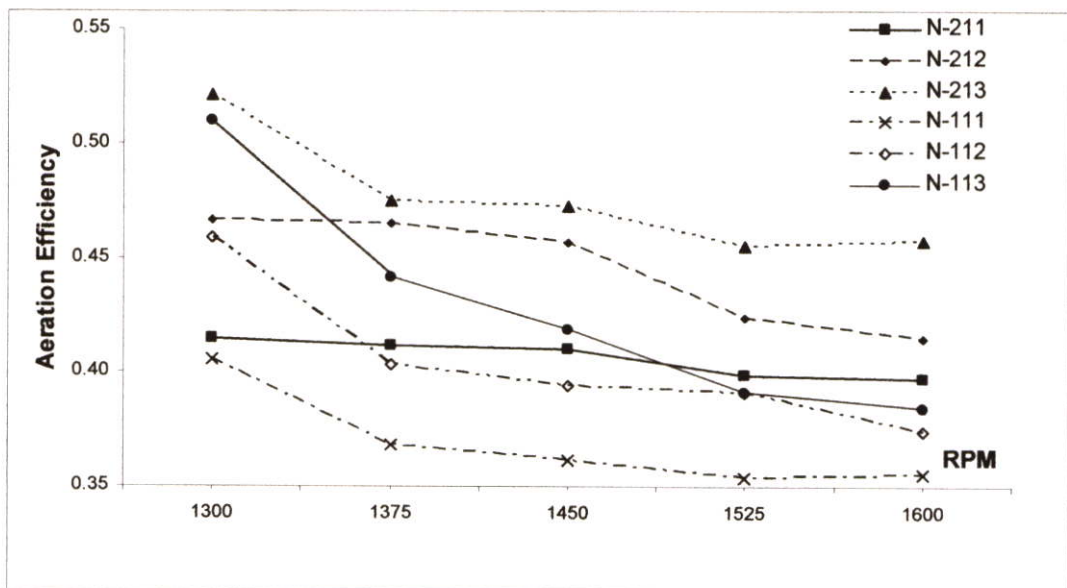


รูปที่ 5.23 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 3 มิลลิเมตร

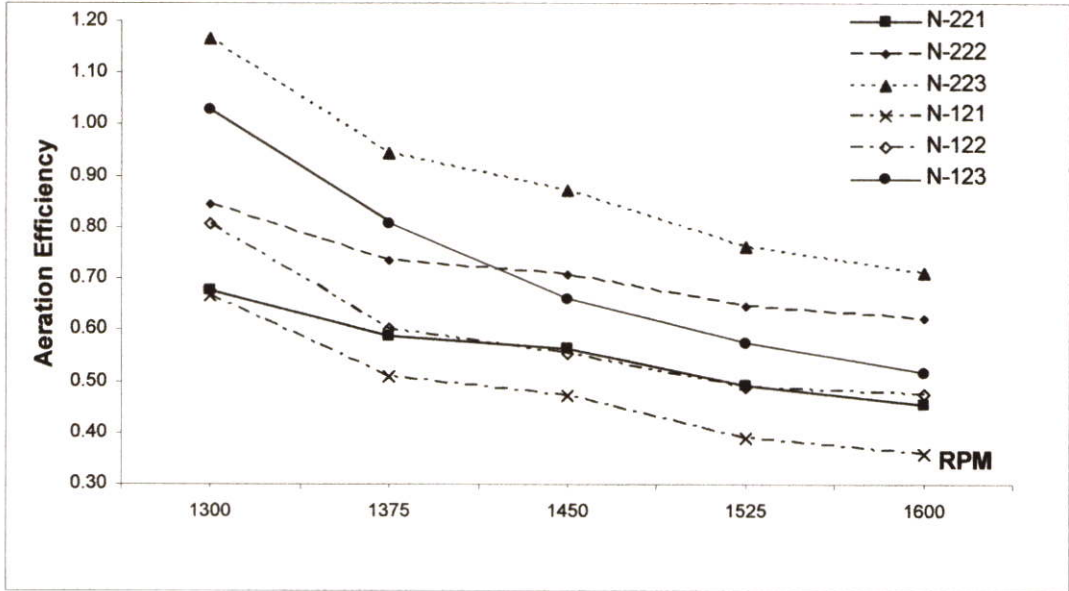


รูปที่ 5.24 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับความเร็วรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 4 มิลลิเมตร

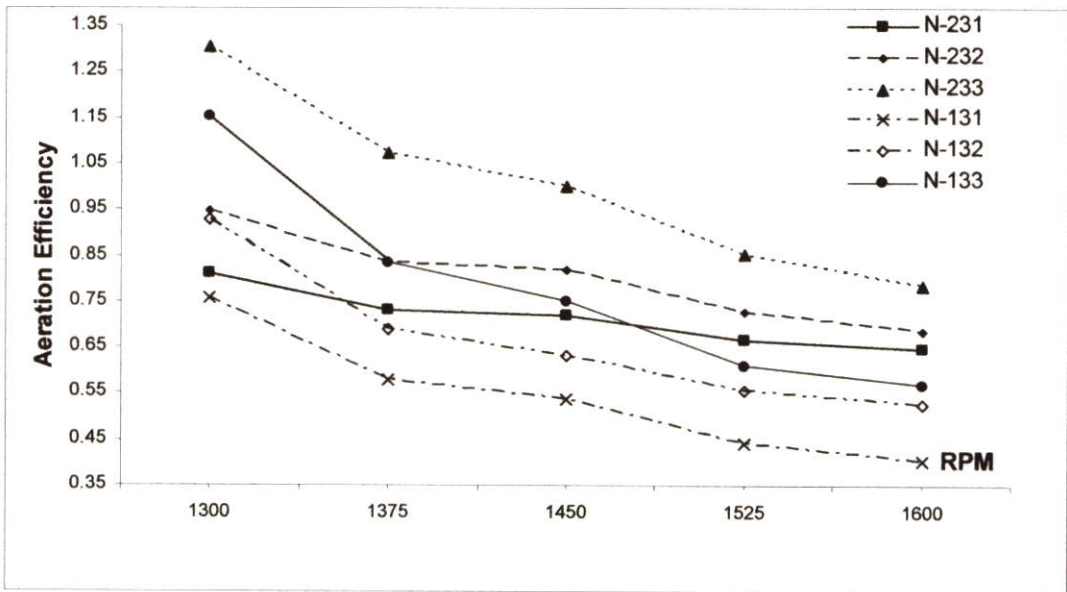
จากรูปที่ 5.25, รูปที่ 5.26 และรูปที่ 5.27 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความเร็วยรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะใช้กำลังงานมากขึ้นตาม ดังที่แสดงในรูปที่ 5.19 รูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 ที่ผ่านมา โดยที่ประสิทธิภาพการเติมอากาศจะคำนวณมาจากกำลังงานที่ใช้ ถ้าใช้กำลังงานมาก ประสิทธิภาพก็จะลดลงตาม



รูปที่ 5.25 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความเร็วยรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 2 มิลลิเมตร



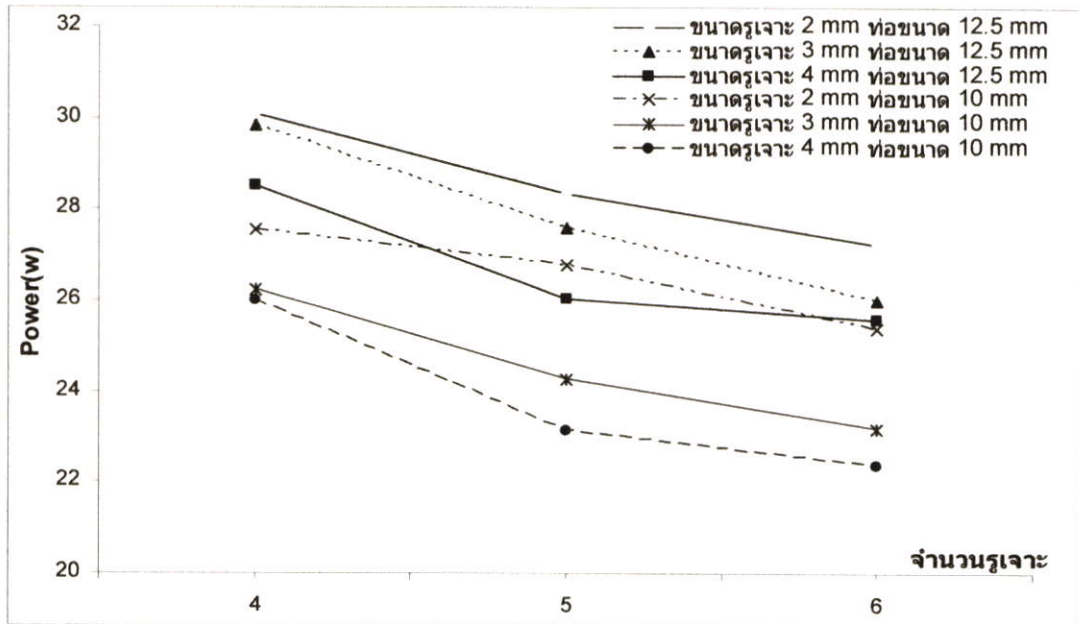
รูปที่ 5.26 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความเร็วยรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รูเจาะ 3 มิลลิเมตร



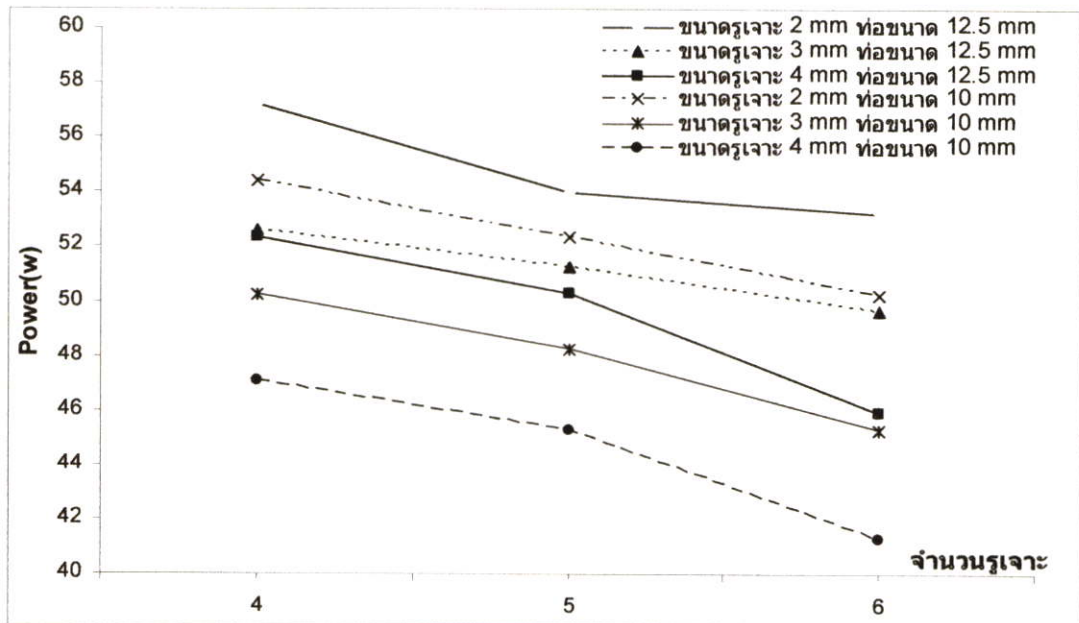
รูปที่ 5.27 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับความเร็วยรอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รูเจาะ 4 มิลลิเมตร

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเติมอากาศกับความเร็วยรอบของใบพัดจากกราฟที่ผ่านมามีสิ่งที่น่าสนใจที่ว่า แม้ประสิทธิภาพจะลดลงที่ความเร็วยรอบที่สูง แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายมวลของออกซิเจนสูงขึ้น ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานจริงว่า ถ้าต้องการประสิทธิภาพสูงก็ต้องใช้เวลาในการเติมอากาศนาน เพราะการใช้ความเร็วยรอบต่ำจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่ำกว่าความเร็วยรอบที่สูง แต่ความเร็วยรอบต่ำใช้กำลังงานน้อยกว่า

### 5.4.3 ผลกระทบของจำนวนรูเจาะที่ก้านใบพัด



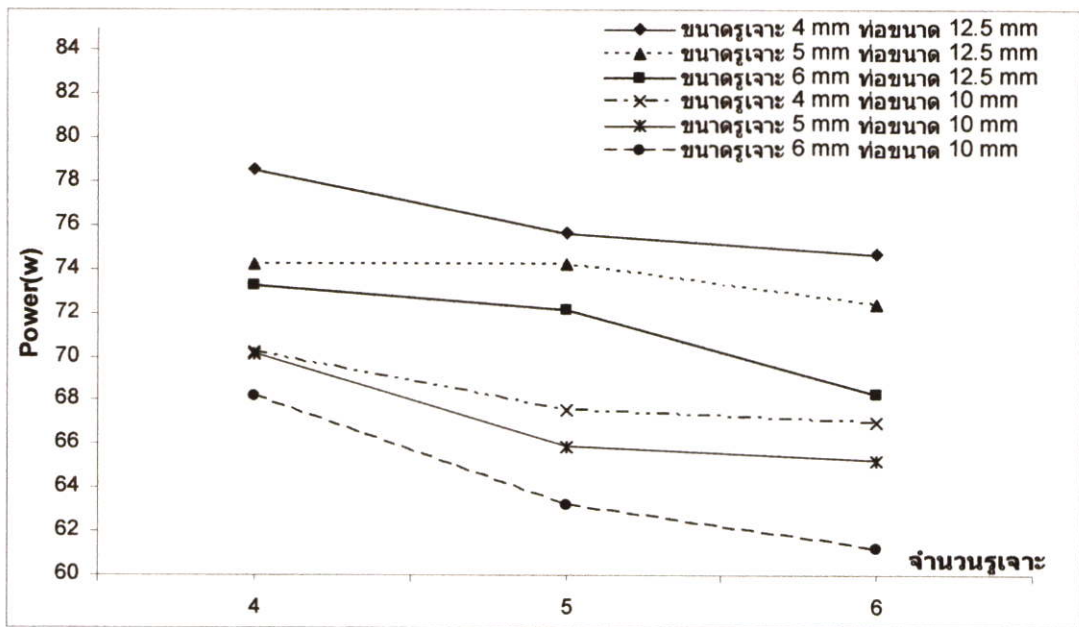
รูปที่ 5.28 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1300 rpm



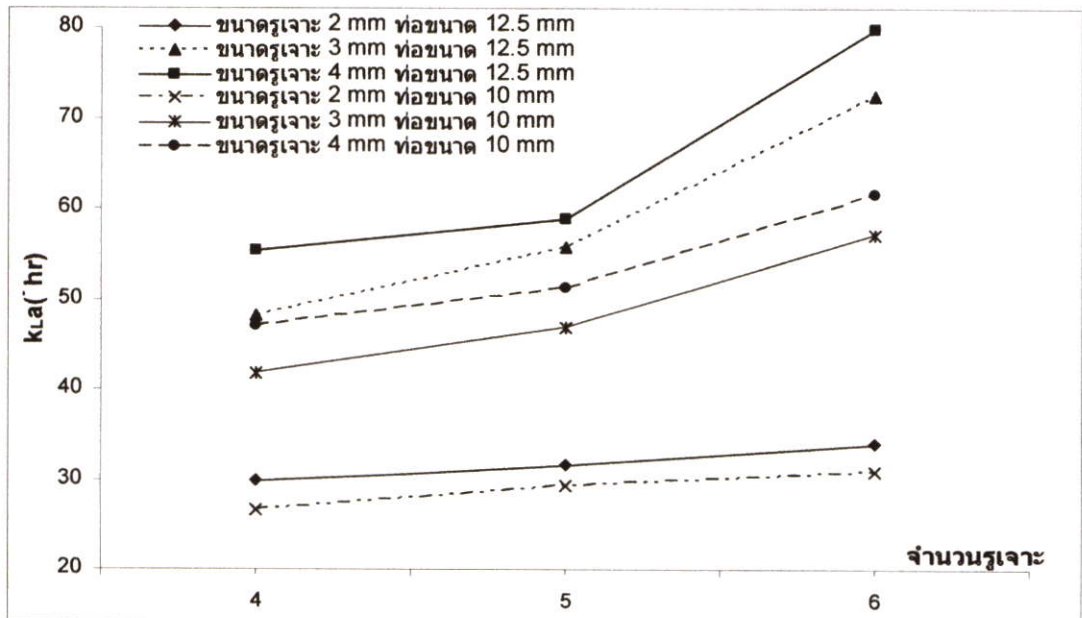
รูปที่ 5.29 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1450 rpm

จากรูปที่ 5.28, รูปที่ 5.29 และรูปที่ 5.30 เป็นกราฟเปรียบเทียบกำลังงานที่ใช้ขับใบพัดกับจำนวนรูเจาะที่ก้านใบพัดที่ความเร็วต่างๆ จะพบว่าจำนวนรูเจาะที่เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังงานที่ใช้ในการขับใบพัดลดลง ทางทฤษฎีอาจเกิดจากพื้นที่ของรูเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันบรรยากาศเข้ามาขัดขวางความดันด้านหลังใบพัดอย่างได้สะดวก และจากกราฟทั้งสามกราฟยังพบอีกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะที่มีขนาดเล็กกว่า จะมีการใช้กำลังงานในการขับใบพัดมากกว่า โดยในสามกราฟนี้ขนาดรูเจาะ 2 มิลลิเมตรที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้านใบ 12.5 มิลลิเมตร มีการใช้กำลัง

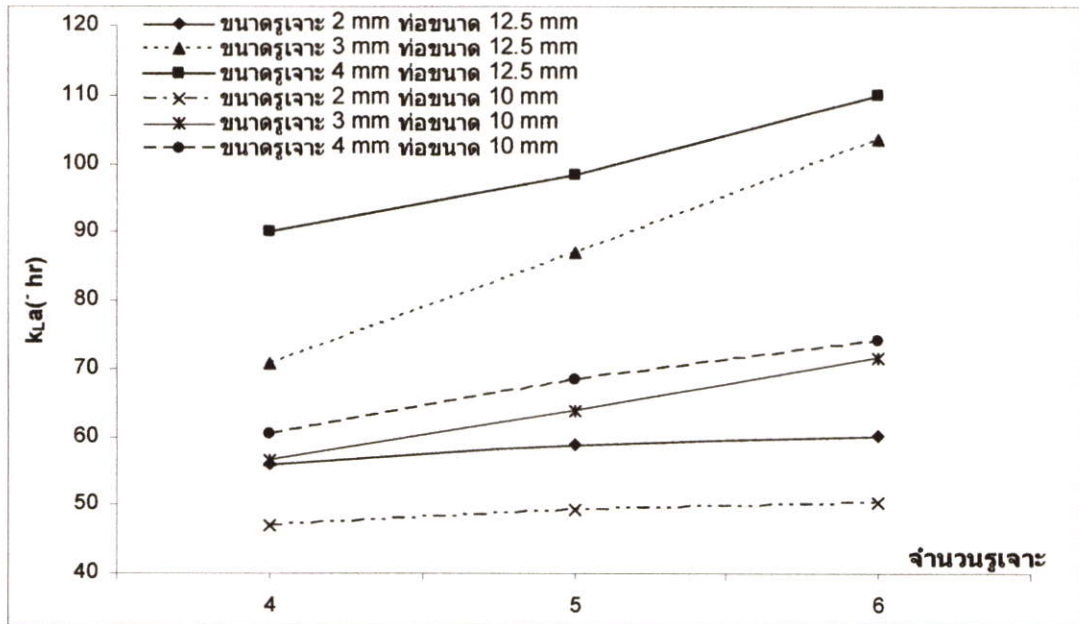
งานในการขับเคลื่อนมากในทุกๆความเร็วรอบ ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้านใบ 10 มิลลิเมตร จะมีการใช้กำลังงานในการขับเคลื่อนใบพัดน้อยกว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้านใบ 12.5 มิลลิเมตร มีเพียงกราฟในรูปที่ 5.28 และ รูปที่ 5.29 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 4 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้านใบ 10 มิลลิเมตร ที่มีใช้กำลังงานในการขับเคลื่อนมากกว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้านใบ 12.5 มิลลิเมตร เนื่องจากพื้นที่ด้านทานการไหลในวัตตจุมของก้านใบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร มีพื้นที่ด้านทานการไหลในวัตตจุมที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีแรงต้านทานการไหลในวัตตจุมถ้าพื้นที่มากก็จะเกิดแรงต้านทานการไหลมากขึ้นตาม



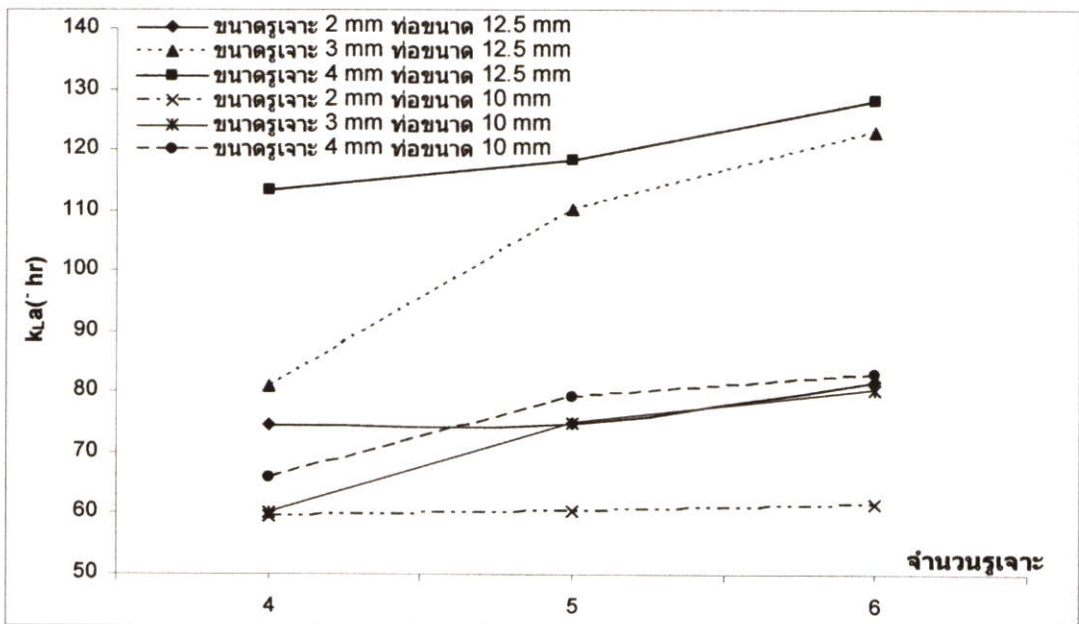
รูปที่ 5.30 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1600 rpm



รูปที่ 5.31 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1300 rpm



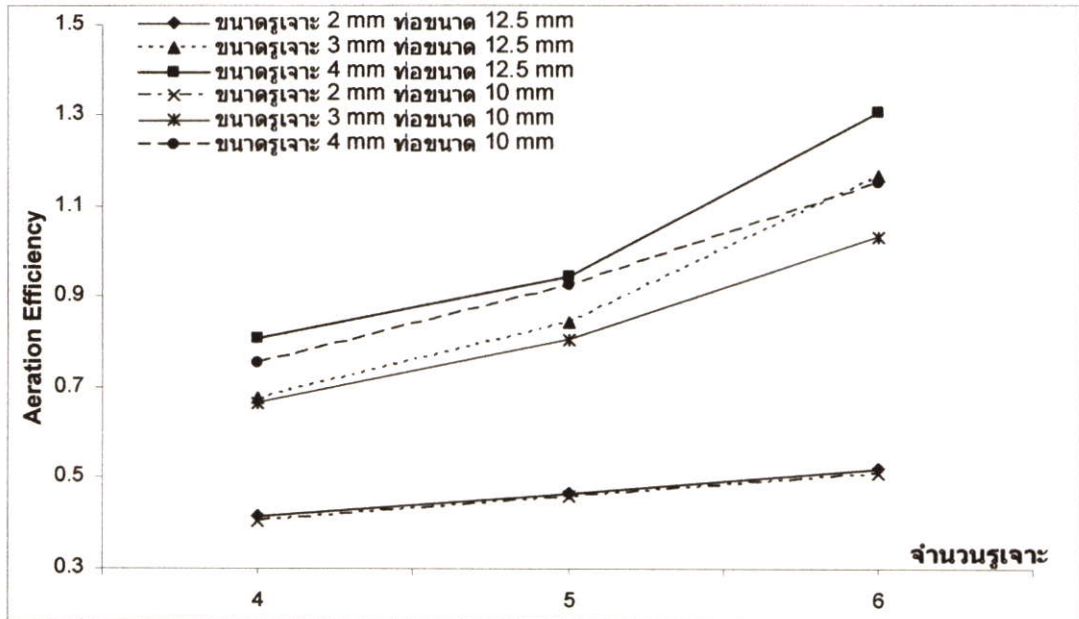
รูปที่ 5.32 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1450 rpm



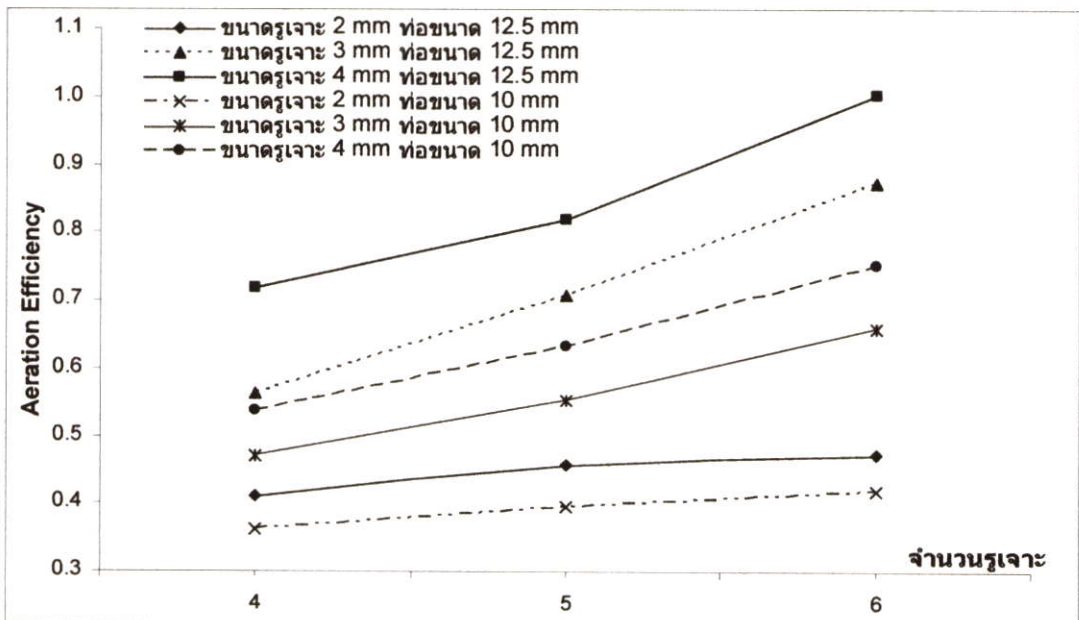
รูปที่ 5.33 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1600 rpm

จากรูปที่ 5.31 รูปที่ 5.32 และรูปที่ 5.33 เป็นกราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบต่างๆ จากกราฟจะเห็นได้ว่าจำนวนรูเจาะที่มากขึ้นส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนมากขึ้นตาม และขนาดรูเจาะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าที่จำนวนรูเจาะเท่ากัน จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมากกว่ารูเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ในขณะที่รูเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนรูเจาะเท่ากัน ขนาดก้านใบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร จะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมากกว่าก้านใบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

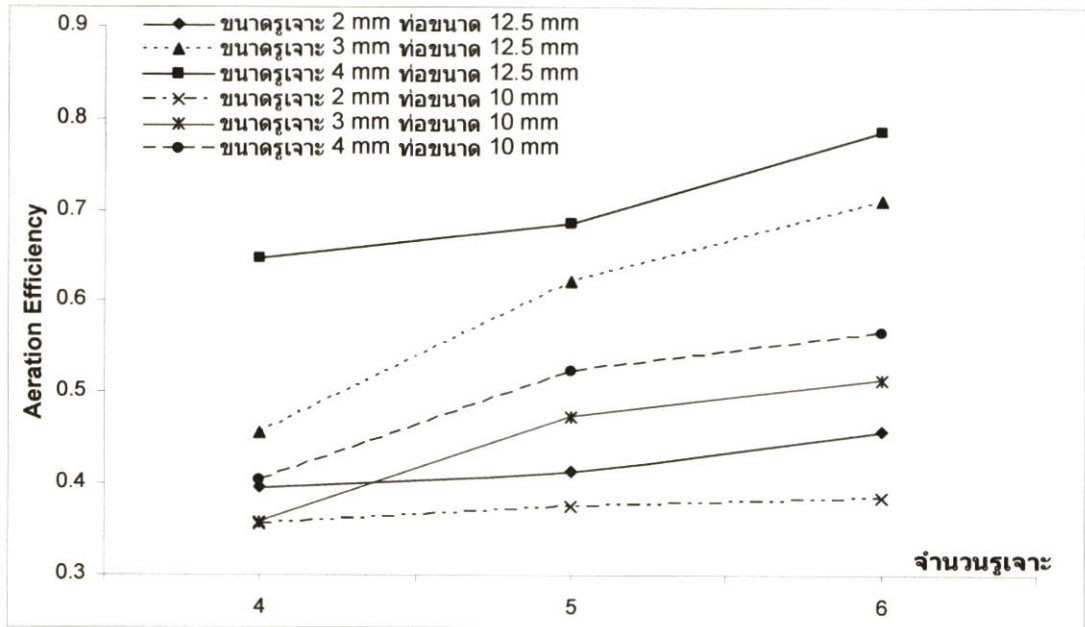
จากรูปที่ 5.34 รูปที่ 5.35 และรูปที่ 5.36 ประสิทธิภาพการเติมอากาศจะเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนรูเจาะเพิ่มจาก 4, 5 และ 6 มิลลิเมตรตามลำดับ เนื่องจากกำลังงานที่ใช้ในการขับใบพัดมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรูเจาะของใบพัดเพิ่มขึ้น โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 4 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร จะมีแนวโน้มของกราฟที่สูงที่สุด ในทุกความเร็วรอบของใบพัด เนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่าสูงขึ้นและกำลังงานในการขับใบพัดลดลงเมื่อจำนวนรูเจาะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.34 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1300 rpm



รูปที่ 5.35 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1450 rpm



รูปที่ 5.36 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับจำนวนรูเจาะที่ความเร็วรอบ 1600 rpm

## 5.5 การวิเคราะห์จากหน่วย

ในการวิเคราะห์จากหน่วยเพื่อทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรแต่ละตัว ที่ส่งผลกับตัวแปรอื่น ในที่นี้เป็นการวิเคราะห์จากหน่วย โดยใช้ Buckingham  $\pi$  Theorem สำหรับการพิจารณา ซึ่งจะนำตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศมาวิเคราะห์ โดยมีดังนี้

Quantity	Symbol	Dimension
Aeration efficiency at 20 °C (kg O <sub>2</sub> /kWh)	AE	T <sup>2</sup> /L <sup>2</sup>
Rotor diameter (m)	<i>D</i> <sub>r</sub>	L
Pipe diameter (m)	<i>D</i> <sub>p</sub>	L
Water density (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	M/L <sup>3</sup>
Water viscosity (kg/(m s))	$\mu$	M/LT
Revolutions per time unit of the motor	<i>N</i>	L <sup>-1</sup>
Immersion depth (m)	<i>H</i>	L
Total area ( $\frac{\pi}{4}(\text{diameter of hole})^2 \times \text{number of hole}$ )	<i>A</i>	L <sup>2</sup>
Overall mass transfer coefficient(h <sup>-1</sup> )	<i>kL</i> <sub>a</sub>	L <sup>-1</sup>

แสดงความสัมพันธ์สมการเป็น

$$f(AE, D_r, D_p, \rho, \mu, N, H, A, kL_a) = 0$$

จากจำนวนตัวแปร 9 ตัวแปรในการพิจารณาจะใช้หน่วยของ มวล (M) ความยาว (L) และเวลา (T) โดยเลือกตัวแปรค่า  $\rho, N$  และ  $D_p$  เป็นตัวแปรหลักในการพิจารณาจะได้สมการของ  $\pi$  มา 6 สมการ

$$\pi_1 = \rho^{x_1} N^{y_1} D_p^{z_1} AE$$

$$\pi_2 = \rho^{x_2} N^{y_2} D_p^{z_2} D_r$$

$$\pi_3 = \rho^{x_3} N^{y_3} D_p^{z_3} \mu$$

$$\pi_4 = \rho^{x_4} N^{y_4} D_p^{z_4} H$$

$$\pi_5 = \rho^{x_5} N^{y_5} D_p^{z_5} A$$

$$\pi_6 = \rho^{x_6} N^{y_6} D_p^{z_6} kL_a$$

เมื่อทำการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์จะได้ (ภาคผนวก ข.)

$$f\left(N^2 D_p^2 AE, \frac{D_r}{D_p}, \frac{\mu}{\rho D_p^2 N}, \frac{h}{D_p}, \frac{A}{D_p^2}, \frac{kL_a}{N}\right) = 0$$

จัดรูปจะได้

$$N^2 D_p^2 AE = f\left(\frac{D_r}{D_p}, \frac{\mu}{\rho D_p^2 N}, \frac{h}{D_p}, \frac{A}{D_p^2}, \frac{kL_a}{N}\right)$$

เมื่อได้สมการมาสามารถจัดรูปเพื่อหาค่าตัวแปรของค่าคงที่ได้ดังนี้

$$N^2 D_p^2 AE = C_1 \left(\frac{D_r}{D_p}\right)^{A_2} \left(\frac{\mu}{\rho D_p^2 N}\right)^{B_2} \left(\frac{h}{D_p}\right)^{C_2} \left(\frac{A}{D_p^2}\right)^{D_2} \left(\frac{kL_a}{N}\right)^{E_2}$$

ทำให้เป็นสมการเส้นตรงจะได้

$$\ln(N^2 D_p^2 AE) = \ln C_1 + A_2 \ln\left(\frac{D_r}{D_p}\right) + B_2 \ln\left(\frac{\mu}{\rho D_p^2 N}\right) + C_2 \ln\left(\frac{h}{D_p}\right) + D_2 \ln\left(\frac{A}{D_p^2}\right) + E_2 \ln\left(\frac{kL_a}{N}\right)$$

ในที่นี้ค่าคงที่จะมีจำนวน 6 ค่าคือ  $C_1, A_2, B_2, C_2, D_2$  และ  $E_2$  เพื่อสะดวกต่อการแก้สมการจึงนำค่าผลการทดลอง 6 ผลการทดลอง (จำนวนสมการเท่ากับจำนวนตัวแปร) โดยมีค่าผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 5.5 ค่าผลการทดลองสำหรับการคำนวณสมการ

	N-113	N-123	N-133	N-213	N-223	N-233
$D_r$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$D_p$	0.01	0.01	0.01	0.0125	0.0125	0.0125
$\mu$	0.00089	0.00089	0.00089	0.00089	0.00089	0.00089
$\rho$	1000	1000	1000	1000	1000	1000
$N$	1600	1600	1600	1600	1600	1600
$h$	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
$A$	7.54286E-05	0.00017	0.000302	7.54286E-05	0.00017	0.000302
$kL_a$	59.64	80.26	82.872	81.731	122.952	128.177
$AE$	0.355	0.515	0.566	0.458	0.711	0.785

เมื่อนำค่าผลการทดลอง 6 ผลการทดลอง จะได้ 6 สมการ 6 ตัวแปรของค่าคงที่ ดังนั้นจึงทำการแก้สมการเพื่อหาค่าคงที่จะได้

$$N^2 D_p^2 AE = 1.00833 \left( \frac{D_r}{D_p} \right)^{-0.3089} \left( \frac{\mu}{\rho D_p^2 N} \right)^{-0.7572} \left( \frac{h}{D_p} \right)^{-0.2963} \left( \frac{A}{D_p^2} \right)^{0.1262} \left( \frac{kL_a}{N} \right)^{0.8434}$$

หมายเหตุ ในที่นี้เป็นแก้สมการที่ใช้ผลการทดลอง 6 ผลการทดลอง แต่ผลการทดลองมีทั้งหมด 90 ผลการทดลอง ดังนั้นเมื่อแทนในสมการจะทำให้มีสมการทั้งหมด 90 สมการ 6 ตัวแปร ซึ่งการแก้สมการขนาดใหญ่นี้ จำเป็นต้องอาศัยการเขียน โปรแกรม และใช้คอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาดังต่อไปนี้

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึง การสรุปผลงานวิจัยที่ทำมาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ และข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศให้ดีขึ้นกว่าเดิม โดยจะกล่าวถึงการปรับปรุงอุปกรณ์บางตัวที่ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งข้อมูลที่ได้ อาจเป็นประโยชน์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองจะพบว่าความเร็วรอบของใบพัด จำนวนรูเจาะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก้านใบ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ มีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพการเติมอากาศ และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจน จากการทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนดและรูปแบบใบพัดทั้งหมด 12 ใบพัด ประสิทธิภาพการเติมอากาศสูงสุดที่ใบพัด N-233 ที่ความเร็ว 1300 rpm และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนสูงสุดที่ N-233 ที่ความเร็วรอบ 1600 rpm

เมื่อความเร็วรอบมากขึ้นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจนเพิ่มขึ้น แต่การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนใบพัดกับมากขึ้นตาม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเติมอากาศต่ำ ในทางกลับกันในกรณีความเร็วของใบพัดรอบต่ำ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจนจะน้อยกว่าความเร็วของใบพัดรอบสูง และกำลังงานในการขับเคลื่อนน้อยกว่า ทำให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศสูงกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจนมากหรือน้อยนั้น เป็นตัวบ่งบอกถึงการใช้เวลาในการทำให้เกิดการอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจนมากก็จะใช้เวลาน้อยที่ทำให้เกิดออกซิเจนอิ่มตัว

ในการนำไปใช้ประโยชน์ของใบพัดรูปแบบที่ทำงานวิจัยนี้ ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ว่า ต้องการใช้เวลามากหรือน้อยในการเติมอากาศหรือผสมแก๊สกับของเหลว ถ้าต้องการใช้เวลาน้อย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลก็จะมาก ความเร็วรอบของใบพัดก็จะสูง การใช้พลังงานก็จะสูงตาม ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำ แต่ถ้าต้องการประหยัดพลังงาน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลก็จะน้อย ทำให้ต้องใช้เวลาในการเติมอากาศหรือผสมแก๊สกับของเหลวยาวนานขึ้น

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการหนึ่ง ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายตัวของออกซิเจนในน้ำ โดยการออกแบบ และพัฒนาใบพัดเพียงอย่างเดียว ยังมีจุดอื่นอีกมากมายที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมอากาศแบบใช้ใบพัดในการเติมอากาศได้น้ำ โดยอาจจะออกแบบรูทางเข้า

ของอากาศให้สามารถอัดอากาศ ไปสู่ทางออกของใบพัดหรือติดตั้งใบกวน เพื่อให้เกิดการปั่นป่วนของอากาศในน้ำมากขึ้น

ระดับการจมของใบพัดก็เป็นตัวแปรที่น่าสนใจอีกตัวหนึ่ง ในการทดลองของงานวิจัยเล่มนี้ ขณะทำการทดสอบฟองอากาศได้เข้าไปแทนที่น้ำ ทำให้ระดับการจมของใบพัดเพิ่มขึ้น ซึ่งในแต่ละรูปทรงใบพัดนั้น จะให้ปริมาณฟองอากาศที่เข้าไปแทนที่น้ำไม่เท่ากัน ทำให้ความดันที่กระทำกับใบพัดเนื่องจากความลึกของแต่ละใบพัดมีไม่เท่ากัน จึงเกิดความผิดพลาดในเรื่องของกำลังที่ใช้ ในทางปฏิบัตินั้นการเติมอากาศด้วยวิธีนี้ อาจนำไปเติมกับถังขนาดใหญ่หรือในบ่อขนาดใหญ่ ทำให้ปริมาณฟองอากาศที่เข้าไปแทนที่ไม่ส่งผลกับระดับการจมของใบพัด ซึ่งทำให้การใช้กำลังงานน้อยลง

อย่างไรก็ตามยังมีตัวแปรที่สำคัญที่น่าสนใจอยู่หนึ่งตัว ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจน คือ ขนาดของฟองอากาศ ซึ่งขนาดของฟองอากาศขนาดเล็ก จะมีพื้นที่ในการสัมผัสกับน้ำมากกว่า คิดในกรณีที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรในการผลิตฟองเท่ากัน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาฟองขนาดเล็ก จะมีความเร็วในการลอยตัวจะน้อยกว่าฟองขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ฟองขนาดเล็กมีระยะเวลาสัมผัสกับน้ำมากกว่า และมีโอกาสที่จะละลายตัวของออกซิเจนในน้ำได้มากกว่าฟองขนาดใหญ่ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของออกซิเจน

## บรรณานุกรม

- [1] พงษ์เจต พรหมวงศ์, “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ “วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย เล่ม 3 (Wastewater Engineering)” ISBN: 974-486-061-8
- [3] Robert W.Fox , Alan T.Mcdonald , “**Introduction to Fluid Mechanics**” Fifth Edition School of Mechanical Engineering Purdue University
- [4] Prof.Dr.Marko Zlokarnik 2001, “**Stirring Theory and Practice**” WILEY-VCH weinheim – New York – Chichester – Brisbane Singapore – Toronto.
- [5] Beatriz Cancino , Pedro Roth , Manfred Reuß, “**Design of high efficiency surface aerators Part 1. Development of new rotors for surface aerators**” Aquacultural Engineering 31 (2004) 83–98
- [6] Beatriz Cancino , “**Design of high efficiency surface aerators Part 2. Rating of surface aerator rotors**” Aquacultural Engineering 31 (2004) 99–115
- [7] Beatriz Cancino , “**Design of high efficiency surface aerators Part 3. Dimensional analysis of rotor performance**” Aquacultural Engineering 31 (2004) 117–121
- [8] Kristian Kramer , Willi H. Hager “**Air transport in chute flows**” International Journal of Multiphase Flow 31 (2005) 1181–1197

## ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



prince of songkla university

**ME-NETT 19th**  
The 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ขอเชิญเข้าร่วม  
"การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล  
แห่งประเทศไทย"  
ครั้งที่ 19  
วันที่ 19-21 ตุลาคม 2548

สาขานี้จะ  

- Energy Technology and Management
- Thermal Systems and Fluid Mechanics
- Applied Mechanics, Materials and Manufacturing
- Dynamic Systems, Robotics and Control
- Aerospace and Marine Engineering
- Computational and Simulation Techniques
- Other Related Topics

สาขานี้จะ  
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112  
โทรศัพท์ 0-7428-7035-6  
โทรสาร 0-7421-2893

E-mail : [me-nett@me.psu.ac.th](mailto:me-nett@me.psu.ac.th) เว็บไซต์ : <http://www.me.psu.ac.th>

## ผลกระทบของรูปทรงใบพัดที่มีผลต่อการเติมอากาศใต้น้ำ

### Effect of the Geometry of Hollow Stirrers on Aeration into Water

มานพ มาสมทบ<sup>1,^</sup> จารุวัตร เจริญสุข<sup>2</sup> วิภา เจียรระโนวชิระ<sup>3</sup> แสง เกิดประทุม<sup>4</sup>  
<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล <sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
<sup>4</sup>ฝ่ายวิศวกรรม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.)  
 35 หมู่ 3 เทคโนโลยีธานี ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120  
 ^E-mail: [manop\\_me03@yahoo.com](mailto:manop_me03@yahoo.com)

Manop Masomto<sup>1,^</sup> Jaruwat Charoensuk<sup>2</sup> Vipa Jayranaiwachira<sup>3</sup> Sawaeng Gerdpratoom<sup>4</sup>  
<sup>1,2</sup> Department of Mechanical Engineering, Department Agricultural, Faculty of Engineering,  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520  
 Department of Engineering, Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR)  
 35 Moo 3 Technopolis, Tambon Khlong 5, Amphoe Khlong Luang, Pathumthani 12120  
 ^E-mail: [manop\\_me03@yahoo.com](mailto:manop_me03@yahoo.com)

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะรูปทรงของใบพัดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศใต้น้ำ โดยออกแบบใบพัดของเครื่องเติมอากาศที่สามารถนำอากาศลงสู่ใต้น้ำ ในลักษณะของฟองอากาศ เพื่อให้เกิดการละลายของออกซิเจนลงในน้ำ ในการศึกษาใช้ใบพัด 2 รูปแบบคือแบบใช้ความดันหลังใบพัด และแบบใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง โดยทำการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆและที่ระดับการจมของใบพัด 3 ระดับ ทั้งนี้ใบพัดทั้ง 2 รูปทรงจะมีความเร็วรอบต่ำสุดที่ใช้ในการทำงานต่างกัน ตลอดการทดลองอุณหภูมิของน้ำถูกควบคุมไว้ประมาณ 30°C และมีการควบคุมไม่ให้เกิดการหมุนวนของโพรงอากาศที่ผิวน้ำ (vortex) ผลที่ได้จากการทดลองแสดงประสิทธิภาพการละลายตัวของออกซิเจน และปริมาณอากาศที่ได้รับที่มีผลจากรูปทรงของใบพัด ซึ่งการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศที่มากขึ้นนั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานมากขึ้น แต่เมื่ออัตราการไหลของอากาศมาถึงค่าหนึ่ง จะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นที่ต้องพิจารณาเพิ่มคือ ขนาดของฟองอากาศ รูปแบบการหมุนวนของน้ำ รูปทรงของถัง เป็นต้น ผลที่ได้จากการศึกษาจะถูกนำไปพัฒนาปรับปรุงใบพัด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนที่ดีขึ้น

**คำสำคัญ :** ใบพัด, การเติมอากาศ, ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

#### Abstract

This research was the study to the effect of the geometry of hollow stirrers on aeration into water by designing the hollow stirrers of aerator were generated air flow rate then pass it into water. Consequently, produced bubbles, which oxygen dissolved with the water. This case study has been used two geometry of Hollow Stirrers, back pressure and back pressure combine centrifugal of Hollow Stirrers. During test can be varied revolution and immersion three levels of hollow stirrers. The geometry of hollow stirrers has its minimum revolution as well. Moreover, the water has been control temperature about 30 °C and the water surface is not occurred of vortex. The result show to aeration efficiency and flow rate of air with obtain from geometry of hollow stirrers. when the flow rate is boosted up, it is necessary to spend more energy. High flow rate, on the other hand, probably not effect to aeration efficiency, also, has a variety of variable such as bubble size, pattern flow of water, shape of tank, and many more which would be considered. This result study will develop the hollow stirrers for high aeration efficiency.

**Keywords :** Hollow stirrers, Aeration, Dissolved oxygen

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ทั่วโลกกำลังคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมมากขึ้น รวมทั้งรัฐบาลของประเทศไทย ที่มีความต้องการที่จะจัดการกับสิ่งแวดล้อม ทำให้ต้องมีการออกกฎหมายข้อบังคับต่างๆออกมา ที่นำมาใช้กับประชาชนและภาคอุตสาหกรรม การจัดการสิ่งแวดล้อมในที่นี้หมายถึง การควบคุมมลพิษของน้ำ ของอากาศ เสียง และอื่นๆ ให้มีค่าตามมาตรฐานที่ทางรัฐบาลได้กำหนดไว้ หรือมาตรฐานที่ใช้กันทั่วโลก เช่น ISO 14000 ซึ่งมันเป็นแนวทางที่ดีในการจัดการ แต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถนำแนวทางมาใช้ได้ อาจเกิดอุปสรรคที่เกิดจากความไม่เข้าใจ และขาดบุคลากรที่มีความรู้ เหตุผลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ อาจเกิดจากการขาดงบประมาณ ในการจัดการกับสิ่งแวดล้อม เพราะว่า ต้องใช้งบประมาณในสร้าง และต้องเสียพลังงานมากในการที่ใช้ในการจัดการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์ให้ได้มากที่สุด และสมเหตุสมผลในการใช้พลังงาน จึงมีความคิดริเริ่มในการที่จะหาวิธีที่จะจัดการ การใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์ จึงทำวิจัยและพัฒนา Aerator แบบใต้อ่างน้ำสำหรับการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจะนำไปใช้ในการเติม  $O_3$  (โอโซน) เพื่อไปทำปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้เกิดเป็นน้ำที่มีคุณภาพสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งจะได้ประโยชน์ 2 ทาง 1) มีการบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยไม่ต้องทิ้งน้ำเสีย ที่ก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม 2) ลดค่าใช้จ่ายของน้ำดีเข้าระบบใหม่ เพราะฉะนั้น ค่าใช้จ่ายหลักจะตกอยู่กับการจ่ายพลังงานให้แก่ ระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่ง Aerator ก็เป็นส่วนหนึ่งของระบบที่ใช้พลังงาน แต่ในขั้นตอนในการวิจัยและพัฒนา นี้ จะใช้อากาศที่มีปริมาณ  $O_2$  ในการศึกษาพัฒนา โดยสมมุติฐานว่า ถ้าดีกับอากาศต้องดีกับ  $O_3$  ด้วย

ในการปรับปรุง Aerator ให้มีประสิทธิภาพสูงมีวิธีการอยู่หลายวิธีดังนี้ 1) การปรับปรุงโดยการออกแบบใบพัด 2) การปรับปรุงการออกแบบทางเข้าของอากาศ 3) การหาความเร็วรอบที่เหมาะสม 4) การหาระดับการจมที่เหมาะสม 5) รูปทรงของถัง

ระบบการเติมอากาศมีวิธีการต่างๆ ในการวิเคราะห์สามารถจำแนกได้ดังนี้

- จากทฤษฎี โดยใช้สมการการถ่ายเทมวล และวิธีการทางคอมพิวเตอร์ร่วมกับทฤษฎีของใบพัด
- จากการทดลอง โดยพื้นฐานจากการทำทดลองในห้องทดลอง หรือสิ่งที่เกี่ยวข้อง

การนำไปใช้งานของเครื่องเติมอากาศอื่นๆ จำแนกได้ดังต่อไปนี้

- การเติมอากาศในการบำบัดน้ำเสีย
- การเติมแก๊สผสมของเหลวในภาคอุตสาหกรรมเคมี
- การเติมอากาศในภาคการเกษตร

## 1. ทฤษฎีการถ่ายเทมวล

### 1.1 ทฤษฎีการถ่ายเทออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นแก๊สที่ละลายในน้ำได้น้อยมาก ความเข้มข้นอิ่มตัว (saturat on concentration) ของออกซิเจนในน้ำทั้ง สารละลาย

ออกซิเจนในน้ำ (Dissolved Oxygen) เป็นดัชนีคุณภาพของน้ำที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง เพราะออกซิเจนเป็นธาตุที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ และป้องกันไม่ให้น้ำเน่าเหม็น ในการจำกัดน้ำทิ้งด้วยวิธีการทางชีววิทยา น้ำทิ้งจะต้องมีออกซิเจนพอเพียง นอกจากนี้การวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ จะหาเป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างคือ

- 1) เป็นปฏิภาคตรงกับความกดดันของบรรยากาศ ถ้าความกดดันสูง ออกซิเจนละลายน้ำได้มาก
- 2) เป็นปฏิภาคกลับกับอุณหภูมิของน้ำ ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูง ออกซิเจนจะละลายได้น้อยลง
- 3) เป็นปฏิภาคกลับกับความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำ ถ้าความเข้มข้นของเกลือแร่สูง ออกซิเจนจะละลายได้น้อย ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำ อาจประมาณได้จากสูตร

$$C_s = \frac{475 - 2.65S}{33.5 + T} \quad (1)$$

ในเมื่อ  $C_s$  ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจน, (mg/L)

$S$  ความเข้มข้นของเกลือแร่ (salinity), (g/L)

$T$  อุณหภูมิของน้ำ, ( $^{\circ}C$ )

ถ้าน้ำที่ใช้ในการทดสอบ ไม่มีความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำจะใช้สมการ

$$C_{sT} = 2234.34 (T + 45.93)^{-1.31403} \quad (2)$$

เมื่อ  $T$  คืออุณหภูมิของน้ำสำหรับการทดสอบ ( $^{\circ}C$ )

$C_{sT}$  ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำที่อุณหภูมิ  $T$  (mg/L)

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศลงในน้ำ จะเป็นปฏิภาคตรง กับค่าความขาดแคลนออกซิเจน (oxygen Deficit) ของน้ำ ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นอิ่มตัวกับความเข้มข้นจริง ดังนั้นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่าย เทออกซิเจนกับความขาดแคลนออกซิเจนจึงเขียนได้เป็น การถ่ายเทมวลระหว่าง อากาศและน้ำ โดยมีสมการที่ใช้ (Treybal, 1980)

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad (3)$$

เมื่อ  $C$  ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ (mg/L)

$C_s$  ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำ (mg/L)

$k_L a$  สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลทั้งหมด ( $h^{-1}$ )

$t$  เวลา (h)

ค่าของ  $k_L a$  จะขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของน้ำ อุณหภูมิความกดดันของบรรยากาศและความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ในน้ำ ในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ สำหรับอุณหภูมิที่แตกต่างกันออกไป เราสามารถใช้สมการการแปลงกลับเพื่อให้อยู่มาตรฐานอุณหภูมิเดียวกันได้ดังนี้

(Boyd,1986 ; Pöpel,1985 )

$$k_L a_{Tr} = \frac{k_L a_T}{1.024^{(T-Tr)}} \quad (3)$$

$Tr$  คืออุณหภูมิอ้างอิง ( $^{\circ}C$ )  
 $T$  อุณหภูมิของน้ำสำหรับการทดสอบ ( $^{\circ}C$ )  
 $C_{sT}$  ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำที่อุณหภูมิ ( $mg/L$ )  
 สมรรถนะของ Aerator จะมีมาตรฐานที่ใช้วัดที่อุณหภูมิมาตรฐานคือ

ประเทศเยอรมัน ใช้อุณหภูมิ  $10^{\circ}C$   

$$OTR_{10} = k_L a_{10} C_{s10} \quad (Wagner,1997) \quad (4)$$

ประเทศอเมริกา ใช้อุณหภูมิ  $20^{\circ}C$   

$$OTR_{20} = k_L a_{20} C_{s20} \quad (ASCE standard,1992) \quad (5)$$

$OTR_{10,20}$  อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนที่อุณหภูมิ  $10^{\circ}C$  และ  $20^{\circ}C$  ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ( $g/m^3/h$ ) จากสมการที่ 2 จะได้

$C_{s10} = 11.29 mg/L$  และ  $C_{s20} = 9.09 mg/L$   
 ดังนั้นที่สภาวะการใช้งานจริง ๆ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของระบบเติมอากาศ จะมีค่าต่างจากค่าที่หาได้ภายใต้สภาวะมาตรฐาน ถ้าอุณหภูมิของน้ำทั้ง สูงกว่า  $20^{\circ}C$  ( $10^{\circ}C$ ) และต้องการรักษาความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำให้สูงกว่า  $0 mg/L$  ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ที่สภาวะการใช้งานจะต่ำกว่าค่าที่สภาวะมาตรฐาน และคำนวณได้จากสมการสำหรับหาประสิทธิภาพของAerator คือ

$$AE_T = \frac{OTR_T V}{P} \quad (6)$$

$AE_T$  ประสิทธิภาพของAeratorที่อุณหภูมินั้น  
 $V$  ปริมาตรของน้ำ ( $m^3$ )  
 $P$  กำลังงานที่ใช้ในการขับใบพัด  
 โดยกำลังคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{2 \pi T n}{60} \quad (7)$$

$P$  กำลังงานที่ใช้ในการขับใบพัด  
 $T$  แรงบิด ( $N.m$ )  
 $n$  ความเร็วรอบใบพัด ( $rpm$ )

ในการหาค่ากำลังที่ใช้ในการขับใบพัดนั้น จำนวนกำลังได้จากข้อมูลที่ได้จากการวัดทอร์คที่ใช้ในการขับใบพัด และความเร็วรอบในขณะใช้งาน โดยในขณะทำการทดลองจะทดลองหาค่ากำลังที่ใช้ขณะแรงเสียดทาน ( $P_f$ ) จากนั้นจะทำการทดสอบกำลังเมื่อติดตั้งใบพัดร่วมกับแรงเสียดทาน ( $P_t$ ) จากนั้นจะนำ ( $P_t - P_f$ ) จะได้อัตกำลังที่เกิดขึ้นกับใบพัดจริง จะได้สมการ

$$P_{turbine} = P_t - P_f \quad (8)$$

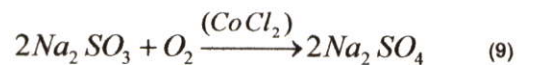
$P_{turbine}$  กำลังที่ใช้ขับใบพัดจริง  
 $P_t$  กำลังทั้งหมดรวมทั้งแรงเสียดทานและใบพัด  
 $P_f$  กำลังที่เกิดจากแรงเสียดทาน

ในการคำนวณเราไม่สนใจผลกระทบของเพลลา ที่มีผลกับกำลังที่ใช้ เนื่องจากทำการทดลองเราทำการทดลองหาค่ากำลังที่ใช้ในขณะทำงานโดยไม่มีใบพัดติดตั้งด้วย เพื่อที่จะทราบค่ากำลังที่จะชนะแรงเสียดทานก่อนทำการติดตั้งใบพัด

### 1.2 การหาค่า $k_L a$

การหาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน สำหรับเครื่องเติมอากาศทำได้ดังนี้คือ

- 1) ติดตั้งเครื่องเติมอากาศลงในถังทดสอบ (Test Tank) แล้วเดินเครื่องเติมอากาศเป็นเวลาานหลายชั่วโมงเพื่อให้ความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำในถังมีค่าอิ่มตัว
- 2) วัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำในถังหลาย ๆ ครั้งทีหลาย ๆ จุด
- 3) เติมสารประกอบโคบอลต์คลอไรด์ ( $CoCl_2$ ) ลงในน้ำในถังจนความเข้มข้นของโคบอลต์คลอไรด์เป็น  $1.0 mg/L$
- 4) เตรียมน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์ ( $Na_2 SO_3$ ) ในถัง เล็กอีกใบหนึ่ง ให้ปริมาณโซเดียมซัลไฟท์เท่ากับ 1.25 เท่าของปริมาณที่ต้องใช้ตามทฤษฎีในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ โดยมีโคบอลต์คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังสมการ



- 5) หยุดเครื่องเติมอากาศและระบายน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์ที่เตรียมไว้ลงในถังทดสอบ โดยระบายลงหลาย ๆ จุดรอบถังทดสอบ
- 6) เดินเครื่องเติมอากาศนานประมาณ 3 - 5 นาที เพื่อให้ในน้ำในถังทดสอบผสมกับน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์โดยทั่วถึง
- 7) หยุดเครื่องเติมอากาศนานประมาณ 10-15 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลไฟท์กับออกซิเจนเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์
- 8) เดินเครื่องเติมอากาศแล้วเก็บตัวอย่างน้ำทุกระยะ 5 นาที ที่จุด 3/4 ของระยะห่างระหว่างเครื่องเติมอากาศกับผนังถังทดสอบ เก็บตัวอย่างที่ระยะ 1 ฟุตใต้ผิวน้ำ กึ่งกลางความลึก และระยะ 1 ฟุต จากกันถึงทดสอบ

- 9) วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทันที เพื่อหาความ เข้มข้นของออกซิเจนโดยใช้ เครื่องวัดความเข้มข้นของออกซิเจนด้วยเครื่องมือ(DO meter) ด้วย เพื่อเป็นการตรวจสอบหาค่าความขาดแคลนของออกซิเจน โดยนำค่า ความเข้มข้นของออกซิเจนไปลบออกจากค่าความเข้มข้นอิ่มตัว
- 10) พลอตค่าความขาดแคลนออกซิเจนกับเวลาแบบ Semi-Log จะได้ เส้นตรง
- 11) ค่าความชัน (slope) ของเส้นตรงที่ได้คือค่า  $k_L a$  ซึ่งอาจคำนวณ ได้จากสมการ

$$k_L a = \frac{(\ln D_1 - \ln D_2) \cdot 60}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

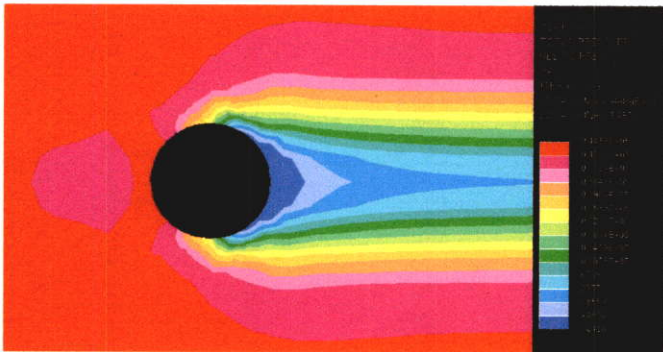
- $D_1, D_2$  ค่าความขาดแคลนออกซิเจนที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ตามลำดับ
- $t_1, t_2$  เวลา, นาที
- 60 การเปลี่ยนหน่วยเวลาจากนาทีเป็นชั่วโมง

**3.การออกแบบใบพัด**

ในการออกแบบใบพัดเบื้องต้นจะมีหลักวิธีการออกแบบสามารถ จำแนกได้ดังนี้

- การหาความดันหลังใบพัดด้วยวิธีการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม Star CD
- การคำนวณหาทอร์คที่ ใบพัดโดยใช้หลักของ Drag coefficient แล้วทำการแก้ปัญหาด้วยมือเพื่อเลือกขนาดมอเตอร์

**ใบพัดแบบที่1** (แบบใช้ความดันหลังใบพัด) เป็นรูปแบบที่คิด ขึ้นมาใหม่ โดยใช้หลักการที่มีการเกิดขึ้นของ Wake ในการออกแบบ จากการทดลองเราพบว่าใบพัดแบบนี้ มีอัตราการไหลของอากาศที่ ออกมาจากใบพัดต่ำกว่าแบบที่1. แต่กลับมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบ ที่1. เนื่องจากใบพัดแบบนี้มีการทำงานที่นอกจากแบบที่1. คือ พองอากาศ ที่ออกมาจากรูที่เล็กส่งผลทำให้พองอากาศมีขนาดเล็ก และยังคงถูกใบพัดที่ตามมาตีให้แตกเล็กลงอีก

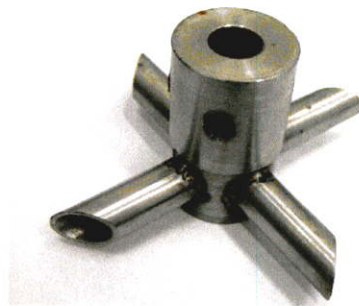


รูปที่ 1. การแสดงลักษณะของความดันที่เกิดขึ้นบริเวณหลังใบพัด



รูปที่ 2. แสดงลักษณะรูปทรงของใบพัดแบบที่ 1.

**ใบพัดแบบที่2** (แบบใช้ความดันหลังใบพัดร่วมกับแรงหนีศูนย์กลาง) เป็นแบบมาตรฐาน ที่มีอัตราการไหลของอากาศที่ออกมาจากใบพัด มาก แต่ มีประสิทธิภาพน้อยกว่าเนื่องจากมีขนาดของพองที่โตกว่า

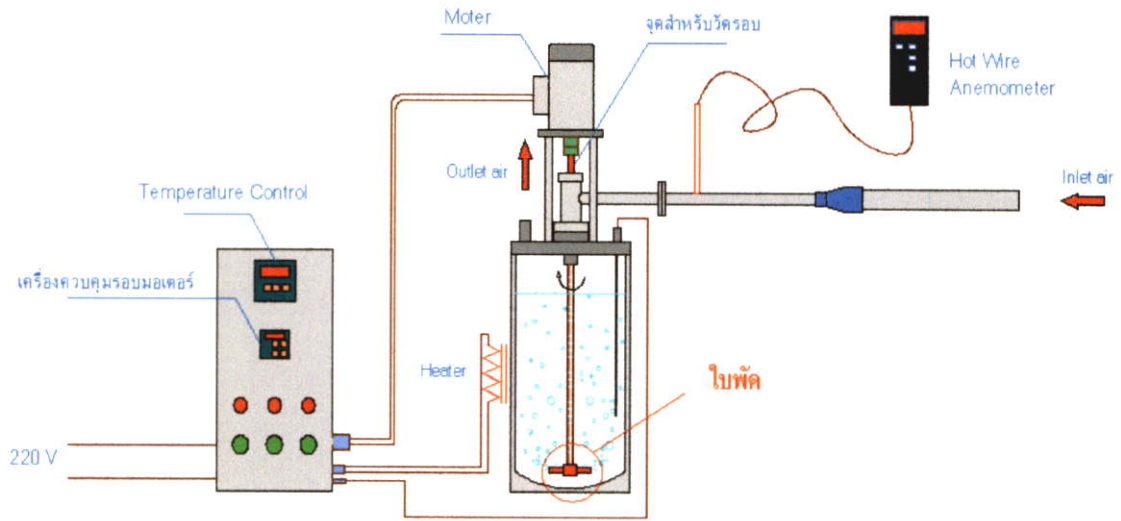


รูปที่ 3. แสดงลักษณะรูปทรงของใบพัดแบบที่ 2.

**4.อุปกรณ์การทดลอง**

1. เครื่องทดสอบ
  - ถังบรรจุน้ำ
  - มอเตอร์ 1/2 แรงม้า ความเร็วรอบ 1450 รอบ
  - ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ 0-1450 รอบ
  - ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำ
2. เครื่องมือวัดความเร็วของอากาศที่ทางเข้า
3. เครื่องวัดรอบใบพัด
4. เครื่องมือวัดอุณหภูมิน้ำและอากาศ
5. เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้า
6. เครื่องมือวัดแรงบิด Load cell
7. เครื่องมือวัดปริมาณการละลายตัวของ O<sub>2</sub> ในน้ำ

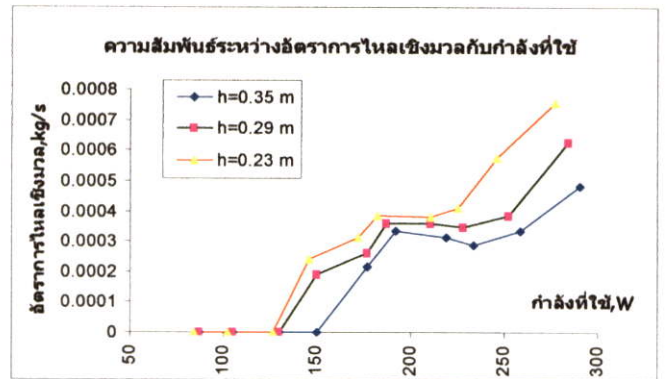
เครื่องทดสอบนี้ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมการเติมอากาศ โดย ทำการดัดแปลงจากเครื่องกวนสารเคมี ผลที่ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะใช้ ในการวิจัยนี้ ซึ่งเครื่องทดสอบนี้ สามารถดูพฤติกรรมลักษณะการไหล ของพองอากาศโดยทำการเปลี่ยนถังจากสแตนเลสมาเป็นถังใส และยัง ติดตั้งอุปกรณ์การวัดที่มีความละเอียดจากการทดสอบ



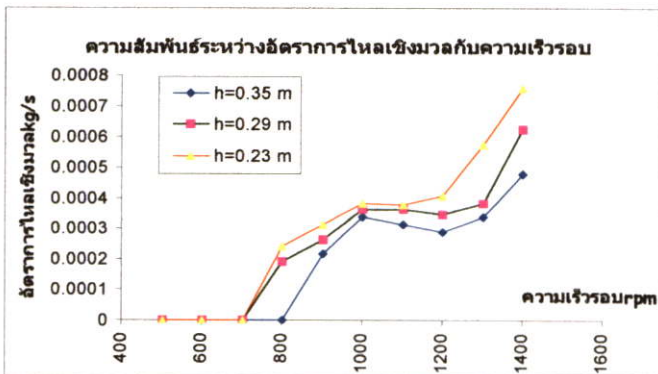
รูปที่ 4. แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในเครื่องทดลอง

**5.ผลการทดลอง**

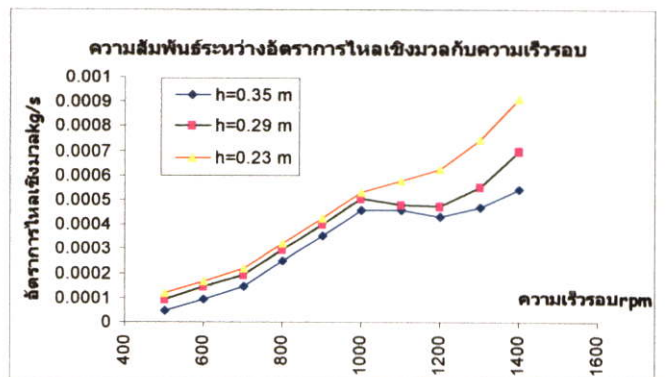
จากการทดลองจะพบว่าที่ระดับการจมน้อยที่สุด เป็นระดับที่สามารถสร้างอัตราการไหลเชิงมวลมากกว่าระดับอื่น ในสภาวะความเร็วรอบเดียวกัน และการใช้กำลังงานจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระดับที่ลึกกว่า เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบมากขึ้นเรื่อยๆ จนความเร็วของมอเตอร์ที่ 1400 รอบ จะพบว่ากราฟมีแนวโน้มในการสร้างอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น แต่จากการทดลองที่ความเร็วรอบประมาณ 1000 รอบ เมื่อเทียบกับความเร็วรอบใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่า ความเร็วรอบประมาณ 1000 รอบ กลับสร้างอัตราการไหลเชิงมวลที่มากกว่า ซึ่งเป็นช่วงที่น่าสนใจ ซึ่งในขณะที่ทำการทดลองนั้นในช่วงความเร็วรอบประมาณ 1000 นี้ เครื่องจะมีการสั่นสะเทือนของเพลลา ซึ่งในช่วงที่เกิดการสั่นนี้ อาจเป็นตัวช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม การเกิดการสั่นสะเทือนของเพลลา ในทางปฏิบัติเราต้องทำการหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือน เพราะว่าอาจทำให้เกิดความเสียหายกลับอุปกรณ์อื่นได้



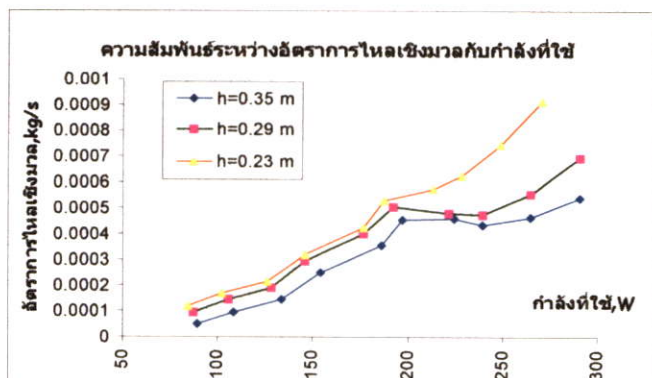
กราฟที่ 2.แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับกำลังที่ใช้ (ไบพัตแบบที่1)



กราฟที่ 1.แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับความเร็วรอบ (ไบพัตแบบที่ 1.)



กราฟที่ 3.แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับความเร็วรอบ (ไบพัตแบบที่ 2.)



กราฟที่ 4. แสดงความสัมพันธ์อัตราการไหลเชิงมวลกับกำลังที่ใช้ (ใบพัดแบบที่ 2.)

#### ตารางที่ 1. การเปรียบเทียบผลการทดลอง

ใบพัด	อัตราการไหลเชิงมวล	AE <sub>20</sub>
รูปแบบที่ 1.	น้อยกว่า	1.08
รูปแบบที่ 2.	มากกว่า	0.84

ในการจะดูว่าใบพัดแบบไหนมีประสิทธิภาพมากกว่านั้น ยังไม่สามารถสรุปได้เลยว่าใบพัดแบบไหนดีกว่า ทั้งที่แบบที่ 2. มีการสร้างอัตราการไหลเชิงมวลดีกว่า เมื่อเทียบกับกำลังงานที่ใช้กลับใช้กำลังมาก เพราะว่ายังมีตัวแปรของขนาดของฟองที่ออกมาว่า มีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ ถ้าฟองขนาดเล็กจะมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำมากกว่า ซึ่งสามารถทำให้เกิดการถ่ายเทมวลได้ดีกว่า ในที่นี้ยังไม่คำนึงถึงขนาดฟอง ซึ่งจะทำให้การศึกษาต่อไป

#### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเราพบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น จะมีการสร้างอัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นตาม แต่มีช่วงที่ไม่เป็นแนวโน้มคือช่วงประมาณ 1000 รอบ ที่มีการรบกวนของการสั่นสะเทือนของเพลลา ที่เป็นตัวช่วยให้เกิดอัตราการไหลของอากาศมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการสั่นสะเทือนไม่เหมาะที่จะใช้กับแบร์ริงหรืออุปกรณ์ ที่ไม่ต้องการเกิดการสั่นรบกวน ส่วนการหาประสิทธิภาพนั้นจะต้องพิจารณาขนาดของฟองที่ถ่ายโอนเข้ายังน้ำด้วย ซึ่งการทดลองนี้เป็นแนวทางที่จะกำหนดความเร็วรอบเริ่มทำงานของใบพัด ซึ่งจะทำการศึกษาต่อไป

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.) สำหรับอุปกรณ์และเครื่องในการทดสอบ

คุณแสง เกิดประทุม นักวิชาการ 8 ฝ่ายวิศวกรรม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.) สำหรับคำปรึกษาที่ดี

#### 8.เอกสารอ้างอิง

- [1] Prof.Dr.Marko Zlokarnik 2001, " Stirling Theory and Practice" WILEY-VCH weinheim – New York – Chichester – Brisbane Singapore – Toronto.
- [2] Beatriz Cancino <sup>a.</sup>, Pedro Roth <sup>b.</sup>, Manfred Reuß <sup>c.</sup>, "Design of high efficiency surface aerators Part 1. Development of new rotors for surface aerators" Aquacultural Engineering 31 (2004) 83–98
- [3] Beatriz Cancino <sup>a.</sup>, "Design of high efficiency surface aerators Part 2. Rating of surface aerator rotors " Aquacultural Engineering 31 (2004) 99–115
- [4] Beatriz Cancino <sup>a.</sup>, "Design of high efficiency surface aerators Part 3. Dimensional analysis of rotor performance" Aquacultural Engineering 31 (2004) 117–121
- [5] พงษ์เจต พรหมวงศ์, "การถ่ายเทความร้อน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ภาคผนวก ข.**  
**การวิเคราะห์ตัวแปรไรมิตี**

## Fluid Mechanics/Ch4

From Wikibooks, the open-content textbooks collection

Dimensionless analysis is just as it sounds, the analysis of fundamental units of dimensions: mass, length, and time; usually abbreviated as MLT for short. It is a mathematical technique used to predict physical parameters that influence the flow in fluid mechanics, heat transfer in thermodynamics, and so forth. It is helpful in experimental work because it provides a guide to factors that significantly affect the phenomena.

Dimensionless analysis is commonly used to determine the relationships between several variables, i.e. to find the force as a function of other variables when an exact functional relationship is unknown. Based on understanding of the problem, we assume a certain functional form.

### Units/Dimensions

The defined units are based on the modern MLT system: mass, length, time. All other quantities can be express in terms of these basic units.

For example,

velocity	m/s	- L/T
acceleration	m/s <sup>2</sup>	- L/T <sup>2</sup>
force	kgm/s <sup>2</sup>	- ML/T <sup>2</sup>

Where L/T, L/T<sup>2</sup>, ML/T<sup>2</sup>, etc. are referred to as the derived units.

Another system for dimensionless analysis is the FLT system, the force, length, time system. In this case, mass = F/a, which makes the units of mass as FT<sup>2</sup>/L, since acceleration has units of L/T<sup>2</sup>.

### Rayleigh Method

An elementary method for finding a functional relationship with respect to a parameter in interest is the Rayleigh Method, and will be illustrated with an example, using the MLT system.

Say that we are interested in the drag,  $D$ , which is a force, on a ship. What exactly is the drag a function of? These variables need to be chosen correctly, though selection of such variables depends largely on one's experience in the topic. It is known that drag depends on

Quantity	Symbol	Dimension
Size	$l$	L
Viscosity	$\mu$	m/LT
Density	$\rho$	m/L <sup>3</sup>
Velocity	$V$	L/T
Gravity	$g$	L/T <sup>2</sup>

This means that  $D = f(l, \rho, \mu, V, g)$  where  $f$  is some function.

With the Rayleigh Method, we assume that  $D = C l^a \rho^b \mu^c V^d g^e$ , where  $C$  is a dimensionless constant, and  $a, b, c, d$ , and  $e$  are exponents, whose values are not yet known.

Note that the dimensions of the left side, force, must equal those on the right side. Here, we use only the three independent dimensions for the variables on the right side: M, L, and T.

### Step 1: Setting up the equation

Write the equation in terms of dimensions only, i.e. replace the quantities with their respective units. The equation then becomes

$$\frac{ML}{T^2} = (L)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b \left(\frac{M}{LT}\right)^c \left(\frac{L}{T}\right)^d \left(\frac{L}{T^2}\right)^e$$

On the left side, we have  $MLT^{-2}$ , which is equal to the dimensions on the right side. Therefore, the exponents of the right side must be such that the units are  $MLT^{-2}$

### Step 2: Solving for the exponents

Equate the exponents to each other in terms of their respective fundamental units:

$$\begin{array}{ll} \text{M: } 1 = b + c & \text{since } M^1 = M^b M^c \\ \text{L: } 1 = a - 3b - c + d + e & \text{since } L^1 = L^a L^{-3b} L^{-c} L^d L^e \\ \text{T: } -2 = -c - d - 2e & \text{since } T^{-2} = T^{-c} T^{-d} T^{-2e} \end{array}$$

It is seen that there are three equations, but 5 unknown variables. This means that a complete solution cannot be obtained. Thus, we choose to solve  $a$ ,  $b$ , and  $d$  in terms of  $c$  and  $e$ . These choices are based on experience. Therefore,

$$\begin{array}{lll} \text{From M:} & b = 1 - c & \text{(i)} \\ \text{From T:} & d = 2 - c - 2e & \text{(ii)} \\ \text{From L:} & a = 1 + 3b + c - d - e & \text{(iii)} \end{array}$$

Solving (i), (ii), and (iii) simultaneously, we obtain

$$a = 2 - c + e$$

Substituting the exponents back into the original equation, we obtain

$$D = c l^{2+e-c} \rho^{1-c} \mu^c v^{2-c-2e} g^e$$

Collecting like exponents together,

$$D = C \left(\frac{V^2}{lg}\right)^{-e} \left(\frac{Vl\rho}{\mu}\right)^{-c} \rho l^2 V^2$$

Which means

$$D = c l^2 l^e l^{-c} \rho \rho^{-c} \mu^c V^2 V^{-c} V^{-2} g^e$$

For the different exponents,

Terms with exponent of 1:	$c\rho$
Terms with exponent of 2:	$l^2 V^2$
Terms with exponent of $e$ :	$l^e V^{-2e} g^e = \left(\frac{lg}{V^2}\right)^e = \left(\frac{V^2}{lg}\right)^{-e}$ (iv)
Terms with exponent of $c$ :	$l^{-c} \rho^{-c} \mu^c V^{-c} = \left(\frac{l\rho V}{\mu}\right)^{-c}$ (v)

The right sides of (iv) and (v) are known as the dimensionless groups.

### Step 3: Determining the dimensionless groups

Note that  $e$  and  $c$  are unknown. Consider the following cases:

If $e = 1$	then (iv) becomes	$\left(\frac{lg}{V^2}\right)$
If $e = -1$	then (iv) becomes	$\left(\frac{V^2}{lg}\right)$
If $c = 1$	then (v) becomes	$\left(\frac{\mu}{l\rho V}\right)$
If $c = -1$	then (v) becomes	$\left(\frac{l\rho V}{\mu}\right) = \left(\frac{lV}{\nu}\right)$

Where  $\nu$  is the kinematic viscosity of the fluid.

And so on for different exponents. It turns out that:

$$\text{Reynolds Number} \equiv \frac{Vl}{\nu} = N_R = Re$$

$$\text{Froude Number} \equiv \left(\frac{V^2}{lg}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{V}{\sqrt{lg}} = N_F = Fr$$

Where  $N_R$  or  $Re$  and  $N_F$  or  $Fr$  are the usual notations for the Reynolds and Froude Numbers respectively. Such dimensionless groups keep re-occurring throughout Fluid Mechanics and other fields.

Choosing exponents of  $-1$  for  $c$  and  $-\frac{1}{2}$  for  $e$ , which result in the Reynolds and Froude Numbers respectively, we obtain

$$D = g(Fr, Re) \rho l^2 v^2$$

Where  $g(Fr, Re)$  is a dimensionless function

This can also be written as

$$\frac{D}{\rho l^2 V^2} = g(Fr, Re)$$

Which is a dimensionless quantity, and a function of only 2 variables instead of 5. This dimensionless quantity turns out to be the drag coefficient,  $C_D$ .

$$C_D \equiv \frac{D}{\rho l^2 V^2}$$

### Notes

The Rayleigh Method has limitations because of the premise that an exponential relationship exists between the variables.

## The Buckingham $\pi$ Theorem/Method

This method will be illustrated by the same example as that for Rayleigh Method, the drag on a ship.

Say that we have  $n$  number of quantities (e.g. 6 quantities, which are  $D, l, \rho, \mu, V$ , and  $g$ ) and  $m$  number of dimensions (e.g. 3 dimensions, which are  $M, L$ , and  $T$ ). These quantities can be reduced to  $(n - m)$  independent dimensionless groups, such as  $Re$  and  $Fr$ .

Say that

$$A_1 = f(A_2, A_3, A_4, \dots, A_n)$$

where  $A_x$  are quantities such as drag, length, and so forth, as mentioned under the  $n$  number of quantities, and  $f$  implies the functional relationship between  $A_1$  and the other quantities.

Then re-arranging, we obtain

$$0 = f(A_2, A_3, A_4, \dots, A_n) - A_1 = f(A_1, A_2, A_3, A_4, \dots, A_n)$$

Which can be further reduced, using the Buckingham  $\pi$  Theorem, to obtain

$$0 = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m})$$

### Forming $\pi$ Groups

For each  $\pi$  group, take  $m$  of the quantities,  $A_x$ , known as  $m$  repeating variables, and one of the other remaining variables. Note that experience dictates which quantities make the best repeating variables.

The  $\pi$  groups, in general form, would then be

$$\begin{aligned}\pi_1 &= A_1^{x_1} A_2^{y_1} A_3^{z_1} A_4 \\ \pi_2 &= A_1^{x_2} A_2^{y_2} A_3^{z_2} A_5 \\ &\square \\ \pi_{n-m} &= A_1^{x_{n-m}} A_2^{y_{n-m}} A_3^{z_{n-m}} A_n\end{aligned}$$

which are all dimensionless quantities.

### Step 1: Setup $\pi$ groups

For the MLT System,  $m = 3$ , so choose  $A_1$ ,  $A_2$ , and  $A_3$  as the repeating variables.

Using the Buckingham  $\pi$  Theorem on the Drag Equation:

$$f(D, l, \rho, \mu, V, g) = 0$$

Where  $m = 3$ ,  $n = 6$ , so there will be  $n - m = 3$   $\pi$  groups.

We will select  $\rho$ ,  $V$ , and  $l$  as the repeating variables (RV), leaving the remaining quantities as  $D$ ,  $\mu$ , and  $g$ . Note that if the analysis does not work out, we could always go back and repeat using new RVs. Thus,

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \rho^{x_1} V^{y_1} l^{z_1} D \\ \pi_2 &= \rho^{x_2} V^{y_2} l^{z_2} \mu \\ \pi_3 &= \rho^{x_3} V^{y_3} l^{z_3} g\end{aligned}$$

Which are all dimensionless quantities, i.e. having units of  $M^0 L^0 T^0$

### Step 2: Determine $\pi$ groups

For the first  $\pi$  group,

$$\pi_1 \quad M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^{x_1} \left(\frac{L}{T}\right)^{y_1} (L)^{z_1} \left(\frac{ML}{T^2}\right)$$

Expanding and collecting like units, we can solve for the exponents:

For M:	$0 = x_1 + 1$	$\square x_1 = -1$
T:	$0 = -y_1 - 2$	$\square y_1 = -2$
L:	$0 = -3x_1 + y_1 + z_1 + 1$	$\square z_1 = 3(-1) - (-2) - 1 = -2$

Therefore, we find that the exponents  $x_1, y_1,$  and  $z_1$  are -1, -2, and -2 respectively. This means that the first dimensionless  $\pi$  group,  $\pi_1$ , is

$$\pi_1 = \rho^{-1} V^{-2} l^{-2} D = \frac{D}{\rho V^2 l^2}$$

For the second  $\pi$  group,

$$\pi_2 \quad M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^{x_2} \left(\frac{L}{T}\right)^{y_2} (L)^{z_2} \left(\frac{M}{LT}\right)$$

Solving for the exponents,

For M:	$x_2 + 1 = 0$	$\square x_2 = -1$
T:	$-y_2 - 1 = 0$	$\square y_2 = -1$
L:	$-3x_2 + y_2 + z_2 - 1 = 0$	$\square z_2 = 1 - (-1) + 3(-1) = -1$

Thus,

$$\pi_2 = \rho^{-1} V^{-1} l^{-1} \mu = \frac{\mu}{\rho V l} = \frac{\nu}{V l}$$

However, we will now invert  $\pi_2$  so that

$$\pi_2 = \frac{V l}{\nu} = \text{Reynolds Number}$$

It is permissible to exponentiate any  $\pi$  group, e.g.  $\pi^{-1}, \pi^{1/2}, \pi^2,$  etc., to form a new group, as this does not alter the functional form.

For the third  $\pi$  group,

$$\pi_3 \quad M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^{x_3} \left(\frac{L}{T}\right)^{y_3} (L)^{z_3} \left(\frac{L}{T^2}\right)$$

Solving for the exponents,

For M:	$x_3 = 0$	$\square x_3 = 0$
T:	$-y_3 - 2 = 0$	$\square y_3 = -2$
L:	$-3x_3 + y_3 + z_3 + 1 = 0$	$\square z_3 = -1 - (-2) = 1$

Thus,

$$\pi_3 = \rho^0 V^{-2} l g = \frac{lg}{V^2}$$

Raising it to the power of  $-1/2$ ,

$$\sqrt{\frac{1}{\pi_3}} = \frac{V}{\sqrt{lg}} = \text{Froude Number}$$

Thus, the three  $\pi$  groups can be written together as

$$f\left(\frac{D}{\rho l^2 V^2}, Re, Fr\right) = 0$$

Finally,

$$\frac{D}{\rho l^2 V^2} = f(Re, Fr)$$

Note that this is the same result as obtained with the Rayleigh Method, but with the Buckingham  $\pi$  Method, we did not have to assume a functional dependence.

## Common $\pi$ Groups

Using the Buckingham  $\pi$  Theorem, we will now examine the  $\pi$  groups which appear most frequently in fluid dynamics. Most fluid flow situations depend on the following quantities:

$l$	length
$D$	diameter
$\epsilon$	surface roughness
$V$	velocity of flow
$\rho$	density of fluid
$\Delta p$	pressure drop
$g$	gravity
$\mu$	absolute/dynamic viscosity
$\sigma$	surface tension
$K$ or $E_v$	Compressibility/Bulk Modulus

There are 10 quantities,  $n = 10$ , and 3 dimensions,  $m = 3$ , so this gives  $n - m = 7 \pi$  groups. Choosing  $V, \rho$ , and  $l$  as the repeating variables, performing the Buckingham  $\pi$  analysis, and using different

exponents for some  $\pi$  groups, we obtain the following  $\pi$  groups, which are common in the study of Fluid Mechanics:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{\Delta p}{\rho V^2} = \text{Pressure Coefficient} = C_P \\ \pi_2 &= \frac{V}{\sqrt{gl}} = \text{Froude Number} = Fr \\ \pi_3 &= \frac{Vl\rho}{\mu} = \text{Reynolds Number} = Re \\ \pi_4 &= \frac{V^2 l \rho}{\sigma} = \text{Weber Number} = We \\ \pi_5 &= \frac{V}{\sqrt{\frac{K}{\rho}}} = \text{Mach Number} = Ma \\ \pi_6 &= \frac{l}{D} = \text{Length : Diameter Ratio} \\ \pi_7 &= \frac{\epsilon}{D} = \text{Relative Roughness} \end{aligned}$$

Retrieved from "[http://en.wikibooks.org/wiki/Fluid\\_Mechanics/Ch4](http://en.wikibooks.org/wiki/Fluid_Mechanics/Ch4)"

### Units/Dimensions

Quantity	Symbol	Dimension
Aeration efficiency at 20 °C (kg O <sub>2</sub> /kWh)	AE	T <sup>2</sup> /L <sup>2</sup>
Rotor diameter (m)	<i>D<sub>r</sub></i>	L
Pipe diameter (m)	<i>D<sub>p</sub></i>	L
Water density (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	M/L <sup>3</sup>
Water viscosity (kg/(m s))	$\mu$	M/LT
Revolutions per time unit of the motor	<i>N</i>	L <sup>-1</sup>
Immersion depth (m)	<i>H</i>	L
Total area ( $\frac{\pi}{4}(\text{diameter of hole})^2 \times \text{number of hole}$ )	<i>A</i>	L <sup>2</sup>
Overall mass transfer coefficient(h <sup>-1</sup> )	<i>kL<sub>a</sub></i>	L <sup>-1</sup>

#### Step 1: Setting up the equation

$$f(AE, D_r, D_p, \rho, \mu, N, H, A, kL_a) = 0$$

$$\pi_1 = \rho^{x_1} N^{y_1} D_p^{z_1} AE \quad \pi_4 = \rho^{x_4} N^{y_4} D_p^{z_4} H$$

$$\pi_2 = \rho^{x_2} N^{y_2} D_p^{z_2} D_r \quad \pi_5 = \rho^{x_5} N^{y_5} D_p^{z_5} A$$

$$\pi_3 = \rho^{x_3} N^{y_3} D_p^{z_3} \mu \quad \pi_6 = \rho^{x_6} N^{y_6} D_p^{z_6} kL_a$$

#### Step 2: Determine $\pi$ groups

$$\pi_1 \quad M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^{x_1} \left(\frac{1}{L}\right)^{y_1} (L)^{z_1} \left(\frac{T^2}{L^2}\right)$$

$$\text{for } M; 0 = x_1 \quad x_1 = 0$$

$$L; 0 = -3x_1 + z_1 - 2 \quad y_1 = 2$$

$$T; 0 = -y_1 + 2 \quad z_1 = 2$$

$$\pi_1 = N^2 D_p^2 AE$$

----- 1

$$\pi_2 \quad M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^{x_2} \left(\frac{1}{L}\right)^{y_2} (L)^{z_2} (L)$$

$$\text{for } M; 0 = x_2 \quad x_2 = 0$$

$$L; 0 = -3x_2 + z_2 + 1 \quad y_2 = 0$$

$$T; 0 = -y_2 \quad z_2 = -1$$

$$\pi_2 = \frac{D_r}{D_p} \quad \text{-----} \quad 2$$

$$\pi_3 \quad M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^{x_3} \left(\frac{1}{L}\right)^{y_3} (L)^{z_3} (M/LT)$$

for  $M$ ;  $0 = x_3 + 1$                        $x_3 = -1$   
 $L$ ;  $0 = -3x_3 + z_3 - 1$                $y_3 = -1$   
 $T$ ;  $0 = -y_3 - 1$                        $z_3 = -2$

$$\pi_3 = \frac{\mu}{\rho D_p^2 N} \quad \text{-----} \quad 3$$

$$\pi_4 \quad M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^{x_4} \left(\frac{1}{L}\right)^{y_4} (L)^{z_4} (L)$$

for  $M$ ;  $0 = x_4$                                $x_4 = 0$   
 $L$ ;  $0 = -3x_4 + z_4 + 1$                $y_4 = 0$   
 $T$ ;  $0 = -y_4$                                $z_4 = -1$

$$\pi_4 = \frac{h}{D_p} \quad \text{-----} \quad 4$$

$$\pi_5 \quad M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^{x_5} \left(\frac{1}{L}\right)^{y_5} (L)^{z_5} (L^2)$$

for  $M$ ;  $0 = x_5$                                $x_5 = 0$   
 $L$ ;  $0 = -3x_5 + z_5 + 2$                $y_5 = 0$   
 $T$ ;  $0 = -y_5$                                $z_5 = -2$

$$\pi_5 = \frac{A}{D_p} \quad \text{-----} \quad 5$$

$$\pi_6 \quad M^0 L^0 T^0 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^{x_6} \left(\frac{1}{L}\right)^{y_6} (L)^{z_6} \left(\frac{1}{T}\right)$$

for  $M$ ;  $0 = x_6$                                $x_6 = 0$   
 $L$ ;  $0 = -3x_6 + z_6$                        $y_6 = -1$   
 $T$ ;  $0 = -y_6 - 1$                        $z_6 = 0$

$$\pi_6 = \frac{kL_a}{N}$$

----- 6

Thus, the six  $\pi$  groups can be written together as

$$f\left(N^2 D_p^2 AE, \frac{D_r}{D_p}, \frac{\mu}{\rho D_p^2 N}, \frac{h}{D_p}, \frac{A}{D_p^2}, \frac{kL_a}{N}\right) = 0$$

Finally,

$$N^2 D_p^2 AE, = f\left(\frac{D_r}{D_p}, \frac{\mu}{\rho D_p^2 N}, \frac{h}{D_p}, \frac{A}{D_p^2}, \frac{kL_a}{N}\right)$$

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายมานพ มาสมทบ  
 วัน เดือน ปีเกิด 2 พฤศจิกายน 2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร  
 ที่อยู่ 959/78 หมู่บ้านยังยืน ซอยสามห่วง ถ.สุขุมวิท ต.บางปูใหม่  
 อ.เมืองสมุทรปราการ จ.สมุทรปราการ 10280 โทร.0-2323-2902

### ประวัติการศึกษา

- 2538 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างยนต์  
 วิทยาลัยเทคนิคสมุทรปราการ
- 2540 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างยนต์  
 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ
- 2545 ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2550 กำลังศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประวัติการทำงานและผลงานการวิจัย

- 2549 – ปัจจุบัน ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย2 วิจัย เรื่องFuel Cell ประเภท SOFC  
 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ