

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลของขนาดของหัวพ่นน้ำต่อเครื่องเติมอากาศแบบดูดอากาศ



นายภาณุวัฒน์ ลีลาธนาพิพัฒน์
นายลักษณะโรจน์ ฟองอ่อน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหน้.....
เลขทะเบียน.....36749.....
วัน, เดือน, ปี.....28 ส.ค. 2542.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่อาจรับผิดชอบในส่วนนี้ หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Effects of Nozzle Aperture Variation on Air Suction Aerator



A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Bachelor of Engineering in Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut 's Institute of Technology Ladkrabang

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาผลของขนาดของหัวพ่นน้ำต่อเครื่องเติมอากาศแบบคู่อากาศ

โดย นายภาณุวัฒน์ ถิลาธนาพิพัฒน์ รหัสประจำตัว 39014390

นายลักษณะโรจน์ ฟองอ่อน รหัสประจำตัว 39014439

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษา คร.ไพศาล นาคพิพัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นำเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์)

..... กรรมการ
(ดร. ประกอบ กิจไชยา)

..... กรรมการ
(อาจารย์ นภกร รัชมพิพิธ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	การศึกษาผลของขนาดของหัวพ่นน้ำต่อเครื่องเดิมอากาศแบบคูดอากาศ
โดย	นายภาณุวัฒน์ สีสานาพิพัฒน์ นายลักษณะ โรจน์ ฟองอ่อน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์
ปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการออกแบบเครื่องเดิมอากาศที่ประกอบขึ้นจากวัสดุพีวีซีเพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับน้ำในแหล่งน้ำซึ่งมีขนาดไม่ใหญ่นัก กลไกโดยย่อ ๆ ของการบำบัดน้ำเสียนี้อาศัยการไหลด้วยความเร็วสูงของของเหลวผ่านหัวพ่นน้ำเข้าสู่ท่อตีบ ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภายนอกเครื่องเดิมอากาศและทางเข้าท่อตีบ ส่งผลให้เกิดการไหลของอากาศเข้าสู่เครื่องเดิมอากาศ อากาศซึ่งถูกผสมกับน้ำที่ฉีดผ่านหัวพ่นน้ำจะเพิ่มระดับออกซิเจนในน้ำที่ออกจากเครื่อง ในการทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่นน้ำถูกแปรผันเป็น 26, 33 และ 38 มิลลิเมตร นอกจากนี้ได้ถูกศึกษาด้วยระยะห่างระหว่างท่อตีบกับหัวพ่นน้ำ (0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เซนติเมตร) ความเร็วของอากาศที่สูงที่สุดถูกตรวจวัดได้เมื่อหัวพ่นน้ำขนาด 26 มิลลิเมตรถูกใช้ และระยะห่างระหว่างท่อตีบกับหัวพ่นน้ำเท่ากับ 1.0 เซนติเมตร

Report Title A Study of Effects of Nozzle Aperture Variation on Air Suction Aerator

By Mr. Panuwat Leelatanapipat
Mr. Laksanarote Fong-on

Advisor Dr. Paisan Nakpipat

Report for Bachelor of Engineering in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering

Abstract

In this project, the polyvinylchloride (PVC) aerator was designed to treat the waste water in a not too big reservoir. The mechanism of wastewater treatment, briefly, based upon the jet flow of liquid from nozzle to throat. Pressure difference of outer aerator and throat gateway consequently made the air flow in the aerator. This air flow combined with the water passing through nozzle would increase the oxygen level of outlet water. In the experiments, the nozzle diameters were varied as 26, 33 and 38 mm. In addition, the distances from throat to nozzle (0.5, 1, 1.5 and 2.0 cm) were studied to gain the most air volume passing thru the aerator. The highest air velocity was detected when the 26 mm nozzle diameter was used and the suitable distance from throat to nozzle was 1.0 cm.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเรื่อง การศึกษาขนาดของหัวพ่นน้ำที่มีผลต่อเครื่องเดิมอากาศแบบคูค
อากาศ เพื่อเสนอต่อภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมเคมี ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และ
บุคคลหลายฝ่ายจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำ ดังนี้คือ

ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้าน
วิชาการรวมทั้งจัดหาอุปกรณ์ในการทำปริญญาบัตรนี้ อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชและ
อาจารย์สันติ วัฒนานุสรณ์ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องมือปฏิบัติการ รวมทั้งเจ้าหน้าที่โรง
ปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในด้านการจัดทำเครื่องมือที่ใช้ในการ
ทดลอง

นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ตลอดเวลาให้ความช่วยเหลือใน
ด้านสถานที่เก็บของ แร่กาย รวมทั้งแรงใจผลักดันให้ปริญญาบัตรนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และ
ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณบุพการีที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์ตลอดระยะ
เวลาของการทำปริญญาบัตรนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
สัญลักษณ์	ฉ
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ลักษณะของน้ำเสีย	4
2.2 แหล่งที่มาของน้ำเสีย	8
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	9
2.4 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย	10
2.5 กระบวนการบำบัดโดยใช้ออกซิเจน	13
2.6 กระบวนการบำบัดโดยไม่ใช้ออกซิเจน	14
2.7 เครื่องเติมอากาศ	14
2.8 ประโยชน์ที่ได้รับจากการเติมอากาศ	20
2.9 ความต้องการออกซิเจน	23
2.10 การละลายของออกซิเจนในน้ำ	28
2.11 ทฤษฎีการถ่ายเทออกซิเจน	31
2.12 สมดุลของออกซิเจนในน้ำ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13	อัตรการดูดซึม (Absorption) หรือการคาย (Desorption) ของก๊าซ	38
บทที่ 3	หลักการและการออกแบบเครื่องเติมอากาศ	
3.1	หลักการของเครื่องเติมอากาศ	40
3.2	วัสดุที่ใช้ทำเครื่องเติมอากาศ	45
บทที่ 4	การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ	
4.1	การทดลองหาประสิทธิภาพ	47
บทที่ 5	ผลการทดลอง	
5.1	ผลการทดลองในขั้นตอนวัดอัตราการไหลของน้ำ	50
5.2	ผลการทดลองในขั้นตอนการทดสอบเครื่องเติมอากาศ	52
5.3	ผลที่ได้จากการคำนวณ	53
บทที่ 6	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
6.1	สรุปผล	57
6.2	ข้อเสนอแนะ	58
6.3	แนวทางในการทำโครงการต่อไป	58

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสามารถของออกซิเจนที่จะละลายน้ำ ณ สภาพต่าง ๆ	28
ตารางที่ 2.2 ค่าอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำจืด	29
ตารางที่ 2.3 ค่าอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำจืด น้ำกร่อยและน้ำทะเล	29
ตารางที่ 2.4 ปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	30
ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและค่าความดันลด	50
ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหัวพ่นน้ำ และความเร็วอากาศเข้า ท่อคูดที่ระยะ 0.5 cm	52
ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหัวพ่นน้ำ และความเร็วอากาศเข้า ท่อคูดที่ระยะ 1.0 cm	52
ตารางที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหัวพ่นน้ำ และความเร็วอากาศเข้า ท่อคูดที่ระยะ 1.5 cm	52
ตารางที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหัวพ่นน้ำ และความเร็วอากาศเข้า ท่อคูดที่ระยะ 2.0 cm	53
ตารางที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหัวพ่นน้ำ 3 ขนาดกับอัตราการไหลของ อากาศที่ระยะห่างจากท่อคูด 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 cm	54

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 Fine bubble diffused-air	15
รูปที่ 2.2 Medium bubble diffused-air	16
รูปที่ 2.3 Coarse bubble diffused-air	16
รูปที่ 2.4 Sparger turbine	17
รูปที่ 2.5 เครื่องเติมอากาศประเภทความเร็วต่ำ	18
รูปที่ 2.6 เครื่องเติมอากาศประเภทความเร็วสูง	19
รูปที่ 2.7 เครื่องเติมอากาศแบบ Rotor-brush	20
รูปที่ 2.8 ค่า BOD สำหรับน้ำเสียทั่ว ๆ ไป	24
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BOD กับเวลา	25
รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว	37
รูปที่ 3.1 รายละเอียดของเครื่องเติมอากาศ	41
รูปที่ 3.2 หัวพ่นน้ำแบบมาตรฐาน	42
รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางของเครื่องเติมอากาศ	46
รูปที่ 5.1 การสอบเทียบอัตราการไหลที่แท้จริงของน้ำ	51
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับระยะห่างระหว่างท่อตีบของหัวพ่นน้ำ 3 ขนาด	55

สัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัด, m^2
A_N	=	พื้นที่หน้าตัดของหัวพ่นน้ำ, m^2
A_T	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อตีบ, m^2
C	=	ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำ, mg/l
C_r	=	ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำทิ้ง, mg/l
C_s	=	ความเข้มข้นอิ่มตัว, mg/l
$C_{s\alpha}$	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนที่อุณหภูมิ $T^\circ C$
C_{s0}	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำสะอาดที่ $20^\circ C$ และความกดดัน 1 บรรยากาศ
	=	9.17 mg/l
C_t	=	ความเข้มข้นที่เวลา t
D_o	=	ความขาดแคลนออกซิเจนที่ $20^\circ C$
	=	9.17 mg/l เนื่องจากความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำเป็นศูนย์
$D_{\text{ท่อ 2"}}$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อขนาด 2 นิ้ว, m
D_1, D_2	=	ค่าความขาดแคลนออกซิเจนที่เวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ
h_1	=	ความดันสูญเสียก่อนเข้าหัวพ่นน้ำ (Head loss), m
h_2	=	ความดันสูญเสียบริเวณ Diffuser (Head loss), m
K_c	=	Contraction-loss coefficient, dimensionless
K_e	=	Expansion-loss coefficient, dimensionless
K_f	=	Fitting-loss coefficients, dimensionless
K_g	=	ค่าอัตราส่วนคงที่สำหรับรูปแบบการสัมผัสสั้น ๆ (Proportional factor for existing conditions exposure)
$K_{t,a}$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(K_L a)_T$	=	ค่าของ $K_L a$ ที่ $T^\circ\text{C}$
$(K_L a)_{20}$	=	ค่าของ $K_L a$ ที่ 20°C
L	=	ความยาวของท่อขนาด 2", m
M	=	ปริมาตรของน้ำในถังทดสอบ, m^3
M_S	=	มวลของของไหลที่ผ่านท่อดูด (Mass of motive fluid), Slugs (kg)
M_1	=	มวลของของไหล (Mass of motive fluid), Slugs (kg)
N_f	=	อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะการใช้งาน, $\text{kg}/\text{hp}\cdot\text{h}$
N_o	=	อัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน, $\text{kg}/\text{hp}\cdot\text{h}$
P	=	กำลังแรงม้าของเครื่องเติมอากาศที่ใช้
P_s	=	ความดันสถิตย์ที่ท่อดูดอากาศ (Static pressure at suction), lb/ft^2 (N/m^2)
P_1	=	ความดันสถิตย์ก่อนเข้าหัวพ่นน้ำ (Static pressure upstream), lb/ft^2 (N/m^2)
P_2	=	ความดันสถิตย์ที่ทางออก (Static pressure at discharge), lb/ft^2 (N/m^2)
Q	=	อัตราการไหลของน้ำ, m^3/s
S	=	ความเข้มข้นของเกลือแร่ (Salinity), g/l
T	=	อุณหภูมิของน้ำ, $^\circ\text{C}$
t	=	เวลา, นาที
V	=	ความเร็วของน้ำ, m/s
V_N	=	ความเร็วที่หัวพ่นน้ำ (Velocity at nozzle orifice), ft/s (m/s)
V_S	=	ความเร็วที่ทางเข้าท่อดูด (Velocity at suction inlet), ft/s (m/s)
V_T	=	ความเร็วที่ท่อตีบ (Velocity at diffuser throat), ft/s (m/s)
V_1	=	ความเร็วก่อนเข้าหัวพ่นน้ำ (Velocity upstream of nozzle), ft/s (m/s)
V_2	=	ความเร็วที่ Downstream (Velocity downstream), ft/s (m/s)
f	=	Friction factor
θ	=	ค่าคงที่โดยทั่วไปเท่ากับ 1.024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

γ_1 = น้ำหนักจำเพาะของของเหลว (Specific weight (force) of motive fluid), lb/ft²
(N/m³)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปริญญานิพนธ์

ปัญหาเรื่องน้ำเสียมีความเป็นมาควบคู่กันกับความเจริญเติบโตของชุมชน กล่าวคือ เมื่อครั้งประชากรยังมีน้อยและกระจุกกระจาย ยังไม่เป็นที่อยู่อาศัยหนาแน่น ต่อมาเมื่อชุมชนเจริญเติบโตประชากรเพิ่มมากขึ้น ปัญหาเรื่องน้ำเสียก็เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เพราะน้ำเสียเป็นผลผลิตอย่างหนึ่งในการดำเนินชีวิตประจำวันของคน และนับว่าน้ำเสียจะมีปริมาณมากขึ้นเป็นทวีคูณและมีสารใหม่ ๆ แปลก ๆ ของผลิตภัณฑ์สมัยใหม่เจือปนอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้น้ำเสียเป็นปัญหาที่ยุ่ยากมากขึ้นตามลำดับ

น้ำเสียจากชุมชนและจากโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากอาจจะสกปรก มีกลิ่นเหม็น สีคาวค้ำ ยังอาจมีสารเคมีที่มีพิษเจือปนอยู่ด้วย เมื่อน้ำเสียไหลลงสู่แหล่งน้ำ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง ก็จะแปรสภาพแหล่งน้ำที่สะอาดตามธรรมชาติให้กลายเป็นแหล่งน้ำเสียไป ทำให้ไม่สามารถใช้น้ำจากแหล่งน้ำเหล่านั้น ได้อีกต่อไปอีกทั้งยังอาจส่งกลิ่นเหม็นคลอบไปทั่วบริเวณ ทำให้อากาศหายใจไม่บริสุทธิ์ เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยและความเป็นอยู่ของประชาชนอย่างร้ายแรง ปลาและสัตว์น้ำทั้งหลายที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ หากไม่ตายก็ต้องอพยพหนีไปอยู่ที่อื่น ส่วนที่ทนอาศัยอยู่ต่อไปได้ก็จะเกิดการปนเปื้อนไม่สามารถนำมาเป็นอาหารได้ อีกทั้งยังกระทบกระเทือนเศรษฐกิจของประเทศด้วย เนื่องจากกิจการที่ต้องใช้น้ำเป็นวัตถุดิบ เช่น การประปา และการอุตสาหกรรม ไม่อาจจะใช้น้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติเหล่านี้ได้ เป็นเหตุให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียประการสำคัญคือ เป็นอันตรายต่ออนามัยและความปลอดภัยของประชาชน ส่วนความเสียหายประการต่อมาคือ เป็นการทำลายความสะอาดน่าดูของแหล่งน้ำ และเป็นการทำลายประโยชน์ในด้านเศรษฐกิจที่จะได้รับจากแหล่งน้ำที่สะอาด

เพื่อดำรงไว้ซึ่งแหล่งน้ำที่สะอาด ไม่ให้แปรสภาพเป็นแหล่งน้ำเสียไป จำเป็นต้องมีการควบคุมน้ำเสีย การควบคุมโดยทั่วไปต้องอาศัยข้อมูลจากสิ่งต่อไปนี้ คือ ความหนาแน่นของประชากร ประเภทและขนาดของอุตสาหกรรม ปริมาณน้ำไหลในลำน้ำ ตลอดจนความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำเสียเหล่านี้ เป็นต้น น้ำเสียโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียจากอาคารบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดความเสียหายและความเดือดร้อนรำคาญขึ้น ก็คือ ปริมาณของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย สารอินทรีย์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้ออกซิเจนในน้ำหมดไปได้ เมื่อออกซิเจนหมดไป ก็จะเกิดภาวะเน่าเสียขึ้น ดังนั้นการปล่อยน้ำเสียจึงต้องคำนึงถึงภาวะทั่วไปของแหล่งน้ำเป็นหลัก เช่น ปริมาณน้ำไหล ออกซิเจนละลายในน้ำ และอัตราการความเร็วของกระแสน้ำ [1]

1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างเครื่องเติมอากาศแบบคู่อากาศ
2. ทดสอบหัวพ่นน้ำขนาดต่าง ๆ (Jet nozzle) ของเครื่องเติมอากาศที่ผลิตจากท่อพีวีซี (PVC)
3. หาอัตราการไหลของอากาศเข้าเครื่องเติมอากาศเมื่อใช้หัวพ่นน้ำขนาดต่าง ๆ ที่ระยะห่างคงที่
4. ทดลองหาการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศโดยใช้หัวพ่นน้ำที่เหมาะสมคิดตั้งให้มีระยะห่างของหัวพ่นน้ำกับท่อตีบเท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2 เซนติเมตร

1.3 ขอบเขตของงาน

1. ศึกษาความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะของน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสีย และเครื่องมือที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
2. ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องเติมอากาศแบบ Jet aerator
3. สร้างเครื่องเติมอากาศโดยใช้ท่อพีวีซี ซึ่งอาศัยหลักการของ Jet aerator เพื่อทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่อง
4. สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการบำบัดและคุณลักษณะของเครื่องบำบัดน้ำเสีย
2. มีความเข้าใจในการทำงานเกี่ยวกับการออกแบบและการเก็บข้อมูลในการทำงานวิจัย
3. สามารถออกแบบและสร้างเครื่องเติมอากาศที่สามารถใช้ในการทำงานจริงได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ประยุกต์กับงานหลายประเภทได้
4. สามารถนำหลักการมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเพื่อพัฒนาเครื่องเติมอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เช่น การนำเครื่องเติมอากาศมาต่อกันแบบขนาน (Parallel) เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ลักษณะของน้ำเสีย

น้ำเสีย หรือน้ำโสโครก (Sewage or wastewater) หมายถึงน้ำที่ใช้แล้วในกิจกรรมต่างๆ ของชุมชน จากบ้านเรือน อาคารพาณิชย์ สถานประกอบการต่าง ๆ ตลอดจนโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอาจมีทั้งน้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน และน้ำฝนรวมอยู่ด้วย

ปริมาณหรือปริมาตรของน้ำเสียในแต่ละชุมชน ขึ้นอยู่กับตัวประกอบหลายอย่าง ในชุมชนที่เป็นที่พักอาศัย (Resident) โดยเฉพาะน้ำเสียอาจมีประมาณ 150 – 200 ลิตรต่อคนต่อวัน โดยไม่คิดรวมน้ำฝน สำหรับในชุมชนที่มีการอุตสาหกรรม ปริมาณน้ำเสียอาจมีมากถึง 600 – 800 ลิตรต่อคนต่อวัน ปกติปริมาณน้ำเสียในชุมชนที่มีน้ำประปาใช้ จะมีเท่ากับประมาณ 2 ใน 3 ของน้ำประปาที่ใช้ ส่วนอีก 1 ใน 3 ใช้ไปในกระบวนการอุตสาหกรรม และการรดน้ำต้นไม้กับสนาม ซึ่งไม่กลับคืนมาในรูปของน้ำเสีย

2.1.1 ส่วนประกอบของน้ำเสีย

2.1.1.1 ของแข็งในน้ำเสีย

ลักษณะและส่วนประกอบของน้ำเสีย คือ น้ำเสียเป็นน้ำที่มีของแข็งละลายอยู่ในรูปของสารแขวนลอย (Suspended) ซึ่งทำให้น้ำเสียมีลักษณะเป็นของเหลวขุ่น วัสดุของแข็งแขวนลอย (Suspended solids) เมื่อยังสดจะมีสีเทาและมีกลิ่นอับ ในน้ำเสียจะมีอุจจาระ

เศษอาหาร กระดาษ และอื่น ๆ ที่ใช้แล้วอยู่ ในชีวิตประจำวันของชุมชน เมื่อเวลาล่วงเลยไป น้ำเสียจะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีดำ เน่า และมีกลิ่นน่ารังเกียจ และมีของแข็งสีดำลอยอยู่บนผิวน้ำ

น้ำเสียประกอบด้วยน้ำและของแข็ง ซึ่งละลายหรือแขวนลอยอยู่ในน้ำ ปริมาณของแข็งปกติมีน้อยมาก ประมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก นั่นคือในน้ำเสีย 1,000 ส่วนจะเป็นน้ำ 999 ส่วนเป็นของแข็งเพียง 1 ส่วน แต่ของแข็งเพียงปริมาณเล็กน้อยนี้เป็นปัญหาใหญ่ในการกำจัดน้ำเสีย ส่วนน้ำทำหน้าที่เป็นเพียงพาหนะขนส่งของแข็ง

ของแข็งที่แขวนลอยและละลายอยู่ในน้ำ เรียกว่า ของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลาย (Dissolved solids) ของแข็งละลายและของแข็งแขวนลอยเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ของแข็งอินทรีย์ (Organic solids) และของแข็งอนินทรีย์ (Inorganic solids) ปริมาณของแข็งในน้ำเสียทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ และความสามารถที่สารเหล่านี้จะเสื่อมสลายหรือสลายตัว เป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย

ก. ของแข็งแขวนลอย ซึ่งสามารถมองเห็นได้และแขวนลอยอยู่ในน้ำ เป็นของแข็งที่แยกออกจากรน้ำโดยวิธีกายภาพหรือวิธีกล เช่น การตกตะกอน หรือการกรอง ในห้องทดลองได้ด้วยการกรองผ่านชั้นแอสเบสตอสไนเบ้ากัวช (Gooch crucible) สารแขวนลอยในน้ำเสียส่วนมากมีทราย กรวดเล็ก ดิน ของแข็ง อูจจาระ กระดาษ ไม้ และเศษอาหาร เป็นต้น ร้อยละ 70 เป็นสารอินทรีย์ และร้อยละ 30 เป็นอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นทรายและกรวดเล็ก ของแข็งแขวนลอยยังสามารถแบ่งออกเป็นของแข็งตกตะกอนได้และของแข็งคอลลอยคัต

ข. ของแข็งละลาย หมายถึง ของแข็งที่กรองผ่านชั้นแอสเบสตอสไนเบ้ากัวช ของแข็งละลายทั้งหมดประมาณร้อยละ 90 จะละลายจริง ส่วนอีกประมาณร้อยละ 10 เป็นคอลลอยคัต ของแข็งละลายทั้งหมดประมาณร้อยละ 40 เป็นสารอินทรีย์ และร้อยละ 60 จะเป็นสารอนินทรีย์ ส่วนที่เป็นคอลลอยคัตจะมีร้อยละของสารอินทรีย์สูงกว่าส่วนที่เป็นของแข็งละลายจริง ของแข็งละลายจริงจะประกอบด้วยเกลือแร่ทั้งหลายที่มีอยู่ในน้ำประปา

ค. ของแข็งทั้งหมด (Total solids) ได้แก่ ของแข็งทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำเสีย โดยเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ทั้งหมด หรือของแข็งแขวนลอยและของแข็งละลายทั้งหมด สำหรับน้ำเสียจากครัวเรือนจะมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในปริมาณเท่ากัน และประมาณ 2 ใน 3 เป็นสารละลาย และ 1 ใน 3 เป็นสารแขวนลอย 1 ใน 2 ของส่วนของแข็งเป็นสารอินทรีย์นี้เป็นปัญหาในการกำจัดน้ำเสีย

2.1.1.2 ก๊าซละลายในน้ำเสีย

น้ำเสียมีก๊าซละลายอยู่ปริมาณเล็กน้อย ก๊าซที่สำคัญคือก๊าซออกซิเจน ซึ่งมากับน้ำประปาและได้รับจากอากาศบนผิวน้ำของน้ำเสีย ออกซิเจนในน้ำเสีย เรียกว่า ออกซิเจนละลาย ออกซิเจนละลายในน้ำเสียมีความสำคัญมาก นอกจากออกซิเจนละลายนี้ น้ำเสียอาจมีก๊าซอื่น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีไนโตรเจนซึ่งละลายจากอากาศ ไฮโดรเจนซัลไฟด์จากการสลายตัวของสารอินทรีย์ และสารประกอบอินทรีย์ของซัลเฟอร์ ก๊าซเหล่านี้แม้ว่าจะมีปริมาณเล็กน้อย แต่มีความสำคัญในการสลายตัวและการกำจัดของแข็งในน้ำเสีย

2.1.1.3 ส่วนประกอบทางชีวของน้ำเสีย

ในน้ำเสียมีสิ่งมีชีวิตอยู่มากมาย ส่วนมากจะเล็กมากจนไม่อาจมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและมีส่วนอย่างสำคัญในการกำจัดน้ำเสีย ซึ่งต้องอาศัยสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ในการทำให้ของแข็งอินทรีย์เสื่อมสลายหรือสลายตัว สิ่งมีชีวิตเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรีย และสิ่งมีชีวิตเชิงซ้อน (complex) กว่า

ก. แบคทีเรีย เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมากมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น เป็นพืชเซลล์เดียว บางชนิดเคลื่อนไหวได้เหมือนสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย แบคทีเรียต้องการอาหาร ออกซิเจน และน้ำ แบคทีเรียสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ พาราซิติกแบคทีเรีย และซาโปรฟิติกแบคทีเรีย

แบคทีเรียทั้งพาราซิติคและซาโปรฟิติค นอกจากต้องการอาหารแล้ว ยังต้องการออกซิเจนสำหรับการหายใจ บางชนิดใช้ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งเรียกว่า ออกซิเจนอิสระ แบคทีเรียเหล่านี้เรียกว่า แอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic bacteria) และกระบวนการทำลายของแข็งอินทรีย์โดยแบคทีเรียเหล่านี้ เรียกว่า การสลายตัวแบบออกซิเคชัน หรือการเสื่อมสลายแบบแอโรบิก การสลายตัวแบบนี้โดยใช้ออกซิเจนละลายจะไม่มีกลิ่นเน่าหรือสภาพไม่น่าดู สำหรับแบคทีเรียชนิดอื่นที่ไม่สามารถอยู่ได้ในที่ที่มีออกซิเจนละลาย จะได้ออกซิเจนที่ต้องการจากปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในของแข็งอินทรีย์และอนินทรีย์จากการสลายตัวแบบแอนแอโรบิก (Anaerobic decomposition) หรือการเน่าเสีย (Putrefaction) หรือการสลายตัวโดยปราศจากออกซิเจนละลาย จะมีกลิ่นเน่าและสภาพไม่น่าดู

นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียแอโรบิกบางชนิดสามารถปรับตัวอาศัยในที่ที่ไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ เรียกว่า แฟคัลเททีฟแอโรบิกแบคทีเรีย (Facultative aerobic bacteria) ในขณะที่เดียวกันมีแบคทีเรียแอนแอโรบิกบางอย่างที่สามารถอยู่และเติบโต ในที่ที่มีออกซิเจนละลายอยู่ เรียกว่า แฟคัลเททีฟแอนแอโรบิกแบคทีเรีย (Facultative anaerobic bacteria)

ข. จุลินทรีย์อื่น นอกจากแบคทีเรียแล้ว ในน้ำเสียยังมีสิ่งมีชีวิตอย่างอื่นที่มีขนาดเล็กมากที่ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์จึงจะมองเห็น จุลินทรีย์เหล่านี้มีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่มีความหนาแน่นไม่เหมือนแบคทีเรียบางชนิดและมักจะใหญ่กว่าและมีโครงสร้างซับซ้อนกว่า บางชนิดเป็นพืช และบางชนิดเป็นสัตว์ ทั้งหมดมีแหล่งกำเนิดมาจากในดินหรือของเสียอินทรีย์ บางชนิดเคลื่อนที่ได้ และบางชนิดเคลื่อนที่ไม่ได้ แต่ทุกชนิดต้องการอาหาร ออกซิเจน และความชื้น ในแง่ความต้องการออกซิเจน จุลินทรีย์เหล่านี้เป็นแอโรบิก แอนแอโรบิก หรือแฟคัลเททีฟ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตเช่นเดียวกับแบคทีเรีย สิ่งมีชีวิตเหล่านี้มีหน้าที่ในการสลายตัวและการเสื่อมสลายของของแข็งอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยใช้ของแข็งเหล่านี้เป็นอาหาร และให้ของเสียที่มีโครงสร้างที่ง่ายกว่าออกมา และผลิตภัณฑ์ของเสียเหล่านี้จะเป็นอาหารสำหรับแบคทีเรียซาโปรฟิติคบางชนิดต่อไป จุลินทรีย์บางชนิดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะกินสิ่งมีชีวิตอื่นเป็นอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรีย

ค. สิ่งมีชีวิตที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Macroscopic organisms) นอกจากจุลินทรีย์ดังกล่าวข้างต้น ยังมีสิ่งมีชีวิตเชิงซ้อนมากกว่าและใหญ่กว่า มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มีส่วนในการสลายตัวของสารอินทรีย์ ได้แก่ หนอนต่าง ๆ และแมลงที่อยู่ในชั้นความเจริญเติบโตต่าง ๆ บางชนิดมีมากอยู่ในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย และบางชนิดมีมากในลำน้ำที่มีน้ำเสียหรือของเสียอินทรีย์

2.2 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

น้ำเสียมีแหล่งกำเนิดจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1 น้ำเสียจากคนและสัตว์

น้ำเสียเหล่านี้ ได้แก่ อุจจาระปัสสาวะ และมูลสัตว์ที่ลงสู่ท่อน้ำเสีย น้ำเสียเหล่านี้มีความสำคัญที่สุดเพราะอาจมีเชื้อโรคอยู่ด้วย การบำบัดน้ำเสียเหล่านี้อย่างถูกวิธีจึงมีความสำคัญยิ่ง

2.2.2 น้ำเสียจากครัวเรือน

น้ำเสียเหล่านี้ ได้แก่ น้ำซักผ้า น้ำอาบ น้ำห้องน้ำ น้ำล้างชาม น้ำในครัว น้ำจากการประกอบอาหาร เป็นต้น น้ำเสียเหล่านี้จะมีสบู่ ผงซักฟอก เศษอาหาร ไขมัน เป็นต้น

2.2.3 น้ำฝนและน้ำล้างถนน

น้ำฝนที่ไหลไปตามพื้นดินจะพาเอาทราย ใบไม้ และขยะมูลฝอยลงสู่ท่อน้ำเสีย ในบางแห่งมีระบบท่อระบายน้ำฝนโดยเฉพาะต่างหากไปจากน้ำเสียอื่น ๆ

2.2.4 น้ำใต้ดินที่ไหลซึมเข้าไปในท่อน้ำเสีย

ท่อน้ำเสียปกติฝังอยู่ใต้ดิน และในบางแห่งอาจวางอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน น้ำใต้ดินสามารถซึมเข้าท่อตามข้อต่อต่าง ๆ ได้ อัตราการซึมคิดเป็นลิตรต่อวันต่อกิโลเมตร หรือ

แกลลอนต่อวันต่อไมล์ บางแห่งอาจคิดเป็นลิตรต่อวันต่อเฮกตาร์ หรือแกลลอนต่อวันต่อเอเคอร์ ของพื้นที่ที่น้ำใต้ดินซึ่งเข้าสู่น้ำเสียได้ สำหรับอัตราการซึมที่ขึ้นอยู่กับลักษณะข้อต่อของท่อ ลักษณะของดิน ภาวะของน้ำใต้ดิน และอัตราฝนตก เป็นต้น

2.2.5 น้ำเสียจากอุตสาหกรรม

น้ำเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมขึ้นอยู่กับชนิดของกระบวนการอุตสาหกรรมอาจจะมีผงซักฟอกออกมาเป็นฟองลอยและสารเคมีนานาชนิด ซึ่งจำเป็นต้องมีการบำบัดเบื้องต้น หรือการบำบัดอย่างสมบูรณ์ที่โรงงานก่อนที่จะได้รับอนุญาตให้ปล่อยลงสู่น้ำเสีย หรือแหล่งน้ำสาธารณะ [1]

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

2.3.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical unit operation)

กระบวนการนี้ คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นขั้นตอนของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตัดย่อย (Comminution) การกวาด (Skimming) การกวน (Mixing) การทำให้ลอย (Flotation) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกตัวด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) การกรอง (Filtration) การกำจัดตะกอนหนัก (Grit Removal) เป็นต้น

2.3.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical unit process)

กระบวนการดังกล่าว คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยการผสมของสารเคมี กับน้ำเสียเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกแอมลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ กระบวนการ

ตกตะกอน (Precipitation) การทำให้เป็นกลางหรือการสะเทิน (Neutralization) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นต้น

2.3.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological unit process)

กระบวนการคั่งกล่าว คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลชีพที่จะทำการย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศ และจะได้จุลชีพเพิ่มจำนวนขึ้น ได้แก่ Activated sludge, Trickling filter, Aerated lagoon, Anaerobic filter, Anaerobic pond, Stabilization pond เป็นต้น

2.3.4 กระบวนการทางกายภาพ - เคมี (Physicochemical unit processes)

คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพและทางเคมีมารวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งได้แก่ Ion exchange, Carbon adsorption, Reverse osmosis, Electrodialysis เป็นต้น

2.4 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

การปล่อยน้ำเสียทิ้งลงแหล่งน้ำโดยวิธีการเจือจาง จำเป็นต้องมีการกำจัดน้ำเสียอย่างเพียงพอเสียก่อน เพื่อรักษาไว้ซึ่งแหล่งน้ำสำหรับใช้เพื่อการประปา การพักผ่อนหย่อนใจ การประมงและอื่น ๆ แม้ว่าจะไม่ได้ใช้ประโยชน์อย่างอื่นของแหล่งน้ำซึ่งเป็นทิ้งน้ำเสีย การกำจัดน้ำเสียยังมีความจำเป็นอยู่เพื่อป้องกันมิให้เกิดภาวะเน่าเสีย ซึ่งอาจจะแบ่งออกได้เป็น 5 วิธีดังนี้

2.4.1 การบำบัดเบื้องต้น (Preliminary treatment)

การบำบัดเบื้องต้นในโรงงานบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ เพื่อป้องกันอุปกรณ์เครื่องสูบน้ำมิให้เสียหาย โดยการขจัดเอาของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ ของแข็งอนินทรีย์หนัก และน้ำมันหรือไขมันออก ในกรณีที่นำน้ำเสียไปทิ้งทะเลการกำจัดเบื้องต้นอย่างเดียวอาจจะเป็นการเพียงพอ อุปกรณ์ที่ใช้การบำบัดเบื้องต้นที่ใช้กันมากประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.4.1.1 ตะแกรงชนิดหยาบและละเอียด
- 2.4.1.2 อุปกรณ์ทำให้เป็นชิ้นเล็ก มีเครื่องบด ตัด และสับ
- 2.4.1.3 ถังตกตะกอนสำหรับกรวดเล็ก (Grit chamber)
- 2.4.1.4 ถังแเอเรชันเบื้องต้น (Pre – aeration tank)

2.4.2 การบำบัดปฐมภูมิ (Primary treatment)

ในการบำบัดปฐมภูมินี้ของแข็งตกตะกอนได้หรือประมาณร้อยละ 40 – 60 ของของแข็งแขวนลอย จะถูกแยกและขจัดออกจากริ่้น้ำเสียโดยตกตะกอนทางกายภาพในถังตกตะกอน ถ้าใช้สารเคมีบางอย่างช่วย นอกจากของแข็งตกตะกอนได้จะตกตะกอนแล้ว ของแข็งคอลลอยด์ส่วนใหญ่จะตกตะกอนด้วย หรือประมาณร้อยละ 80 –90 ของของแข็งทั้งหมดจะถูกขจัดออก การทำงานของสิ่งมีชีวิตในน้ำเสียช่วงนี้มีน้อยมาก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการกำจัดปฐมภูมิจะลดความเร็วของน้ำเสียลงเพียงพอที่จะทำให้ของแข็งตกตะกอนได้ จึงเรียกว่าถังตกตะกอน ถังตกตะกอนสามารถแบ่งออกตามการออกแบบและการทำงานเป็น 4 กลุ่มดังนี้

- 2.4.2.1 ถังเกรอะ (Septic tank)
- 2.4.2.2 ถังสองชั้น หรือถังอิมฮอฟฟ์ (Two stry tank or Imhoff tank)
- 2.4.2.3 ถังตกตะกอนธรรมดาพร้อมด้วยเครื่องจักรกวาดตะกอน
- 2.4.2.4 ถังตกตะกอนแบบไหลขึ้นพร้อมด้วยเครื่องจักรกวาดตะกอน

ในกรณีที่มีการใช้สารเคมีจะมีอุปกรณ์เพิ่มเติมดังนี้

- ก. เครื่องจ่ายสารเคมี (Chemical feeder)
- ข. เครื่องกวน (Mixing device)
- ค. เครื่องให้รวมตัวเป็นก้อน (Flocculator)

2.4.3 การบำบัดทุติยภูมิ (Secondary treatment)

การบำบัดทุติยภูมิใช้ในกรณีที่น้ำเสียหลังจากที่ได้รับการบำบัดปฐมภูมิแล้ว แต่ยังมีของแข็งอินทรีย์แขวนลอยและละลายอยู่อีกมาก เกินกว่าที่ลำน้ำจะสามารถรับได้ เป็นเหตุให้ไม่สามารถใช้น้ำจากลำน้ำได้ตามปกติ อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดทุติยภูมิแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือ

2.4.3.1 ถังกรองหยด (Tricking filter) พร้อมด้วยถังตกตะกอนทุติยภูมิ

2.4.3.2 ถังแเอเรชัน (Aeration tank)

2.4.3.3 ถังทรายกรองแบบจ่าย - พัก (Intermittent sand filter)

2.4.3.4 สเตบิไลเซชัน พอนด์ (Stabilization pond)

2.4.4 การเติมคลอรีน (Chlorination)

การให้คลอรีนอาจจะใช้ในการบำบัดคอนใดก็ได้ โดยมีความมุ่งหมายดังนี้

2.4.4.1 เพื่อฆ่าเชื้อโรคหรือทำลายเชื้อโรค

2.4.4.2 เพื่อช่วยในกระบวนการตกตะกอน ในถังกรองหยดและในแอสทิวเทค

2.4.4.3 เพื่อลดหรือชะลอความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี

2.4.5 การบำบัดตะกอน (Sludge treatment)

ตะกอน คือ ของแข็งซึ่งมีน้ำอยู่ด้วยที่ขจัดออกจากน้ำเสียในการกำจัดทั้งประภภูมิและทุติยภูมิ โดยทั่วไปตะกอนจะต้องถูกบำบัดต่อไปอีกก่อนที่จะนำไปทิ้งได้ การบำบัดตะกอนมีความมุ่งหมาย 2 ประการ คือ เพื่อขจัดน้ำบางส่วนหรือทั้งหมดออกจากตะกอนเพื่อลดปริมาตรของตะกอน และเพื่อให้การสลายตัวของของแข็งอินทรีย์ที่เน่าเสียได้ไปเป็นของแข็งแร่หรือของแข็งอินทรีย์ที่ค่อนข้างอยู่ตัว วิธีการกำจัดตะกอนอาจใช้ 2 วิธี หรือมากกว่าในวิธีต่อไปนี้

- 2.4.5.1 การทำให้เข้มข้น (Thickening)
- 2.4.5.2 การย่อย (Digestion)
- 2.4.5.3 การตากแห้งบนชั้นทราย (Sand bed)
- 2.4.5.4 การปรับด้วยสารเคมี (Conditioning with chemical)
- 2.4.5.5 การกรองสุญญากาศ (Vacuum filtration)
- 2.4.5.6 การทำแห้งด้วยความร้อน
- 2.4.5.7 การเผา (Combustion)
- 2.4.5.8 การออกซิเดชันเปียก (Wet oxidation)
- 2.4.5.9 การลอยตัว (Flotation) ด้วยสารเคมีหรืออากาศ
- 2.4.5.10 การใช้แรงหนีศูนย์กลาง

จากขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียที่กล่าวมาแล้วนั้น ในส่วนหลักของเนื้อหาจะเน้นที่ส่วนของการเติมอากาศ เช่น ถังแเอเรชันเบื้องต้นและถังแเอเรชัน ซึ่งในแต่ละแบบจะเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological unit process) เพราะมีการนำหลักของการเติมอากาศมาใช้มากที่สุดและเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานบำบัดน้ำเสีย โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท คือ [2]

2.5 กระบวนการบำบัดโดยใช้ออกซิเจน (Aerobic treatment processes)

กระบวนการบำบัดโดยใช้ออกซิเจนเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพที่ต้องควบคุมให้มีก๊าซออกซิเจนในระบบ เพื่อให้มีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียพวกแอโรบิกในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้ยังแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ลักษณะคือลักษณะที่จุลินทรีย์แขวนลอยอยู่ในถังปฏิกรณ์ (Aerobic suspended growth treatment processes) ได้แก่ กระบวนการเอเอส (Activated sludge process) บ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon) กระบวนการย่อยแบบใช้อากาศ (Aerobic digestion process) เป็นต้น และลักษณะที่จุลินทรีย์จับตัวอยู่ที่ตัวกลางหรือตัวกรอง (Media) ได้แก่ กระบวนการถังกรองจุลชีพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Trickling filter) ระบบจานหมุนชีวภาพ (Rotating biological contactors) เป็นต้น [3]

2.6 กระบวนการบำบัดโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic treatment processes)

ระบบบำบัดน้ำเสียโดยไม่ใช้ออกซิเจนเป็นวิธีที่ไม่ต้องเติมออกซิเจนหรือนิยมเรียกว่าระบบไร้ออกซิเจนหรือถังหมัก ระบบนี้เริ่มนิยมใช้กันแพร่หลายมากขึ้นเรื่อย ๆ เพราะสามารถประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ และยังได้พลังงานที่เกิดจากระบบไร้ออกซิเจน ได้แก่ ก๊าซมีเทน เป็นต้น ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้ในการหุงต้มทำอาหารได้ และใช้ในการคั้นน้ำในหม้อคั้นน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมได้ ในอดีตเข้าใจกันว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการบำบัดโดยไม่ใช้ออกซิเจนจำเป็นต้องมีน้ำเสียที่มีความสกปรกมาก (BOD มาก ๆ) แต่ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนารูปแบบของถังปฏิกริยาขึ้นมาเรื่อย ๆ จนสามารถบำบัดน้ำเสียที่มี BOD ต่ำ ๆ เช่น น้ำเสียจากชุมชน เป็นต้น ต่อไปนี้จะได้อธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการต่าง ๆ ของระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนพร้อมข้อมูลออกแบบ และการนำไปใช้งาน [2]

2.7 เครื่องเติมอากาศ (Aerator)

เครื่องเติมอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบการเติมอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยในแต่ละระบบจะใช้เครื่องเติมอากาศแตกต่างกันออกไป ซึ่งเราสามารถแบ่งประเภทของเครื่องเติมอากาศได้ดังนี้

2.7.1 เครื่องเติมอากาศแบบจมน้ำ (Submerged aerator) ได้แก่

2.7.1.1 Diffused – air aerator

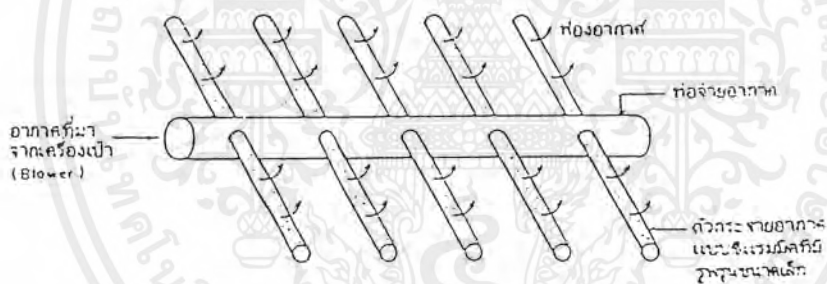
Diffused – air aerator เป็นเครื่องเติมอากาศที่นิยมใช้กันมากในถังเติมอากาศทั่วไป โดยอาศัยเครื่องอัดอากาศ (Air compressor) เป็นตัวเป่าอากาศเข้าไปในระบบท่อจ่ายอากาศ โดยทั่วไปพบว่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลงในน้ำจะมีประมาณ 5 ถึง 8% และ 7 ถึง 12% สำหรับฟองอากาศขนาดใหญ่และขนาดเล็กมากตามลำดับ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศที่เป่าเข้าไปด้วยคือยังมีปริมาณอากาศที่เป่าลงไปมากเกินไป จะมีผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนลงไปใต้น้ำตกต่ำลงด้วย ในการคำนวณหากำลังงานที่ต้องการใช้ในการเติมอากาศ ควรพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ ขนาดความลึกของน้ำในถังเติมอากาศ ขนาดท่อจ่ายอากาศ ความยาวท่อจ่ายอากาศ เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องทราบค่าสูญเสียความดันของระบบท่อจ่ายอากาศ เพื่อนำมาคำนวณหา กำลังงานของเครื่องเติมอากาศต่อไป เครื่องเติมอากาศแบบนี้ยังแบ่งออกได้ เป็น 3 ชนิด คือ

ก. แบบ Porous (Fine bubble)

เครื่องเติมอากาศมักเป็นท่อทำด้วยวัสดุที่มีรูพรุน หรือหุ้มด้วยวัสดุที่มีรูพรุน เครื่องเติมอากาศแบบนี้ต้องการอากาศที่สะอาด ปราศจากฝุ่นละออง รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องกระจายอากาศแบบ Porous (Fine bubbles) ใช้ได้กับระบบเอเอสทุกประเภท [4]

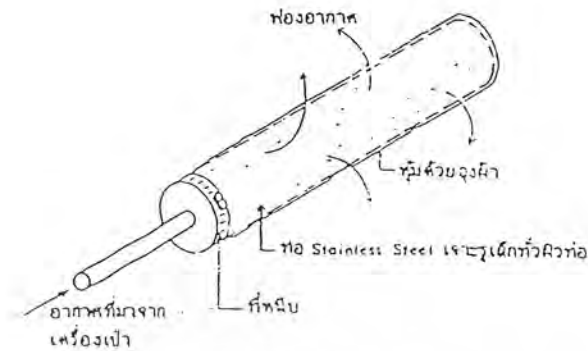


รูปที่ 2.1 Fine bubble diffused-air

ข. แบบ Porous (Medium bubble)

เครื่องเติมอากาศมักเป็นท่อที่มีรูเปิด (Orifices) ขนาดไม่ใหญ่นัก เป็นท่อพลาสติกหรือ เมมเบรน (Membrane) ที่เป็นตัวทำให้เกิดฟอง รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องกระจายอากาศแบบ Porous (Medium bubbles) ใช้ได้กับระบบ Activated sludge ทุกประเภท [4]

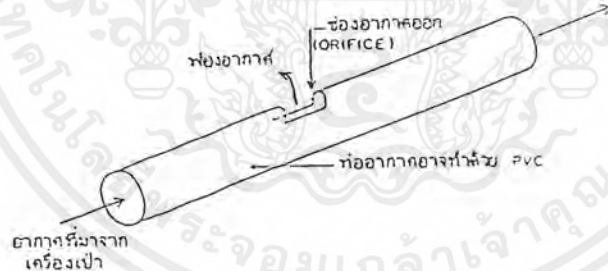
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 Medium bubble diffused-air

ก. แบบ Nonporous (Coarse bubble)

เครื่องเติมอากาศเป็นท่อตั้ง ภายในท่อเป็นเกลียวหรือแผ่นกั้น (Baffles) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เพื่อให้อากาศไหลวกไปวนมาอยู่ภายในท่อจนถูกแรงเฉือน (Shear) ทำให้แตกกระจายเป็นฟอง [4]



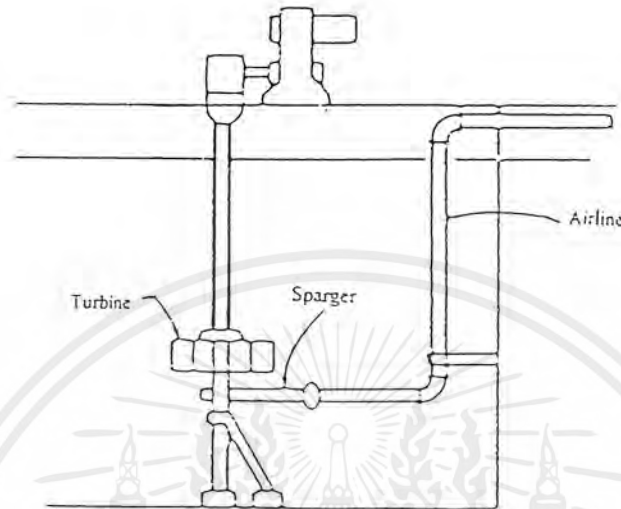
รูปที่ 2.3 Coarse bubble diffused-air

2.7.1.2 Sparger turbine aerator

ระบบนี้ประกอบด้วยเครื่องกวนน้ำแบบใบพัดและระบบเติมอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.4 อากาศจะถูกอัดเข้าไปปล่อยใต้ใบพัด และจะถูกใบพัดตีกระจายเป็นฟองเล็กๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำคล้ายกับระบบฟองอากาศ ระบบ Turbine แบบนี้มีข้อดีคือใช้ได้กับถังเติมอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลึก ๆ ได้ในกรณีที่ไม่มีพื้นที่ดินพอเพียง โดยทั่วไประบบ Turbine จะประหยัดกว่าระบบ Surface aeration ถ้าขนาดใหญ่เกิน 75 แรงม้าขึ้นไป สามารถใช้ได้กับระบบเอเอสทุกประเภท [5, 6]



รูปที่ 2.4 Sparger turbine

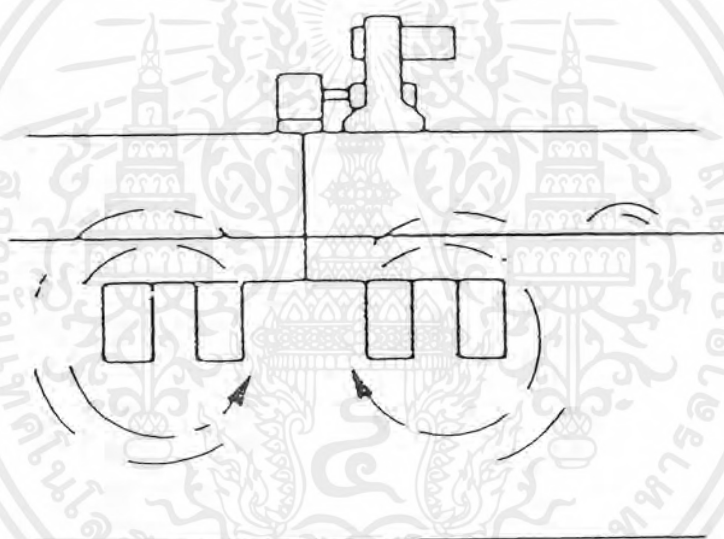
2.7.1.3 Jet aerator

หลักการของเครื่องเติมอากาศแบบนี้คือ อาศัยการผสมกันระหว่างอากาศที่ถูกดูดเข้าไปทางท่อดูดอากาศและน้ำที่ถูกสูบเข้าไป โดยทั่วไปจะติดตั้งไว้บริเวณใกล้ ๆ กับพื้นถังเติมอากาศ มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างสูงพอประมาณ มีขนาดฟองอากาศตั้งแต่ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ตัวกระจายอากาศแบบนี้เหมาะสมกับถังเติมอากาศที่มีความลึกมากถึง 7-8 เมตร มีราคาพอประมาณ แต่ต้องตรวจสอบเป็นประจำ เพราะอาจเกิดการอุดตันได้ง่าย รายละเอียดดูได้จากบทที่ 4 ในหลักการและการออกแบบเครื่องเติมอากาศ [4, 6]

2.7.2 เครื่องเติมอากาศผิวน้ำ (Surface aeration)

2.7.2.1 เครื่องเติมอากาศประเภทความเร็วต่ำ (Low-speed turbine aerator)

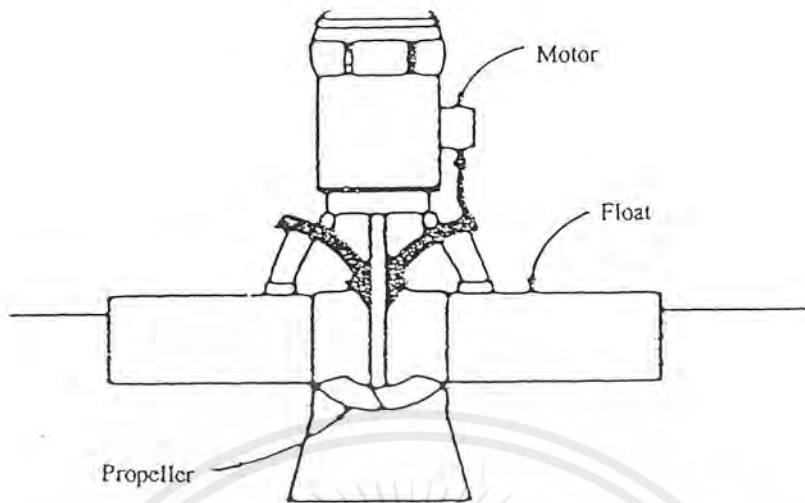
เป็นเครื่องเติมอากาศประเภทที่ไม่มีท่อดูด ใบพัดมีขนาดใหญ่ขับเคลื่อนโดยตรงด้วยมอเตอร์ และเกียร์ทดหมุนในแนวตั้งด้วยความเร็วต่ำไม่เกิน 100 รอบ/นาที หรือมีค่าความเร็วตามเส้นรอบวง (Peripheral speed) ประมาณ 4-6 เมตร/นาที ใบพัดซึ่งบิดทำมุมกับผิวน้ำจะวิดน้ำขึ้นมาเหวี่ยงกระจายไปโดยรอบๆ ตัวเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 นิยมใช้กับระบบเอสหรือระบบ Aerated lagoons [6]



รูปที่ 2.5 เครื่องเติมอากาศประเภทความเร็วต่ำ

2.7.2.2 เครื่องเติมอากาศประเภทความเร็วสูง (High-speed floating aerator)

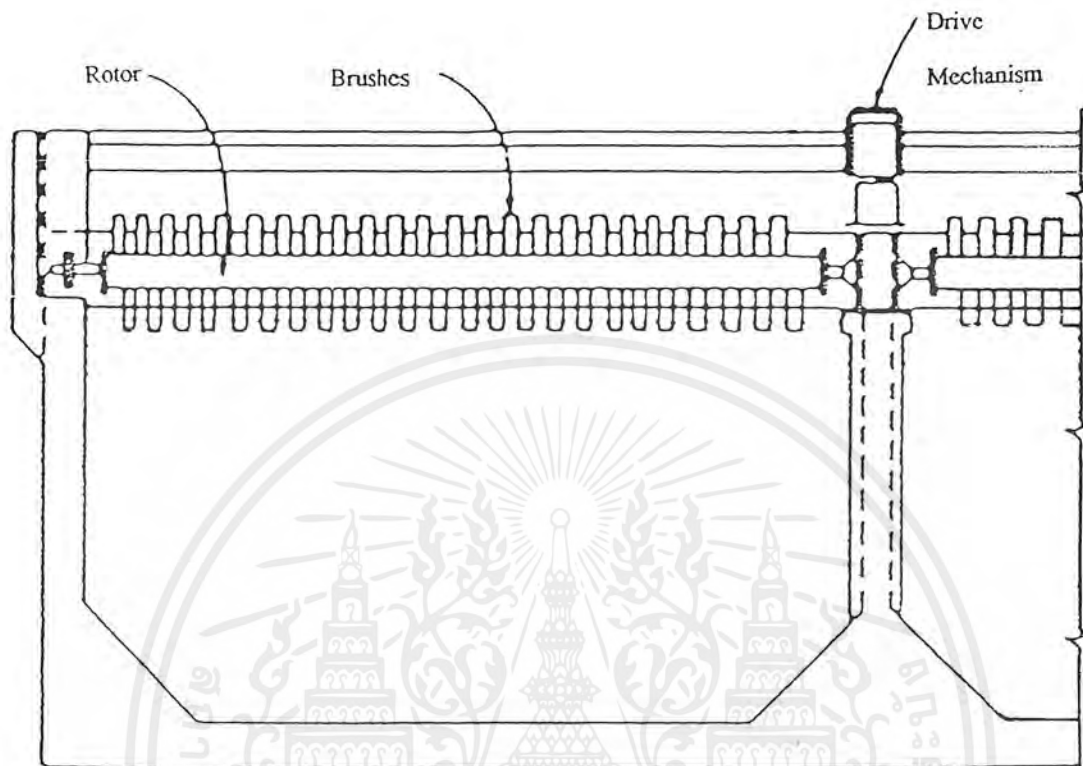
เป็นเครื่องเติมอากาศประเภทที่มีท่อดูด ใบพัดขับเคลื่อนโดยตรงด้วยมอเตอร์หมุนในแนวตั้งด้วยความเร็วที่อาจสูงถึง 1750 รอบ/วินาที ใบพัดมีลักษณะคล้ายใบจักรเร็ว จะดูดน้ำผ่านท่อขึ้นไปกระทบกับเครื่องกระจายน้ำ (Diffusor) เพื่อให้น้ำแผ่กระจายเป็นฝอยรอบตัวเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [6]



รูปที่ 2.6 เครื่องเติมอากาศประเภทความเร็วสูง

2.7.2.3 เครื่องเติมอากาศแบบ Rotor-brush

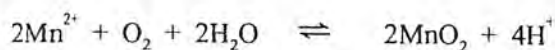
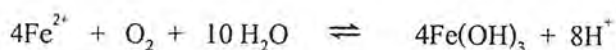
เครื่องเติมอากาศประเภทนี้หมุนตามแนวราบด้วยความเร็วต่ำ ประกอบด้วยใบพัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็ก ๆ หลายสิบอันรอบเพลา ใบพัดเหล่านี้จะทำหน้าที่สาดน้ำขึ้นมาเป็นฝอยกระจาย ข้อเสียของเครื่องเติมอากาศแบบนี้คือ กวนน้ำได้ไม่ลึกนัก และความยาวของเครื่องขึ้นกับกำลังแรงม้า ดังนั้นจึงใช้ได้แต่ในถังเติมอากาศสั้น ๆ เช่นในระบบ Oxidation ditch ซึ่งลึกเพียง 1.3 เมตร และใช้สำหรับกำลังแรงม้าไม่มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [5, 6]



รูปที่ 2.7 เครื่องเติมอากาศแบบ Rotor-brush

2.8 ประโยชน์ที่ได้รับจากการเติมอากาศ

1) เพื่อกำจัดเหล็กและแมงกานีส โดยเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำเสีย ปกติเหล็กและแมงกานีสจะปรากฏในรูปสารละลายในน้ำบาดาลที่ขาดออกซิเจน เมื่อน้ำดิบได้รับออกซิเจนจากการเติมอากาศ สารละลาย Fe^{2+} (ไอรอน(II) ไอออน) กับ Mn^{2+} (แมงกานีส(II) ไอออน) ก็จะถูกออกซิไดส์กลายเป็น Fe^{3+} (ไอรอน(III) ไอออน) กับ Mn^{4+} (แมงกานีส(IV) ไอออน) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เพื่อกำจัดก๊าซที่ละลายปนอยู่ในน้ำเสีย ก๊าซที่สำคัญคือ

2.1) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ดี บางส่วน (1%) ทำปฏิกิริยากับน้ำเป็นกรดคาร์บอนิก หรือแตกตัวออกมาเป็น HCO₃⁻ และ CO₃²⁻ ซึ่งส่วนที่ทำปฏิกิริยาทั้งหมดนี้ไม่อาจกำจัดไปได้ด้วยวิธีเคมีอากาศ อย่างไรก็ตาม ปริมาณของ CO₂ ในบรรยากาศทั่วไปมีอยู่น้อย จึงมีความดันย่อยต่ำ คือ 0.033% และมีค่าความละลายอิ่มตัว (Saturation value) ที่ 20°C เพียง 0.56 mg/l เมื่อใช้วิธีฉีดพ่นน้ำซึ่งอาจมี CO₂ สูงถึง 30–50 mg/l ไปสัมผัสกับอากาศจะทำให้ก๊าซที่ละลายปนนี้ระเหยออกไปจากน้ำได้มาก จากการทดลองพบว่าระยะสัมผัสอากาศประมาณสองวินาทีจะลดก๊าซ CO₂ จากน้ำดิบได้ถึง 70–80% หรือบางครั้ง 90%

เนื่องจาก H₂CO₃ เป็นกรดอ่อนซึ่งมีส่วนสำคัญต่อค่า pH ของน้ำ ดังนั้นเมื่อ CO₂ ระเหยออกไปจะทำให้ความเข้มข้นของ H⁺ ลดลง หรือทำให้ pH ของน้ำเพิ่มขึ้นนั่นเอง

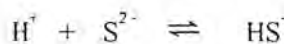
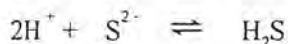
2.2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S)

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ยุ่งยากกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะ H₂S ละลายน้ำได้มากกว่า CO₂ ถึงสองเท่า อีกทั้งการแตกตัวของก๊าซ H₂S ที่ละลายอยู่ในน้ำยังเป็นลักษณะของ HS⁻ และ S²⁻



ซึ่งทั้ง HS⁻ และ S²⁻ นี้ไม่อาจกำจัดได้โดยการเติมอากาศ นอกจากนี้โดยเหตุที่ก๊าซ CO₂ ระเหยออกจากน้ำได้เร็วกว่า H₂S และการระเหยของ CO₂ จะทำให้จำนวน H⁺ ลดลงดังกล่าวแล้วซึ่งจะมีผลให้จำนวนของ HS⁻ และ S²⁻ เพิ่มขึ้น เพื่อให้อยู่ในสภาวะสมดุลโดยการแตกตัวของ H₂S

ก.) H_2S เมื่ออยู่ในน้ำจะมีอยู่ 3 สถานะ คือ H_2S (Gas), HS^- และ S^{2-} ขึ้นกับ pH ของน้ำตามสมดุล



ข.) ในสภาพไร้ออกซิเจน แบคทีเรียที่อยู่ในสภาพแวดล้อมแบบไร้ออกซิเจนจะใช้ออกซิเจนจาก SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- โดยทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูป S^{2-} , N_2 (Gas) ดังนั้นในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายเป็นศูนย์ (Anaerobic) จึงพบว่ามี S^{2-} จำนวนมาก (ไม่พบ SO_4^{2-}) แต่การปรากฏในรูป H_2S เป็นผลเนื่องจากสมดุลของน้ำที่ pH นั้นๆ

ค.) เมื่อเติม O_2 ลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยา $S^{2-} + 2O_2 \rightarrow SO_4^{2-}$ เนื่องจาก O_2 เป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ดี และกลับเป็น H_2S อย่างเดิม เมื่อเกิดสภาพขาดออกซิเจนขึ้น

ประสิทธิภาพในการกำจัด H_2S โดยวิธีการเติมอากาศอาจเพิ่มได้โดยแบ่งการเติมอากาศออกเป็น 2 ครั้ง ครั้งแรกกระทำในบรรยากาศที่มีก๊าซ CO_2 สูงกว่าปกติ ซึ่งอาจได้มาจากท่อไอเสีย การเผาไหม้ CO_2 ที่มีอยู่ 10% ในบรรยากาศนี้จะช่วยเพิ่มหรือรักษาระดับ CO_2 ในน้ำไว้ ทำให้ pH อยู่ในปริมาณเหมาะสมสำหรับการคงสภาพเป็นก๊าซของ H_2S และสามารถระเหยออกมาได้ ส่วน CO_2 กำจัดออกในการเติมอากาศครั้งที่สอง [7]

- 2.3) ทำให้เกิดการตกตะกอนมากขึ้นในถังตกตะกอน
- 2.4) ช่วยในการแยกน้ำมันและไขมันที่ปนมากับน้ำสกปรกออก
- 2.5) ทำให้น้ำสกปรกที่เน่าเสียมีสภาพดีขึ้นก่อนเข้าสู่การบำบัดขั้นต่อไป
- 2.6) เพื่อลดค่า BOD [8]

2.9 ความต้องการออกซิเจน (Oxygen demand)

น้ำที่ส่วนใหญ่มีสิ่งสกปรกหลายชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายได้ ดังนั้นเมื่อระบายน้ำที่ลงในน้ำ จึงเป็นเหตุให้ปริมาณสารละลายออกซิเจนในน้ำลดน้อยลง ในการบำบัดน้ำที่ประเภทนี้ จึงต้องกำจัดสิ่งสกปรกที่ต้องการออกซิเจนให้มีปริมาณน้อยลงตามมาตรฐาน

เนื่องจากสิ่งสกปรกในน้ำที่มีหลายชนิดปะปนกัน การวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของสิ่งสกปรกแต่ละชนิดจึงทำได้ยาก ในทางปฏิบัติจึงหาปริมาณออกซิเจนที่จะต้องใช้ในการทำปฏิกิริยากับสิ่งสกปรก ปริมาณออกซิเจนที่ได้เรียกว่า ความต้องการออกซิเจน (Oxygen demand) ของน้ำที่ ความต้องการออกซิเจนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับวิธีการหาค่า ที่นิยมใช้กันมากได้แก่

2.9.1 Biological oxygen demand (BOD)

ค่าของ BOD นี้เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากในการแสดงถึงความสกปรกมากน้อยเพียงใดของน้ำเสียจากชุมชน และจากโรงงานต่าง ๆ ค่าของ BOD นี้เป็นค่าที่มีความสำคัญอย่างมากในการออกแบบและควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียโดยทางชีวภาพ สามารถใช้บ่งบอกถึงค่าภาระอินทรีย์ (Organics loading) และใช้ในการหาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย การวัดค่าของ BOD ยังใช้สำหรับการตรวจสอบคุณภาพของน้ำในแม่น้ำลำคลองอีกด้วย

BOD₅ คือ ค่าปริมาณของออกซิเจนที่ถูกใช้ในการย่อยสารอินทรีย์ชนิดที่ย่อยสลายได้ ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) โดยจุลินทรีย์ในช่วงเวลา 5 วัน ณ ที่อุณหภูมิ 20°C สำหรับการวิเคราะห์หาค่าของ BOD₅ มีหลักการง่าย ๆ ดังต่อไปนี้

2.9.1.1 นำตัวอย่างน้ำเสียที่ต้องการหาค่าของ BOD₅ มาเติมด้วยอากาศ จนแน่ใจว่าอิ่มตัวด้วยอากาศแล้ว

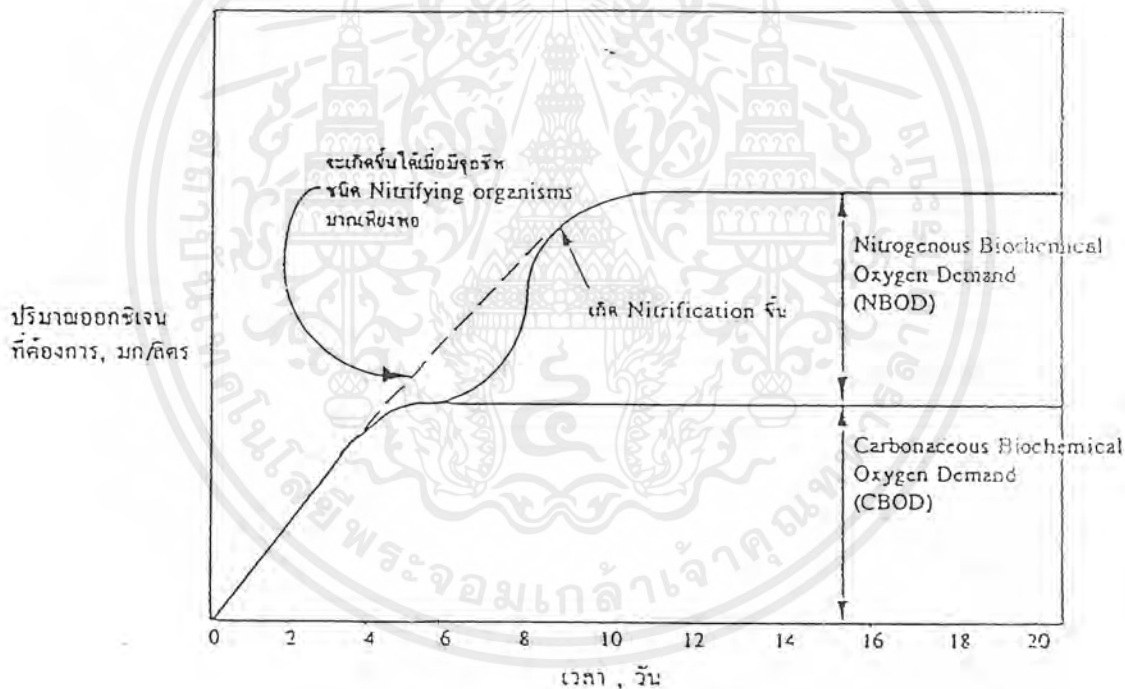
2.9.1.2 นำไปใส่ขวดมาตรฐาน BOD 2 ขวด (ต้องปิดให้สนิท) และใช้ขวดหนึ่งมาทำการวัดค่าของ DO (Dissolved oxygen) = DO₀ (ค่า DO ในวันที่ 0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.9.1.3 นำขวดที่เหลือไปเก็บไว้ในตู้มืดที่อุณหภูมิ 20°C ในเวลา 5 วัน
- 2.9.1.4 หลังจากนั้น นำออกมาวัดค่าของ DO = DO₅ (ค่า DO ในวันที่ 5)
- 2.9.1.5 เพราะฉะนั้นจะได้ค่า BOD₅ ที่ 20°C (mg/l) จากสมการ

$$BOD = \frac{(DO_0 - DO_5)(\text{ปริมาตรของขวด BOD})}{\text{ปริมาตรของขวดตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้}}$$

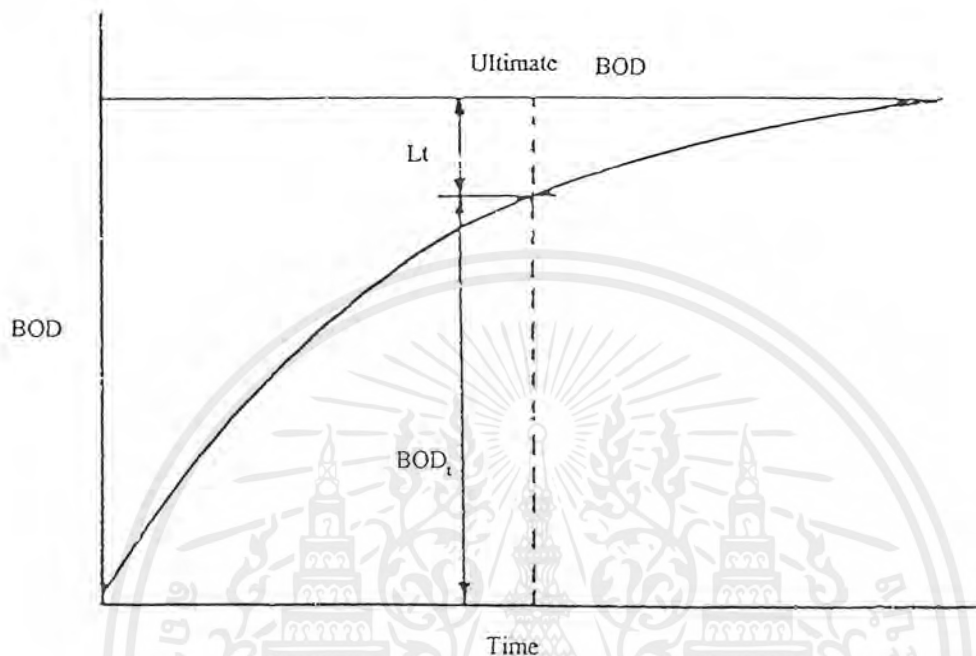
ค่า BOD ของน้ำเสียจะขึ้นอยู่กับเวลาเป็นสิ่งสำคัญ ค่า BOD ในเวลา 5 วัน (BOD₅) ได้นิยมใช้กันมาก แต่จริง ๆ แล้วสารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำเสียที่สามารถย่อยสลายได้มักใช้เวลาประมาณ 20 วันในการถูกย่อยสลายเกือบหมดสิ้นไป (ดูรูปที่ 2.8 ประกอบ [2])



รูปที่ 2.8 ค่า BOD สำหรับน้ำเสียทั่วไป

จากรูปที่ 2.9 [5] จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างออกซิเจนกับสารอินทรีย์ในน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ กว่าสารอินทรีย์จะถูกทำลายหมดจะใช้เวลาหลายสิบวันตามมาตรฐานสากลจึงวัดค่า BOD ทั้งหมดเวลา 5 วัน ที่อุณหภูมิ 20°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิของน้ำในฤดูร้อนของ

ประเทศหนาว BOD ในระยะ 5 วัน (BOD_5) จะมีค่าประมาณ 70-80% ของปริมาณ BOD ทั้งหมด (Ultimate BOD)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง BOD กับเวลา

2.9.2 Chemical oxygen demand (COD)

การวิเคราะห์หาค่าของ COD ใช้สำหรับประมาณปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป โดยที่สารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำเสียจะถูกออกซิไดซ์โดยปริมาณมากเกินพอของ $K_2Cr_2O_7$ ในสภาพของความเป็นกรด โดยทั่วไปแล้ว ค่าของ COD จะมีค่ามากกว่าค่าของ BOD เพราะว่ามีปริมาณของสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธีทางเคมี จะมีปริมาณมากกว่าสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธีทางชีวภาพ

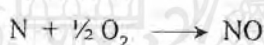
ประโยชน์ของการหาค่า COD ที่มีเหนือกว่าของ BOD_5 ก็คือ เวลาของการวิเคราะห์หาค่า COD ใช้ประมาณ 3 ชั่วโมง แต่สำหรับ BOD_5 ต้องใช้เวลาถึง 5 วัน จึงจะทราบผล ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่า COD จึงนิยมใช้กันมากในระบบบำบัดน้ำเสียทั่ว ๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าจำเป็นต้องทราบค่าของ BOD_5 ด้วยก็สามารถทำได้โดยพยายามหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ COD และ BOD_5 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองนี้จะมีความแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับน้ำเสียแต่ละชนิด แม้กระทั่งน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบบำบัด (Influent) กับน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแล้ว (Effluent) ก็ยังมีค่า BOD_5/COD แตกต่างกัน

2.9.3 Total oxygen demand (TOD)

การวิเคราะห์หาค่าของ TOD สามารถรู้ผลได้ภายใน 3 นาทีเท่านั้นและง่ายต่อการวิเคราะห์หามากกว่าของ COD หรือ BOD แต่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงกว่ามาก หลักการของการวิเคราะห์หาค่าของ TOD คือใช้กระบวนการเผาผลาญดังต่อไปนี้



ซึ่งสามารถรวมได้เป็นสมการข้างล่างนี้



2.9.4 Theoretical oxygen demand (ThOD)

ค่าของ ThOD คือปริมาณของออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์สารใดสารหนึ่ง เช่น Lactose, Glycine เป็นต้น สำหรับน้ำเสียมักจะประกอบด้วยคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าของ ThOD ได้ถ้ารู้สูตรเคมีของสารประกอบนั้น ๆ แล้ว ค่านี้ไม่นิยมใช้แสดงคุณภาพของน้ำ เนื่องจากได้ข้อมูลมายาก

2.9.5 Total organic carbon (TOC)

หลักการของการวิเคราะห์หาค่าของ TOC คือการออกซิไดซ์สารคาร์บอนในสารอินทรีย์ให้เปลี่ยนสภาพไปเป็นก๊าซ CO_2 และหาปริมาณของก๊าซ CO_2 โดยการทำให้ปฏิกิริยากับ KOH หรือโดยการใช้เครื่องมือ Infrared ก่อนที่ตัวอย่างน้ำเสียจะถูกใช้ในการวิเคราะห์หาค่า TOC ต้องการเติมอากาศและทำให้มีสภาพเป็นกรด เพื่อกำจัดความผิดพลาดเนื่องจากมีสารอินทรีย์คาร์บอนอยู่ในตัวอย่างน้ำเสียนั้น

2.9.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ BOD, COD, TOD, ThOD และ TOC

การหาความสัมพันธ์ของแต่ละค่านี้ต้องกระทำทุกครั้ง เมื่อมีชนิดของน้ำเสียแตกต่างกัน ซึ่งน้ำเสียบางชนิด เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่ง จะยากมากในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่าง ๆ เหล่านี้ได้ แต่พอจะประมาณได้ว่า ค่าของ $\text{TOD} > \text{COD} > \text{BOD}_5 > \text{ThOD} > \text{TOC}$ ความสัมพันธ์นี้เป็นจริงกับน้ำเสียทุกชนิด สำหรับน้ำเสียที่มาจกตามบ้านเรือนทั่วไปจะมีความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เหล่านี้ดังแสดงในสมการ [2]

$$\text{BOD}_2 = 1.87(\text{TOC}) - 17$$

$$\frac{\text{BOD}_5}{\text{COD}} = 0.40 \text{ ถึง } 0.80$$

$$\frac{\text{BOD}_5}{\text{TOD}} = 1.0 \text{ ถึง } 1.6$$

$$\frac{\text{ThOD}}{\text{ThOC}} = 2.67$$

$$\frac{\text{BOD}_5}{\text{BOD}_t} = 2/3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\text{COD}}{\text{TOD}} = 1.00$$

2.10 การละลายของออกซิเจนในน้ำ (Dissolved oxygen)

การละลายของออกซิเจนเป็นดัชนีคุณภาพของน้ำที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง เพราะออกซิเจนเป็นธาตุที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ และป้องกันไม่ให้น้ำเน่าเหม็น ในการกำจัดน้ำทิ้งด้วยวิธีทางชีววิทยาที่จะต้องใช้ออกซิเจนพอเพียง นอกจากนี้การวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ จะหาเป็นปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จะขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่างคือ

ก. เป็นปฏิภาคตรงกับความกดดันของบรรยากาศ นั่นคือถ้าความกดดันสูง ออกซิเจนละลายน้ำได้มาก

ข. เป็นปฏิภาคกลับกับอุณหภูมิของน้ำ นั่นคือถ้าอุณหภูมิของน้ำสูง ออกซิเจนจะละลายได้น้อยลง

ค. เป็นปฏิภาคกลับกับความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำ นั่นคือถ้าความเข้มข้นของเกลือแร่สูง ออกซิเจนจะละลายได้น้อย [5]

ตารางที่ 2.1 ความสามารถของออกซิเจนที่จะละลายน้ำ ณ สภาวะต่าง ๆ [2]

สภาวะ	ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำ
อุณหภูมิสูง	ลดน้อยลง
ความดันสูง (หรือที่ระดับต่ำ)	เพิ่มขึ้น
ความเข้มข้นของเกลือสูง	ลดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำ อาจประมาณได้จากสูตร

$$C_s = \frac{475 - 2.65S}{(33.5 + T)} \dots\dots\dots (2.1)$$

ตารางที่ 2.2 ค่าอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำจืด [1]

อุณหภูมิ		ปริมาณ ออกซิเจนละลาย (mg/l)	อุณหภูมิ		ปริมาณ ออกซิเจน ละลาย (mg/l)
°C	°F		°C	°F	
0	32	14.62	16	60.8	9.95
2	35.6	13.84	18	64.4	9.54
4	39.2	13.13	20	68.0	9.17
6	42.8	12.48	22	71.6	8.83
8	46.4	11.87	24	75.2	8.53
10	50.0	11.33	26	78.8	8.22
12	53.6	10.83	28	82.4	7.92
14	57.2	10.15	30	86.0	7.63

ตารางที่ 2.3 ค่าอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำทะเล [1]

ประเภทของน้ำ	อุณหภูมิ (°C)						
	0	5	10	15	20	25	30
น้ำจืด mg/l	14.6	12.8	11.3	10.2	9.2	8.4	7.6
น้ำกร่อย mg/l	13.0	11.4	10.1	9.1	8.3	7.6	6.9
น้ำทะเล mg/l	11.3	10.0	9.0	8.1	7.4	6.7	6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*น้ำกร่อย (Brackish water) มีคลอไรด์ 10,000 mg/l

**น้ำทะเล มีคลอไรด์ 20,000 mg/l

ตารางที่ 2.4 ปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ ณ อุณหภูมิต่างๆ [2]

อุณหภูมิของน้ำ (°C)	ปริมาณอากาศที่ละลาย (mg/l)
0	37.0
5	32.5
10	28.9
15	26.0
20	23.6
25	21.5
30	19.8
35	18.4
40	17.1
45	15.9
50	14.7

เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนแปลงได้ง่าย การวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนจึงต้องทำโดยทันทีที่เก็บตัวอย่าง การหาปริมาณออกซิเจนในน้ำทำได้ 2 วิธี คือ

2.10.1 วิธีเอไซด์โมดิฟิเคชัน (Azide modification method)

ก. หลักการทั่วไป

ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำธรรมชาติและในน้ำเสียขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมี กายภาพ และกระบวนการชีวเคมีในสิ่งมีชีวิต การวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนละลายเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการทดสอบในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียและมลภาวะทางน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากปริมาณออกซิเจนละลายนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และ ปริมาณของแข็งละลาย ดังนั้นจึงควรทำการหาค่าปริมาณออกซิเจนละลายในตัวอย่างทันทีที่เก็บ ตัวอย่าง

ข. สารแทรกสอด

ในการหาค่าปริมาณออกซิเจนละลายนั้นมีสารหลายอย่างที่เป็นสิ่งแทรกสอด อาทิเช่น เกลือของธาตุเหล็ก สารอินทรีย์ สารแขวนลอยที่มากเกินไป ชัลไฟด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ คลอรีนที่เหลืออยู่ โครเมียมและไซยาไนด์

2.10.2 วิธีเมมเบรนอิเล็กโทรด (Membrane electrode method)

ระบบอิเล็กโทรดที่หุ้มด้วยเมมเบรนนั้นมีองค์ประกอบที่มีความไวสูงเรียกว่า โพรบ (Probe) ซึ่งถูกป้องกันโดยเมมเบรน ซึ่งยอมให้ออกซิเจนผ่านและเปรียบเสมือนที่กั้นมิให้ สิ่งแปลกปลอมแพร่ผ่านเข้าไป ในสถานะที่มีความสมดุล กระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ สามารถเทียบความสัมพันธ์ได้กับความเข้มข้นของออกซิเจนละลาย มักใช้วิธีนี้ในการหาออกซิเจนละลายสำหรับตัวอย่างซึ่งมีสารแทรกสอดคือ วิตามินซี โมดิฟิเคชัน อาทิเช่น ชัลไฟด์ ไทโอซัลเฟต คลอรีน ฮิสระ ที ความขุ่น และฟล็อก (Flock) ของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ วิธีการเทียบมาตรฐานและการอ่านค่านั้นมักกระทำไว้ในวิธีการใช้เครื่องมือชนิดนั้น ๆ [9]

2.11 ทฤษฎีการถ่ายเทออกซิเจน

ออกซิเจนเป็นก๊าซที่ละลายในน้ำได้น้อยมาก ความเข้มข้นอิ่มตัว (Saturate on concentration) ของออกซิเจนในน้ำที่นิ่ง หรือความเข้มข้นสูงสุดที่ออกซิเจนจะละลายอยู่ในน้ำได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ ความกดดันของบรรยากาศ และความเข้มข้นของเกลือแร่ในน้ำ ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำบริสุทธิ์ภายใต้ความกดดัน 1 บรรยากาศ หาได้จากตารางในภาคผนวก ข หรืออาจประมาณได้จากสมการที่กล่าวมาแล้ว

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำจะเป็นปฏิภาคตรงกับค่าความขาดแคลนออกซิเจน (Oxygen deficit) ของน้ำ ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นอิ่มตัวกับความเข้มข้นจริง ดังนั้นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทออกซิเจนกับความขาดแคลนออกซิเจนจึงเขียนได้เป็น

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_S - C) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ค่าของ $K_L a$ จะขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของน้ำ (Turbulence) อุณหภูมิ ความกดดันของบรรยากาศและความเข้มข้นของสารละลายต่าง ๆ ในน้ำ

ค่าของ $K_L a$ ที่อุณหภูมิ $T^\circ\text{C}$ จะมีความสัมพันธ์กับค่า $K_L a$ ที่อุณหภูมิ 20°C ดังสมการ

$$(K_L a)_T = (K_L a)_{20} \times \theta^{(T - 20)} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

จะเห็นได้ว่าสามารถคำนวณอัตราการถ่ายเทออกซิเจนได้จากค่า $K_L a$ สำหรับมาตรฐานทั่วไปในระบบเดิมอากาศ จะวัดประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเดิมอากาศในน้ำสะอาดเป็นน้ำหนักของออกซิเจนต่อหน่วยกำลังงานที่ใช้ภายในระยะเวลาหนึ่งชั่วโมง ภายใต้สภาวะมาตรฐานดังนี้คือ

- ก. อุณหภูมิ 20°C
- ข. ความเข้มข้นของออกซิเจนเมื่อเริ่มทดสอบมีค่าเป็นศูนย์
- ค. ความกดดันบรรยากาศเท่ากับ 760 mmHg

ดังนั้นที่สภาวะการใช้งานจริง ๆ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของระบบเดิมอากาศจะมีค่าต่างจากค่าที่หาได้ภายใต้สภาวะมาตรฐาน ถ้าอุณหภูมิของน้ำที่สูงกว่า 20°C และต้องการรักษาความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำทิ้งให้สูงกว่า 0 mg/l ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะการใช้งานจะต่ำกว่าค่าที่สภาวะมาตรฐานและคำนวณได้จากสมการ

$$N_f = \frac{N_o (C_{sa} \times \beta - C_r)(1.024)^{T-20} \alpha}{C_{so}} \dots\dots\dots (2.4)$$

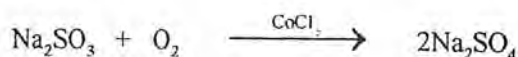
$$\beta = \frac{\text{ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำที่ } T}{\text{ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำที่ } 20}$$

$$= \frac{\text{อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ } T}{\text{อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำที่ } 20}$$

โดยทั่วไป β จะมีค่าประมาณ 0.95 และ α จะมีค่าประมาณ 0.80 – 0.95 ค่าที่แท้จริง จะหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.11.1 การหาค่า $K_L a$ การหาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสำหรับเครื่องเติมอากาศทำได้ดังนี้คือ

- 1) ติดตั้งเครื่องเติมอากาศลงในถังทดสอบ (Test Tank) แล้วเดินเครื่องเติมอากาศเป็นเวลานานหลายชั่วโมงเพื่อให้ความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำในถังมีค่าอิ่มตัว
- 2) วัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนของน้ำในถังหลายๆ ครั้ง ณ ตำแหน่งที่กำหนด เทียบเคียงค่าที่ได้กับค่ามาตรฐานในตารางภาคผนวก ข
- 3) เติมสารประกอบโคบอลต์(II) คลอไรด์ (CoCl_2) ลงในถังจนความเข้มข้นของโคบอลต์(II) คลอไรด์เป็น 1.0 mg/l
- 4) เตรียมน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์ (Na_2SO_3) ในถังเล็กอีกใบหนึ่งให้ปริมาณโซเดียมซัลไฟท์เท่ากับ 1.25 เท่าของปริมาณที่ต้องใช้ตามทฤษฎีในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำ โดยมี โคบอลต์(II) คลอไรด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ



- 5) หยุดเครื่องเติมอากาศและระบายน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์ที่เตรียมไว้ลงในถังทดสอบ โดยระบายลง ณ ตำแหน่งต่างๆ รอบถังทดสอบ
- 6) เดินเครื่องเติมอากาศนานประมาณ 3 ถึง 5 นาที เพื่อให้น้ำในถังทดสอบผสมกับน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์โดยทั่วถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) หยดเครื่องเติมอากาศนานประมาณ 10 ถึง 15 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลไฟท์กับออกซิเจนเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์

8) เดินเครื่องเติมอากาศแล้วเก็บตัวอย่างน้ำทุกระยะ 5 นาที ที่ 3/4 ของระยะห่างระหว่างเครื่องเติมอากาศกับผนังถังทดสอบ เก็บตัวอย่างที่ระยะ 1 ฟุตใต้ผิวน้ำ กึ่งกลางความลึกและระยะ 1 ฟุตจากกันถึงทดสอบ

9) วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทันทีเพื่อหาความเข้มข้นของออกซิเจนโดยใช้วิธีเคมี และควรวัดความเข้มข้นของออกซิเจนด้วยเครื่องมือ (DO meter) ด้วยเพื่อเป็นการตรวจสอบหาค่าความขาดแคลนของออกซิเจนโดยนำค่าความเข้มข้นของออกซิเจนไปลบออกจากค่าความเข้มข้นอิ่มตัว

10) เขียนกราฟระหว่างค่าความขาดแคลนออกซิเจนกับเวลาในกระดาษกราฟแบบ Semi-log จะได้เส้นตรง

11) ค่าความชัน (Slope) ของเส้นตรงที่ได้คือค่า $K_L a$ ซึ่งอาจคำนวณได้จาก

สมการ

$$K_L a = \frac{(\log D_1 - \log D_2)(2.303)(60)}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots (2.5)$$

2.303 = การเปลี่ยนค่า \log_{10} เป็น \log_e
 60 = การเปลี่ยนหน่วยเวลาจากนาทีเป็นชั่วโมง

12) จำนวนประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องเติมอากาศจากสมการ

การ

$$N_o = \frac{(K_L a)(D_o)(M)(1.024)^{20-T}}{P \times 1000} \dots\dots\dots (2.6)$$

1000 = การเปลี่ยนหน่วยจาก mg/l เป็น kg/m^3

2.11.2 การหาค่า β และ α มีวิธีการดังต่อไปนี้คือ

- 1) นำตัวอย่างน้ำทิ้งและน้ำสะอาดมาปริมาณหนึ่ง ถ้าใช้เครื่องมือวัดความเข้มข้นของออกซิเจนใช้ตัวอย่างน้ำเพียงประมาณ 4 ลิตร ถ้าวัดความเข้มข้นของออกซิเจนด้วยวิธีเคมี ใช้น้ำตัวอย่างประมาณ 80 ลิตร
- 2) เติมอากาศลงในน้ำตัวอย่างทั้งสองพร้อม ๆ กันเพื่อให้ออกซิเจนละลายน้ำจนอิ่มตัว
- 3) หากความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนในตัวอย่างน้ำทั้งสองคำนวณค่า β จากสูตร
- 4) กำจัดออกซิเจนในน้ำทิ้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนหรือน้ำยาโซเดียมซัลไฟท์กับโคบอลต์(II) คลอไรด์
- 5) เติมอากาศลงในตัวอย่างน้ำทั้งสอง แล้ววัดความเข้มข้นของออกซิเจนทุก 5 นาที ถ้าค่าความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าอิ่มตัวเร็วเกินไป คือภายใน 30 นาที ลดปริมาณอากาศลงแล้วเริ่มต้นจากข้อ 4 ใหม่อีกครั้ง
- 6) จากผลที่ได้คำนวณหาค่า $K_L a$ ในน้ำทิ้งและในน้ำสะอาด
- 7) คำนวณค่า α จากสมการ [5]

$$\alpha = \frac{K_L a \text{ ของน้ำทิ้ง}}{K_L a \text{ ของน้ำสะอาด}}$$

2.12 สมดุลของออกซิเจนในน้ำ (Equilibrium of dissolve oxygen)

การระเหยออกหรือซึมเข้าของก๊าซสู่น้ำนั้นจะเป็นไปได้เร็วหรือช้า ยากหรือง่ายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ ได้แก่ ลักษณะสมบัติของสารระเหยนั้น ๆ อุณหภูมิ ความต้านทานของการถ่ายเทแลกเปลี่ยน ความดันย่อยของก๊าซในบรรยากาศ การผสมสัมผัส (Turbulence) ระหว่างน้ำกับอากาศ อัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตร (Area/volume ratio) และระยะเวลาแห่งการสัมผัส (Time of exposure) ทั้งนี้อาจอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแห่งความสมดุลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำนั้นวัดในรูปของความเข้มข้นเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปกติที่สภาวะอุณหภูมิและความดันคงที่ ณ จุดใดจุดหนึ่ง ความเข้มข้นของ ก๊าซที่ละลายอยู่จะมีค่าเท่ากับค่าความละลายอิ่มตัว (Saturation value) ที่จุดนั้น เช่น ที่อุณหภูมิ 20°C และภายใต้ความดันบรรยากาศ ความละลายอิ่มตัวของก๊าซ O₂ และ CO₂ ในน้ำบริสุทธิ์จะมีค่าเท่ากับ 9.0 และ 0.56 mg/l ตามลำดับ การที่ก๊าซละลายได้น้ำได้มากน้อยไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับ ความดันย่อยของก๊าซนั้น และความดันย่อยของก๊าซใด ๆ ก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณหรือ เปอร์เซ็นต์ของก๊าซนั้นในมวลก๊าซรวม เช่น ที่ความสูงระดับน้ำทะเล จะมีก๊าซ CO₂ ในอากาศแห้ง (Dry air) ราว 0.033% ดังนั้นอัตราส่วนความดันย่อยของก๊าซ CO₂ ในบรรยากาศนี้จะมีค่า 0.033% นั่นเอง ยิ่งความดันย่อยสูงขึ้นเท่าใดความสามารถในการละลายน้ำก็จะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น (Henry's law) อุณหภูมิก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับค่าความละลายอิ่มตัว ถ้าหากความดันย่อยมีค่าคงที่ แต่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซจะลดลง นอกจากนี้ถ้าหากความดันย่อย มีค่าคงที่ แต่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซจะลดลง นอกจากนี้ถ้าหากใน น้ำมีของแข็งละลายปะปน (Dissolved solids) มาก ค่าความละลายอิ่มตัวของก๊าซจะลดลงเช่นกัน เช่น น้ำทะเลซึ่งมีปริมาณคลอไรด์ 20,000 mg/l ที่อุณหภูมิ 20°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ ความละลายอิ่มตัวของ O₂ จะมีเพียง 7.3 mg/l

เมื่อฉีดพ่นน้ำขึ้นสัมผัสกับอากาศในบรรยากาศ CO₂ จะระเหยออกเพื่อลดความเข้มข้นให้เหลือเท่ากับค่าความละลายอิ่มตัวของมันหรือปรับให้เข้าสู่สภาวะสมดุลนั่นเอง แต่ปฏิกิริยา ดังกล่าวนี้มักไม่ดำเนินไปถึงสภาวะสมดุลเพราะความสามารถในการระเหยนั่นอาจเป็นไปได้ช้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ นอกเสียจากว่าจะใช้เวลาในการสัมผัสกับอากาศให้นานจนพอเพียง แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่มีความจำเป็นอันใดที่จะให้ปฏิกิริยาดำเนิน ไปจนถึงขั้นสมดุลโดยสมบูรณ์

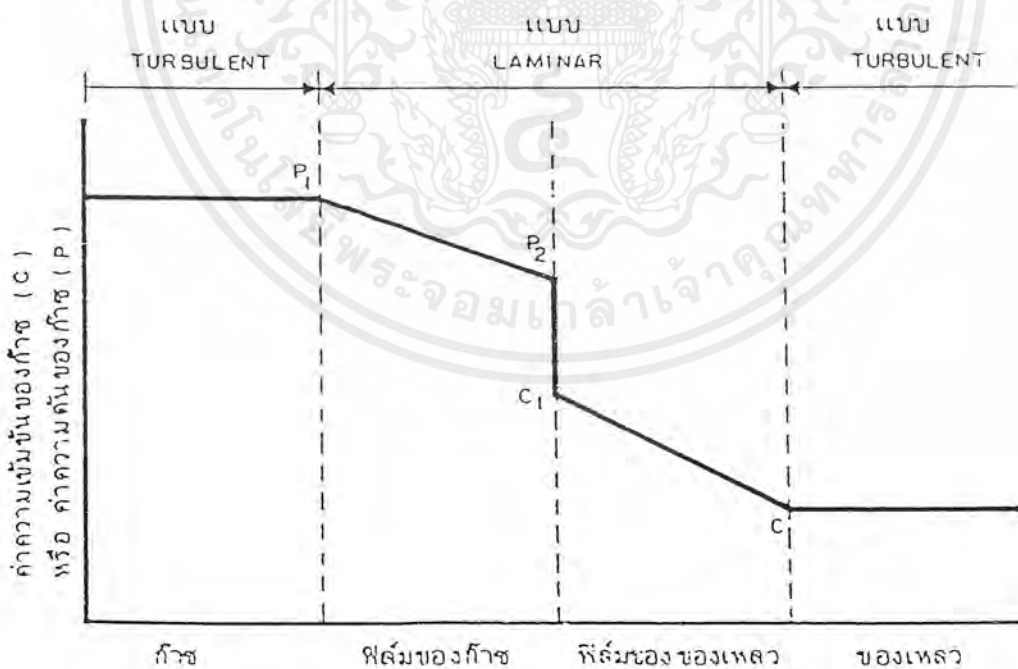
ค่าความละลายอิ่มตัวมีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการเติมอากาศ ทั้งนี้เพราะแรง ขับ (Driving force) ที่จะไล่ก๊าซให้ระเหยไปหรือดูดซับเข้ามานั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่าง ค่าความละลายอิ่มตัวกับความเข้มข้นจริงที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ถ้าความแตกต่างนี้มีค่าสูงก็จะทำให้ แรงขับสูงและปฏิกิริยาเกิดขึ้นรวดเร็ว

ขั้นตอนการถ่ายเทออกซิเจนจากบรรยากาศไปสู่ชั้นของเหลวมีอยู่ด้วยกัน 3 ขั้นตอน

ก. ขั้นที่หนึ่ง การถ่ายเทออกซิเจนจากบริเวณบรรยากาศเข้าสู่ฟิล์มของก๊าซ ซึ่งอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนในบริเวณนี้มีอัตราเร็วมาก เนื่องจากความต้านทานในชั้นฟิล์มของก๊าซมีน้อยมาก ค่าความดันของก๊าซจะค่อย ๆ ลดลง แต่ในปริมาณที่น้อยคงแสดงไว้ในรูปที่ 2.10

ข. ขั้นที่สอง การถ่ายเทของออกซิเจนจากบริเวณฟิล์มของก๊าซเข้าสู่ฟิล์มของของเหลว โดยมากจะมีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของบริเวณผิวของของเหลว (ผิวน้ำ) ถ้ามีความปั่นป่วนบริเวณผิวน้ำมาก ชั้นฟิล์มของน้ำอาจแตกออก ทำให้อัตราการถ่ายเทของออกซิเจนเข้าสู่ผิวน้ำมีมากขึ้น บริเวณชั้นฟิล์มของน้ำมีค่าความเข้มข้นของออกซิเจนจะค่อย ๆ ลดลงจาก C_1 ไปเป็น C

ค. ขั้นที่สาม การถ่ายเทออกซิเจนจากชั้นฟิล์มของของเหลวเข้าสู่ชั้นของของเหลว ในชั้นนี้จะมีค่าความเข้มข้นของก๊าซ (ออกซิเจน) เท่ากับ C ถ้าน้ำมีการกวนสมบูรณ์ ค่า C จะมีเท่า ๆ กันในทุกส่วนของน้ำ แต่ถ้าน้ำไม่มีการกวน ค่า C อาจจะมีค่าแตกต่างกันตามระดับความลึกของน้ำ โดยทั่วไปยิ่งลึกลงไปเท่าใดค่า C จะมีค่าลดลงไปเรื่อย ๆ [4]



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซบริเวณชั้นผิวของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 อัตราการดูดซึม (Absorption) หรือการคาย (Desorption) ของก๊าซ

อัตราการดูดซึมของก๊าซจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณที่พร่องจากอิ่มตัว (Saturation deficit) ของก๊าซในน้ำเสียนั้น เขียนได้ในรูปของสมการ

$$\frac{dc}{dt} = K_g (C_s - C_t) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Integrate จาก C_0 เมื่อ $t=0$ จนถึง C_t เมื่อ $t=t$ จะได้

$$\begin{aligned} C_t - C_s &= (C_s - C_0) [1 - \exp(-K_g t)] \\ &= (C_s - C_0) (1 - 2.718^{-K_g t}) \end{aligned}$$

ถ้าหากการถ่ายเทก๊าซเป็นไปในลักษณะดูดซึม ความเข้มข้นจะอยู่ในรูป $C_0 < C_t < C_s$ ดังนั้นทั้ง $C_t - C_0$ และ $C_s - C_0$ จะเป็นบวก

ถ้าหากการถ่ายเทก๊าซเป็นไปในลักษณะระเหยออก ความเข้มข้นจะอยู่ในรูป $C_s < C_t < C_0$ ดังนั้นทั้ง $C_t - C_0$ และ $C_s - C_0$ จะเป็นลบ

ค่าของ K_g จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและการผสมสัมผัสที่ติระหว่างน้ำกับก๊าซ เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ผ่านผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับน้ำ (Gas-liquid interface) ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่สุดของการเติมอากาศ ดังนั้นค่า K_g จะมีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าของ A/V (Area-volume ratio) หรือพื้นที่ผิวสัมผัส (A) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของน้ำ (V) อธิบายได้ว่า ในปริมาตรที่เท่ากันถ้าสามารถกระจายน้ำให้แตกออกเป็นเม็ดเล็ก ๆ ได้มากที่สุด พื้นที่ผิวสัมผัสแต่ละเม็ดรวมกันจะมากกว่าการกระจายแบบเม็ดใหญ่จำนวนน้อยและนั่นคือประสิทธิภาพในการเติมอากาศจะสูงกว่าไปด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่าง K_g กับ A/V เป็นไปดังนี้

$$K_g = k_g \cdot \frac{A}{V} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

k_g = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทก๊าซ (Gas transfer coefficient)

เบกเกอร์ได้รายงานผลการทดลองเติมอากาศแบบอัดฟองอากาศเพื่อการศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทก๊าซที่แปรตามอุณหภูมิ $k_g(T) = k_g^{(T_c - 20)}$ และได้ค่า $k_g(T)$ ของก๊าซ O_2 , N_2 และในช่วงอุณหภูมิ 3.5-35°C ค่าดังกล่าวนี้ใช้ได้เฉพาะลักษณะการเติมอากาศในแบบที่ทดลองนี้เท่านั้นดังนี้ [7]

$$k_g(T) O_2 = 32.3 \times 1.018^{T-20} \quad \text{cm/h}$$

$$k_g(T) N_2 = 34.0 \times 1.019^{T-20} \quad \text{cm/h}$$

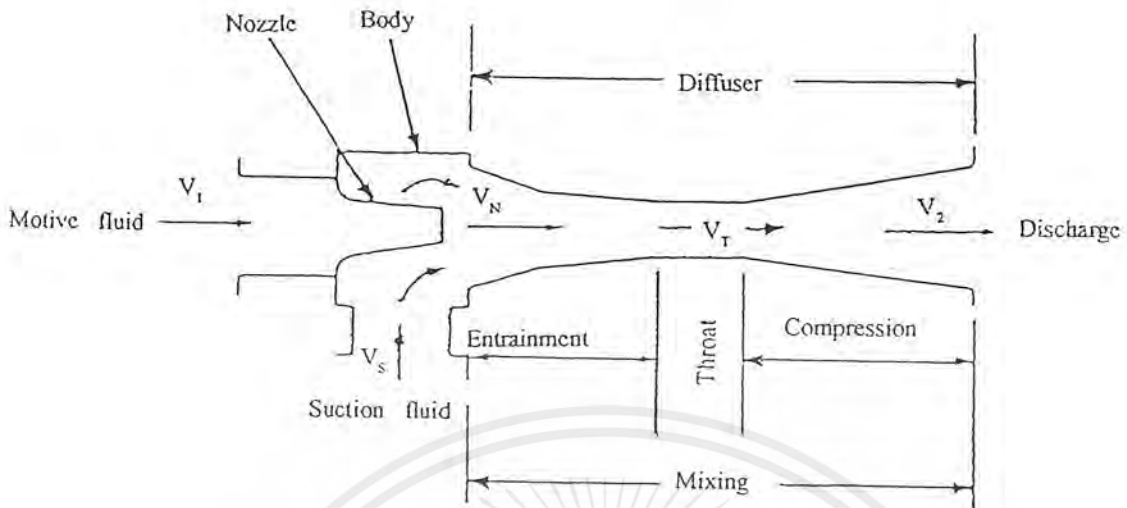
$$k_g(T) \text{ Air} = 32.1 \times 1.019^{T-20} \quad \text{cm/h}$$

บทที่ 3

หลักการและการออกแบบเครื่องเติมอากาศ

3.1 หลักการของเครื่องเติมอากาศ

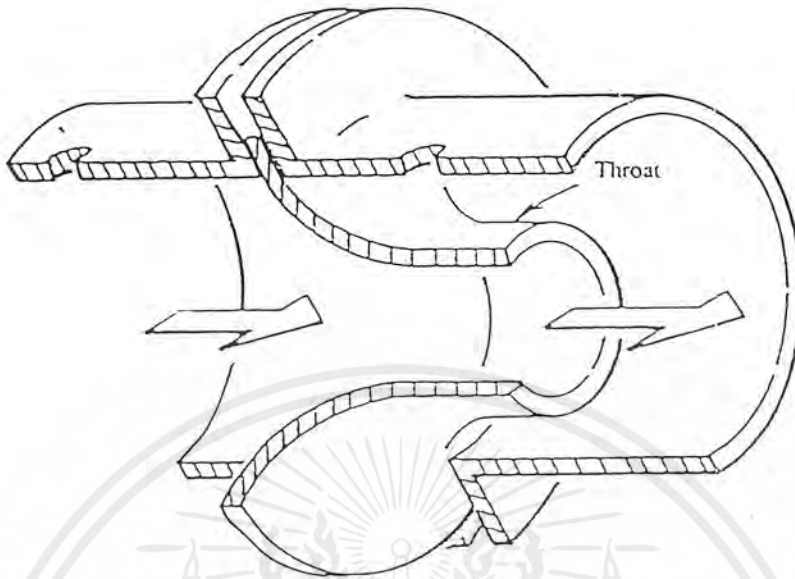
เครื่องเติมอากาศที่จะออกแบบและสร้างนี้ใช้หลักการเดียวกับ Eductor โดยใช้ของไหลคือของเหลวเป็นตัวเคลื่อนที่ (Motive fluid) ผ่านท่อที่มีลักษณะเป็นหัวพ่นน้ำ หลักการและทฤษฎีของเครื่องมือนี้ถูกพัฒนามาจากสมการ Bernoulli equation กล่าวคือ ความดันสถิตย์ (Static pressure) ที่ทางเข้าของหัวพ่นน้ำ ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์เมื่อของเหลวเคลื่อนที่ผ่านหัวของหัวพ่นน้ำ เมื่อน้ำผ่านหัวพ่นน้ำ ออกมาจะเป็นของเหลวที่มีความเร็วสูงทำให้ความดันตรงบริเวณหัวของหัวพ่นน้ำนั้นต่ำลง เป็นผลให้เกิดความดันแตกต่างระหว่างบริเวณหัวพ่นน้ำ กับภายนอกตัวเครื่อง ให้อากาศจากภายนอกถูกดูดเข้ามาที่ทางเข้าของช่องดูดอากาศเกิดการผสมกันของอากาศกับน้ำภายในกล่องผสม (Chamber) จากรูปที่ 3.1 แสดงบริเวณส่วนต่างของเครื่องเติมอากาศ บริเวณที่เกิดการแพร่ (Diffuser section) จะเปลี่ยนความดันเนื่องจากความเร็ว (Velocity pressure) ไปเป็นความดันสถิตย์ (Static pressure) ที่ทางออก (Discharge) [10]



รูปที่ 3.1 รายละเอียดของเครื่องเจ็ทอากาศ

3.1.1 หัวพ่นน้ำ (Flow nozzle)

เริ่มมีการใช้ครั้งแรกในเยอรมนี รูปแบบของหัวพ่นน้ำมีต่าง ๆ กัน หัวพ่นน้ำเหมาะสำหรับใช้กับของไหลที่มีความเร็วในการไหลสูง ทนต่อการกัดกร่อนอันเกิดจากของไหลเสียดสี (Erosion) ได้ดีกว่าออร์ฟิส ในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความดันดิสเพลเมนต์ที่เท่ากัน หัวพ่นน้ำจะให้ค่าอัตราการไหลมากกว่าออร์ฟิสถึง 65% ค่า β (d/D) ของหัวพ่นน้ำอาจสูงกว่าแบบออร์ฟิสในย่านอัตราการไหลสูง ๆ ได้ แต่ไม่เหมาะกับของไหลที่มีสารแขวนลอยอยู่ เพราะโดยธรรมชาติของเหลวจะไหลแบบหมุนวนหลังช่วงหัวพ่นน้ำ ซึ่งจะทำให้สารแขวนลอยที่หนักกว่าเข้าไปสะสมอยู่หลัง Throat ดังนั้นการติดตั้งที่ถูกต้องควรจะต้องติดตั้งในแนวตั้ง โดยให้มีทิศทางการไหลจากบนลงล่าง หัวพ่นน้ำสามารถใช้งานได้ดีทั้งของไหลที่เป็นก๊าซและของเหลว แต่ราคาของตัววัดจะสูงกว่าแบบออร์ฟิสรวมทั้งการบำรุงรักษา เนื่องจากออร์ฟิสเป็นแผ่นสามารถถอดออกได้โดยไม่ต้องถอดท่อด้านหน้าและด้านหลังออกด้วย แต่แบบหัวพ่นน้ำต้องถอดท่อออกด้วย [11]



รูปที่ 3.2 หัวพ่นน้ำแบบมาตรฐาน

3.1.2 สมการสำหรับการออกแบบเครื่องเติมอากาศ

สมการ Bernoulli สำหรับ Motive fluid ที่ผ่านหัวพ่นน้ำ ดังนี้

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g_c} = \frac{P_s}{\gamma_1} + \frac{V_N^2}{2g_c} - h_1 \dots\dots\dots (3.1)$$

$$h_1 = \left(4f \frac{L}{D_{\text{throat}}} + \sum K_f \right) \frac{V^2}{2g_c}$$

จากสมการที่ (3.1) จัดสมการจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{P_1 - P_s}{\gamma_1} = \frac{V_N^2}{2g_c} - \frac{V_1^2}{2g_c} + h_1 \dots\dots\dots (3.2)$$

เรียกสมการที่ (3.2) นี้ว่า Operating head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาบริเวณ Diffuser แสดงสมการได้ดังนี้

$$\frac{P_s}{\gamma_2} + \frac{V_T^2}{2g_c} = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g_c} - h_2 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$h_2 = \left(4f \frac{L}{D} + K_e + K_c \right) \frac{V_T^2}{2g_c}$$

ท่อตัน

ที่จุด Discharge จากสมการที่ (3.3) จัดสมการใหม่จะได้

$$\frac{P_2 - P_s}{\gamma_2} = \frac{V_T^2}{2g_c} - \frac{V_2^2}{2g_c} + h_2 \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

สมการที่ (3.4) นี้เรียกว่า Discharge head

Head ratio (R_H) คือ อัตราส่วนของ Operating head / discharge head

$$R_H = \frac{V_N^2 / 2g_c}{V_T^2 / 2g_c} = \frac{V_N^2}{V_T^2} = \frac{(P_1 - P_s) / \gamma_1}{(P_2 - P_s) / \gamma_2} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

หรือแทน γ_1 และ γ_2 ด้วย Specific weight และ Specific gravity ตามลำดับ จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$R_H = \frac{(P_1 - P_s)(\text{sp.gr. 2})}{(P_2 - P_s)(\text{sp.gr. 1})} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

เมื่อจุด Suction และจุดก่อนเข้าหัวพ่นน้ำ เหมือนกันและไม่คิดแรงโน้มถ่วง สมการที่ (3.6) จะกลายเป็น

$$R_H = \frac{H_1 - H_s}{H_2 - H_s} \dots\dots\dots (3.7)$$

เมื่อ $H_1 - H_s =$ Operating head, ft (m)

$H_2 - H_s =$ Discharge head, ft (m)

จากรูปที่ 3.1 ทำ Momentum balance ของ Entrainment ได้ดังนี้

$$M_1 V_N + M_s V_s = (M_1 + M_s) V_T \dots\dots\dots (3.8)$$

จากสมการที่ (3.8) สามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$M_s = M_1 \frac{(V_N - V_T)}{(V_T - V_s)} \dots\dots\dots (3.9)$$

และ

$$R_w = \frac{M_s}{M_1} = \frac{(V_N - V_T)}{(V_T - V_s)} \dots\dots\dots (3.10)$$

เรียกสมการที่ (3.10) ว่า Weight operating ratio

จากเทอม V_N^2/V_T^2 , สมการที่ (3.10) และ Head ratio (R_H) จะได้

$$R_w = \sqrt{R_H} - 1 \dots\dots\dots (3.11)$$

ในทางทฤษฎีแล้วความสามารถสูงสุดของเครื่องเติมอากาศคำนวณได้จากความสัมพัทธ์ข้างต้นที่กล่าวมา ในทางปฏิบัติพลังงานที่สูญเสียไปนั้นเกิดจาก Mixing of fluids และ Frictional losses ดังนั้นประสิทธิภาพที่แท้จริงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.11) คูณด้วยค่า Efficiency factor (\mathcal{E}) กับ $\sqrt{R_H}$ จะได้

$$R_w = \mathcal{E} \sqrt{R_H} - 1 \dots\dots\dots (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องเติมอากาศ

เครื่องเติมอากาศชนิดนี้สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง ไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่และไม่ต้องใช้สารหล่อลื่น วัสดุที่ใช้ทำเครื่องเติมอากาศมีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิดของวัสดุ

3.2.1 ชนิดของวัสดุที่ใช้ในงานบำบัดน้ำเสีย

3.2.1.1 Cast-iron

3.2.1.2 Steel

3.2.1.3 Reinforced cement concrete (RCC)

3.2.1.4 Pre-stressed concrete (PSC)

3.2.1.5 Asbestos cement (AC)

3.2.1.6 Wrought iron

3.2.1.7 Copper, brass and lead

3.2.1.8 Plastic

3.2.1.9 Glass reinforced plastic (GRP)

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ทำหัวพ่นน้ำในโครงการนี้ใช้ท่อ Polyvinylchloride (PVC) ซึ่งท่อ PVC มีข้อดีหลายด้านเหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นอุปกรณ์เติมอากาศในงานบำบัดน้ำเสีย

3.2.2 ข้อดีของ PVC ที่นำมาใช้ทำเป็นอุปกรณ์เติมอากาศ

3.2.2.1 มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน

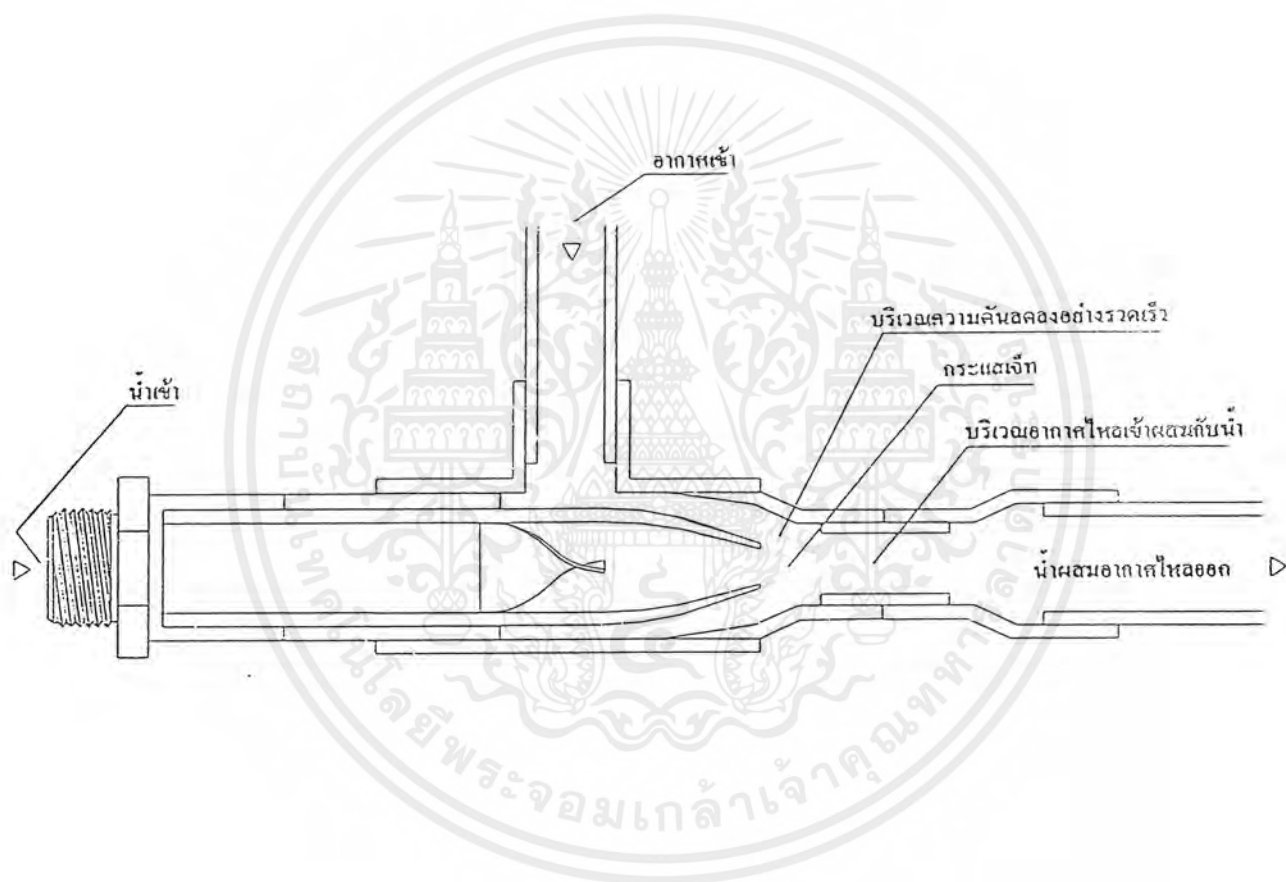
3.2.2.2 น้ำหนักเบา สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก

3.2.2.3 ราคาถูก มีหลายขนาดให้เลือก

3.2.2.4 ไม่ก่อให้เกิดสารพิษปนเปื้อนกับน้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์นี้

3.2.2.5 สามารถประกอบและเปลี่ยนแปลงตามลักษณะการใช้งานได้ง่าย [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ภาพตัดขวางของเครื่องเติมอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ

4.1 การทดลองหาประสิทธิภาพ

การวัดประสิทธิภาพของโครงการนี้เพื่อเป็นการทดสอบเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ได้ประกอบขึ้นเป็นเครื่องเติมอากาศ โดยจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดและระยะของหัวพ่นน้ำ ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศอย่างไร ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนทำการทดลองในสระน้ำ โดยในขั้นตอนแรกจะทดสอบในส่วนของเครื่องเติมอากาศ และในขั้นตอนสุดท้ายจะทดสอบปริมาณของการละลายของก๊าซออกซิเจน (Dissolved oxygen) ในน้ำด้วยวิธีทางเคมี

4.1.1 การวัดอัตราการไหลของน้ำ

อุปกรณ์

- Rotameter
- ท่อ PVC ขนาด 2 เซนติเมตร
- หน้าแปลน
- Gate valve
- นอตยวียึดหน้าแปลน 4 ตัว
- Orifice
- Manometer
- สายยาง
- เครื่องสูบน้ำ (Water Pump) ขนาด 2 แรงม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

- 1) วัดอุณหภูมิของน้ำในสระ
- 2) วัด Pressure drop ของน้ำที่ไหลผ่านท่อที่ออกจากเครื่องสูบน้ำ เพื่อนำไปหาอัตราการไหลที่แท้จริง
- 3) ติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำเข้ากับเครื่องสูบน้ำไว้ที่ขอบสระน้ำ นำ Manometer มาต่อเข้ากับเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ
- 4) สูบน้ำให้ไหลผ่านเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ แล้วปรับค่าอัตราการไหลของน้ำที่ผ่าน Rotameter โดยปรับค่าอัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 3,000 4,000 5,000 6,000 7,000 8,000 9,000 และ 10,000 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นอ่านค่า Pressure drop จาก Manometer ในแต่ละอัตราการไหลของน้ำ
- 5) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 3 อีก 2 ครั้ง เพื่อผลการทดลองที่ถูกต้องแล้วหาค่าเฉลี่ยของ Pressure drop ที่อ่านได้
- 6) เขียนกราฟระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่าเฉลี่ยของ Pressure drop ที่คำนวณได้ จากนั้นทำการ Extrapolate กราฟที่ได้เพื่อหาค่าอัตราการไหลของน้ำที่แท้จริง โดยดูจากค่า Pressure drop ที่อ่านได้จากข้อ 2

4.1.2 การทดสอบเครื่องเติมอากาศ

อุปกรณ์

- เครื่องเติมอากาศ
 - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องเท่ากับ 48 mm
 - ความยาวของเครื่องเติมอากาศเท่ากับ 90 cm
 - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อสูดอากาศเท่ากับ 38.1 mm
 - ความยาวของท่อสูดอากาศเท่ากับ 93 cm
 - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตีบเท่ากับ 35 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หัวพ่นน้ำจำนวน 3 ขนาด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่นน้ำเท่ากับ 26, 33 และ 38 mm ตามลำดับ
- เครื่องสูบน้ำ ขนาด 2 แรงม้า
- Anemometer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 66 mm
- เทอร์โมมิเตอร์

วิธีการทดลอง

1) ติดตั้งเครื่องเดิมอากาศเข้ากับเครื่องสูบน้ำไว้ที่บริเวณขอบสระน้ำ แล้วสูบน้ำให้ไหลผ่านเครื่องเดิมอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวพ่นน้ำขนาดต่าง ๆ กัน 3 ขนาด และในแต่ละขนาดของหัวพ่นน้ำให้ทำการเปลี่ยนแปลงระยะของหัวพ่นน้ำระหว่างปลายหัวฉีดและท่อตีบ โดยใช้ระยะ 0.5, 1, 1.5 และ 2 เซนติเมตร

2) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1 อีก 2 ครั้ง เพื่อผลการทดลองที่ถูกต้อง

4.1.3 การคำนวณ

- 1) หาอัตราเร็วของน้ำในท่อ อัตราเร็วของน้ำที่ออกจากหัวพ่นน้ำและอัตราเร็วที่บริเวณท่อตีบ โดยคำนวณจากอัตราการไหลที่วัดได้ในเบื้องต้น
- 2) คำนวณหา Head ในท่อจาก Bernoulli equation
- 3) คำนวณหา Power consumption ของมอเตอร์
- 4) คำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่เข้าท่อดูด

บทที่ 5

ผลการทดลอง

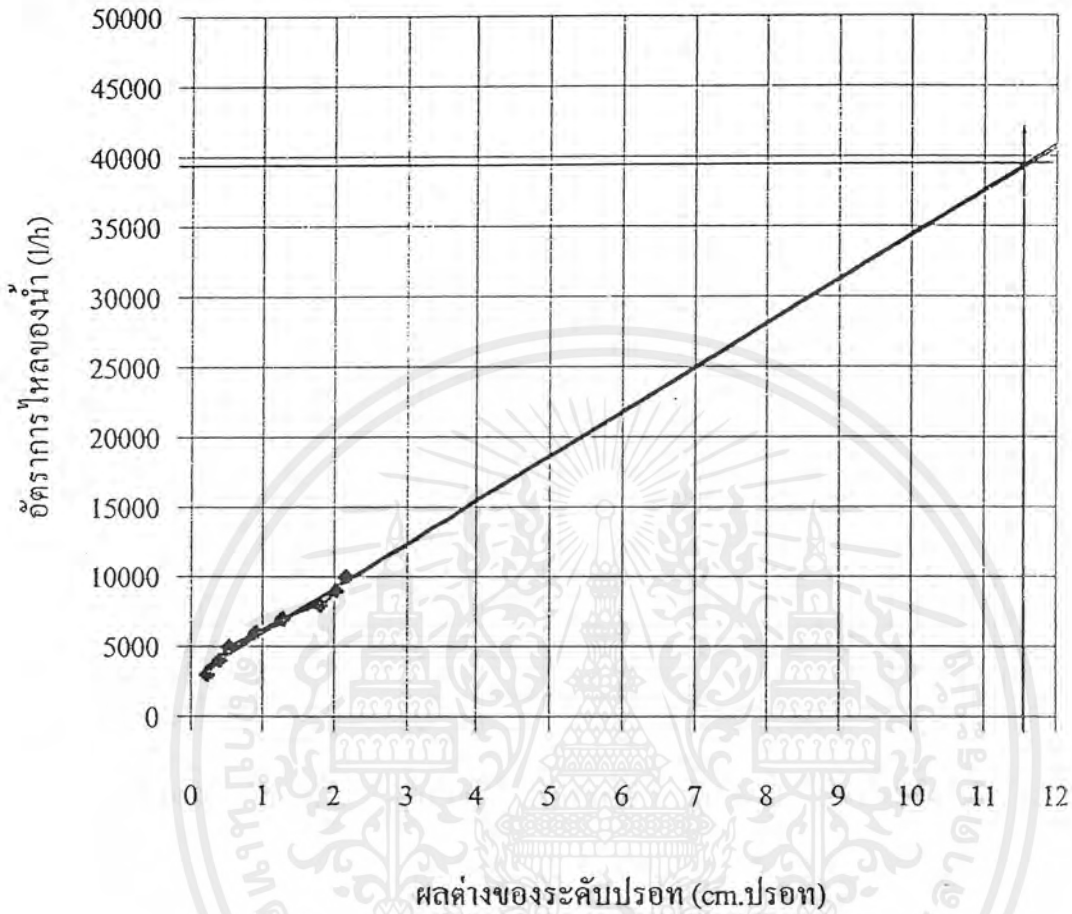
5.1 ผลการทดลองในชั้นตอนวัดอัตราการไหลของน้ำ

อุณหภูมิของน้ำในสภาวะที่ทำการทดลอง = 30°C

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและค่าความดันลด

อัตราการไหล (ลิตร/ชั่วโมง)	Pressure drop (cm ปรอท)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
3000	0.2	0.2	0.3	0.23
4000	0.4	0.4	0.4	0.40
5000	0.5	0.5	0.6	0.53
6000	0.9	0.9	0.9	0.90
7000	1.3	1.2	1.3	1.27
8000	1.8	1.8	1.8	1.80
9000	2.1	2.0	2.0	2.03
10000	2.2	2.1	2.2	2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 การสอบเทียบอัตราการไหลที่แท้จริงของน้ำ

จากการ extrapolate กราฟ จะได้ค่าอัตราการไหลของน้ำที่แท้จริง คือ

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลของน้ำที่แท้จริง} &= 39,210.48 \quad \text{l/h} \\ &= 0.011 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

5.2 ผลการทดลองในขั้นตอนการทดสอบเครื่องเติมอากาศ

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหัวพ่นน้ำและความเร็วอากาศเข้าที่ท่อคูดที่ระยะ 0.5 cm

ขนาดหัวพ่นน้ำ (mm)	ความเร็วอากาศเข้าที่ท่อคูด (m/s)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
26	8.0	7.9	7.9	7.93
33	3.3	3.3	3.4	3.33
38	0.7	0.6	0.6	0.63

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหัวพ่นน้ำและความเร็วอากาศเข้าที่ท่อคูดที่ระยะ 1.0 cm

ขนาดหัวพ่นน้ำ (mm)	ความเร็วอากาศเข้าที่ท่อคูด (m/s)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
26	8.1	8.2	8.2	8.17
33	3.2	3.2	3.2	3.20
38	0.5	0.5	0.5	0.50

ตารางที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหัวพ่นน้ำและความเร็วอากาศเข้าที่ท่อคูดที่ระยะ 1.5 cm

ขนาดหัวพ่นน้ำ (mm)	ความเร็วอากาศเข้าที่ท่อคูด (m/s)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
26	8.1	8.1	8.0	8.07
33	3.1	3.1	3.1	3.10
38	0.4	0.4	0.4	0.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดหัวพ่นน้ำและความเร็วอากาศเข้าที่ท่อดูดที่ระยะ 2.0 cm

ขนาดหัวพ่นน้ำ (mm)	ความเร็วอากาศเข้าที่ท่อดูด (m/s)			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
26	7.8	7.8	7.7	7.77
33	2.8	2.7	2.7	2.73
38	0.3	0.3	0.3	0.30

5.3 ผลที่ได้จากการคำนวณ

5.3.1 Operating head

Operating head เป็น Head บริเวณกลองผสมอากาศ (Mixing chamber) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- 1) หัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm (เล็ก) มี Operating head เท่ากับ 254.98 เมตร
- 2) หัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 mm (กลาง) มี Operating head เท่ากับ 122.39 เมตร
- 3) หัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm (ใหญ่) มี Operating head เท่ากับ 97.80 เมตร

5.3.2 Discharge head

1) Discharge head เป็น Head บริเวณท่อตีบ (Throat) มีค่าเท่ากับ 104.51 เมตร ซึ่งหัวพ่นน้ำทั้ง 3 ขนาดมีค่า Discharge head เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 Efficiency factor (\mathcal{E}) และ กำลังมอเตอร์ที่ใช้ (Power consumption)

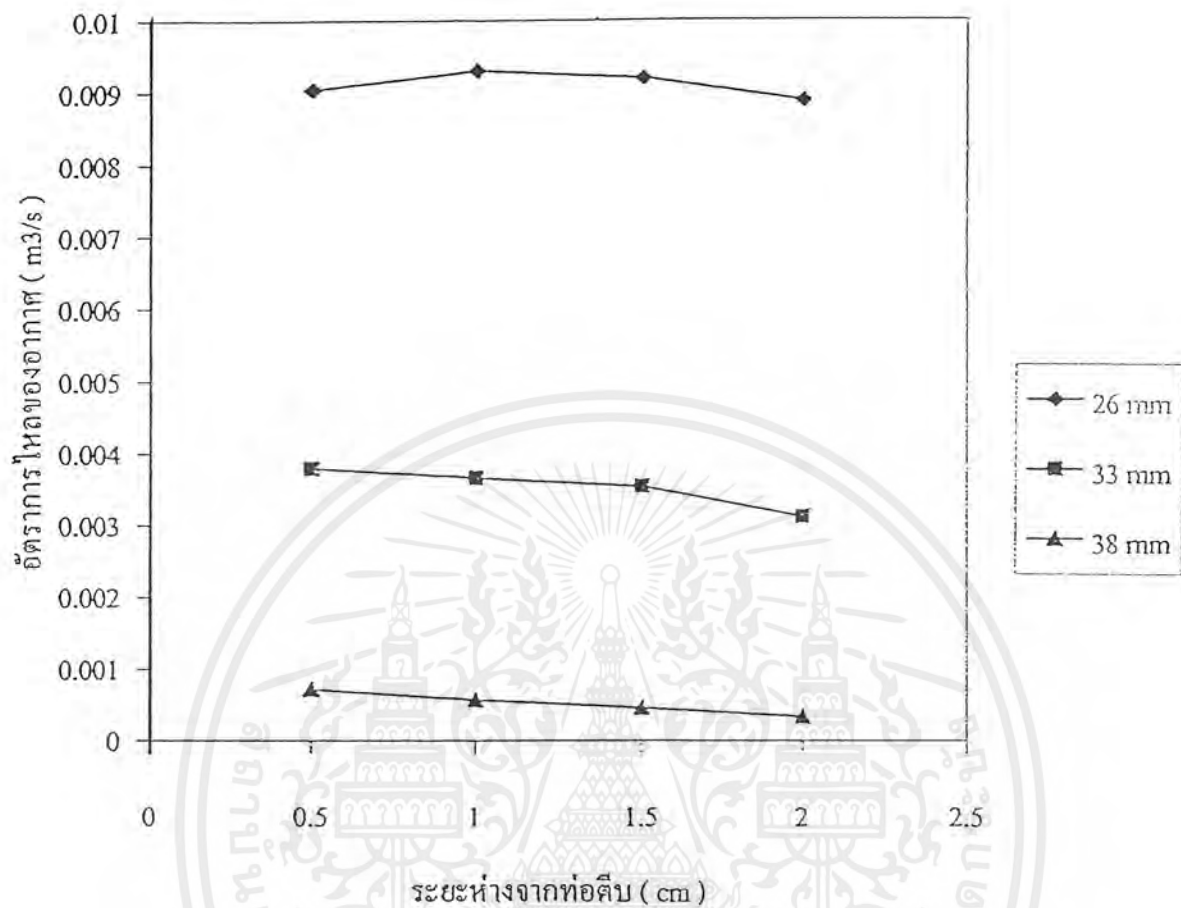
- 1) Efficiency factor (\mathcal{E}) ของเครื่องสูบน้ำเท่ากับ 0.64
- 2) กำลังมอเตอร์ที่ใช้ เท่ากับ 1.28 hp (0.95 kW)

5.3.4 อัตราการไหลของอากาศ

ตารางที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหัวพ่นน้ำ 3 ขนาดกับอัตราการไหลของอากาศที่ระยะห่าง จากท่อตีบ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 cm

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่นน้ำ (mm)	ระยะห่างจากท่อตีบ (cm)	อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)
26	0.5	0.0271
	1.0	0.0279
	1.5	0.0276
	2.0	0.0266
33	0.5	0.0113
	1.0	0.0109
	1.5	0.0106
	2.0	0.0093
38	0.5	0.0022
	1.0	0.0017
	1.5	0.0014
	2.0	0.0010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับระยะห่างระหว่างท่อน้ำของหัวพ่นน้ำ 3 ขนาด

5.3.5 อัตราการไหลของน้ำ

1) จากกราฟอัตราการไหลของน้ำกับผลต่างของระดับปรอทจะได้ค่าอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 39,210.48 l/h หรือ 0.011 m³/s

5.3.6 ความเร็วของน้ำที่หัวพ่นน้ำ (V_N)

- 1) V_N ของหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm เท่ากับ 20.75 m/s
- 2) V_N ของหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 mm เท่ากับ 12.86 m/s
- 3) V_N ของหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm เท่ากับ 10.78 m/s

5.3.7 ความเร็วของน้ำที่ท่อตีบ (V_T)

- 1) V_T ของเครื่องเติมอากาศเท่ากับ 11.43 m/s



บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

6.1.1 จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำโดยใช้ Rotameter กับผลต่างของระดับปรอท ซึ่งใช้ Manometer เป็นตัววัดที่ระดับผลต่างของปรอทและอัตราการไหลต่างๆ กันทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ออกมา จากนั้นทำการ Extrapolate กราฟออกมาจะได้อัตราการไหลของน้ำที่แท้จริงเท่ากับ $39,210.48 \text{ l/h}$ ($0.011 \text{ m}^3/\text{s}$)

6.1.2 ในการทดสอบหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของเครื่องเดิมอากาศ ซึ่งจะทราบได้จากค่าความเร็วของอากาศสูงสุดที่เข้าที่ท่อดูดอากาศโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านของหัวพ่นน้ำจำนวน 3 ขนาดคือ 26, 33 และ 38 mm และระยะระหว่างหัวพ่นน้ำกับท่อคือ 4 ระยะคือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 cm ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่นน้ำขนาด 26 mm และระยะระหว่างหัวพ่นน้ำกับท่อคือเท่ากับ 1.0 cm ทำให้ได้ค่าความเร็วของอากาศที่เข้าท่อคือเท่ากับ 8.17 m/s ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่วัดได้

6.1.3 จากผลที่ได้จากการคำนวณค่า Operating head ของหัวพ่นน้ำทั้ง 3 ขนาด จะพบว่าหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm จะมีค่า Operating head สูงสุดเท่ากับ 254.98 m ซึ่งจะเป็นผลให้อัตราการไหลของอากาศเข้าที่ท่อดูดสูงสุดเท่ากับ 27.9 l/s ($0.0279 \text{ m}^3/\text{s}$) นอกจากนี้หัวพ่นน้ำขนาดดังกล่าวยังทำให้ความเร็วของน้ำที่หัวพ่นน้ำสูงที่สุดเท่ากับ 20.75 m/s

6.1.4 จากการคำนวณจะได้ค่า Efficiency factor เท่ากับ 0.64 ซึ่งจะทำให้ได้ค่า Power consumption ของมอเตอร์เท่ากับ 1.28 hp (จากภาคผนวก ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.5 จากผลการทดลองจะทำให้ทราบถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตีบและหัวพ่นน้ำ กับความเร็วของอากาศที่เข้าท่อคูด โดยเมื่อขนาดของหัวพ่นน้ำเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตีบมากเท่าใด ยิ่งทำให้ความเร็วของอากาศที่เข้าท่อคูดมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งเมื่อสังเกตจากท่อตีบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm ที่ใช้ทดลองแล้วพบว่าหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm จะให้ความเร็วของอากาศสูงที่สุด สำหรับหัวพ่นน้ำที่เล็กกว่า 26 mm จะมีความต้านทานการไหลสูงขึ้น จึงมีแนวโน้มที่ทำให้อัตราการไหลของน้ำผ่านหัวพ่นน้ำลดลง และการสูญเสียกำลังงานเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ประสิทธิภาพลดลงตามไปด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การติดตั้งเครื่องเติมอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับระดับน้ำในสระ ควรให้มีระดับที่คงที่แน่นอน ไม่ควรให้มีการเคลื่อนที่ขณะที่ทำการทดลอง เพราะจะทำให้ค่าความเร็วของอากาศที่เข้าท่อคูดอากาศเปลี่ยนแปลง

6.2.2 การติดตั้งทวิตเตอร์ในหัวพ่นน้ำ ควรติดตั้งให้แน่นติดกับท่อ ไม่ให้มีการเคลื่อนที่และหมุนควงเมื่อน้ำไหลผ่าน

6.3 แนวทางการทำโครงการต่อไป

6.3.1 ทำการสร้างเครื่องเติมอากาศโดยการต่อขนาน (Parallel) แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับเครื่องเติมอากาศที่ไม่ได้ต่อขนาน

6.3.2 เพิ่มขนาดของเครื่องเติมอากาศให้มีขนาดใหญ่กว่าเดิม รวมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของหัวพ่นน้ำด้วย

6.3.3 ทำการวัดค่าการละลายของออกซิเจน (DO) เพื่อดูประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เพียรวิจิตร, เทคโนโลยีการกำจัดน้ำเสีย, สำนักพิมพ์โอเรียนสโตร์, 2525
2. ดร.เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, การบำบัดน้ำเสีย, มิตรนราการพิมพ์, 2539
3. รศ.ดร.ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ, การป้องกันและควบคุมมลพิษ, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541
4. ดร.เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย เล่ม 3, มิตรนราการพิมพ์, 2537
5. เสริมผล รัตสุขและไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2524
6. Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering*, 3rd edition, McGraw–Hill, 1991
7. ผศ.ดร. อุดร จารุรัตน์ และ ผศ. จารุรัตน์ วรรณสรากุล, วิศวกรรมการประปา (*Water Supply Engineering*), เรือนแก้วการพิมพ์, 2537
8. รศ. วรณศรี บุญรัตพันธ์, เทคนิคการกำจัดน้ำสกปรกจากอุตสาหกรรม, งานผลิตเอกสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2536
9. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมไทย (สวสท.) และ World Environmental Center (WEC), คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย, World Environmental Center, 2535
10. Igor J. Karassik, William C. Krutzsch, Warren H. Fjaser and Joseph P. Messina, *Pump Handbook*, 2nd edition, McGraw-Hill, 1986
11. สมศักดิ์ กิรติวุฒิเศรษฐ์, หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม, พิมพ์ที่บริษัท ส.เอเชียเพรส จำกัด, 2541
12. BSN RAJU, *Water Supply & Wastewater Engineering*, McGraw–Hill, 1995
13. W. Wesley Eckenfelder, Jr., *Industrial Water Pollution Control*, McGraw–Hill, 1994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

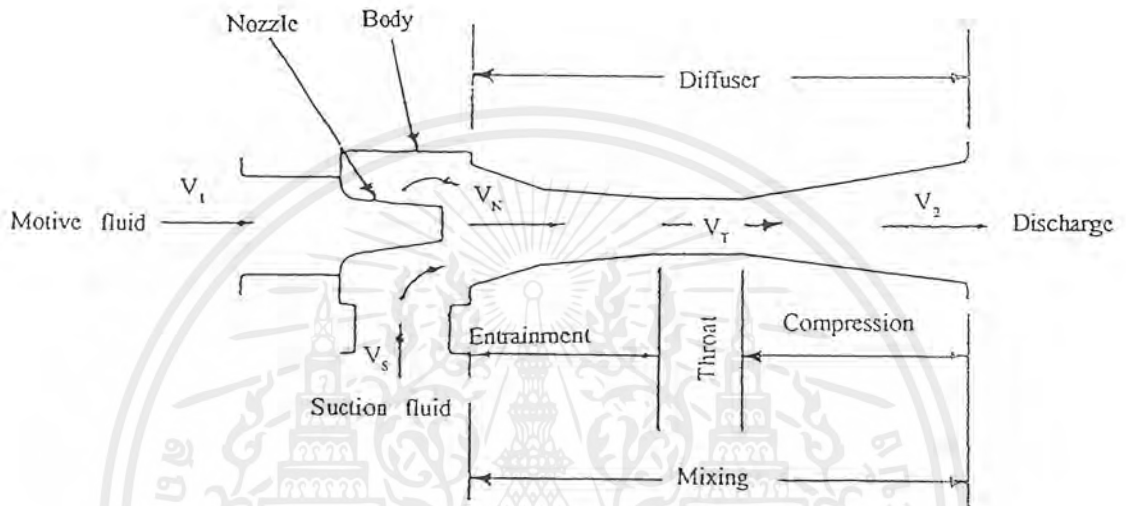


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าต่าง ๆ ของเครื่องเติมอากาศแบบดูดอากาศ

การคำนวณหาค่า Operating head และ Discharge head



รายละเอียดของเครื่องเติมอากาศ

จาก

$$Q = VA$$

จะได้

$$V = \frac{Q}{A}$$

..... (ก.1)

Operating head

ที่บริเวณกล่องผสมอากาศ (Mixing chamber) สมการเป็นดังนี้

$$\frac{P_1 - P_s}{\gamma_1} = \frac{V_N^2}{2g_c} - \frac{V_1^2}{2g_c} + h_1 \quad \text{..... (ก.2)}$$

เมื่อ

$$V_1 = \frac{Q}{A_{ทอ2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{0.011}{1.96 \times 10^{-3}}$$

$$= 5.60 \text{ m/s}$$

- คิดหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm

จากสมการ (1) จะได้

$$V_N = \frac{Q}{A_N}$$

$$A_N = \frac{\pi D_{\text{หัวพ่นน้ำ}}^2}{4}$$

$$= \frac{(26 \times 10^{-3})^2}{4}$$

$$= 5.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_N = \frac{0.011}{5.30 \times 10^{-4}}$$

$$= 20.75 \text{ m/s}$$

$$h_1 = \left(4f \frac{L}{D_{\text{ท่อ 2\"}}} + \sum K_f \right) \frac{V^2}{2g_c}$$

$$\text{Elbow } 90^\circ \text{ 3 ตัว } (\sum K_f) = 0.9 \times 3$$

$$= 2.7$$

$$N_{Re} = \frac{\rho_{\text{น้ำ}}^* D_{\text{ท่อ 2\"}} V_1}{\mu_{\text{น้ำ}}^*}$$

$$D_{\text{ท่อ 2\"}} = 5.08 \times 10^{-2} \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = 3.02 \text{ m}$$

น้ำที่ 30°C จาก Appendix มีคุณสมบัติดังนี้

$$\rho_{\text{น้ำ}} = 993.76 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{\text{น้ำ}} = 0.803 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$$

$$\begin{aligned} N_{Re} &= \frac{(993.76)(5.08 \times 10^{-2})(5.60)}{0.803 \times 10^{-3}} \\ &= 3.5 \times 10^5 \end{aligned}$$

จาก Friction factor chart จะได้ $f = 0.0035$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad h_f &= \left(\frac{4(0.0035)(3.02)}{5.08 \times 10^{-2}} + 2.70 \right) \frac{(5.60)^2}{2} \\ &= 55.38 \text{ m} \end{aligned}$$

จากสมการ (ก.2) แทนค่าต่างๆ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{P_1 - P_2}{\gamma_1} &= \frac{20.75^2}{2} - \frac{5.60^2}{2} + 55.38 \\ &= 254.98 \text{ m} \end{aligned}$$

∴ Operating head ของหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm เท่ากับ 254.98 m

- คิดหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 mm

$$\begin{aligned} A_N &= \frac{\pi (33 \times 10^{-3})^2}{4} \\ &= 8.55 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 V_N &= \frac{0.011}{8.55 \times 10^{-4}} \\
 &= 12.86 \quad \text{m/s}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
 \frac{P_1 - P_S}{\gamma_1} &= \frac{12.86^2}{2} - \frac{5.60^2}{2} + 55.38 \\
 &= 122.39 \quad \text{m}
 \end{aligned}$$

∴ Operating head ของหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 mm เท่ากับ 122.39 m

- คิดหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm

$$\begin{aligned}
 A_N &= \frac{\pi(38 \times 10^{-3})^2}{4} \\
 &= 1.02 \times 10^{-3} \quad \text{m}^2 \\
 V_N &= \frac{0.011}{1.02 \times 10^{-3}} \\
 &= 10.78 \quad \text{m/s}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
 \frac{P_1 - P_S}{\gamma_1} &= \frac{10.78^2}{2} - \frac{5.60^2}{2} + 55.38 \\
 &= 97.80 \quad \text{m}
 \end{aligned}$$

∴ Operating head ของหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm เท่ากับ 97.80 m

Discharge head

ที่บริเวณท่อตีบ (Throat) สมการเป็นดังนี้

$$\frac{P_2 - P_S}{\gamma_2} = \frac{V_T^2}{2g_c} - \frac{V_2^2}{2g_c} + h_2 \quad \dots\dots\dots (ก.3)$$

$$V_T A_T = V_2 A_{\text{ท่อ 2"}}$$

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{V_T A_T}{A_{\text{ท่อ 2"}}} \\ &= \frac{11.43 \times 35 \times 10^{-3}}{50.8 \times 10^{-3}} \\ &= 8.001 \quad \text{m/s} \end{aligned}$$

จากสมการ (ก.1) จะได้

$$\begin{aligned} V_T &= \frac{Q}{A_T} \\ A_T &= \frac{\pi D_{\text{ท่อตีบ}}^2}{4} \\ &= \frac{\pi (35 \times 10^{-3})^2}{4} \\ &= 9.62 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_T &= \frac{0.011}{9.62 \times 10^{-4}} \\ &= 11.43 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$h_2 = \left(4f \frac{L}{D_{\text{ท่อตีบ}}} + K_e + K_c \right) \frac{V_T^2}{2g_c}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{Re} = \frac{\rho_{\text{น้ำ}} D_{\text{ท่อ2}} V_T}{\mu_{\text{น้ำ}}}$$

$$D_{\text{ท่อ2}} = 5.08 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$L = 12 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\begin{aligned} N_{Re} &= \frac{(93.76)(35 \times 10^{-3})(11.43)}{0.803 \times 10^{-3}} \\ &= 4.95 \times 10^5 \end{aligned}$$

จาก Friction factor chart จะได้ $f = 0.0051$

$$\begin{aligned} K_c &= 0.4 \left(1.25 - \frac{A_2}{A_1} \right) \\ &= 0.4 \left(1.25 - \frac{(35 \times 10^{-3})^2}{(75 \times 10^{-3})^2} \right) \\ &= 0.41 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_c &= \left(1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \\ &= \left(1 - \frac{(35 \times 10^{-3})}{(75 \times 10^{-3})} \right)^2 \\ &= 0.61 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } h_2 = \left(\frac{4(0.0035)(12 \times 10^{-2})}{35 \times 10^{-3}} + 0.61 + 0.41 \right) \frac{(11.43)^2}{2}$$

$$= 71.20 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (ก.3) แทนค่าต่าง ๆ จะได้

$$\begin{aligned}\frac{P_2 - P_S}{\gamma_2} &= \frac{11.43^2}{2} - \frac{8.001^2}{2} + 71.20 \\ &= 104.51 \quad \text{m}\end{aligned}$$

∴ Discharge head บริเวณท่อตีบ เท่ากับ 104.51 m

Head ratio (R_H) สูงสุด

คือ อัตราส่วนของ Operating head / discharge head ของหัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm จะได้

$$\begin{aligned}R_H &= \frac{(P_1 - P_S)/\gamma_1}{(P_2 - P_S)/\gamma_2} \\ &= 2.44\end{aligned}$$

Weight operating ratio (R_w)

$$\begin{aligned}R_w &= \frac{M_S}{M_I} \\ &= \frac{\rho_{\text{air}} Q_S}{\rho_{\text{น้ำ}} Q_I} \dots\dots\dots (ก.4)\end{aligned}$$

อากาศที่ 38°C มี $\rho_{\text{air}} = 1.136 \text{ kg/m}^3$

$$Q_S = V_S A_S$$

$$A_S = \pi D_{\text{ท่อสูดอากาศ}}^2 / 4$$

$$= \pi (66 \times 10^{-3})^2 / 4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

คิดที่ความเร็วของอากาศที่เข้าท่อสูงสุด

$$\begin{aligned} Q_s &= (8.17)(3.42 \times 10^{-3}) \\ &= 0.028 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_i &= Q \\ &= 0.011 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

แทนค่าใน (ก.4) จะได้

$$\begin{aligned} R_w &= \frac{(0.028)(1.136)}{(0.011)(993.76)} \\ &= 0.0029 \end{aligned}$$

จาก R_w และ R_H สามารถนำไปหา Efficiency factor (\mathcal{E}) ของมอเตอร์ได้

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \frac{(R_w + 1)}{\sqrt{R_H}} \\ &= \frac{(0.0029 + 1)}{\sqrt{2.44}} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{Efficiency factor } (\mathcal{E}) = 0.64$$

กำลังของมอเตอร์ที่ใช้ (Power consumption)

$$\begin{aligned} \text{Power consumption} &= \mathcal{E} \times \text{Power of pump} \\ &= (0.64)(2) \\ &= 1.28 \text{ hp หรือ } 0.95 \text{ kW} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของอากาศ (Q_{air})

$$Q_{air} = V_{air} A_{ที่ออกอากาศ}$$

- หัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 mm

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อตีบ 0.5 cm} \quad Q_{air} &= (7.93)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0271 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อตีบ 1.0 cm} \quad Q_{air} &= (8.17)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0279 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อตีบ 1.5 cm} \quad Q_{air} &= (8.07)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0276 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อตีบ 2.0 cm} \quad Q_{air} &= (7.77)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0266 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

- หัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 mm

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อตีบ 0.5 cm} \quad Q_{air} &= (3.33)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0113 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อตีบ 1.0 cm} \quad Q_{air} &= (3.20)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0109 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อตีบ 1.5 cm} \quad Q_{air} &= (3.10)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0106 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อตีบ 2.0 cm} \quad Q_{air} &= (2.73)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0093 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หัวพ่นน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 mm

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อคืบ 0.5 cm} \quad Q_{\text{air}} &= (0.63)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0026 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อคืบ 1.0 cm} \quad Q_{\text{air}} &= (0.50)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0017 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อคืบ 1.5 cm} \quad Q_{\text{air}} &= (0.4)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0014 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ระยะห่างจากท่อคืบ 2.0 cm} \quad Q_{\text{air}} &= (0.30)(\pi(66 \times 10^{-3})^2)/4 \\ &= 0.0010 \quad \text{m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงค่าการละลายของออกซิเจนในน้ำ

Table I Dissolved-oxygen concentration in water as a function of temperature and salinity

(Barometric pressure = 760 mm Hg)^a [6]

Temp, °C	Dissolved-oxygen concentration, mg/L									
	Salinity, parts per thousand									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0	14.60	14.11	13.64	13.18	12.74	12.31	11.90	11.50	11.11	10.74
1	14.20	13.73	13.27	12.83	12.40	11.98	11.58	11.20	10.83	10.46
2	13.81	13.36	12.91	12.49	12.07	11.67	11.29	10.91	10.55	10.20
3	13.45	13.00	12.58	12.16	11.76	11.38	11.00	10.64	10.29	9.95
4	13.09	12.67	12.25	11.85	11.47	11.09	10.73	10.38	10.04	9.71
5	12.76	12.34	11.94	11.56	11.18	10.82	10.47	10.13	9.80	9.48
6	12.44	12.04	11.65	11.27	10.91	10.56	10.22	9.89	9.57	9.27
7	12.13	11.74	11.37	11.00	10.65	10.31	9.98	9.66	9.35	9.06
8	11.83	11.46	11.09	10.74	10.40	10.07	9.75	9.44	9.14	8.85
9	11.55	11.19	10.83	10.49	10.16	9.84	9.53	9.23	8.94	8.66
10	11.28	10.92	10.58	10.25	9.93	9.62	9.32	9.03	8.75	8.47
11	11.02	10.67	10.34	10.02	9.71	9.41	9.12	8.83	8.56	8.30
12	10.77	10.43	10.11	9.80	9.50	9.21	8.92	8.65	8.38	8.12
13	10.53	10.20	9.89	9.59	9.30	9.01	8.74	8.47	8.21	7.96
14	10.29	9.98	9.68	9.38	9.10	8.82	8.55	8.30	8.04	7.80
15	10.07	9.77	9.47	9.19	8.91	8.64	8.38	8.13	7.88	7.65
16	9.86	9.56	9.28	9.00	8.73	8.47	8.21	7.97	7.73	7.50
17	9.65	9.36	9.09	8.82	8.55	8.30	8.05	7.81	7.58	7.36
18	9.45	9.17	8.90	8.64	8.39	8.14	7.90	7.66	7.44	7.22
19	9.26	8.99	8.73	8.47	8.22	7.98	7.75	7.52	7.30	7.09
20	9.08	8.81	8.56	8.31	8.07	7.83	7.60	7.38	7.17	6.96
21	8.90	8.64	8.39	8.15	7.91	7.69	7.46	7.25	7.04	6.84
22	8.73	8.48	8.23	8.00	7.77	7.54	7.33	7.12	6.91	6.72
23	8.56	8.32	8.08	7.85	7.63	7.41	7.20	6.99	6.79	6.60
24	8.40	8.16	7.93	7.71	7.49	7.28	7.07	6.87	6.68	6.49
25	8.24	8.01	7.79	7.57	7.36	7.15	6.95	6.75	6.56	6.38
26	8.09	7.87	7.65	7.44	7.23	7.03	6.83	6.64	6.46	6.28
27	7.95	7.73	7.51	7.31	7.10	6.91	6.72	6.53	6.35	6.17
28	7.81	7.59	7.38	7.18	6.98	6.79	6.61	6.42	6.25	6.08
29	7.67	7.46	7.26	7.06	6.87	6.68	6.50	6.32	6.15	5.98
30	7.54	7.33	7.14	6.94	6.75	6.57	6.39	6.22	6.05	5.89
31	7.41	7.21	7.02	6.83	6.65	6.47	6.29	6.12	5.96	5.80
32	7.29	7.09	6.90	6.72	6.54	6.36	6.19	6.03	5.87	5.71
33	7.17	6.98	6.79	6.61	6.44	6.26	6.10	5.94	5.78	5.63
34	7.05	6.86	6.68	6.51	6.33	6.17	6.01	5.85	5.69	5.54
35	6.93	6.75	6.58	6.40	6.24	6.07	5.92	5.76	5.61	5.46
36	6.82	6.65	6.47	6.31	6.14	5.98	5.83	5.68	5.53	5.39
37	6.72	6.54	6.37	6.21	6.05	5.89	5.74	5.59	5.45	5.31
38	6.61	6.44	6.28	6.12	5.96	5.81	5.66	5.51	5.37	5.24
39	6.51	6.34	6.18	6.03	5.87	5.72	5.58	5.44	5.30	5.16
40	6.41	6.25	6.09	5.94	5.79	5.64	5.50	5.36	5.22	5.09

^a From Cott, J.: "Computation of Dissolved Gas Concentrations in Water as Functions of Temperature, Salinity, and Pressure," *American Fisheries Society Special Publication 14*, Bethesda, MD, 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table II Dissolved-oxygen concentration in water as a function of temperature and barometric pressure (Salinity = 0 ppt)^a [6]

Temp. °C	Dissolved-oxygen concentration, mg/L									
	Barometric pressure, millimeters of mercury									
	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780
0	14.12	14.22	14.31	14.41	14.51	14.60	14.70	14.80	14.89	14.99
1	13.73	13.82	13.92	14.01	14.10	14.20	14.29	14.39	14.48	14.57
2	13.36	13.45	13.54	13.63	13.72	13.81	13.90	14.00	14.09	14.18
3	13.00	13.09	13.18	13.27	13.36	13.45	13.53	13.62	13.71	13.80
4	12.66	12.75	12.83	12.92	13.01	13.09	13.18	13.27	13.35	13.44
5	12.33	12.42	12.50	12.59	12.67	12.76	12.84	12.93	13.01	13.10
6	12.02	12.11	12.19	12.27	12.35	12.44	12.52	12.60	12.68	12.77
7	11.72	11.80	11.89	11.97	12.05	12.13	12.21	12.29	12.37	12.45
8	11.44	11.52	11.60	11.67	11.75	11.83	11.91	11.99	12.07	12.15
9	11.16	11.24	11.32	11.40	11.47	11.55	11.63	11.70	11.78	11.86
10	10.90	10.98	11.05	11.13	11.20	11.28	11.35	11.43	11.50	11.58
11	10.65	10.72	10.80	10.87	10.94	11.02	11.09	11.16	11.24	11.31
12	10.41	10.48	10.55	10.62	10.69	10.77	10.84	10.91	10.98	11.05
13	10.17	10.24	10.31	10.38	10.46	10.53	10.60	10.67	10.74	10.81
14	9.95	10.02	10.09	10.16	10.23	10.29	10.36	10.43	10.50	10.57
15	9.73	9.80	9.87	9.94	10.00	10.07	10.14	10.21	10.27	10.34
16	9.53	9.59	9.66	9.73	9.79	9.86	9.92	9.99	10.06	10.12
17	9.33	9.39	9.46	9.52	9.59	9.65	9.72	9.78	9.85	9.91
18	9.14	9.20	9.26	9.33	9.39	9.45	9.52	9.58	9.64	9.71
19	8.95	9.01	9.07	9.14	9.20	9.26	9.32	9.39	9.45	9.51
20	8.77	8.83	8.89	8.95	9.02	9.08	9.14	9.20	9.26	9.32
21	8.60	8.66	8.72	8.78	8.84	8.90	8.95	9.02	9.08	9.14
22	8.43	8.49	8.55	8.61	8.67	8.73	8.79	8.84	8.90	8.96
23	8.27	8.33	8.39	8.44	8.50	8.56	8.62	8.68	8.73	8.79
24	8.11	8.17	8.23	8.29	8.34	8.40	8.46	8.51	8.57	8.63
25	7.96	8.02	8.08	8.13	8.19	8.24	8.30	8.36	8.41	8.47
26	7.82	7.87	7.93	7.98	8.04	8.09	8.15	8.20	8.26	8.31
27	7.68	7.73	7.79	7.84	7.89	7.95	8.00	8.06	8.11	8.17
28	7.54	7.59	7.65	7.70	7.75	7.81	7.86	7.91	7.97	8.02
29	7.41	7.46	7.51	7.57	7.62	7.67	7.72	7.78	7.83	7.88
30	7.28	7.33	7.38	7.44	7.49	7.54	7.59	7.64	7.69	7.75
31	7.16	7.21	7.26	7.31	7.36	7.41	7.46	7.51	7.56	7.62
32	7.04	7.09	7.14	7.19	7.24	7.29	7.34	7.39	7.44	7.49
33	6.92	6.97	7.02	7.07	7.12	7.17	7.22	7.27	7.31	7.36
34	6.80	6.85	6.90	6.95	7.00	7.05	7.10	7.15	7.20	7.24
35	6.69	6.74	6.79	6.84	6.89	6.93	6.98	7.03	7.08	7.13
36	6.59	6.63	6.68	6.73	6.78	6.82	6.87	6.92	6.97	7.01
37	6.48	6.53	6.57	6.62	6.67	6.72	6.76	6.81	6.86	6.90
38	6.38	6.43	6.47	6.52	6.56	6.61	6.66	6.70	6.75	6.80
39	6.28	6.33	6.37	6.42	6.46	6.51	6.55	6.60	6.65	6.69
40	6.18	6.23	6.27	6.32	6.36	6.41	6.46	6.50	6.55	6.59

^a From Colt, J.: "Computation of Dissolved Gas Concentrations in Water as Functions of Temperature, Salinity, and Pressure," *American Fisheries Society Special Publication 14*, Bethesda, MD, 1984.

Note: ppt = parts per thousand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table III Solubility of oxygen (mg/l) at various temperatures, elevations, and total dissolved solid levels [13]

Temperature		Elevation, ft							TDS (at sea level), ppm			
°F	°C	0	1000	2000	3000	4000	5000	6000	400	800	1500	2500
32.0	0	14.6	14.1	13.6	13.1	12.6	12.1	11.7	—	—	—	—
35.6	2	13.8	13.3	12.8	12.4	11.9	11.5	11.1	13.74	13.68	13.58	13.42
39.2	4	13.1	12.6	12.2	11.8	11.4	10.9	10.5	13.04	12.98	12.89	12.75
42.8	6	12.5	12.0	11.6	11.2	10.8	10.4	10.0	12.44	12.38	12.29	12.15
46.4	8	11.9	11.4	11.0	10.6	10.2	9.9	9.5	11.85	11.80	11.70	11.58
50.0	10	11.3	10.9	10.5	10.1	9.8	9.4	9.1	11.25	11.20	11.12	11.00
53.6	12	10.8	10.4	10.1	9.7	9.4	9.0	8.6	10.76	10.71	10.64	10.52
57.2	14	10.4	10.0	9.6	9.3	8.9	8.6	8.3	10.36	10.32	10.25	10.15
60.8	16	10.0	9.6	9.2	8.9	8.6	8.3	8.0	9.96	9.92	9.85	9.75
64.4	18	9.5	9.2	8.9	8.5	8.2	7.9	7.6	9.46	9.43	9.36	9.27
68.0	20	9.2	8.8	8.5	8.2	7.9	7.6	7.3	9.16	9.13	9.06	8.97
71.6	22	8.8	8.5	8.2	7.9	7.6	7.3	7.1	8.77	8.73	8.68	8.60
75.2	24	8.5	8.2	7.9	7.6	7.3	7.1	6.8	8.47	8.43	8.38	8.30
78.8	26	8.2	7.9	7.6	7.3	7.1	6.8	6.6	8.17	8.13	8.08	8.00
82.4	28	7.9	7.6	7.4	7.1	6.8	6.6	6.3	7.87	7.83	7.78	7.70
86.0	30	7.6	7.4	7.1	6.9	6.6	6.4	6.1	7.57	7.53	7.48	7.40
89.6	32	7.4	7.1	6.9	6.6	6.4	6.2	5.9	7.4	—	—	—
93.2	34	7.2	6.9	6.7	6.4	6.2	6.0	5.8	7.2	—	—	—
96.8	36	7.0	6.7	6.5	6.3	6.0	5.8	5.6	7.0	—	—	—
100.4	38	6.8	6.6	6.3	6.1	5.9	5.6	5.4	6.8	—	—	—
104.0	40	6.6	6.4	6.1	5.9	5.7	5.5	5.3	6.6	—	—	—

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table IV Saturated dissolved-oxygen concentration in water at 1 atm (101.325 kPa) [5]

Temperature in °C	Chloride Concentration in Water—mg/l					Difference per 100 mg Chloride
	0	5 000	10 000	15 000	20 000	
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	7.7	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					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้