

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเติมอากาศ (Aeration process)

กระบวนการเติมอากาศ คือ กระบวนการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลวเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายในของเหลวหรือน้ำให้สูงขึ้น เพื่อใช้ในการหายใจของสัตว์น้ำหรือใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำได้เป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's law)

กฎของเฮนรี (Henry's law) อธิบายปริมาณก๊าซที่สามารถละลายน้ำได้ ณ สภาวะสมดุล ซึ่งเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการละลายในน้ำได้น้อยโดยไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำ มีความสัมพันธ์กับความดันของก๊าซในก๊าซผสม หรือปริมาณก๊าซนั้นในบรรยากาศเหนือผิวน้ำ (Partial pressure) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$C = K_h \cdot P \quad (2.1)$$

- เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายน้ำ (โมล/ลิตร)
K_h คือ ค่าคงที่ของ Henry (โมล/ลิตร-บรรยากาศ)
P คือ ความดันย่อยของก๊าซในก๊าซผสม (Partial pressure : บรรยากาศ)

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงปริมาณก๊าซต่างๆในบรรยากาศ

ก๊าซ	สูตรเคมี	ร้อยละโดยปริมาตร	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไนโตรเจน	N ₂	78.03	75.47
ออกซิเจน	O ₂	20.99	23.18
อาร์กอน	Ar	0.94	1.30
คาร์บอนไดออกไซด์	CO ₂	0.03	0.05
อื่นๆ	-	0.01	-

หมายเหตุ : ก๊าซอื่นๆคือก๊าซที่มีปริมาณน้อยในบรรยากาศ ได้แก่ ไฮโดรเจน นีออน ฮีเลียม คริปทอน และซีนอน เป็นต้น

ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2004

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศต่างๆ

อุณหภูมิ	ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุล (มก./ลิตร)									
	ความดันบรรยากาศ (มม.ปรอท)									
°C.	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
5	12.33	12.42	12.50	12.59	12.67	12.76	12.84	12.93	13.01	13.10
10	10.90	10.98	11.05	11.13	11.20	11.28	11.35	11.43	11.50	11.58
15	9.73	9.80	9.87	9.94	10.00	10.07	10.14	10.21	10.27	10.34
20	8.77	8.83	8.89	8.95	9.02	9.08	9.14	9.20	9.26	9.32
25	7.96	8.02	8.08	8.13	8.19	8.24	8.30	8.36	8.41	8.47
30	7.28	7.33	7.38	7.44	7.49	7.54	7.59	7.64	7.69	7.75
35	6.69	6.74	6.79	6.84	6.89	6.93	6.98	7.03	7.08	7.13
40	6.18	6.23	6.27	6.32	6.36	6.41	6.46	6.50	6.55	6.59

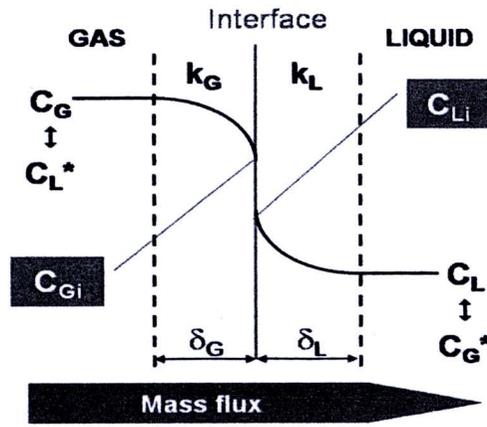
ที่มา : Metcalf และ Eddy, 2004

จากตารางที่ 2.1 พบว่าปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศมีประมาณร้อยละ 20.99 โดยปริมาตรและมีค่าคงที่ของเฮนรีเท่ากับ 1.27×10^{-3} โมล/ลิตร-บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Benjamin, 2002) เมื่อนำค่าดังกล่าวไปคำนวณตามสมการที่ 2.1 จะได้ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุลที่สอดคล้องกับค่าในตารางที่ 2.2 คือ 9.08 มก./ลิตร เมื่อมีค่าความเค็ม (Salinity) ในน้ำเท่ากับ 0 พีพีที (Part per thousand, ppt.) แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อย อย่างไรก็ตามการคำนวณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่สภาวะสมดุลตามกฎของเฮนรีเพียงอย่างเดียวไม่สามารถประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเติมอากาศ หรืออุปกรณ์เติมอากาศได้ จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการถ่ายเทออกซิเจนด้วยซึ่งอธิบายถึงอัตราเร็วของการละลายของออกซิเจนจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล

2.2 ทฤษฎี "Two film theory"

คือ ทฤษฎีที่อธิบายถึงการถ่ายเทสารระหว่างสถานะก๊าซและของเหลว โดยการซึมผ่านชั้นกลางระหว่างก๊าซกับของเหลวซึ่งชั้นกลางถูกพิจารณาออกเป็นสองชั้น คือ ชั้นกลางของก๊าซ และชั้นกลางของของเหลว ปัจจัยที่ผลต่อการละลายหรือซึมผ่านชั้นกลาง ได้แก่

- ความสามารถในการละลายของสาร
- ความดันย่อยของก๊าซในก๊าซผสม
- ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ
- ปริมาณสารเจือปน (Impurities) ในของเหลว เช่น ค่าความเค็ม และของแข็งแขวนลอย เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทมวลสารตามทฤษฎี "Two film theory"

ที่มา : Spartan Environmental Technologies : Air and Water Treatment (ออนไลน์), 2004

จากรูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายเทสารจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว โดยมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารในก๊าซและของเหลวเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ทำให้สารในสถานะก๊าซซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าซึมผ่านชั้นกลางทั้งสองชั้นละลายสู่สถานะของเหลวซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า หลังจากนั้นจึงแพร่กระจายจากบริเวณใกล้ชั้นกลางของเหลวไปสู่บริเวณอื่นๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารทั้งในสถานะก๊าซและของเหลวอยู่ในสภาวะสมดุล ในกระบวนการเติมอากาศซึ่งนิยมเป่าอากาศได้น้ำสามารถใช้ทฤษฎี "Two film theory" อธิบายการละลายของออกซิเจนจากอากาศสู่น้ำได้เช่นกัน

2.3 การถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer)

การถ่ายเทออกซิเจน คือ กระบวนการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว ซึ่งกล่าวถึงอัตราเร็วของการเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในสถานะของเหลวเข้าใกล้สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ และความดันบรรยากาศขณะนั้น โดยสามารถประเมินอัตราการถ่ายเทออกซิเจนได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (Volumetric mass transfer coefficient, $k_L a$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) \quad (2.2)$$

เมื่อ $\frac{dC}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจน หน่วย มก./ลิตร-วินาที

k_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (The liquid-side mass transfer coefficient) หน่วย ม./วินาที

- a คือ พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว หน่วย ตร.ม./ลบ.ม.
- C_s คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุล หน่วย มก./ลิตร
- C คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เวลาใดๆ หน่วย มก./ลิตร
- 2.3.1 ขั้นตอนของการถ่ายเทออกซิเจนจากสถานะก๊าซไปสู่สถานะของเหลว หรือการเติมอากาศ
- 1.) การทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องจักรสร้างความปั่นป่วนบริเวณผิวน้ำทำให้เกิดละอองน้ำกระจายในอากาศ หรือการปล่อยอากาศได้นำ ซึ่งขนาดละอองน้ำที่เกิดขึ้นหรือฟองอากาศที่ถูกปล่อยได้นำที่มีขนาดเล็ก จึงเกิดพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำได้มาก ทำให้เกิดการเติมอากาศที่มีประสิทธิภาพ
 - 2.) เมื่ออากาศสัมผัสกับน้ำออกซิเจนในอากาศซึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าออกซิเจนละลายในน้ำ จึงเกิดแรงขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนในอากาศเคลื่อนผ่านชั้นกลางระหว่างอากาศกับน้ำตามทฤษฎี "Two film theory" กลายเป็นออกซิเจนละลายในน้ำ
 - 3.) ออกซิเจนที่ละลายในน้ำบริเวณพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำจะมีความเข้มข้นมากกว่าบริเวณอื่นๆในน้ำ จึงเกิดการแพร่จากบริเวณพื้นที่สัมผัสไปสู่บริเวณอื่นๆของน้ำ จนกระทั่งมีความเข้มข้นของออกซิเจนละลายสม่ำเสมอทุกบริเวณในน้ำและมีความเข้มข้นถึงจุดอิ่มตัว
- 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเติมอากาศ
- 1.) ความเข้มข้นของออกซิเจนในก๊าซ และในของเหลว ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศกับน้ำส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ ในทางปฏิบัติสามารถเลือกใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในกระบวนการเติมอากาศ เพื่อเพิ่มความแตกต่างของความเข้มข้น และขับเคลื่อนทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำได้ดีขึ้น
 - 2.) ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศโดยทั่วไปสามารถทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนต่อออกซิเจนและปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ตามกฎของเฮนรีการเพิ่มความดันทำให้ออกซิเจนละลายน้ำมากขึ้นได้ ส่วนอุณหภูมิมิมีผลต่อความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำ และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นอิ่มตัวของออกซิเจนละลายในน้ำต่ำลง แต่มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้น ในทางปฏิบัติจึงควรควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้เหมาะสม และสามารถเพิ่มความดันเพื่อให้ออกซิเจนละลายน้ำมากขึ้นได้
 - 3.) ขนาดฟองอากาศ กรณีการเติมอากาศโดยปล่อยอากาศได้นำ ขนาดฟองอากาศมีผลต่อพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ฟองอากาศขนาดเล็กมีพื้นที่สัมผัสมากทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี ในทางปฏิบัติจึงควรเลือกอุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก และควบคุมปริมาณการเติมอากาศให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการรวมตัวของฟองอากาศขณะลอยขึ้นสู่อากาศซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศลดลง
 - 4.) ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ ส่งผลต่อจำนวนฟองอากาศและพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศมากทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี ในกระบวนการเติมอากาศจึงควรควบคุมความถี่การเกิดฟองอากาศให้เหมาะสม ความถี่

ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำมาก จนทำให้เกิดการรวมตัวของฟองอากาศ และควรเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศกระจายอย่างสม่ำเสมอ

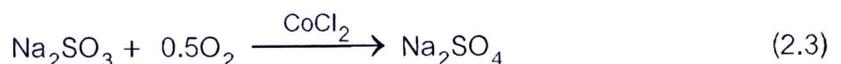
- 5.) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และระยะเวลาสัมผัสระหว่างก๊าซกับของเหลว กรณีการเติมอากาศโดยปล่อยอากาศได้น้ำ ฟองอากาศที่ถูกปล่อยได้น้ำจะลอยขึ้นสู่น้ำด้วยความเร็วลอยตัวค่าหนึ่งซึ่งสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความเร็วลอยตัวน้อยกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ตามกฎของสโตกส์ (Stoke's law) ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศที่น้อยทำให้เกิดระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำที่นาน ในกระบวนการเติมอากาศจึงควรเลือกอุปกรณ์เติมอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก และออกแบบถังเติมอากาศให้มีความลึกที่เหมาะสมเพื่อให้มีความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแก่การเติมอากาศ การสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำในระดับที่เหมาะสมโดยการกวนน้ำเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยยืดระยะเวลาสัมผัสได้
- 6.) ความปั่นป่วนของน้ำ ตามทฤษฎี "Two film theory" ออกซิเจนในอากาศจะเคลื่อนผ่านชั้นกลางของอากาศ และชั้นกลางของน้ำ ซึ่งชั้นกลางของน้ำเป็นอุปสรรคหลักที่ออกซิเจนต้องใช้เวลานานในการเคลื่อนผ่าน การสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำในระดับที่เหมาะสมทำให้เกิดแรงเฉือนที่ชั้นกลางของน้ำ ส่งผลให้ชั้นกลางของน้ำบางลงออกซิเจนจึงสามารถเคลื่อนผ่านได้ง่ายขึ้น ดังนั้นการกวนน้ำขณะเติมอากาศเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนในระดับที่เหมาะสมจะช่วยให้มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงขึ้น

2.4 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

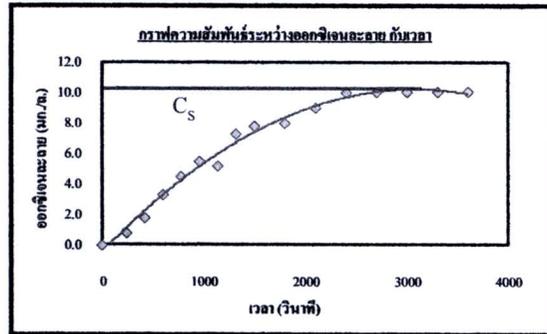
การประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศสามารถประเมินได้จากปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทสู่น้ำต่อปริมาณอากาศที่ถูกเติมเข้าสู่ระบบภายใต้สภาวะเดียวกัน เช่น อุณหภูมิ สารเจือปนในน้ำ ความลึกของจุดเติมอากาศ (กรณีเติมอากาศโดยปล่อยอากาศได้น้ำ) เป็นต้น ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพได้โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน แต่เนื่องจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศอาจเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการใช้งาน ดังนั้นจึงควรวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนทั้งในน้ำสะอาดหรือน้ำประปา และในน้ำจากสภาวะการทำงานจริง

2.4.1 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด

องค์กรวิศวกรรมโยธาแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Civil Engineers, ASCE) ได้ระบุวิธีการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำสะอาด ซึ่งประกอบไปด้วยการกำจัดออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved oxygen, DO) โดยการเติมโซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนละลายในน้ำดังสมการ



นอกจากนี้ยังสามารถเติมโคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้กำจัดออกซิเจนละลายในน้ำเร็วขึ้นได้ โดยเติมในปริมาณ 1.5 มก./ลิตร เพื่อกำจัดออกซิเจนละลาย 1 มก./ลิตร เมื่อปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าเท่ากับ 0 มก./ลิตร หรือมีค่าต่ำ จึงเริ่มเติมอากาศพร้อมกับวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่เพิ่มขึ้น ณ เวลาต่างๆ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าใกล้จุดอิ่มตัว ดังแสดงในภาพ



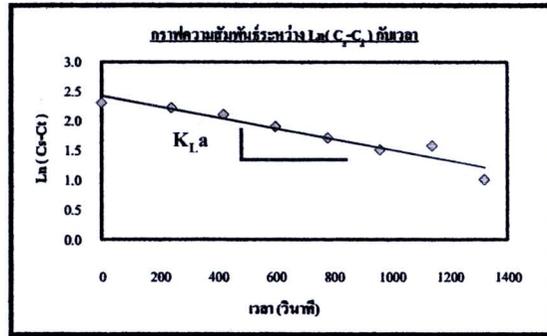
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำกับเวลา

จากรูปที่ 2.2 แสดงความเข้มข้นของออกซิเจนละลายขณะเติมอากาศ ณ เวลาใดๆ เมื่อเติมอากาศอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายจะเข้าใกล้จุดอิ่มตัวซึ่งสามารถวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้น ณ สภาวะสมดุลได้ จากข้อมูลความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่วัดได้สามารถนำมาวิเคราะห์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยสมการการถ่ายเทมวลสารซึ่งได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 2.2 จนได้รูปสมการเป็นดังนี้

$$\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = e^{-(k_L a) \times t} \quad (2.4)$$

$$\ln(C_s - C_t) = \ln(C_s - C_0) - k_L a \times t \quad (2.5)$$

- เมื่อ $k_L a$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนโดยรวม หน่วย 1/วินาที
 C_s คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุล หน่วย มก./ลิตร
 C_t คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ เวลาใดๆ หน่วย มก./ลิตร
 C_0 คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่มีอยู่เดิมในน้ำ หน่วย มก./ลิตร
 t คือ ระยะเวลาการเติมอากาศ หน่วย วินาที



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลา เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน

จากสมการที่ 2.4 เมื่อใส่เครื่องหมายลอการิทึมสามัญ (\ln) และจัดรูปสมการใหม่เป็นสมการที่ 2.5 จะได้สมการที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง และมีความชันเท่ากับค่าลบของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้น เมื่อนำข้อมูลความเข้มข้นของออกซิเจนละลายที่วัดได้ขณะเติมอากาศ ณ เวลาต่างๆ มาคำนวณตามสมการที่ 2.5 และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_s - C_t)$ กับเวลาตามรูปที่ 2.3 จะสามารถวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้

2.4.2 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำเสีย

การเติมอากาศในน้ำเสีย ออกซิเจนละลายบางส่วนจะถูกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลชีพในน้ำ โดยทั่วไปการเติมอากาศในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจะควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนละลายประมาณ 1 ถึง 3 มก./ลิตร ซึ่งจะถูกใช้โดยจุลชีพอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำเสียจึงต้องคำนึงถึงอัตราการใช้ออกซิเจนของจุลชีพด้วย ตามสมการดังนี้

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_s - C) - r_M \quad (2.6)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำ หน่วย มก./ลิตร
 r_M คือ อัตราการใช้ออกซิเจนโดยจุลชีพ

โดยทั่วไป อัตราการใช้ออกซิเจนของจุลชีพมีค่าประมาณ 2 ถึง 7 ก.(ออกซิเจน)/วัน-ก.(เซลล์จุลชีพ หรือ MLVSS) จากสมการที่ 2.6 ถ้ามีการควบคุมปริมาณการเติมออกซิเจนให้คงที่ หรือ " dC/dt " เท่ากับศูนย์ ดังนั้น จึงได้ความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$r_M = k_L a (C_s - C) \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำ (C) จะมีค่าคงที่ตามปริมาณการเติมออกซิเจนที่ถูกควบคุม อัตราการใช้ออกซิเจนโดยจุลชีพสามารถหาค่าได้โดยเครื่องวัดอัตราการหายใจ (Respirometer) ดังนั้น จึงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนได้ตามสมการดังนี้

$$k_L a = \frac{r_M}{(C_S - C)} \quad (2.8)$$

เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในห้องปฏิบัติการอ้างอิงจากการใช้สมการการถ่ายเทออกซิเจนเป็นหลัก ซึ่งในสภาวะการทำงานจริงมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจน เช่น อุณหภูมิ ส่วนประกอบในน้ำที่เติมอากาศ รูปทรงของถังเติมอากาศ และระดับความปั่นป่วนในถังเติมอากาศ เป็นต้น ดังนั้น นอกจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในห้องปฏิบัติการแล้ว จึงควรทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทำงานจริงด้วย เพื่อสามารถวิเคราะห์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

2.5 ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ (Oxygenation Capacity, OC)

ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ คือ ปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทสู่น้ำโดยอุปกรณ์เติมอากาศ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$OC = k_L a \times C_S \times V \quad (2.9)$$

เมื่อ OC คือ ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจน หน่วย มก./วินาที
V คือ ปริมาตรของน้ำที่เติมอากาศ หน่วย ลิตร



จากสมการที่ 2.9 หลังจากวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศและความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลแล้วสามารถนำค่าดังกล่าวมาวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศต่อไปได้

2.6 อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer rate, OTR)

อัตราการถ่ายเทออกซิเจน คือ อัตราส่วนความสามารถในการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศต่อกำลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$OTR = \frac{OC}{P} = \frac{k_L a \times C_S \times V}{P} \quad (2.10)$$



เมื่อ	OTR	คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจน หน่วย มก./วินาที-กิโลวัตต์ (mg/s-kW.)
	P	คือ กำลังงานที่ใช้ในการเติมอากาศ หน่วย กิโลวัตต์

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนสามารถอธิบายถึงความสามารถในการเติมอากาศ และการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์เติมอากาศ ซึ่งใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศแต่ละประเภทได้ แต่เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมอากาศ และอาจทำให้การเปรียบเทียบคลาดเคลื่อนได้ จึงนิยมเปรียบเทียบประสิทธิภาพภายใต้สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลภายใต้สภาวะมาตรฐานมาคำนวณตามสมการที่ 2.10 จะได้เป็นอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard oxygen transfer rate, SOTR)

2.7 ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer efficiency, OTE)

ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน คือ อัตราส่วนร้อยละของปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำต่อปริมาณออกซิเจนที่เติมให้กับระบบ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$OTE = \frac{\text{Oxygen}_{\text{Transferred}}}{\text{Oxygen}_{\text{Added}}} = \frac{OC}{P_G \times Q_G} \quad (2.11)$$

เมื่อ	OTE	คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน หน่วย ร้อยละ (%)
	$\text{Oxygen}_{\text{Transferred}}$	คือ ปริมาณออกซิเจนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำ
	$\text{Oxygen}_{\text{Added}}$	คือ ปริมาณออกซิเจนที่เติมเข้าสู่ระบบ
	P_G	คือ ความหนาแน่นของอากาศ หน่วย กก./ลิตร หรือ มก./ลิตร
	Q_G	คือ อัตราการไหลของอากาศ หน่วย ลิตร/วินาที

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศนิยมเปรียบเทียบโดยใช้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard oxygen transfer efficiency, SOTE) ซึ่งคำนวณจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลภายใต้สภาวะมาตรฐาน

2.8 ผลกระทบจากอุณหภูมิต่อการถ่ายเทออกซิเจน

เนื่องจากอุณหภูมิมี่ความสัมพันธ์ต่อความสามารถในการละลายของออกซิเจน และอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้น การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศแต่ละประเภทจึงควรเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งสามารถปรับค่าได้ตามสมการดังนี้

$$k_L a_{(T)} = k_L a_{(20^\circ\text{C})} \times \theta^{T-20} \quad (2.12)$$

- เมื่อ $k_L a_{(T)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิใดๆ หน่วย 1/วินาที
 $k_L a_{(20^\circ\text{C})}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หน่วย 1/วินาที
 θ คือ ค่าคงที่ของการปรับค่า
 T คือ อุณหภูมิขณะเต็มอากาศ หน่วย องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปค่า θ ได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าประมาณ 1.015 ถึง 1.040 สำหรับอุปกรณ์เต็มอากาศประเภทหวักระจ่ายอากาศ และเครื่องเต็มอากาศที่ผิวน้ำนิยมใช้ค่า θ เท่ากับ 1.024

2.9 ผลกระทบจากสภาวะการทำงานจริงต่อการถ่ายเทออกซิเจน

การเต็มอากาศในสภาวะการทำงานจริงมีหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทออกซิเจน เช่น รูปทรงของถังเต็มอากาศ ลักษณะของอุปกรณ์เต็มอากาศ และสารเจือปนในน้ำ เป็นต้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระดับการกวนผสมของน้ำที่ทำให้เกิดการแพร่ของออกซิเจนละลายอย่างทั่วถึงในถังเต็มอากาศ สารเจือปนในน้ำส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของน้ำ ลักษณะการเกิดฟองอากาศ และความสามารถในการละลายของออกซิเจน เช่น สารลดแรงตึงผิวทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสจำเพาะขณะเต็มอากาศ แต่ในขณะเดียวกันอ็อกซิเจนในน้ำล้อมรอบผิวฟองอากาศขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวลดลง เป็นต้น เพื่อให้สามารถอธิบายการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงได้อย่างชัดเจน จึงควรมีการศึกษาอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงกับผลวิเคราะห์ในน้ำสะอาดเป็นตัวคูณปรับแก้ตามสมการดังนี้

$$\alpha = \frac{k_L a \text{ (Actual system)}}{k_L a \text{ (Experiment)}} \quad (2.13)$$

- เมื่อ α คือ ตัวคูณปรับแก้อัลฟา
 $k_L a \text{ (Actual system)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริง หน่วย 1/วินาที
 $k_L a \text{ (Experiment)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนจากการวิเคราะห์ หน่วย 1/วินาที

โดยทั่วไป ตัวคูณปรับแก้อัลฟาหาได้โดยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำจากสภาวะการทำงานจริงเปรียบเทียบกับค่าวิเคราะห์ในน้ำประปาในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าประมาณ

0.3 ถึง 1.2 และทำให้สามารถอธิบายผลกระทบจากสารเจือปนในน้ำได้อย่างชัดเจนไม่มีปัจจัยอื่นๆจากรูปทรงของถังเติมอากาศมาเกี่ยวข้อง

2.10 ผลกระทบจากส่วนประกอบในน้ำต่อการถ่ายเทออกซิเจน

เนื่องจากส่วนประกอบในน้ำมีความสัมพันธ์ต่อความสามารถในการละลายของออกซิเจน การเติมอากาศในสภาวะการทำงานจริงซึ่งมีส่วนประกอบในน้ำแตกต่างจากน้ำประปาจึงส่งผลกระทบต่อถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้น การวิเคราะห์การถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงซึ่งมีสารเจือปนในน้ำจึงควรปรับแก้ค่าตามความสามารถในการละลายของออกซิเจน โดยการใช้ตัวคูณปรับแก้ตามสมการดังนี้

$$\beta = \frac{C_S \text{ (Aerated water)}}{C_S \text{ (Clean water)}} \quad (2.14)$$

เมื่อ	β	คือ ตัวคูณปรับแก้เบต้า
	$C_S \text{ (Aerated water)}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลในน้ำเสีย หรือในสภาวะการทำงานจริง หน่วย มก./ลิตร
	$C_S \text{ (Clean water)}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลในน้ำสะอาด หรือน้ำประปา หน่วย มก./ลิตร

โดยทั่วไป ตัวคูณปรับแก้เบต้าแปรผันตามส่วนประกอบของน้ำที่เติมอากาศ หาค่าโดยการวัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำที่เติมอากาศ ณ สภาวะสมดุลเปรียบเทียบกับน้ำสะอาดหรือน้ำประปา ซึ่งมีค่าประมาณ 0.7 ถึง 0.98 สำหรับน้ำเสียทั่วไปนิยมใช้ตัวคูณปรับแก้เบต้าเท่ากับ 0.95

2.11 ผลกระทบจากการอุดตันต่อการถ่ายเทออกซิเจน

เนื่องจากขนาดฟองอากาศเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ฟองอากาศขนาดเล็กมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำมากทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้ดีกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ อุปกรณ์เติมอากาศส่วนใหญ่จึงถูกออกแบบให้มีรูพรุนขนาดเล็ก เพื่อความสามารถในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กได้ แต่รูพรุนขนาดเล็กเกิดการอุดตันได้ง่ายจากสารเจือปนในน้ำภายใต้สภาวะการทำงานจริง การอุดตันที่เกิดขึ้นจากการใช้งานอุปกรณ์เติมอากาศเป็นเวลานานอาจส่งผลให้เกิดฟองอากาศกระจายตัวไม่สม่ำเสมอบนอุปกรณ์เติมอากาศ และทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนลดลง ดังนั้น การประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศในสภาวะการทำงานจริง จึงควรปรับแก้ค่า โดยการใช้ตัวคูณปรับแก้ตามสมการดังนี้

$$F = \frac{SOTE_{Used}}{SOTE_{New}} \quad (2.15)$$

เมื่อ	F	คือ ตัวคูณปรับแก้ของการดูดตัน
	$SOTE_{Used}$	คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ ของอุปกรณ์เติมอากาศหลังการใช้งานหน่วย ร้อยละ
	$SOTE_{New}$	คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ ของอุปกรณ์เติมอากาศก่อนการใช้งานหน่วย ร้อยละ

โดยทั่วไป ตัวคูณปรับแก้ของการดูดตันสามารถวิเคราะห์ได้จากประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศหลังการใช้งานเปรียบเทียบกับก่อนใช้งาน หรือหลังจากดูดตันเปรียบเทียบกับก่อนเกิดการดูดตัน ซึ่งมีค่าประมาณ 0.65 ถึง 0.9 ขึ้นอยู่กับสมบัติของอุปกรณ์เติมอากาศ

2.12 การปรับแก้ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนโดยใช้ตัวคูณปรับแก้

เนื่องจากกระบวนการเติมอากาศในสภาวะการทำงานจริงมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ ลักษณะของน้ำหรือสารเจือปนในน้ำ รูปทรงของถังเติมอากาศ ประเภทอุปกรณ์เติมอากาศ และปริมาณออกซิเจนในอากาศที่เติมให้กับระบบ เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจน ดังนั้น การประเมินการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริงจึงควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยการใช้ตัวคูณปรับแก้มาคำนวณเป็นค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนตามสมการดังนี้

$$AOTR = SOTR \times \left(\frac{\beta C_{\bar{S},T,H} - C_L}{C_{S,20}} \right) \times (1.024^{T-20}) \times \alpha \times F \quad (2.16)$$

$$C_{\bar{S},T,H} = C_{S,T,H} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{P_d}{P_{atm,H}} + \frac{O_t}{21} \right) \quad (2.17)$$



$$C_{\bar{S},T,H} = C_{S,T,H} \times \left(\frac{P_{atm,H} + P_{w,mid\ depth}}{P_{atm,H}} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ	AOTR	คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริง หน่วย มก./วินาที-กิโวลต์
	SOTR	คือ อัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ หน่วย มก./วินาที-กิโวลต์
	$C_{S,T,H}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวโดยเฉลี่ย ในน้ำสะอาด ในถังเติมอากาศที่อุณหภูมิ และระดับความสูงในสภาวะการทำงานจริง หน่วย มก./ลิตร

C_L	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ควบคุมในถังเติมอากาศ หน่วย มก./ลิตร
$C_{S,20}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัว ณ สภาวะมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ ในน้ำสะอาด หน่วย มก./ลิตร
T	คือ อุณหภูมิขณะเติมอากาศ หน่วย องศาเซลเซียส
$C_{S,T,H}$	คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวในน้ำสะอาด ที่อุณหภูมิ และระดับความสูง ในสภาวะการทำงานจริง หน่วย มก./ลิตร
P_d	คือ ความดัน ณ จุดเติมอากาศได้น้ำ หน่วย กิโลปาสคาล
$P_{atm,H}$	คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับความสูงในสภาวะการทำงานจริง หน่วย กิโลปาสคาล
O_i	คือ ร้อยละความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศที่เหลือจากถังเติมอากาศ ปกติ เหลือประมาณร้อยละ 18 ถึง 20
$P_{w,mid\ depth}$	คือ ความดันที่ระดับความลึกกึ่งกลางระหว่างผิวน้ำ และจุดเติมอากาศ หน่วย กิโลปาสคาล

จากสมการที่ 2.16 เป็นสมการที่ใช้คำนวณอัตราการถ่ายเทออกซิเจนในสภาวะการทำงานจริง โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐาน และตัวคูณปรับแก้ต่างๆ สำหรับตัวคูณปรับแก้ของการดูดซับออกซิเจนรวมทั้งการดูดซับภายนอกและการดูดซับภายในของอุปกรณ์เติมอากาศ ซึ่งอาจเกิดจากการตกตะกอนทับถมของสิ่งเจือปนในน้ำ การสร้างเมือกของจุลินทรีย์บริเวณผิวนอก หรือการดูดซับภายในจากสิ่งเจือปนในอากาศที่เติมให้กับระบบ เป็นต้น สำหรับความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวโดยเฉลี่ย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 หรือ 2.18 เนื่องจากในถังเติมอากาศขนาดใหญ่อาจมีความลึกมากจนทำให้ความดันบรรยากาศบริเวณผิวน้ำกับความดันบริเวณจุดเติมอากาศได้น้ำมีค่าแตกต่างกันมาก ความสามารถในการละลายของออกซิเจนที่ระดับทั้งสองจึงแตกต่างกันมากด้วย ดังนั้นในการประเมินความเข้มข้นของออกซิเจนอิ่มตัวจึงคิดเป็นค่าเฉลี่ยที่ระดับกึ่งกลางระหว่างผิวน้ำ และจุดเติมอากาศ

2.13 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters)

ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ คือ การศึกษาลักษณะการเกิดฟองอากาศเพื่อให้สามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (ประมาณ 100 ภาพ/วินาที หรือมากกว่า) ถ่ายภาพการเกิด และการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆดังนี้

2.13.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter, d_B)

ขนาดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ฟองอากาศขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากกว่า และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่า ฟองอากาศขนาดใหญ่เมื่อเติมอากาศให้กับระบบในปริมาณเท่ากัน นอกจากนั้น ขนาดฟองอากาศยังมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศตัวอื่นๆ เช่น ฟองอากาศแต่ละขนาดมีความเร็วลอยตัวที่แตกต่างกัน ฟองอากาศขนาดเล็กอาจแสดงถึงการใช้ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศน้อยกว่า หรือมีความถี่ของการเกิดฟองอากาศสูงกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่เมื่อเติมอากาศในปริมาณเท่ากัน เป็นต้น การศึกษาขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์เติมอากาศจึงสามารถอธิบายถึงตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศตัวอื่นๆ และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์ชนิดนั้นในเบื้องต้นได้

2.13.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, U_B)

ในกรณีการเติมอากาศโดยวิธีปล่อยอากาศใต้น้ำ ฟองอากาศที่ถูกปล่อยใต้น้ำจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม และลอยตัวขึ้นสู่น้ำด้วยความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของสโตกส์ (Stoke's law) ที่อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมผ่านของไหลที่มีความหนืด โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$V_T = \frac{g (\rho_L - \rho_a) d^2}{18\mu} \quad (2.19)$$

เมื่อ	V_T	คือ ความเร็วปลาย (Terminal velocity) หน่วย ม./วินาที
	ρ_L	คือ ความหนาแน่นของน้ำ หน่วย กก./ลบ.ม.
	ρ_a	คือ ความหนาแน่นของอากาศ หรือฟองอากาศ หน่วย กก./ลบ.ม.
	d	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค หรือฟองอากาศ หน่วย ม.
	μ	คือ ความหนืดของน้ำ หน่วย ปาสคาล-วินาที (Pa-s.) หรือ กก./ม.-วินาที

จากสมการที่ 2.19 ในกรณีของการเติมอากาศความเร็วปลาย (V_T) คือความเร็วลอยตัวของฟองอากาศซึ่งมีความสัมพันธ์แปรผันตามขนาดฟองอากาศ คือฟองอากาศขนาดใหญ่มีความเร็วลอยตัวมาก ฟองอากาศขนาดเล็กมีความเร็วลอยตัวน้อยกว่าแต่มีช่วงระยะเวลาสัมผัสกับน้ำนานกว่า ช่วงระยะเวลาที่ฟองอากาศใช้ลอยตัวขึ้นจนถึงผิวน้ำคือช่วงเวลาที่ฟองอากาศสัมผัสกับน้ำ และเกิดการถ่ายเทออกซิเจน ในทางปฏิบัติสามารถวัดค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขณะเติมอากาศ แล้วนำภาพมาวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวตามสมการดังนี้

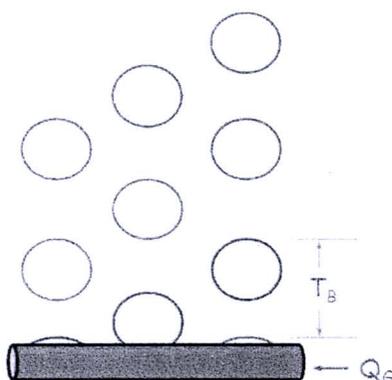
$$U_B = \frac{\Delta D}{T_{\text{Frames}}} \quad (2.20)$$

เมื่อ U_B คือ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ หน่วย ม./วินาที
 ΔD คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ หน่วย ม.
 T_{Frames} คือ ช่วงเวลาของการถ่ายภาพ หน่วย วินาที

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูงวิเคราะห์ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวได้โดยตรง และลดความคลาดเคลื่อนจากการใช้สมการคำนวณ นอกจากนี้ สามารถใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศ และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ เพื่อสามารถอธิบายประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนเบื้องต้นได้จากการวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศ

2.13.3 ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation time, T_B) และความถี่ของการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency, f_B)

เนื่องจากระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ และความถี่ของการเกิดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้น และพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำที่ทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจน จึงมีความสำคัญที่ต้องศึกษาตัวแปรดังกล่าวประกอบการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศแต่ละชนิด โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงถ่ายภาพและจับเวลาการเกิดฟองอากาศ ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศประกอบด้วยช่วงเวลาที่เริ่มเกิดฟองอากาศ ฟองอากาศขยายขนาด จนกระทั่งฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เติมอากาศและเริ่มเกิดฟองใหม่ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองแสดงระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ

$$T_B = T_{\text{Growing}} + T_{\text{Out}} \quad (2.21)$$

$$f_B = \frac{1}{T_B} \quad (2.22)$$

- เมื่อ T_B คือ ระยะเวลาการเกิดฟองอากาศ หน่วย วินาที
 T_{Growing} คือ ระยะเวลาที่เริ่มเกิดฟองอากาศ และขยายขนาด หน่วย วินาที
 T_{out} คือ ระยะเวลาที่ฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เดิมอากาศ หน่วย วินาที
 f_B คือ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ หน่วย 1/วินาที

จากรูปที่ 2.4 แสดงระยะเวลาการเกิดฟองอากาศซึ่งประกอบด้วย ระยะที่เริ่มเกิดฟองอากาศและขยายขนาด รวมกับระยะเวลาที่ฟองอากาศหลุดออกจากอุปกรณ์เดิมอากาศและเริ่มเกิดฟองอากาศฟองใหม่มาแทนที่ตามสมการที่ 2.21 และมีความสัมพันธ์กับความถี่ของการเกิดฟองอากาศตามสมการที่ 2.22 นอกจากนั้น ความถี่ของการเกิดฟองอากาศสามารถคำนวณได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_B = \frac{Q_G}{V_B} \quad (2.23)$$

$$V_B = \frac{1}{6} \pi \times d_B^3 \quad (2.24)$$

- เมื่อ Q_G คือ อัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ หน่วย ลบ.ม./วินาที
 V_B คือ ปริมาตรฟองอากาศ (ปริมาตรทรงกลม) หน่วย ลบ.ม.
 d_B คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ หน่วย ม.

จากสมการที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการเกิดฟองอากาศกับอัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ และปริมาตรของฟองอากาศ เมื่อฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลมหรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter, d_e) สามารถคำนวณปริมาตรของฟองอากาศได้ตามสมการที่ 2.24 และความถี่ของการเกิดฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเติมอากาศตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$N_B = \frac{f_B \times H_L}{U_B} \quad (2.25)$$

- เมื่อ N_B คือ จำนวนฟองอากาศ หน่วย ฟอง

H_L คือ ความสูงของผิวน้ำเหนือจุดเดิมอากาศ หน่วย ม.

จากสมการที่ 2.25 จำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นขณะเดิมอากาศมีความสัมพันธ์กับความถี่ของการเกิดฟองอากาศ ความสูงของผิวน้ำเหนือจุดเดิมอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ ซึ่งส่งผลต่อพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ความถี่ของการเกิดฟองอากาศที่มากทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมาก มีพื้นที่สัมผัสมากและประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงในกรณีที่ไม่เกิดการรวมตัวของฟองอากาศ และจากสมการที่ 2.19 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ จึงอาจมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าความถี่ของการเกิดฟองอากาศ และจำนวนฟองอากาศเบื้องต้นได้เมื่อทราบค่าขนาดฟองอากาศ ซึ่งอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เดิมอากาศได้

2.13.4 พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว (Interfacial area, a)

พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสของฟองอากาศทั้งหมดกับปริมาตรของน้ำที่เดิมอากาศ แสดงถึงพื้นที่ทั้งหมดที่เกิดการถ่ายเทออกซิเจนได้ขณะเดิมอากาศ โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

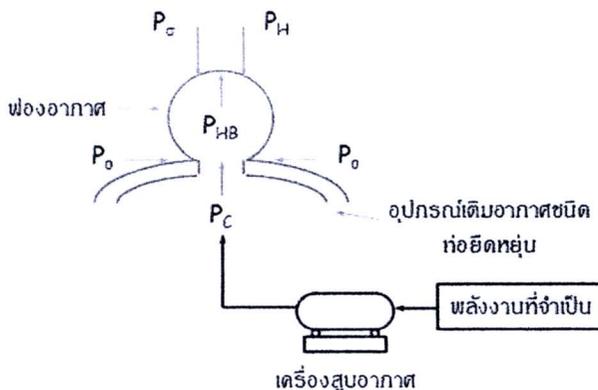
$$a = \frac{N_B \times S_B}{V_{Total}} = \frac{N_B \times \pi \times d_B^2}{A \times H_L + N_B \times V_B} \quad (2.26)$$

เมื่อ	a	คือ พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว หน่วย ตร.ม./ลบ.ม. หรือ 1/ม.
	S_B	คือ พื้นที่ผิวของฟองอากาศ (พื้นที่ผิวทรงกลม) หน่วย ตร.ม.
	V_{Total}	คือ ปริมาตรโดยรวมระหว่างปริมาตรของน้ำ และฟองอากาศ หน่วย ลบ.ม.
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดขวางของน้ำในถังเดิมอากาศ หน่วย ตร.ม.
	H_L	คือ ความสูงของน้ำในถังเดิมอากาศ หน่วย ม.

เนื่องจากพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลวมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของฟองอากาศทั้งหมดหรือผลคูณระหว่างจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ผิวของฟองอากาศหนึ่งฟอง และปริมาตรโดยรวมระหว่างปริมาตรน้ำกับปริมาตรฟองอากาศทั้งหมดหรือผลคูณระหว่างจำนวนฟองอากาศกับปริมาตรฟองอากาศตามสมการที่ 2.26 (Painmanakul และคณะ, 2004) เมื่อสมมติให้ฟองอากาศมีรูปร่างเป็นทรงกลม ปริมาตรฟองอากาศจึงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.24 จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะพบว่าพื้นที่สัมผัสมีความสัมพันธ์กับขนาดฟองอากาศ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะในเบื้องต้นเมื่อทราบค่าขนาดฟองอากาศ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เดิมอากาศได้

2.14 ความดัน (Pressure, P) และกำลังที่จำเป็น (Power required)

เนื่องจากการเติมอากาศโดยวิธีปล่อยอากาศได้น้ำจำเป็นต้องใช้เครื่องเป่าอากาศเพื่อไล่เสียงอากาศ และอัดด้วยความดันผ่านอุปกรณ์เติมอากาศที่ติดตั้งอยู่ได้น้ำทำให้อากาศกระจายตัวเป็นฟองอากาศขนาดเล็กลอยขึ้นสู่น้ำ จึงเกิดการสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนในกระบวนการเติมอากาศ ความดันเริ่มต้นที่ทำให้เกิดฟองอากาศได้ เรียกว่า ความดันวิกฤต (Critical pressure, ΔP) มีความสัมพันธ์กับความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศ โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงสมดุลของความดันขณะเกิดฟองอากาศบนอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น

ที่มา : Painmanakul และคณะ, 2004

$$\Delta P > P_C - P_H + P_{HB} - P_\sigma - P_0 \quad (2.27)$$

$$\Delta P_{\text{critic}} = \frac{4 \times \sigma_L}{d_{OR}} + P_0 \quad (2.28)$$

$$P_H = P_{\text{atm}} + \rho_L \times g \times H_L \quad (2.29)$$

$$P_{HB} = \rho_L \times g \times R_B \quad (2.30)$$

เมื่อ	ΔP	คือ ความดันลดที่เกิดจากอุปกรณ์เติมอากาศ หน่วย ปาสคาล
	P_C	คือ ความดันจากก๊าซ หน่วย ปาสคาล
	P_H	คือ ความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure) หน่วย ปาสคาล
	P_{HB}	คือ ความดันไฮโดรสแตติกของฟองอากาศ หน่วย ปาสคาล
	P_σ	คือ ความดันจากแรงตึงผิวของน้ำ หน่วย ปาสคาล

P_0	คือ ความดันจากความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศ หน่วย ปาสคาล
ΔP_{critic}	คือ ความดันวิกฤต หน่วย ปาสคาล
σ_L	คือ แรงตึงผิวของของเหลว หน่วย นิวตัน/ม.
d_{OR}	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของรูเติมอากาศ (Equivalent hole diameter) หน่วย ม.
P_{atm}	คือ ความดันบรรยากาศ หน่วย ปาสคาล
ρ_L	คือ ความหนาแน่นของของเหลว หน่วย กก./ลบ.ม.
R_B	คือ รัศมีของฟองอากาศ (รูปร่างทรงกลม) หน่วย ม.

จากรูปที่ 2.5 แสดงสมดุลของความดันขณะเกิดฟองอากาศบนอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น เครื่องเป่าอากาศอัดอากาศเข้าสู่อุปกรณ์เติมอากาศที่ติดตั้งอยู่ใต้น้ำด้วยความดัน (P_c) เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศเครื่องเป่าอากาศต้องมีความดันมากกว่าความดันจากความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศ (P_0) ซึ่งเป็นความดันที่เกิดจากการหดตัวของรูเติมอากาศต้านทานการไหลของอากาศ เมื่อเริ่มเกิดฟองอากาศความดันจากเครื่องเป่าอากาศต้องทำให้ฟองอากาศมีความดันไฮโดรสแตติก (P_{HB}) มากกว่าความดันไฮโดรสแตติกจากความลึกของน้ำ (P_H) และความดันจากแรงตึงผิวของน้ำ (P_σ) จึงสามารถทำให้เกิดฟองอากาศและลอยขึ้นสู่น้ำได้ โดยความดันที่จำเป็นเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศหรือความดันขณะเติมอากาศมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.27 และสามารถคำนวณเป็นค่าความดันวิกฤตได้ตามสมการที่ 2.28 ในทางปฏิบัติสามารถวัดค่าความดันวิกฤตได้โดยตรง ดังนั้นจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.28 คำนวณค่าความดันจากความยืดหยุ่นของอุปกรณ์เติมอากาศได้ ส่วนความดันไฮโดรสแตติกสามารถคำนวณได้โดยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.29 และ 2.30 เมื่อทราบค่าความดันที่จำเป็นเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศจึงสามารถเลือกเครื่องเป่าอากาศเพื่อใช้ในกระบวนการเติมอากาศได้อย่างเหมาะสม

เนื่องจากเครื่องเป่าอากาศที่ใช้ในกระบวนการเติมอากาศต้องมีความดันมากกว่าความดันลดทั้งหมด เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศได้ซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงาน เครื่องเป่าอากาศที่มีความดันสูงจะใช้พลังงานมากตามไปด้วย โดยปริมาณพลังงานที่จำเป็นในการเติมอากาศสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_w = \frac{w \times R \times T_1}{29.7 \times n \times e} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0.283} - 1 \right] \quad (2.31)$$

$$\frac{P_G}{V_{\text{Total}}} = Q_G \times \frac{\Delta P_{\text{Total}}}{V_{\text{Total}}} = Q_G \times \frac{\rho_L \times g \times H_L + \Delta P}{V_{\text{Total}}} \quad (2.32)$$

เมื่อ	P_w	คือ กำลังที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศ หน่วย กิโลวัตต์
	w	คือ น้ำหนักอากาศที่เติมให้กับระบบ หน่วย กก./วินาที

R	คือ ค่าคงที่ทางวิศวกรรมของอากาศเท่ากับ 8.314 กิโลจูล/กิโลโมล-เคลวิน
T_1	คือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้า หน่วย เคลวิน
n	คือ ค่าคงที่ของอากาศเท่ากับ 0.283
e	คือ ประสิทธิภาพเครื่องเป่าอากาศ ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90
p_1	คือ ความดันของอากาศขาเข้า หน่วย บรรยากาศ
p_2	คือ ความดันของอากาศขาออก หน่วย บรรยากาศ
P_G	คือ กำลังที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศ หน่วย วัตต์
ΔP_{Total}	คือ ความดันลดโดยรวม หน่วย ปาสคาล

เนื่องจากพลังงานที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศมีความสัมพันธ์กับกำลังที่จำเป็นของเครื่องเป่าอากาศเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความดัน การวัดค่าความดันที่จุดต่างๆของอุปกรณ์เติมอากาศจึงสามารถวิเคราะห์หาค่าพลังงานที่จำเป็นได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.31 คำนวณค่ากำลังที่จำเป็นในกระบวนการเติมอากาศ (Metcalf และ Eddy, 2004) หรือใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่จำเป็นกับความดันลดที่เกิดจากอุปกรณ์เติมอากาศตามสมการที่ 2.32 (Painmanakul และ คณะ, 2004) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีวัดค่าความดันลดที่เกิดจากอุปกรณ์เติมอากาศ และใช้คำนวณค่ากำลังที่จำเป็นตามสมการที่ 2.32 เนื่องจากสามารถใช้อุปกรณ์วัดค่าความดันได้โดยตรง หลังจากนั้นจึงใช้ค่ากำลังที่จำเป็นประกอบการวิเคราะห์ค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นตามสมการที่ 2.10

2.15 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

เนื่องจากกระบวนการเติมอากาศสามารถควบคุมได้โดยอัตราการไหลของก๊าซที่เติมให้กับระบบ อัตราการไหลของอากาศแต่ละค่าทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนที่แตกต่างกัน เช่น การเติมอากาศด้วยอัตราการไหลต่ำอาจทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กและมีความเร็วลอยตัวค่าหนึ่ง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลอาจทำให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความเร็วลอยตัวลดลง เป็นต้น แสดงว่าอัตราการไหลของอากาศมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ นอกจากนั้นยังมีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับตัวแปรอื่นๆ เช่น ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างฟองอากาศกับน้ำ เป็นต้น จึงมีความน่าสนใจในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับขนาดฟองอากาศเพื่อใช้เป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว พื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างก๊าซและของเหลว และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนตามหัวข้อที่ 3.4.1 ทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกิดจากผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวกับพื้นที่สัมผัสจำเพาะตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$k_L a = k_L \times a \quad (2.33)$$

$$k_L = \frac{k_L a}{a} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ 2.34 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และพื้นที่สัมผัส จำเพาะทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวได้ และสามารถอธิบายถึงการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (d_b)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	ข้อกำหนด	อ้างอิง
d_b-1	$d_b = \left(\frac{6 \cdot d_{OR} \cdot \sigma \cdot g_c}{g \cdot \Delta p} \right)^{1/3}$	$Q_{g0} < \left(\frac{20(\sigma \cdot d_o \cdot g_c)^5}{(g \cdot \Delta p)^2 \cdot \rho_L^3} \right)^{1/6}$	Krevelen et al. (1959)
d_b-2	$d_b = 0.0287 d_{OR}^{1/2} \cdot Re^{1/3}$	$Re < 2100$	Leibson et al. (1956)
d_b-3	$d_b = \left(\frac{72 \rho_L}{\pi^2 \cdot g \cdot \Delta p} \right)^{1/5} \cdot Q_{g0}^{0.4}$		Krevelen et al. (1959)
d_b-4	$d_b = 7.1 \times 10^{-4} \cdot \Delta P^{0.328}$		Hebrard (1995)
d_b-5	$d_b = 15.73 \times 10^{-3} \cdot D_c^{0.32} \left(\frac{Q_g}{D_{OR}} \right)^{0.16}$		Hebrard (1995)
d_b-6	$d_b = 1.56 Re^{0.058} \left(\frac{d_{OR}^2 \cdot \sigma}{\Delta p g} \right)^{1/4}$ $d_b = 0.32 Re^{0.425} \left(\frac{d_{OR}^2 \cdot \sigma}{\Delta p g} \right)^{1/4}$	$1 < Re < 10$ $10 < Re < 21000$	Kumar et al. (1976)
d_b-7	$\frac{g \cdot \rho_L \cdot d_b^2}{\sigma} = 8.8 \left(\frac{u_g \cdot \mu_L}{\sigma} \right)^{-0.04} \left(\frac{\sigma^3 \cdot \rho_L}{g \cdot \mu_L} \right)^{0.12} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.22}$		Wilkinson et al. (1994)

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (U_b)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	ข้อกำหนด	อ้างอิง
U _b -1	$U_b = \frac{g \cdot \Delta \rho \cdot d_b^2}{12 \cdot \mu}$	$Re < 250$, $\frac{\mu_g}{\mu} = 0$	Hadamard and Ryazantsev (1911)
U _b -2	$U_b = \frac{g \cdot \Delta \rho \cdot d_b^2}{18 \cdot \mu}$	$Re < 250$, $\frac{\mu_g}{\mu} = \infty$	Frumkin and Levich (1947)
U _b -3	$U_b = \frac{\mu}{\rho_L \cdot d_b} (J - 0.875) M_o^{-0.149}$ $J = 0.94H^{0.757} ; 2 < H \leq 59.3$ $J = 0.32H^{0.441} ; H > 59.3$ $H = \frac{4}{3} E_o \cdot M_o^{-0.149} \left(\frac{\mu}{0.0009} \right)^{-0.14}$	$250 < Re < 6000$	Grace et al. (1976)
U _b -4	$U_b = \left(\frac{2\sigma}{d_b \cdot \sigma} + 0.5d_b \cdot g \right)^{0.5}$	$0.2 \leq d_b \leq 8 \text{ cm.}$	Mendelson (1967)
U _b -5	Experimental curve for the bubble rising velocity		Grace and Wairegi (1986)

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะระหว่างของเหลวและก๊าซ (a)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
a-1	$a = 34.4U_G^{0.25} \cdot \epsilon_G$	Deckwer (1992)
a-2	$a = 26 \left(\frac{L_R}{d_R} \right)^{-0.3} \left(\frac{\rho_L \cdot \alpha^3}{g \cdot \mu^4} \right)^{-0.003} \cdot \epsilon_G$	Gestrich and Krauss (1975)
a-3	$a = \frac{6}{2.5} \left(\frac{\alpha}{\rho_L \cdot g} \right)^{-0.5} \left(\frac{\mu \cdot U_G}{\alpha} \right)^{0.25} \left(\frac{\rho_L \cdot \alpha^3}{g \cdot \mu^4} \right)^{0.125} \cdot \epsilon_G$	Van Dierendonck et al. (1968)
a-4	$a = 4.65 \times 10^{-12} \cdot \left(\frac{U_G}{\mu} \right)^{0.51}$	Tomida et al. (1978)
a-5	$a = \frac{6 \cdot \epsilon_G}{d_b (1 - \epsilon_G)}$	Moustiri (2000)
a-6	$a = 8.54 \cdot U_G^{0.12} \cdot \epsilon_G$	Deckwer (1992)
a-7	$a = \frac{f_b \cdot H_L \cdot \pi \cdot d_b^2}{U_b \cdot V_{Total}}$	Painmanakul et al. (2004)

ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว (k_L)

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
K _L -1	$K_L = 2 \left(\frac{D_{O_2} \cdot U_b}{\pi \cdot h} \right)^{0.5}$	Higbie's equation (Roustan, 2003)
K _L -2	$K_L = \frac{D}{d_b} (2 + 0.6Re^{(1/2)} \cdot Sc^{(1/3)})$	Frossling's equation (Roustan, 2003)

ตารางที่ 2.7 ตารางแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (k_{La})

ลำดับที่	ความสัมพันธ์	อ้างอิง
KL _a -1	$K_{La} = 0.0269U_G^{0.82}$	Deckwer et al. (1974)
KL _a -2	$K_{La} = d_c^{0.17} \cdot U_G^{0.7}$	Akita and Yoshida (1973)
KL _a -3	$\frac{K_{La}}{U_G} \cdot \left(\frac{v_L^2}{g} \right)^{0.33} = 3.9 \times 10^{-5} \cdot \left(\frac{\mu_G}{(v_L \cdot g)^{0.33}} \right)^{-0.1}$	Zlaskarnik (1981)
KL _a -4	$K_{La} = 0.041\alpha \cdot \frac{H_L}{d_b^{0.67}} \cdot \left(\frac{d_{OR}}{D_c} \right)^{0.18} \cdot \frac{U_G}{H_L}$	Khudenko and Shpirt (1986)
KL _a -5	$K_{La} = K_L \times a$	Painmanakul et al. (2004)

จากตารางที่ 2.3 ถึง 2.7 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่ถูกลำเลียงในปัจจุบันซึ่งมาจากการศึกษาความสัมพันธ์ในระดับห้องปฏิบัติการ หรือศึกษาความสัมพันธ์จากข้อมูลทุติยภูมิโดยอ้างอิงจากทฤษฎี โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซกับขนาดฟองอากาศเป็นตัวแปรหลักในการทำนายค่าต่างๆ เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกและบรรเทาความยุ่งยากจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน เช่น ระยะเวลาและความยุ่งยากในการวิเคราะห์ การเตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็น และทักษะของผู้วิเคราะห์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการทำงานเนื่องจากจุดประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน และปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจนทำให้มีความคลาดเคลื่อนจากการทำนายค่อนข้างมาก ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองเพิ่มเติมเพื่อสามารถใช้ในการทำนายได้อย่างแม่นยำ และมีความคลาดเคลื่อนลดลงจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อสามารถประยุกต์ใช้ผลจากการทำนายในการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ และประเมินความเหมาะสมของอุปกรณ์เติมอากาศในขั้นต้นได้ (Painmanakul และ Jamnongwong, 2007)

2.16 อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการเติมอากาศ

ในระบบการเติมอากาศส่วนใหญ่ประกอบด้วย เครื่องเป่าอากาศ อุปกรณ์เติมอากาศหรือ อุปกรณ์กระจายอากาศ และท่ออากาศ เป็นต้น อุปกรณ์เติมอากาศที่นิยมใช้ทั่วไปมีหลายประเภทโดยขึ้นกับลักษณะการใช้งาน รูปทรงของถังเติมอากาศ ราคาติดตั้งและค่าเดินระบบ เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

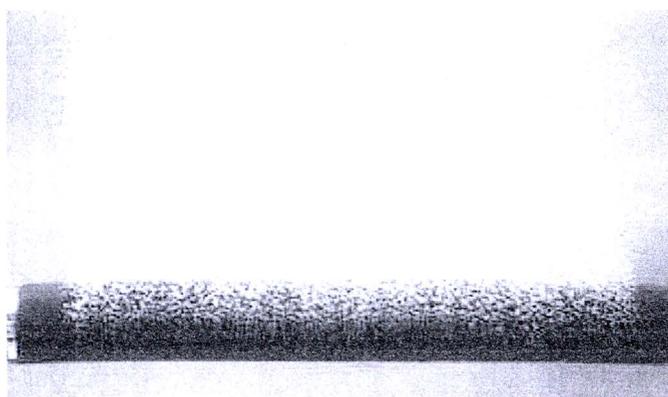
2.16.1 อุปกรณ์กระจายอากาศ (Diffused aeration)

ระบบการเติมอากาศที่ใช้อุปกรณ์กระจายอากาศอาศัยความดันจากเครื่องเป่าอากาศอัดอากาศลงใต้น้ำ เมื่ออากาศผ่านอุปกรณ์กระจายอากาศทำให้เกิดเป็นฟองอากาศและเกิดการถ่ายเทออกซิเจน ซึ่งอุปกรณ์กระจายอากาศสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ 2 ลักษณะ คือ แบ่งตามขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น และแบ่งตามลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์กระจายอากาศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.) แบ่งตามขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น

1.1) ฟองอากาศขนาดเล็ก (Fine bubble)

อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กมาก อาจมีลักษณะเป็นแผ่น ท่อ หรือโดม (Dome) ผลิตจากซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide, SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Aluminum oxide, Al_2O_3) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ซึ่งอาจเป็นอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดที่มีความแข็งหรือความยืดหยุ่นยืดหยุ่น โดยมีวัสดุยึดประสานประเภทเซรามิก (Ceramic) เป็นตัวช่วยยึดประสานให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 10 ถึง 30 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.2 ถึง 2.0 กก./ชม.-กิโลวัตต์ และขนาดฟองอากาศประมาณ 2.0 ถึง 2.5 มม. โดยทั่วไปถูกออกแบบให้สามารถจ่ายอากาศได้ในอัตรา 0.1 ถึง 0.4 ลบ.ม./นาที-อุปกรณ์ ข้อดีของอุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้ คือ มีความสามารถในการกวนผสมน้ำได้อย่างทั่วถึง สามารถปรับอัตราการไหลของอากาศที่เติมให้กับระบบได้ในวงกว้าง และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงทำให้ประหยัดพลังงานมากกว่าอุปกรณ์ชนิดฟองอากาศขนาดใหญ่ แต่มีข้อเสีย คือ มีราคาแพงทั้งค่าวัสดุและค่าบำรุงรักษา และเกิดการอุดตันได้ง่ายเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็ก จึงควรติดตั้งเครื่องกรองอากาศก่อนเป่าอากาศเข้าอุปกรณ์กระจายอากาศ



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

ที่มา : Triveni : ENGINEERING AND INDUSTRIES LTD. (ออนไลน์), 2003

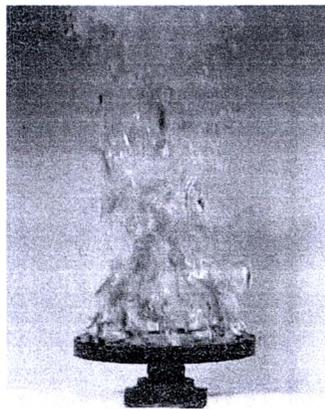
1.2) ฟองอากาศขนาดกลาง (Medium bubble)

อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีรูพรุนขนาดกลาง โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นท่อซึ่งผลิตมาจากเหล็กไร้สนิม (Stainless steel) เจาะเป็นรูและหุ้มด้วยถุงผ้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7.5 ซม. และมีความยาวประมาณ 61 ซม. อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 6 ถึง 15 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.0 ถึง 1.6 กก./ชม.-กิโลวัตต์ และมีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 มม. เล็กน้อย ข้อดีของอุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้ คือ มีความสามารถในการกวนผสมน้ำได้อย่างทั่วถึง ค่าบำรุงรักษาถูกเนื่องจากการเปลี่ยนถุงหุ้มท่อเท่านั้น แต่

มีข้อเสีย คือ ราคาตัววัสดุแพง และควรมีการติดตั้งเครื่องกรองอากาศก่อนเป่าอากาศเข้าอุปกรณ์กระจายอากาศเพื่อป้องกันการอุดตันภายในอุปกรณ์

1.3) ฟองอากาศขนาดใหญ่ (Coarse bubble)

อุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้มีรูขนาดใหญ่ อาจมีลักษณะเป็นท่อหรือโดม มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างต่ำโดยมีค่าประมาณร้อยละ 4 ถึง 8 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 0.6 ถึง 1.2 กก./ชม.-กิโลวัตต์ และมีขนาดฟองอากาศใหญ่กว่า 2.5 มม. ข้อดีของอุปกรณ์กระจายอากาศประเภทนี้คือ เกิดการอุดตันได้ยากจึงมีค่าบำรุงรักษาถูก ไม่จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องกรองอากาศ และมีความสามารถในการกวนผสมสูง แต่มีข้อเสีย คือ มีราคาแพง และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำมาก



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟองอากาศขนาดใหญ่

ที่มา : ENVIRONMENTAL DYNAMICS INC. (ออนไลน์), 2005

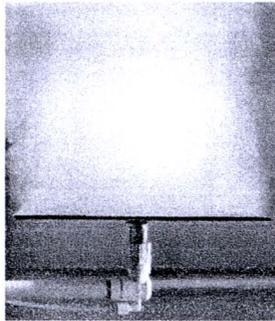
2.) แบ่งตามลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์กระจายอากาศ

2.1) ชนิดรูพรุนขนาดเล็ก (Porous diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูพรุนขนาดเล็กโดยทั่วไปผลิตจากวัสดุที่มีรูพรุนจำนวนมาก เช่น เซรามิก พลาสติกทั้งชนิดแข็งและยืดหยุ่น ยาง และวัสดุหุ้มด้วยถุงผ้า เป็นต้น เมื่ออากาศถูกอัดผ่านรูพรุนขนาดเล็กจึงเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก และมีการถ่ายเทออกซิเจนที่ดี แต่รูพรุนขนาดเล็กทำให้เกิดการอุดตันได้ง่ายจากสิ่งเจือปนประเภทฝุ่นในอากาศ จึงควรติดตั้งอุปกรณ์กำจัดฝุ่นประเภทถุงกรอง (Bag filter) หรือเครื่องกรองฝุ่นชนิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic filter) บริเวณขาเข้าของเครื่องเป่าอากาศ อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดนี้มักมีรูปร่างลักษณะหลากหลาย เช่น ชนิดแผ่น ชนิดท่อ ชนิดโดม และชนิดแผ่นจาน เป็นต้น มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 6 ถึง 30 มีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.0 ถึง 2.0 กก./ชม.-กิโลวัตต์

2.1.1) ชนิดแผ่น (Plate diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่นอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูปวงรีขนาดเล็กผลิตจากเซรามิกมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 30 ซม. ยาว 30 ซม. และหนาประมาณ 2.5 ถึง 3.8 ซม. อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดนี้จะถูกติดตั้งที่พื้นของถังเติมอากาศ และจัดเรียงเป็นกลุ่มๆ ให้กระจายทั่วบริเวณพื้น เติมน้ำอากาศเพื่อลำเลียงไปยังอุปกรณ์แต่ละกลุ่มและมีวาล์วควบคุมการปิดเปิดของแต่ละกลุ่ม ข้อเสียของระบบเติมอากาศแบบนี้ คือ การกระจายตัวของฟองอากาศจากอุปกรณ์กระจายอากาศแต่ละกลุ่มอาจไม่เท่ากันหรือไม่สม่ำเสมอ มีความยุ่งยากในการบำรุงรักษาเนื่องจากอุปกรณ์ถูกติดตั้งอยู่ที่พื้นของถังเติมอากาศ และกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณพื้นจึงมีความยุ่งยากในการถอดอุปกรณ์ขึ้นมาบำรุงรักษา และมีความยุ่งยากมากในกรณีที่ต้องการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์กระจายอากาศซึ่งต้องจัดเรียงอุปกรณ์และท่ออากาศใหม่ จึงไม่นิยมใช้ระบบเติมอากาศแบบนี้ แต่มีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง และมีอายุการใช้งานนาน



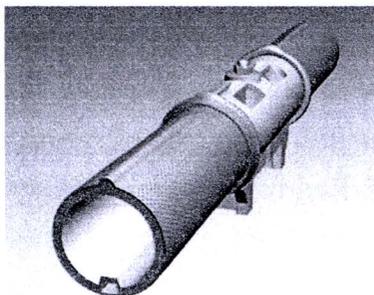
รูปที่ 2.8 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่น

ที่มา : ALAB, LLC : QuickPure™ TECHNOLOGIES (ออนไลน์), 1996

2.1.2) ชนิดท่อ (Tube diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่ออยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูปวงรีขนาดเล็กผลิตจากวัสดุประเภทอะลูมิเนียมออกไซด์ หรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยอาจเป็นท่อแข็งหรือท่อยืดหยุ่นก็ได้ มีความยาวประมาณ 50 ถึง 60 ซม. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 6.5 ถึง 7.5 ซม. และมีความหนาของผนังท่อประมาณ 0.6 ถึง 2.5 มม. โดยทั่วไปอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อที่มีขนาดดังกล่าวสามารถทำงานได้ในช่วงอัตราการไหลของอากาศประมาณ 0.5 ถึง 4.7 ลิตร/วินาที ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่กว้าง ลักษณะที่เป็นท่อจึงสามารถติดตั้ง และเคลื่อนย้ายได้ง่าย การถอดอุปกรณ์ขึ้นมาบำรุงรักษาทำได้ง่ายกว่าอุปกรณ์ชนิดแผ่น จึงสามารถเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ในถังเติมอากาศ และจัดเรียงอุปกรณ์ใหม่ได้สะดวกทำให้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย กรณีอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อที่มีความยืดหยุ่นหรือโค้งงอได้ทำให้สามารถติดตั้งในถังเติมอากาศที่มีรูปทรงต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย หรือติดตั้ง

หลบหลีกสิ่งกีดขวางได้อย่างสะดวก แต่ข้อเสียของอุปกรณ์ชนิดนี้ คือ มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่า และมีอายุการใช้งานสั้นกว่าอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่น

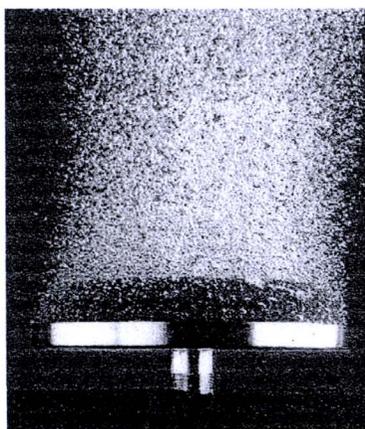


รูปที่ 2.9 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดท่อ

ที่มา : HYDRO-LOGIC ENVIRONMENTAL (ออนไลน์), 2001

2.1.3) ชนิดโดม (Dome diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดโดมอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูพรุนขนาดเล็กมีลักษณะเป็นแผ่นจานวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 18 ซม. และความหนาประมาณ 3.8 ซม. ที่กึ่งกลางของแผ่นมีวัสดุซึ่งมีรูพรุนติดตั้งอยู่ทำหน้าที่เป็นตัวกระจายอากาศ บางชนิดผลิตจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เมื่อหยุดเติมอากาศแผ่นยืดหยุ่นนี้จะยุบตัวลงเป็นระนาบเรียบ ความยืดหยุ่นของแผ่นทำให้ขนาดรูหดตัวลงจนปิดสนิทซึ่งช่วยป้องกันการอุดตันขณะหยุดเติมอากาศ เมื่อเริ่มเติมอากาศแผ่นยืดหยุ่นจะพองขึ้นตามความดันอากาศจนมีลักษณะเป็นรูปโดม ขนาดรูที่ขยายใหญ่ขึ้นจึงกระจายอากาศเป็นฟองขนาดเล็กได้ การขยายและหดตัวของแผ่นยืดหยุ่นตลอดการใช้งานทำให้ขนาดของรูใหญ่ขึ้น และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำลงเมื่อถูกใช้งานเป็นเวลานาน อายุการใช้งานของอุปกรณ์ชนิดนี้จึงสั้นกว่าชนิดอื่น

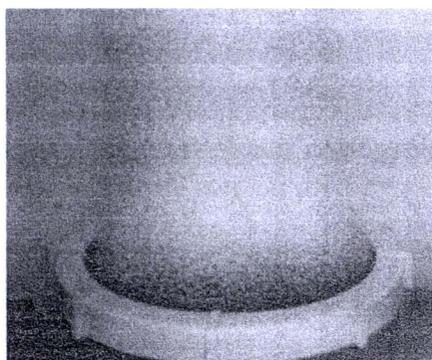


รูปที่ 2.10 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดโดม

ที่มา : Spartan Environmental Technologies : Air and Water Treatment (ออนไลน์), 2004

2.1.4) ชนิดแผ่นจาน (Disc diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่นจานอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูพรุนขนาดเล็กมีลักษณะเป็นแผ่นจานวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 18 ถึง 24 ซม. และมีความหนาประมาณ 1.3 ถึง 1.9 ซม. ผลิตจากวัสดุประเภทเซรามิก อะลูมินัมออกไซด์ หรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกติดตั้งกับท่ออากาศที่กั้นถังเติมอากาศ มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูง และมีอายุการใช้งานนานเช่นเดียวกับอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่น แต่มีความยุ่งยากในการบำรุงรักษาเช่นเดียวกันด้วย



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดแผ่นจาน

ที่มา : BRIGHTWATER F.L.I. : WATER AND WASTEWATER TREATMENT (ออนไลน์), 2007

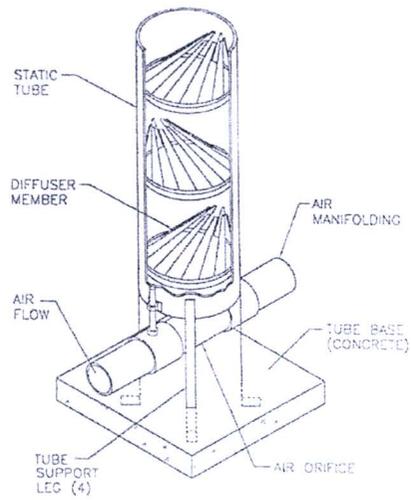
2.2) ชนิดไม่มีรูพรุน (Nonporous diffusers)

อุปกรณ์กระจายอากาศชนิดไม่มีรูพรุน คืออุปกรณ์กระจายอากาศที่ถูกออกแบบให้มีรูปร่างที่บิดเบี้ยวหรือเป็นเกลียว เพื่อสร้างความปั่นป่วนหรือแรงเฉือนต่ออากาศที่ไหลผ่านทำให้เกิดเป็นฟองอากาศ ในปัจจุบันอุปกรณ์ชนิดนี้มีอยู่หลายชนิด เช่น ฟิกซ์ออริฟิส (Fixed orifice) วาล์วออริฟิส (Valved orifice) สแตติกทิวบ์ (Static tube) เพอร์ฟอเรทฮอส (Perforated hose) และสลิตทิวบ์ (Slotted tube) เป็นต้น อุปกรณ์ชนิดนี้สร้างฟองอากาศขนาดใหญ่กว่าอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดรูพรุนขนาดเล็กจึงมีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำกว่า โดยทั่วไปอุปกรณ์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 4 ถึง 8 และมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 0.6 ถึง 1.0 กก./ชม.-กิโลวัตต์ แต่ชนิดสแตติกทิวบ์มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าคือร้อยละ 7 ถึง 10 และมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะมาตรฐานประมาณ 1.2 ถึง 1.6 กก./ชม.-กิโลวัตต์ ข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ มีราคาถูกและมีการบำรุงรักษาได้ง่ายกว่าเนื่องจากไม่มีรูพรุนหรือมีรูเติมอากาศขนาดใหญ่กว่าจึงอุดตันได้ยาก



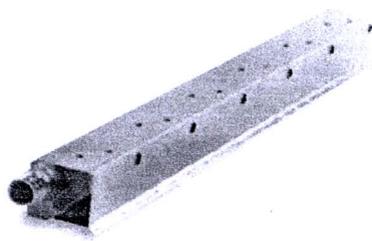
รูปที่ 2.12 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดฟลักซ์ออริฟิส

ที่มา : SIEMENS (ออนไลน์), 2010



รูปที่ 2.13 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดสแตติกทิวบ์

ที่มา : VENTUSE (ออนไลน์), 2001



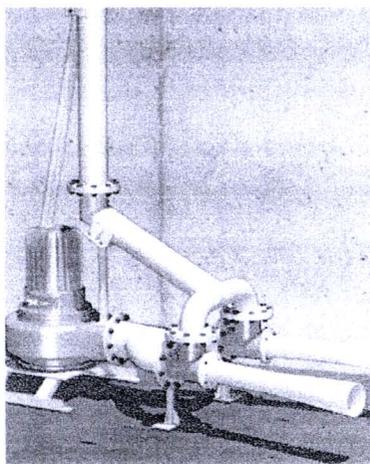
รูปที่ 2.14 ภาพแสดงอุปกรณ์กระจายอากาศชนิดสลิตทิวบ์

ที่มา : ERE CORPORATE (ออนไลน์), 2009

2.3) อุปกรณ์เติมอากาศประเภทอื่นๆ

2.3.1) อุปกรณ์เติมอากาศชนิดเจ็ท (Jet aerator)

อุปกรณ์เติมอากาศชนิดเจ็ทเป็นอุปกรณ์เติมอากาศที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างสูง สามารถสร้างฟองอากาศให้มีขนาดอยู่ในช่วงขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ โดยการผสมระหว่างอากาศที่ถูกอัดเข้าอุปกรณ์กับน้ำที่ถูกสูบเข้าไปพร้อมกัน เมื่ออากาศกับน้ำผสมกันที่ช่องแคบ (Nozzle) ในอุปกรณ์ทำให้เกิดความเร็วสูงแล้วจึงถูกฉีดพ่นออกมาภายนอกอุปกรณ์ โดยทั่วไปอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกติดตั้งไว้บริเวณใกล้พื้นของถังเติมอากาศ นิยมใช้กับถังเติมอากาศที่มีความลึกมากประมาณ 7 ถึง 8 ม. มีราคาค่อนข้างแพง มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 10 ถึง 25 และมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลประมาณ 1.2 ถึง 2.4 กก./ชม.-กิโลวัตต์

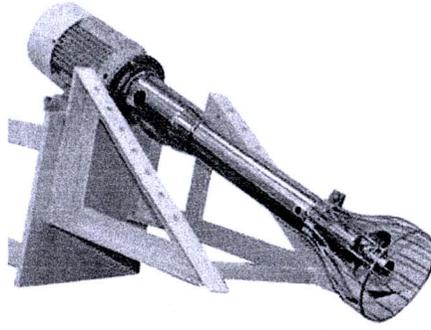


รูปที่ 2.15 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดเจ็ท

ที่มา : FLYMAR LTD. (ออนไลน์), 2008

2.3.2) อุปกรณ์เติมอากาศชนิดแอสไพเรติง (Aspirating aerator)

อุปกรณ์เติมอากาศชนิดแอสไพเรติงเป็นอุปกรณ์เติมอากาศที่ใช้มอเตอร์หมุนแกนซึ่งติดตั้งอยู่กลางท่ออากาศ เพื่อดูดอากาศจากภายนอกเข้าสู่ท่อแล้วฉีดพ่นลงน้ำ โดยอาศัยความเร็วของการหมุนรอบแกน ทำให้อากาศมีความเร็วจึงสร้างความปั่นป่วนเกิดเป็นฟองอากาศขณะถูกฉีดพ่นได้น้ำ และเกิดการกวนผสมระหว่างอากาศกับน้ำ โดยทั่วไปอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกติดตั้งไว้กับโครงสร้างเหนือผิวน้ำ หรือติดตั้งบนทุ่นลอยน้ำให้ปลายท่ออากาศจุ่มอยู่ใต้น้ำ สามารถทำงานได้กับถังเติมอากาศที่มีความลึกไม่เกิน 3.5 ม. มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 9 ถึง 12 และมีอัตราการถ่ายเทออกซิเจน ณ สภาวะสมดุลประมาณ 1.5 กก./ชม.-กิโลวัตต์

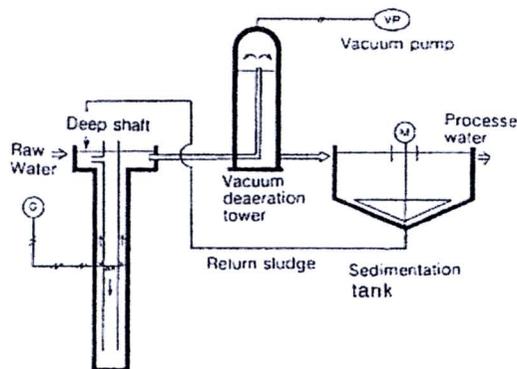


รูปที่ 2.16 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศชนิดแอสไปเรติง

ที่มา : GRG ENVIRO SOUND SOLUTIONS (P) LTD. (ออนไลน์), 2009

2.3.3) ระบบเติมอากาศแบบยูทิวบ์ (U-tube aerator)

ระบบเติมอากาศแบบยูทิวบ์คือระบบเติมอากาศในถังเติมอากาศที่มีความลึกมากจากระดับพื้นดิน ถังเติมอากาศมีลักษณะเป็นถังแคบแต่มีความลึกประมาณ 120 ถึง 150 ม. ที่ระดับความลึกมากจะมีความดันสูงทำให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนสูงมากขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน การไหลของน้ำภายในถังเติมอากาศมีลักษณะเป็นแบบปลั๊กโฟลว์ (Plug flow) ไหลวนตามแนวตั้งจากผิวน้ำลงสู่ก้นถังที่มีความดันสูง แล้วไหลย้อนขึ้นสู่อีกครั้งก่อนถูกระบายออกจากถังเติมอากาศ มีอุปกรณ์เติมอากาศติดตั้งอยู่ระหว่างทางของการไหล และเติมอากาศสวนทางกับทิศทางการไหลของน้ำเพื่อสร้างความปั่นและการกวนผสมระหว่างอากาศกับน้ำ ระบบเติมอากาศแบบนี้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงมากจึงเหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีสูง (Biochemical oxygen demand, BOD) แต่มีข้อเสีย คือ ใช้พลังงานในการเติมอากาศมาก ค่าบำรุงรักษา และค่าก่อสร้างถังเติมอากาศแพง



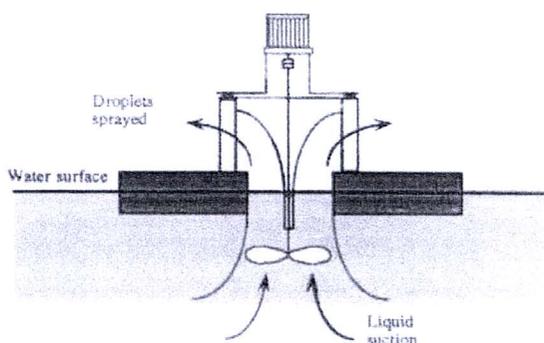
รูปที่ 2.17 ภาพแสดงระบบเติมอากาศแบบยูทิวบ์

ที่มา : Japanese Advanced Environment Equipment (JSIM) (ออนไลน์), 2001

2.16.2 อุปกรณ์เติมอากาศทางกล (Mechanical aeration)

1.) อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้ง (Surface mechanical aerator with vertical axis)

คือ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ลอยอยู่บนผิวน้ำมีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวตั้ง อุปกรณ์อาจถูกยึดกับโครงสร้างถาวรหรือสามารถลอยน้ำได้ด้วยตัวเอง เติมอากาศโดยใช้ใบพัดหมุนตีน้ำ บริเวณผิวน้ำให้เกิดความปั่นป่วน และเกิดการพลิกกลับของชั้นน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำอย่างทั่วถึงและเกิดการถ่ายเทออกซิเจน

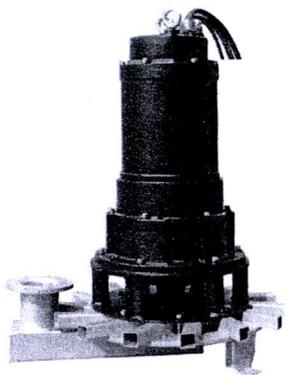


รูปที่ 2.18 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวตั้ง

ที่มา : FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY (ออนไลน์), 2000

2.) อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวตั้ง (Submerged mechanical aerator with vertical axis)

คือ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ถูกจุ่มลงใต้น้ำเติมอากาศโดยใช้อุปกรณ์กระจายอากาศ และมีกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวตั้งเหนืออุปกรณ์กระจายอากาศ ติดตั้งมอเตอร์ไว้เหนือผิวน้ำเพื่อหมุนแกนของกังหัน เมื่อการหมุนกังหันด้วยความเร็วทำให้เกิดความปั่นป่วนและแรงเฉือนต่อฟองอากาศที่ถูกสร้างจากอุปกรณ์กระจายอากาศ ทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กลงและฟุ้งกระจายทั่วถึงเติมอากาศ จึงเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสและระยะเวลาสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เทอร์ไบน์แอเรชันยูนิต (Turbine aeration unit)

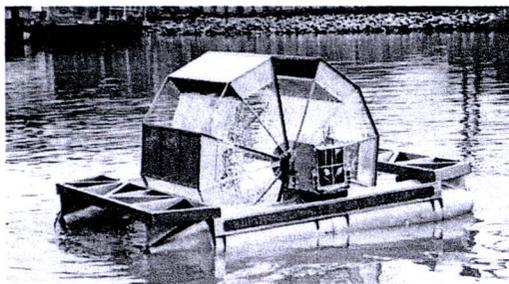


รูปที่ 2.19 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวตั้ง

ที่มา : Nanjing DeTech Pumps Co., Ltd. (ออนไลน์) , 2007

3.) อุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน (Surface mechanical aerator with horizontal axis)

คือ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ลอยอยู่บนผิวน้ำมีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวนอน ใบพัดอาจผลิตจากเหล็กกันสนิมขนาดเล็กติดตั้งรอบแกนหมุนจำนวนหลายแผ่น บางส่วนของใบพัดจมอยู่ใต้น้ำเมื่อใบพัดหมุนจึงตักน้ำให้เกิดการปั่นป่วน น้ำบางส่วนกระจายเป็นหยดน้ำในอากาศขณะเดียวกันอากาศบางส่วนถูกพัดลงสู่ใต้น้ำ ทั้งสองเหตุการณ์ทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำและเกิดการถ่ายเทออกซิเจนอย่างทั่วถึง โดยทั่วไปนิยมใช้ในถังเติมอากาศแบบคลองวนเวียน (Oxidation ditch)

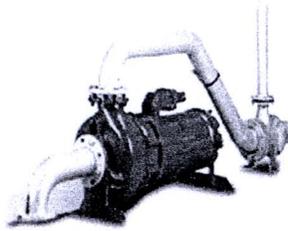


รูปที่ 2.20 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน (กังหันชัยพัฒนา)

ที่มา : มูลนิธิชัยพัฒนา (ออนไลน์), 2531

4.) อุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวนอน (Submerged mechanical aerator with horizontal axis)

คือ อุปกรณ์เติมอากาศทางกลที่ถูกจุ่มลงใต้น้ำมีใบพัดหรือกังหันติดตั้งกับแกนหมุนในแนวนอน เช่นเดียวกับอุปกรณ์เติมอากาศทางกลบนผิวน้ำในแนวนอน แต่ทำงานอยู่ใต้น้ำและมีลักษณะของใบพัดแตกต่างกันเล็กน้อย มีหลักการเติมอากาศคล้ายกับแต่การหมุนแกนใช้มอเตอร์และแกนเพลลาที่ต้องมีกำลังมากกว่า



รูปที่ 2.21 ภาพแสดงอุปกรณ์เติมอากาศทางกลใต้น้ำในแนวนอน

ที่มา : Triumph Machinery Corporation (ออนไลน์), 1971

2.16.3 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)

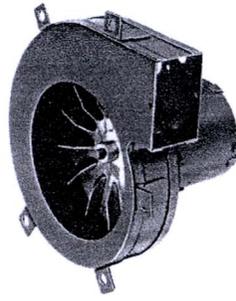
เครื่องเป่าอากาศ คือ อุปกรณ์ที่ดึงอากาศจากภายนอกแล้วเป่าหรืออัดเข้าไปในท่ออากาศเพื่อลำเลียงอากาศไปใช้ประโยชน์ตามต้องการ โดยอาศัยแรงดูดจากการหมุนของใบพัด หรือใช้แรงเหวี่ยงของกังหันเพื่อถ่ายเทอากาศไปในทิศทางที่ต้องการ เครื่องเป่าอากาศที่ใช้ในการเติมอากาศมีหลายประเภท ซึ่งอาจแบ่งประเภทของเครื่องเป่าอากาศได้ 2 ลักษณะดังนี้

1.) แบ่งตามความดันที่สร้างได้

- 1.1) พัดลม (Fan) คือ เครื่องเป่าอากาศที่สามารถสร้างความดันประมาณ 0.14 บรรยากาศ หรือประมาณ 2 ปอนด์/ตร.นิ้ว
- 1.2) เครื่องเป่าอากาศ (Blower) คือ เครื่องเป่าอากาศที่สามารถสร้างความดันสูงถึง 1 บรรยากาศ หรือ 15 ปอนด์/ตร.นิ้ว
- 1.3) เครื่องอัดอากาศ (Compressor) คือ เครื่องเป่าอากาศที่สามารถสร้างความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ หรือมากกว่า 15 ปอนด์/ตร.นิ้ว

2.) แบ่งตามกลไกการสร้างความดัน

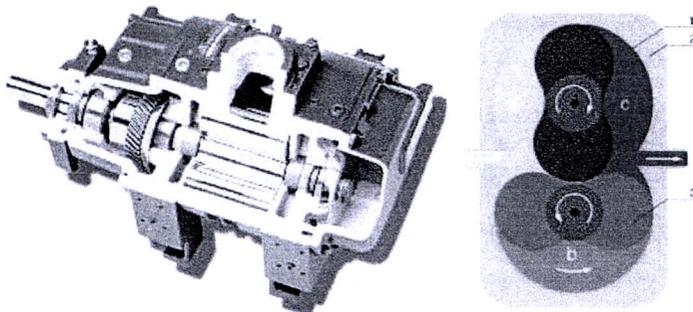
- 2.1) เครื่องเป่าอากาศชนิดเซนตริฟูกอล (Centrifugal blower) คือ เครื่องเป่าอากาศชนิดอาศัยแรงเหวี่ยงของกังหันภายในเครื่องเพื่อเหวี่ยงอากาศเข้าสู่ท่ออากาศขาออกและเกิดความดัน เป็นชนิดที่นิยมใช้ในงานเติมอากาศ เนื่องจากทำงานได้ที่อัตราการไหลมากกว่า 425 ลบ.ม./นาที และมีความดันประมาณ 48 ถึง 62 กิโลปาสกาล หรือ 7 ถึง 9 ปอนด์/ตร.นิ้ว



รูปที่ 2.22 ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดเซนตริฟูกอล

ที่มา : CSH INC. (ออนไลน์), 2006

2.2) เครื่องเป่าอากาศชนิดโรตารีโลบ (Rotary lobe blower) คือ เครื่องเป่าอากาศชนิดอาศัยการหมุนของเฟืองซึ่งถูกออกแบบให้มีช่องว่างที่สามารถกักอากาศได้ เมื่อเฟืองหมุนจะกักอากาศจากขาเข้าของเครื่องแล้วหมุนไปปล่อยทางขาออก เครื่องเป่าอากาศชนิดนี้ทำงานได้ที่อัตราการไหลของอากาศต่ำกว่า 425 ลบ.ม./นาที และมีความดันมากกว่า 55 กิโลปาสคาล หรือประมาณ 8 ปอนด์/ตร.นิ้ว

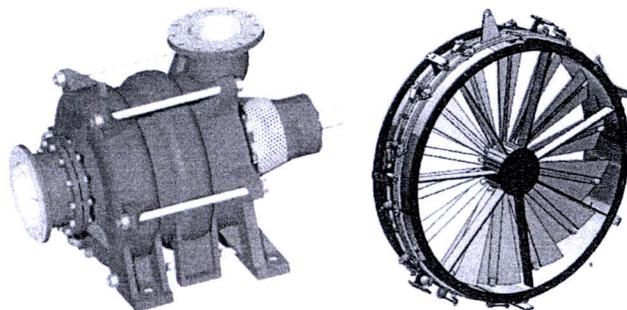


รูปที่ 2.23 ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดโรตารีโลบ

ที่มา : DIRECT INDUSTRY (ออนไลน์), 2005

2.3) เครื่องเป่าอากาศชนิดอินเล็ตไกด์แวนแวลูเอเบิลดิฟฟิวเซอร์ (Inlet guide vane-variable diffuser) คือ เครื่องเป่าอากาศชนิดอาศัยการหมุนของใบพัดซึ่งถูกติดตั้งไว้กลางช่องลมของเครื่องเป่าอากาศ เมื่อใบพัดหมุนจะดูดอากาศทางขาเข้าของเครื่องและเป่าออกทางขาออกโดยตรงทำให้เกิดการไหลของอากาศอย่างต่อเนื่อง เครื่องเป่าอากาศชนิดนี้สามารถปรับค่าอัตราการไหลของอากาศได้จึงมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีในสภาวะที่มีการแกว่งค่าของอุณหภูมิอากาศขาเข้า อัตราการไหลของอากาศขาออกและความดันที่ต้องการ ช่วงของอัตรา

การไหลที่สามารถทำงานได้คือ 85 ถึง 1,700 ลบ.ม./นาที และสร้างความดันได้สูงถึง 170 กิโลปาสคาล หรือ 25 ปอนด์/ตร.นิ้ว แต่มีข้อเสียคือราคาแพง และต้องการคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน



รูปที่ 2.24 ภาพแสดงเครื่องเป่าอากาศชนิดอินเล็ตไกด์เวนวาเรียเบิลฟิวเซอร์

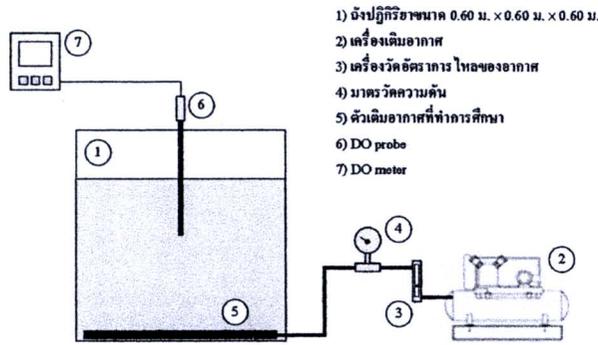
ที่มา : Grupa Poven-Wafapomp SA (ออนไลน์), 2006

2.16.4 ท่ออากาศ (Air piping)

ท่ออากาศในระบบเติมอากาศที่ใช้อุปกรณ์กระจายอากาศโดยทั่วไปประกอบด้วยท่อหลัก วาล์ว และอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ ใช้ลำเลียงอากาศไปยังอุปกรณ์กระจายอากาศที่ถูกติดตั้งอยู่ทั่วบริเวณถังเติมอากาศโดยอาศัยความดันจากเครื่องเป่าอากาศ ท่ออากาศควรผลิตจากวัสดุที่มีสมบัติทนต่อแรงต่างๆได้ดี สามารถป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำในถังเติมอากาศหรือสิ่งเจือปนในอากาศได้ เช่น ท่อเหล็กคาร์บอน ท่อเหล็กกัสนิม ท่อพลาสติกไฟเบอร์กลาส และท่อพีวีซี (Polyvinyl chloride, PVC) เป็นต้น สำหรับท่ออากาศที่ถูกติดตั้งภายในถังเติมอากาศอาจเลือกใช้ท่อเหล็กกัสนิม ท่อพีวีซี หรือท่อเอชดีพีอี (High density polyethylene, HDPE) ก็ได้เนื่องจากมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

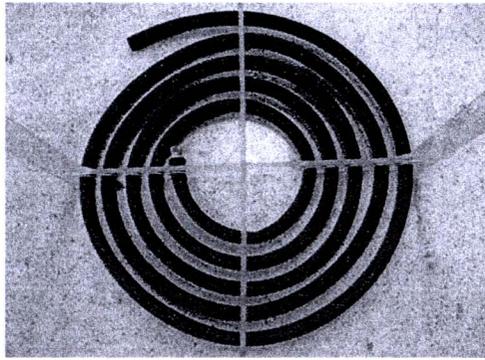
กชกร ก้องกังวาลย์ และคณะ (2552) ศึกษาอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่นในด้านการถ่ายเทออกซิเจน และอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ เพื่อการประยุกต์ใช้ท่อที่ยืดหยุ่นซึ่งผลิตจากของเสียประเภทยางในกระบวนการเติมอากาศ ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ถังเติมอากาศปริมาตร 140 ลิตร ขนาดกว้าง 0.6 ม. ยาว 0.6 ม. และสูง 0.6 ม. ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ภาพแสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ทำการทดลองเติมอากาศเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของท่อยืดหยุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ขนาด คือ 0.25 0.50 และ 0.75 นิ้ว ที่อัตราการเติมอากาศต่าง ๆ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ประกอบกับการศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศเพื่อการอธิบายการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน จากการศึกษาพบว่า

- 1.) อัตราการไหลของอากาศที่เติมให้กับระบบมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ
 - อัตราการไหล 5-10 ลิตร/นาที มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (Energy Efficiency, E_p) สูง แต่มีการกวนผสมต่ำจึงไม่เหมาะกับการบำบัดน้ำเสีย แต่เหมาะกับการเลี้ยงสัตว์น้ำ
 - อัตราการไหล 10-30 ลิตร/นาที มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และการกวนผสมสูงขึ้นจึงเหมาะกับการบำบัดน้ำเสีย
 - อัตราการไหลมากกว่า 30 ลิตร/นาที ไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนให้สูงขึ้น ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานลดลง มีการกวนผสมมากขึ้น แต่ยังไม่เหมาะกับการใช้งานจริงเพราะสิ้นเปลืองพลังงาน
- 2.) ท่อยืดหยุ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 นิ้วมีความเหมาะสมกับการใช้งานจริง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนประมาณ 60 1/ชั่วโมง ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนประมาณร้อยละ 20 และประสิทธิภาพเชิงพลังงานประมาณ 20 กก./ชั่วโมง-กิโวลต์ดี ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดในช่วงอัตราการไหล 10 ถึง 30 ลิตร/นาที



รูปที่ 2.26 ภาพแสดงรูปแบบการจัดเรียงท่อยึดหุ่นเป็นวงกลมรูปก้นหอย

- 3.) การจัดเรียงท่อยึดหุ่นในถังเดิมอากาศควรวางให้มีระยะห่างระหว่างท่อมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เพื่อป้องกันการรวมตัวของฟองอากาศซึ่งทำให้พื้นที่สัมผัสจำเพาะลดลง และการถ่ายเทออกซิเจนลดลงตามไปด้วย จากการศึกษาพบว่าความยาวของท่อที่ใช้คือ 4 ม. ต่อพื้นที่ก้นถังเดิมอากาศกว้าง 0.6 ม. และยาว 0.6 ม. มีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนสูงที่สุดโดยวางชุดเป็นวงกลมรูปก้นหอยดังรูปที่ 2.26

Devatine และ Mietton-Peuchot (2009) ศึกษาการคำนวณปริมาณการเติมออกซิเจนในกระบวนการผลิตไวน์ เนื่องจากกระบวนการหมักไวน์มีขั้นตอนการเติมออกซิเจนเพื่อเลี้ยงยีสต์และการปรับสีให้สม่ำเสมอ ซึ่งต้องเติมออกซิเจนให้เพียงพอกับความต้องการของยีสต์แต่ไม่ต้องการให้มีออกซิเจนสะสมในไวน์จึงต้องเติมออกซิเจนด้วยอัตราการไหลต่ำ แต่คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักจะละลายอยู่ในไวน์ทำให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนลดลงจนไม่เพียงพอกับความต้องการ งานวิจัยนี้ศึกษาการเติมออกซิเจนทั้งการเป่าด้วยอากาศและการเป่าด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ สำหรับการเป่าด้วยอากาศได้ศึกษาทั้งกรณีการถ่ายเทออกซิเจนต่ำจนไม่ทำให้ฟองอากาศลดขนาด และกรณีที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่มากจนทำให้เกิดการถ่ายเทออกซิเจนอย่างรวดเร็วและฟองอากาศลดขนาดลงขณะลอยขึ้น ทำการทดลองเติมอากาศทั้งในคอลัมน์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ซม. สูงประมาณ 7 ม. และถังเดิมอากาศรูปทรงกระบอกขนาดใหญ่ที่มีความลึกเท่ากัน

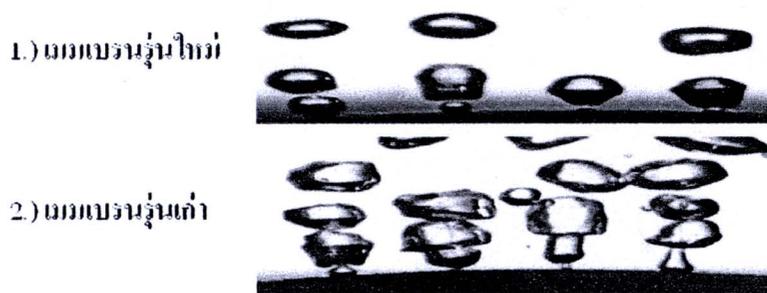
$$Y_{O_2} = \frac{k_L a \times C_S \times V}{Q_G \times \frac{P_{O_2}}{P_{atm}} \times M_{O_2}} = k_L \times \frac{18 \times \mu \times P_{atm} \times V_{mol}}{M_{O_2} \times H_{O_2}} \times \frac{6}{g(P_L - P_G)} \times \frac{H}{d_B^3} \quad (2.35)$$

จากการศึกษาพบว่าค่าประสิทธิภาพของการถ่ายเทออกซิเจน (Oxygen transfer yield, Y_{O_2}) หรือประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนมีความสัมพันธ์กับความสูงของระดับน้ำและขนาดฟองอากาศ ทำให้

สามารถคำนวณความสูงของน้ำที่ทำให้ค่ายิลด์เท่ากับ 1 หรือถ่ายเทออกซิเจนได้ทั้งหมดเมื่อทราบขนาดฟองอากาศ จากกรณีของการเติมอากาศที่มีการถ่ายเทออกซิเจนต่ำและฟองอากาศมีขนาดคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในห้องปฏิบัติการซึ่งใช้น้ำประปาและมีการถ่ายเทออกซิเจนค่อนข้างช้าจนฟองอากาศมีขนาดคงที่ การคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในถังเติมอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจึงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.35 ดังนั้นผลจากงานวิจัยนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศ และการออกแบบกระบวนการเติมอากาศในขั้นต้นได้

Hebrard และคณะ (2000) ศึกษาการวิเคราะห์ค่าตัวคูณปรับแก้อัลฟาในน้ำที่มีคุณภาพต่างกัน 3 ชนิด คือ น้ำเสีย น้ำส่วนบน (Supernatant) จากถังเติมอากาศ และน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถังตกตะกอนชั้นที่สอง โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในคอลัมน์เติมอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 ม. และสูงประมาณ 0.9 ม. เติมอากาศโดยใช้ก๊าซโพรเพนและวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทมวลสารของก๊าซโพรเพนกับก๊าซออกซิเจน เพื่อแปลงผลเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน จากผลการศึกษาพบว่า ตัวคูณปรับแก้อัลฟาในน้ำแต่ละชนิดมีค่าต่างกันเนื่องจากค่าแรงตึงผิวและสิ่งเจือปนในน้ำที่แตกต่างกัน วิเคราะห์ปริมาณสิ่งเจือปนในน้ำโดยใช้ค่าอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) ลักษณะน้ำที่แตกต่างกันส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลว และพื้นที่สัมผัสจำเพาะซึ่งทำให้ผลคูณจากตัวแปรทั้งสองเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนมีค่าแตกต่างกันด้วย เช่น ในน้ำเสียมีค่าแรงตึงผิวต่ำแสดงถึงน้ำถูกเจือปนด้วยสารลดแรงตึงผิว ทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กซึ่งมีพื้นที่สัมผัสมาก แต่สารลดแรงตึงผิวถูกดูดซับที่ผิวของฟองอากาศจึงมีความแข็งและขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้ายมวลผ่านชั้นกลางของเหลวต่ำลงมาก ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและค่าตัวคูณปรับแก้อัลฟาจึงต่ำลงด้วย สำหรับอัตราส่วนการถ่ายเทมวลสารของก๊าซทั้งสองในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 1.396 ± 0.091 การศึกษาลักษณะของน้ำที่เติมอากาศ เช่น แรงตึงผิวและปริมาณสารปนเปื้อนในน้ำ ควบคู่กับการวิเคราะห์ตัวคูณปรับแก้อัลฟาจึงมีความสำคัญเพื่ออธิบายการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน

Painmanakul และคณะ (2004) ศึกษาผลจากความแตกต่างทางสมบัติต่อการถ่ายเทออกซิเจนของเมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุประเภทยาง 2 ชนิด คือ เมมเบรนรุ่นเก่าที่ใช้อยู่เดิมและเมมเบรนรุ่นที่ผลิตใหม่ ซึ่งถูกใช้เป็นอุปกรณ์กระจายอากาศในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เพื่อเปรียบเทียบขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้น ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ และประสิทธิภาพการทำงานโดยใช้ค่าพื้นที่สัมผัสจำเพาะและปริมาณการใช้พลังงาน สมบัติที่สนใจศึกษา เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเติมอากาศ ความดันลด ความดันวิกฤต และความยืดหยุ่นที่ศูนย์กลางของเมมเบรน เป็นต้น ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้เมมเบรนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มม. ซึ่งถูกเจาะรู 1 รู และ 4 รู เติมอากาศในภาชนะแก้วรูปทรงสี่เหลี่ยมกว้าง 0.4 ม. ยาว 0.4 ม. และสูง 0.3 ม. ศึกษาขนาดฟองอากาศ ความถี่ของการเกิดฟองอากาศ และความยืดหยุ่นที่ศูนย์กลางของเมมเบรนโดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงมีความเร็วประมาณ 360 ภาพ/วินาที



รูปที่ 2.27 ภาพแสดงการเกิดฟองอากาศโดยเมฆเบรนนุ่นที่ถูกเจาะรู 4 รู

จากการศึกษาพบว่า เมฆเบรนนุ่น 2 ชนิดมีสมบัติแตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทออกซิเจน และการเกิดฟองอากาศ โดยเมฆเบรนนุ่นใหม่มีสมบัติความแข็งแรงมากกว่าและคล้ายคลึงกับอุปกรณ์เติมอากาศชนิดแข็ง มีขนาดรูเติมอากาศเล็กกว่า ผลของการมีความยืดหยุ่นน้อยจึงมีการขยายขนาดรูเติมอากาศตามอัตราการไหลของอากาศน้อย ทำให้สร้างฟองอากาศขนาดใหญ่แต่มีขนาดและความถี่ของการเกิดฟองอากาศสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.27 มีความยืดหยุ่นที่ศูนย์กลางของเมฆเบรนนุ่นน้อย และมีความดันลดน้อยกว่าแต่มีอัตราส่วนพื้นที่สัมผัสจำเพาะต่อพลังงานที่ใช้เท่ากับเมฆเบรนนุ่นเก่าจึงกล่าวได้ว่าใช้พลังงานเท่ากัน ดังนั้น การศึกษาสมบัติของอุปกรณ์เติมอากาศจึงมีความสำคัญต่อการเลือกใช้อุปกรณ์เติมอากาศ การออกแบบ และการพัฒนาอุปกรณ์เติมอากาศ ทั้งด้านประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน และพลังงานที่จำเป็น

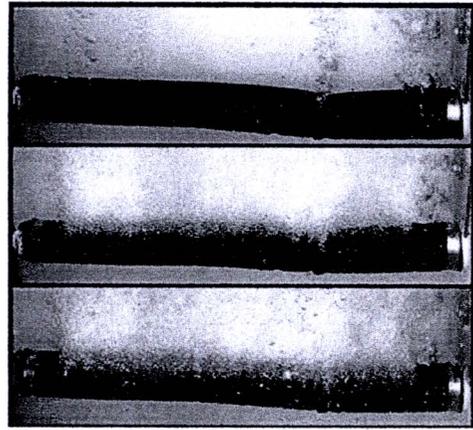
Painmanakul และ Jamnongwong (2007) ศึกษาการทำนายค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการถ่ายเทออกซิเจนหรือตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ ในงานวิจัยนี้ได้สนใจทำนายค่าขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ และพื้นที่สัมผัสจำเพาะโดยวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการเติมอากาศในคอลัมน์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 ม. และสูง 0.4 ม. ใช้เมฆเบรนนุ่นเป็นอุปกรณ์กระจายอากาศ ควบคู่กับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำเสนอในปัจจุบันดังแสดงในตารางที่ 2.3 ถึง 2.7 ซึ่งมาจากการศึกษาความสัมพันธ์ในระดับห้องปฏิบัติการหรือศึกษาความสัมพันธ์จากข้อมูลทฤษฎีโดยอ้างอิงจากทฤษฎี เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน อธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนของอุปกรณ์เติมอากาศ และความเหมาะสมของอุปกรณ์ในขั้นต้นได้ จากการศึกษาพบว่า อัตราการไหลของอากาศที่เติมให้กับระบบมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศซึ่งมีขนาดฟองอากาศเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ทำนายค่าตัวแปรอื่นๆ ขนาดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัว และพื้นที่สัมผัสจำเพาะสามารถทำนายได้โดยใช้สมการของ Leibson (1956) Mendelson (1967) และ Moustiri (2000) ตามลำดับ แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนระหว่างการวิเคราะห์กับการทำนายประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากข้อจำกัดของการใช้แบบจำลอง และปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทออกซิเจน จึงควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการทำนายที่แม่นยำมากขึ้น

Rosso และคณะ (2008) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเมมเบรนที่ถูกใช้เป็นอุปกรณ์กระจายอากาศ ชนิดฟองละเอียดเนื่องจากการอุดตันและการตกตะกอนที่บดนม ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำลง ความดันลดมีค่าสูงขึ้น และสิ้นเปลืองพลังงานในการเติมอากาศ โดยการศึกษาเมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุประเภทโพลีเมอร์สังเคราะห์ 3 ชนิด ทั้งก่อนและหลังการใช้งานในโรงงานบำบัดน้ำเสีย 2 แห่ง เมมเบรนจากโรงงานแห่งแรกมีอายุการใช้งานประมาณ 12 เดือน และเมมเบรนจากโรงงานอีกแห่งมีอายุการใช้งานประมาณ 7 ถึง 10 ปี วิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในห้องปฏิบัติการโดยเติมอากาศในถังขนาดกว้าง 0.915 ม. ยาว 0.610 ม. และสูง 0.610 ม. ประเมินการอุดตันโดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน วิเคราะห์ตัวคุณปรับแก้ของการอุดตัน และอัตราส่วนระหว่างความดันลดก่อนกับหลังการใช้งาน

อัตราการไหลของอากาศ 1.70 ลบ.ม. ชั่วโมง

อัตราการไหลของอากาศ 5.10 ลบ.ม. ชั่วโมง

อัตราการไหลของอากาศ 8.50 ลบ.ม. ชั่วโมง



รูปที่ 2.28 ภาพแสดงการเกิดฟองอากาศจากอุปกรณ์กระจายอากาศซึ่งถูกใช้งานเป็นระยะเวลานาน

จากการศึกษาพบว่าเมมเบรนที่ถูกใช้งานเป็นเวลานานจะเกิดการอุดตันทั้งภายนอกและภายในทำให้เมมเบรนมีสมบัติความแข็งแรงมากขึ้น เกิดการฉีกขาดตามรอยพับของเมมเบรนทำให้ขนาดรูเติมอากาศและฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น การเกิดฟองอากาศไม่สม่ำเสมอทั่วบริเวณเมมเบรนดังรูปที่ 2.28 จึงทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนต่ำลง การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเพื่อเพิ่มการถ่ายเทออกซิเจนให้เพียงพอส่งผลให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน หลังถูกใช้งานเมมเบรนมีค่าตัวคุณปรับแก้ของการอุดตันประมาณ 1.23 ถึง 1.3 และอัตราส่วนระหว่างความดันลดก่อนกับหลังการใช้งานประมาณ 2.2 เท่า จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการตรวจวัดค่าความดันลดระหว่างการเติมอากาศ การศึกษาสมบัติของอุปกรณ์เติมอากาศในช่วงการใช้งานมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบเติมอากาศ และการทำความสะอาดอุปกรณ์ ซึ่งวิธีวิเคราะห์การอุดตันในงานวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในเบื้องต้นได้ และการออกแบบระบบเติมอากาศที่รองรับผลกระทบจากการอุดตัน เพื่อการรักษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนให้คงที่และการประหยัดพลังงาน

Van Halem และคณะ (2008) ศึกษาการใช้เซรามิกเมมเบรนเคลือบด้วยสารประกอบเงินเพื่อกรองน้ำดื่มภายในบ้านเรือนอย่างยั่งยืน โดยการเก็บตัวอย่างจากหลายประเทศมาศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ สามารถผลิตได้ คุณภาพและปริมาณของน้ำที่ผ่านการกรอง การใช้งาน การทำความสะอาด และรอยเท้าทางนิเวศน์ (Environmental footprint) เพื่อให้กระบวนการกรองโดยเซรามิกเมมเบรนเป็นวิธีหนึ่งในการผลิตน้ำดื่มได้อย่างยั่งยืนโดยการผลิตเซรามิกเมมเบรนซึ่งใช้วัสดุที่มีในพื้นที่ สามารถกรองน้ำดื่มให้มีคุณภาพดีและมีปริมาณเพียงพอกับความต้องการ ต้นทุนการผลิตน้ำดื่มมีราคาถูก มีการใช้งานและการทำความสะอาดอย่างถูกวิธีเพื่ออายุการใช้งานที่ยาวนาน และไม่มีความเป็นพิษหรือทิ้งสิ่งตกค้างต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างการใช้งานและการกำจัดเมื่อหมดอายุการใช้งาน จากการศึกษาพบว่า เซรามิกเมมเบรนสามารถกรองจุลชีพก่อโรคได้ตามคุณภาพของน้ำดื่ม ความเข้มข้นของสารประกอบเงินที่ถูกชะมา กับน้ำดื่มมีค่าน้อยจนไม่เป็นอันตรายต่อผู้ดื่ม ปริมาณน้ำที่กรองได้ลดลงตามระยะเวลาการใช้งานเนื่องจากการอุดตัน ซึ่งเกิดจากการสะสมของสารอินทรีย์บริเวณผิวเมมเบรน การตกตะกอนของสารอินทรีย์ภายในรูเมมเบรน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และการอุดตันจากสารประเภทคอลลอยด์ การทำความสะอาดโดยวิธีการขัดไม่สามารเพิ่มอัตราการกรองได้ในระยะยาวเพราะเป็นการทำความสะอาดที่ผิวเท่านั้น หลังการขัดอัตราการกรองลดลงอย่างรวดเร็ว การนำเซรามิกเมมเบรนออกมาขัดบ่อยๆ ทำให้มีความเสี่ยงต่อการแตกหักซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานที่สั้นลง ในขณะที่การเป่าด้วยความดันสูงเป็นวิธีทำความสะอาดได้ในระยะยาวเพราะสามารถกำจัดการอุดตันได้ทั้งที่ผิวและภายในรูเมมเบรน หลังการเป่าอัตราการกรองจึงลดลงช้ากว่าวิธีอื่นๆ จากผลการศึกษาจึงมีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้การเป่าด้วยความดันสูงในการทำทำความสะอาดอุปกรณ์เติมอากาศชนิดท่อยืดหยุ่น ซึ่งมีรูพรุนคล้ายกับเซรามิกเมมเบรน เพื่อการทำทำความสะอาดทั้งที่ผิวท่อและภายในรูพรุน รักษาอายุการใช้งานให้ยาวนาน และไม่มีสารเคมีตกค้างต่อสิ่งแวดล้อม

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบถึงแนวทางการประยุกต์ใช้ท่อยืดหยุ่นเป็นอุปกรณ์เติมอากาศทั้งด้านการกำหนดช่วงอัตราการไหลของอากาศ การติดตั้งอุปกรณ์วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน และการจัดเรียงท่อยืดหยุ่นในถังเติมอากาศ เป็นต้น เพื่อประเมินประสิทธิภาพของอุปกรณ์เติมอากาศทั้งในด้านการถ่ายเทออกซิเจนและประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ทำให้ทราบถึงแนวทางการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์เติมอากาศเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพของอุปกรณ์กับกลไกการถ่ายเทออกซิเจน ทำให้ทราบถึงแนวทางการศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศเพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทออกซิเจนได้อย่างชัดเจน และทำให้ทราบถึงแนวทางการศึกษาผลกระทบจากการอุดตันและวิธีทำความสะอาดที่เหมาะสม ดังนั้น จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงใช้เป็นแนวทางในการออกแบบวิธีการทดลองในงานวิจัยนี้ เพื่อให้เกิดผลการทดลองที่สอดคล้องกับจุดประสงค์ของงานวิจัย และเกิดผลประโยชน์ดังที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้