



溶氧

台大生機系 朱元南

2017/10/19

內容

- 增氧原理
- 增氧技術與設備
- 純氧增氧系統

空氣的組成

- 氮氣(Nitrogen)
- 氧氣(Oxygen)
- 氬氣(Argon)
- 二氧化碳(Carbon dioxide)

Table 8.1 Dry Air Components

Species	% volume	% mass	Molecular Wt.
Nitrogen	78.084	75.600	28.0
Oxygen	20.946	23.200	32.0
CO ₂	0.032	0.048	44.0
Argon	0.934	1.300	39.9
Air	100.000	100.000	29.0

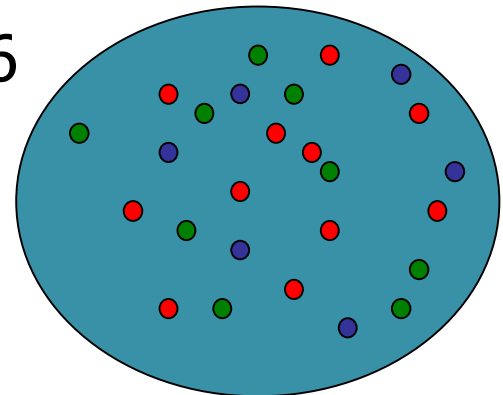
大氣壓力與組成氣體的分壓

- 大氣壓力(Barometric pressure, BP)是乾燥空氣中所有氣體分壓力的總合

$$BP = P(O_2) + P(N_2) + P(Ar) + P(CO_2)$$

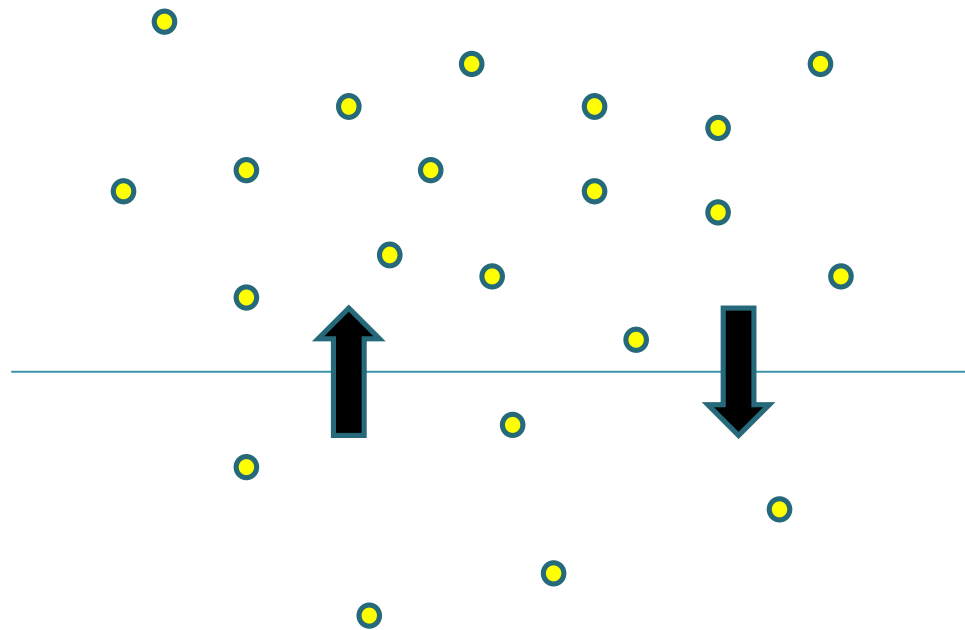
- 每種氣體的分壓與其所占的莫耳數比例成正比，例如氧氣的分壓為

$$\begin{aligned} P(O_2) &= BP * \chi(O_2) \\ &= 760 \text{ mm Hg} * 0.20946 \\ &= 159.2 \text{ mm Hg} \end{aligned}$$



水中溶解氣體的分壓

- 水中溶解氣體的分壓等於同一溫度下該氣體以氣態與水接觸時最後的平衡壓力



水蒸氣的分壓

- 水蒸氣的分壓(VP)隨溫度上升而增加
- 空氣包含水蒸氣，因此一般空氣中氣體的分壓為

$$P_i = \chi_i * (BP - VP)$$

Table 11-2. Vapor pressure of pure water at various temperatures.

Temperature (°C)	Vapor pressure (mm Hg)	Temperature (°C)	Vapor pressure (mm Hg)
0	4.579	18	15.477
1	4.926	19	16.477
2	5.294	20	17.535
3	5.685	21	18.650
4	6.101	22	19.827
5	6.543	23	21.068
6	7.013	24	22.377
7	7.513	25	23.756
8	8.045	26	25.209
9	8.609	27	26.739
10	9.209	28	28.349
11	9.844	29	30.043
12	10.518	30	31.824
13	11.231	31	33.695
14	11.987	32	35.663
15	12.788	33	37.729
16	13.634	34	39.898
17	14.530	35	42.175

Source: Boyd (1990) with permission.

氣體在水中的溶解率

- 氣體在水中的溶解率受到溫度、壓力、氣體成份和鹽度的影響

Table 11-1. Solubility of major atmospheric gases as a function of pressure and gas composition at 15°C.

Pressure (atm)	Gas composition	Gas solubility (mg/L)			
		Nitrogen	Oxygen	Argon	Carbon dioxide
1	air	16.36	10.08	0.62	0.69 ¹
1	pure gas	20.95	48.14	65.94	1,992.53
2	air	33.00	20.32	1.24	1.38 ¹
2	pure gas	42.26	97.02	133.01	3,979.36

¹ Based on a mole fraction of 0.000350 for air.

Source: J. Colt and C. Orwicz. Aeration in intensive culture. IN: D.E. Brune and J.R. Tomasso, eds. 1991. *Aquaculture and Water Quality*, World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA.

氧氣的溶解率

- 當空氣與水接觸，氧溶解到水中，直到氧在水中的分壓與氧在空氣中的分壓一致
- 氧氣的溶解在水中的氧的數量可以用溶氧率的飽合百分比表示

$$\% \text{ saturation} = (C_m / C_s) * 100$$

Where C_m = measured oxygen concentration,
 C_s = saturated oxygen concentration

淡水

海水

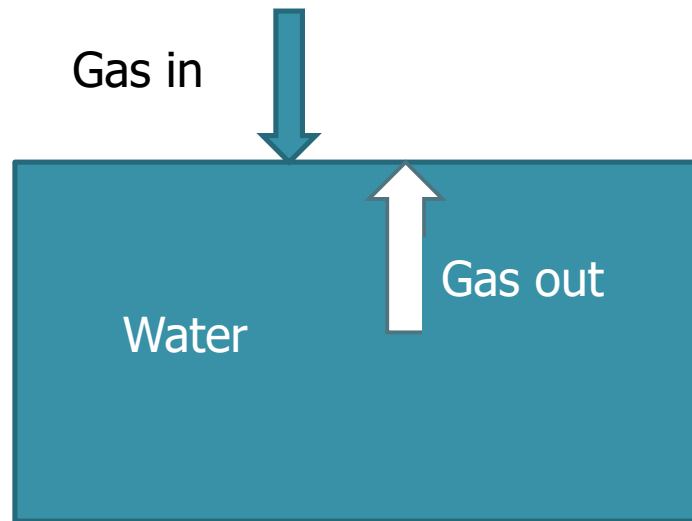
Table 2-4. Solubility of oxygen (mg/L) in water at different temperatures and salinities from moist air at 760 mm Hg.

(°C)	(°F)	Salinity (g/L)							
		0	5	10	15	20	25	30	35
0	32.0	14.60	14.11	13.64	13.18	12.74	12.31	11.90	11.50
1	33.8	14.2	13.72	13.27	12.82	12.40	11.98	11.58	11.20
2	35.6	13.81	13.36	12.91	12.49	12.07	11.67	11.29	10.91
3	37.4	13.44	13.00	12.58	12.16	11.76	11.38	11.00	10.64
4	39.2	13.09	12.67	12.25	11.85	11.47	11.09	10.73	10.38
5	41.0	12.76	12.34	11.94	11.56	11.18	10.82	10.47	10.13
6	42.8	12.44	12.04	11.65	11.27	10.91	10.56	10.22	9.89
7	44.6	12.13	11.74	11.36	11.00	10.65	10.31	9.98	9.66
8	46.4	11.83	11.46	11.09	10.74	10.40	10.07	9.75	9.44
9	48.2	11.55	11.18	10.83	10.49	10.16	9.84	9.53	9.23
10	50.0	11.28	10.92	10.58	10.25	9.93	9.62	9.32	9.03
11	51.8	11.02	10.67	10.34	10.02	9.71	9.41	9.12	8.83
12	53.6	10.77	10.43	10.11	9.80	9.50	9.21	8.92	8.65
13	55.4	10.52	10.20	9.89	9.59	9.29	9.01	8.73	8.47
14	57.2	10.29	9.98	9.68	9.38	9.10	8.82	8.56	8.30
15	59.0	10.07	9.77	9.47	9.19	8.91	8.64	8.38	8.13
16	60.8	9.86	9.56	9.28	9.00	8.73	8.47	8.21	7.97
17	62.6	9.65	9.36	9.09	8.82	8.55	8.30	8.05	7.81
18	64.4	9.45	9.17	8.90	8.64	8.39	8.14	7.90	7.66
19	66.2	9.26	8.99	8.73	8.47	8.22	7.98	7.75	7.52
20	68.0	9.08	8.81	8.56	8.31	8.07	7.83	7.60	7.38
21	69.8	8.90	8.64	8.39	8.15	7.91	7.68	7.46	7.25
22	71.6	8.73	8.48	8.23	8.00	7.77	7.54	7.33	7.12
23	73.4	8.56	8.32	8.08	7.85	7.63	7.41	7.20	6.99
24	75.2	8.40	8.16	7.93	7.71	7.49	7.28	7.07	6.87
25	77.0	8.24	8.01	7.79	7.57	7.36	7.15	6.95	6.75
26	78.8	8.09	7.87	7.65	7.44	7.23	7.02	6.83	6.64
27	80.6	7.95	7.73	7.51	7.31	7.10	6.91	6.72	6.53
28	82.4	7.81	7.59	7.38	7.18	6.98	6.79	6.61	6.42
29	84.2	7.67	7.46	7.26	7.06	6.87	6.68	6.50	6.32
30	86.0	7.54	7.34	7.14	6.94	6.76	6.57	6.39	6.22
31	87.8	7.41	7.21	7.02	6.83	6.64	6.47	6.29	6.12
32	89.6	7.29	7.09	6.90	6.72	6.54	6.36	6.19	6.03
33	91.4	7.17	6.98	6.79	6.61	6.43	6.26	6.10	5.94
34	93.2	7.05	6.86	6.68	6.51	6.34	6.17	6.01	5.85
35	95.0	6.93	6.75	6.58	6.40	6.24	6.07	5.91	5.76
36	96.8	6.82	6.65	6.47	6.31	6.14	5.98	5.83	5.68
37	98.6	6.72	6.54	6.37	6.21	6.05	5.89	5.74	5.59
38	100.4	6.61	6.44	6.28	6.12	5.96	5.81	5.66	5.51
39	102.2	6.51	6.34	6.18	6.02	5.87	5.72	5.58	5.44
40	104.0	6.41	6.25	6.09	5.94	5.79	5.64	5.50	5.36

Source: Colt (1984).

平衡

- 當氣體分子擴散到水中的速度等於氣體分子由水中擴散到空氣的速度，即稱為平衡，此時氣體在水中為飽合，其溶解度為 100%
- 過飽合：氣體溶解度 $> 100\%$ ，氣體由水中轉移到空氣中
- 未飽合：氣體溶解度 $< 100\%$ ，氣體由空氣中轉移到水中



高度與水壓的影響

- 氧氣的溶解率受到高度的影響，高度愈高，溶解率愈低

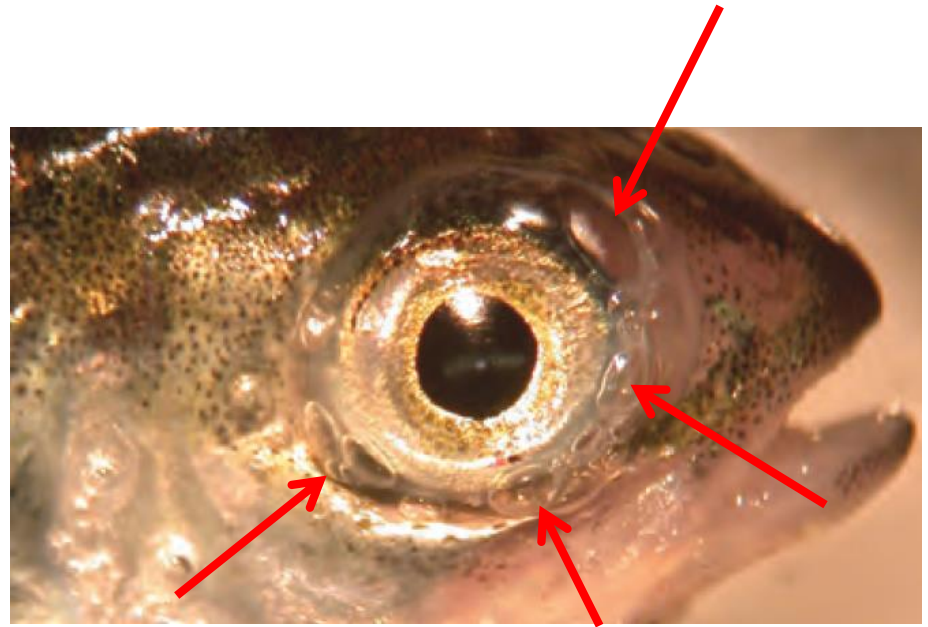
Table 11-3. Solubility of oxygen in water exposed to water-saturated air at various temperatures and elevations above mean sea level (MSL).

Temperature (°C)	Oxygen solubility, mg/L						
	Elevation, ft						
	0	500	1,000	1,500	2,000	3,000	4,000
0	14.60	14.34	14.09	13.84	13.59	13.12	12.65
1	14.20	13.95	13.70	13.46	13.22	12.75	12.30
2	13.81	13.57	13.33	13.09	12.86	12.41	11.97
3	13.45	13.21	12.97	12.74	12.52	12.07	11.65
4	13.09	12.86	12.63	12.41	12.19	11.76	11.34
5	12.76	12.53	12.31	12.09	11.87	11.46	11.05
10	11.28	11.08	10.88	10.68	10.49	10.12	9.76
15	10.07	9.89	9.71	9.54	9.37	9.04	8.71
20	9.08	8.91	8.75	8.59	8.44	8.14	7.84
25	8.24	8.09	7.95	7.80	7.66	7.38	7.12
30	7.54	7.40	7.26	7.13	7.00	6.74	6.50
35	6.93	6.81	6.68	6.55	6.43	6.19	5.96
40	6.41	6.29	6.17	6.05	5.94	5.71	5.49

Source: Weiss (1970).

產生溶氧過飽合的原因

- 室內池
 - 混入水中的空氣泡被泵浦加壓而溶進水中
 - 池水快速加熱
- 室外池
 - 光合作用
 - 白天快速增溫
 - 流水使壓力快速變化



氣泡病由水中氧氣和氮氣的過飽合造成

人為增氧

- 室內池由於水量少，增氧相對容易
- 室外池水量大，水流死角多，且耗氧有機物容易累積，故增氧效率差

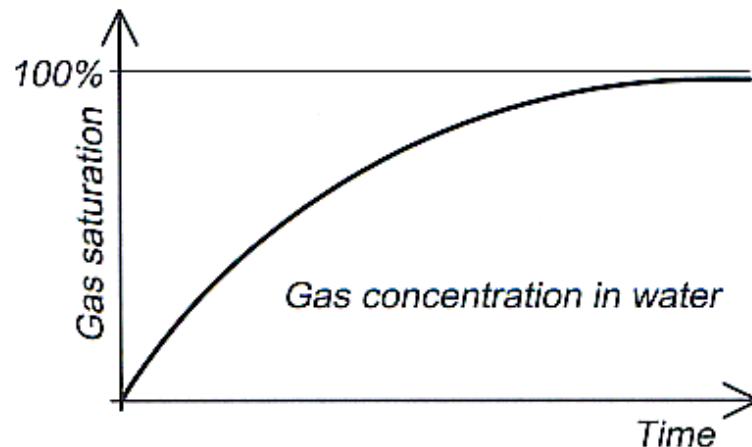


增氧曲線

- 氣體溶入水中的速度與水中氣體濃度與飽合濃度的差、氣液接觸面積成正比，與水的體積成反比

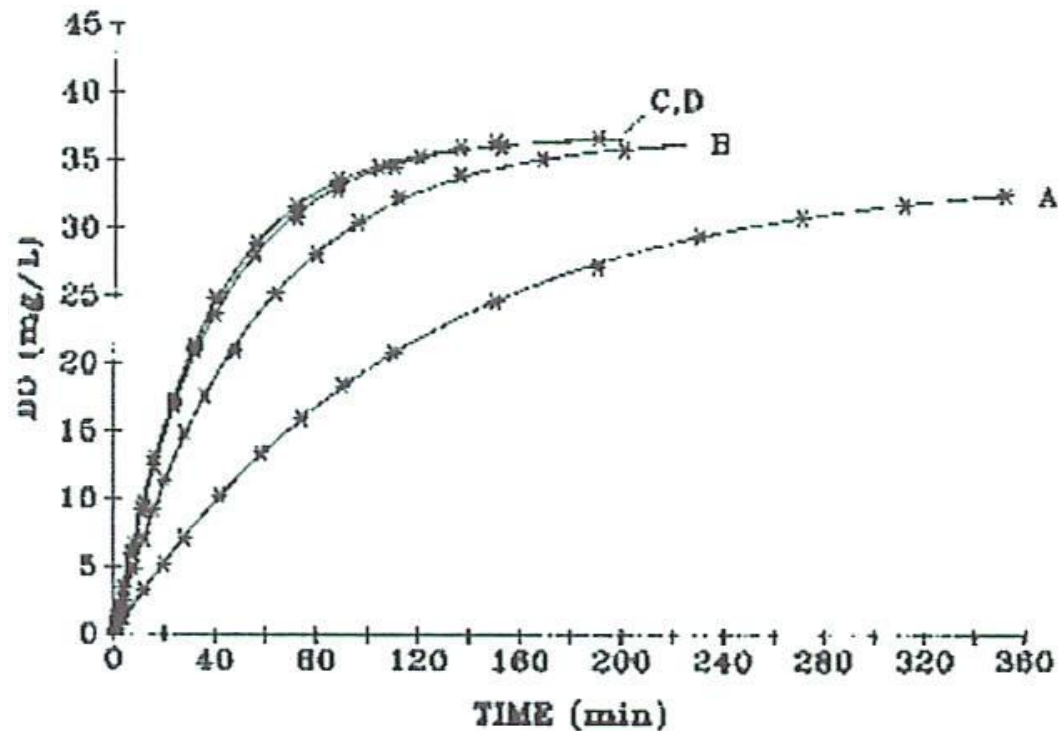
$$\frac{dc}{dt} = \frac{D A}{\Delta V} (C_s - C_m)$$

- 如圖，增氧開始時水中缺氧，此時增氧效率最高。隨著水中溶氧增加，增氧速度逐漸減少，直到水中溶氧飽合，之後不再增氧



增氧試驗

- 加氯化鈷(cobalt chloride) to 0.5 mg/L
- 加硫化鈉(sodium sulfide)直到溶氧降到零
- 開始增氧，記錄時間和溶氧
- 由數據取對數求出係數值



決定擴散係數

- 擴散係數通常以實驗決定

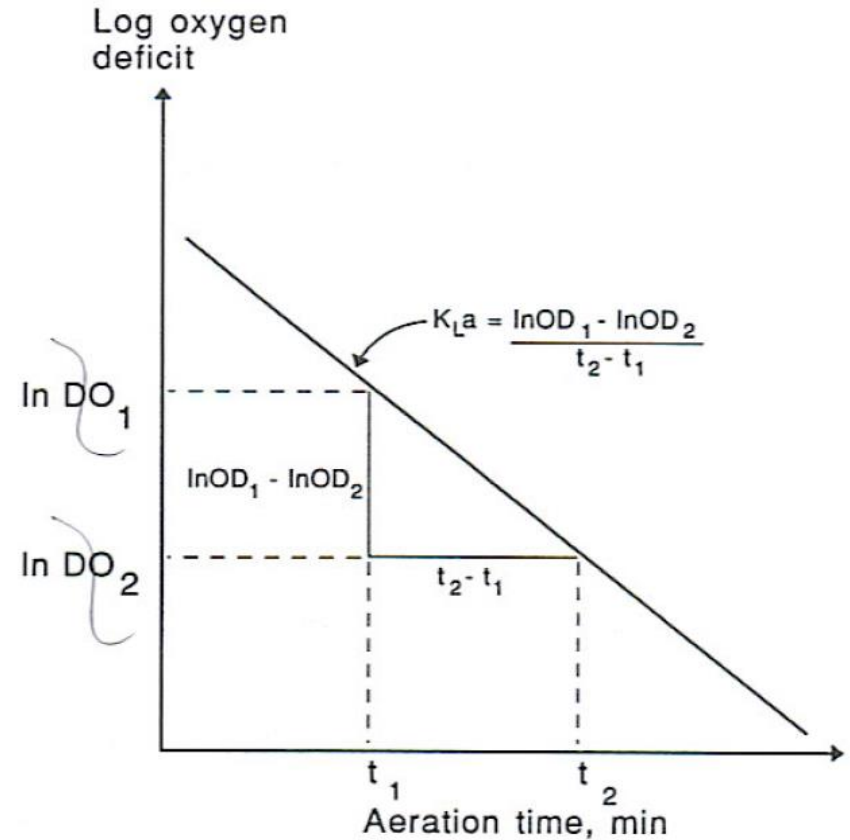
$$\frac{dc}{dt} = K_{La}(C_s - C_m)$$

$$K_{La} = \frac{\ln(OD)_1 - \ln(OD)_2}{t_2 - t_1}$$

- 考慮溫度效應

$$(K_La)_T = (K_La)_{20} \Theta^{(T-20)}$$

$$\Theta = 1.024$$



增氧機效率指標(SAE)

- 標準增氧效率(Standard Aeration Efficiency, SAE)：由增氧機消耗單位能量在標準條件下(溶氧0 mg/L，20°C，淨水)所能帶入水中的溶氧量(kg O₂ / kW-h)
SAE=SOTR/Power input
- 簡單來說，以一台SAE為1，功率為1 kW之的增氧機為例，運轉一天可以增氧24kg

真實增氧能力

- SAE的測試條件在真實情形必須查表調整，因為已經在養魚的池塘不能從0ppm開始增氧
- 如果水中溶氧已經飽合，則增氧機運轉再久也沒有任何效果。水中溶氧愈不足，增氧機效率愈高
- 白天池塘中由於光合作用，溶氧經常過飽合，此時增氧機反而將溶氧由水中排出到空氣中

估計真實增氧

- 根據下表可修正由SAE計算的增氧量，例如池水溶氧開始時是3ppm，20°C，則真實增氧能力為SAE值的62%。如果池塘溶氧在開始時是9ppm，即已接近飽和(9.08ppm)，則真實增氧為0%

Percentage of advertised oxygen transfer actually transferred to a pond based on water temperature and the dissolved oxygen level prior to adding the aeration device.

Existing Dissolved Oxygen Level in Water Being Aerated (mg/L or PPM)	50°F (10°C)	59°F (15°C)	68°F (20°C)	77°F (25°C)	86°F (30°C)
0	89%	90%	91%	92%	96%
1	82%	82%	82%	82%	82%
2	75%	73%	72%	72%	67%
3	67%	64%	62%	58%	56%
4	58%	55%	51%	46%	44%
5	52%	46%	41%	35%	31%
6	41%	36%	30%	24%	17%
7	34%	27%	19%	10%	3%
8	25%	17%	8%	2%	0
9	17%	8%	0	0	0
10	9%	0	0	0	0

問題

- 假設有一台1kW的水車式增氧機，SAE值是1.2，用在養殖池中。假設你希望養殖池水的溶氧保持在3ppm以上，水溫30°C，請問運轉水車可以在夜間提供多少溶氧給魚使用？電費是多少？
- **Ans.**
 - (1) 水車SAE值為1.2，表示增氧能力為1.2kg/h
 - (2) 若你希望保持池水溶氧為3ppm以上，查表，30°C時的真實增氧能力為SAE值的56%
 - (3) 真實增氧能力為 $1.2 * 0.56 = 0.67 \text{kg/h}$
 - (4) 若每天夜間增氧10小時，可以提供 $0.67 * 10 = 6.7 \text{kg}$ 溶氧
 - (5) 電費= $1 \text{kW} * 10 \text{h/天} * 4 \text{元/kW-h} = 40 \text{元/天}$

重力流增氧

- SAE : 1.2-2.3 kg O₂/kW hr

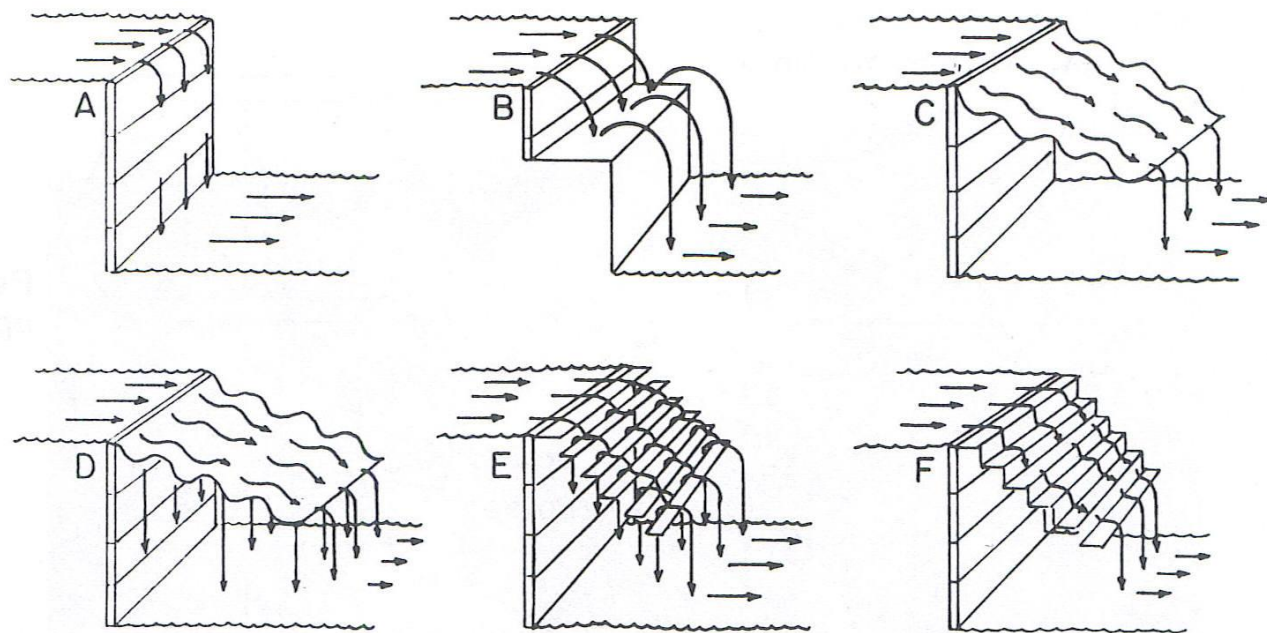
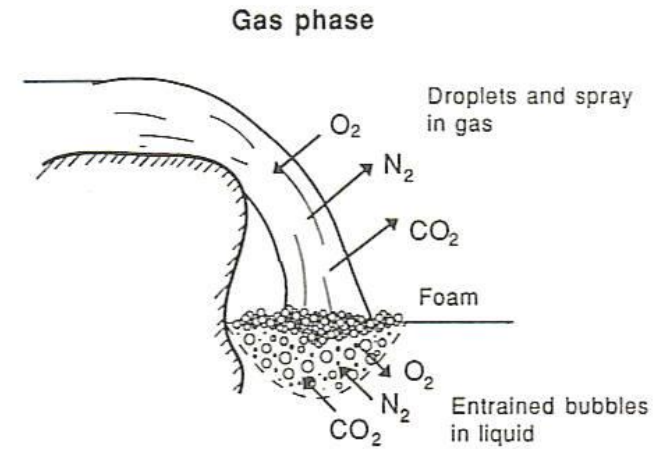
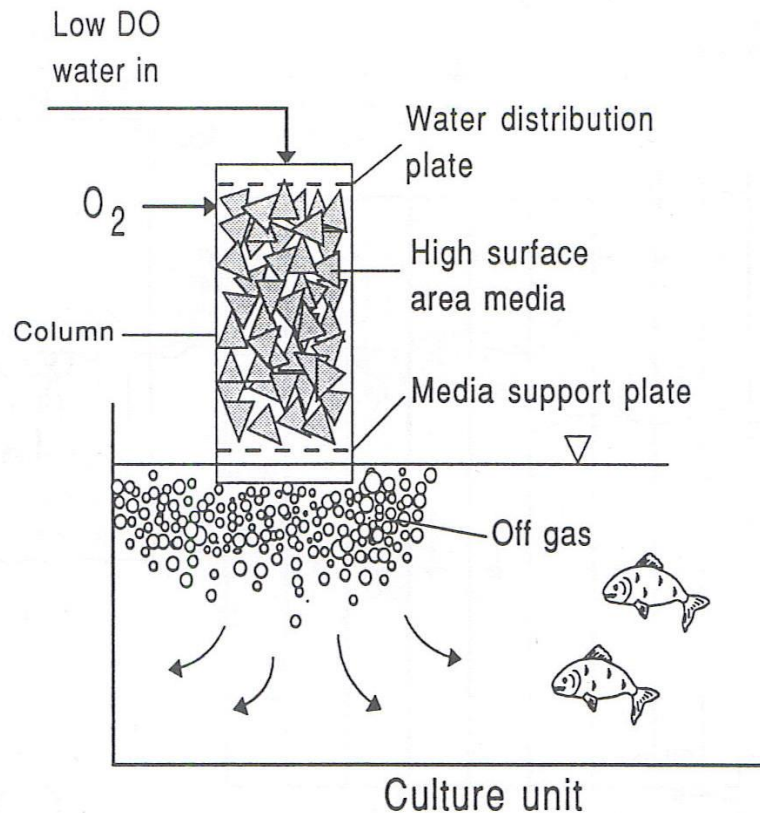


Figure 11-23. Various types of cascade aerators (reproduced from Soderberg (1982) with permission from the American Fisheries Society).

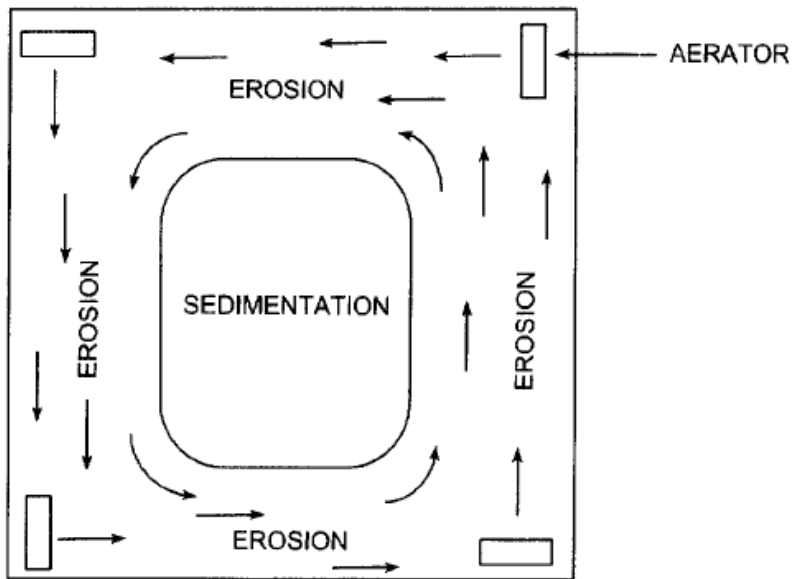
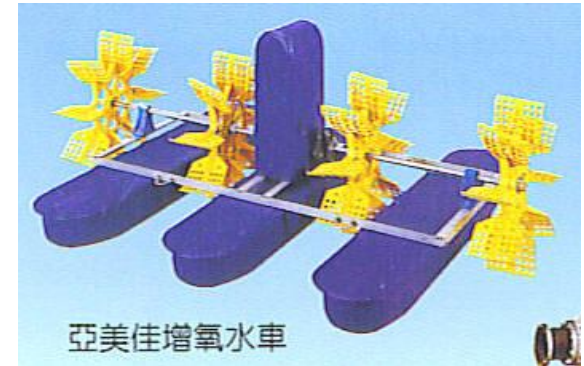
增氧塔

- 流水經過濾材時使氧氣溶入水中
- SAE : 1.2-2.4 kg O₂/kW hr



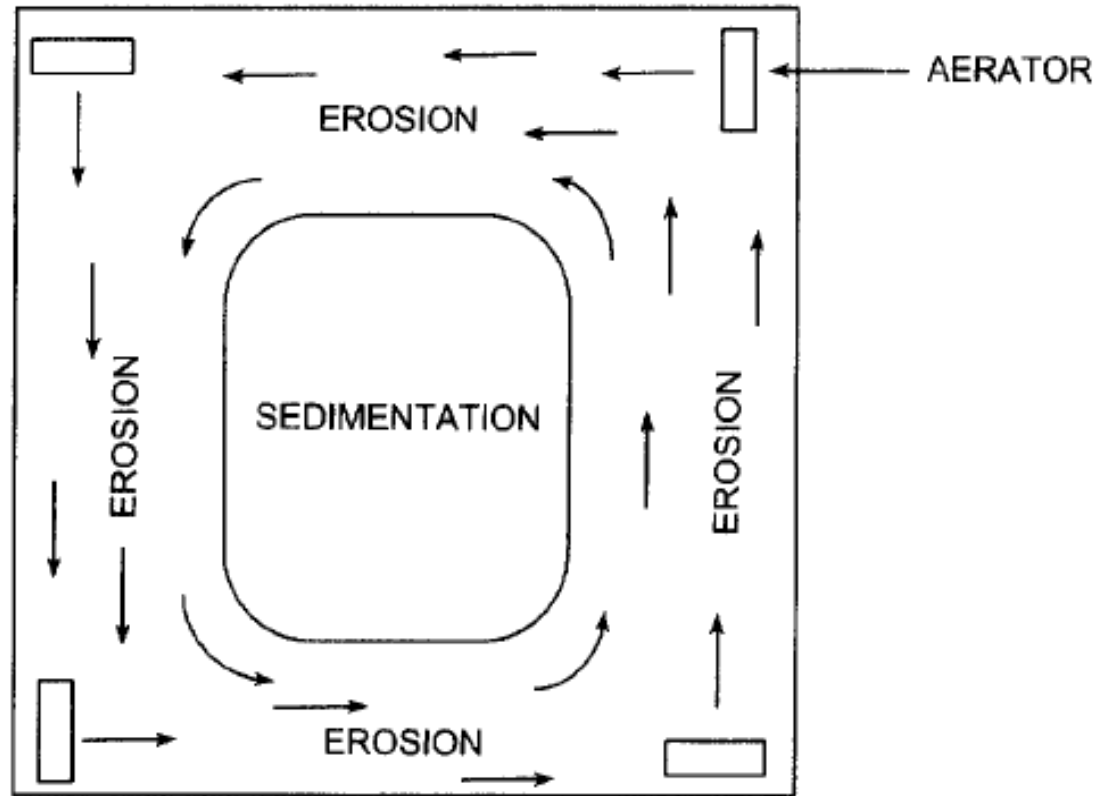
水車式增氧機

- 增氧
- 產生池中水流，混合上下水層
- 集中淤泥
- SAE : 1.1-3 kg O₂/kW hr
- 建議用量 : 20 kW/hector



水車式增氧機的布置

- 依池形配置，方池最有效率
- 目的是使池水流動無死角



以水車增氧池塘的溶氧分布

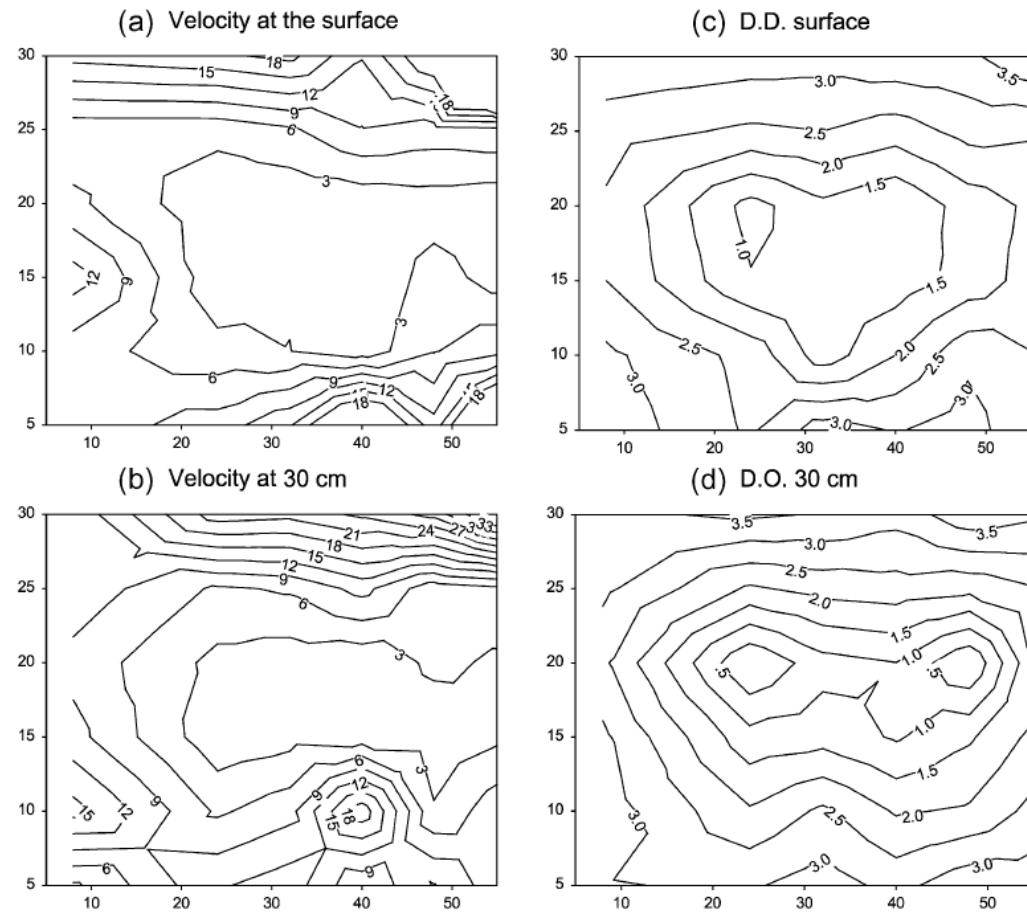


Fig. 1. Water speed and early morning DO in Pond 1: (a) surface water speed, (b) water speed 30 cm above the pond bottom, (c) surface DO, (d) DO 30 cm above the pond bottom.

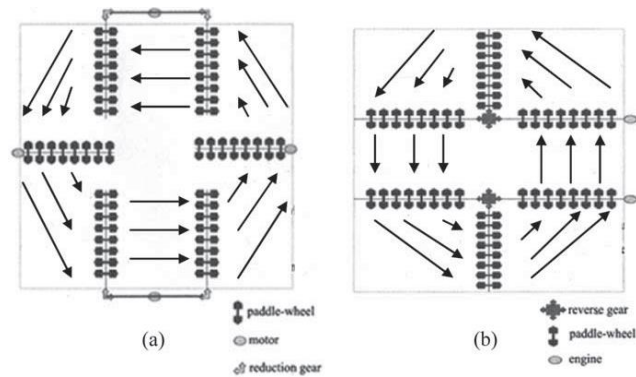
池面與池底的溶氧

Table 1
DO and pH by region, depth and time of day (mean±S.D.)

Depth	Dissolved oxygen (mg/l)*			
	Morning		Afternoon	
	Inner	Outer	Inner	Outer
Surface	1.55±0.58 ^a	2.86±0.65 ^c	6.71±4.40 ^{**}	5.98±2.81 ^{**}
Bottom	0.85±0.32 ^b	2.61±0.45 ^c	3.06±2.01 ^d	4.43±1.88 ^e

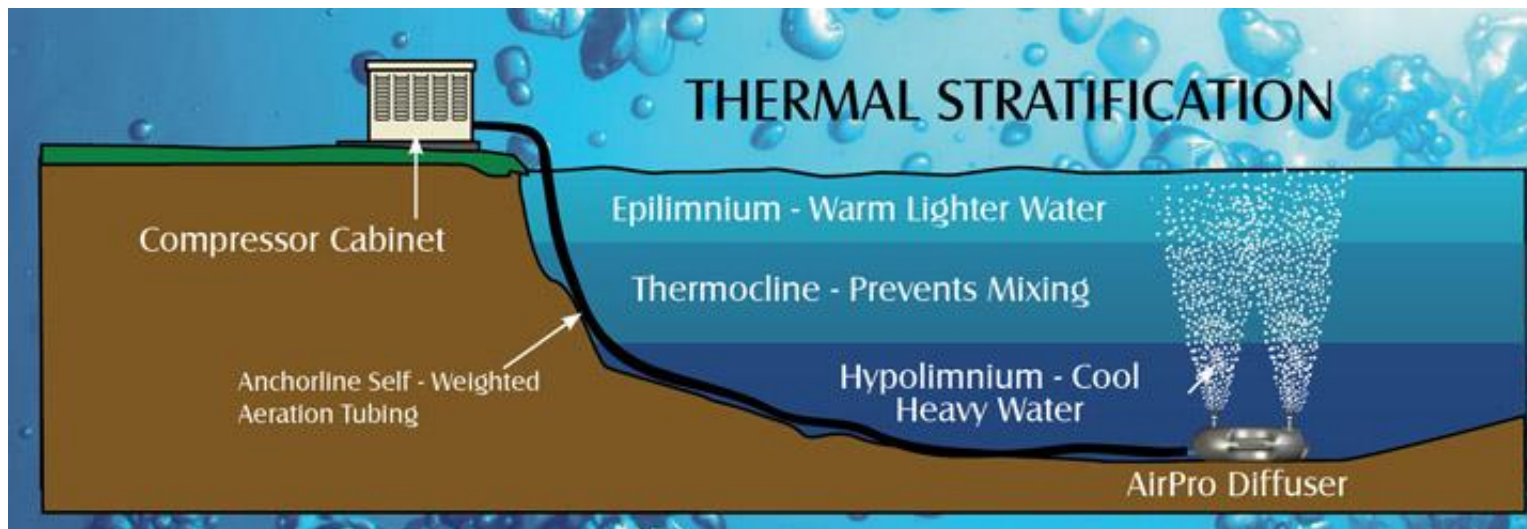
泰國的高密度水車增氧

- 達到30 kW/hector
- 成排的增氧機減少池中死角，使上下水層混合均勻



白天該不該使用水車？

- 白天使用水車不但不能增氧反而去氧
- 但是水車可使上層過飽合的水與下層混合，將溶氧帶進池底
- 增氧可打破溫度分層造成的池底缺氧

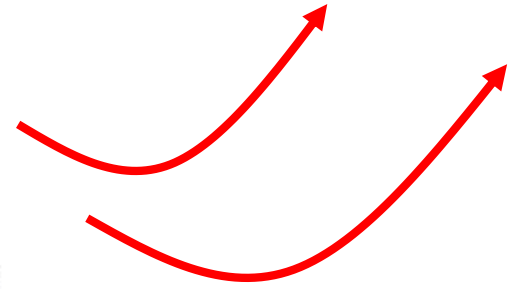
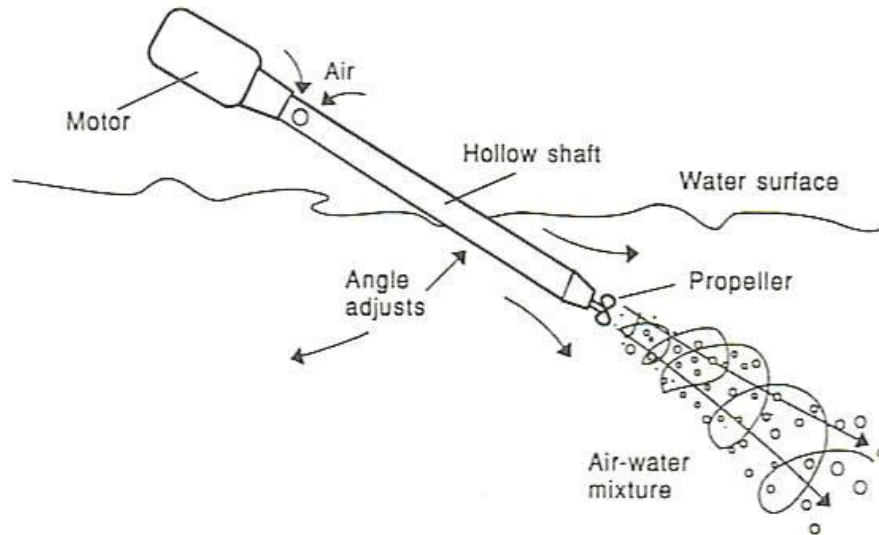


水車增氧成本

- 1 kg 蝦，每天投餌20g，消耗20 g 溶氧，1 kW 水車(SAE=1)增氧能力10 kg，每增加500 kg 需1 kW 水車
- 養蝦4個月收成，後3個月平均每天增氧10小時，則每增加500kg收成需要900度電，約需3000元，即6元/kg
- 1馬力水車一台約10000~15000元

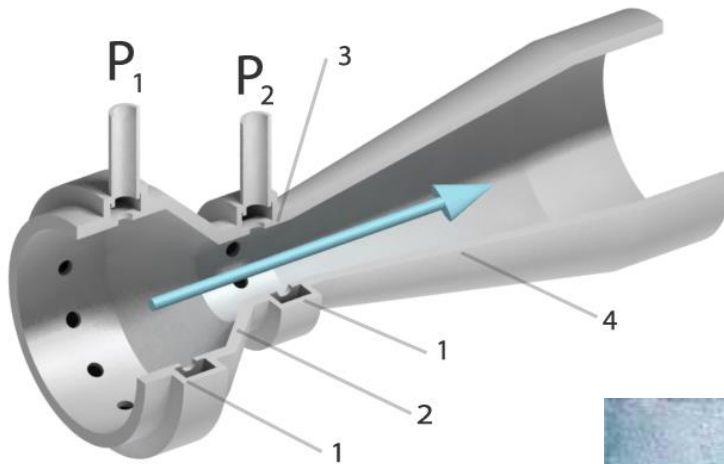
水下噴射式增氧機

- 向水下噴水時因文氏管原理將空氣泡吸入水中
- 氣泡上浮影響水流方向，不能達到原本深層增氧的目的
- SAE : 1.3-1.8 kg O₂/kW hr



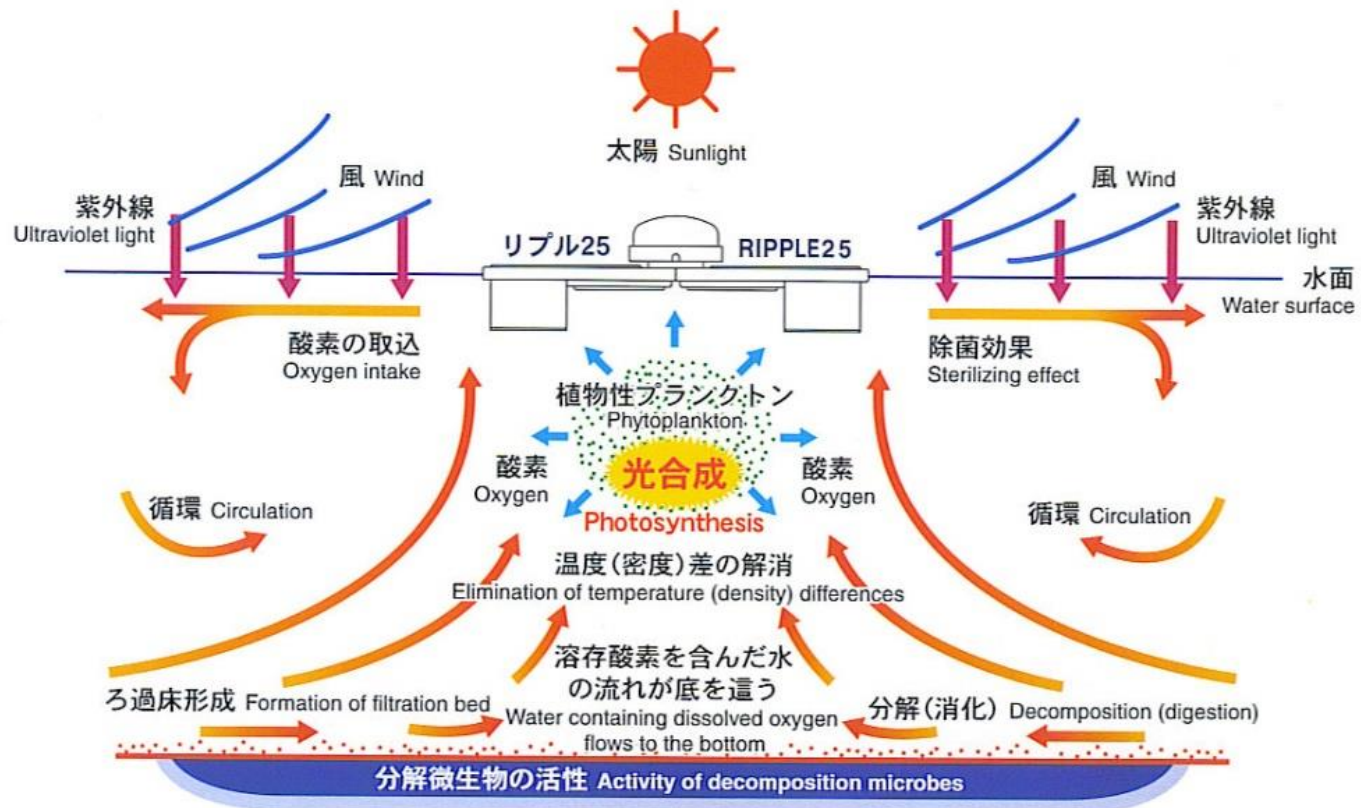
文氏管增氧的原理

- 基於白努利定理，水流造成負壓而吸入空氣，紊流使氣泡變成無數微細氣泡，其中的氧氣快速溶入水中
- 可用為注射空氣設備或水流量測設備



底部增氧設備

- 產生由池底往上的水流，使池底低溶氧的水與池面高溶氧的水混合，以最少的能源達到增氧效果
- 缺點是影響面積小



底層增氧機

- 產生垂直流動
- 省電

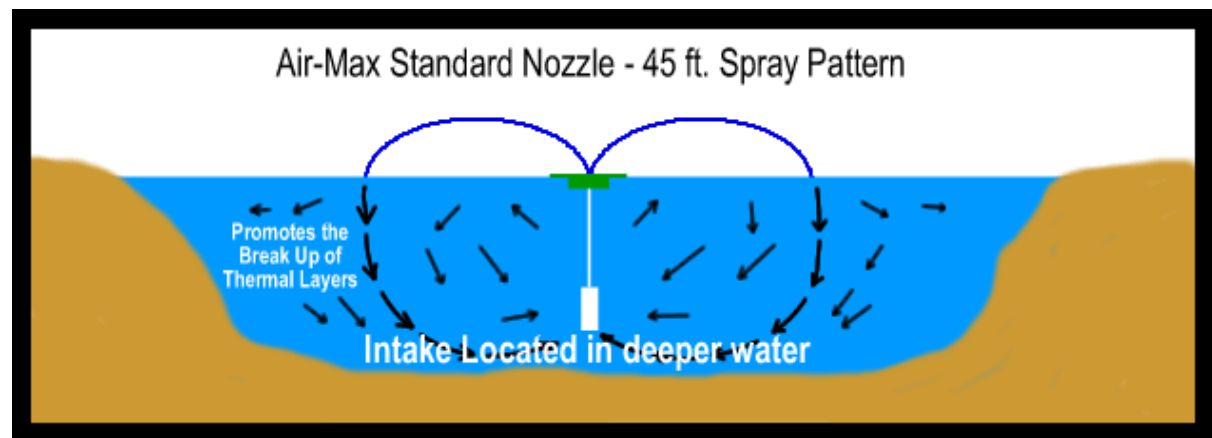


養殖技術の革新！ 驚異の水底活性機『リップル25』

<https://www.youtube.com/watch?v=fxuvcgHWBvg>

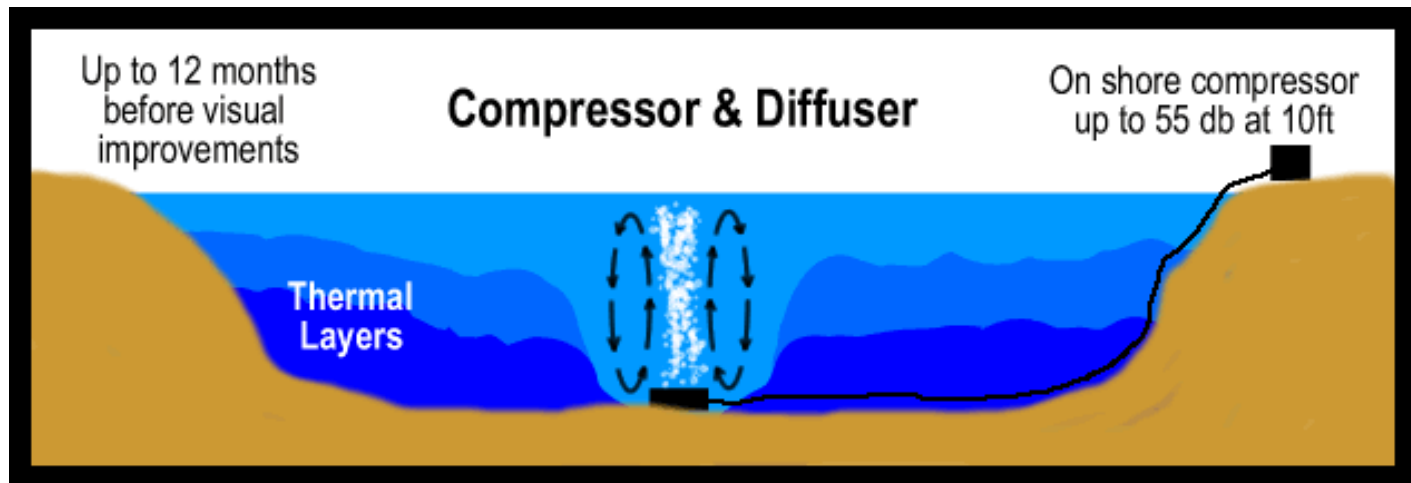
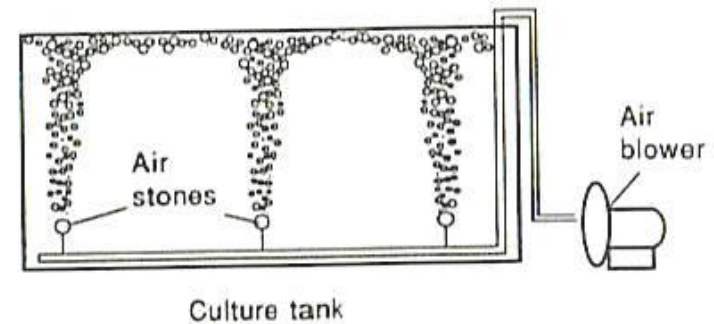
噴泉式增氧機

- 水珠可充分與空氣接觸而達飽合溶氧
- 可以由池底吸水
- 缺點是影響面積小，耗能量大
- SAE : 0.9-1.9 kg O₂/kW hr



曝氣石或曝氣管

- 氣泡上升時帶動水流上升，有助於打破分層，能量效率高
- 影響面積小，常用於室內池
- SAE : 0.7-1.2 kg O₂/kW hr
- 池塘愈淺，曝氣效率愈低



蝦苗繁殖場

- 水深愈深，曝氣石效率愈高



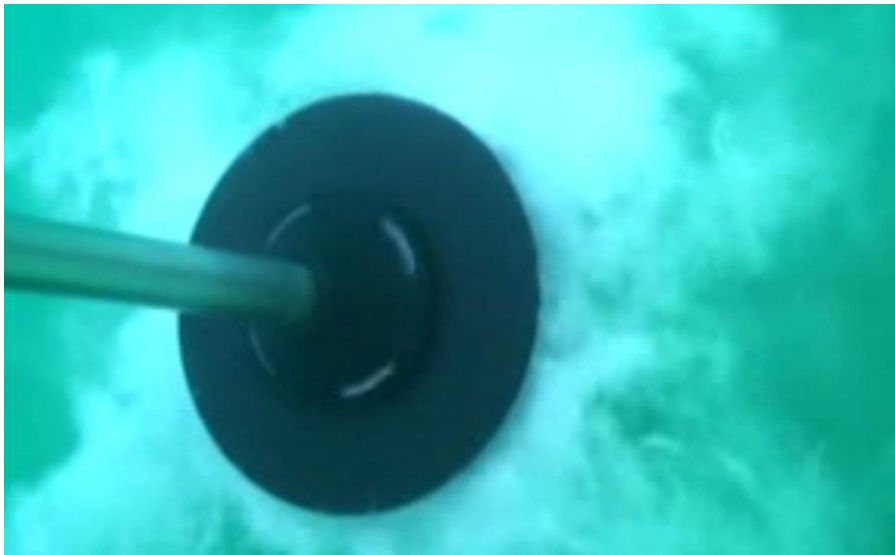
微細氣泡

- 微細氣泡的總表面積大，上升速度慢，使氧氣有更多時間溶入水中，可提昇溶氧效率



Toring 增氧機

- Creates air bubbles from 0.5 - 2 mm in diameter
- Claims to have an SAE of 8 kg O₂/kW-h





Different configurations of Toring Turbine

<https://www.youtube.com/watch?v=mpGHub4ujgE>

增氧技術的瓶頸

- 池底增氧
- 大面積增氧無死角
- 適時適量增氧
- 可能解決方案
 - 白天和晚上不同的增氧策略
 - 白天以上下層混合為主要目的
 - 晚上以底層增氧和中央無死角為主要目的

滾輪增氧

- 傳統水車加裝無動力滾輪，增加曝氣量約20%

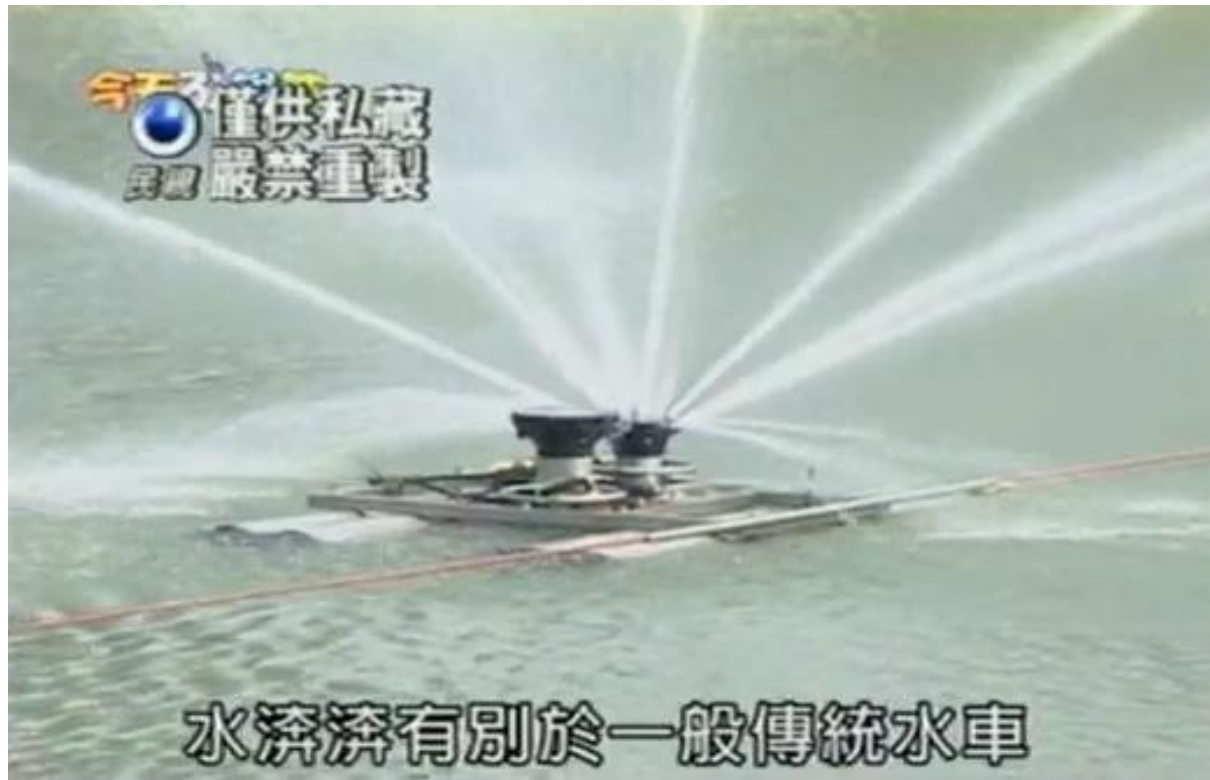


台江-滾輪水車 ((傳統水車加裝滾輪增氧裝置))



水澆澆

- 以噴水的反作用力帶動浮筏，能來回行走於池塘中，將底層水噴到空氣中曝氣，增加池底溶氧



盛文科技AquaJet水質排毒增氧機水車水澆澆影片.mpg

ChayuaqteqChannel

訂閱

20 部影片



喜歡



新增至

分享



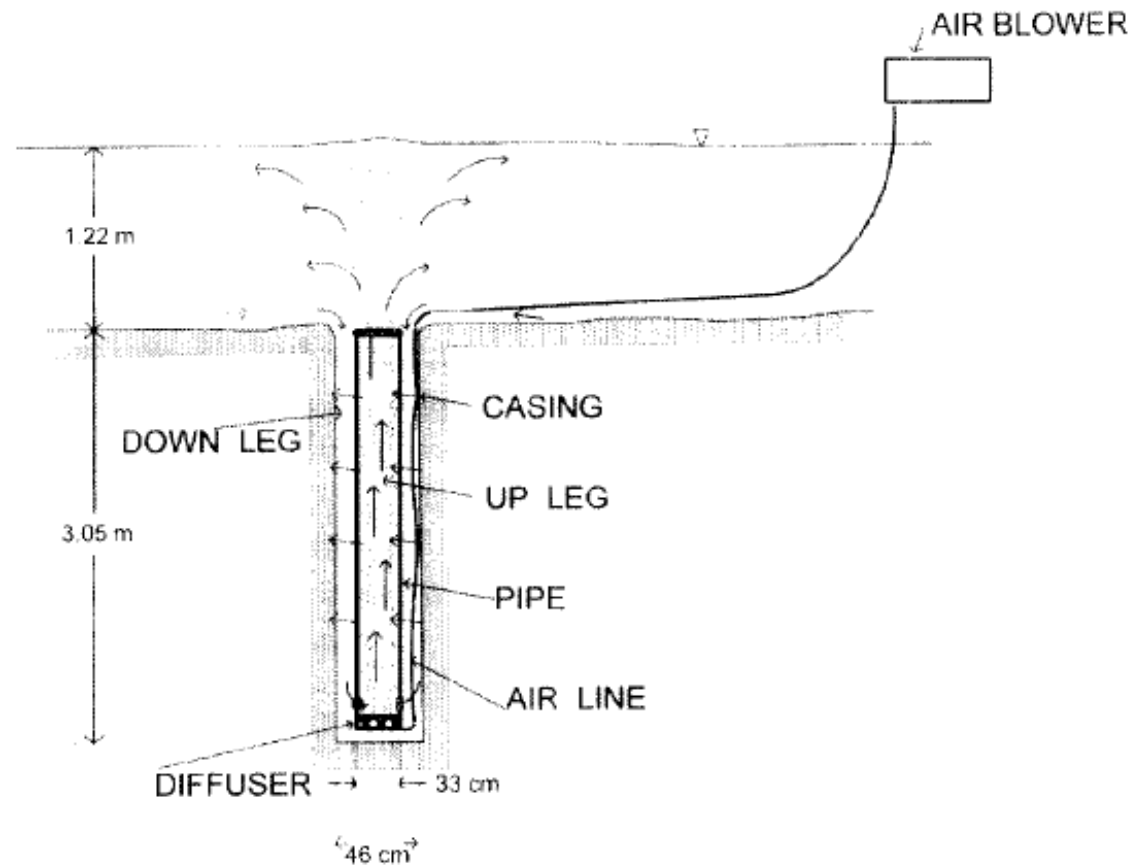
147 觀看次數



<https://www.youtube.com/watch?v=WvNA-RVn6e4>

U 型管增氧

- SAE: 6.37 kg O₂/kW hr



氣舉式增氧

- SAE : 2.0-2.1 kg O₂/kW hr

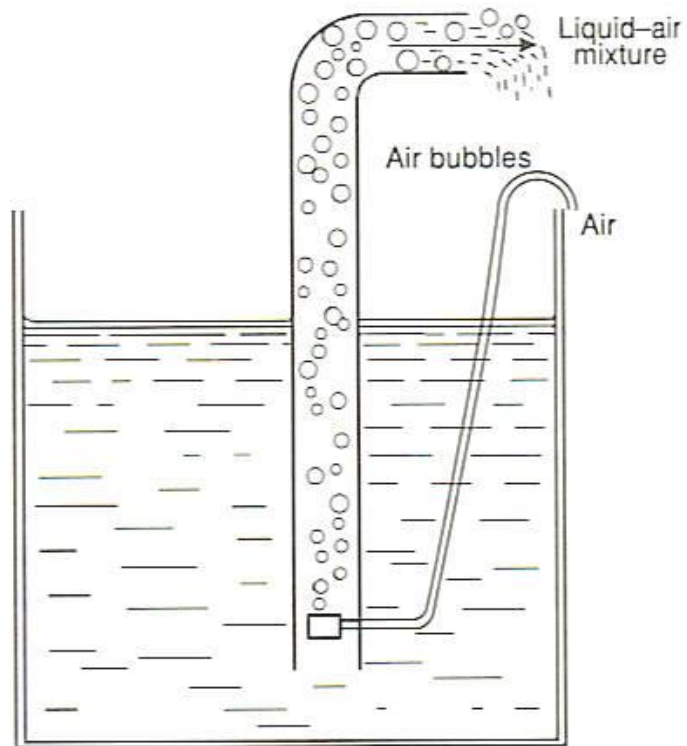


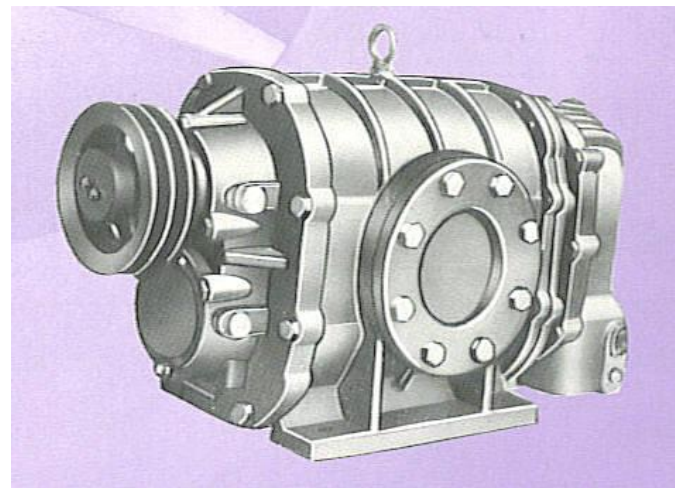
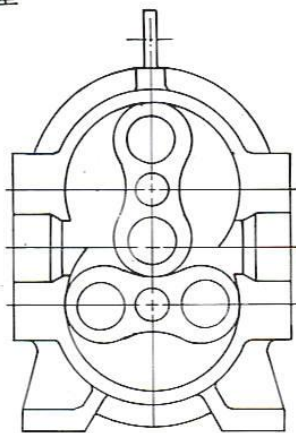
Figure 4.15 An airlift pump. (From Wheaton, 1977.)

空氣供應

- 鼓風機
- 魯式鼓風機
- 薄膜式空氣泵



RT 型



空氣泵規格

- 出氣量以2m深為準



HP-10,20,30,40,50



HP-60,80



HP-100,120,150,200

▲ 適用: 魚類養殖供氣、低頻治療儀及其它醫療、科學儀器、淨化槽曝氣、氣泡浴打氣。

※規格表(1):

型號		HP-10	HP-20	HP-30	HP-40	HP-50
電壓	V	AC 110V 或 220V				
最大出壓力	Kgf/cm ²	0.19	0.25	0.3	0.38	0.38
出氣量	l/min	20	30	42	52	62
消耗電力	W	8.5	17	22	38	52
噪音值	dBA(1m)	30	31	31	32	35
重量	Kg	3.2	3.2	5.7	5.7	6.5

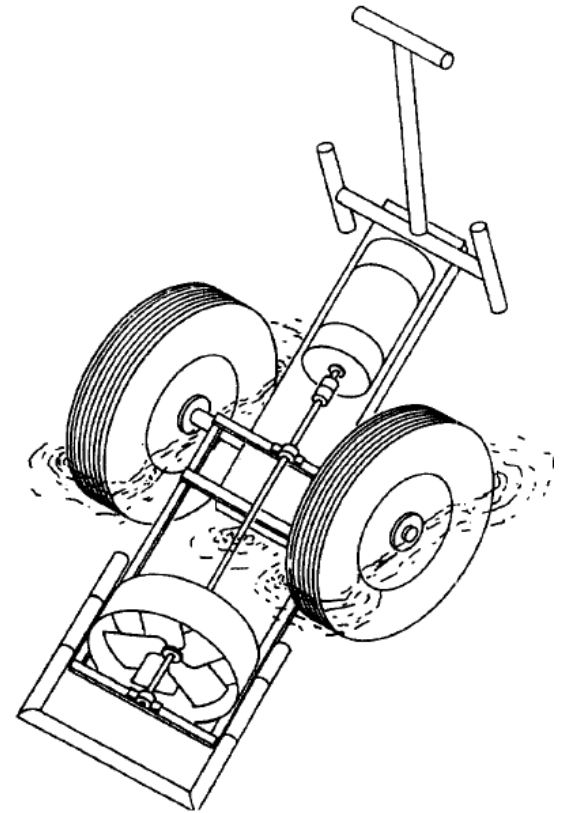
※規格表(2):

型號		HP-60	HP-80	HP-100	HP-120	HP-150	HP-200
電壓	V	AC 110V 或 220V					
最大出壓力	Kgf/cm ²	0.35	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6
出氣量	l/min	100	120	140	160	220	300
消耗電力	W	51	71	100	125	155	250
噪音值	dBA(1m)	35	35	38	40	46	50
重量	Kg	7	7	8.5	8.8	10	10

<http://www.pumpworld.com.tw/3.htm>

水流混合設備

- 上下層水的混合是另一種增氧的途徑，主要目標是將上層溶氧高的水取代池底溶氧低的水



增氧效率文獻值

Table 11-16. Relative efficiencies of various aeration devices.

Aeration device	Standard aerator efficiency (kg O ₂ /kW hr)	Reference
Gravity aerators		
Cascade weir (45°)	1.5–1.8	Colt and Orwicz (1991)
Corrugated incline plane	1.0–1.9	Colt and Orwicz (1991)
Horizontal screen	1.2–2.6	Colt and Orwicz (1991)
Lattice	1.8–2.6	Colt and Orwicz (1991)
Packed column		
Zero head	1.2–2.4	Colt and Orwicz (1991)
0.5–1.0 m head	10–80 ^a	Colt and Orwicz (1991)
Surface aerators		
Low speed surface	1.2–2.4	Colt and Orwicz (1991)
Low speed surface with draft tube	1.2–2.4	Colt and Orwicz (1991)
High speed surface	1.2–2.4	Colt and Orwicz (1991)
Vertical pump	0.7–1.8	Colt and Orwicz (1991)
Pump sprayer	0.9–1.9	Colt and Orwicz (1991)
Paddle wheel	1.1–3.0	Colt and Orwicz (1991)
Subsurface aerators		
Aeration cone	2.5	Colt and Orwicz (1991)
Air-lift pump	2.0–2.1	Colt and Orwicz (1991)
Air diffuser	0.6–3.9	Boyd (1990)
Air diffuser		
Fine bubbles	1.2–2.0	Colt and Orwicz (1991)
Medium bubbles	1.0–1.6	Colt and Orwicz (1991)
Coarse bubbles	0.6–1.2	Colt and Orwicz (1991)
Propeller aspirator	1.7–1.9	Colt and Orwicz (1991)
Propeller aspirator	1.3–1.8	Boyd (1990)
Nozzle	1.3–2.6	Colt and Orwicz (1991)
Static tube	1.8–2.4	Colt and Orwicz (1991)
U—tube		
Zero head	0.7–2.3	Colt and Orwicz (1991)
0.5–1.0-m head	10–40 ^b	Colt and Orwicz (1991)
Venturi	2.0–3.3	Colt and Orwicz (1991)

^a Does not include power to the pump.

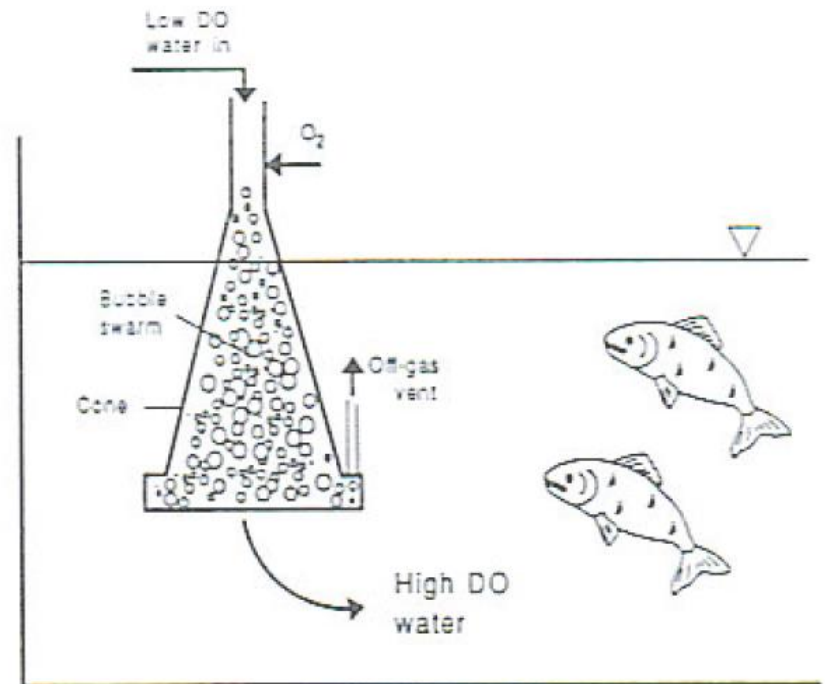
^b Estimated.

循環水系統增氧

- 循環水系統通常在水回到養殖池前增氧
- 以空氣增氧的養殖密度上限：~ 40 kg fish/m³
- Example
 - 40 kg of fish, consuming $40 * 1.5\% = 0.6$ kg feed/d, requiring $0.6 * 0.25 = 150$ g oxygen
 - Assuming 30 water exchanges, i.e., 30 m³ water /day, the water should have $150/30 = 5$ ppm of excess oxygen, i.e., the incoming water should have $5 + 5 = 10$ ppm oxygen, close to the saturated oxygen content.

純氧增氧

- 主要用於循環水養殖系統和流水式水道養殖系統
- 純氧的飽合溶氧遠大於空氣
- 優點
 - 提高水中溶氧超過正常飽合值
 - 強迫溶解的氮氣化排出
以避免氣泡病
 - 大幅增加養殖生產量

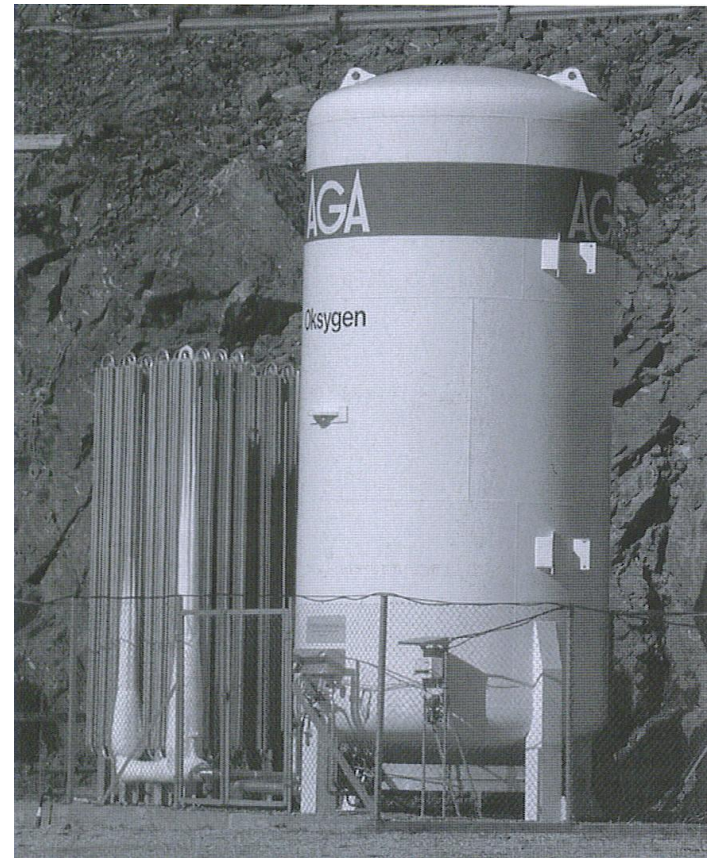


純氧物理性質

- 沸點：1大氣壓下，約 -183°C
- 密度： 15°C ，1大氣壓時， 1.36 kg/m^3
- 液態氧密度： $1.15 * 10^3 \text{ kg/m}^3$

純氧來源

- 氧氣鋼瓶：40L，150 bar
- 液態氧：大量
- 純氧機：90%濃度



氧氣濃縮機

- 製氧速度約5 L/min，即 $5*60*24=7200$ L/d，或 $7200/1000*1.36*90%=9$ kg/d
- 以RAS養吳郭魚為例，若投餌率為3%，轉換係數1，則最多可養約300kg的魚
- 醫療用濃縮機約3萬元，耗電量約300W

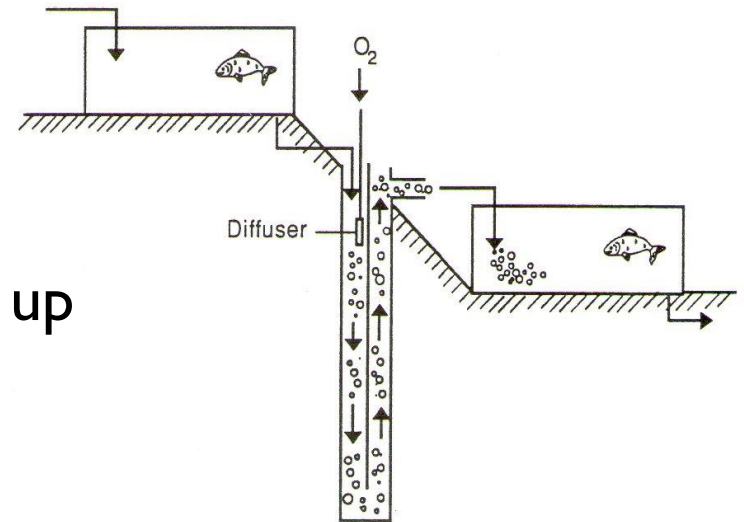


純氧接觸器

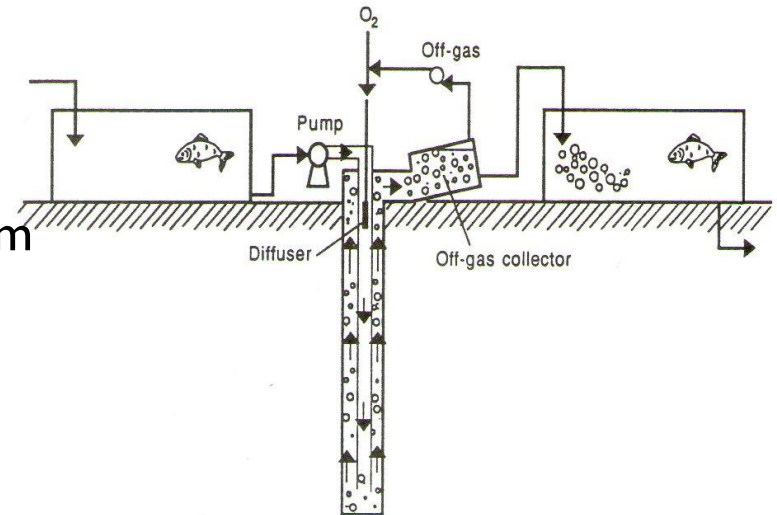
- U形管
- 曝氣塔
- LHO
- 溶氧錐
- 曝氣石
- 文氏管

U 形管

- Vertical tubes increase hydraulic pressure to speed up oxygen adsorption
- Best operation parameters
 - Depth of conduit: 25-60m
 - Water velocity: 1.8-3 m/s
- Advantages
 - Low head requirement
 - Particulate material no problem
 - Pumping may not necessary

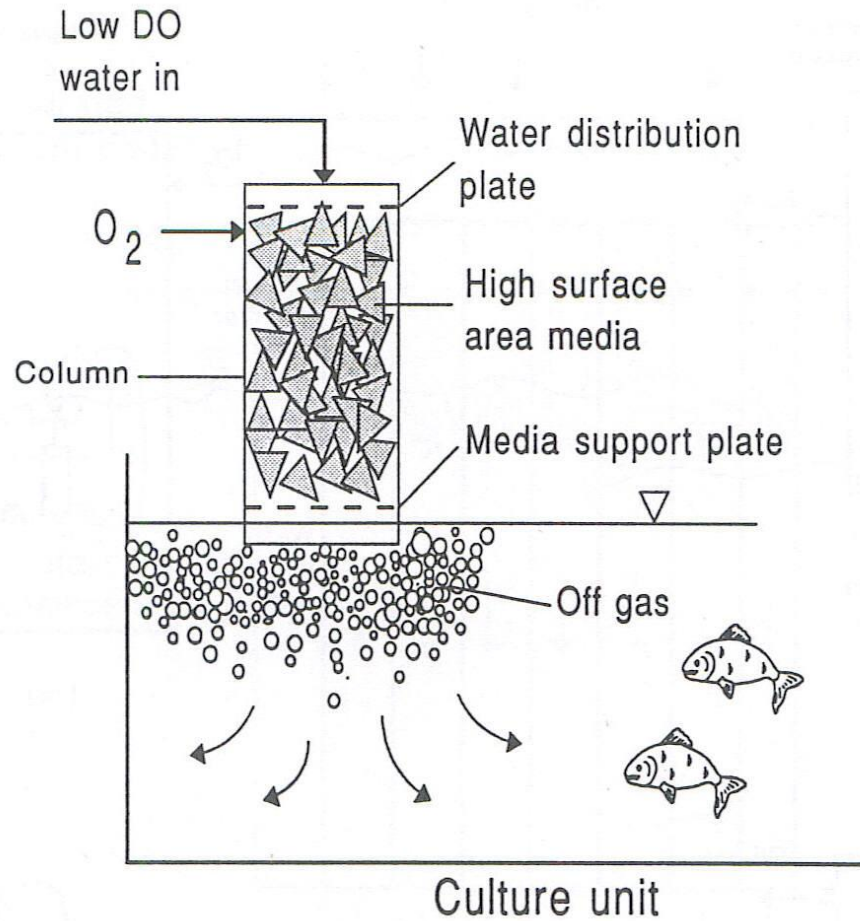


(a)

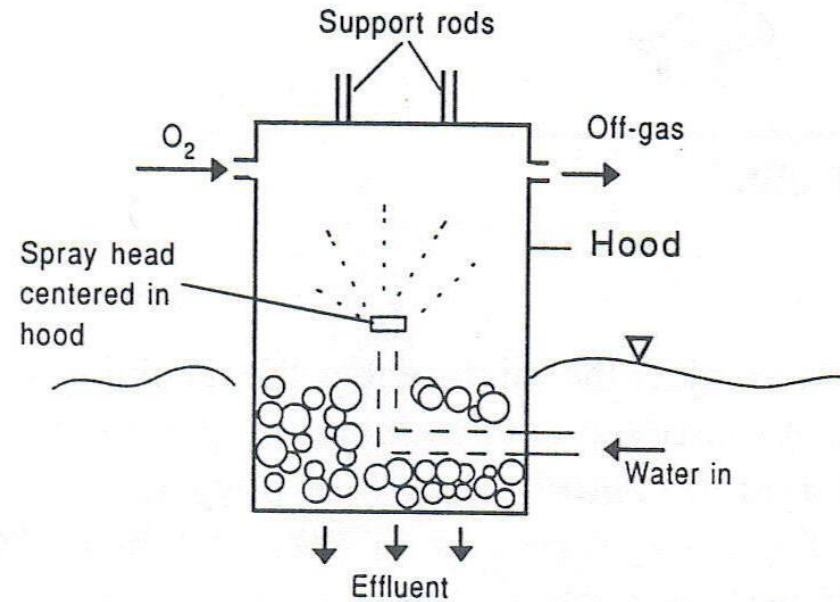
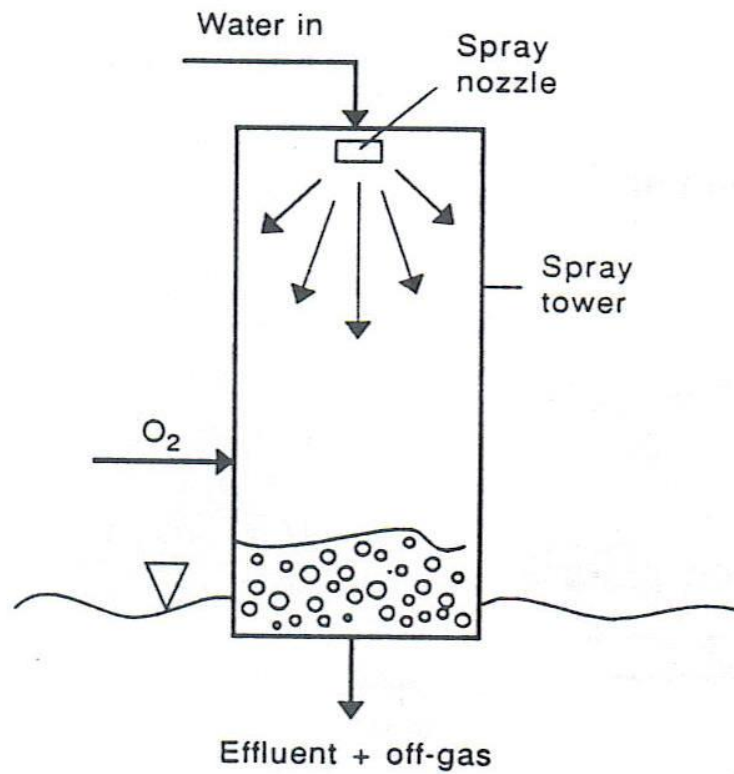


(b)

曝氣塔

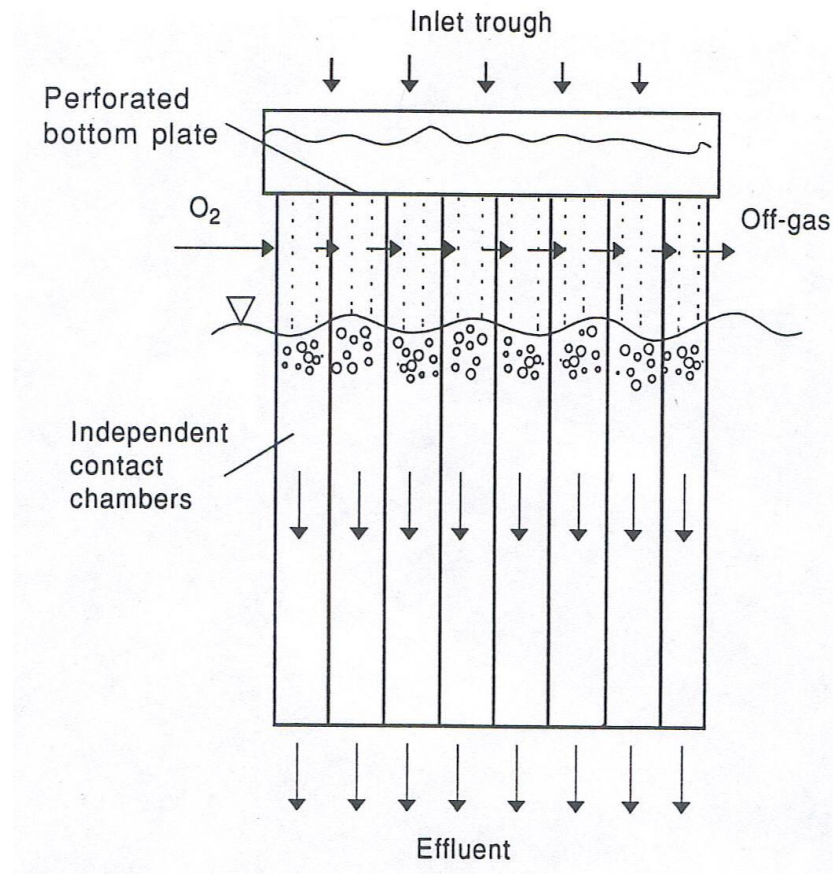


Spray tower



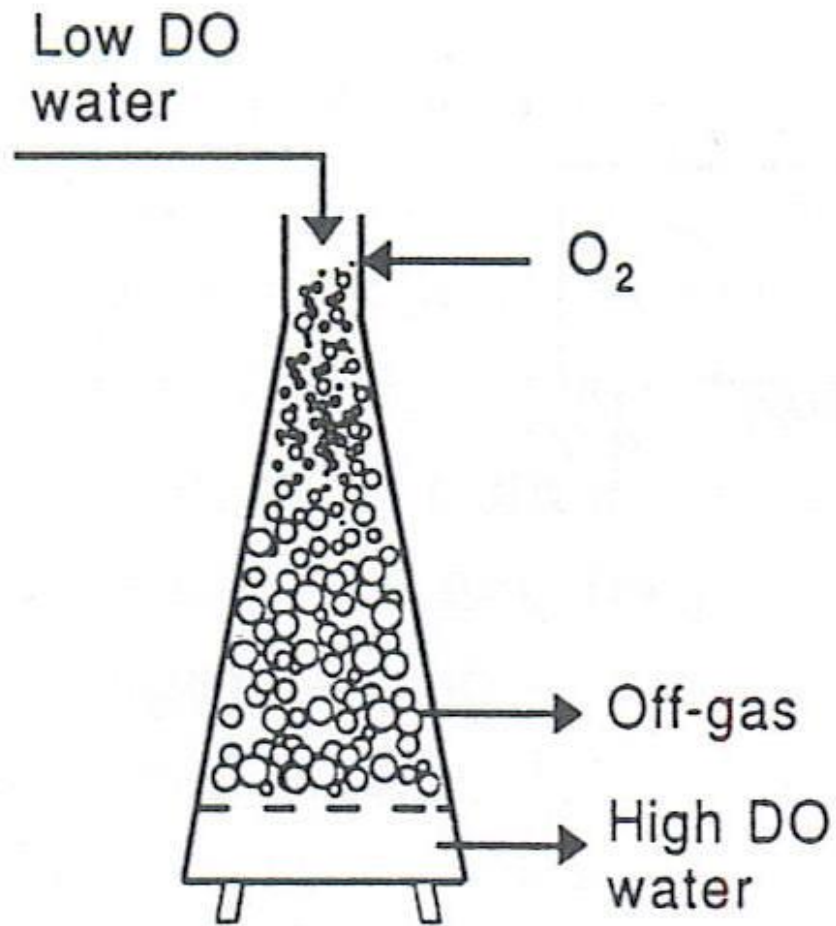
Low head oxygenator (LHO)

- 類似滴濾槽，但沒有濾材
- 消耗的水頭很小



溶氧錐

- 純氧由下方進入，氣泡上浮過程被水流往下帶，可極大化溶氧



純氧增氧方式

Table 11-18. Typical operating characteristics of pure oxygen systems.^a

System	Absorption efficiency (%)	Transfer efficiency (kg oxygen/kW-hr)	Effluent concentration (mg/L)
U-tube	30–50	1.0–1.5	20–40
U-tube with off-gas recycling	60–90	2.0–3.0	20–40
Packed column	40–50	0.5–1.0	10–15
Spray tower	40–55	0.5–1.0	10–15
Pressurized packed column	95–100	1.0	30–90
Aeration cone	80–90	4.0	5–25
Oxygen injection: high-pressure venturi	15–70	< 0.5	50–80
Oxygen injection: bubble generator	20–40 ^b	0.2–0.5	30–50
Diffused aeration	3–7	-	10–20

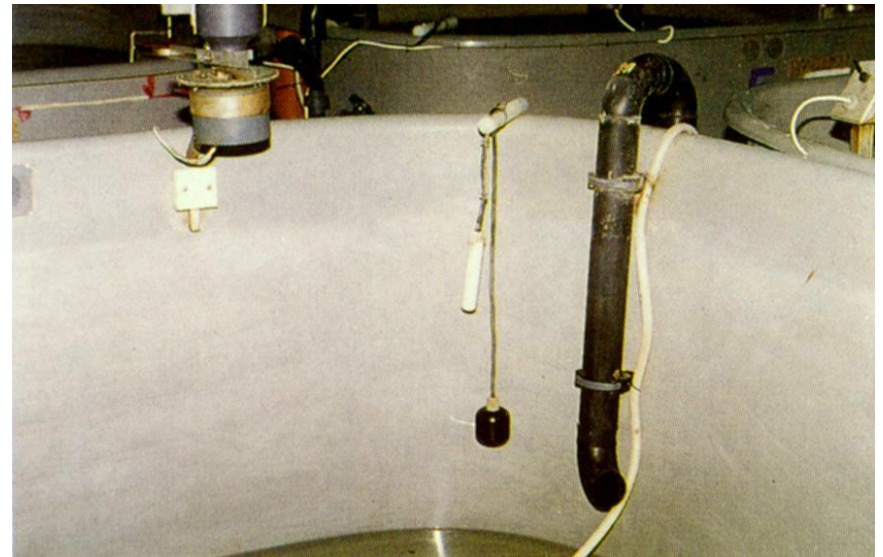
^a Power requirements for oxygen generation not included.

^b Overall absorption efficiency may approach 90–100 % when absorption in the rearing unit is included.

Source: Colt and Watten (1988).

緊急供氧系統

- 為避免高密度養殖缺氧的危險，於池中置溶氧感測器，偵測到缺氧時即啟動緊急供氧系統



溶氧需求的計算

- 一個循環水養殖系統有10個8 m直徑的養殖水槽，水深1 m。假設系統要養殖吳郭魚，收穫密度80 kg/ton，平均重量1 kg，投餌量是體重的3%，飼料含30%粗蛋白，溶氧消耗率可以由投餌量估計，0.25 kg 氧/ kg 飼料。
- 計算溶氧需求：
 - Total water: $8*8*3.14/4*1=50$ ton
 - Total fish: $50*80=4000$ kg
 - Total feed: $4000*3%=120$ kg
 - Oxygen consumption= $120*0.25=30$ kg/day

循環水流的計算

- 假設循環水利用純氧增氧，進水的溶氧超飽合(22 ppm)，出水的含氧為安全限度(5 ppm)
- 水流需求：
 - Oxygen (k1) within each ton of incoming water: $k1 = 1 * 22 = 22g$
 - Oxygen (k2) within each ton of outgoing water: $k2 = 1 * 5 = 5g$
 - Oxygen supplied by each ton of water: $22 - 5 = 17g$
 - Total water required: $30kg * 1000 / 17 = 1765 \text{ ton}$
 - Flowrate required: $1765 \text{ ton} * 1000 / 24 \text{ hr} * 60 \text{ min} = 1225 \text{ lpm}$
 - Water exchange (n) : $1765 / 50 = 35 \text{ times/day}$

循環水養殖系統的增氧成本

- 因為高密度養殖的溶氧消耗太快，循環水養殖系統一般用純氧增氧
- 純氧來源
 - 高壓氧氣鋼瓶：40L，120 atm，500 NT，約74 NT/kg
 - 液態氧：160 kg，2000 NT，約12.5 NT/kg
 - 醫用氧氣製造機：95%濃度，5 lpm，氧氣量0.42 kg/h，耗電量300 W，電費約2.1 NT/kg
- 若以循環水系統養殖吳郭魚，使用液態氧增氧，飼料FCR是1.4，生產1 kg的氧氣成本是 $1 \text{ kg} * 1.4 * 0.25 * 12.5 = 4.4 \text{ NT/kg}$