廢 (污) 水生物處理程序簡介練習題 (甲乙級)

壹、生物處理原理

1.1 生物處理程序分類

1. 生物處理依有無供給氧氣形式可分為哪些方式？

   解答：可分為好氧性 (Aerobic)、缺氧性 (Anoxic)、兼氧性 (Facultative) 及厭氧性 (Anaerobic) 等處理程序。

貳、好氧生物處理

2.1 標準活性污泥法

2. 曝氣設備的主要功用為何？

   解答：曝氣槽係活性污泥系統之主要單元，在槽中好氧性微生物利用廢水中之有機物 (例如 BOD) 為食物，進行生物氧化作用而達到淨化廢水之目的。

3. 活性污泥法在曝氣槽內，混合液中懸浮固體物 (MLSS) 濃度一般維持約為？溶氧濃度保持在？

   解答：在曝氣槽內，混合液中之懸浮固體物 (MLSS) 濃度約為 1,500~3,000 mg/L，溶氧保持在 1~3 mg/L。因系統內微生物為好氧性，通常可量測攝氧率來判定微生物活性。

2.2 氧化渠

4. 標準活性污泥法中低有機負荷或低食微比 (F/M) 之應用，亦是延長曝氣氧化處理方式之一。其基本的控制條件有哪些？

   解答：1. 低有機負荷：F/M 應維持在 0.05~0.15 kg BOD_5/(kg MLVSS · day)，MLSS 在 2,000~6,000 mg/L。由此兩個條件，可以推算出其容積負荷，如 F/M=0.075 kg BOD_5/(kg MLVSS · day)，MLSS=4,000 mg/L，則容積負荷=0.3 kg BOD_5/(m^3 · day)。由 F/M 或容積負荷均可計算出所需曝氣槽體積。

   2. 曝氣器供氧量之計算：依經驗，去除 1 kg BOD_5 約需 2.0 kg O_2，由每天所欲去除的總 BOD_5 量乘以去除每公斤 BOD_5 之需氧量即知每天所需的供氧量。足夠的氧量可同時提供硝化 (Nitrification) 和污泥消化之用。

   3. 曝氣器輸氧量大小之控制：不論採用豎軸或橫軸曝氣器，其輸氧量和葉片浸水深成正比，也和耗電量成正比。浸水深一般均由氧化渠的溢流堰來調整。豎軸曝氣器也可由油壓幫浦

來調整曝氣器軸的升降。不論調整溢流堰或調整曝氣器軸，均可由氧化渠內之溶氧控制。但由於氧化渠內溶氧的分布並不均勻，採用豎軸的 Carrousel 氧化渠，更有溶氧豐富區和溶氧缺乏區之分。如何選定溶氧測點和溶氧量控制範圍，是設計者和操作者均需謹慎面對的問題。通常氧化渠曝氣器最小浸水深和最大浸水深，輸氧量差異約 3~4 倍。氧化深渠之應用，除了適合初期有機負荷不大之處理外，亦適合稍微超有機負荷之處理，此亦為氧化深渠在國內曾經廣受採用的原因之一。

2.4 接觸曝氣法

5. 接觸曝氣法一般使用接觸材料之特性為何？

解答：1. 生物膜容易附著。
2. 材料具機械強度，不變質、彎曲、不易破壞、磨損、可耐久使用。
3. 比表面積大。
4. 粒徑或間隔均勻，槽內水流可順暢流動。
5. 與水之比重相近，不致於對槽底增加荷重。
6. 孔隙率大，即使充填率高仍不影響廢水之停留時間。

2.5 活性污泥膜濾法 (MBR)

6. 與標準活性污泥法比較，活性污泥膜濾法 (MBR) 的特點有哪些？

解答：1. 適合中小型規模特殊污染物處理。
2. 初設成本較高，但操作成本低，以總成本而言仍較有利。
3. 污泥可完全截留，沒有傳統程序污泥分離的問題，系統操作維護容易。
4. 污泥停留時間可相當長，生長速率緩慢的微生物得以滯留與增殖，有利於特殊或難分解污染物的去除。
5. 污泥濃度高，處理系統單位活性增加，進而減少處理槽體積。
6. 處理系統不須設置沉澱及過濾單元，可大幅節省空間。
7. 截留難分解之高分子物質，增加處理效率。
8. 可去除細菌和病毒，以達消毒作用。
9. 維持低 F/M 比操作，減少廢棄污泥量。
10. 處理單元緊密配置，減少臭味溢散。

參、生物除氮與除磷

3.1 生物除氮原理

7. 一般廢水中含氮污染物之生物去除程序包括哪些？

解答：一般氨氮之生物去除程序包括有機氮的水解、硝化及脫硝。

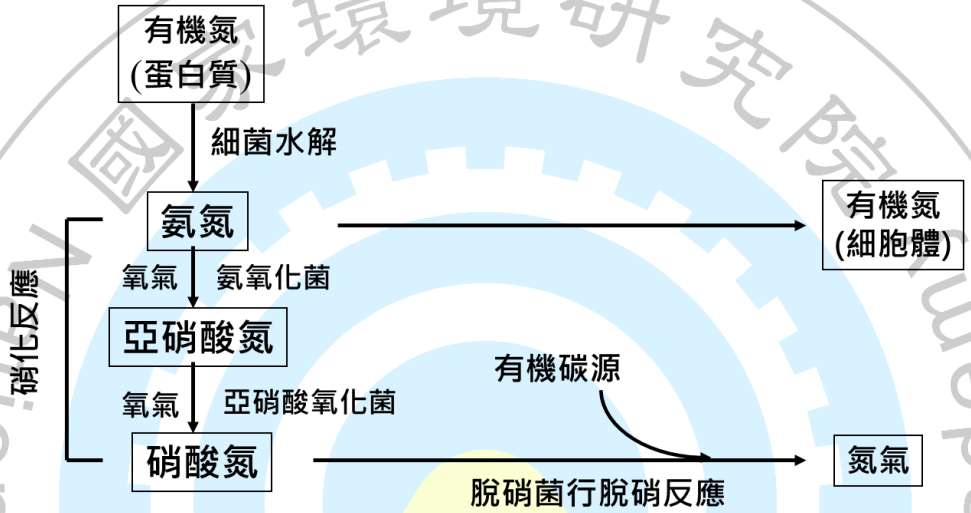
主要亞硝化反應由硝化菌 *Nitrosomonas* 促成：

$55NH_4^+ + 76O_2 + 109HCO_3^- \rightarrow C_5H_7O_2N + 54NO_2^- + 57H_2O + 104H_2CO_3$

亞硝酸氧化反應主要由亞硝酸氧化菌 *Nitrobactor* 促成：

$400NO_2^- + NH_4^+ + 4H_2CO_3 + HCO_3^- + 195O_2 \rightarrow$

$C_5H_7O_2N + 3H_2O + 400NO_3^-$



3.2 影響生物硝化之因子

8. 影響生物硝化反應之因子有哪些？

解答：1. 溫度：溫度影響硝化菌的比增長速率與活性，最適合硝化反應的溫度為 30~35℃，當溫度低於 5℃時，硝化菌將停止作用。對於同時進行有機物去除與硝化反應之污水處理系統，若水溫低於 15℃，則硝化速率迅速降低，易出現亞硝酸鹽的累積。

2. pH 值：硝化菌對 pH 值的變化十分敏感，最佳 pH 值範圍為 7.5~8.5，若低於此範圍時，硝化反應速率隨著 pH 值下降而降低，pH 值低於 6 或高於 9.6 時，硝化反應將停止進行。

3. 溶氧：硝化反應必須在好氧的條件下進行，通常維持水中溶氧濃度為 2~3 mg/L，溶氧濃度 0.5 mg/L 為硝化反應的極限。一般而言，當溶氧濃度低時，硝化反應受溶氧濃度之影響大；當溶氧濃度高 (如使用高純度氧氣) 時，硝化反應通常不受溶氧濃度所限制。

4. 污泥齡：硝化菌群屬自營性細菌，其比生長速率較代謝有機物之異營性菌群低許多，故需有較長污泥齡，通常污泥齡須維持在 15 天左右，以避免硝化菌離開處理系統而降低處理效果，始能獲得不錯之硝化效果。
5. 基質濃度：高濃度銨離子及亞硝酸鹽會抑制硝化作用，主要原因是受到自由氨分子 (Free ammonia, FA) 及自由亞硝酸分子 (Free nitrous acid, FNA) 的影響。
6. BOD/TKN 比值：BOD/TKN 比值為重要影響因子之一，由於硝化菌群比生長速率慢，當廢水 BOD/TKN 之比值大於 25 時，絕大部分的氮源將先被異營菌利用作為細胞合成所需之氮源，而硝化微生物則沒有或僅有非常有限的氨氮來進行硝化反應，導致系統中異營性微生物占絕大多數，降低硝化菌群之比例，使得硝化微生物在活性污泥中所占之比例與其功能皆不具影響力。當廢水 BOD/TKN 之比值小於 20 時，硝化微生物在活性污泥中之比例則與 BOD/TKN 之比值成反比。
7. 抑制性物質：廢水中含有抑制或毒性物質，對硝化作用會有抑制或毒化。一般而言，會抑制硝化菌活性之物質，包括：濃度偏高的氨氮、重金屬、毒性有機化合物。

9. 影響生物脫硝反應之因子有哪些？

解答：1. 氧氣：脫硝反應為一種在無氧狀態下之反應，氧會與硝酸鹽與亞硝酸鹽競爭電子，迫使電子流轉向有氧呼吸作用，進而抑制氮氧化物還原為氮氣。當溶氧濃度高於 0.2 mg/L 時，脫硝作用即受到抑制，雖然某些兼氣性脫硝菌可於低溶氧存在下進行脫硝作用，但速率較為緩慢。爲求達到良好脫硝效果，建議溶氧濃度應盡量控制為零。

2. 酸鹼值 (pH)：依據脫硝反應式，隨脫氮作用之進行會產生氫氧離子，廢水中鹼度與 pH 將逐漸上升，理論上 1 mg 硝酸鹽脫硝反應會產生 3.6 mg $CaCO_3$ 鹼度，並可大約取代硝化作用所耗去鹼度之一半，實務上控制 pH 6.5 至 7.5 即可得有效之脫氮效果。

3. 有機碳源：在異營菌脫硝反應中，電子供給者為有機物，其來源包括純有機化合物 (如甲醇、乙醇、醋酸、糖蜜等)、家庭生活污水、食品廢水及污泥等，一般以短直鏈碳源之效果較佳，實務上以甲醇為最常使用之外加有機碳來源。

肆、厭氧生物處理

4.1 厭氧生物處理及影響因素

10. 影響厭氧生物處理的因子有哪些？

解答：1. 生物一物理因子

(1) 污泥停留時間 (Sludge retention time, SRT)：污泥停留時間 (SRT) 為厭氧處理重要指標。在處理過程中，甲烷化為最後的階段，故為確保複雜有機物能有效轉化為甲烷和二氧化碳，必須有足夠的 SRT，使甲烷生成菌能夠生長及反應，因此如何增加系統之 SRT，為維持甲烷菌生長的重要因子。

(2) 攪拌 (Mixing)：消化槽攪拌之主要作用有二：A.將污泥固體傳送給微生物作為其食物源，並將營養物質送至細胞壁供作微生物營養源；B.將細胞壁排出之甲烷氣擴散至液相中，排出槽外。適當的攪拌提供一個均勻的環境，可促進反應效率。

(3) 溫度：甲烷生成菌為厭氧菌，對溫度和 pH 極為敏感，故維持一定的操作溫度對促進反應效率是必須的。最適合甲烷菌進行厭氧反應之溫度操作範圍有兩個：一為中溫 (30~38℃)，另一為高溫 (50~60℃)。雖然高溫可縮短反應時間、提高產氣速率，但在 30~38℃範圍內操作較為經濟。在 20℃左右，厭氧反應作用就受到抑制而減緩。

2. 化學因子：厭氧系統之化學因子為揮發酸、鹼度和 pH，也是系統穩定的重要操作指標，3 者互相關聯，因此可合併加以討論。揮發酸主要的成分為醋酸、丙酸和丁酸等有機酸，為厭氧反應過程之酸生成相的產物，也是甲烷化的先驅物質，酸生成相之反應比甲烷生成相迅速許多，但當揮發酸因不良操作而快速增加累積時，消化槽內若無足夠的鹼度以中和過量的揮發酸，將導致槽中 pH 降低，造成反應液逐漸酸化，最後使系統完全失敗。McCarty 之研究指出，只要 pH 維持在適當值，則揮發酸可提高至 600 mg/L，而甲烷氣產量並沒有減少。但也有認為揮發酸在 2,000 mg/L 以上時才具有毒性。若鹼度不足時，可藉由添加化學藥品 ($NaHCO_3$、Na_2CO_3、NaOH) 以提高鹼度並控制 pH。高揮發酸濃度產生常為系統不良操作之結果，故應該找出異常的原因加以控制，才是最佳的處理程式。

3. 營養物質：為維持消化反應之進行，必須供給充分的營養源，主要營養物質為氮和磷，這兩種元素和 C、H、O 為構成微生物細胞之主要元素，細胞平均有 12% N 及 2% P，而微生

物生長約需 11% N 和 2% P。微生物也需要一些微量元素以利其生長，如 Fe、Co、Mn、Mo、Ni 及 V 等，這些金屬元素常形成低溶解性的硫化物沉澱，被污泥中微生物吸收利用，但是這些金屬物質如果過量反而會對微生物產生毒性。

4. 毒性物質：毒性物質會抑制細菌活動，造成厭氧反應失敗，所以應防止毒性物質進入消化槽。一般陽離子對厭氧微生物分解速率之影響較有機物質為大，最常見之抑制物質為無機性物質，如鹼性物質、鹼土金屬、重金屬、氨氮、硫化物及許多種類之有機化合物。

伍、污泥消化

5.1 厭氧消化

11. 厭氧污泥消化之過程可分為哪二個階段？

解答：有機物如碳水化合物、蛋白質、脂肪等經由微生物厭氧分解可分解成簡單穩定物質，如甲烷 (CH_4) 及二氧化碳 (CO_2)。
厭氧之過程分為 2 個階段第一階段為酸化，第二階段為甲烷化。厭氧的兩階段中第一階段為酸化：酸生成菌將簡單之有機物化成有機酸；第二階段為甲烷化：甲烷生成菌將有機酸反應分解為 CH_4 及 CO_2，此時廢水達到穩定，厭氧消化作用完成。

12. 污泥厭氧消化處理程序的產物有哪些？

解答：1. 氣體：主要氣體產物為 CH_4 及 CO_2。當氣體由消化槽底部上升至表面時，挾帶小塊底泥並造成內部擾動，常為一般消化槽內唯一發生之攪拌現象。

2. 浮渣：浮渣之比重小，可以上升。浮渣之出現顯示攪拌並不完全，通常細菌存在於底泥中，而浮渣中有濃縮之養分，在沒有良好之攪拌狀況下，上層液即形成一層障礙，並造成浮渣消化不完全。

3. 上澄液：上層液含有高懸浮固體 SS 及 BOD，通常其性質受消化系統型式、消化效率及廢水性質所影響。操作上常以總固體 (TS) 及揮發性固體 (VS) 含量表示其特性。

4. 消化污泥：包括無機物質及不易消化之揮發性固體。良好穩定之消化污泥應有良好之排水性及脫水性，且不產生惡臭。消化污泥之性質為：污泥容易脫水、體積減少、外表凹凸不平、變黑、臭味減輕。

13. 污泥厭氧消化指標為何？

解答：厭氧消化最主要的目的是將有機物質穩定化，而欲使消化槽之操作穩定，必須注意 3 項主要影響消化效率之因子：良好的攪拌、最佳的環境條件、維持足夠長的污泥停留時間 (SRT)。

目前消化槽之設計逐漸傾向於維持系統較長的 SRT，如此可以減少因有機物負荷增加、溫度變化或毒性物質流入，所引起的不良反應，欲維持消化槽正常運轉，須經常量測：揮發酸、鹼度、pH、氣體量、CH_4 量、有機物減少率。

由於系統產生不正常的現象多肇因於：有機物負荷或流量負荷之突變、投入有機物性質的改變、溫度之改變及毒性物質流入消化槽等因素，故在不正常操作期間，揮發酸濃度會逐漸累積，而 CO_3^{2-}鹼度、pH、氣體產量、CH_4 比例及有機物減少率都會降低，若能小心監視這些參數，採取適當的應變措施，可以防止系統失敗，否則僅量測其中的任何一項，很難正確的描述系統狀況。

1. 揮發酸、CO_3^{2-}鹼度、pH 值

揮發酸、CO_3^{2-}鹼度及 pH 三項指標因彼此關係密切，故常合併討論。當 pH 為 6.5~7.6 時，HCO_3^-在消化槽中，是最主要緩衝能力的來源，由於消化過程中，含氮物質 (一般為蛋白質) 分解成 NH_3，而 NH_3 和 CO_2 作用產生 NH_4^+及 HCO_3^-，以初沉污泥為例：

$$C_{10}H_{19}NO_3+4.69H_2O \xrightarrow{\text{厭氧微生物}} 5.74CO^2+2.45CH^4+0.2C5H^7NO^2+0.8NH_4^++0.8HCO_3^-$$

由上列方程式可計算出，分解 1.0 g/L 初沉污泥之 VS ($C_{10}H_{19}NO_3$)，產生 200 mg/L 之鹼度 (以 $CaCO_3$ 計)。當含有鹼性物質或有機酸鹽類之物質流入消化系統，則陽離子將和鹼性物質或有機酸結合，產生之 CO_2 和 H_2O 遂形成 HCO_3^-，同時為鹼度之來源，若投入大量的工業廢棄污泥，常因缺乏含氮物質，而無鹼度產生，致使系統失敗，故在操作上須加以注意。由化學平衡之觀點，當消化槽開始不正常時，揮發酸開始增加，且被重碳酸鹽所中和，如下列方程式所示。

$$HCO_3^-+HAc \rightarrow H_2O+Ac^-+CO_2$$

Ac^-為 CH_3COO^-代號 (醋酸為最主要的揮發酸中間產物) 高濃度之 CO_3^{2-}可以中和更多的揮發酸，以防止系統之 pH 下降。典型消化槽中，最佳 pH=6.5~7.6 時，$[CO_3^{2-}]$=1,000~5,000 mg/L (以 $CaCO_3$ 計) 之間。一般最常被用以控制 pH 值的化學藥品有 $CaCO_3$、Na_2CO_3、NaOH 及 NH_3 等。過去使用石灰來因應有機物超負荷之問題，以便消化槽較快恢復正常，石灰雖然是最便宜的化學藥品，但並不是最經濟有效 (Cost-

effective) 的方式，因為由化學計量之觀點，欲使消化槽之 $[CO_3^{2-}]$>1,000 mg/L (以 $CaCO_3$ 計)，與 pH 提升至 6.5~7.6，單獨加入石灰是無法達到此目的。況且加入太多的石灰，會在消化槽內形成 $CaCO_3$ 沉澱物，使消化槽增添了不必要之固體物，減少消化槽之有效體積，因而減少了系統的 SRT。另一方面，當加入過量的石灰，則消化槽上部空間之 CO_2 氣體被往下吸，可能形成真空問題以及造成總氣體產量的減少。

2. 氣體產量及 CH_4 成分

厭氧消化主要目的是將有機物分解。污泥消化時，氣體產量和分解之有機物息息相關，一般去除每公斤 COD 可以產生 0.35 Nm^3 CH_4。若欲有效利用 CH_4，須同時量測 CH_4 產量及消化氣體中之 CO_2 及 H_2S 濃度，因 H_2S 會造成腐蝕問題而降低消化氣體的利用價值，都市污水廠污泥經厭氧消化後，其 CH_4 含有率約 60~75%。在厭氧系統操作結果指標中，CH_4 產量是最敏感的，因其直接受有機物去除的影響。當系統不平衡時，CH_4 之產量將減少 (總氣體量亦然)，但 CO_2 比例將增加，由於 CH_4 產量對水力負荷及有機物負荷甚為敏感，故不適合當作系統開始不正常的指標，欲瞭解系統操作情形，除每日量測 CH_4 產量及 CO_2 比例外，尚須同時監測揮發酸、pH 及總鹼度之變化。目前美國許多地區積極偵測消化氣體中 H_2 含量，以便找出 H_2 與系統操作結果之關係，因為 H_2 監測設備便宜且使用方便，故 H_2 含量之測定可能成為未來厭氧系統操作指標之一。

3. 有機物減少率

都市污水處理所產生之污泥，其有機成分通常以 TS、TVS 或 COD 來代表。以不同型式之污泥而言，厭氧消化時 TS 減少率約 40~50%、初沉污泥之 TVS 減少率為 40~70%，廢棄活性污泥則為 20~50%。若將初沉污泥與終沉污泥混合，其 TVS 減少率約 40~60%。COD 減少率方面，初沉污泥為 40~60%，廢棄活性污泥為 25~50%，即 COD 與 TVS 之減少量接近。就污泥性質而言，廢棄活性污泥比初沉污泥較難被微生物分解，即使增加 SRT，亦無法達到相同的有機物減少率，當消化槽之投入基質為初沉污泥時，速率限制步驟包括脂質 (脂肪酸)、丙酸之分解，及醋酸轉化成 CH_4，當以廢棄活性污泥為投入基質時，微生物細胞的水解是很重要的速率限制步驟，故在操作及設計消化槽時，須了解速率限制步驟，即投入有機物質特性，然後控制適當條件，以達到所要求之有機物減少率。