

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

高濃度廢水自發性高溫好氧處理程序(ATAT)最佳化研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2211-E-039-002-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：中國醫藥大學環境醫學研究所

計畫主持人：江舟峰

計畫參與人員：吳勇興,張芳華

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 8 月 13 日

高濃度廢水自發性高溫好氧處理程序(ATAT)最佳化處理

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 92 - 2211 - E - 039 - 002 -

執行期間： 92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

計畫主持人：江舟峰

共同主持人：

計畫參與人員：吳勇興、張芳華

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：中國醫藥大學環境醫學研究所

中 華 民 國 九 十 三 年 八 月 十 三 日

自發性高溫好氧處理程序 (ATAT) 之熱平衡模式敏感度分析

江舟峰¹ 吳勇興² 張芳華³

NSC : 92-2211-E-039-002

¹ 中國醫藥大學環境醫學研究所 副教授

² 財團法人中興工程顧問社 研究員

³ 中國醫藥大學環境醫學研究所 碩士班研究生

摘要

自發性高溫好氧處理程序 (autothermal thermophilic aerobic wastewater treatment, ATAT) 設計上之重點在於：系統中好氧分解產生的熱量是否足以讓曝氣槽自發性地維持高溫操作；因此，考量曝氣槽之熱平衡分析(heat balance analysis)對 ATAT 系統之設計而言是必要的。本研究就國內某 ATAT 食品油脂廢水實廠進行熱平衡分析，開發可利用實廠每日監測數據（操作溫度 (T_t) 進流水與出流水 COD 濃度 ($S_{i,COD}$, $S_{e,COD}$) 曝氣槽與放流水污泥濃度 ($X_{t,SS}$, $X_{e,SS}$) 估測實廠操作比生物潛熱 (specific biological heat potential, h_b) 之演算法，並以該實廠六個月之監測數據進行個案探討，利用敏感度分析研判影響 ATAT 高溫自發可行性之主要操作因子。

經本研究熱平衡分析研究發現該廠主要熱源為生物反應熱（佔總熱貢獻率之 87.1%），證實該廠為 ATAT 操作，能產生自發性高溫達平均溫度 48°C。而敏感度分析結果顯示：增加廢水進流溫度 (T_w) 與廢水進流濃度 ($S_{i,COD}$) 較能有效提升高溫自發之可行性，增加此二操作條件 ($S_{i,COD}$, T_w) 10%，可增加反應溫

度 (T_t) 約 3-4%。若降低操作條件 10%，則效應程度不變，正負號相反。本研究建議：若廠區無廢熱可用，則以提高進流廢水濃度來增加高溫自發性較為可行。

關鍵詞：熱平衡模式、自發性高溫好氧處理、敏感度分析、比生物潛熱

ABSTRACT

The design of autothermal thermophilic aerobic wastewater treatment (ATAT) must consider a key issue regarding whether sufficient heat can be produced from biological degradation to maintain spontaneous reaction at thermophilic temperatures. It is therefore important to analyze heat balance for system performance. This study develops a mathematical heat balance model, requiring daily average input data under steady-state conditions, including aeration tank temperature (T_t), influent and effluent COD concentrations ($S_{i,COD}$, $S_{e,COD}$), suspended solid concentrations for aeration tank and effluent ($X_{t,SS}$, $X_{e,SS}$) for estimation of specific biological heat potential (h_b). The model was employed to analyze a set of 6-month full-scale data. Sensitivity analysis was also performed on major

operating parameters affecting system performance.

Steady-state simulation demonstrates clear evidence of spontaneous reaction with a biological heat contribution as high as 87.1% at 48 °C. Sensitivity analysis indicates that the operating temperature can be elevated by 3-4% with an increase of influent temperature and COD concentration by 10%. If no waste heat is available, it is suggested that increasing influent COD concentration is a more effective mean to achieve reaction spontaneity.

Keywords: heat balance model, autothermal thermophilic aerobic treatment (ATAT), sensitivity analysis, specific biological heat potential

一、前言

活性污泥程序 (activated sludge process, ASP) 為目前最常見之廢水生物處理程序，其遭遇瓶頸在於高污泥量、低反應速率與低有機負荷，而自發性高溫好氧處理程序 (auto-thermal thermophilic aerobic waste-water treatment, ATAT) 適足以解決上述問題 (Chiang, 1999; Lapara and Alleman, 1999) 通常 ATAT 操作在 55-65°C 之高溫好氧條件，根據 vant Hoff-Arrhenius 定律，高溫能提高基質降解速率，而且根據熱力學與生物能量學 (bioenergetics) 觀點，高溫環境會使能量使用效率下降，在生物反應過程中，促使基質還原能走向熱能 (energy pathway) 損失比例增加，相對造成細胞生長可用能量 (cell synthesis pathway) 比例變小。因此，ATAT 之污泥量可望減少，而且該熱能損失恰可自發性地提供維持 ATAT 反應高溫之熱能需求 (Kamb-lum and Andrews, 1968; Rozich and Borgacs, 2001; Chiang et al., 2001)。

ATAT 在設計上之重點在於系統中好氧分解產生的熱量是否足以讓曝氣槽自發性地維持高溫操作；因此，考量曝氣

槽之熱平衡分析 (heat balance analysis) 對自發性高溫好氧系統的設計是必要的。

二、研究方法

本研究建立 ATAT 熱平衡系統如 Figure 1 所示，其 ATAT 熱平衡模式分析如下：

(累積項) = (廢水進出溫升損失項) + (曝氣進出溫降供熱項) - (曝氣蒸發熱損失項) + (生物反應產熱項) - (槽體熱傳損失項)

或

(Accumulation heat rate) = (Influent WW heat rate - Effluent WW heat rate) + (Inlet gas sensible heat rate - Exit gas heat rate) + (Inlet gas latent heat rate - exit gas latent heat rate) + (Reaction heat rate) - (Tank heat loss rate)

亦即

$(J_{acc}) = (J_w - J_{wl}) + (J_a - J_{al}) + (J_v - J_{vl}) + (J_b) - (J_t)$

或

$$V_t P_w C_{p,w} dT_t/dt = Q P_w C_{p,w} (T_w - T_t) + (G_a P_a C_{p,a} T_a - G_t P_t C_{p,t} T_t) + (h_{v,a} G_a P_a w_a - h_{v,t} G_t P_t w_t) + (Q S_{i,COD} E_{COD} (1 - Y_o)) h_b - k_t A_t / W_t (T_t - T_{amb})$$

其中 T_t, T_w, T_a 與 T_{amb} 分別為曝氣槽之反應溫度，廢水進流溫度，進流曝氣溫度與大氣溫度，單位 °C； P_w, P_a 與 P_t 分別為廢水，進流曝氣與出流曝氣之密度，單位 kg/m^3 ； $C_{p,w}, C_{p,a}$ 與 $C_{p,t}$ 分別為廢水，進流曝氣與出流曝氣之比熱，單位 $kcal/kg\cdot°C$ ； Q, G_a 與 G_t 分別為進流廢水，進流曝氣與出流曝氣之流量，單位 m^3/min ； $h_{v,a}$ 與 $h_{v,t}$ 分別為進流曝氣與出流曝氣之水蒸發潛熱，單位 $kcal/kg$ ； w_a 與 w_t 分別為進流曝氣與出流曝氣之水蒸氣含量，單位 $kg\ water/kg\ wet\ air$ ； $S_{i,COD}$ 與 E_{COD} 分別為廢水進流 COD 濃度與廢水 COD 處理效率，單位分別為 $g\ COD/m^3$ 與

無因次； Y_o 為視生長係數，單位 mg-COD of X /mg-COD of S ； h_b 為比生物潛熱，單位 kcal/g-CODr； k_t 為曝氣槽熱傳導係數，單位 kcal/min-m- $^{\circ}$ C； V_t, A_t 與 W_t 分別為曝氣槽之容積，表面積與槽壁厚度，單位分別為 m^3, m^2 與 m。

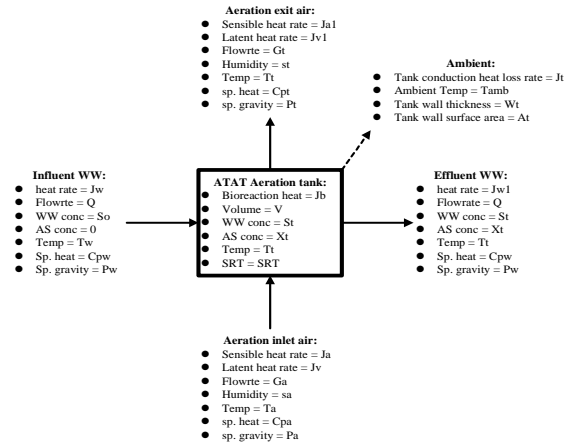


Figure 1: 高濃度廢水自發性高溫好氧處理程序 (ATAT) 熱平衡分析示意圖

當 $J_{acc} = 0$ 時，代表 ATAT 系統可維持穩態恆溫操作；當 $J_{acc} < 0$ 時，代表 ATAT 系統須有額外熱源方可維持穩態恆溫操作，否則無法達到所需操作溫度；而當 $J_{acc} > 0$ 時，代表 ATAT 系統須有額外冷卻方法維持穩態恆溫操作，否則操作溫度將上升。

利用 ATAT 熱平衡模式進行敏感度分析，可知所需進流水濃度與溫度是否足以提供足夠熱能，而使系統達自發性高溫操作。若廢水之熱能不足時，則可考慮工廠內是否有足夠之廢熱可供使用。

三、結果與討論

本研究以北部某食品油脂廢水實廠 (簡稱 KK 廠)，其自發性高溫好氧處理程序 (ATAT) 之每日操作數據，配合本研究 ATAT 熱平衡模式，進行熱平衡分析。假設該系統處於恆溫穩態操作，則 ATAT 熱平衡式即可被分別改寫成：

$$0 = (J_w - J_{w1}) + (J_a - J_{a1}) + (J_v - J_{v1}) +$$

$$(J_b) - (J_t) \quad (\text{eq.1})$$

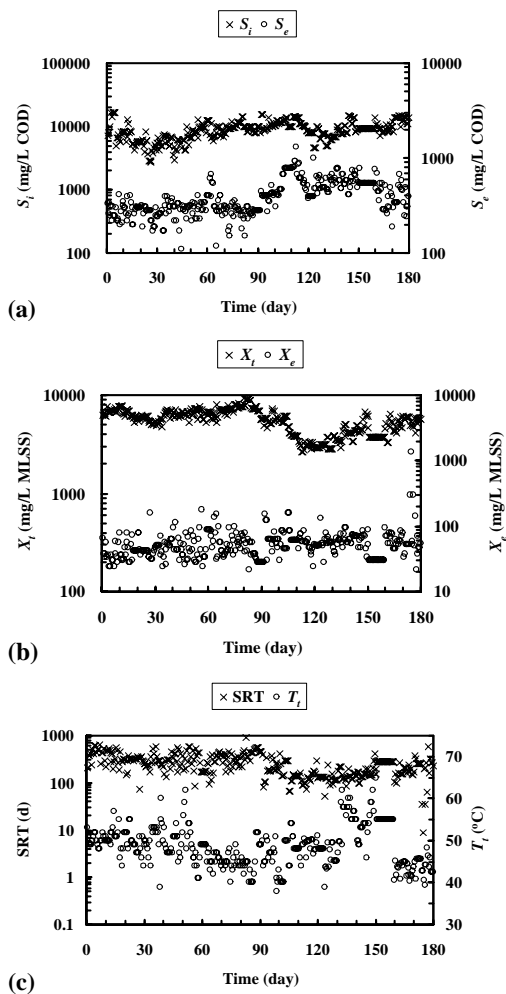
與

$$0 = Q P_w C_{p,w} (T_w - T_t) + (G_a P_a C_{p,a} T_a - G_t P_t C_{p,t} T_t) + (h_{va} G_a P_a w_a - h_{vt} G_t P_t w_t) + [Q S_{i,COD} E_{COD} (1 - Y_o)] h_b - k_t A_t / W_t (T_t - T_{amb}) \quad (\text{eq.1a})$$

如若廢水進流與出流熱率 (J_w 與 J_{w1})、曝氣顯熱 (sensible heat) 之進流與出流熱率 (J_a 與 J_{a1})、曝氣蒸發潛熱 (latent heat) 之進流與出流熱率 (J_v 與 J_{v1}) 與槽體熱損率 (J_t) 均已知，利用 eq.1 可算出生物反應熱率 (J_b)。

KK 廠每日操作數據如 Figures 2a-c 所示。該廠六個月的平均操作參數與上述熱平衡分析所需各項設計參數分述如下：

1. P_w, P_a 與 P_t 分別為廢水密度 1,000 kg/m^3 ，進流曝氣密度 0.899 kg/m^3 與出流曝氣密度 1.08 kg/m^3 ；
2. $C_{p,w}, C_{p,a}$ 與 $C_{p,t}$ 分別為廢水比熱 1 kcal/kg- $^{\circ}$ C，進流曝氣比熱 0.251 kcal/kg- $^{\circ}$ C 與出流曝氣比熱 0.278 kcal/kg- $^{\circ}$ C；
3. Q, G_a 與 G_t 分別為進流廢水流量 0.158 m^3/min ，進流曝氣流量 31.2 m^3/min 與出流曝氣流量 25.5 m^3/min ；
4. h_{va} 與 h_{vt} 為進流曝氣之水蒸發潛熱 527 kcal/kg 與出流曝氣之水蒸發潛熱 569 kcal/kg；
5. w_a 與 w_t 分別為進流曝氣之水蒸氣含量 0.020 kg water/kg wet air 與出流曝氣之水蒸氣含量 0.073 kg water/kg wet air；
6. k_t 為水泥曝氣槽熱傳導係數 0.012 kcal/min-m- $^{\circ}$ C；
7. A_t 與 W_t 分別為曝氣槽之表面積 293 m^2 與槽壁厚度 0.5 m。



Figures 2a-c: ATAT 實廠日操作數據: (a) 進流廢水 COD 濃度 (S_i) 與放流水 COD 濃度 (S_e); (b) 曝氣槽 MLSS 濃度 (X_t) 與放流廢水 MLSS 濃度 (X_e); (c) SRT 估算值與曝氣槽溫度 (T_t)

將上述參數值代入 eq.1 與 eq.1a, 可以計算出 KK 廠之各項熱率值如 Table 1 所示。

Table 1 顯示所有熱貢獻項中, 廢水進流熱率 (J_w) 提供了一半的總熱貢獻來源 (佔 49.8%), 為系統中最重要熱源。生物反應熱率 (J_b) 提供了 37.8%, 是第二重要的熱源。曝氣進流溫度雖然高達 120°C , 其熱貢獻以顯熱形式提供者 (J_a) 只有 9.2%, 這是由於空氣的比熱與密度均甚低於廢水所致。另外, 蒸發潛熱進流熱率 (J_v) 則僅佔總熱貢獻 3.2%。

Table 1: ATAT 實廠熱平衡單項分析結果

Heat contribution terms	kcal/min	%
Wastewater influent heat rate (J_w)	4,572	49.8%
Inlet aeration sensible heat rate (J_a)	846.1	9.2%
Inlet aeration latent heat rate (J_v)	290.3	3.2%
Biological reaction heat rate (J_b)	3,465	37.8%
Heat loss terms		
Wastewater effluent heat rate (J_{w1})	7,567	82.5%
Outlet aeration sensible heat rate (J_{a1})	331.4	3.6%
Outlet aeration latent heat rate (J_{v1})	1,148	12.5%
Tank loss heat rate (J_t)	126.5	1.4%

將上述所有的熱率項目重新劃分為廢水進出項 ($J_w - J_{w1}$)、曝氣顯熱進出項 ($J_a - J_{a1}$)、曝氣潛熱進出項 ($J_v - J_{v1}$)、生物反應項 (J_b) 與槽體熱損率 (J_t), 計算結果如 Table 2 所示。

Table 2: ATAT 實廠熱平衡分類項分析結果

Heat requirement	kcal/min	%
Wastewater stream ($J_w - J_{w1}$)	-2,995	75.3%
Latent aeration heat ($J_v - J_{v1}$)	-857.2	21.5%
Tank loss (J_t)	-126.5	3.2%
Heat generation		
Sensible aeration heat ($J_a - J_{a1}$)	514.7	12.9%
Biological reaction heat (J_b)	3,465	87.1%

由 Table 2 可發現只有生物反應項 (J_b) 與曝氣顯熱進出項 ($J_a - J_{a1}$) 是熱貢獻來源。Table 2 亦同時顯示生物反應項 (J_b) 與曝氣顯熱進出項 ($J_a - J_{a1}$) 分別貢獻 87.1% 與 12.9% 之總熱貢獻率。在總熱貢獻率中, 有 75.3% 是屬於廢水進出項 ($J_w - J_{w1}$), 使廢水由進流溫度 29°C , 自發性地提升至反應溫度 48°C ; 另有 21.5% 是用於曝氣潛熱進出項 ($J_v - J_{v1}$), 顯示曝氣

蒸發所造成的熱損失不可輕忽；至於剩下的 3.2% 則用於槽體熱損率(J_t)所需，顯示 50 cm 厚的水泥槽絕熱效果不錯。

雖然 KK 廠之反應操作溫度 48°C，並非一般生物學上所認定的典型高溫菌 (thermophiles) 最適溫度範圍 55-65°C (Brock, 1986)，但確實屬於廢水高溫生物處理操作之溫度範圍：45°C 以上 (Lapara and Alleman, 1999)。此現象亦說明此類 ATAT 實廠中，可能仍存有部分的中溫菌(mesophiles)。

本研究利用 KK 廠之各項設計參數與六個月的平均操作參數，計算出該廠之生物反應熱率(J_b)為 3,465 kcal/min (Table 2)。進一步藉由生物反應熱率(J_b)，配合廢水進流濃度($S_{i,COD}$)與處理效率(E_{COD})，亦即

$$J_b = Q S_{i,COD} E_{COD} (1 - Y_o) h_b \text{ (eq.2)}$$

根據日平均廢水進流濃度 ($S_{i,COD}$) 8,937 mg COD/L (或 g/m³)與處理效率 (E_{COD}) 95.09%，配合曝氣槽污泥濃度 ($X_{t,SS}$)日平均值 5,536 mg/L SS (6,918 mg/L COD)，水力停留時間 (θ) 2.20 d，污泥停留時間 (θ_c) 261 d，採用

$$Y_o = X_{t,COD} / (S_{i,COD} E_{COD}) \times \theta / \theta_c \text{ (eq.3)}$$

算出平均視生長係數 (Y_o) 為 6.9×10^{-5} (COD of X/ COD of S)。配合平均進流流量 (Q) 0.158 m³/min，利用 eq. 2a 可算出 h_b 等於 2.7 kcal/g-CODr。

若改以每日監測數據為計算基準，可算得 h_b 之每日變化如 Figure 3 所示，其平均值為 3.2 kcal/g-CODr (Cv = 56%)，此估測值之範圍涵蓋上述以六個月平均監測數據求得之 h_b (2.7 kcal/g-CODr)，且與文獻值 (3.4-3.5 kcal/g-CODr) (Cooney *et al.*, 1968) 相當接近。Figure 3 所示每日穩態視生長係數 (Y_o) 之 Cv 值高達 88%。事實上，視生長係數 (Y_o) 之計算

與系統是否處於穩態 (steady state) 有關。上述 Y_o 之計算式 (eq.3) 是基於系統穩態假設下，所推導而得。

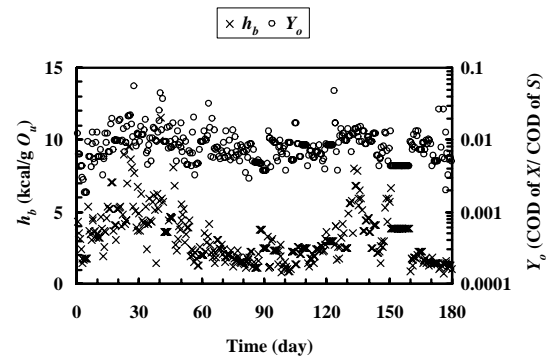


Figure 3: ATAT 實廠每日之比生物潛熱 (h_b) 與 Y_o 估測數據

根據 Y_o 之定義式：

$$\begin{aligned} Y_o &= -dX/dS \\ &= [(dX/dt)/X] / [-(dS/dt)/X] \\ &= (\mu_g - k_d) / (\mu_g/Y_g) \end{aligned} \text{ (eq. 4)}$$

與該系統之質量平衡主導方程式 (假設曝氣槽與放流水基質濃度相同， $S_{t,COD} = S_{e,COD}$)：

$$dX_{t,COD}/dt = -X_{t,COD} / \theta_c + (\mu_g - k_d) X_{t,COD} \text{ (eq. 5)}$$

$$dS_{e,COD}/dt = (S_{i,COD} - S_{e,COD}) / \theta - \mu_g X_{t,COD} / Y_g \text{ (eq. 6)}$$

可以推導出 Y_o 之計算通式：

$$Y_o = (dX_{t,COD}/dt + X_{t,COD} / \theta_c) / [(S_{i,COD} - S_{e,COD}) / \theta - dS_{e,COD}/dt] \text{ (eq. 3a)}$$

在穩態條件下，亦即 $dX_{t,COD}/dt = dS_{e,COD}/dt = 0$ ，上式 (eq.3a) 可以簡化為 eq.3。由上述推導可以瞭解：在穩態與非穩態條件下，淨生長係數 (Y_o) 之計算式有所差異。

因此，上述以 KK 廠六個月平均監測

數據所求得之 Y_o (6.9×10^{-5} COD of $X/\text{COD of } S$) 與 Figure 3 所示之每日平均值 (9.3×10^{-3} COD of $X/\text{COD of } S$), 其差異可能是由於系統處於非穩態條件所造成。而在穩態假設條件下, 所估測之比生物潛熱 (h_b) 平均值 3.2 kcal/g-CODr ($C_v = 56\%$) 與文獻值 (3.4-3.5 kcal/g-CODr) (Coo-ney *et al.*, 1968) 之差異, 可能也是由於系統處於非穩態條件所造成之估測誤差。

本研究進一步以上述 KK 廠之操作條件與熱平衡模式 (eq. 1a) 為基礎, 進行 ATAT 熱平衡模式敏感度分析。經由變異各操作條件 ($S_{i,COD}$, E_{COD} , Y_o , T_w , G_a) $\pm 10\%$, 計算其可達之反應溫度 (T_t), 以瞭解各操作條件對反應溫度 (T_t) 之影響程度。

在進行敏感度分析時, 所採用之比生物潛熱值 (h_b) 與視生長係數 (Y_o) 值, 分別為 3.5 kcal/kg-CODr 與 0.24 COD of $X/\text{COD of } S$, 其他操作參數則同上所述, 其敏感度分析結果如 Table 3 所示。

由 Table 3 可知, 增加各操作條件 ($S_{i,COD}$, E_{COD} , Y_o , T_w , G_a) 10%, 對反應溫度 (T_t) 之影響程度依序為: 廢水進流溫度 (T_w) 之效應可增加 T_t 約 4%; 廢水進流濃度 ($S_{i,COD}$) 之效應與廢水處理效率 (E_{COD}) 皆可增加 T_t 約 3%; 淨生長係數 (Y_o) 之效應可降低 T_t 約 1%; 曝氣流量 (G_a) 之效應則可降低 T_t 約 0.3%。若降低各操作條件 ($S_{i,COD}$, E_{COD} , Y_o , T_w , G_a) 10%, 則效應程度不變, 正負號相反。

如 Table 3 所示, 廢水進流溫度 (T_w) 對反應溫度 (T_t) 之影響程度最大, 以實際操作的觀點, 此意謂對廢水直接加熱, 是提高反應溫度 (T_t) 最有效的方法。但由於廢水流量 (Q) 大、比熱 ($C_{p,w}$) 高, 此舉並不符合經濟效益。因此若廠區末端製程為高溫操作, 其排放原水即屬高溫, 就有利於 ATAT; 或若廠區前端製程為高溫操作, 而末端製程為室溫或低溫操作, 雖然其製程排放廢水屬室溫或低溫, 但是由於前端高溫製程通

常有高溫廢熱, 只要利用節能器 (e-conomizer) 設計, 可將這些高溫廢熱用來提高廢水進流溫度 (T_w), 或直接加熱曝氣槽。

Table 3: 自發性高溫好氧處理系統之熱平衡模式敏感度分析結果

Variation on effect	+10%	-10%
Selected effect	Resulted variation of T_t	
$S_{i,COD}$	+3.2%	-3.3%
E_{COD}	+3.1%	-3.1%
Y_o	-0.98%	+0.99%
T_w	+4.1%	-4.1%
G_a	-0.29%	+0.32%

若廠區無廢熱可用, 則以提高進流廢水濃度來增加高溫自發性較為可行。

在應用上述結果時, 必須注意上述計算是以 KK 廠之動力參數與槽體設計參數為基礎, 並未考量其固液分離設備是否能配合處理其曝氣槽所產生之污泥量 (X_t), 而達到所設定之污泥停留時間 (SRT)。

四、結論與建議

1. 本研究根據某食品油脂廢水自發性高溫好氧處理 (ATAT) 實廠六個月之日操作數據, 進行熱平衡分析, 發現該廠之主要熱源為生物反應熱 (佔總熱貢獻率之 87.1%), 因此證實該廠實為 ATAT 操作, 能產生自發性高溫 (48°C)。
2. 本研究求得該食品油脂廢水之比生物潛熱 (h_b), 其平均值 3.2 kcal/g-CODr ($C_v = 56\%$), 與 Coo-ney *et al.* (1968) 之文獻值範圍 3.4-3.5 kcal/g-CODr 相當接近。
3. 本研究對該 ATAT 實廠進行熱平衡敏感度分析, 結果顯示: 增加廢水進流溫度 (T_w) 與廢水進流濃度 ($S_{i,COD}$) 較能有效提升高溫自發之可行性, 增

加此二操作條件 ($S_{i,COD}$, T_w) 10% , 可增加反應溫度 (T_t) 約 3-4%。

參考文獻

- Brock T. D. (1986) *Introduction: An overview of the thermophiles. In Thermophiles: General, Molecular, and Applied Microbiology*, John Wiley and Sons, New York, NY, U.S.A.
- Cooney, C. L., Wang, D. I. C. and Mateles, R. I. (1968) "Measurement of heat evolution and correlation with oxygen consumption during microbial growth," *Biotechnology and Bioengineering*, 11,269-281.
- Chiang C. F. (1999) *Study of thermophilic aerobic treatment of high strength wastewater by respirometry*. Technical Report, Chaoyang University of Technology, Taichuang, Taiwan, ROC.
- Chiang, C. F., Lu, C. J., Sung, L. K. and Wu, Y. S. (2001) "Full-scale evaluation of heat balance for autothermal thermophilic aerobic treatment of food processing wastewater," *Water Science and Technology*, **43**(11), 251-258.
- Kambhu, K. and Andrews, J. F. (1968) "Aerobic thermophilic process for the biological treatment of wastes – Simulation studies," *Journal WPCF*, **41**(5), Part 2, R127-R141.
- Lapara T. M. and Alleman J. E. (1999). "Review Paper --Thermophilic aerobic biological wastewater treatment," *Water Research*, **33**(4), 895-908.
- Rozich A. F. and Borgacs (2001). "Use of thermophilic biological aerobic technology for industrial waste treatment," *The Second World Water Congress of IWA*, Berlin, Germany.