

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

電腦模擬微生物成長對生物濾床濾料乾燥現象之影響(III)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2211-E-216-001-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：中華大學土木工程學系

計畫主持人：黃思蓊

計畫參與人員：溫奕杰，盧宜含及白旭峰

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 1 日

電腦模擬微生物成長對生物濾床濾料乾燥現象之影響 (III)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC 92 - 2211 - E - 216 - 001
執行期間：92年8月1日至93年7月31日

計畫主持人：黃思尊 副教授
共同主持人：(無)
計畫參與人員：白旭峰、溫奕杰、盧宜含

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：中華大學土木工程學系環境工程組

中華民國 93 年 10 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

電腦模擬微生物成長對生物濾床濾料乾燥現象之影響(III)

Modeling the drying phenomenon in biofiltration of waste gases containing ethylacetate using pure strain *Rhodococcus fascians* (III)

計畫編號：NSC 92-2211-E-216-001

執行期限：92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

主持人：黃思尊 副教授 中華大學土木工程學系

計畫參與人員：白旭峰、溫奕杰、盧宜含 中華大學土木工程學系

中文摘要

影響生物濾床表現的因素有很多，而乾燥現象卻是影響濾床操作的最重要因素之一，濾床內的水分會因進流氣體的濕度、溫度或進流速度的不同，而有不同的乾燥速率。本研究的目的是要彙整所有影響濾料水分變化的重要因素，建立一套生物濾床水分乾燥的模式。換言之，希望藉由一個簡單且容易推導的理論，結合微生物的生長、質量傳輸現象及溫度的變化，以電腦模擬的方式來輔助驗證濾料中水分移動的機制。為了獲得水分乾燥模式的電腦模擬解，在數學的求解過程中必須依照其困難度分為三階段來進行。首先針對污染物於生物濾床的穩態代謝現象進行電腦模擬，希望能藉由電腦求得已降解污染物的量而得知生物濾床系統因微生物分解污染物所獲得的熱能。其次，必須進行動態代謝現象的電腦模擬，其原因是水分乾燥的過程中，微生物的活性將會大幅受到影響，其對污染物的降解能力也會隨時間而變化，在數學的求解過程中也較為困難。最後，有了以上基礎即針對水分的乾燥現象與微生物的代謝現象進行電腦模擬數值上求解。

關鍵詞：濾料含水率、水分乾燥機制、微生物代謝

英文摘要

Drying is one of serious operating problems in biofiltration. This project is in the third fiscal year. The kinetic modeling program for biodegradation of ethyl acetate in biofilters was developed and integrated into the drying modeling program. Upon performing the biofiltration process, the operating conditions for biofiltration were well controlled, using several Fuzzy rule based controllers and seeding a pure culture. In addition, all possible influent factors must be reviewed such as inputting the combined substrates to biofilters with sludge as a seeding culture. In order to solve the program that combines the kinetic model with drying mechanism, we worked on three sequencing way. At the beginning, we obtained the produced heat by the microorganisms with a steady state modeling technique. Next, we solved the dynamic model with Matlab PDE toolkit and obtained the biodegradation efficiency versus time by substituted a simulated water concentration into the inhibition form of original kinetic model. Finally, we compared the previous results with the solution of our proposed drying model.

Key words: Computer modeling, steady-state kinetics, dynamic kinetics, and drying of biofilters

一、前言

在 1920 年，即有文獻報導將廢水處理廠產生的臭氣，以風管導入土壤堆積而成的小山丘底部，讓氣體通過土壤排出，藉由土壤內微生物的作用去除臭味，亦即所謂的土壤濾床 (soil bed) (邱創汎等，1996)。在歐洲，第一座生物濾床於 1964 年設置在瑞士的 Geneva-Villette，用來處理堆肥工廠的惡臭，目前在德國及荷蘭已有超過 500 座面積介於 10 至 1000 m² 的生物濾床應用於廢氣處理 (吳俊耀，1993)。近二十年來生物濾床廢氣處理技術已逐漸開發完成，除了脫臭的功能外，並運用於處理工業廢氣所含的惡臭物質如硫化氫，及揮發性有機物 (volatile organic compounds, VOCs)，以達淨化空氣品質的目的 (van Groenestijn and Hesselink, 1993)。

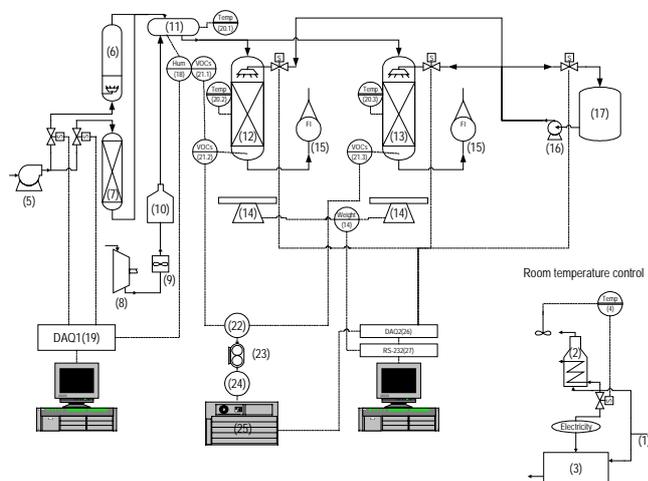
目前常用的廢氣生物處理技術有生物洗滌器 (bioscrubber)、生物滴濾床 (biotrickling filter)、生物濾床 (biofilter) 及活性污泥曝氣法 (activated sludge aeration)，其中以生物濾床最廣泛被使用。影響生物濾床表現的因素很多有例如：填充濾料的種類、營養源的添加、pH 值、進流氣體的風量及有機物濃度、有機物的種類、反應器種類、選植的菌種、氧氣利用速率、生物降解動力、操作溫度和溼度等 (Baltzis *et al.*, 1997), Gostomski *et al.* (1997) 提到，水含量會影響濾床的物理及微生物性質，若水分不足時，微生物的降解能力會減低，而過高則會造成壓降問題，因為通常濾床的水含量為不飽和狀態，所以不會形成自由水流，因此判定濾床中的水含量是否足夠是一件不容易的事。van Lith *et al.* (1997) 也曾提及影響微生物生長的變數中，水份是最重要的因素之一。在本實驗室先前的研究中，發現濾料乾燥的現象是生物濾床操作技術上不可忽視的問題之一，乾燥現象及營養源的限制被公認是生物濾床的最大致命傷，因為微生物攝取營養

源、碳源及氧氣都透過液相的擴散擴散作用，在沒有足夠的水份環境微生物將會快速的脫水乾燥而死亡 (Mysliwiec *et al.*, 2001)。

二、研究方法

2.1 實驗設備

本實驗之實驗設備可分為硬體和軟體等兩部份，請參考圖 2-1。整個系統係架設在一個一坪大的空間中。



- (1) clean air, (2) heater, (3) air conditioner, (3) thermometer (K-type) & controller for room temperature, (5) blower, (6) humidifier filled with water, (7) dessicator, (8) compressor, (9) mass flowmeter, (10) tanned glass bottle with ethyl acetate, (11) mixing chamber, (12) biofilter, (13) biofilter (Blank of inoculation), (14) electric balance, (15) rotameter, (16) water pump, (17) nutrient tank, (18) hygrometer, (19) DAQ Card (UEI) for humidity control, (20) mercury thermometers, (21) VOCs sampling tubes, (22) electric stream selector, (23) diaphragm pump, (24) electric sample injector, (25) gas chromatography, (26) DAQ card (NI), (27) 4-port PCI-bus RS-232 Serial IO card (ADVantech).

圖 2-1、實驗設備圖

在硬體方面可分為 4 個主要的控制系統，分別為進流濃度、進流室溫、進氣溼度及濾料含水率 (僅初期)，並自動記錄初期水分補償的噴水時間、濾料總重、進出口 VOCs 濃度、室溫與溼度。為此，使用了二部電子天平 (JADEVER, LPW-1260,

Taipei, Taiwan)、一個質量流量計 (SIERRA, 810C-DR-MP, Monterey, California, USA)、兩部奔騰級的個人電腦和 2 片資料截取卡 (UEI, PD2-MF-16-50/16L, Maryland, US; NI, PCI-6025E, Austin, Texas, US) 以及其他簡單的硬體與控制元件。在軟體方面, 則使用美國國家儀器公司 (National Instrument) 所發展的 LabVIEW 儀控程式, 利用模糊化的邏輯控制初期噴水時間和進流濕度, 讓實驗的操作變數在精密的控制下, 增進實驗的可重覆性 (Hwang et. al, 2002)。

2.2 研究內容

本研究的目的是要彙整所有影響濾料水分變化的重要因素及有關濾床模式的研究, 藉由一個簡單且容易推導的理論, 結合微生物的生長、質量傳輸現象及水份和溫度的變化建立一套預測模式, 以電腦模擬的方式來輔助驗證濾料中水分移動的機制, 提供濾床設計時可以用一個經濟且快速有效的方法, 對濾料含水率的變化有更進一步的了並能評估濾床的效能。

濾床內的水份會因進流氣體的濕度、溫度或進流速度的不同, 而有不同的乾燥速率, 研究濾料的乾燥現象, 以傳統物理性乾燥機制為主, 即進流氣體與濾料溫差間的傳熱導致水分揮發, 因微生物降解有機物時會產熱, 所以也考慮微生物代謝所產生的熱而使得濾料乾燥, 亦將細胞合成時所需的水份加入。使用水溶性高的乙酸乙酯作為污染物。

三、模式推導

從文獻中, 對於濾床的模式研究已相當多, 但有關濾料乾燥的模式並不多, 然而乾燥現象卻是影響濾床操作的重要因素, 因此將利用理論推導出一數值模式, 預測濾床中的水份變化, 並探討其對濾床表現的影響, 以作為濾床設計參考。

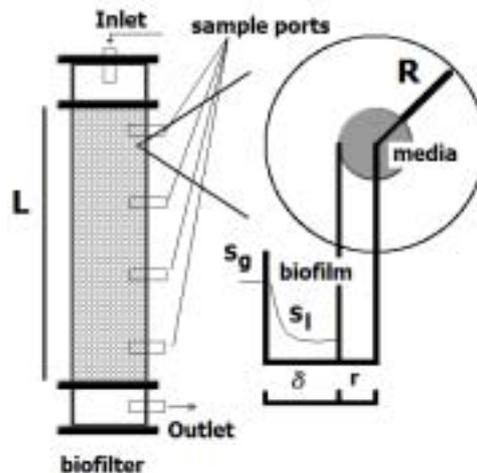


圖 3-1 生物濾床及濾料示意圖

3.1 模式的基本條件

真實的生物濾床系統是相當複雜且多變, 在建立模式時, 必須對系統做以下的假設, 使系統處於一個能控制的狀態下:

1. 氣體以塞狀流 (plug-flow) 通過濾床。
2. 有機污染物及氧氣在氣相與液相 (生物膜) 之間的濃度始終維持平衡, 並遵循亨利定律。
3. 生物膜全都具有活性, 污染物降解只發生在生物膜內。
4. 將生物膜密度及生物膜厚度視為定值。
5. 微生物的水份佔全部細胞的 75 %。
6. 濾料視為圓形, 不考慮濾料吸附作用。
7. 由圖 3-1 得知, 當 $R = r$, 生物膜為厚度為零, 而在 $R = r + \delta$ 時, 生物膜厚度為 δ 。
8. 生物生長動力考慮二種基質, 將 Luong (1987) 所提出的抑制關係式以乘法形式修改成:

$$\mu = \left(\frac{\mu_{\max} S_l}{K_s + S_l} \right) \left(1 - \frac{S_l}{S_l^*} \right)^n \left(\frac{O_l}{K_o + O_l} \right) \quad (3-1)$$

S_l : 生物膜內污染物濃度

S_l^* : 表示微生物受到抑制時的污染物液相濃度

K_s : 污染物之飽和常數

μ : 比生長速率

μ_{\max} : 最大比生長速率

O_l : 氧氣在生物膜內的濃度

K_o : 氧氣的飽和常數

$n = 1.04$

3.2 生物濾床模式推導

基於上述的假設，利用質量傳送的觀念，分別推導出污染物與氧氣在氣流中及生物膜內的濃度平衡關係式。

在生物膜內污染物及氧氣的平衡方程式為：

$$\frac{\partial S_l}{\partial t} = \frac{D_s}{R^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(R^2 \frac{\partial S_l}{\partial R} \right) - \frac{X_v}{Y_s} \mu \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial O_l}{\partial t} = \frac{D_o}{R^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(R^2 \frac{\partial O_l}{\partial R} \right) - \frac{X_v}{Y_o} \mu \quad (3-3)$$

當系統達穩定狀態時，污染物及氧氣在生物膜內的累積量為零，故 (3-2) 和 (3-3) 式等號左邊為零，將其展開並重新整理，則穩定狀態下的方程式如下：

$$D_s \frac{d^2 S_l}{dR^2} = -D_s \frac{2}{R} \frac{dS_l}{dR} + \frac{X_v}{Y_s} \mu \quad (3-4)$$

$$D_o \frac{d^2 O_l}{dR^2} = -D_o \frac{2}{R} \frac{dO_l}{dR} + \frac{X_v}{Y_o} \mu \quad (3-5)$$

D_s ：污染物的擴散係數

D_o ：氧氣的擴散係數

R ：將濾料視為圓形之半徑

X_v ：生物膜密度

Y_s ：單位污染物之微生物產率

Y_o ：單位氧氣之微生物產率

在假設中已知，污染物降解只發生在生物膜內，故每組方程式有兩個邊界條件：

1. 在生物膜表面，即圖 3-1 中 $R = r + \delta$ 處之初始條件：

$$S_l = \frac{S_g}{m_s} \quad (3-6)$$

$$O_l = \frac{O_g}{m_o} \quad (3-7)$$

S_g ：污染物在氣相中的濃度

O_g ：氧氣在氣相中的濃度

m_s ：污染物之分散係數

m_o ：氧氣之分散係數

分散係數為在平衡狀態時，物質在氣相與液相分佈濃度之比值。

2. 在濾料表面，即圖 3-1 中 $R = r$ 處之邊界條件：

$$\frac{dS_l}{dR} = 0 \quad (3-8)$$

$$\frac{dO_l}{dR} = 0 \quad (3-9)$$

在氣流中（濾床的氣流方向）污染物及氧氣的平衡方程式為：

$$\frac{\partial S_g}{\partial t} = -U_g \frac{\partial S_g}{\partial L} + A_s D_s \left[\frac{\partial S_l}{\partial R} \right]_{R=r+\delta} \quad (3-10)$$

$$\frac{\partial O_g}{\partial t} = -U_g \frac{\partial O_g}{\partial L} + A_s D_o \left[\frac{\partial O_l}{\partial R} \right]_{R=r+\delta} \quad (3-11)$$

當系統達穩定狀態時，污染物及氧氣在濾床中的累積量為零，故 (3-10) 和 (3-11) 式等號左邊為零，將其展開並重新整理，則穩定狀態下的方程式如下：

$$U_g \frac{dS_g}{dL} = A_s D_s \left[\frac{dS_l}{dR} \right]_{R=r+\delta} \quad (3-12)$$

$$U_g \frac{dO_g}{dL} = A_s D_o \left[\frac{dO_l}{dR} \right]_{R=r+\delta} \quad (3-13)$$

在濾床之入口處 ($L = 0$)，污染物與氧氣濃度等於進流濃度，所以初始條件為：

$$S_g = S_{gi}, \quad O_g = O_{gi} \quad (3-14)$$

S_{gi} ：污染物在氣相中的初始濃度

O_{gi} ：氧氣在氣相中的初始濃度

3.3 模式求解

方程式 (3-4) 與 (3-5) 式，及邊界條件 (3-6) (3-9) 式，構成邊界條件問題 (BVP)，而方程式 (3-12) 與 (3-13) 式，與出始條件 (3-14) 式，構成初始值問題 (IVP)。

在求解的過程中，要將每個方程式無因次化，可使變數與係數分離成為標準的方程式，並將濾床分為十層，而解得第一層之出口濃度當作在第二層的初始濃度，如此反覆求解至第十層。再將解得之生物膜中污染物濃度，帶入先前求出的生物膜內污染物與氧氣濃度的關係式中，求解生物膜內氧氣濃度，最後再利用 Runge-Kutta method 積分，可以得到氧氣在濾床中隨高度變化的濃度。電腦程式撰寫的軟體是使用 MATLAB。

將 (3-4) 與 (3-5) 式無因次化得到下列方程式：

$$\frac{d^2 \bar{S}_l}{d\theta^2} = -\frac{2}{\theta} \frac{d\bar{S}_l}{d\theta} + \phi^2 \left[\frac{\bar{S}_l}{1+\bar{S}_l} \right] \left[\frac{\bar{O}_l}{1+\bar{O}_l} \right] \left[1 - \frac{K_s}{S_l^*} \bar{S}_l \right] \quad (3-15)$$

$$\frac{d^2 \bar{O}_l}{d\theta^2} = -\frac{2}{\theta} \frac{d\bar{O}_l}{d\theta} + \phi^2 \lambda \left[\frac{\bar{S}_l}{1+\bar{S}_l} \right] \left[\frac{\bar{O}_l}{1+\bar{O}_l} \right] \left[1 - \frac{K_s}{S_l^*} \bar{S}_l \right] \quad (3-16)$$

邊界條件 (3-6) (3-9) 式無因次化得到：
在 $\theta=1$, $\bar{S}_l = \sigma_1 \bar{S}_g$, $\bar{O}_l = \sigma_2 \bar{O}_g$ (3-17)

在 $\theta=0$, $\frac{d\bar{S}_l}{d\theta} = 0$, $\frac{d\bar{O}_l}{d\theta} = 0$ (3-18)

將 (3-12) 與 (3-13) 式無因次化得到下列方程式：

$$\frac{d\bar{S}_g}{dL} = \psi \left[\frac{d\bar{S}_l}{d\theta} \right]_{\theta=1} \quad (3-19)$$

$$\frac{d\bar{O}_g}{dL} = \psi \omega \left[\frac{d\bar{O}_l}{d\theta} \right]_{\theta=1} \quad (3-20)$$

邊界條件 (3-14) 式無因次化得到：
 $\bar{L} = 0$, $\bar{S}_g = \bar{O}_g = 1$ (3-21)

將方程式 (3-15) 與 (3-16) 相除得到：

$$\frac{\frac{d^2 \bar{S}_l}{d\theta^2} + \frac{2}{\theta} \frac{d\bar{S}_l}{d\theta}}{\frac{d^2 \bar{O}_l}{d\theta^2} + \frac{2}{\theta} \frac{d\bar{O}_l}{d\theta}} = \frac{1}{\lambda} \quad (3-22)$$

將 (3-22) 式帶入邊界條件 (3-17) 式解得：
 $\bar{O}_l = \sigma_2 \bar{O}_g + \lambda (\bar{S}_l - \sigma_1 \bar{S}_g)$ (3-23)

將方程式 (3-19) 與 (3-20) 相除得到：
 $\frac{d\bar{S}_l}{dL} = \frac{1}{\omega \lambda} \frac{d\bar{O}_g}{dL}$ (3-24)

將 (3-24) 式帶入邊界條件 (3-21) 式解得：
 $\bar{O}_g = 1 + \lambda \omega (\bar{S}_g - 1)$ (3-25)

無因次的定義如下：

$$\bar{S}_g = \frac{S_g}{S_{gi}} , \bar{O}_g = \frac{O_g}{O_{gi}} , \bar{O}_l = \frac{O_l}{K_O} , \bar{S}_l = \frac{S_l}{K_S} , \bar{L} = \frac{Z}{L} , \bar{\theta} = \frac{X}{\delta}$$

$$\phi = \left(\frac{\mu_{\max} X_V \delta^2}{Y_S D_S K_S} \right)^{0.5} , \lambda = \frac{D_S K_S Y_S}{D_O K_O Y_O} , \psi = \frac{D_S A_S K_S L}{\delta U_g S_{gi}} ,$$

$$\omega = \frac{K_O D_O S_{gi}}{K_S D_S O_{gi}}$$

$$\sigma_1 = \frac{S_{gi}}{K_S m_S} , \sigma_2 = \frac{O_{gi}}{K_O m_O}$$

解這些方程組步驟為，首先利用方程式 (3-23) 與 (3-25) 式，帶入 (3-15) 式，如此就可將方程式中化簡成為只有一個變數，再使用 orthogonal collocation method 可解出生物膜中污染物的通量，將解出之通量帶入方程式 (3-19) 式中，此時利用邊界條件 (3-21) 式，使用 Runge-Kutta method 積分，可求得污染物在氣相中的濃度，再將解出之濃度當作下一層之初始濃度，反覆上述步驟，直到濾床出口處為止，即可得到濃度隨濾床高度增加變化的量。

表 2-7 乙酸乙酯動力參數值

參數	Value	單位	參考文獻
A_s	450	($1/m$)	林志芳 (2002)
D_s	3.6×10^{-6}	(m^2/hr)	Ottengraf and van den oever (1983)
D_o	8.676×10^{-6}	(m^2/hr)	Shareedfdeen <i>et al.</i> (1993)
X_v	48	(kg/m^3)	林志芳 (2002)
m_s	0.0051	(-)	Ottengraf and van den Oever (1983)
m_o	34.4	(-)	Shareedfdeen <i>et al.</i> (1993)
K_s	3.5	(g/m^3)	李惠娟 (2000)
K_o	0.267	(g/m^3)	Shareedfdeen <i>et al.</i> (1993)
S_l^*	-	(g/m^3)	-
U_g	0.84	(cm/s)	Ottengraf and van den Oever (1983)
S_{gi}	1.377	(g/m^3)	Ottengraf and van den Oever (1983)
O_{gi}	275	(g/m^3)	Shareedfdeen <i>et al.</i> (1993)
δ	130	(μm)	林志芳 (2002)
μ_{max}	0.09612	($1/hr$)	李惠娟 (2000)
Y_o	1.71	(-)	林志芳 (2002)
Y_s	0.06	(-)	李惠娟 (2000)
L	0.84	(m)	林志芳 (2002)

3.4 乾燥模式理論

考慮濾床中氣、液兩相的接觸面上，按理論而言，介面的溫度會很快達到平衡 (T_i 與 T_g 的 T_w 達到平衡)，此時的溫度為濕球溫度 T_w 。由微觀的角度來看，此接觸面即雙膜理論中氣相與液相間的一層介面，氣液相彼此間會因溫度差而造成熱量的傳送，所以單位時間內濾床中溫度的變化量，應考慮氣體流動所造成的溫度梯度與氣、液相間因為溫差造成的熱的質通量 (包括顯熱及潛熱)。

首先考慮無微生物作用時，氣體與液體間介面溫度為 T_i ，氣體溫度 T_g 與液體溫度 T_l ，在介面的平衡溫度都趨向 T_i 。濾床的進流溫度大都隨工廠製程的溫度而固定，由於通常濾床中氣體的流速很快，所以氣相與介面的溫差 ($T_g - T_i$) 會形成一穩定不變

的熱流來加熱氣液相介面；相反地，雖然液相與介面的溫差 ($T_l - T_i$) 也會加熱氣液相介面，但液相溫度卻在沒有加水的狀態而無法取得外在的熱源，溫度就此而下降，直到與 T_g 的濕球溫度 T_w 相同為止。因此，生物濾床乾燥的現象是在氣相溫差 ($T_g - T_l$) 恆為定值下進行，而且會被由大逐漸變小的液相溫差所影響，但整體液相溫度若達到濕球溫度 T_w ，則此固定的氣相溫差則成為唯一的熱源來加熱水分，使水分蒸發，此即所謂的穩態乾燥現象 (能量系統為穩態，但質量系統為不穩態)。在此刻，氣相溫差所加入的熱量恰好等於蒸發液體所需的潛熱，使系統維持平衡。

在考慮生物濾床系統時，微生物的代謝現象會使濾料升溫，預料此時的液相溫差會如圖 3-1 所示，將增加的熱量直接疊加到原有無微生物存在的系統溫度曲線上。因此，得知生物濾床的乾燥現象，主要是受到液相溫差所主導而變化，尤其當濾料的升溫現象過於嚴重時，液相的溫度不但遠超過進流氣相溫度，而且管壁會凝結空氣中的水氣。此時濾床若沒有裝設適當的除霧器 (demister) 則會損失大量的水分。

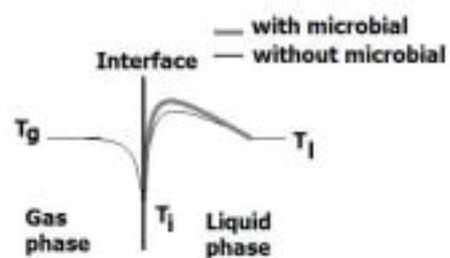


圖 3-2 氣相與液相的溫度平衡關係圖

在考慮生物濾床乾燥的現象，必須考慮的影響因子，包括氣相溫度、液相溫度、氣相污染物濃度、液相污染物濃度及氣相的濕度。因此，其模式的求解，必須針對以上五大變因進行質量平衡或能量平衡。其模式如下所示：

模式基本型式：

$$[\text{系統累積變化量}] + [\text{對流項}] = [\text{擴散相}] + [\text{反應相}]$$

液相污染物質質量平衡

$$\frac{\partial S_l}{\partial t} = \frac{D_s}{R^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(R^2 \frac{\partial S_l}{\partial R} \right) - \frac{X_V}{Y_S} \mu$$

氣相污染物質質量平衡

$$\frac{\partial S_g}{\partial t} = -U_g \frac{\partial S_g}{\partial L} + A_s D_s \left[\frac{\partial S_l}{\partial R} \right] \Big|_{R=r+\delta}$$

氣相溫度能量平衡

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} + U_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = -N_{\text{heat flux}} = -h_g (T_g - T_w) + \left(\frac{\partial X}{\partial t} \cdot \lambda_w \right)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{h_g (T_g - T_w) + h_w (T_l - T_w)}{\lambda_w}$$

液相溫度能量平衡

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} = + \frac{D}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial T_g}{\partial R} \right) + \Delta H_{EA} V \left(\frac{X_V}{Y_S} \mu \right) - h_l (T_l - T_w)$$

氣相濕度質量平衡

$$\frac{\partial H}{\partial t} + U_g \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial X}{\partial t}$$

四、結果與討論

為了獲得水分乾燥模式的電腦模擬解，在數學的求解過程中必須依照其困難度分為三階段來進行。首先針對污染物於生物濾床的穩態代謝現象進行電腦模擬，希望能藉由電腦求得已降解污染物的量而得知生物濾床系統因微生物分解污染物所獲得的熱能，而且在此階段因為污染物的變化不隨時間而變，求解過程較為簡單。其次，必須進行動態代謝現象的電腦模擬，其原因是水分乾燥的過程中，微生物的活性將會大幅受到影響，其對污染物的降解能力也會隨時間而變化，在數學的求解過程中也較為困難。最後，有了以上的基礎才可能針對水分的乾燥現象與微生物的代謝現象進行電腦模擬數值上求解。在學數學的意義上，因為濾床水分乾燥的現象與微生物降解污染物的動態反應現象

皆屬於擴散 - 反應的動態模式，若能求得第二部份的電腦的數值解，即可以很快地完成整體的工作。以下按此三階段進行介紹：

在文獻上，有許多學者都致力於生物濾床模式之研究，接下來將會把文獻中生物濾床之動力參數，帶入第三章所推導出之模式，以驗證模式的正確性。

4.1 生物濾床模式的靈敏度分析（略）

在生物濾床中，會影響去除效率的參數有比表面積、生物膜厚度、進流基質濃度、空床停留時間（EBRT）最大比生長速率。

4.2 與清華大學化工所唐修穆論文結果的比較

圖 4-1 (A) (B) 為模式預測在相同條件下，使用不同濾料處理相同濃度甲苯、丙酮的處理效能。其中 (A) 為稻穀/堆肥 (B) 是矽藻土/堆肥 (C) 則是以活性炭/堆肥為濾料，預測結果顯示以 (C) 濾床較好，因為在濾床中添加活性炭可增加去除效率，這跟 Abumaizar et al. (1997) 與 Amanullah et al. (2000) 等人的實驗結果相符。數值模擬之動力參數值如表 4-1。

在圖 4-1 (A) 上顯示，降解行為由零階轉變成一階，在此時有明顯的轉折點。

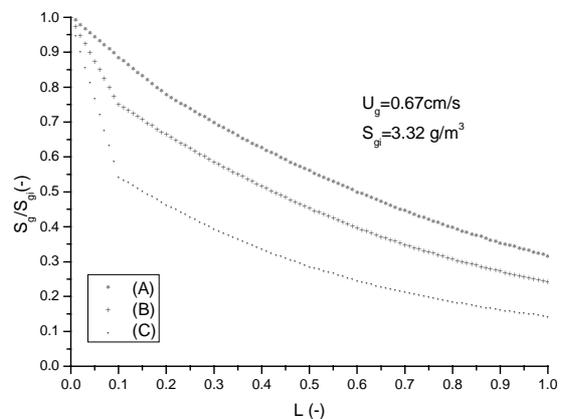


圖 4-1a 不同濾料處理相同甲苯濃度模式預測結果

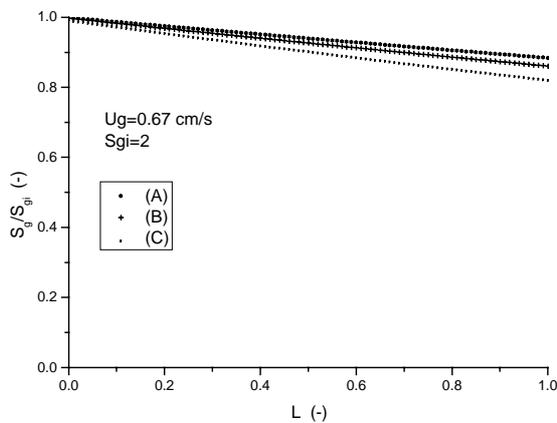


圖 4-1b 不同濾料處理相同丙酮濃度模式預測結果
(A) 稻穀/堆肥 (B) 矽藻土/堆肥 (C) 活性炭/
堆肥為濾料

表 4-1 動力參數值 (唐修穆, 1995)

參數	Value		單位
	甲苯	丙酮	
A_s	152 (A)	137 (A)	(1/m)
	168 (B)	155 (B)	
	205 (C)	161 (C)	
D_s	5.4×10^{-7} (A)	5.7×10^{-7} (A)	(m^2/hr)
	5.7×10^{-7} (B)	6.0×10^{-7} (B)	
	4.5×10^{-7} (C)	5.3×10^{-7} (C)	
D_o	1.5×10^{-6} (A)	1.7×10^{-6} (A)	(m^2/hr)
	1.6×10^{-6} (B)	1.8×10^{-6} (B)	
	1.2×10^{-6} (C)	1.5×10^{-6} (C)	
X_v	112 (A)	112 (A)	(kg/m^3)
	105 (B)	105 (B)	
	137 (C)	137 (C)	
m_s	0.27	0.00028	(-)
m_o	34.4	34.4	(-)
K_s	2.6	100.3	(g/m^3)
K_o	0.28	0.28	(g/m^3)
S_l^*	50.4	3.32	(g/m^3)
U_g	0.67	0.67	(cm/s)
S_{gi}	3.32	1.377	(g/m^3)
O_{gi}	275	275	(g/m^3)

δ	93 (A)	97 (A)	(μm)
	102 (B)	110 (B)	
	98 (C)	103 (C)	
μ_{max}	0.406	0.15	(1/hr)
Y_o	0.27	0.23	(-)
Y_s	0.62	0.38	(-)
L	1	1	(m)
(A) 稻穀/堆肥為濾料			
(B) 矽藻土/堆肥為濾料			
(C) 以活性炭/堆肥為濾料			

參考文獻

- 吳俊耀 (1993), “廢氣生物濾床處理技術” 工業污染防治, pp.93~105. (有)
- 周明顯、黃俊傑 (1994), “以生物滴濾塔處理排氣中丁酮成份之操作性能研究” 第十一屆空氣污染控制技術研討會論文集, pp.131~144.
- 唐修穆 (1995), “應用生物濾床處理含揮發性有機化合物 (VOCs) 廢氣之研究” 國立清華大學化學工程研究所博士論文, 台灣新竹.
- 陳家勳 (1995), “生物濾床法處理含乙醇及丙酮廢氣之研究” 國立中興大學環境工程研究所碩士論文, 台灣台中.
- 邱創汎、王耀銘、張坦卿 (1996), “空氣污染生物處理技術本土化之評析” 工業污染防治第 58 期, pp.111~124. (有)
- 林敬忠 (1998), “生物濾床處理樹脂工廠廢氣之研究—六種單一 VOCs 廢氣” 國立中興大學環境工程學系碩士論文, 台灣台中.
- 黃俊傑、賴慶智、王耀銘 (1998), “電子半導體廠之有機廢氣處理—生物濾床處理案例研究” 化工資訊, pp.14~23.
- 呂東璇 (1999), “生物滴濾床處理含甲苯及丙酮之混合廢氣” 國立清華大學化學工程研究所碩士論文, 台灣新竹.
- 盧重興、林明瑞、魏銀河 (1999), “生物濾床法處理五種樹脂工廠廢氣：混合 VOCs 廢氣之研究” 第十六屆空氣污染控制技術研討會論文集, pp.164~169.
- 潘慧芳、李季眉 (2000), “甲苯暨乙酸乙酯分解菌 *Rhodococcus sp.* 同時降解甲苯及乙酸乙酯時基質間的相互作用” 第十七屆空氣污染控制技術研討會論文集, pp.320~324.
- 林晉成、黃思尊、李惠娟、李季眉 (2000), “以純菌 (*Rhodococcus putida* & *Rhodococcus sp.*) 生物濾床處理含甲苯及乙酸乙酯混合廢氣之研究” 第十七屆空氣污染控制技術研討會論文集, pp.325~330.
- 李惠娟、李季眉、黃思尊 (2000), “甲苯與乙酸乙酯在生物濾床中分解機制之探討” 第十七屆空氣污染控制技術研討會論文集, pp.331~337.
- 張國財、盧重興、林明瑞 (2000), “生物濾床處理 PU 樹脂實廠廢氣之研究” 第十七屆空氣污染控制技術研討會論文

- 集, pp.344~349.
- 魏銀河(2000)**, “生物濾床處理五種樹脂工廠混合混合 VOCs 廢氣之研究”國立中興大學環境工程學系碩士論文, 台灣台中。
- 林晉成(2000)**, “以純菌(*Rhodococcus putida* & *Rhodococcus sp.*) 生物濾床處理含甲苯及乙酸乙酯混合廢氣之研究” 中華大學碩士論文, 台灣新竹。
- 周明顯(2001)**, “排氣中揮發性有機物處理方法” 環保月刊 第1卷第6期, pp.135~151。
- 吳尚儒(2001)**, “生物濾床內微生物分解乙酸乙酯對水分影響的研究”中華大學碩士論文, 台灣新竹。
- 廖庭寬、李季眉(2002)**, “菌種組合與溫度對生物濾床中二甲苯及乙酸乙酯之影響” 第十九屆空氣污染控制技術研討會論文集。
- 林志芳(2002)**, “以理論探討生物濾床法處理 VOCs 之研究”國立中興大學環境工程學系碩士論文, 台灣台中。(有)
- 史孟燕(2002)**, “應用純菌(*Rhodococcus sp.* & *Rhodococcus fascians*) 生物濾床處理含甲苯及乙酸乙酯混合廢氣之研究” 中華大學碩士論文, 台灣新竹。
- 張國財(2003)**, “生物濾床法處理光電產業揮發性有機廢氣之研究”國立中興大學環境工程研究所博士論文, 台灣台中。
- Abumaizar, R. J., Smith, E. H. and Kocher, W. (1997)** “Analytical Model of Dual-Media Biofilter for Removal of Organic Air Pollution.” *J. Environ. Eng.*, pp. 606~614.
- Aiba, S., Shoda, M. and Nagatami, M. (1968)** “Kinetics of product inhibition in alcohol fermentation.” *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 10, pp. 845 ~864.
- Alonso, C., Suidan, M. T., Sorial, G. A., Smith, F. L., Biswas, P., Smith, P. J. and Brenner, R. C. (1997)** “Gas Treatment in Trickle-Bed Biofilter: Biomass, How Much Is Enough?” *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 54, No. 6, pp. 583~594.
- Alonso, C., Suidan, M. T., Kim, B. R. and Kim, B. J. (1998)** “Dynamic Mathematical Model for the Biodegradation of VOCs in a Biofilter: Bio- mass Accumulation Study.” *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 32, No. 20, pp. 3118~3123.
- Amanullah, Md., Farooq, S. and Viswanathan, S. (1999)** “Modeling and Simulation of a Biofilter.” *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 38, No. 7, pp. 2765~2774.
- Amanullah, Md., Viswanathan, S. and Farooq, S. (2000)** “Equilibrium, Kinetic, and Column Dynamics of Methyl Ethyl Ketone Biodegradation.” *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 39, pp. 3387~3396.
- Baltzis, B. C., Wojdyla, S. M. and Zarook, S. M. (1997)** “Modeling Bio -filtration of VOC Mixtures Under Steady-State Condition.” *J. Environ. Eng.*, pp. 599~605. (有)
- Chang, K.T., Lu, C. S., and Lin, M. R. (2001)** “Treatment of Volatile Organic Compounds Emitted from A Polyurethane and Epoxy Manufacturer by a Trickle-bed Air Biofilter.” *J. Biosci. Bioeng.*, Vol. 92, No 2, pp. 126~130.
- Corsi, R. L. and Seed, L. (1995)** “Biofiltration of BTEX: Media, Substrate, and Loadings Effects.” *Environ. Prog.*, Vol. 14, No. 3, pp. 151~158.
- Deshusses, M. A., Hamer, G. and Dunn, I. J. (1995a)** “Behavior of Biofilters for Waste Air Biotreatment. 1. Dynamic Model Development.” *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 29, pp. 1048~1058.
- Deshusses, M. A., Hamer, G. and Dunn, I. J. (1995b)** “Behavior of Biofilters for Waste Air Biotreatment. 2. Experimental Evaluation of a Dynamic Model.” *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 29, pp. 1059~1068.
- Deshusses, M. A., Hame, G. and Dunn, I. J. (1996)** “Transient- State Behavior of a Biofilter Removing Mixtures of Vapors of MEK and MIBK from Air.” *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 49, pp. 587~598.
- Deshusses, M. A., Johnson, C. T., Hohenstein, G. A. and Leson, G. (1997)** “Treating high loads of ethyl acetate and toluene in a biofilter.” *In Proceedings of the 90th Annual Meeting & Exhibition of the Air and Waste Management Association*, Toronto, Ontario, Canada.
- Deviny, J. S., Deshusses, M. A. and Webster, T. S. (1999)** “Biofiltration For Air Pollution Control” Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Edwards, V. H. (1970)** “The influence of high substrate concentrations on microbial kinetics.” *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 12, pp. 679~712.
- Fan, L. S., Leyva-Ramos, R., Wisecarver, K. D. and Zehner, B. J. (1990)** “Diffusion of phenol through a biofilm grown on activated carbon particles in a draft-tube three-phase fluidized-bed bioreactor.” *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 35, pp. 279~286.
- Geankoplis, C. J. (1993)** “Transport Processes and Unit Operations” Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Gostomski, P. A., Sisson, J. B. and Cherry, R. S. (1997)** “Water Content Dynamics in Biofiltration: The Role of Humidity and Microbial Heat Generation.” *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, Vol. 47, pp. 936~944.
- Haldane, J. B. C. (1930)** “Enzymes” Longmans, London.
- Han, K. and Levenspiel, O. (1988)** “Extended Monod Kinetics for substrate, product, and cell inhibition.” *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 32, pp. 430 ~437.
- Hodge, D. S. and Deviny, J. S. (1995)** “Modeling Removal of Air Contaminants by Biofiltration.” *J. Environ. Eng.*, pp. 21~32.
- Howell, J. A. and Atkinson, B. (1976)** “Influence of Oxygen and Substrate Concentrations on the Ideal Film Thickness and the Maximum Overall Substrate Uptake Rate.” *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 18, pp. 15.
- Hwang, S. C., Wu, S. J. and Lee, C. M. (2002)** “Water Transformation in the Media of Biofilters Controlled by *Rhodococcus fascians* in Treating an Ethyl Acetate-Contaminated Airstream.” *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, Vol. 52, pp. 511~520. (有)
- Levenspiel, O. (1972)** “Chemical Reaction Engineering” John Wiley & Sons, New York.
- Liu, Y. H., Quan, X., Sun, Y. M., Chen, J. W., Xue, D. M. and Chung, J. S. (2002)** “Simultaneous removal of ethyl acetate and toluene in air streams using compost-based biofilters.” *J. Hazard. Mater.*, B 95, pp. 199~213.
- Lu, C. S., Lin, M. R., Lin, J. C., and Chang, K. T. (2001)** “Removal of ethylacetate vapor from waste gases by a trickle-bed air biofilter.” *J. Biotechnol.*, Vol. 87, pp. 123~130.

- Lu, C. S., Lin, M. R. and Chu, W. C. (2002)** "Effects of pH, moisture, and flow pattern on trickle-bed air biofilter performance for BTEX removal." *Adv. Environ. Res.*, Vol. 6, pp. 99~106.
- Luong, J. H. T. (1987)** "Generalization of Monod kinetics for analysis of growth data with substrate inhibition." *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 29, pp. 242~248.
- Michael, L. S. and Fikret, K. (1992)** "Bioprocess Engineering" Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Mysliwiec, M. J., VanderGheynst, J. S., Rashid, M. M. and Schroeder, E. D. (2001)** "Dynamic Volume - Averaged Model of Heat and Mass Transport Within a Compost Biofilter: I. Model Development." *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 73, No. 4, pp. 282~294. (有)
- Nguyen, H. D., Sato, C., Wu, J. and Douglass, R. W. (1997)** "Modeling Biofiltration of Gas Streams Containing TEX Components." *J. Environ. Eng.*, pp. 615~621.
- Ottengraf, S. P. P. and van den Oever, A. H. C. (1983)** "Kinetics of Organic Compound Removal from Waste Gases with a Biological Filter." *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 25, pp. 3089~3102.
- Ruthven, D. M. (1984)** "Principles of Adsorption and Adsorption Processes." John Wiley & Sons, New York.
- Shareefdeen, Z., Baltzis, B. C., Oh, Y. S. and Bartha, R. (1993)** "Biofiltration of Methanol Vapor." *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 41, pp. 512~524.
- Shareefdeen, Z. and Baltzis, B. C. (1994)** "Biofiltration of Toluene Vapor Under Steady-State and Transient Conditions: Theory and Experimental Results." *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 49, No. 24A, pp. 4347~4360.
- Vanlsaraj, K. T. (1995)** "ELEMENTS of ENVIRONMENTAL ENGINEERING: Thermodynamics and Kinetics" Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- van Groenestijn, J. W. and Hesselink, P. G. M. (1993)** "Biotechniques for Air Pollution Control." *Biodegradation*, 4, pp. 283~301. (有)
- van Lith, C., Leson, G. and Michelsen, R. (1997)** "Evaluating Design Options for Biofilters." *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, Vol. 47, p. 37~48. (有)
- Yano, T. and Koga, S. (1969)** "Dynamic behavior of the chemostat subject to substrate inhibition." *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 11, pp. 139~153.
- Yoon, I. K. and Park, C. H. (2002)** "Effects of Gas Flow Rate, Inlet Concentration and Temperature on Biofiltration of Volatile Organic Compounds in a Peat-Packed Biofilter." *J. Biosci. Bioeng.*, Vol. 93, No. 2, pp. 165~169.
- Zarook, S. M., Shaikh, A. A. and Ansar, Z. (1997a)** "Development, experimental validation and dynamic analysis of a general transient biofilter model." *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 52, No. 5, pp. 759~773.
- Zarook, S. M., Shaikh, A. A., Ansar, Z. and Baltzis, B. C. (1997b)** "Biofiltration of volatile compound (VOC) mixtures under transient conditions." *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 52, No. 21/22, pp. 4135~4142.
- Zarook, S. M. and Shaikh, A. A. (1997c)** "Analysis and comparison of biofilter models." *Chem. Eng. J.*, Vol. 65, pp. 55~61.