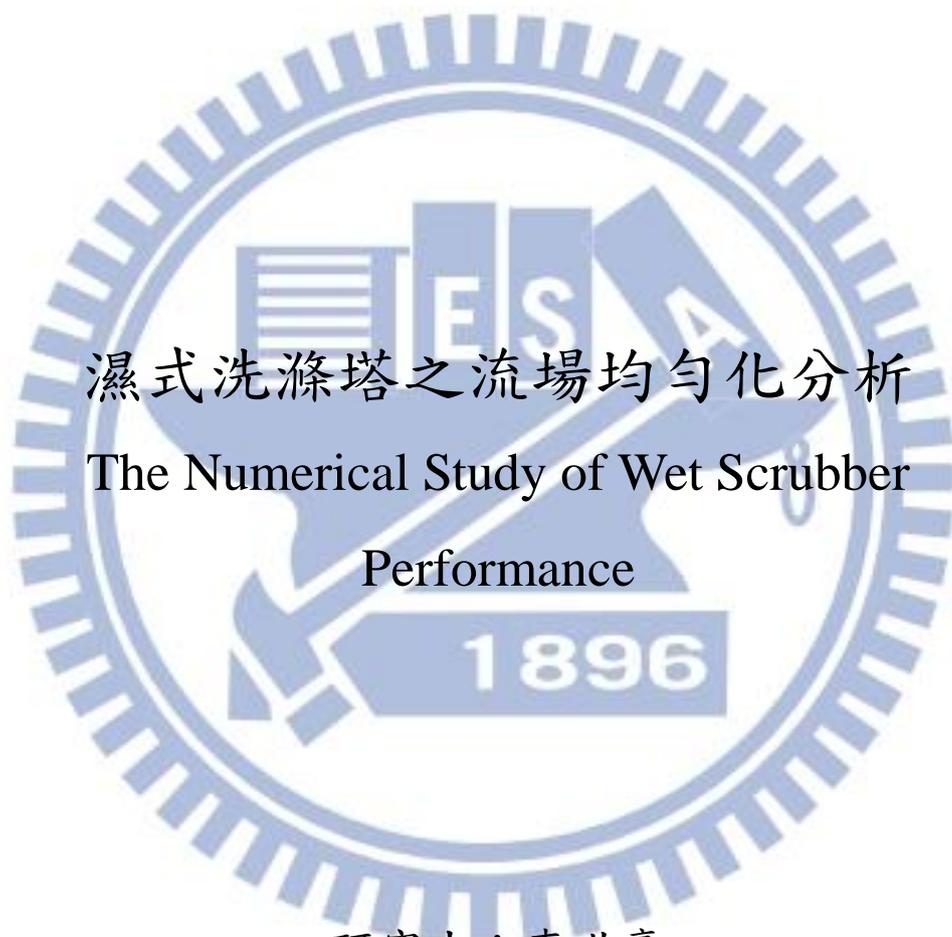


國立交通大學

機械工程學系

碩士論文



濕式洗滌塔之流場均勻化分析

The Numerical Study of Wet Scrubber
Performance

研究生：李世豪

指導教授：傅武雄

中華民國一百零一年七月

濕式洗滌塔之流場均勻化分析

研究生：李世豪

Student : Shih-Hao Li

指導教授：傅武雄

Advisor : Wu-Shung Fu

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

June 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

濕式洗滌塔之流場均勻化分析

研究生：李世豪

指導教授：傅武雄

國立交通大學機械工程學系

摘要

本文使用數值方法分析填充式濕式洗滌塔的性能，其方法如下，利用數值模擬軟體，完成洗滌塔內流場狀況，再藉由所得的資料，代入剩餘容積比與濃度效應之吸附模式中，使用數值方法計算出洗滌塔的性能，並在不同洗滌水體積的模式及改變理論公式的係數下，比較所得效率。為改善傳統填充式濕式洗滌塔的過濾效率，設計一孔洞擋板使其流場均勻化，並比較流場均勻化的好壞是否會影響洗滌塔之過濾效率。

The Numerical Study of Wet Scrubbers Performance

Student : Shih-Jay Lu

Advior : Wu-Shung Fu

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

This paper is to study adsorption efficiency in Wet scrubber numerically. The adsorption model which includes the ratio of remnant capacity and the concentration effect is proposed , also the different model of water volume and different coefficient of the theoretically formula are considered to calculate the adsorption efficiency. The solver of CFD code is need to execute numerical computation. In order to improve the efficiency of wet scrubber, we design a porous plate, expect that can have uniform flow inside the scrubber. Finally, we discuss the efficiency between the improved scrubber and the old one, and we can find that there is about 3% enhancement by using the porous plate.

誌 謝

求學生涯暫且是告一段落了，這二十多年來，感謝父母含辛茹苦的拉拔我長大，使我衣食無虞的一路念到碩士畢業，更感謝父母對我長期讀書在外，無法常伴膝下的體諒；由衷感激家人們在這一路上的支持與陪伴，這是我一直以來能持續向前的動力。此外感謝交大棒球隊黃衫楹教練多年來對我的栽培與器重，以及在待人處世上的諄諄教誨。還有一起奮鬥多年的隊友們互相扶持，總能在我低潮時給予我鼓勵，我才能順遂的走過所遭遇的挫折與難關。

另外，感謝吾師傅武雄教授在學業及研究上的指導，同時也感謝實驗室學長們在我論文上提供的寶貴意見和同學、學弟們的幫忙。最後，將此一喜悅分享給所有關心我的家人與朋友們。



目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	v
圖目錄.....	vi
符號索引.....	ix
第一章 緒論.....	1
第二章 物理模式.....	11
第一節 濕式洗滌塔流場模擬.....	11
第二節 吸附性能分析.....	16
第三章 數值方法.....	24
第一節 濕式洗滌塔流場模擬.....	24
第二節 吸附性能分析.....	29
第四章 結果與討論.....	35
第一節 濕式洗滌塔流場模擬.....	35
第二節 吸附性能分析.....	55
第五章 結論.....	77
參考文獻.....	78

表目錄

表 1-1 濕式處理優缺點比較表	3
表 4-1 各個模式的廢氣與水之處理效率整理比較表	59



圖目錄

圖 1-1 汙染微粒在洗滌槽收集的機制.....	7
圖 1-2 傳輸與附著兩階段.....	9
圖 2-1 填充式濕式洗滌塔的實體立體透視圖.....	13
圖 2-2 填充式濕式洗滌塔之剖面圖.....	14
圖 2-3 孔洞板之設計圖.....	15
圖 2-4 剩餘容積比之說明示意圖.....	19
圖 2-5 剩餘容積比-指數模式.....	20
圖 2-6 吸附曲線之類型.....	21
圖 2-7 濃度效應之說明示意圖.....	22
圖 2-8 濃度效應-Freundlich 模式.....	23
圖 3-1 簡化示意圖.....	31
圖 3-2 過濾效率計算模型.....	32
圖 3-3 過濾示意圖.....	33
圖 3-4 程式之計算流程圖.....	34
圖 4-1 洗滌塔之三視圖.....	38
圖 4-2 洗滌塔之剖面示意圖.....	39
圖 4-3 高度 3700mm 處之速度等高線圖.....	40
圖 4-4 與進口方向平行之中線(B 線)剖面速度等高線圖.....	41
圖 4-5(a) C 線剖面速度之等高線圖.....	42
圖 4-5(b) D 線剖面速度之等高線圖.....	43
圖 4-5(c) E 線剖面速度之等高線圖.....	44
圖 4-6 加入孔洞檔板後之洗滌塔剖面圖.....	45
圖 4-7 加入檔板後的洗滌塔在高度 3700mm 處之速度等高線圖.....	46
圖 4-8 加入檔板後的洗滌塔在 B 線剖面的速度等高線圖.....	47
圖 4-9(a) 加入檔板後的洗滌塔在 C 線剖面的速度等高線圖.....	48

圖 4-9(b) 加入檔板後的洗滌塔在 D 線剖面的速度等高線圖	49
圖 4-9(c) 加入檔板後的洗滌塔在 E 線剖面的速度等高線圖	50
圖 4-10 B 線之速度分佈圖	51
圖 4-11 C 線之速度分佈圖	52
圖 4-12 D 線之速度分佈圖	53
圖 4-13 E 線之速度分佈圖	54
圖 4-14 計算模型示意圖	61
圖 4-15(a) 洗滌塔內填充物之示意圖	62
圖 4-15(b) 建立洗滌水總體積模式示意圖	62
圖 4-16(a) 未加檔板者廢氣處理效率與時間關係圖(廢氣速度模式).....	63
圖 4-16(b) 加檔板者廢氣處理效率與時間關係圖(廢氣速度模式).....	63
圖 4-17(a) 未加檔板者水處理效率與時間關係圖(廢氣速度模式).....	64
圖 4-17(b) 加檔板者水處理效率與時間關係圖(廢氣速度模式).....	64
圖 4-18(a) 未加檔板者廢氣處理效率與時間關係圖(水流自由落體速度模式).....	65
圖 4-18(b) 加檔板者廢氣處理效率與時間關係圖(水流自由落體速度模式).....	65
圖 4-19(a) 未加檔板者水處理效率與時間關係圖(水流自由落體速度模式).....	66
圖 4-19(b) 加檔板者水處理效率與時間關係圖(水流自由落體速度模式).....	66
圖 4-20 剩餘容積比之理論公式圖	67
圖 4-21(a) 未加檔板者廢氣處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-5).....	68
圖 4-21(b) 加檔板者廢氣處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-5)	68
圖 4-22(a) 未加檔板者水處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-5).....	69
圖 4-22(b) 加檔板者水處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-5)	69
圖 4-23(a) 未加檔板者廢氣處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-1).....	70
圖 4-23(b) 加檔板者廢氣處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-1)	70
圖 4-24(a) 未加檔板者水處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-1).....	71
圖 4-24(b) 加檔板者水處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-1)	71

圖 4-25(a) 未加檔板在時間 0.1 秒時塔內剩餘濃度分佈圖.....	72
圖 4-25(b) 加檔板在時間 0.1 秒時塔內剩餘濃度分佈圖	72
圖 4-26(a) 未加檔板在時間 0.5 秒時塔內剩餘濃度分佈圖.....	73
圖 4-26(b) 加檔板在時間 0.5 秒時塔內剩餘濃度分佈圖	73
圖 4-27(a) 未加檔板在時間 1.0 秒時塔內剩餘濃度分佈圖.....	74
圖 4-27(b) 加檔板在時間 1.0 秒時塔內剩餘濃度分佈圖	74
圖 4-28(a) 未加檔板在時間 2.0 秒時塔內剩餘濃度分佈圖.....	75
圖 4-28(b) 加檔板在時間 2.0 秒時塔內剩餘濃度分佈圖	75
圖 4-29(a) 未加檔板在時間 30.0 秒時塔內剩餘濃度分佈圖	76
圖 4-29(b) 加檔板在時間 30.0 秒時塔內剩餘濃度分佈圖	76



符 號 索 引

C	入口濃度	[ppm]
C_0	參考濃度	[ppm]
C_r	局部濃度與參考濃度的比值 ($C_r = \frac{C}{C_0}$)	
d_c	粒度特性數 (absolute size constant)	[m]
d_m	平均有效粒徑 (mean drop size)	[m]
k_1	剩餘容積比理論公式係數	
k_2	剩餘容積比理論公式係數	
k_3	濃度效應理論公式係數	
k_4	濃度效應理論公式係數	
P	全壓值	[pa]
Q_c	$Q_c = \frac{\text{可被吸附之量}}{\text{被帶至水滴之量}}$	
Q_r	$Q_r = \text{剩餘容積比} = \frac{\text{可吸附容積}}{\text{剩餘未吸附容積}}$	
S_d	水滴的表面積	[m ²]
u_i	流體在 x_i 方向的絕對速度	[m · s ⁻¹]
V_d	水滴的體積	[m ³]
V_p	微粒的體積	[m ³]
V_r	$V_r = \text{已吸附容積比} = \frac{\text{已吸附容積}}{\text{總容積}}$	
x_i	卡氏座標(i=1,2,3)	[m]
η_T	單一吸附材的收集效率	
ρ_{air}	空氣密度	[kg · m ⁻³]

ρ_{water} 水密度 [kg · m⁻³]

$\sigma_{h,t}$ 紊流普朗特數(Turbulent Prandtl Number)

μ 黏性係數 [kg · m⁻¹ · s⁻¹]



第一章 緒論

隨著國內半導體產業的發展與製程技術的進步，除了造就傲人經濟奇蹟及高科技產業發展基礎之外，隨著產能的遽增，園區各產業所使用的化學原料、毒性化學物質以及有機溶劑更是與日俱增。基於對環境保護的共識及製程尾氣的控制要求，在相關回收設備、器材維護、或是意外的問題處理上，也顯得日趨重要。化學物質逸散到作業環境空氣中，或是隨著大氣飄散到園區周界，不但會影響作業人員的健康，也會引起園區週遭住戶的陳情。另外對於環保意識的增加，及政府法規的建立，製程廢氣的控制也日趨嚴謹。基於永續經營的精神，也勢必要提升處理這些污染氣體的技術及效率，以其對環境、社會盡最大的心力。

在半導體的製程中使用了多種毒性、可燃性氣體及強酸等危險化學藥品，所以排放大量殘餘尾氣，如矽甲烷 (SiH_4)、氟化物、氫氣及反應而成之細微粒等。為了保持環境清潔，其排放的標準需符合國內的環保法規所訂定的標準。目前處理上述尾氣的方法主要分為兩種，一為經由燃燒管 (burn tube)，二為經由局部洗滌器 (local scrubber) 處理，之後再經由中央洗滌塔做最後處理排放。若是除塵效率不佳而逕行將微粒排放至大氣，會造成環境污染，故除塵設備的選用及性能效率的評估為半導體產業工安及環保的重要課題。工業上常用的洗滌器有

(1) 重力洗滌器 (Gravity Settlers)、(2) 離心式洗滌器 (Centrifugal Separators)、(3) 袋式洗滌器 (Baghouses)、(4) 濕式洗滌器 (Scrubbers)、(5) 靜電洗滌器 (Electrostatic Precipitators) 等[1]。由於濕式處理方式於處理廢氣中具有自燃性之粒狀物，及其他氣態污染物之效率較佳，故為目前使用相當廣泛的一種方式[2]。

濕式洗滌器用作粒子淨化程序的主要機構有二：第一種機構係利用洗滌液將粒子潤濕，第二個機構係將被潤濕的粒子收集在除塵器之表面並予以去除。關於粒子濕潤的方式，則可利用將洗滌液噴散霧化 (atomization)，或者用擴散器 (diffuser) 把氣體破壞成小氣泡的方法，使微粒子(或氣體)與液面互相接觸。

洗滌器利用濕潤的表面可去除小至 $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$ 之粒子，但是對稍大一點的粒子如 $1.0\sim 10.0\mu\text{m}$ 及 $10.0\sim 50.0\mu\text{m}$ 大小之去除效果更佳[3]。而利用液體吸收氣體來達到除污的效果，則是利用氣體溶解於液體或互相有化學反應之方式，將氣流中之某種或多種氣體成分，在和液體接觸的過程中加以去除。藉此吸收可以控制二氧化硫、硫化氫、氯化氫、氯氣、氨、氮氧化物、氟化氫及經分子量碳氫化合物等有毒化學氣體之排放。

雖然目前多數的半導體廠中最常選用濕式處理方法來處理製程尾氣，然而在選擇濕式處理時，必須先了解本方式的一些優缺點，以作選擇評估的依據。茲列舉濕式處理的優缺點如表 1-1[4]：



表 1-1 濕式處理優缺點比較表

<p>優點</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 濕式法處理廢氣時包含冷卻、增濕、集塵及吸收等作用。不但能去除氣流中夾帶的粒狀物，同時也可吸收去除氣態的空氣污染物，這是其他乾式處理法所不及的。 2. 和其他類似性能的集塵設備比較，設備費較低，所佔空間較小，構造比較簡單，故障機率也較小。 3. 對某些氣態污染物而言，利用濕式吸收處理，可以生產或回收有用之化學物質。 4. 對於污染物的突增負荷，可調整水量，繼續維持高效率操作。
<p>缺點</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 此法將空氣污染轉換為水污染問題。所使用的吸收液可再利用或者需處理後才能排放。必須增加固液分離設備。若為特殊的粉塵或氣體，將造成排水處理及污泥處理上的困難。 2. 具有腐蝕性的氣體或吸收液，常使材料選擇及保養工作較乾式法更為嚴格。 3. 不易潤濕的粒子不適用濕式處理法。 4. 用水量大，增加操作成本。此外，經處理後之排氣，由於受到冷卻，以致降低浮力，減少上升高度，必要時須除濕、再熱後排出。

常見濕式處理廢氣的設備型式，大致可分成兩種。一種是將洗滌液霧化，使其與廢氣接觸；如噴水式洗滌器、旋風式洗滌器及文氏洗滌器。若主要去除對象為粒狀物時，則霧化液滴之直徑以不超過粒狀物之二百倍時，效果較佳。另一種形式係將洗滌液散佈於裝有隔板、填充料或其他裝置內，使氣體迂迴通過；如隔板式洗滌器、浮床式洗滌器、填充式濕式洗滌器等。對廢氣中之有毒氣體而言，在欲處理之廢氣量大、污染物對吸收液之溶解度不高或吸收反應速率慢的情況下，多以填充式濕式洗滌塔為主。

填充式洗滌塔之形式多為直立式與臥式，兩種形式之外型與構造雖然不盡相同，但塔內之基本構造與去除機制卻是一樣的。以直立式為例，填充塔內充填有不同的惰性材料，用以將塔頂噴灑下的吸收液體分散成薄膜，再將液體與氣體同方向或反方向導入填充床內，利用填充物增加接觸的表面積使其和塔底的廢氣產生連續且充分的接觸、冷卻、濕化及吸收作用，以去除氣體中的微粒或吸收有害氣體。其內部主要構造如下[5]：

分散器：

主要用來使洗滌液均勻分散於塔內，也有使用噴嘴的設備來使洗滌液達到均勻分散的效果。但需注意的是若是使得出口處之氣流帶有太多水滴會增加後段除霧器的負擔。

填充物：

主要之功用為增加液體與氣流之接觸面積，選擇比面積較高的填充物才能在單位體積的填充物中使接觸面積更大，則反應面積亦能更大。另外選用材質上要能抗腐蝕性，才能延長使用的壽命。而且對於氣流的壓降要小，這樣才能夠減少風車能量的消耗，達到節省能源的效果。

填充物阻流器：

直立式的洗滌塔中，當廢氣流速過高時可能會使填充物上浮，因此可使用較重之填充物阻流器防止其浮起。對於較輕的填充物阻流器，則需將其固定於塔殼上。

洗滌塔外殼：

外殼可以為任何材質，但必須隨著洗滌液與處理廢氣之性質做改變，最需要注意的是防腐蝕的效果。因為洗滌塔外殼是不做更換的配備，故其外殼的壽命會決定一台洗滌塔使用的年限。

除霧裝置：

為了避免廢氣攜帶過多的霧滴或洗滌水之小水滴，會使得排放口含有大量的水汽造成粒狀污染物的污染。因此必須對水滴進行篩除。但去除效率越好的除霧器，其壓損勢必較大，洗滌塔所消耗的能源也會隨之增加。

填充物料支撐架：

此構造目的為防止填充物料掉落至洗滌塔之貯水槽內，典型的設計為波浪型，但目前為了設計與施工的方便大多使用平面式的支撐架。

濕式洗滌雖然具有多種優點，適用於半導體製程中之尾氣處理，只是在傳統設計上，於處理次微米微粒時，有壓降大，效率不佳，導致操作成本高等限制，另外因為粒狀污染物廢氣處理上原理與硝酸、鹽酸等氣體並不相同，因此洗滌塔可能無法兼顧對氣狀與粒狀的廢氣處理效率。黃[6]曾對高科技產業的填充式濕式洗滌塔對於硫酸液滴的處理效率進行研究，針對半導體各廠的 57 座與光電廠 17 座填充式洗滌塔利用環保署公告 NIEA450.70B 的標準採樣方法進行硫酸液滴的採樣，採樣結果發現大部分的硫酸液滴處理效率接近 0%。因此許多的研究利用不同方式增加洗滌液帶電的特性希望能提高粒狀廢氣的處理效率，例如：通電、噴霧自然帶電、加藥等方法。黃等人[7]用添加界面活性劑、新的噴霧與除霧裝置後，可讓實場洗滌塔處理效率提升至 70 ~ 85%。

在現有的研究中，重點均著力於使液、氣接觸頻繁或洗滌液中添加化學物質來與廢氣反應，進一步則是利用各種方式使洗滌液帶電進而將微粒吸附來改善去除效率；但是除此之外，在舊有的洗滌塔中，洗滌塔本身的設計容易導致塔體內的廢氣流場分佈不均勻亦可能是影響處理效率的重大因素之一。受限於廠區大小

等，迫使得洗滌塔廢氣入口與塔體呈現垂直角度，基於這本身的塔體形狀設計，容易導致進入塔內的廢氣流場分佈極度不均勻，使得塔內有相當大部分的填充物料只能與少量的廢氣接觸，剩下部分的填充物料則是有大量廢氣通過，因而難以提升去除效率，更無法滿足日愈嚴苛的環保要求。

另外在去除效率的機制上，由於吸附塔內最重要的功能在於活性炭的吸附作用，然而在實際操作時活性炭的吸附作用十分複雜，舉凡氣流流速、污染物濃度和性質、活性炭流量及吸附性質等都是必須詳加考慮的因素。鄭[8]透過多孔性介質的模擬來簡化原本相當複雜的模型，並在分析吸附能力時，同時考慮了剩餘容積比、濃度效應、碰撞附著效率的影響，建立吸附模式分析的完整性。

濕式洗滌器的原理如同前述，主要受到濕潤及收集分離兩個機構所影響，其收集的機制大致可分為：慣性碰撞 (Inertial impaction)、直接截取 (Direct interception)、擴散 (Diffusion - Brownian movement)、重力 (Gravitational force)、靜電力 (Electrostatic force)、凝結 (Condensation)、溫度梯度 (Thermal gradient) [9] 分別簡述如下：慣性碰撞和直接截取都是發生於，污染微粒隨氣體流場運動時遇上水滴，由於流場受到障礙物的影響，流線偏離 (diverge)，而微粒本身的慣性若足夠時，直接撞擊水滴則產生慣性碰撞，如圖 1-1(a)，若在經過水滴周圍時才撞擊到水滴，則稱為直接截取，如圖 1-1(b)。倘若微粒的粒徑很小 (次微米 submicron) 懸浮於氣流中，本身會有一振盪的運動 (布朗運動 Brownian Movement)，如圖 1-1(c)，故此種機制最需要很大的吸收面積，即水滴的表面積對體積之比愈大則收集微粒的效率越高。重力的效應發生在污染微粒的體積較大時 (約大於 $40\ \mu\text{m}$) 如圖 1-1(d)。靜電力的效應發生在帶有電荷的污染微粒或吸收水滴上，如圖 1-1(e)。凝結發生在氣體中的水氣溫度突然降至其結露點 (dew-point)，則污染微粒將成為凝結核產生霧氣。溫度梯度會帶動微粒由高溫區至低溫區。

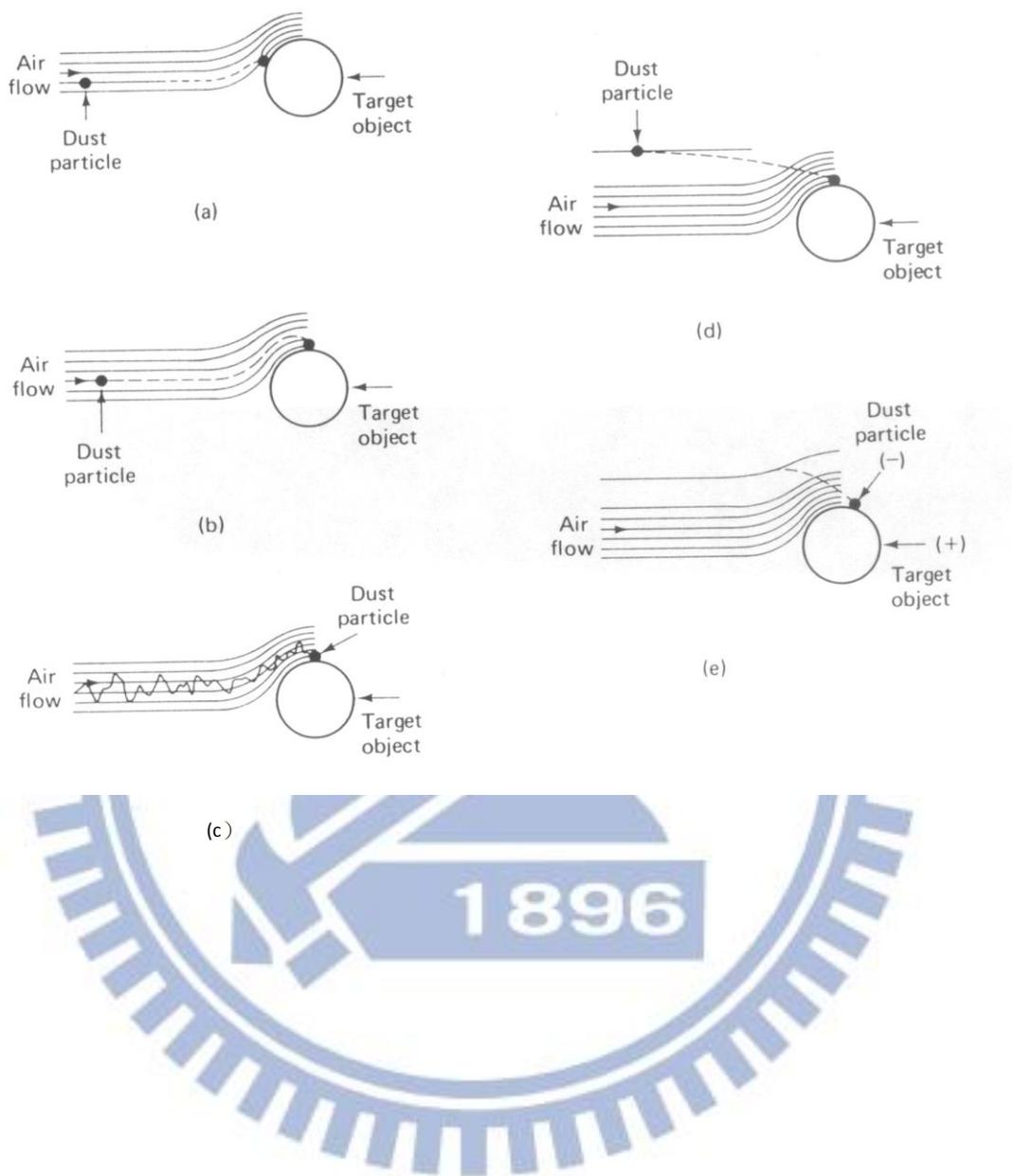


圖 1-1 污染微粒在洗滌槽收集的機制

使用水滴為吸附劑時，主要的吸附機制與上述情況相同，對於吸附能力的評估，一般使用的假設有：水滴形狀為球型剛體；微粒污染物均勻分佈於氣相流場當中；微粒對水滴的附著效率為 100%，換句話說，當微粒附著於水滴表面時，即完成收集機制，不會再分離回歸於氣相流場中，所以收集的效率取決於水滴半徑在污染物氣相流場中，所掃過的區域[10]之比例。影響水滴吸附污染物微粒的各種作用力（慣性力、靜電力、凡得瓦力、重力）在吸附機制中所扮演的角色，因操作的條件，污染物的種類而異，在過去曾有研究此類微粒流經吸附劑表面行為的文獻，其理論稱為軌跡理論（Trajectory Theory）[11]，其所提出的模式大致可分為兩大類，一為外部流模式（External Flow Model）另一為內部流模式（Internal Flow Model）。然而不管哪一種模式，都具有以下特性：污染物微粒所走的路徑是隨著流線而走，但是當污染物接近吸附劑的表面時，會因為一些作用力而使微粒離開流線，沈降附著在吸附劑的表面上；整個過程大致分為兩個階段，一為傳輸，二為附著，如圖 1-2。就以往所研究的軌跡理論，可歸納出以下幾個要點：

- (1) 遠離吸附材的區域，污染物顆粒的路徑是隨著流體的流線走。
- (2) 當污染物顆粒很接近吸附材表面時，其路徑會因一些作用力而離開流體流線。
- (3) 污染物顆粒很接近吸附材表面時，會發生流體動力學的遲滯現象。
- (4) 在分析軌跡理論時，不同的作用力及其他會影響污染物顆粒移動的因子，皆可轉換成無因次群以利分析。
- (5) 軌跡方程式的解，稱為單一吸附材的收集效率(η_T)，是由一些無因次群表示。

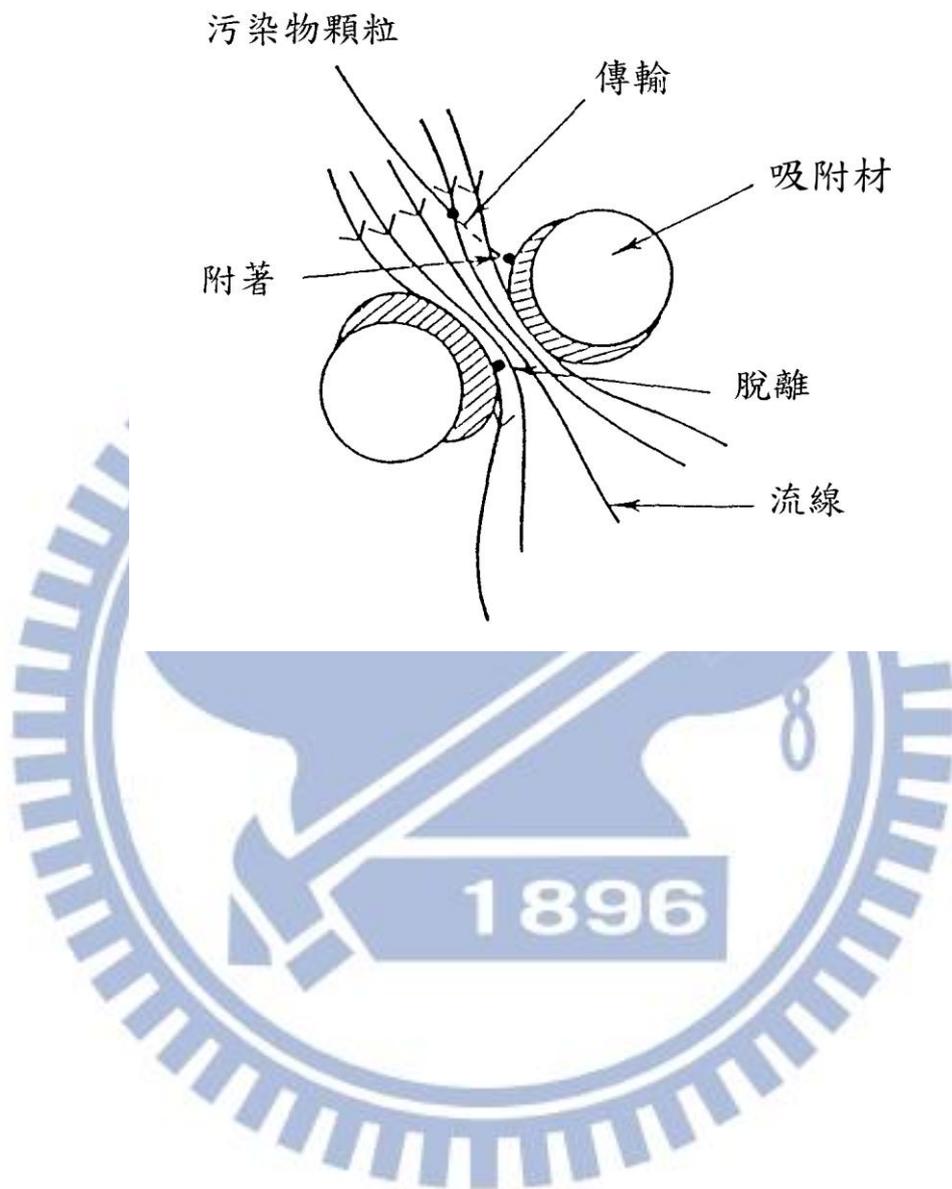


圖 1-2 傳輸與附著兩階段

從過去研究顯示，一般對於物體在流場中運動的模擬，大都採用簡化的相對速度來分析，即是假設其中物體為靜止不動，流體則以相對速度流經物體做運動，而所得的結果與實際現象上有著許多差異，其中最大的差異就在於流體流動的連續性，物體移動會擠壓流體，而流體也會填補因物體移動所產生之空洞，這種現象在流體力學上是屬於動態的移動邊界問題（moving boundary problem）[12]。

所以由以上幾點顯示，利用水滴吸附污染物微粒的過程，吸附的現象在水滴表面附近均有可能發生，而且其吸附效率與所形成水滴之半徑有著密切的關係，若相同體積的水，其水滴半徑愈小則所形成的表面積將愈大，一方面可增加吸附的表面積，另一方面較小的水滴其軌跡與流場較相似，亦可增加在有效流場中水滴的數目。呂[4]透過對文氏洗滌器的模擬，分析其內部流場狀況後，再考慮剩餘容積比、濃度效應及水滴分佈模式的影響，完成對文式洗滌器吸附效率的分析。此外，由於在剩餘容積比及濃度效應的理論中，其方程式中的參數乃是由實驗所得；葉[13]考慮有解離作用之亨利定律，以理論推導證明剩餘容積比及濃度效應的理論公式，並利用其理論對噴霧氣流消滅毒性氣體進行分析，發現若是廢氣流速過快，與噴霧氣流接觸的時間會變短，無法在短時間內提供給噴霧氣流可吸收的量，因此效率降低。

本研究將針對廠商現有之濕式洗滌塔為依據，透過多孔性介質的模擬，並加裝孔洞板對不均勻的流場進行改進，其以得到均勻的塔內流場分佈；此外更進一步綜合三種對吸附量的影響，解析污染物與吸附材間的吸附作用，期藉由綜合以上分析，可使污染物去除效率有所提升。

第二章 物理模式

第一節 濕式洗滌塔流場模擬

本研究所使用之填充式濕式洗滌塔的實體立體透視圖如圖 2-1 所示，製程尾氣由輸送管路送至洗滌塔入口處，經過入口段腔室後再穿過填充物料進行過濾，最後經過處理後之氣體由煙囪排放至大氣。

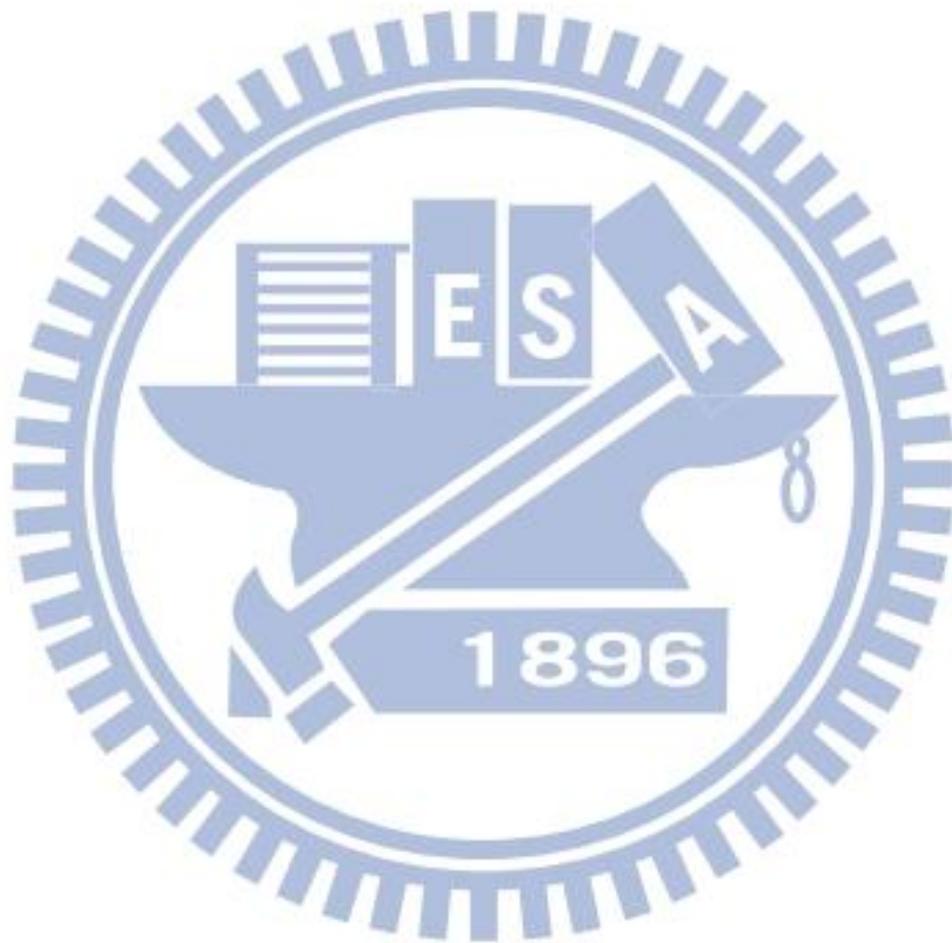
圖 2-2 所示為填充式濕式洗滌塔之剖面圖，其中主要尺寸為輸送管道之高度 $L2=1600\text{mm}$ ，進入塔體之入口高度 $L1=900\text{mm}$ ，塔體直徑 $D1=\varphi 4200\text{mm}$ 、出口處直徑 $D2=\varphi 1700\text{mm}$ ，入口段腔室高度 $H1=2200\text{mm}$ ；填充物料第一層高度 $H3=1400\text{mm}$ 、第二層高度 $H4=1200\text{mm}$ 、第三層高度 $H7=900\text{mm}$ ；此外灑水管路與 FRP 格柵之間距分別為 $H2=300\text{mm}$ 及 $H6=300\text{mm}$ ，灑水管路與第二層填充物料頂部間距則為 $H5=400\text{mm}$ ，最後是塔頂漸縮段 $H9=900\text{mm}$ ，整體塔高為 8000mm 。

由圖 2-2 及其所標示之尺寸可知，洗滌塔內之構造十分複雜且龐大，故本文在此詳細說明構造。為了使填充物料能支撐在塔體內，在 b-b 段、c-c 段及 f-f 段內加入 FRP 格柵支撐架，而在 a-a 段及 e-e 段部分則是加上灑水管路，目的為使洗滌液均勻噴灑於填充物料上，增加其接觸表面積，能更有利與廢氣結合，提高去除之效率。最後出口處部分在 g-g 段則是加上波浪型除霧器，其功用在將多餘之水氣去除，減少粒狀物之汙染。

因此，此原型之填充式濕式洗滌塔在廢氣進入後，經由灑水管路的洗滌液噴灑下，洗滌液先與廢氣混合，形成噴霧氣流後再經過格柵板；格柵板除了提供填充物料支撐外，尚有些許阻流之功用，能降低氣流流速，使得廢氣進入填充物料時比較沒有格柵板時來的均勻，但流場均勻化的效果仍是相當有限。之後廢氣進入已噴灑洗滌液之填充物料中進行過濾，處理完的廢氣再經過波浪型除霧器去除多餘水氣，最後由塔頂出口處排出，而多餘之洗滌液則由塔底排出。

由於原型之填充式濕式洗滌塔形狀設計，入口與塔體呈現 90 度垂直，導致氣

流進入塔體後會集中於遠離進口處，使得後段速度遠大於前端，造成流場不均勻的現象；為改善流場之均勻化，在塔體 b-b 段格柵板的上方再加入一層 5mm 的孔洞板，孔洞板之設計如圖 2-3 所示。孔洞直徑 $\varphi 62\text{mm}$ ，孔洞圓心距為 113.5mm，將孔洞佈滿一矩形後，再於其中切出直徑 $\varphi 4180\text{mm}$ 的圓板，如此可得孔隙率為 0.22 的 $\frac{3}{4}$ 圓孔洞板，藉以擋住較快之氣流流速，達到流場均勻化效果。



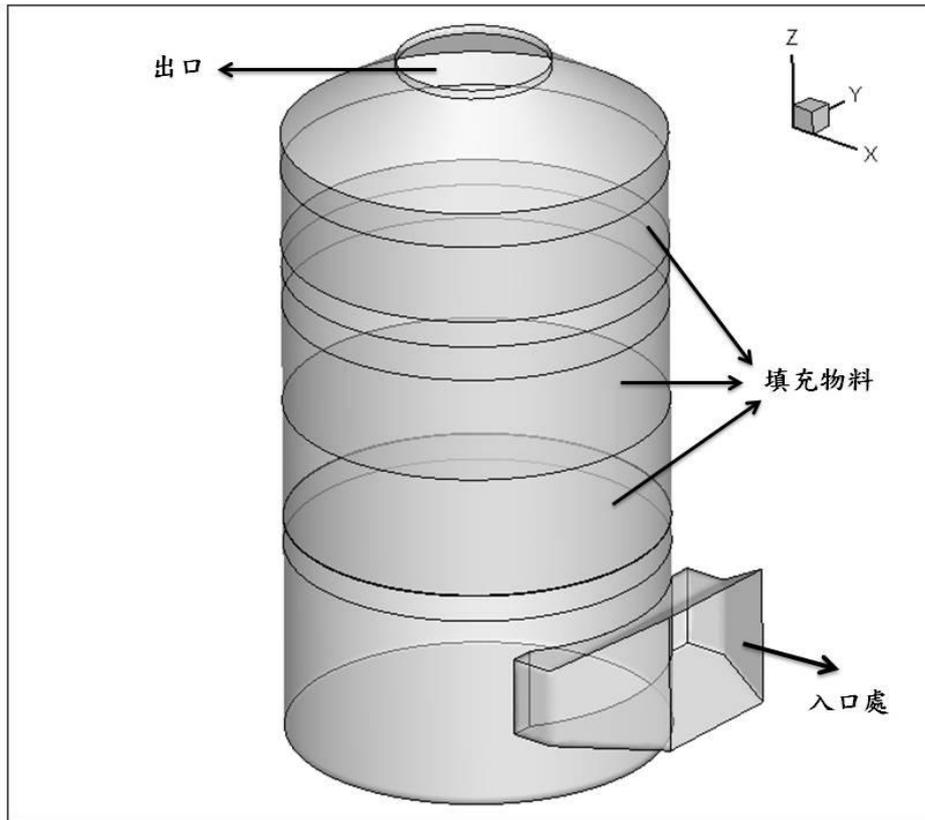


圖 2-1 填充式濕式洗滌塔的實體立體透視圖

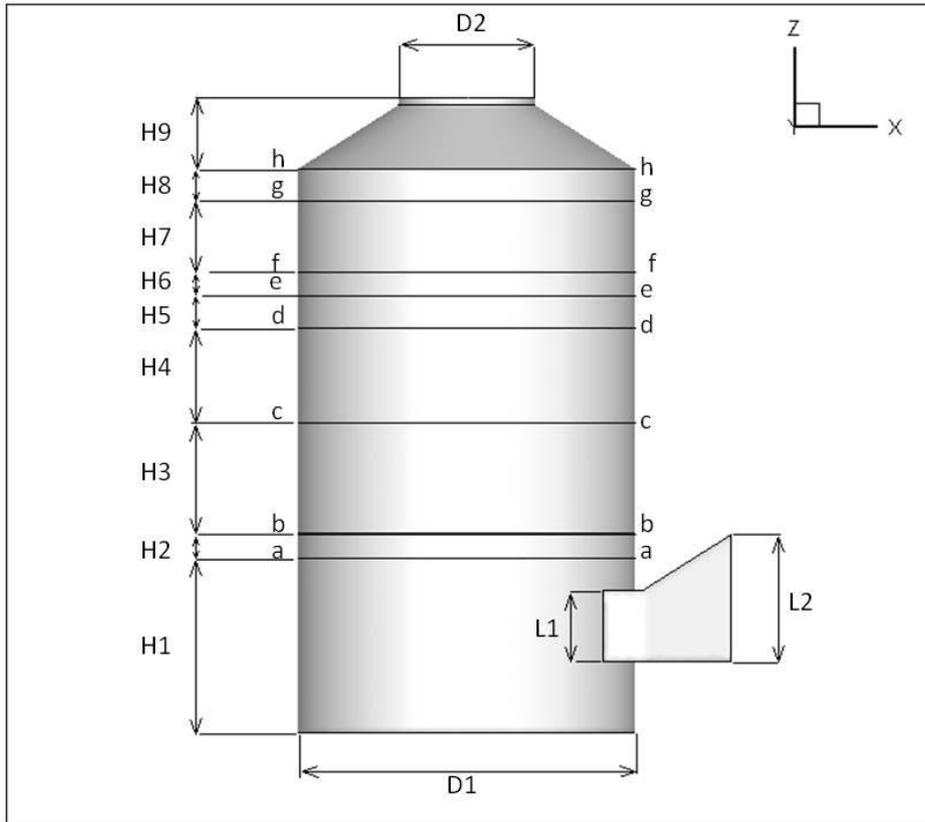


圖 2-2 填充式濕式洗滌塔之剖面圖

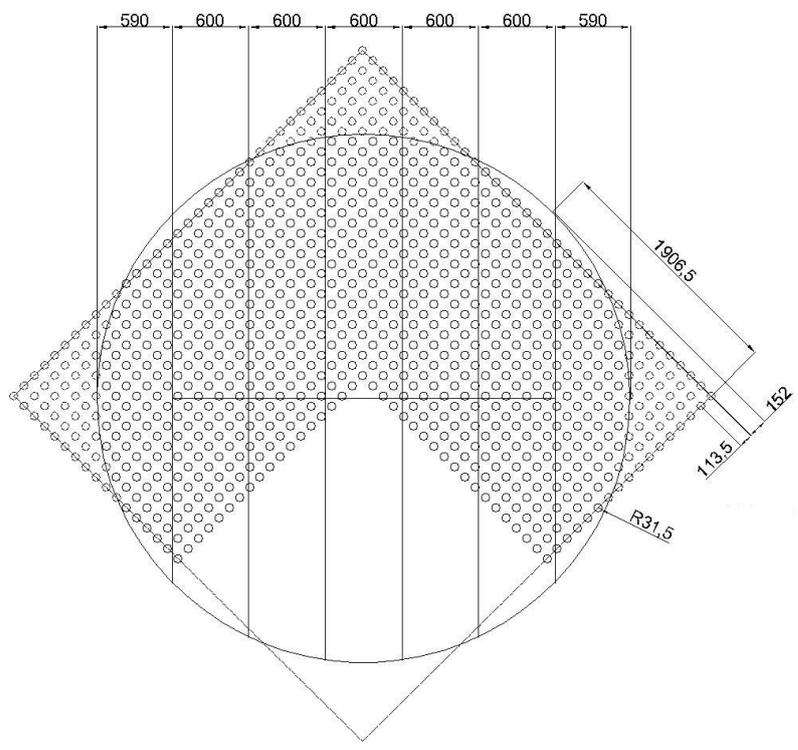


圖 2-3 孔洞板之設計圖

第二節 吸附性能分析

另外，在處理吸附性能模式時，採用鄭[8]所定義之剩餘容積比（ratio of remnant capacity Q_r ）以及污染物的濃度效應（concentration-effect Q_c ），作為主要考慮的因素，並計算出收集的效率。

其中剩餘容積比的意義為水滴中剩餘未吸附容積中，最多還能吸附污染物的比例。當水滴（吸附劑）吸附量增加時，剩餘吸附容積減少，能夠吸附污染物的比例也將隨之遞減，換句話說即表示吸附量漸趨於飽和，伴隨著剩餘未吸附容積的減少，而能夠吸附污染物的比例也將隨之遞減。一般而言其遞減模式可概分為常數模式、線性模式、指數模式三種情況。參考圖 2-4 之說明，定義：

$$V_r = \text{已吸附容積比} = \frac{\text{已吸附容積}}{\text{總容積}} \quad (\text{式 2-1})$$

$$Q_r = \text{剩餘容積比} = \frac{\text{可吸附容積}}{\text{剩餘未吸附容積}} \quad (\text{式 2-2})$$

其中第一次求出的可吸附容積，成為第二次吸收的已吸附容積，總容積減去已吸附容積即為剩餘未吸附容積。指數模式乃指著剩餘容積比（ Q_r ）隨已吸附容積比（ V_r ）呈指數關係遞減，如圖 2-5，也就是水滴越趨近飽和時，能吸附到污染物的比例也越低。指數模式之關係如下

$$Q_r = k_1 \cdot \exp(k_2 \cdot V_r) \quad (\text{式 2-3})$$

其中 $k_2 \neq 0$ ， k_1 、 k_2 為實驗值，由於在本文所研究的物理條件下，過去並無此二常數的實驗數據，所以依據鄭[8]的結論，採用被最廣泛使用的 $k_1 = 0.7$ ，

$k_2 = -4$ ，為本文數值模擬所使用之參數。假設總吸附容積 $A=1$ ，第一次吸附時已吸附容積 $B=0$ ，此時剩餘未吸附容積 $G=A-B=1-0=1$ ，計算 $V_r = B/A=0/1=0$ ，若以 $k_4=0.7$ ， $k_5=-4$ 為例，由 (2-3) 式計算得 $Q_r = 0.7 \times \exp(-4 \times 0) = 0.7$ ，所以可吸附容積 $D = Q_r \times G = 0.7 \times 1 = 0.7$ 。第一次吸附作用完成後，已吸附容積變為 $B=0.7$ ，而此時的剩餘未吸附容積 $G=A-B=1-0.7=0.3$ ，所以第二次吸附時 $V_r = B/A=0.7/1=0.7$ ， $Q_r = 0.7 \times \exp(-4 \times 0.7) = 0.0426$ ，因此可吸附容積 $D = Q_r \times G = 0.0426 \times 0.3 = 0.01278$ ，這表示第二次吸附時，最多只能再吸附 0.01278 的量。依此流程繼續進行第三次、第四次...的吸附作用，直到該水滴飽和為止。

有關有害氣體濃度效應的影響，一般討論上都以吸附等溫線來評估，所謂吸附等溫線為，在一既定溫度下，被吸附物濃度與吸附劑之間的平衡關係，以巨觀而言，當污染物濃度較大時，表示有較多的污染物被帶至水滴（吸附劑）附近，此時對於水滴的吸附量將有所助益，亦即在濃度較大時，吸附能力將隨之提升，其吸附量和濃度的關係，其典型的類型如圖 2-6，此分類為 MaCabe 等人提出 [14]，其中向上凸的等溫曲線表示有利於吸附的，反之向下凹的等溫曲線表示不利於吸附，這也常是被用來當脫附，再生程序的方法。而濃度與吸附量的關係，一般可歸納為常數模式、線性模式、Freundlich 模式、Langmuir 模式四類。參考圖 2-7 之說明，定義：

$$C_r : \text{局部濃度與參考濃度的比值} \left(C_r = \frac{C}{C_0} \right) \quad (\text{式 2-4})$$

$$Q_c = \frac{\text{可被吸附之量}}{\text{被帶至水滴之量}} \quad (\text{式 2-5})$$

Freundlich 模式乃指 Q_c 值，隨濃度比 C_r 遞增之情況，也就是局部濃度越高時，污染物能提供被吸附物的比例也越高，如圖 2-8。Freundlich 模式之關係如下：

$$Q_c = k_3 \cdot C_r^{k_4} \quad (\text{式 2-6})$$

其中 $k_4 \neq 0, 1$ ，同樣由於缺乏實驗數據，所以依照鄭[8]的結論，本文將採 $k_3 = 0.7$ ， $k_4 = 0.6$ 為數值模擬的參數。

假設參考濃度 $C_0 = 1$ ，局部濃度 $C = 1$ ，則 $C_r = C/C_0 = 1/1 = 1$ ，若以 $k_3 = 0.7, k_4 = 0.6$ 為例，由(2-6)式計算得 $Q_c = 0.7 \cdot C_r^{0.6} = 0.7 \times 1^{0.6} = 0.7$ ，所以可被吸附之量 $E = Q_c \cdot C = 0.7 \times 1 = 0.7$ ，這表示氣流中污染物被帶至水滴之量為 1 單位，但實際上最多可被吸附之量為 0.7 單位。假設吸附材能提供足夠的剩餘未吸附容積，因此 0.7 的量將全被吸附，則本層活性碳吸附完成後剩下 0.3 的量流至下一層，即對下一層而言，其局部濃度為 $C = 0.3$ ，則 $C_r = C/C_0 = 0.3/1 = 0.3$ ， $Q_c = 0.7 \times 0.3^{0.6} = 0.34$ ，此時可以被吸附的量為 $E = 0.34 \times 0.3 = 0.102$ ，這表示這 0.3 的量中最多只能提供 0.102 的量給水滴吸附。依此流程繼續流往下一層進行吸附作用，直到污染物流出出口，或是完全被吸附為止。

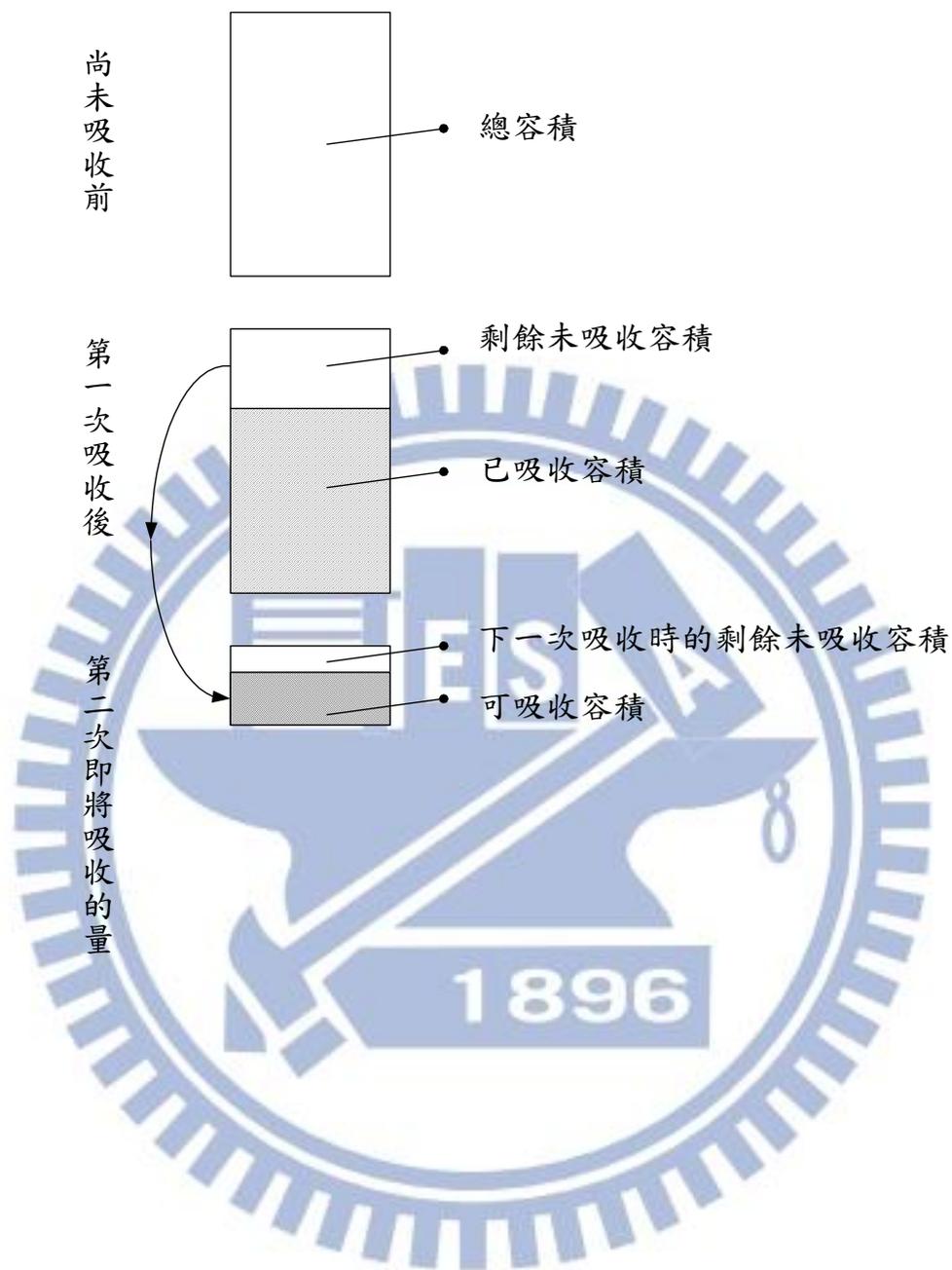


圖 2-4 剩餘容積比之說明示意圖

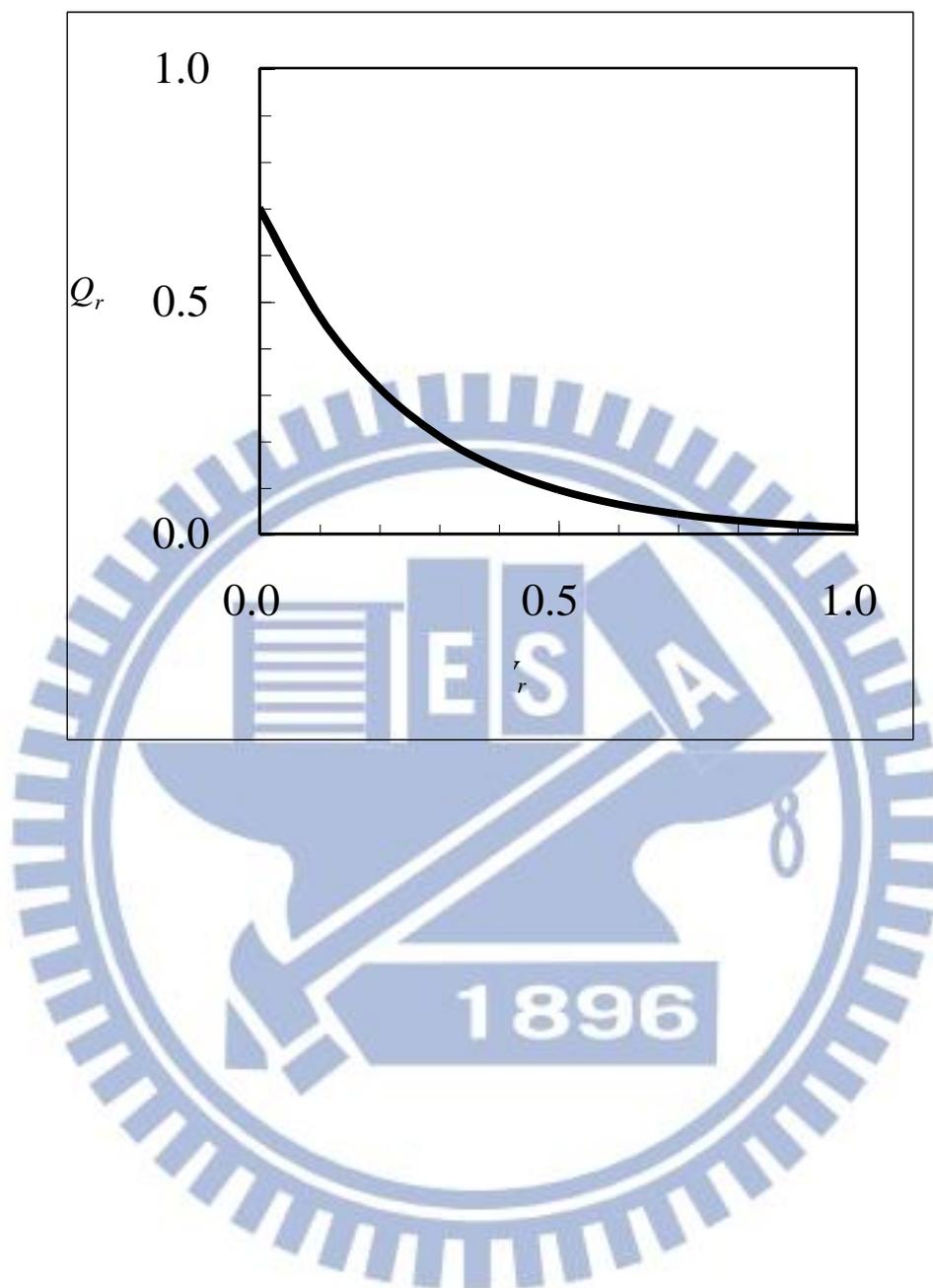


圖 2-5 剩餘容積比—指數模式

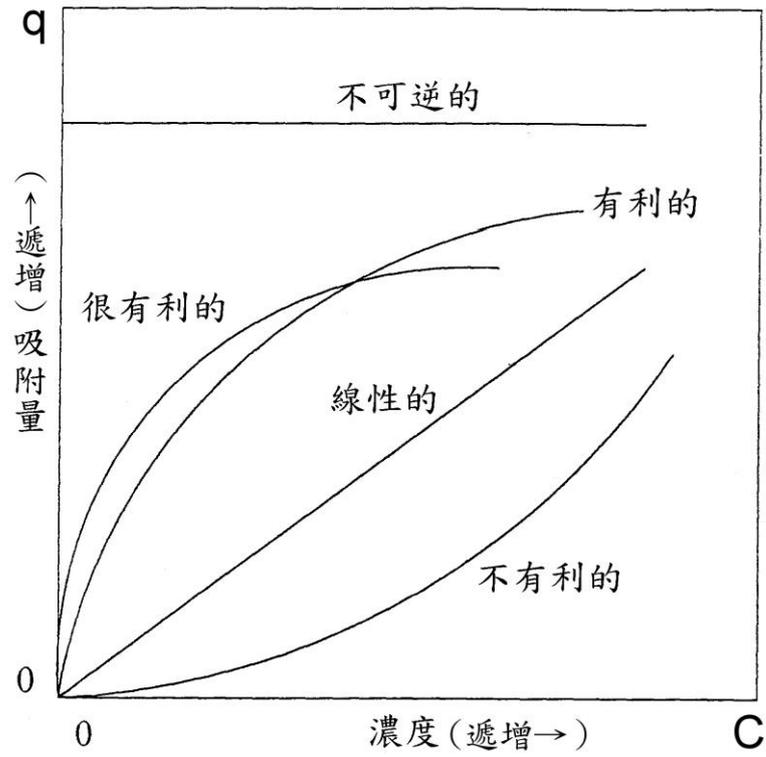


圖 2-6 吸附曲線之類型

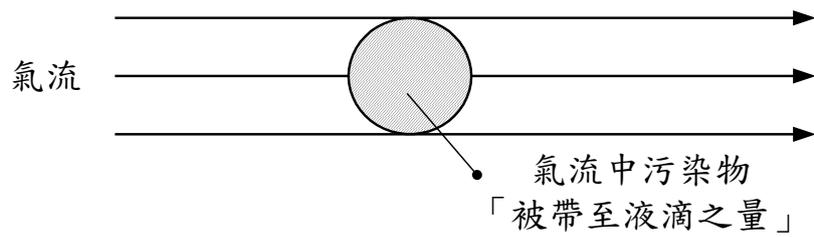


圖 2-7 濃度效應之說明示意圖

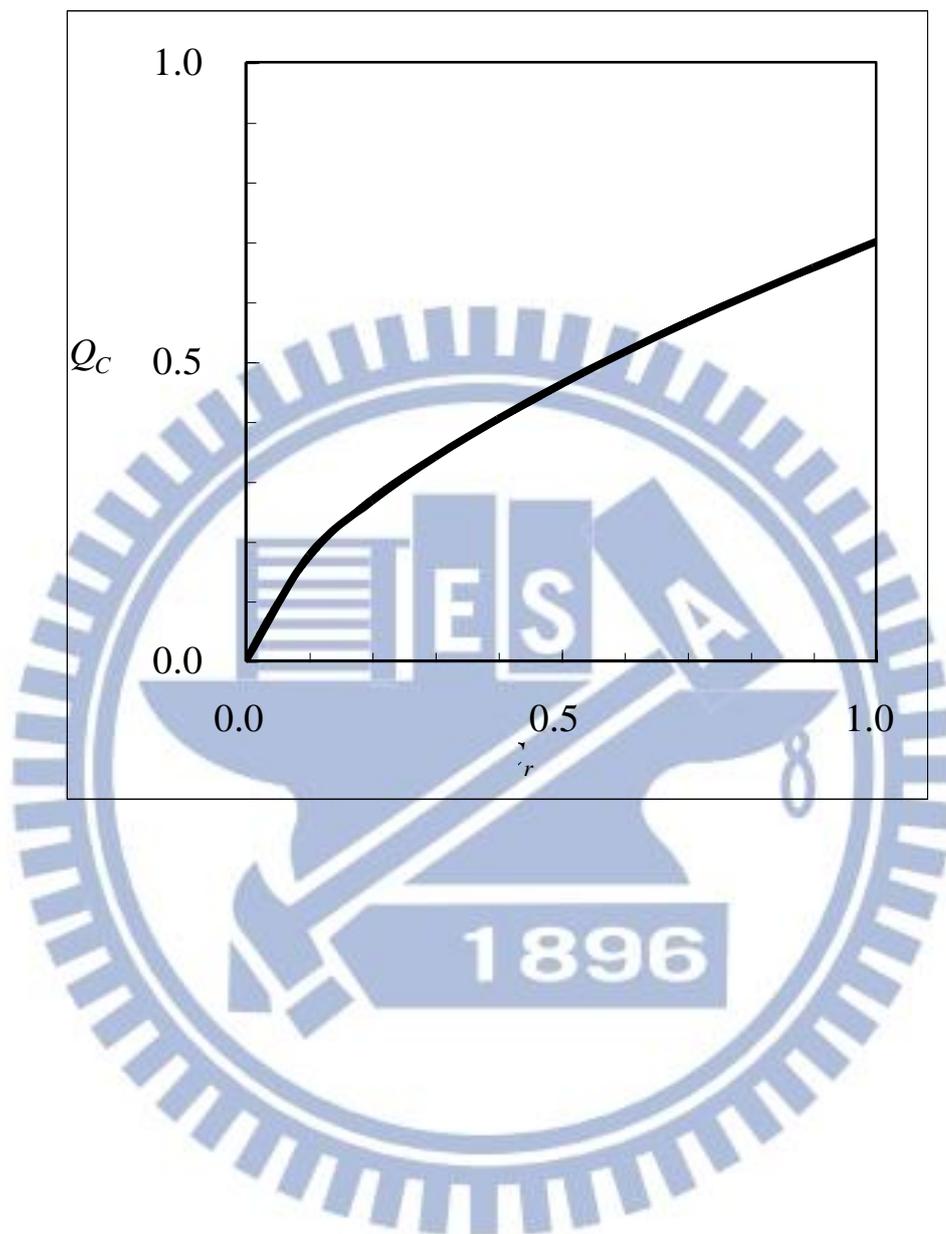


圖 2-8 濃度效應—Freundlich 模式

第三章 數值方法

第一節 濕式洗滌塔流場模擬

本研究利用數值方法，求解洗滌塔內之流場的變化。此數值方法乃是應用流體力學輔助軟體 FLUENT 作為計算平台，紊流流場 $k-\varepsilon$ 模式並假設流場為不可壓縮流模式，利用 SIMPLE 演算法解三維穩態之那維爾-史托克方程式 (Navier-Stokes equations)。

由於整個物理模式尺寸相當大，需要龐大的網格數方能達到較精確模擬結果，但基於如此不僅會浪費電腦空間，且計算所需時間相當耗時；因此為了簡化模型及計算上的方便，本研究將以多孔性介質來模擬格柵板、孔洞板、填充物吸附層等部分。

所謂多孔介質乃指內部有一些由固體壁形成可供流體流動之交錯孔道的介質。在介質內固體部份稱為固相母體 (solid matrix)，剩餘之孔道部份則稱為孔隙 (void space)。若代表體積為 V ，其中孔隙所佔之體積為 V_f ，則可定義此多孔介質之孔隙率 (porosity) ε 為

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V} \quad (\text{式 3-1})$$

本研究流場的統御方程式乃是應用 FLUENT 流體力學計算軟體輔助計算，其基本假設與統御方程式如下列所示。

基本假設：

- (1) 多孔介質為球形顆粒所組成，其材料不會變形。
- (2) 多孔介質不會與所通過之流體產生任何化學反應。
- (3) 流場為單相、紊流、不可壓縮流、牛頓流體。
- (4) 流體與多孔介質的黏性係數與密度為定值。
- (5) 重力影響忽略不計。

流場的統御方程式則有連續方程式、動量方程式、紊流動能方程式、紊流動量消耗方程式，分別如下：

連續方程式：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f \tilde{u}_j) = 0 \quad (\text{式 3-2})$$

動量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (\text{式 3-3})$$

$$\tau_{ij} = 2\mu_f s_{ij} - \frac{2}{3}\mu_f \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j} \quad (\text{式 3-4})$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{式 3-5})$$

其中：

x_i : 卡氏 (Cartesian) 座標 ($i=1, 2$)

u_i : 流體在 x_i 方向的絕對速度 [$m \cdot s^{-1}$]

$\tilde{u}_j = u_j - u_{cj}$: 流體相對於移動座標 (u_{cj}) 的流速 [$m \cdot s^{-1}$]

p : 全壓值 (piezometric pressure) [Pa]

ρ_f : 流體密度 [$kg \cdot m^{-3}$]

τ_{ij} : 應力張量

μ_f : 流體黏性係數 [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]

δ_{ij} : Kronecker delta

s_{ij} : rate of strain tensor

紊流動能方程式：(Standard $k-\varepsilon$ Model)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_f \tilde{u}_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \mu_t (P + P_B) - \rho_f \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho_f k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \mu_t P_{NL} \quad (式 3-6)$$

$$\mu_{eff} = \mu_f + \mu_t \quad (式 3-7)$$

$$P \equiv 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (式 3-8)$$

$$P_B \equiv -\frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \quad (式 3-9)$$

$$P_{NL} = -\frac{\rho_f}{\mu_t} \frac{u'_i u'_j}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \left[P - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\rho_f k}{\mu_t} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \quad (式 3-10)$$

其中：

μ_t ：紊流黏性係數 (turbulent viscosity)

$\sigma_{h,t}$ ：紊流普朗特數 (turbulent Prandtl number)

σ_k ：經驗值

紊流耗散方程式：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_f u_j \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\mu_t P - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho_f k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B - C_{\varepsilon 2} \rho_f \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho_f \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_{NL} \quad (式 3-11)$$

其中 $\sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}, C_{\varepsilon 4}$ 為經驗值

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$
0.09	1.0	1.22	1.44	1.92	0.0 or 1.44 *	-0.33

$$* C_{\varepsilon 3} = \begin{cases} 0 & , P_B \leq 0 \\ 1.44 & , P_B > 0 \end{cases} \quad (\text{式 3-12})$$

k、 ε 經驗公式：

$$k_t = 1.5 \times (u \times I)^2 \quad (\text{式 3-13})$$

$$\varepsilon_t = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{l} \quad (\text{式 3-14})$$

其中：

$I = 0.1$: 紊流強度

$C_\mu = 0.09$: 經驗常數

$l = 5 \times 10^{-3}$: 混合長度 (mixing length) [m]

而在多孔介質區域內，假設局部壓力與阻力達成平衡，則可得下式，即所謂達西定律 (Darcy law) [15]：

$$-K_i u_i = \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (\text{式 3-15})$$

其中：

$\frac{\partial p}{\partial x_i}$: 流體流動方向的壓力梯度

K_i : 滲透度 (permeability)

當流體速度較大時，由於在多孔介質內固體所引起的形狀阻力 (form drag) 與磨擦所引發的表面阻力 (surface drag) 具有同等地位，因此 Forchheimer [16] 建議此時需考慮慣性項的影響，故將達西定律之 K 修改成：

$$K_i = \alpha_i |\vec{v}| + \beta_i \quad (\text{式 3-16})$$

$|\vec{v}|$ 為表面速度值， α 、 β 為經驗值，且 α 與慣性有關， β 則與黏性有關。由 Bear [17] 所提出的函數式如(2-18)式及(2-19)式，其中的 α 、 β 係數則是孔隙率、黏滯性、密度和顆粒粒徑等之函數。對於此二者之模擬相當多，但一般較為常用者為 Ergun [18] 所提出之方程式：

$$\frac{dp}{L_p} = \frac{150\mu_f(1-\varepsilon)^2 u}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1.75\rho_f(1-\varepsilon)u^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (\text{式 3-17})$$

$$\alpha = \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad (\text{式 3-18})$$

$$\beta = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} \quad (\text{式 3-19})$$

其中：

d_p : 多孔介質之平均粒徑 [m]

L_p : 吸附床深度 [m]

第二節 吸附性能分析

至於過濾效率計算之模型則是先將原三維之模型簡化成二維，如圖 3-1 所示將填充物料高度部份先分成十層，每一層再依據入口氣流進入之方向(X 方向)再分為十塊面積，成為 10 X 10 的二維網格，上方為洗滌水入口，下方則為廢氣汙染物入口，如圖 3-2 所示；而依照氣流進入的方向劃分乃是因為若是採取垂直方向(Y 方向)時，此塊區域之平均速度會受到離進口遠近之影響，其計算出的平均速度無法有效的代表整塊面積之速度，因為離進口遠近的兩端速度差異甚大。

計算效率時，由於廢氣於塔內滯留時間約為一秒，我們將網格分為十格後，其在每個網格內之停留時間約為 0.1 秒，再加上從前一開始的流場計算中取出各個網格之平均速度(包含 X 方向和 Z 方向)，因此我們可計算出廢氣進出網格的總量，再依據濃度效應的理論公式可以計算出每一時階(time step)廢氣被洗滌水所吸收的量，因而可在出口處估算廢氣被處理之效率。廢氣之處理效率定義為

$$\epsilon_{\text{air}} = \frac{\text{入口之廢氣量} - \text{出口之廢氣量}}{\text{入口之廢氣量}} \quad (式 3-20)$$

此外在計算洗滌水之總量時，我們首先假設開始過濾時之條件為：

- (1) 塔體內已充滿水霧，廢氣才開始進入塔體進行過濾。
- (2) 在塔內之填充物料以圓球替代其原本之雙蓮花型拉西環。
- (3) 不考慮阻塞效應，即假設填充物料的孔隙率、粒徑、密度…等，皆不會隨著時間改變。
- (4) 每一單位的水滴吸附容積，可吸附一單位污染物的量。
- (5) 微粒污染物均勻分佈於氣相流場中，微粒對水滴的附著效率為 100%，換句話說，當微粒附著於水滴表面時，即完成收集機制，不會再分離回歸於氣相流場中。

由於洗滌水於塔體內之滯留時間並不明確，我們假設洗滌水在該時階內能走完其網格長度，另外由於水霧噴灑於塔體內後會附著於填充物料上對廢氣汙染物進行過濾，因此水只要能包覆住整個填充物料，我們即以填充物料的體積替代水之過濾總體積，這也較為符合實際現象中填充物料是為了能使得水更有效的與廢氣接觸作用而存在的。確立了水之有效的總體積後，再利用剩餘體積之理論公式計算出每一網格中能提供吸收廢氣之水量，所以於水之出口處，能計算出洗滌水之效率。洗滌水之效率則定義為：

$$\epsilon_{\text{water}} = \frac{\text{出口含廢氣之水量}}{\text{入口之水量}} \quad (\text{式 3-21})$$

最後在過濾的機制上，我們以高度 3 格為例簡單說明其過濾機制；如圖 3-3 所示，左邊的格子代表洗滌水，右邊則為廢氣汙染物。首先第一步 (No. 1) 為還未過濾前，塔內已經充滿了新鮮的洗滌水，而帶滿汙染物的廢氣才開始進入，第一次過濾後，已過濾一次的廢氣 (在格子內標示一個圓圈) 往上進入第二個網格，而已進行過一次過濾的洗滌水則掉出出口，然後帶滿汙染物的廢氣和水依舊持續進入塔內，因此原本在塔內的水都往下掉一個網格，維持最上方網格的水為尚未過濾的；且未進行過濾的空氣汙染物也新進入了第一個網格如第二步 (No. 2) 所示，之後所進行的過濾則以此類推，進行第三次、第四次、..... 一直到廢氣出口和洗滌水出口平衡為止。其程式流程圖如圖 3-4 所示。

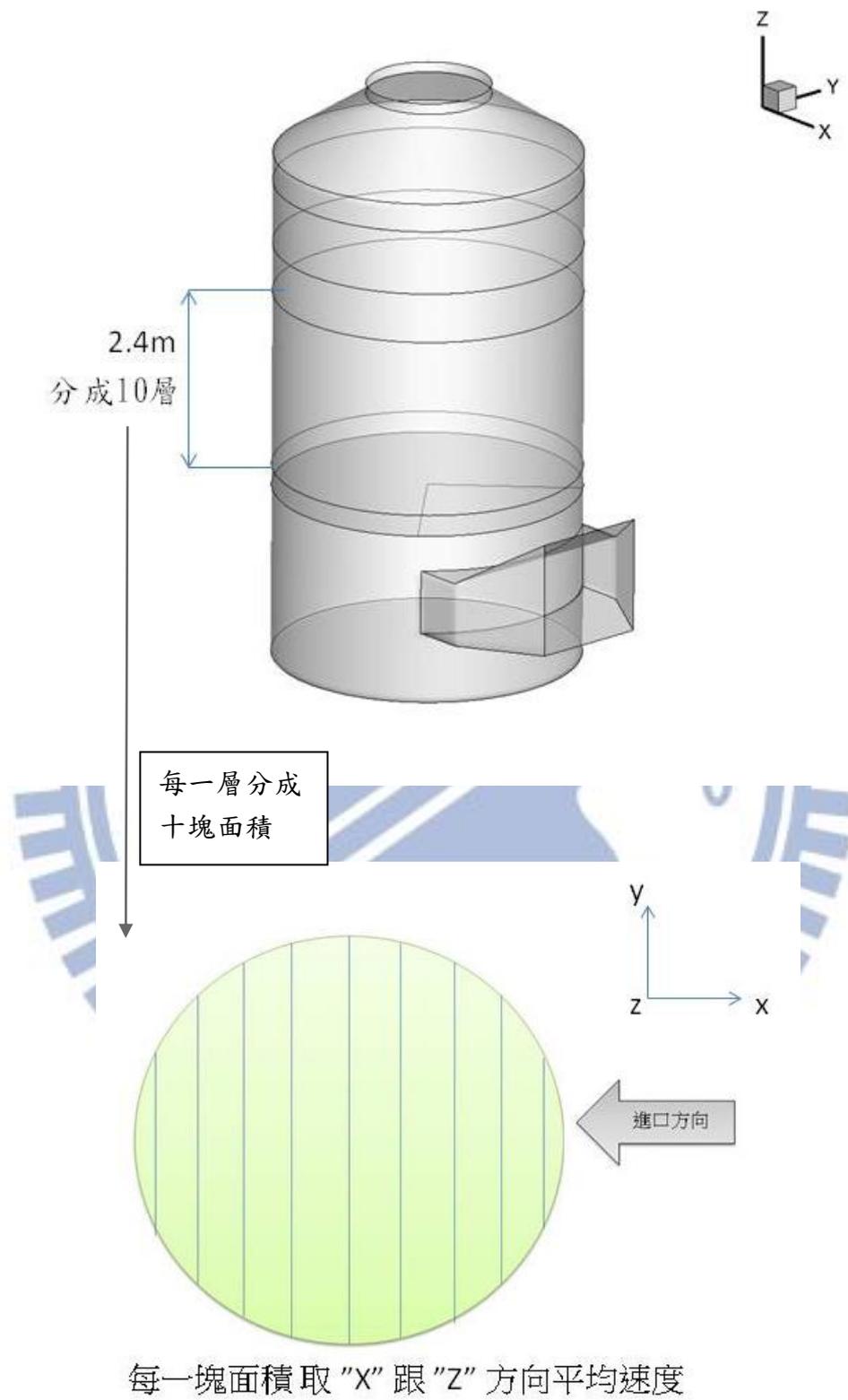


圖 3-1 簡化示意圖

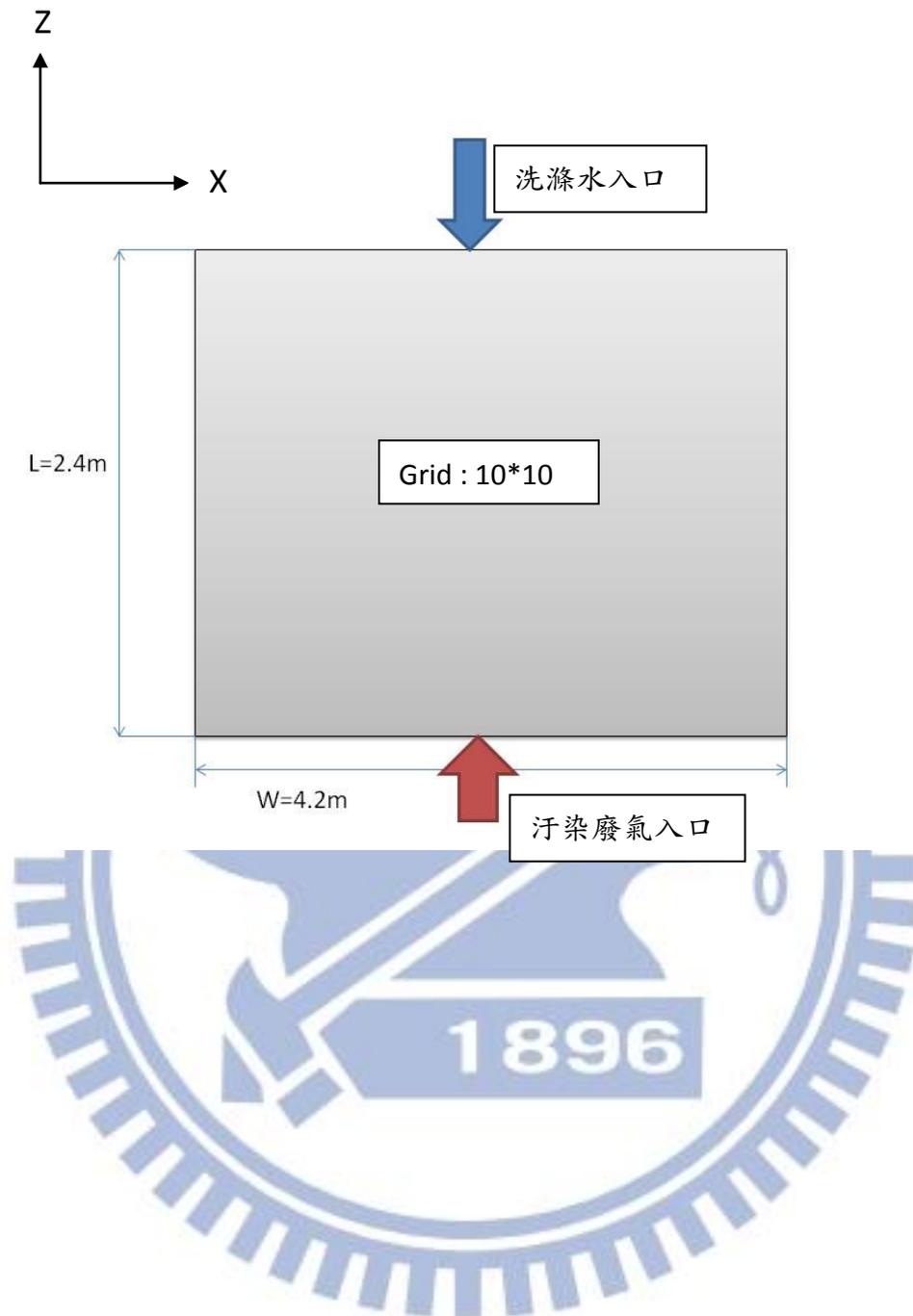


圖 3-2 過濾效率計算模型

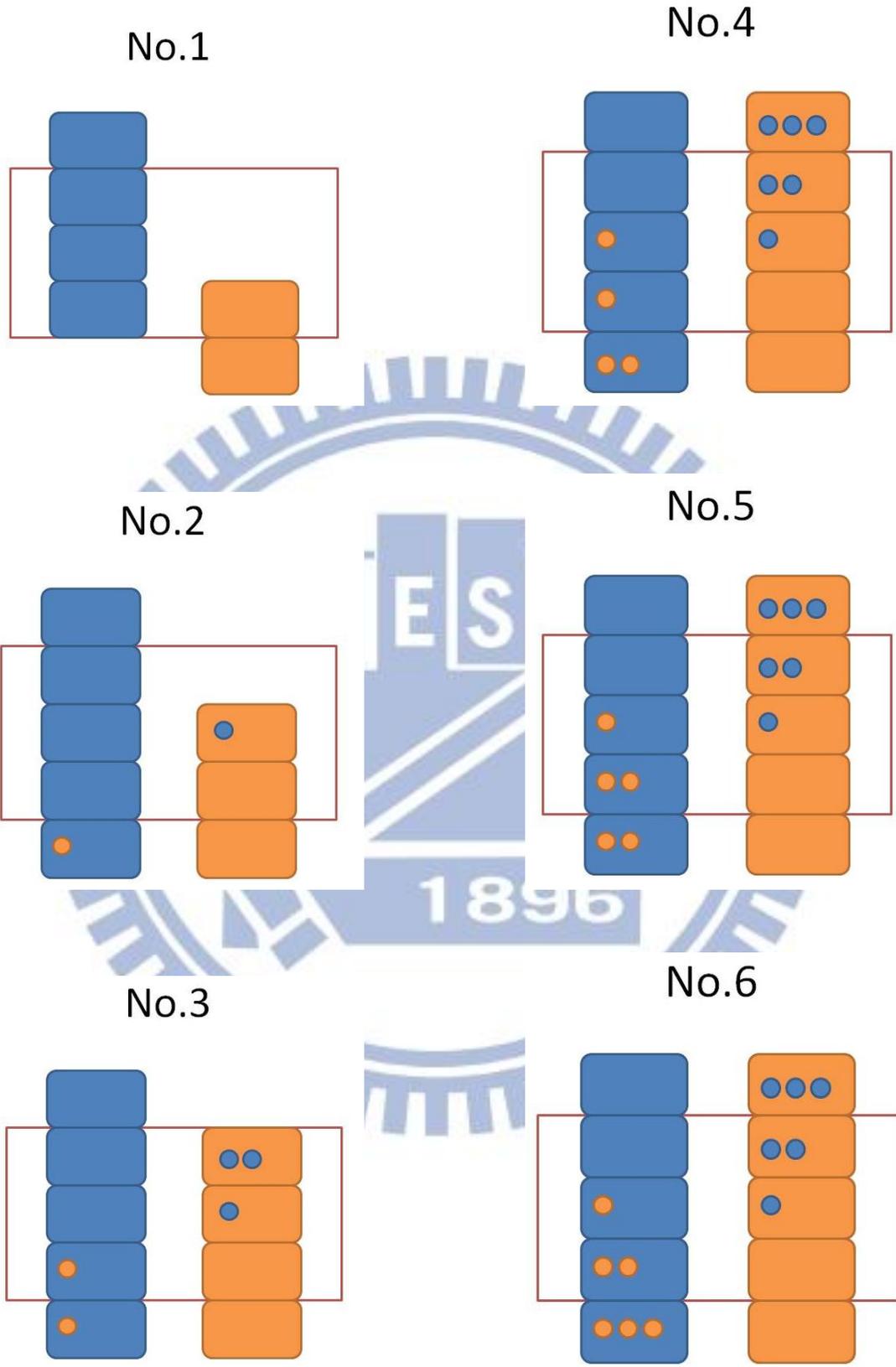


圖 3-3 過濾示意圖

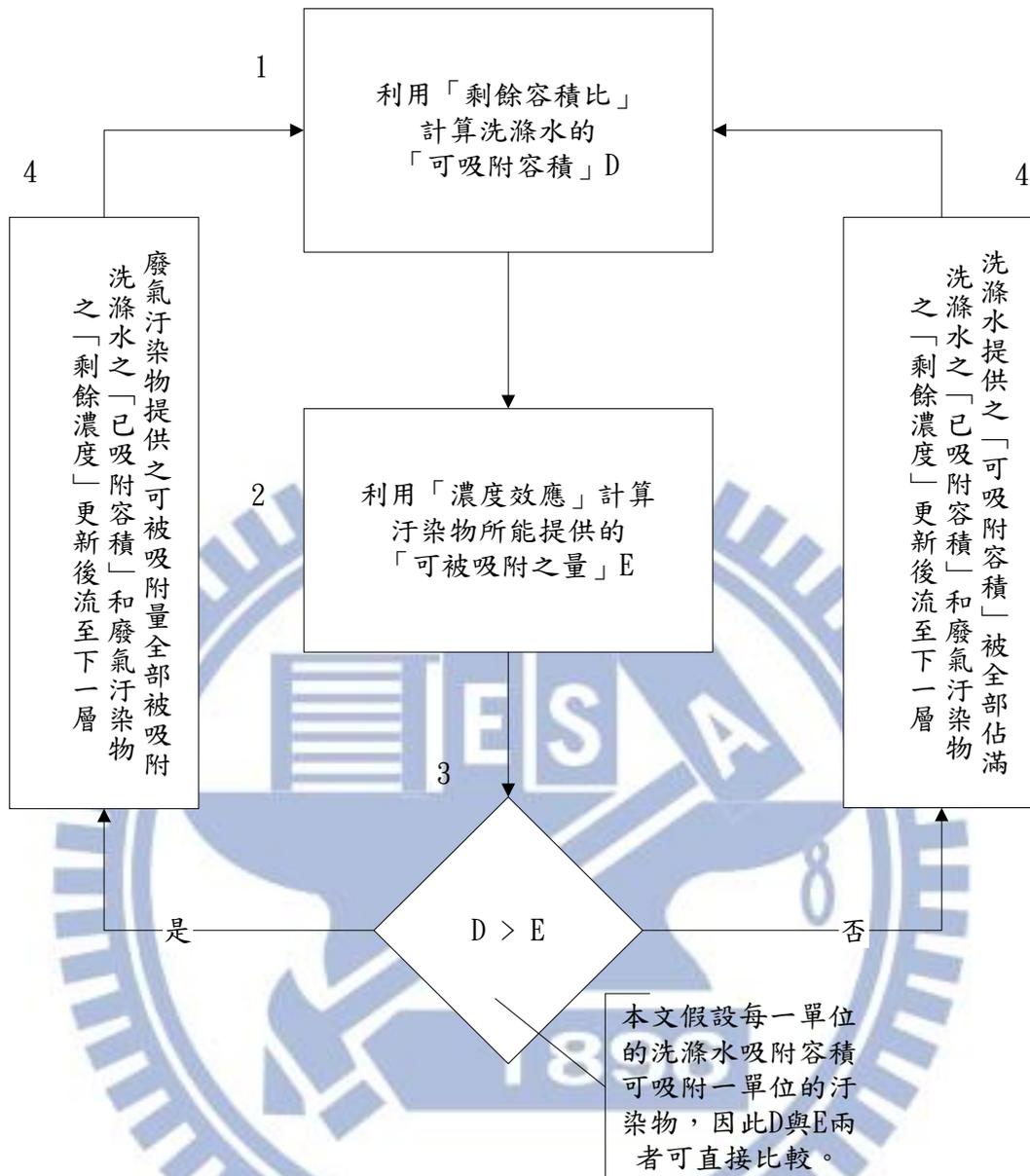


圖 3-4 程式之計算流程圖

第四章 結果與討論

第一節 濕式洗滌塔流場模擬

本研究模擬乃假設工作流體為空氣，其性質如下所述：

$$\text{空氣密度：} \quad \rho_f = 1.205 [kg \cdot m^{-3}]$$

$$\text{空氣黏性係數：} \quad \mu_f = 1.81 \times 10^{-5} [kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$$

依據廠商所設計製造的填充式濕式洗滌塔如圖 4-1 所示，此提供之設計值可知，入口處平均流量為 $120000 [m^3/hr]$ ，入口之截面積為 $1600mm \times 1600mm$ ，因此入口平均流速概算如下式：

$$U_0 = \frac{Q}{A} = \frac{120000 \left(\frac{m^3}{hr}\right) \times \frac{1}{3600} \left(\frac{hr}{s}\right)}{1600^2 (mm^2) \times 10^{-6} \left(\frac{m}{mm}\right)} = 13.02 \left(\frac{m}{s}\right)$$

其中：

U_0 ：入口處之平均流速 $[m/s]$

Q ：入口處之平均體積流率 $[m^3/hr]$

A ：入口處截面積 $[m^2]$

由於要以多孔性介質來模擬原本並非多孔材料的格柵板與孔洞板兩部分，而多孔介質最主要的兩個參數為孔隙率(ε)與粒徑(d)大小，在隔柵板與孔洞板部分，由於格柵的孔洞是正方形，因此取其邊長為粒徑之平均大小，即平均粒徑；孔隙率部分則用孔洞面積除上總面積，由此可得：

格柵板：

$$d_{p1} = 38 (m) \Rightarrow 0.038$$

$$\varepsilon_1 = 0.667$$

孔洞板：

$$d_{p2} = 63(\text{mm}) = 0.063(\text{m})$$

$$\varepsilon_1 = 0.22$$

為使充分了解填充式濕式洗滌塔改善前後流場均勻化的成果，將模擬分為兩部分，第一為原先未改善前之洗滌塔，第二為加入孔洞板改善後之洗滌塔。

由於希望能於第一層填充物出口時就能使流速達到平均值的正負 10%，所以選定高度 3700mm 為監測高度，並將流場結果切出多個剖面以利探討其均勻化程度。而且再加入孔洞板後，會提高洗滌塔之壓力損失，因此本研究中亦將壓力差算出，以利估計改善之可行性。

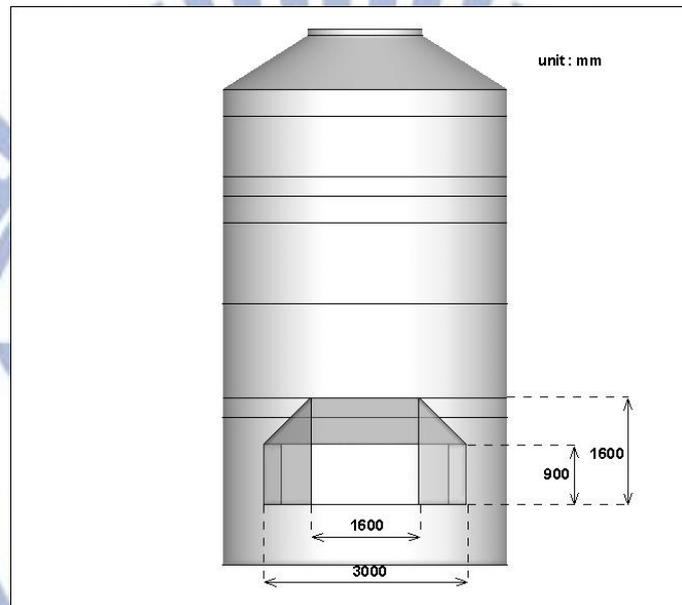
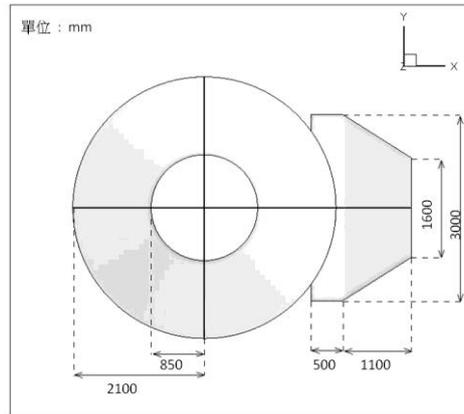
原始洗滌塔模型剖面圖如圖 4-2 所示，其計算結果可得知出口處與入口處之壓力差為 340.39Pa，在高度 3700mm 處切一剖面，如圖 4-3 所示，而圖 4-4 為速度場在與進口方向平行之截面上之分佈，從其中可看出速度流場在此高度依舊處於分佈不均勻的狀態。

由於洗滌塔之入口設計與塔體呈現 90 度垂直，易導致廢氣從入口進入後，直朝對向之塔體壁面衝去，在撞擊塔體壁後一分为二，大部分廢氣延伸往上方出口處繼續流出，另外少部分則是被導入塔底，並在塔底形成一小渦流；因此可看出在距離入口遠處，會有大量的廢氣通過填充物料；而在入口附近處大部分的填充物料則是僅有少部分的廢氣通過，會導致有大量廢氣通過的填充物料很快就達到飽和，而失去其過濾的效果，相反的大部分的填充物料因為少有廢氣通過，難以對廢氣進行過濾，此兩結果大大降低了廢氣的去除效率。為使更易看出其流場現象，另於各截面做等高線圖，如圖 4-5 所示。

為求對流場做均勻化的改善，本研究於高度 2513mm(第一層格柵上方)處加入一 5mm 高的孔洞板，形狀為 3/4 圓，如圖 4-6 所示。同樣於監測高度 3700mm 處切一剖面，和與進口方向平行之中線切一剖面，如圖 4-7，圖 4-8 所示，可看出已經為速度相當均勻的流場。

因為孔洞板在原先後方廢氣大量衝入處，阻擋了廢氣的行進，僅提供少量的廢氣通過，致使其餘廢氣必須繞道從前 1/4 圓處通過，在後方速度降低、前方速度提高之下，速度場便能控制在速度平均的正負 10%內；另外由於孔洞板僅僅只有 5mm 厚，其入口與出口之壓力差為 381Pa，比較原先洗滌塔壓差提升了 11.9%，並未造成過多的壓力損失。同樣的為使流場結果更易觀察，圖 4-9 提供了各截面之等高線圖。

而於圖 4-3 與圖 4-6 中所標示的 B、C、D、E 四條線中，另外將其速度分佈標示在圖 4-10~圖 4-13 中。圖中所標示之紅線為原有洗滌塔內之速度，黑線為改善後之洗滌塔內速度，紫色線為在此截線上之速度平均值，綠色線則為平均值之正負 10%。顯而易見的，未改善之流場在距進口遠處其速度遠大於平均值，而改善後之流場則能穩定的在正負 10%之內；因此改善過的洗滌塔能提供較均勻之流場，使得填充物質都能有效的對廢氣進行過濾。



- 單位 : mm
- H1 : 2200
 - H2 : 300
 - H3 : 1400
 - H4 : 1200
 - H5 : 400
 - H6 : 300
 - H7 : 900
 - H8 : 400
 - H9 : 900
 - D1 : $\phi 4200$
 - D2 : $\phi 1700$
 - L1 : 900
 - L2 : 1600

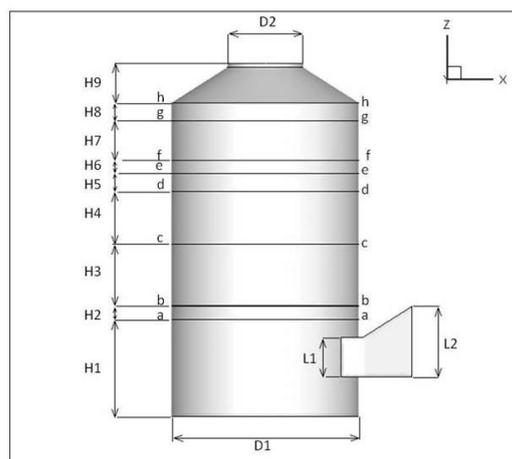


圖 4-1 洗滌塔之三視圖

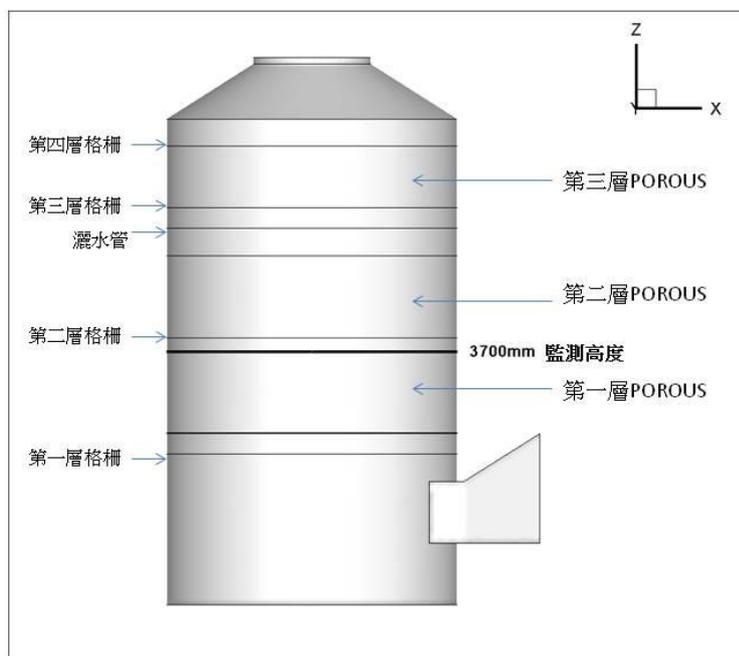


圖 4-2 洗滌塔之剖面示意圖

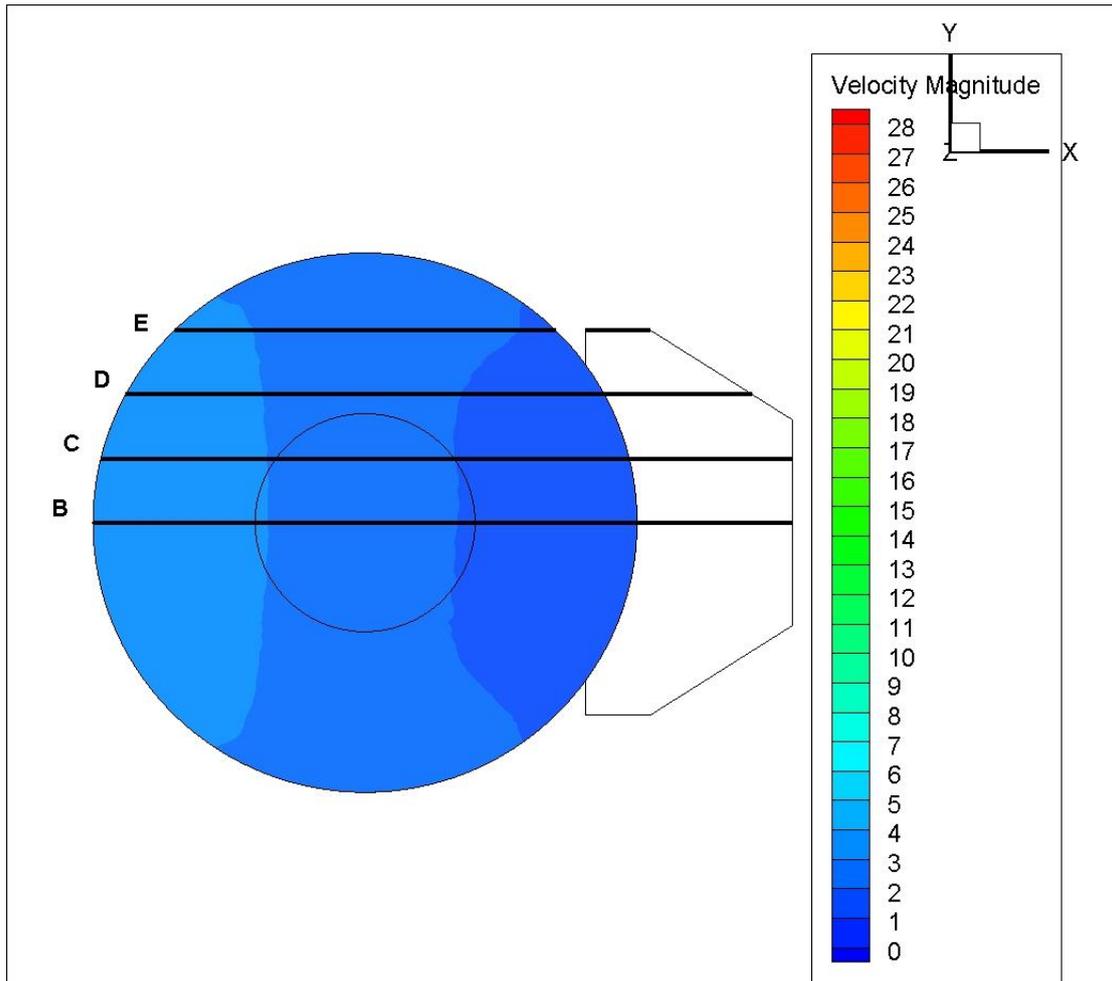


圖 4-3 高度 3700mm 處之速度等高線圖

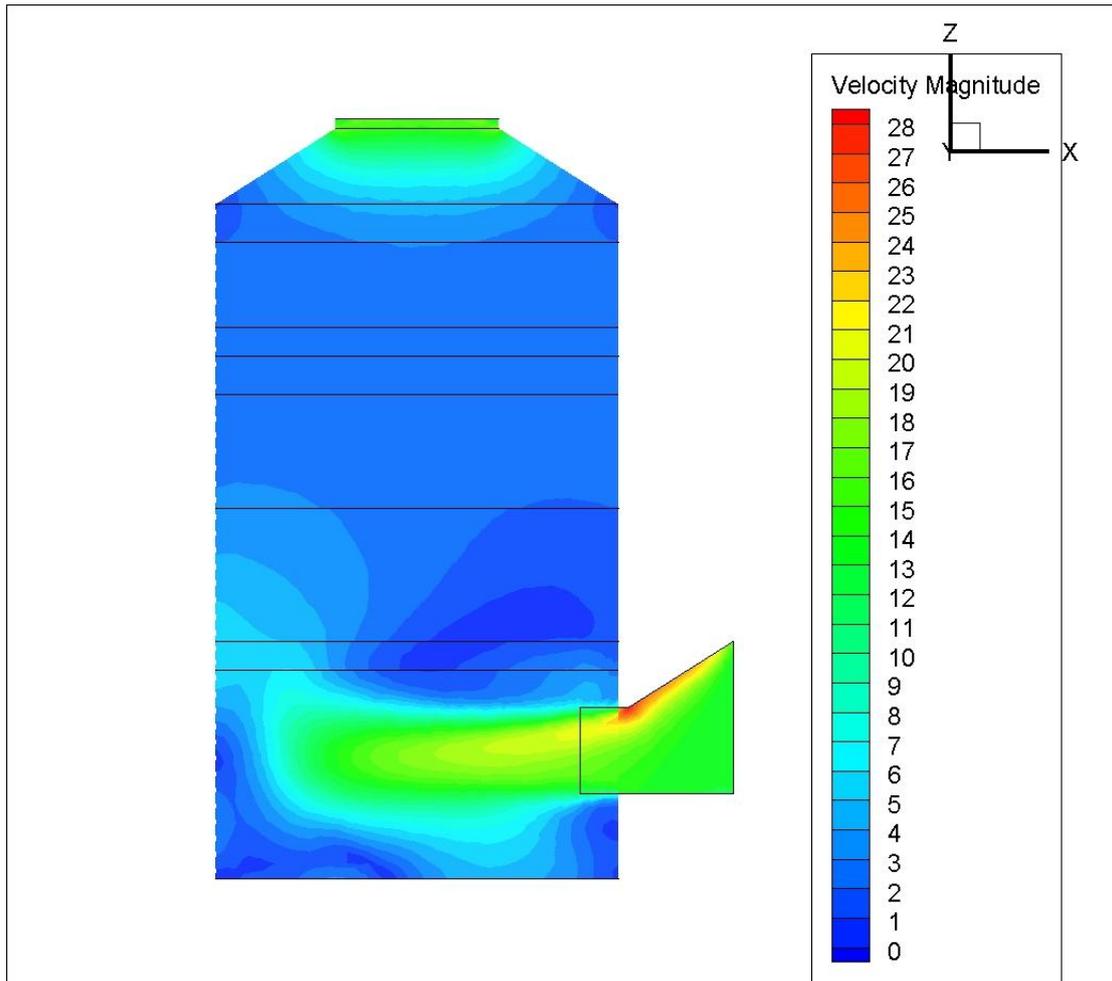


圖 4-4 與進口方向平行之中線(B線)剖面速度等高線圖

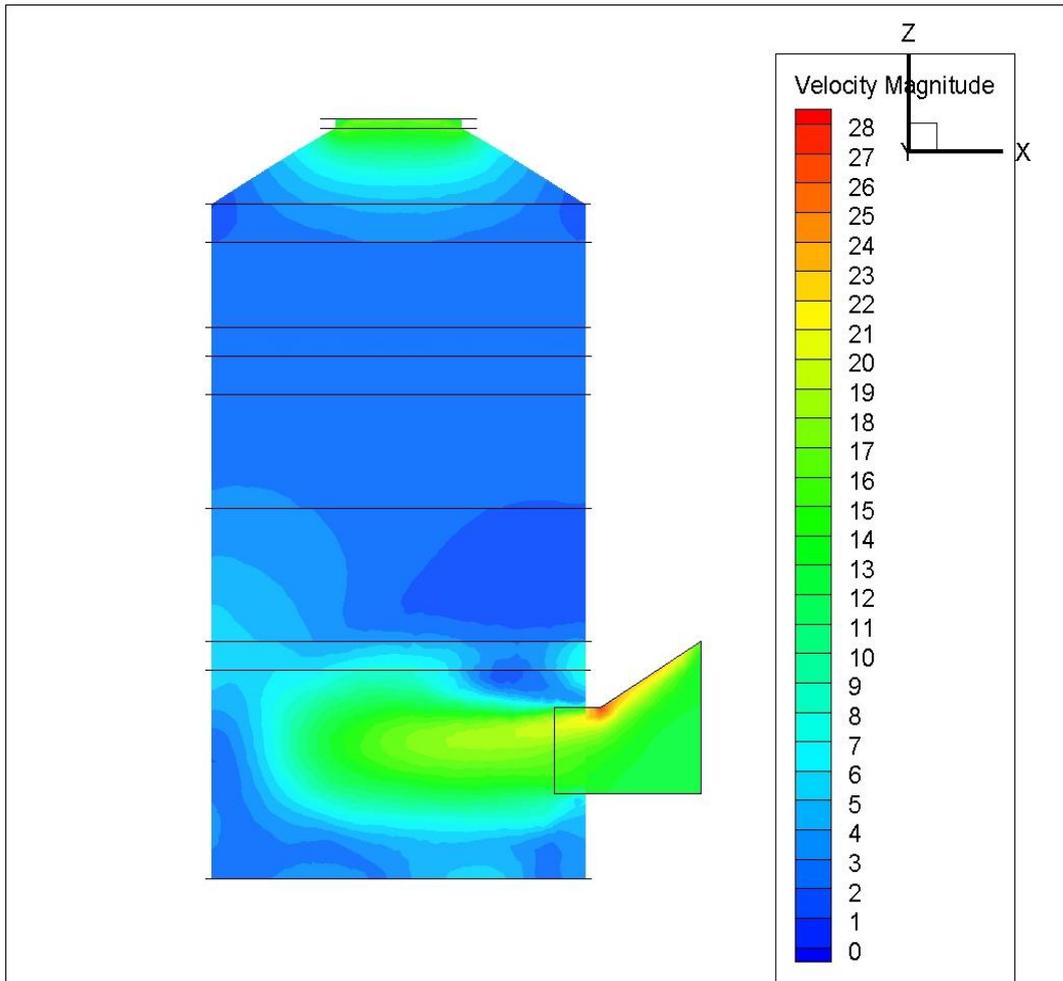


圖 4-5(a) C 線剖面之速度等高線圖

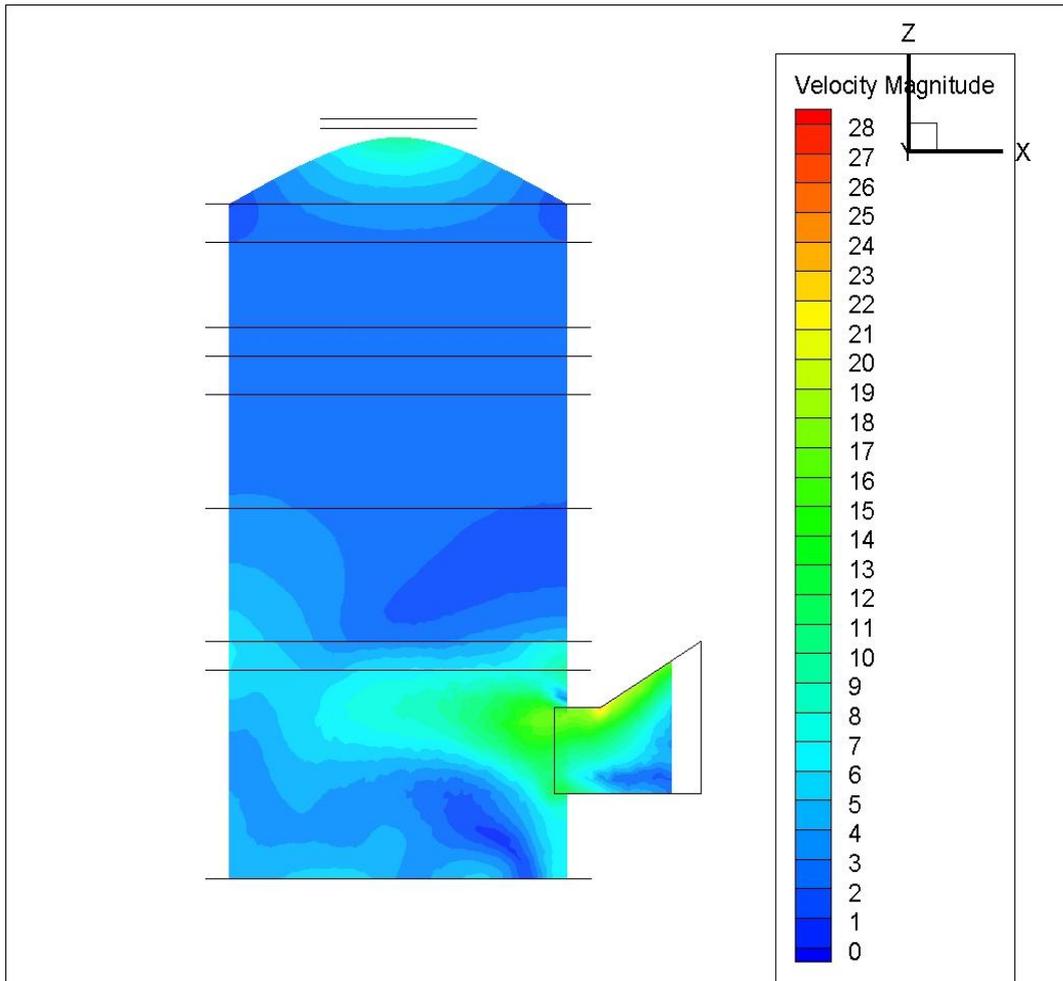


圖 4-5(b) D 線剖面之速度等高線圖

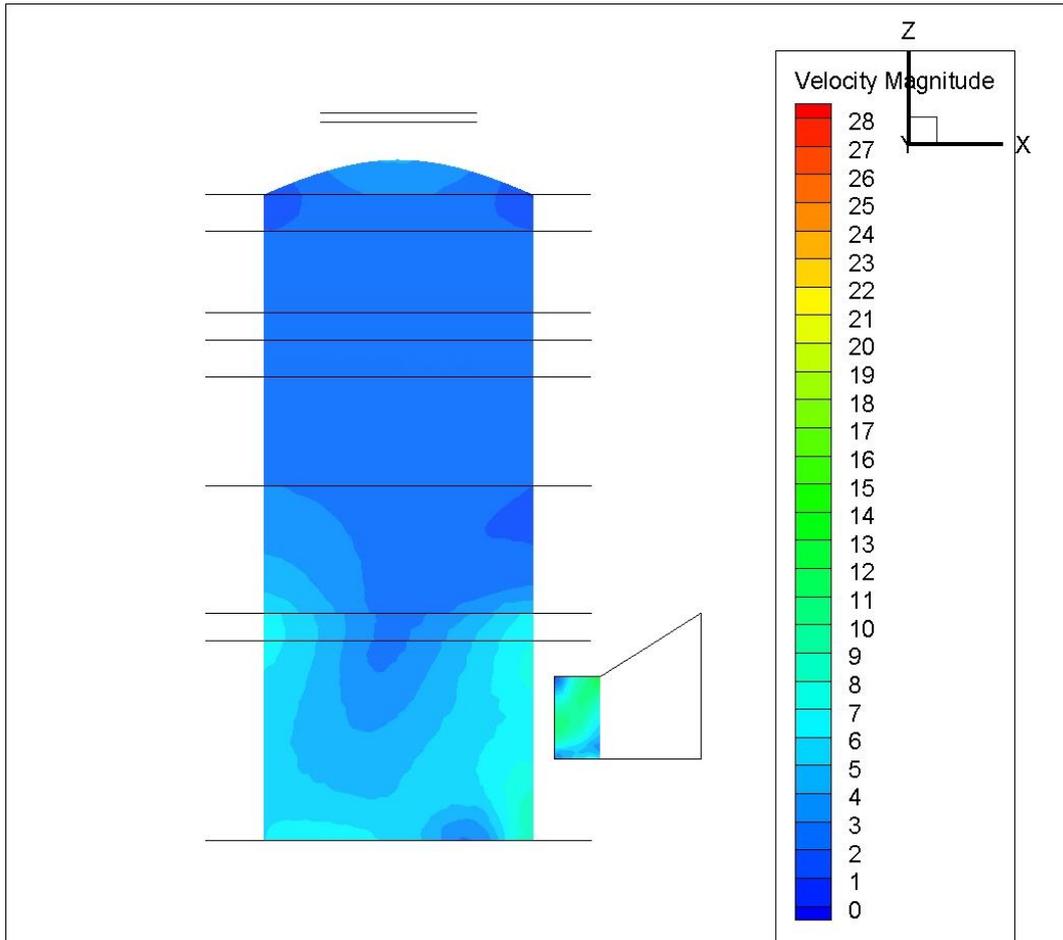


圖 4-5(c) E 線剖面之速度等高線圖

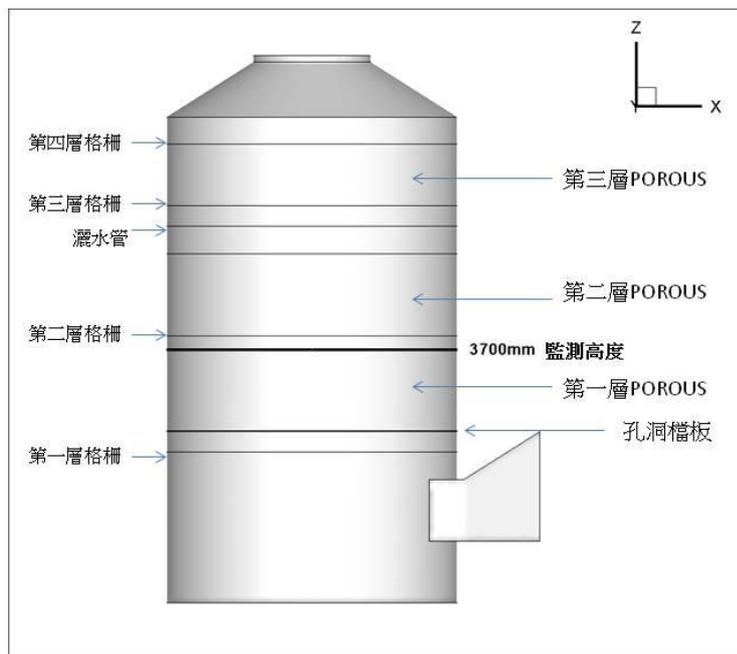


圖 4-6 加入孔洞檔板後之洗滌塔剖面圖

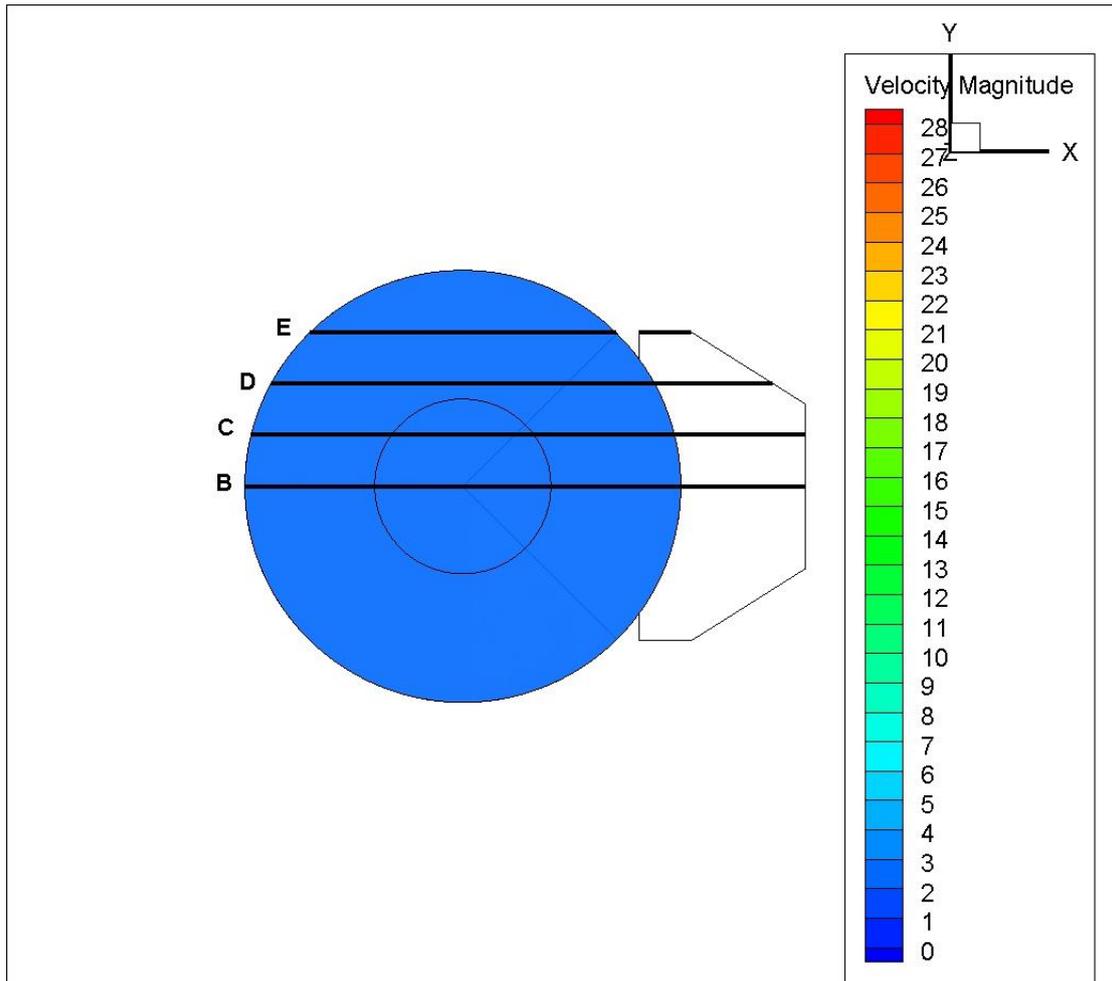


圖 4-7 加入檔板後的洗滌塔在高度 3700mm 處之速度等高線圖

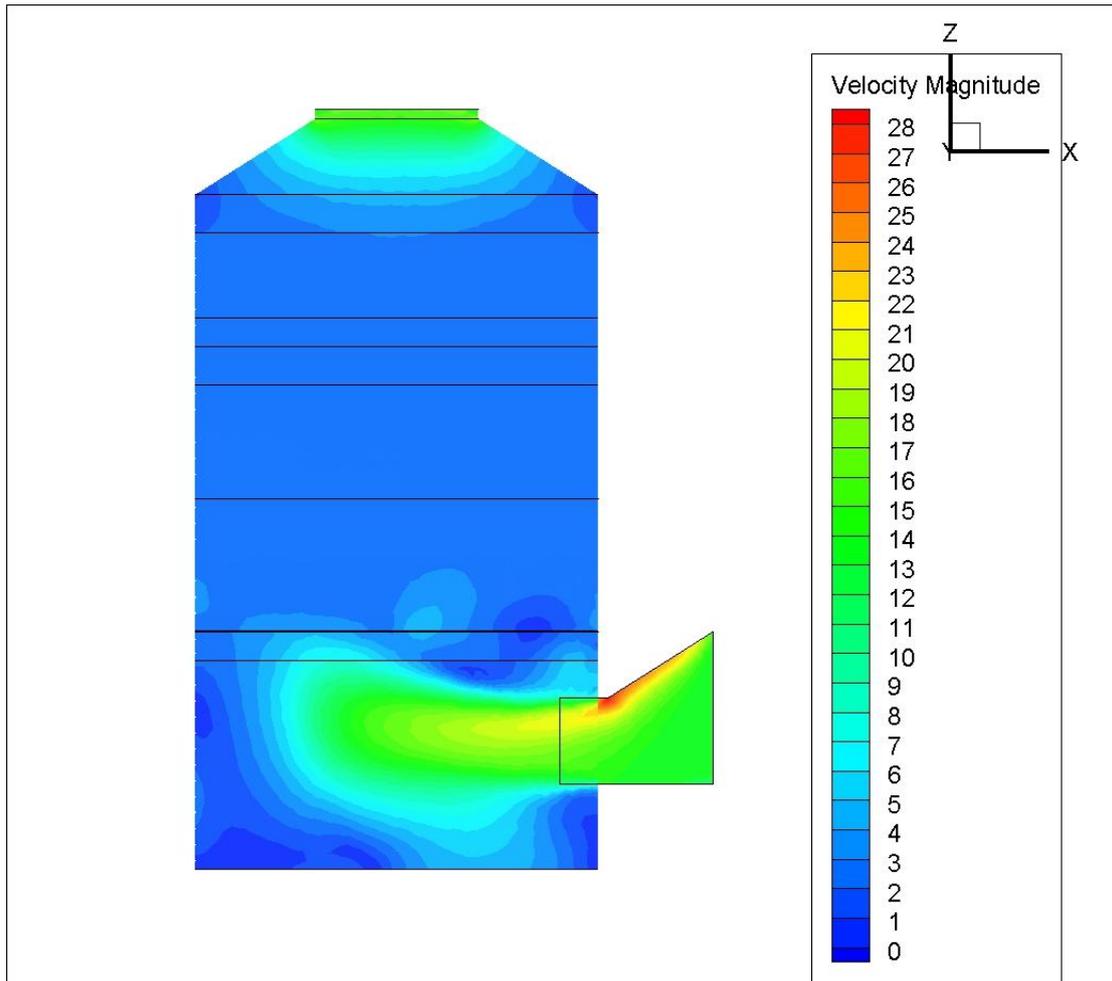


圖 4-8 加入檔板後的洗滌塔在 B 線剖面的速度等高線圖

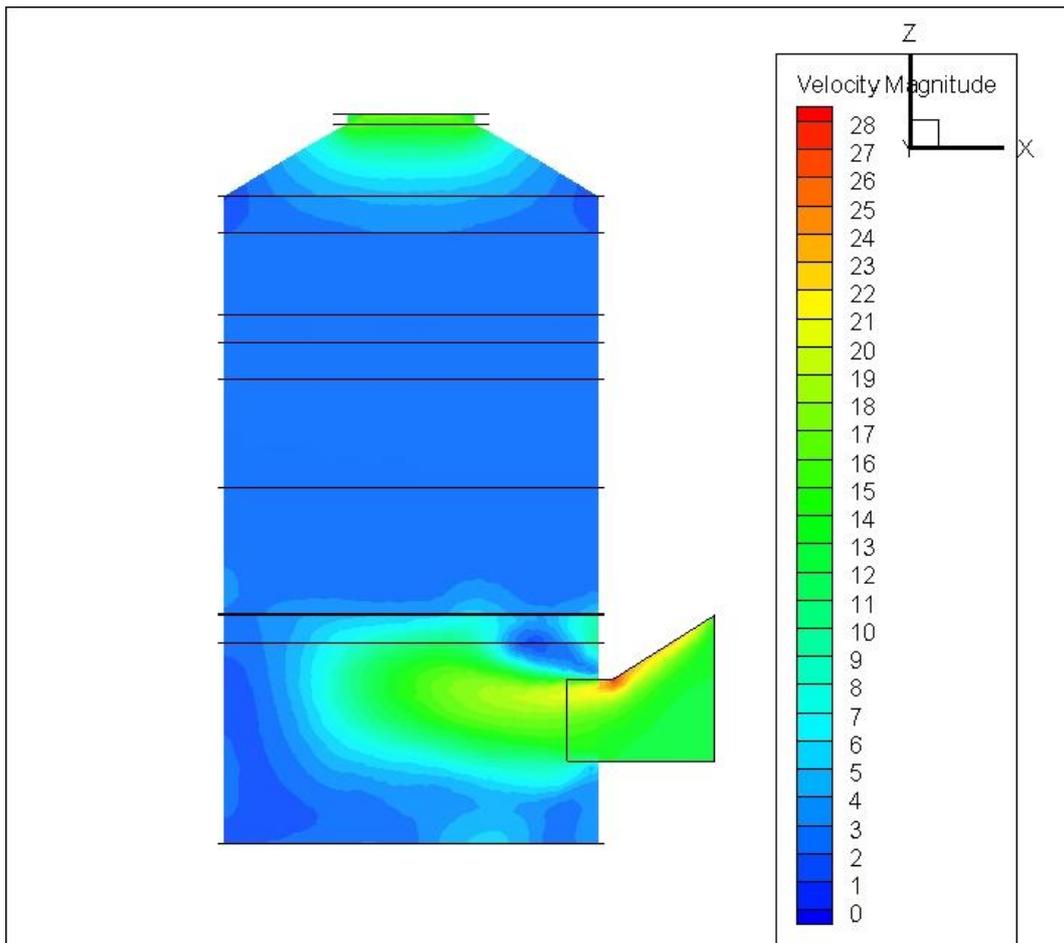


圖 4-9(a) 加入擋板後的洗滌塔在 C 線剖面之速度等高線圖

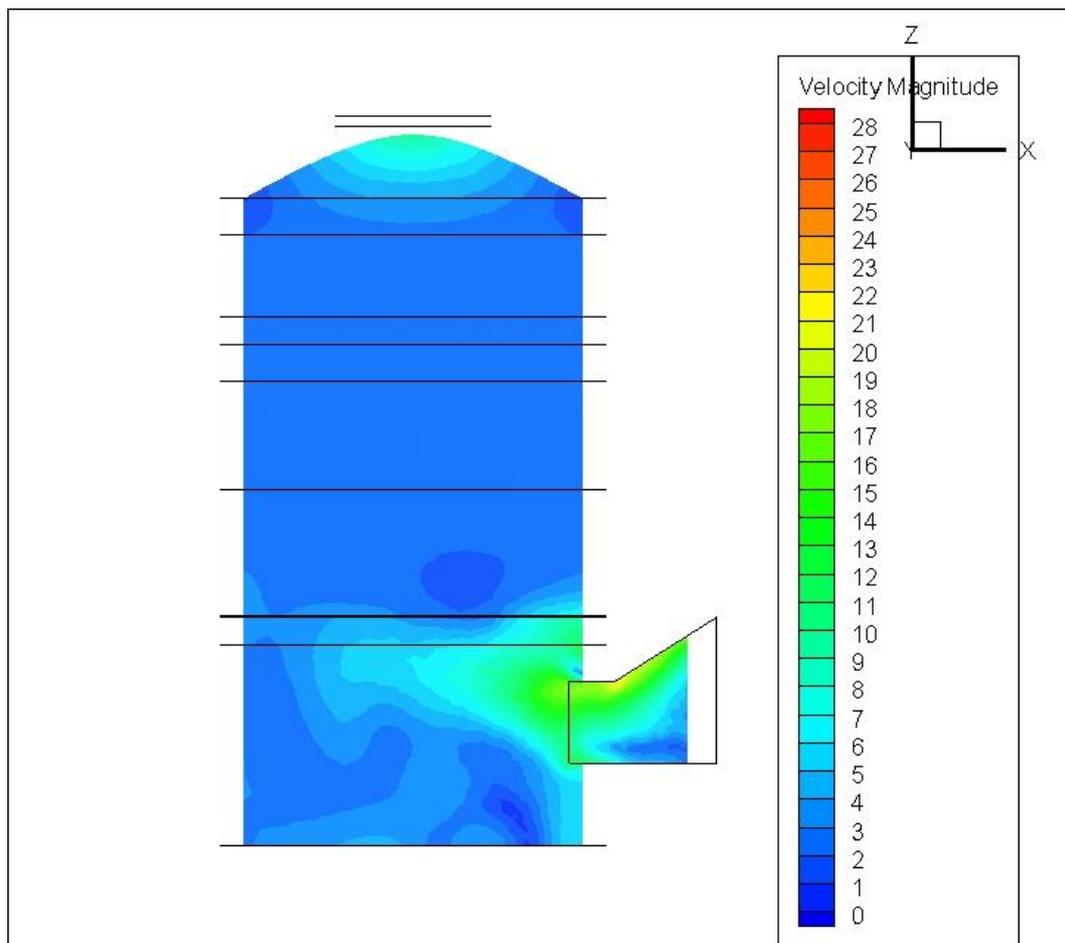


圖 4-9(b) 加入擋板後的洗滌塔在 D 線剖面之速度等高線圖

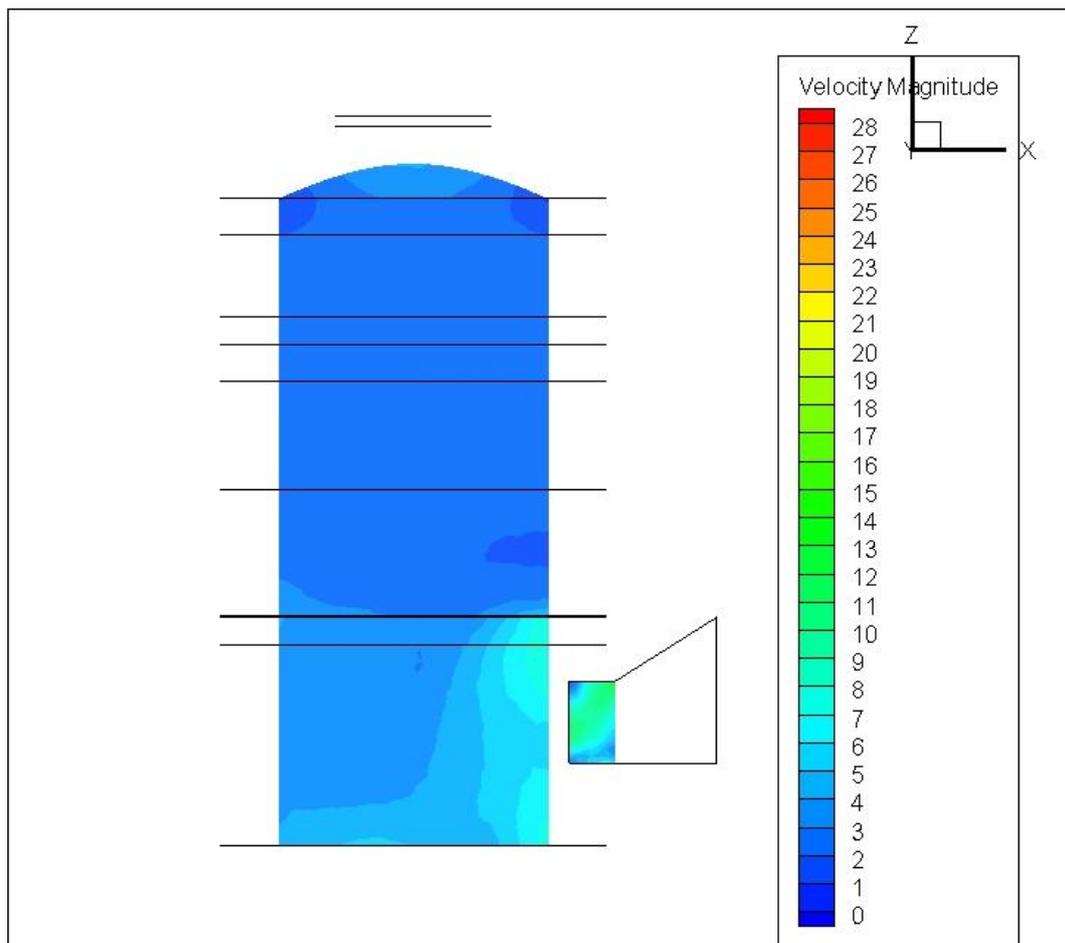
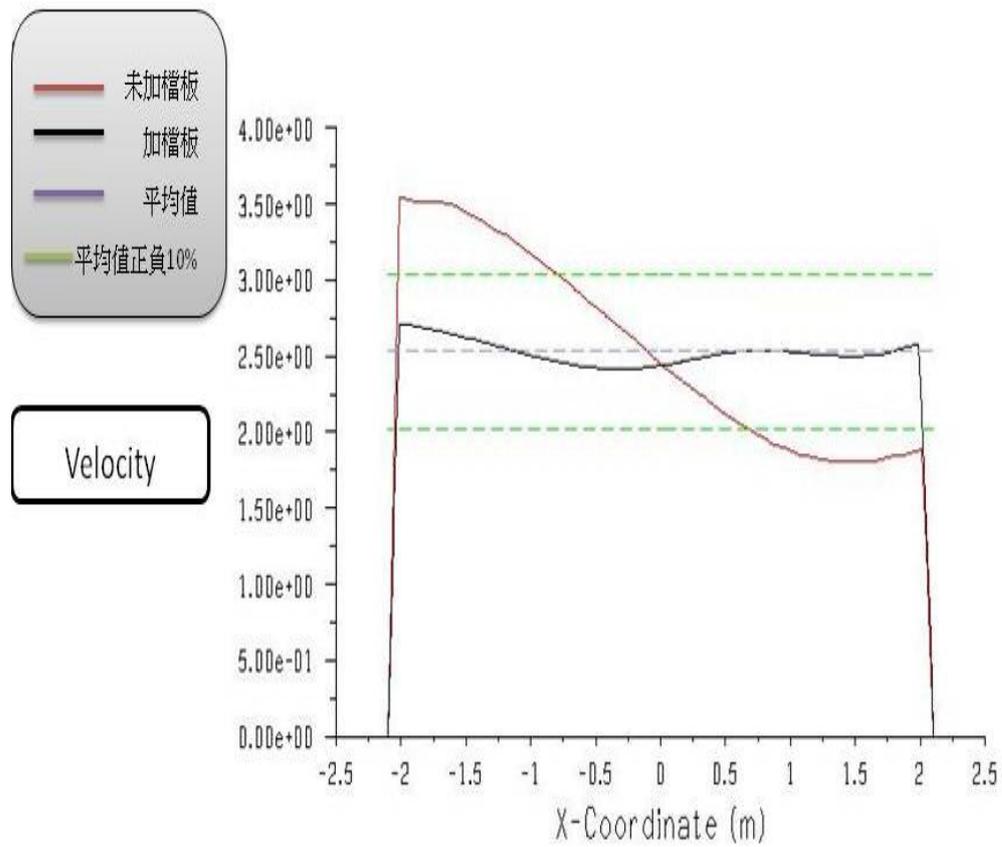


圖 4-9(c) 加入擋板後的洗滌塔在 E 線剖面之速度等高線圖

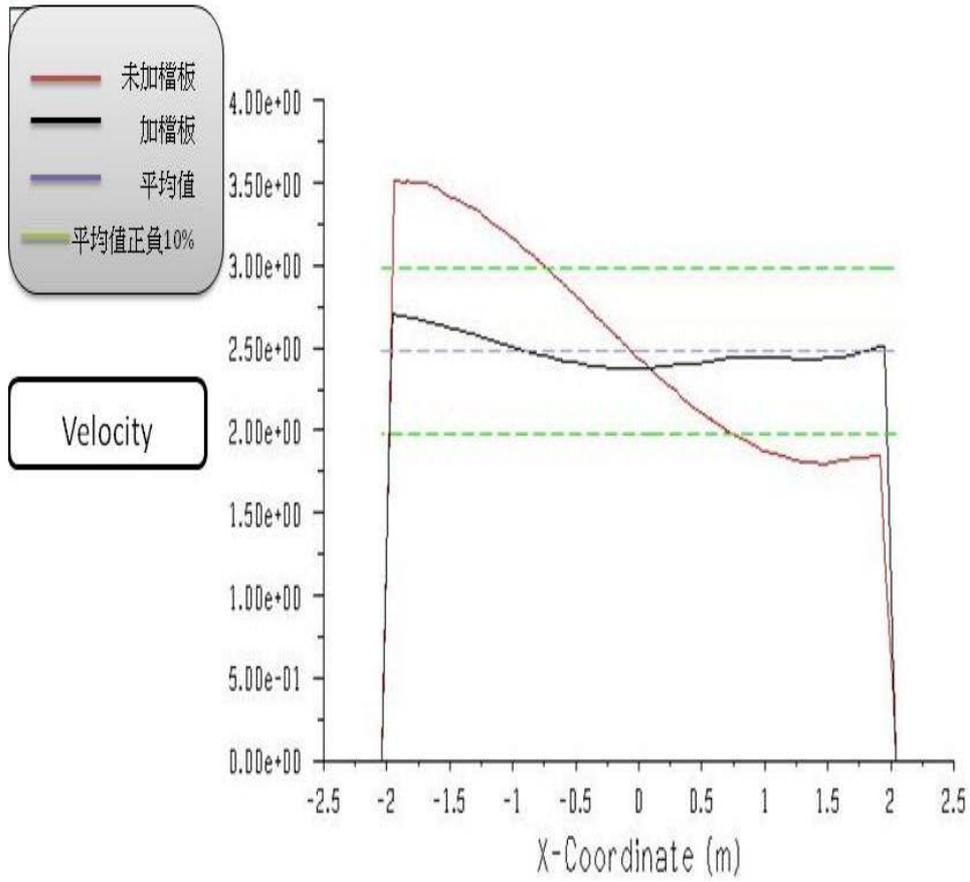


custom-function-1 vs. X-Coordinate

Oct 18, 2011
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)



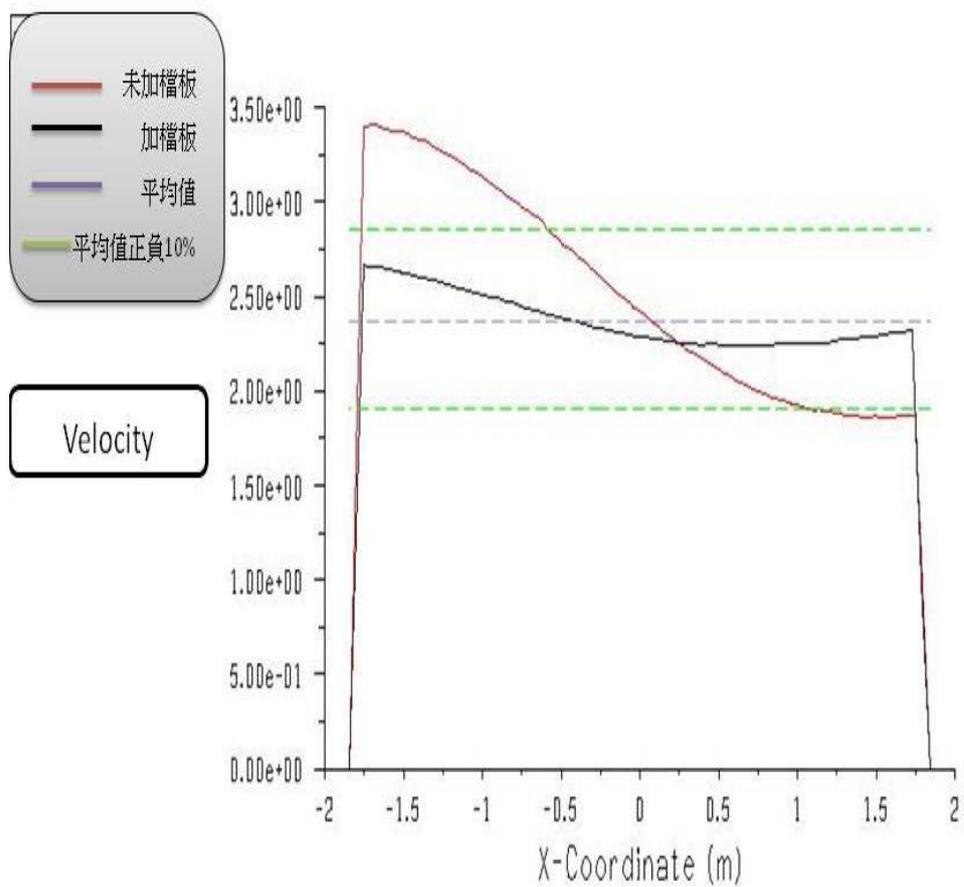
圖 4-10 B 線之速度分佈圖



custom-function-1 vs. X-Coordinate Oct 18, 2011
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)



圖 4-11 C 線之速度分佈圖

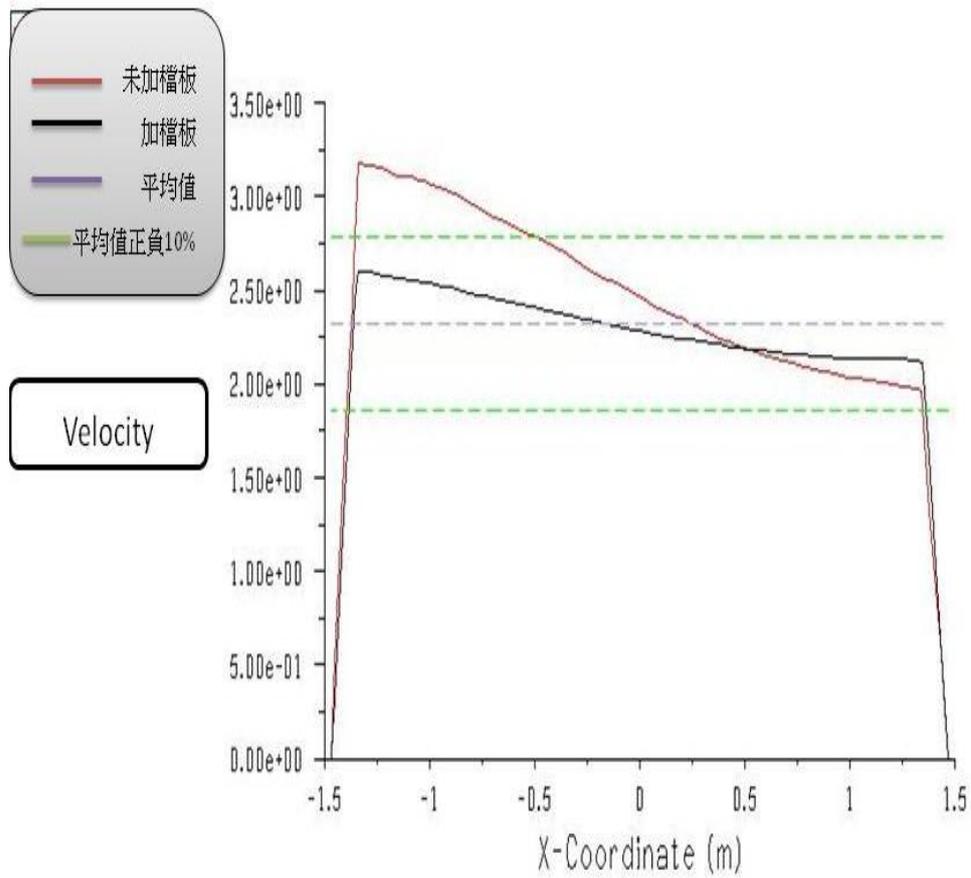


custom-function-1 vs. X-Coordinate

Oct 18, 2011
 FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)



圖 4-12 D 線之速度分佈圖



custom-function-1 vs. X-Coordinate Oct 18, 2011
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, rke)



圖 4-13 E 線之速度分佈圖

第二節 吸附性能分析

本研究建立吸附分析模式時，如圖 4-14 所示。首先我們將填充層高度 2.4m 分成 10 層，每層高度為 0.24m；而每層則由空氣進入方向再分為 10 塊面積，而此 10 塊上的面積、Z 方向與 X 方向平均速度則可分別計算出之後再帶入格點中。在計算每個格點進入之廢氣量的問題中，我們知道廢氣在塔內之滯留時間為 1 秒，所以在每個網格中我們接假設其行進時間為 0.1 秒，然後我們從之前的流場計算中可以提出流場平均速度資料，包刮 X 方向與 Z 方向之速度，考慮垂直與水平方向進出網格之廢氣量，利用式 4-1 我們可計算進入網格之總廢氣量。知道總量後即可以濃度效應之理論公式開始進行計算。

$$V(\text{體積}) = A(\text{截面積}) \times U(\text{速度}) \times t(\text{時間}) \quad \text{式(4-1)}$$

然而在每個格點之洗滌水總體積上，並沒有流場資料可以知道水之流速或是其在塔內之滯留時間，因此在估算水之體積上，我們採用三種模式並討論其正當性。圖 4-15(a)為填充物料充滿塔體之示意圖，一般在過濾時，是在充滿填充物料之塔內噴灑洗滌水，洗滌水沾附住每個填充物料後才持續往下流動；由於沾附在每個填充物料上可使得其與廢氣接觸之表面積增大，所以在估算可與廢氣進行交換之洗滌水總體積上，不能只單單以進口水量做估算；而是以水沾附住的填充物之體積為洗滌水之總體積。

但是以填充物總體積為洗滌水總體積時，尚還需討論幾個問題，即是現有水量中是否能夠在時間內流過其流動行進方向中之所有填充物料。若是不行，則我們以填充物總體積替代時，會發生估算體積過大之情況，進而導致所估算之去除效率過於良好；倘若可以時，也有可能發生其流過之水量大過填充物總體積，則此時我們必須探討是否該以填充物總體積為其最大總體積還是可直接將流過之水量視為洗滌水之總體積。

圖 4-15(b)所示為我們建立洗滌水總體積的模式，我們舉三個填充物為例，以相對速度之觀點來看，時間內廢氣能走過的距離如圖所示，此一距離即是廢氣能與水接觸之距離，我們假設這段距離中水都能與空氣有效接觸，且廢氣之流速與滯留時間皆為已知，因此我們可藉由式 4-2 來估算水量。

$$V(\text{洗滌水體積}) = A_s(\text{填充物表面積}) \times U(\text{廢氣速度}) \times t(\text{時間}) \quad \text{式(4-2)}$$

因此在估算洗滌水總體積之三種模式中，第一種模式即是以式 4-2 為計算方程式，但若是超過填充物總體積時，則以填充物之總體積替代；第二種模式則是不管是否超過填充物總體積都以式 4-2 為計算方程式；第三種模式我們則將水在塔內之流動速度假設為自由落體，以此速度代入式 4-2 中的廢氣速度項，由此來估算水量。總水量估算出來之後，即可用剩餘體積之理論公式繼續計算下去，最後則估算出廢氣與洗滌水之處理效率。而廢氣與洗滌水之處理效率定義則如同前述式 3-20 與式 3-21。

結果顯示，不管是否超過填充物體積都以式 4-2 為估算總水量方程式的此種模式下，圖 4-16 為尚未加入擋板與加入擋板改善後空氣效率的比較圖，圖 4-16(a) 為尚未加入擋板時，圖 4-16(b) 則為已加入擋板後。可看出兩者效率相差不大，且在第十步後即達到收斂，前者收斂在 95.57%，而後者則是在 95.71%，加入擋板後之效率乍看下並無明顯優略，此乃是因為以式 4-2 估算水量時，水量大過原填充物總體積的 8-10 倍，水量相較於廢氣來說相當大，因此廢氣在每個網格中所提供的量都被完全的清洗掉，不論加擋板與否皆是，且可以很快達到平衡；另外由於水量相對廢氣來說相當大，因此在圖 4-17 中可看出水被污染物所吸附的比例就顯得非常小，不論在與加擋板或未加擋板時都是如此，未加擋板時之用水約為 12.26%，加擋板後則約為 12.58%。

而在以水為自由落體為假設時的模式下，則可由圖 4-18 中看出其廢氣之處理效率比較前種模式來說並無差異，然而在圖 4-19 中水的效率上則可看出都較前者模式來的小。這是因為水的速度以自由落體估算時，其速度較前種模式下之空氣速度大將近 2-3 倍，因此在水用掉的比例上就會稍稍降低；但是對空氣而言，由於洗滌水的體積已經過大到一個極致，並不會影響吸附到廢氣的水量，使得每次廢氣提供的量都能輕易的清洗掉，因此在廢氣的處理效率上就會跟前者模式相同。但在上述兩種模式下，我們可看出估算出的水總量都相當大，以至於在過濾的機制上，每次水提供吸附的量總是遠遠大於廢氣所提供要被吸附的量，導致空氣效率在未加檔板與加入檔版兩種情況下，顯的完全無差異，且水的用量比例也非常小，似乎並無法代表最合理的模式。

在前兩種模式下，我們能知道水量估算遠大於填充物的總體積，因此第三種模式中，水若能包覆住填充物料，我們即以填充物的體積來替代水的體積，且最大的總體積視為是填充物的總體積。然而在此種模式下，我們會發現其原本剩餘體積之理論公式(式 2-3)中，其係數 k_1 、 k_2 之影響就相當的劇烈了。如圖 4-20 所示，當 $k_2 = -1$ 時，會發現曲線較平坦，而當 $k_2 = -5$ 時， Q_r 值所落的區間就比較大；而此兩條曲線所代表之物理意義為當越平坦之時，其 Q_r 值並不太會受到 V_r 值大小的影響，皆能提供一定的比例當做水之吸附體積；然而當曲線如同 $k_2 = -5$ 時，我們可看到當 V_r 值超過 0.6 後，其所能提供的 Q_r 值趨近於 0，也就是說，當洗滌物本身吸附到越多物質時，其所能提供下次被吸附的量可說是微乎其微，這在當洗滌物是活性碳時是合理的，但是在洗滌物是水時，就無法顯現出水的特性。因此我們比較當係數是-1 和-5 時廢氣處理效率上的差異，並與廠商所提供之實驗測得的數據做一對照。

圖 4-21 和圖 4-22 是當 $k_2 = -5$ 時所得之廢氣與水之去除效率隨時間的變化圖。4-21(a)為未加檔板前，4-21(b)則為加入檔板後，由圖中可看出未加檔板時達到穩定狀態後的廢氣過濾效率約為 68.75%，而加入檔板後約為 69.67%，水的用量則為 69.25%和 69.53%。與廠商所提供之 90%的廢氣處理效率有相當大的落差，這是由於採用這條曲線時，當水所吸附物質比例越來越大，水所能提供下次吸附的比例衰減的程度會非常快，甚至在一半過後就趨近於零，這在濕式洗滌塔中就會看到一種情況，就是在下層洗滌水是以最髒的狀態遇到剛進到塔內也是最髒狀態的廢氣，但所提供的比例非常小，因此就無法對廢氣做有效的去除，而這樣的情況則會一點一點的累積，慢慢的往上層影響，最後就會反應在整體的去除效率上。

而當我們將係數做一改變，使 $k_2 = -1$ 時，即便 V_r 值趨近於 1，也就是水中吸附的比例趨近於 100%時，還是能提供剩餘乾淨水一定比例的量給污染物吸附，此也較為符合水的特性。我們可從圖 4-23(a)看到未加檔板時廢氣去除效率最後收斂在 89.46%，相當符合廠商所提供之 90%數據；在加入檔板改善流場過後則如圖 4-23(b)所示，去除效率穩定在 92.07%，有著約莫 3%的效率提升。另外在洗滌水的效率計算上，我們也可發現其效率與廢氣處理效率大約相同，未加檔板改善時為 89.59%，加檔板改善後則為 91.54%，如圖 4-24；這是因為我們採用填充物的總體積做為水的總體積，而在如此狀況下，洗滌水的總體積與廢氣的總體積在同一網格內相差不大的關係。各個模式所計算出之廢氣與水的處理效率整理於表 4-1。

表 4-1 各個模式的廢氣與水之處理效率整理比較表

	廢氣處理效率	洗滌水處理效率
廢氣速度為相對速度 未加檔板	95.57%	12.27%
廢氣速度為相對速度 加檔板	95.71%	12.58%
水為自由落體速度 未加檔板	95.57%	8.20%
水為自由落體速度 加檔板	95.71%	8.36%
填充物體積為最大水體積 未加檔板 $k_2 = -5$	68.75%	69.25%
填充物體積為最大水體積 加檔板 $k_2 = -5$	69.67%	69.53%
填充物體積為最大水體積 未加檔板 $k_2 = -1$	89.46%	89.59%
填充物體積為最大水體積 加檔板 $k_2 = -1$	92.07%	91.54%

為了能了解孔洞板的有無對廢氣處理效率的影響，我們取幾個時階下廢氣剩餘濃度在整個塔體的分佈狀況來看，模式則是採用以填充物體積替代洗滌水最大體積且係數 $k_2 = -1$ 的狀況下來討論。圖 4-25 為一開始廢氣進入塔體 0.1 秒時，有無加檔板雖然並無太大差異，但已稍微可看出未加檔板者其左方濃度較右方來的大，而有加檔板者則較為均勻的往上；圖 4-26 則為 0.5 秒後之分佈狀況，兩者之差異就開始變得較為顯而易見了，而在圖 4-27 中可看見 1 秒過後，一開始進入塔體的廢氣都已從出口排出，而由於一開始我們即先讓塔體充滿洗滌水，也就是說一開始進口的廢氣每次都接受相當乾淨的洗滌水過濾，因此兩者在一開始出口之廢氣處理上都能相當有效的去除，但入口到塔體中段的地方，濃度也已經開始有所變化，此一變化在接下來的時間裡就會開始影響廢氣處理的效率。在未加檔板的狀態下，由於左方的流速較大，能帶來的廢氣量也較右方來的大，在幾次過濾後，剩餘的濃度就會持續的累積下來，因此我們可從圖 4-28 中看出 2 秒後，在出口廢氣濃度上的差異，有加檔板者是相當均勻的情況，而未加檔板者在左方出口的濃度已經比右方大許多了。圖 4-29 則是兩者效率都已經接近穩態的情況下，未加檔板只有在右方小邊緣處才能有效的將廢氣去除，然而有加檔板者則是顯得較為均勻；也因此計算整體的效率上，有加檔板的洗滌塔比起沒加檔板者有著大約 3% 的過濾效率改善。

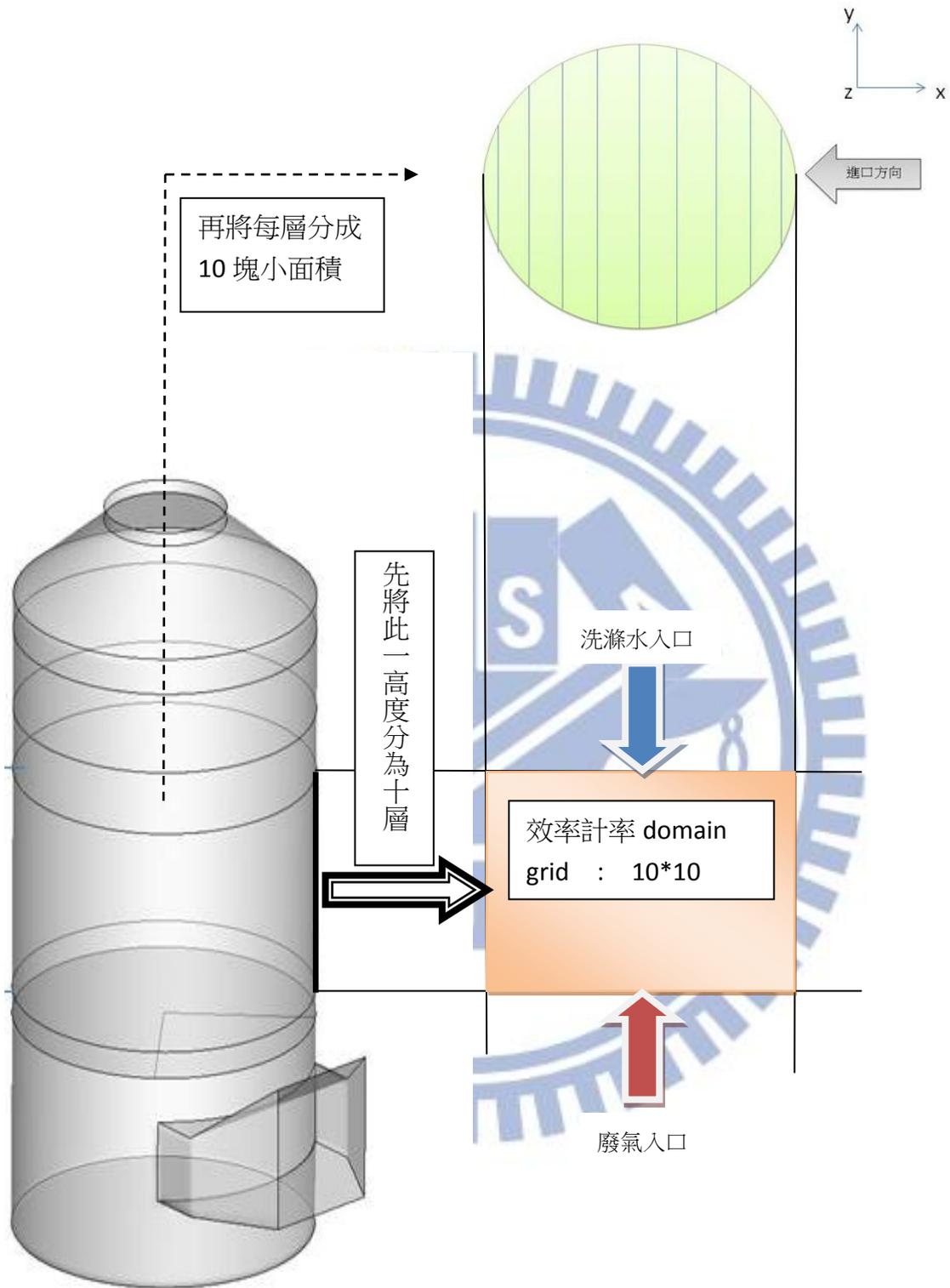
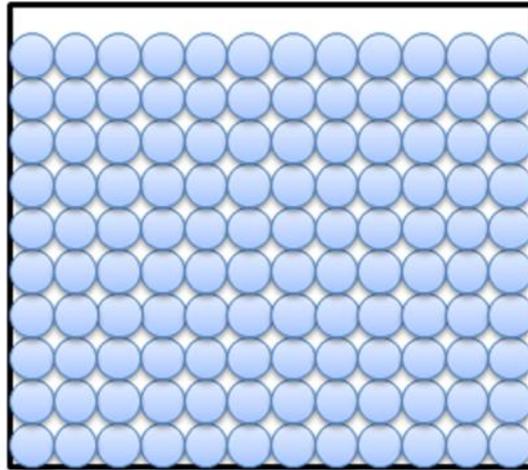
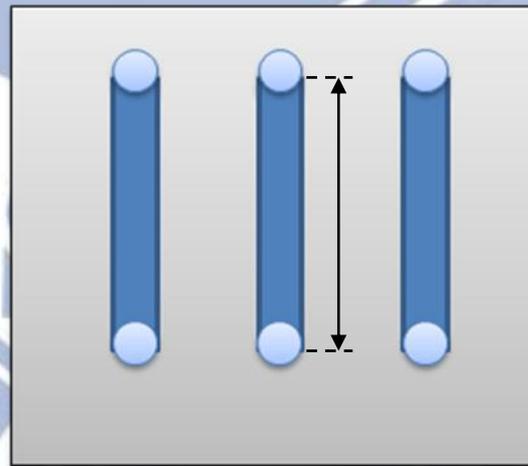


圖 4-14 計算模型示意圖

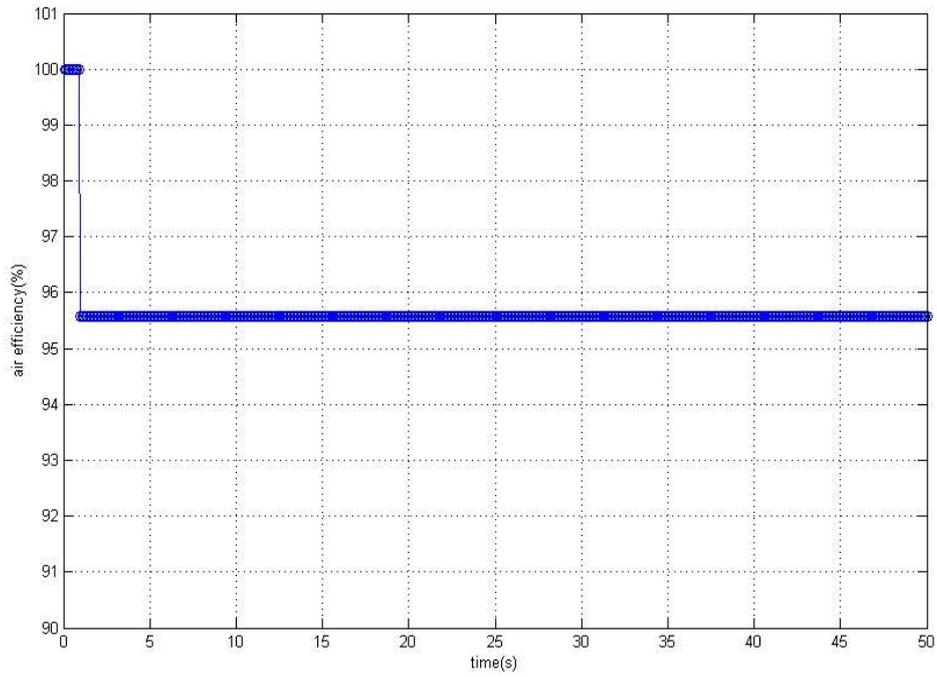


(a) 洗滌塔內填充物之示意圖

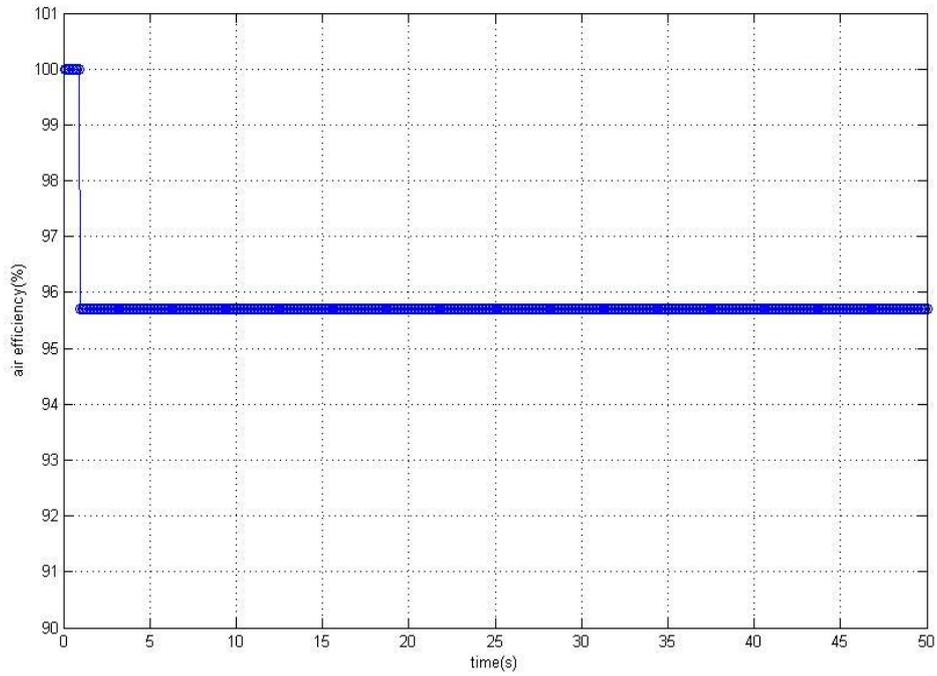


(b) 建立洗滌水總體積模式示意圖

圖 4-15

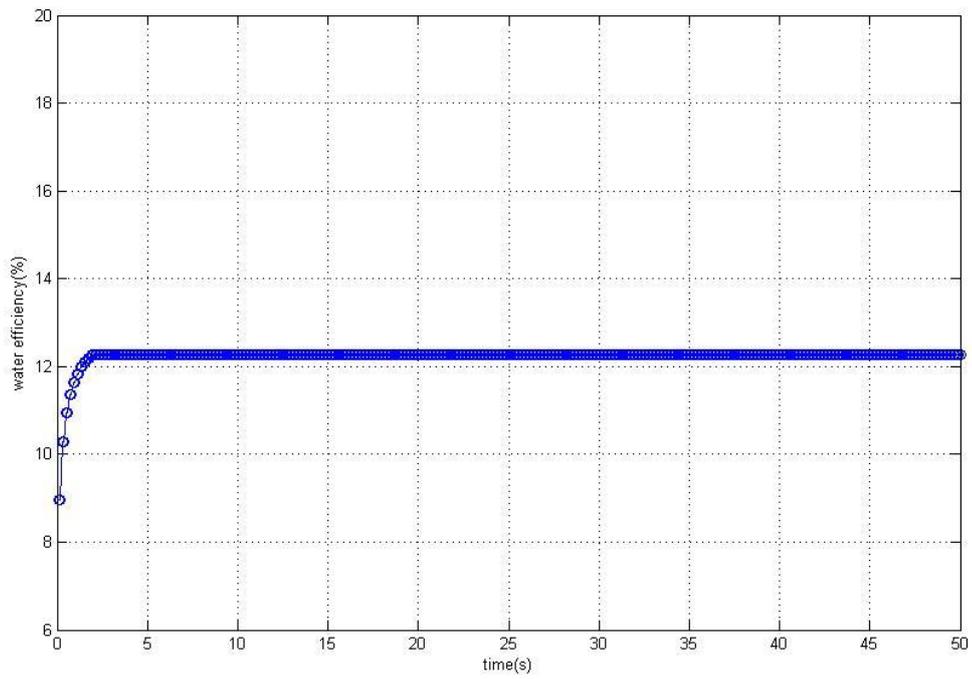


(a) 未加檔板

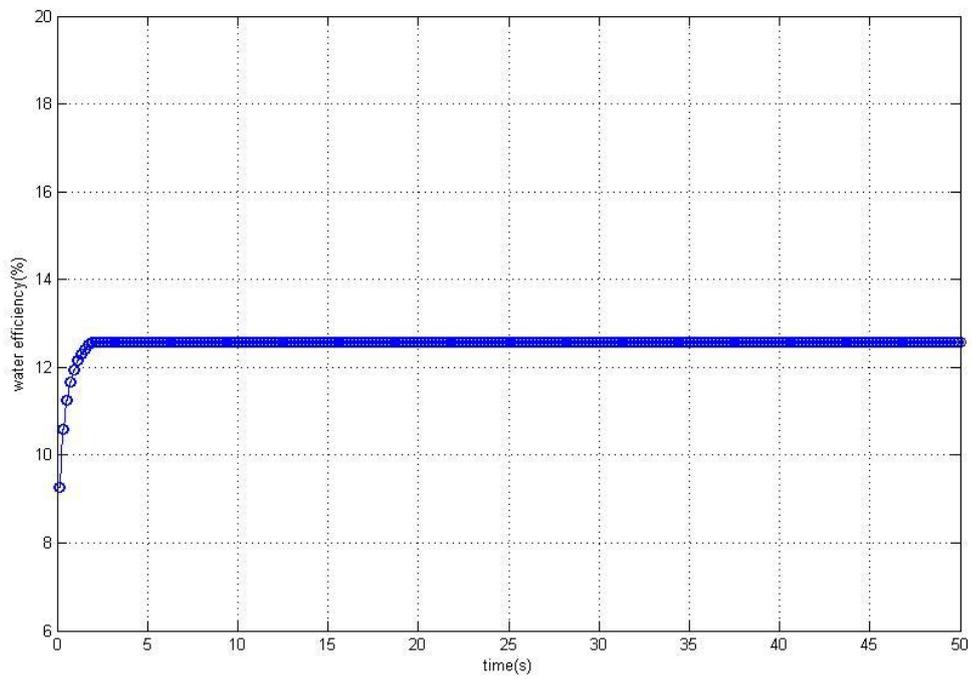


(b) 加檔板

圖 4-16 廢氣處理效率與時間關係圖(廢氣速度模式)

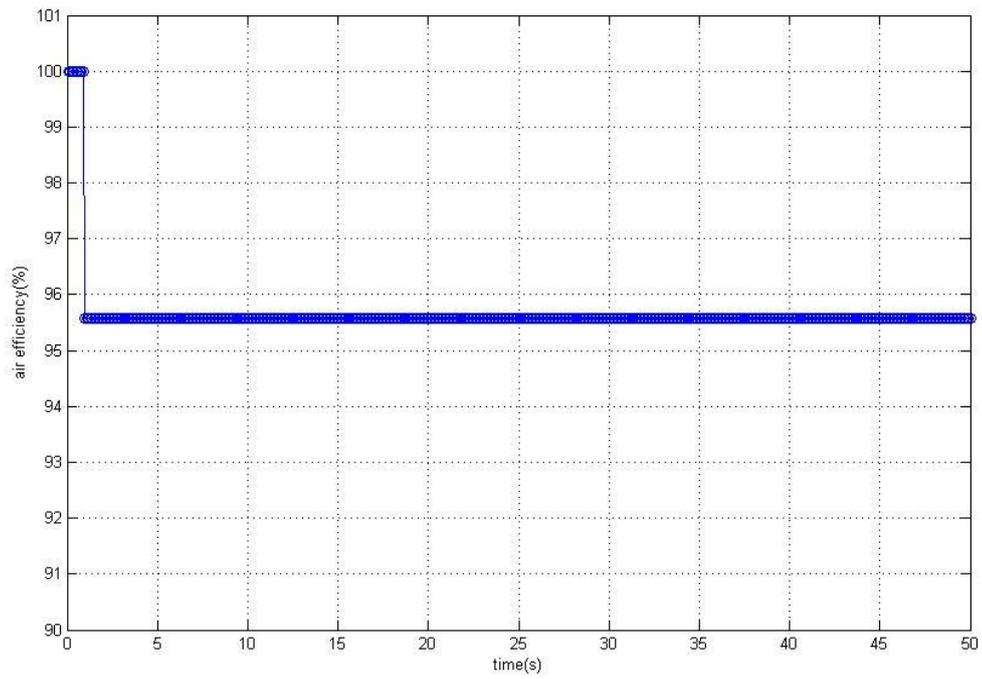


(a) 未加檔板

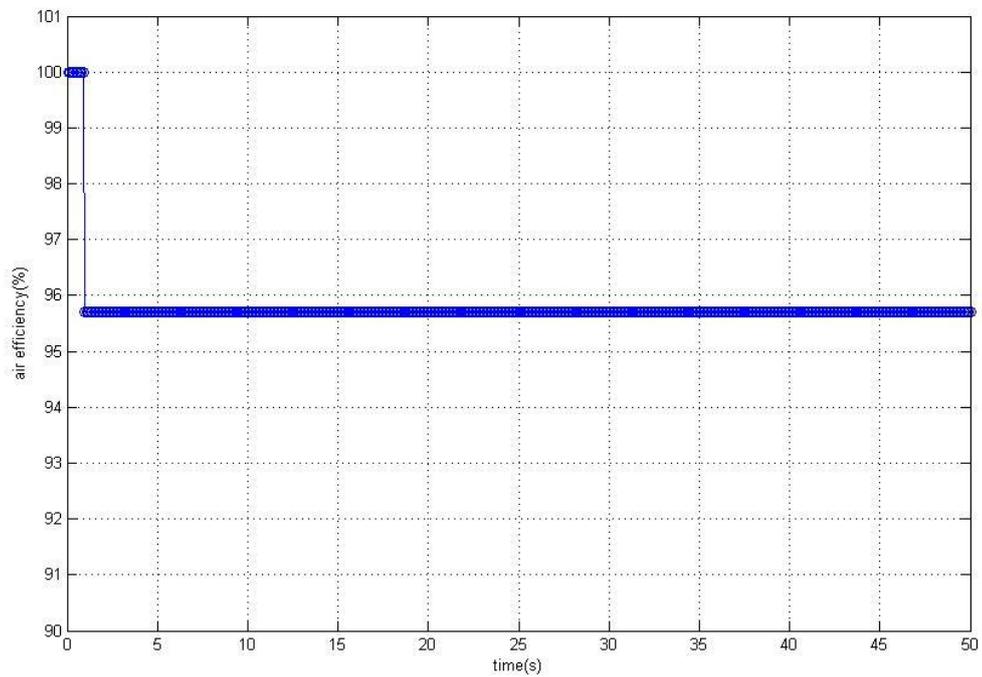


(b) 加檔板

圖 4-17 水處理效率與時間關係圖(廢氣速度模式)

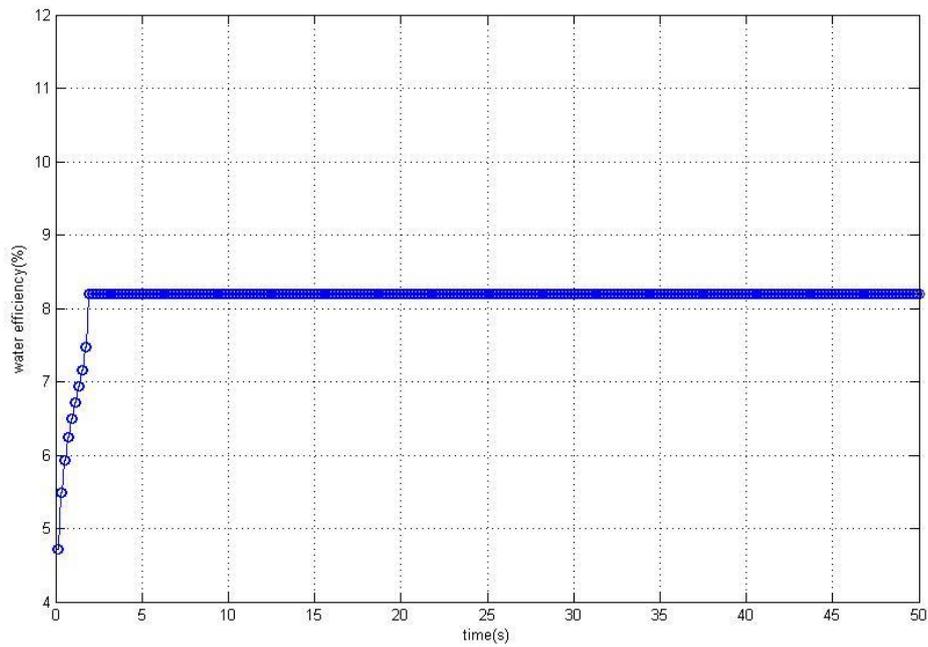


(a) 未加檔板

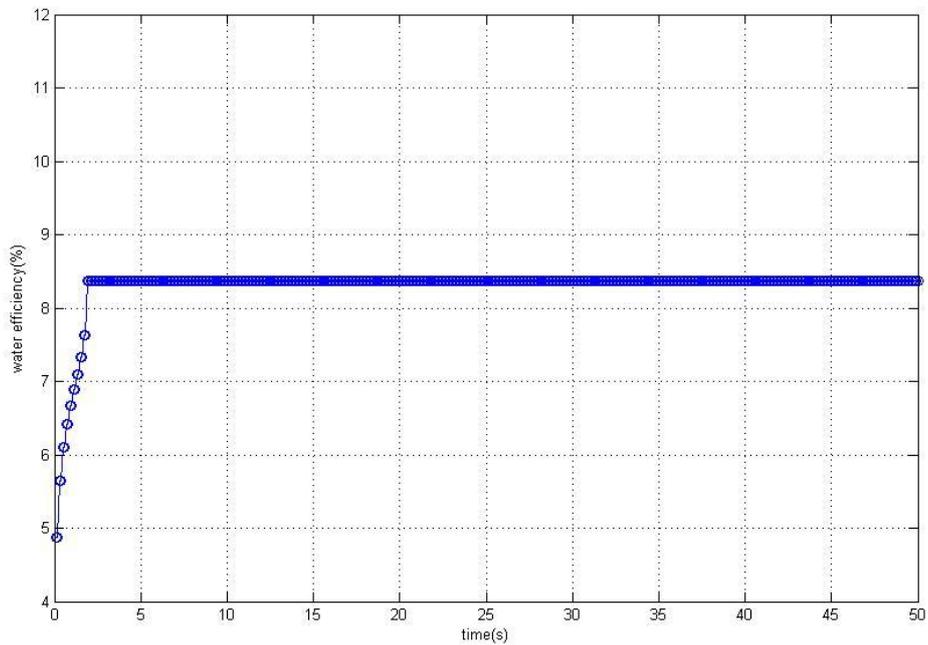


(b) 加檔板

圖 4-18 廢氣處理效率與時間關係圖(水流自由落體速度模式)



(a) 未加檔板



(b) 加檔板

圖 4-19 水處理效率與時間關係圖(水流自由落體速度模式)

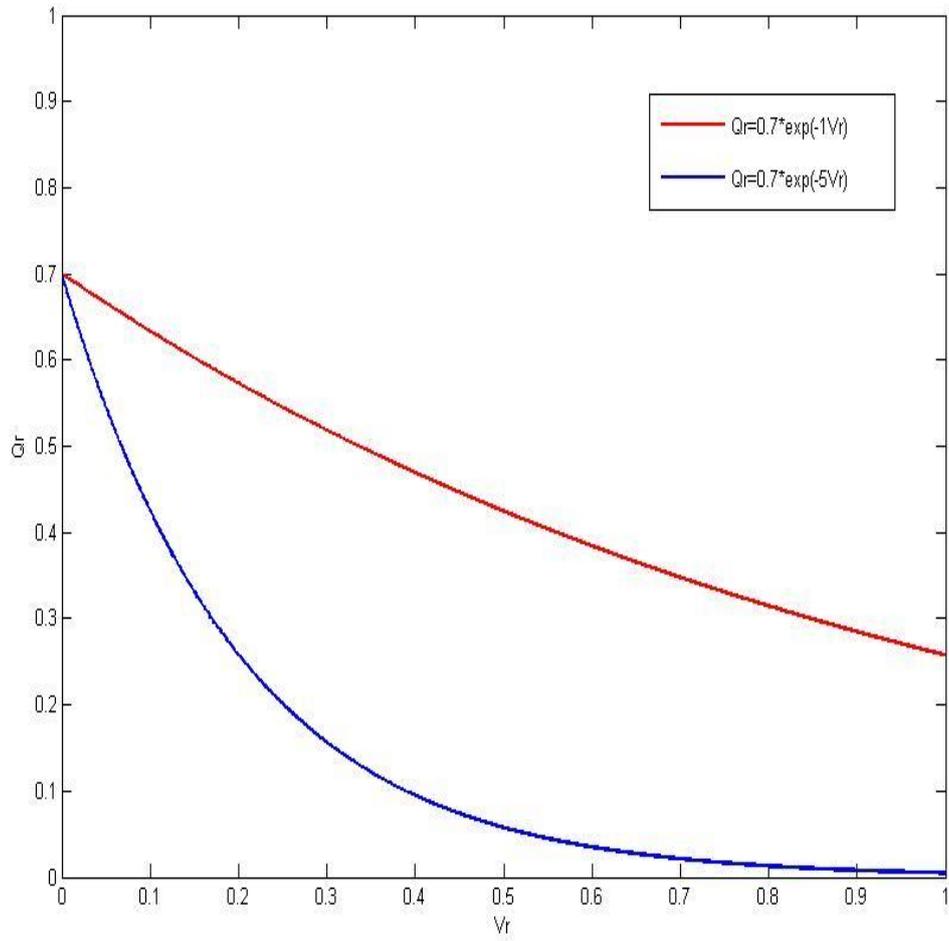
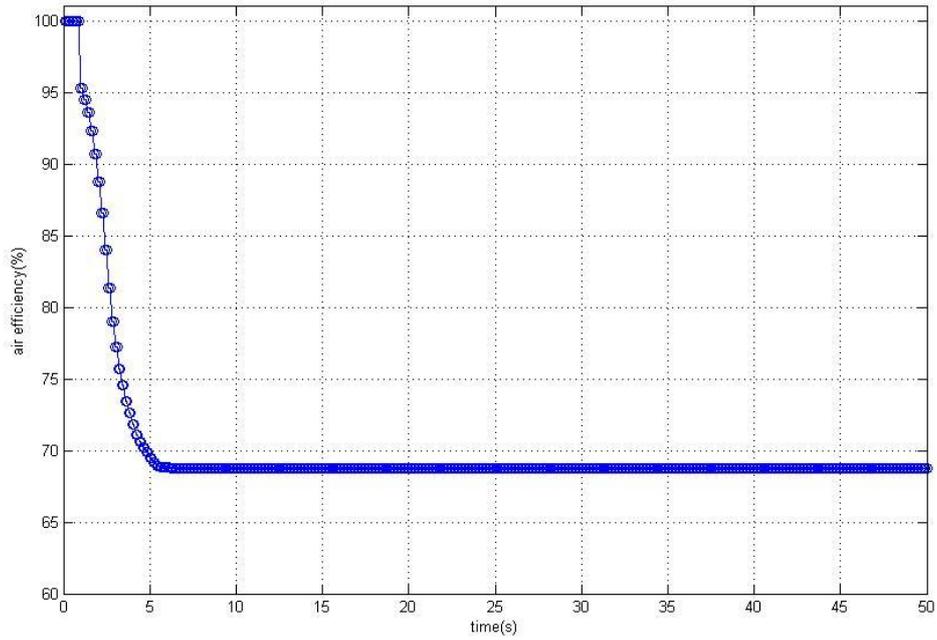
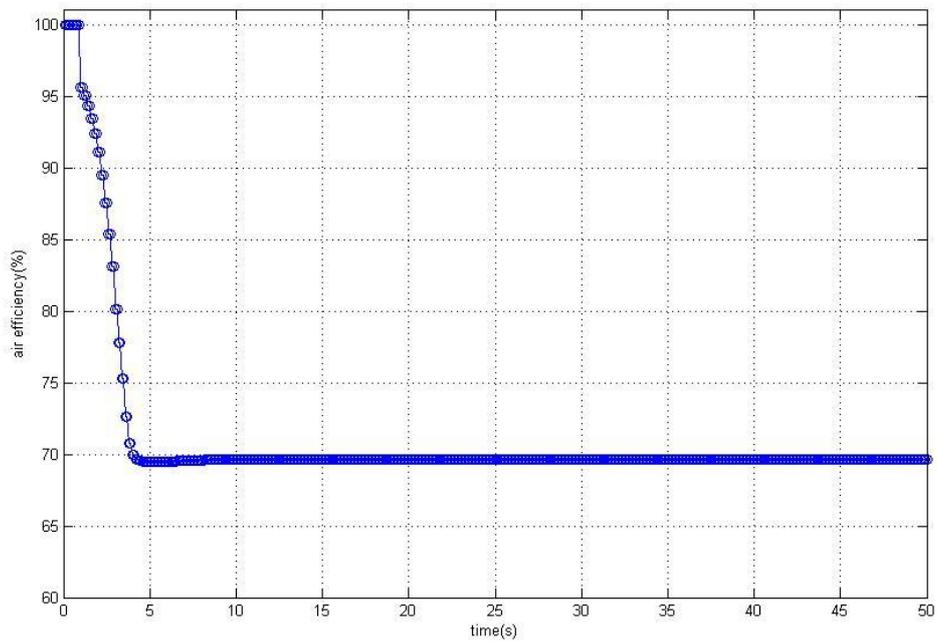


圖 4-20 剩餘容積比之理論公式圖

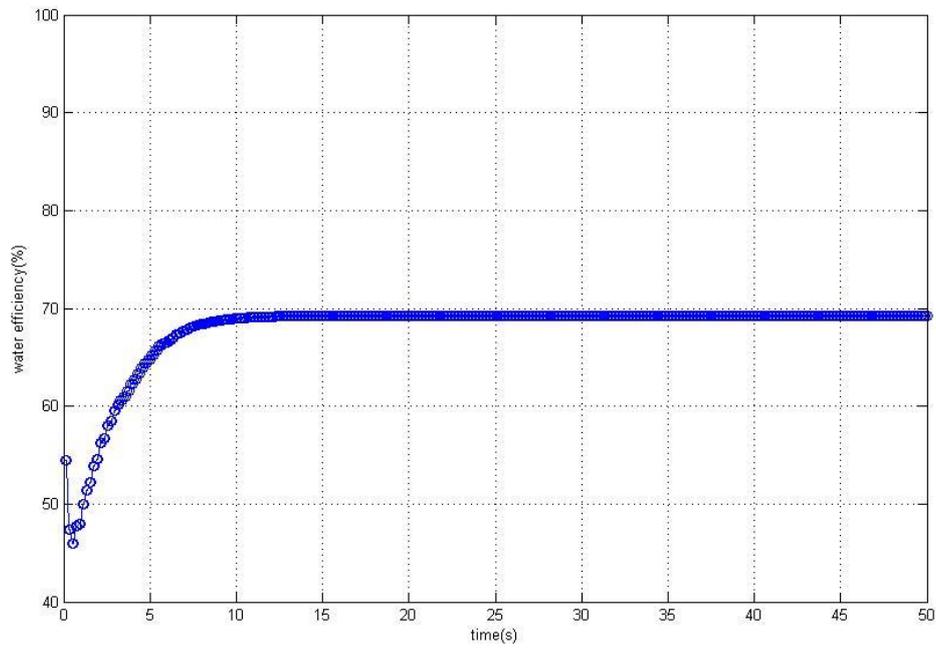


(a) 未加檔板

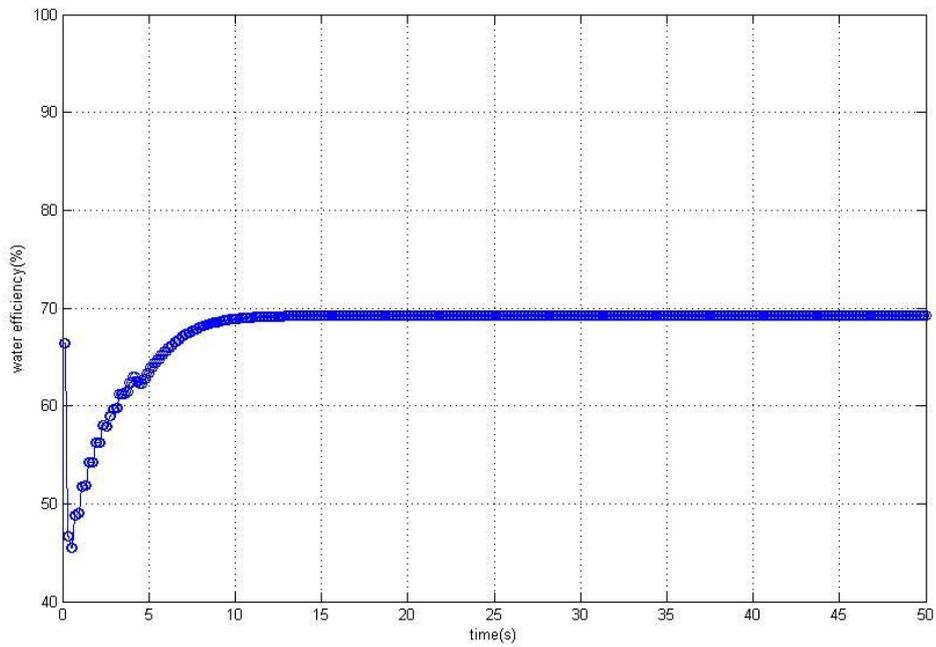


(b) 加檔板

圖 4-21 廢氣處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-5)

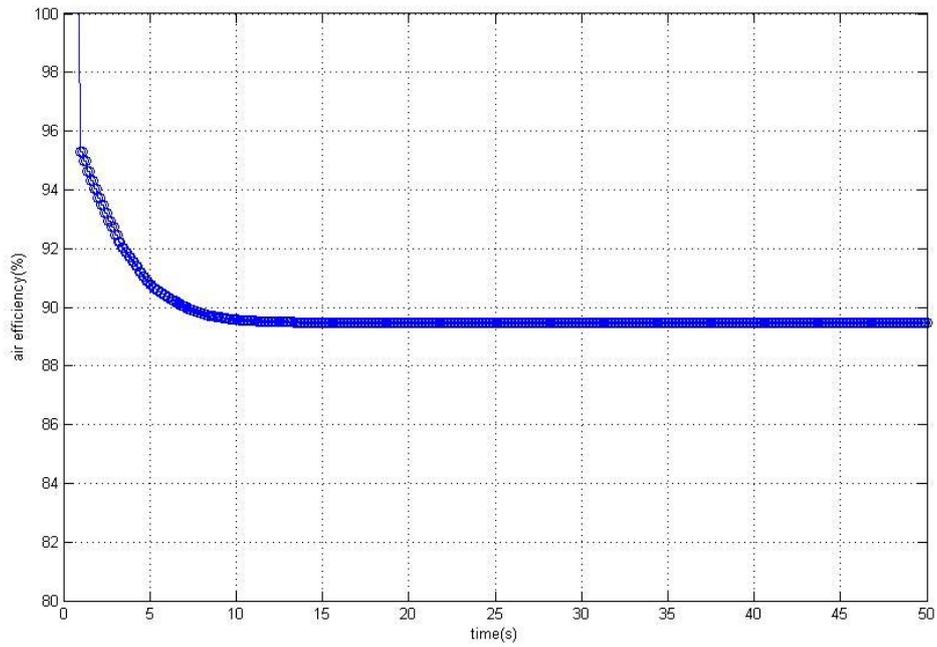


(a) 未加檔板

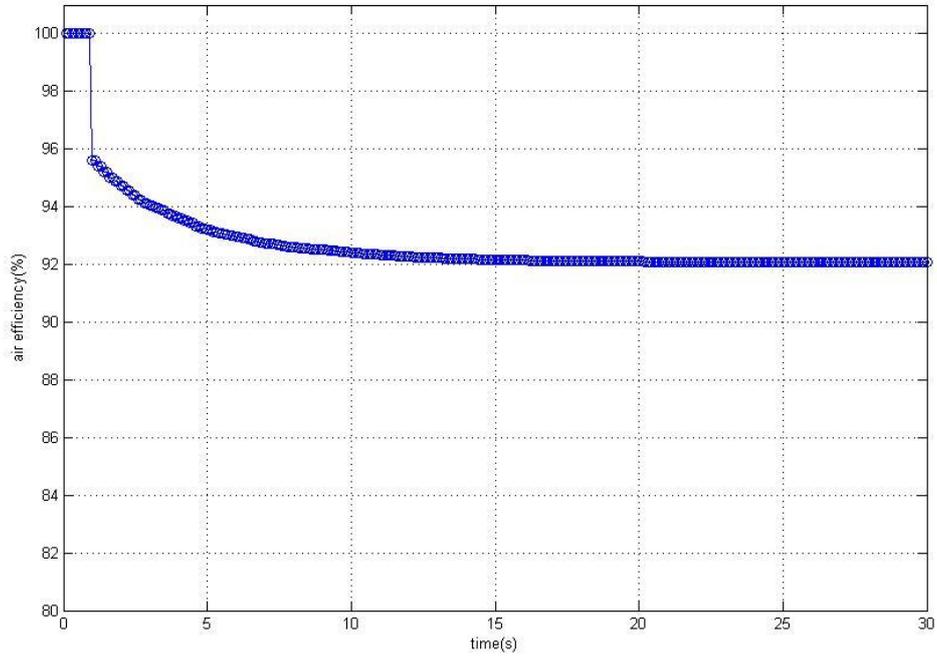


(b) 加檔板

圖 4-22 水處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-5)

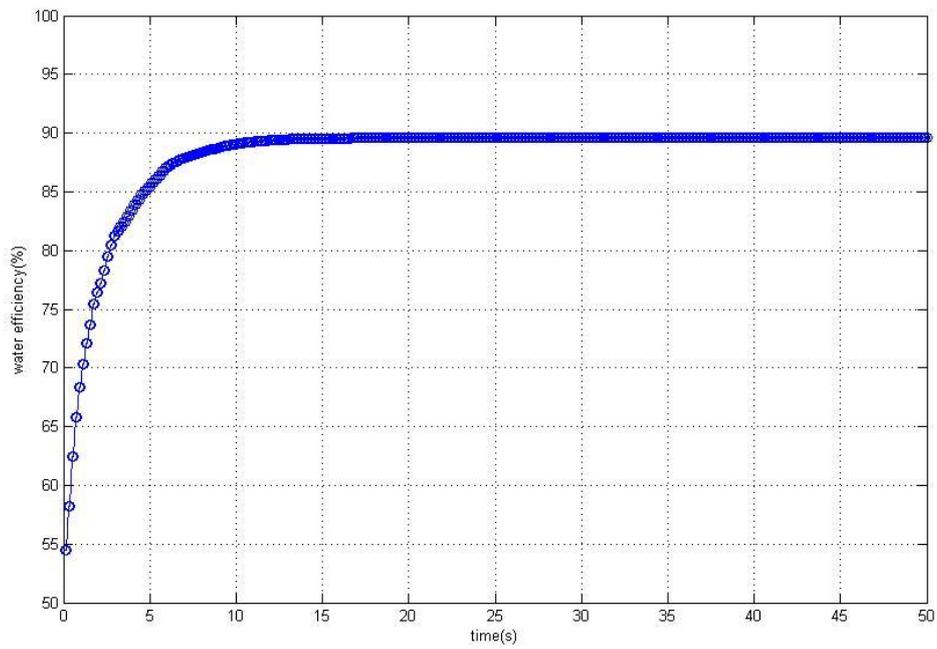


(a) 未加檔板

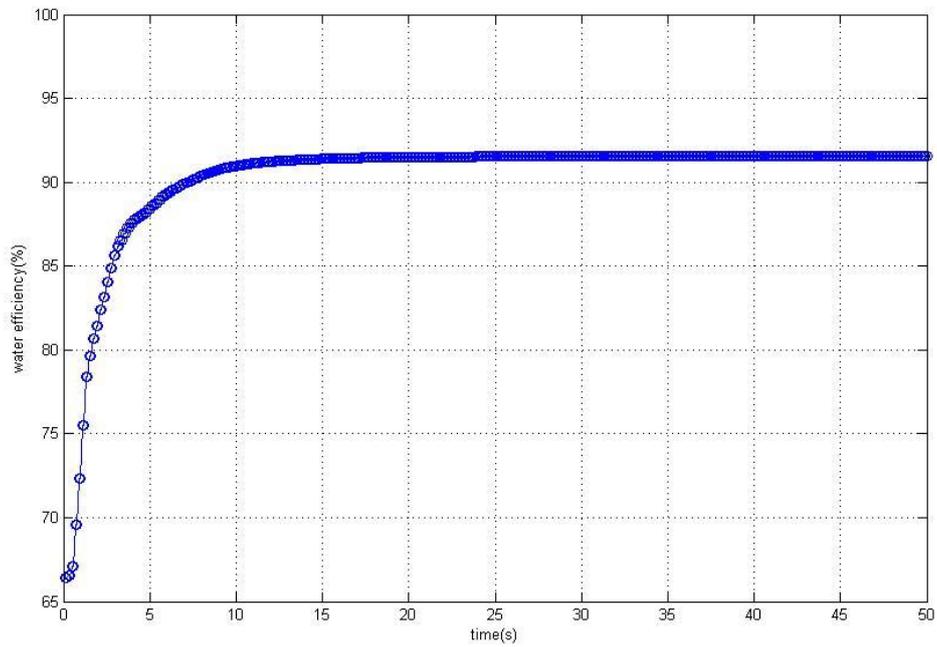


(b) 加檔板

圖 4-23 廢氣處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-1)

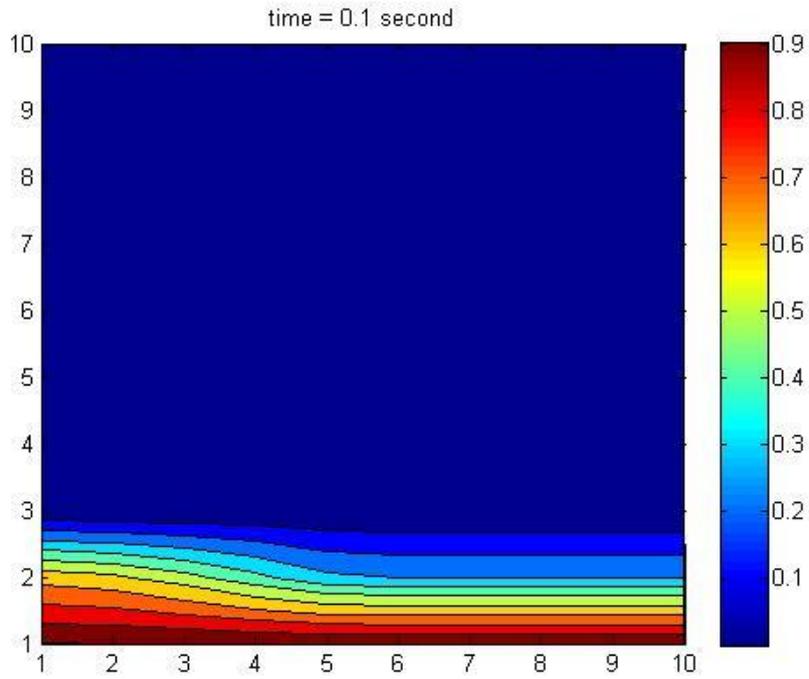


(a) 未加檔板

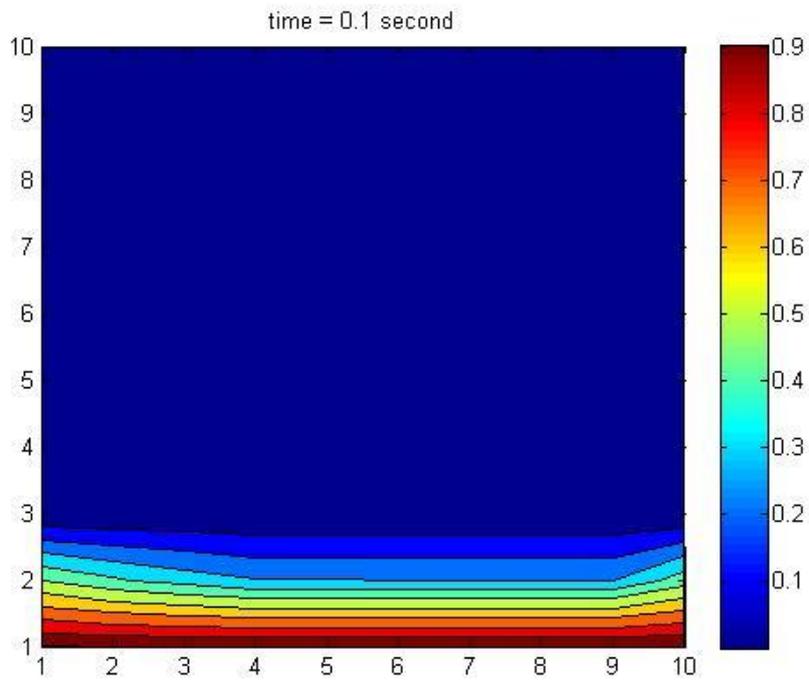


(b) 加檔板

圖 4-24 水處理效率與時間關係圖(填充物體積模式，係數-1)

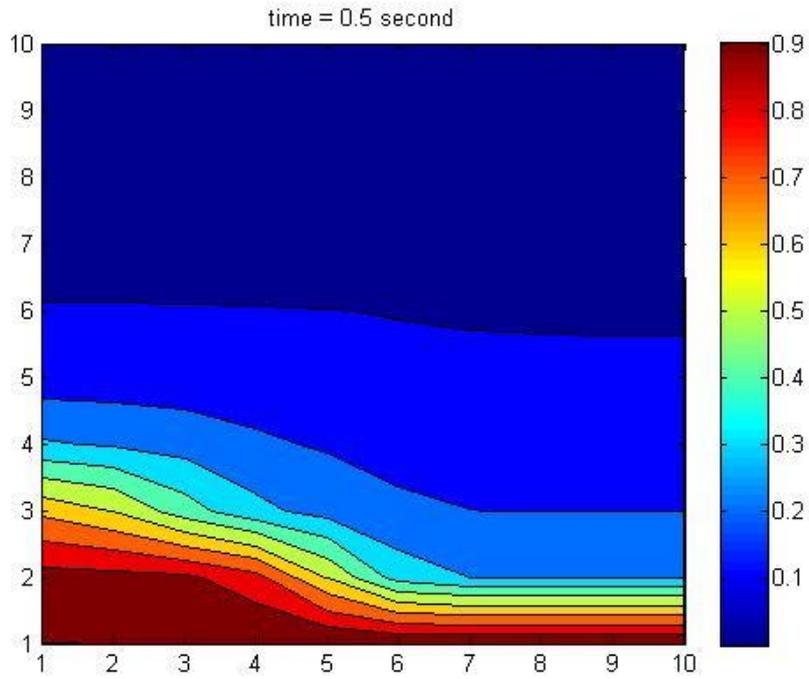


(a) 未加檔板

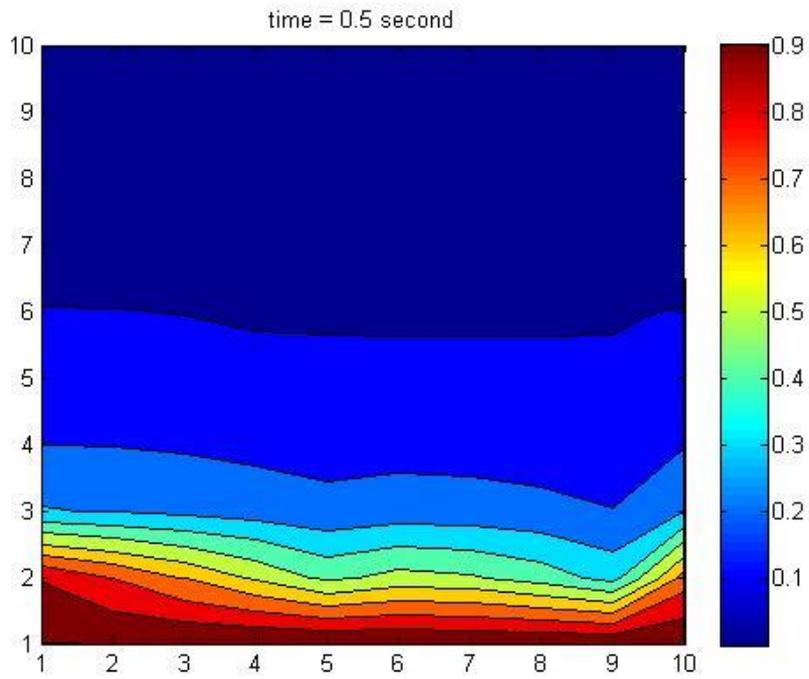


(b) 加檔板

圖 4-25 時間 0.1 秒時塔內剩餘濃度分佈圖

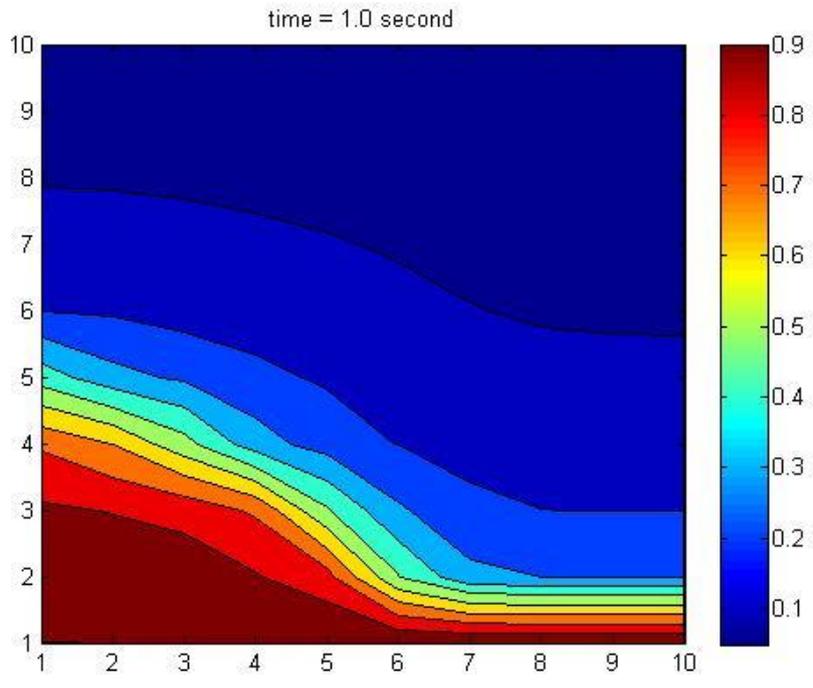


(a) 未加檔板

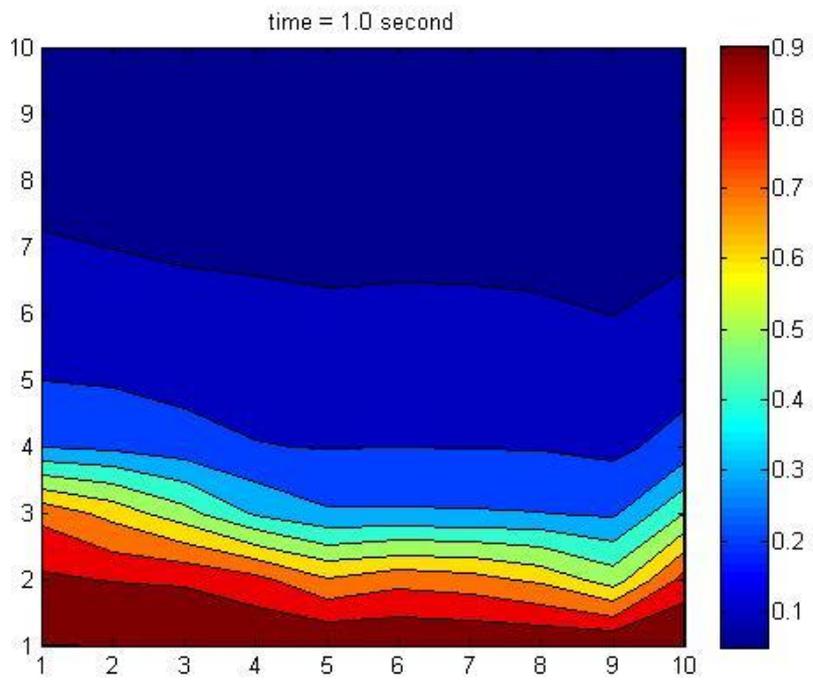


(b) 加檔板

圖 4-26 時間 0.5 秒時塔內剩餘濃度分佈圖

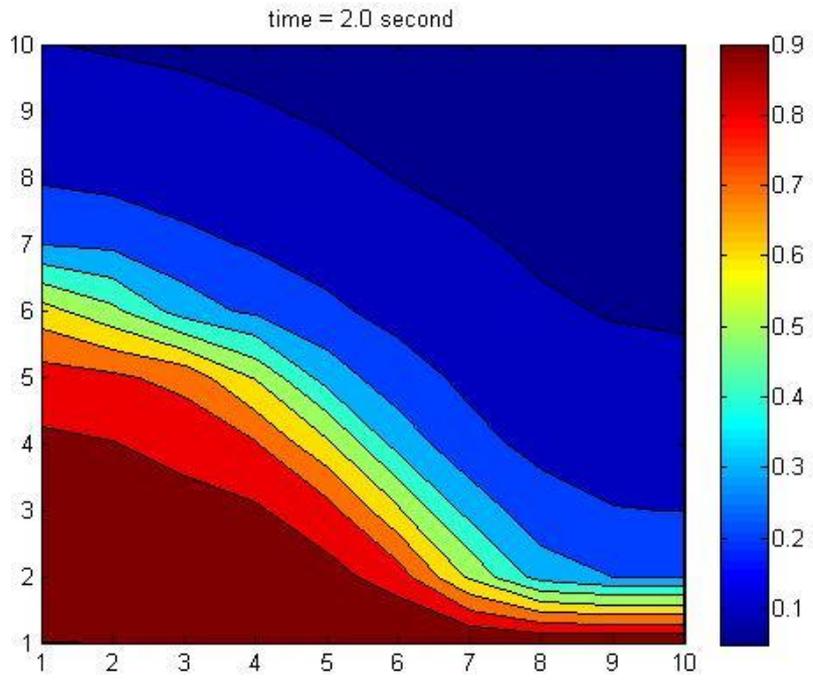


(a) 未加檔板

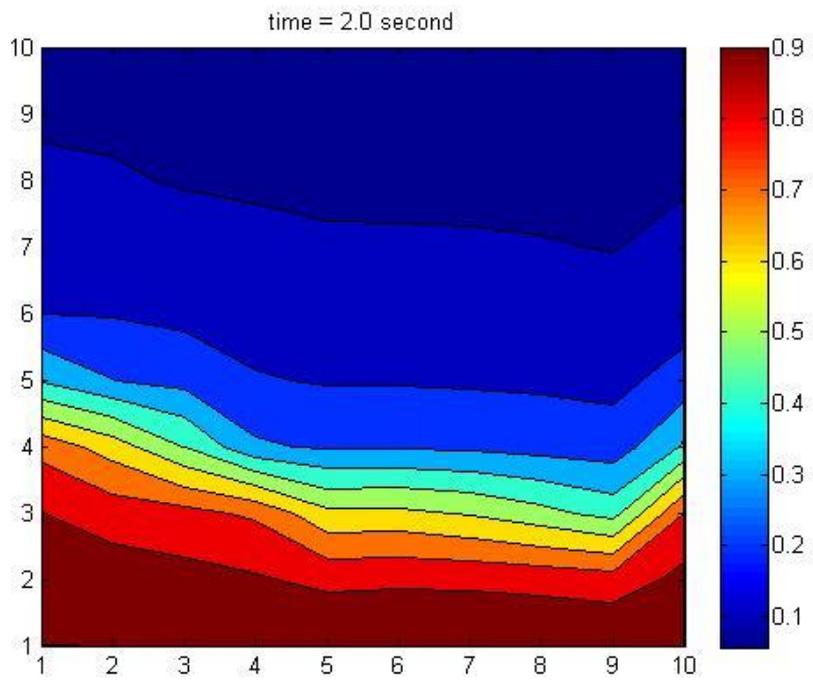


(b) 加檔板

圖 4-27 時間 1.0 秒時塔內剩餘濃度分佈圖

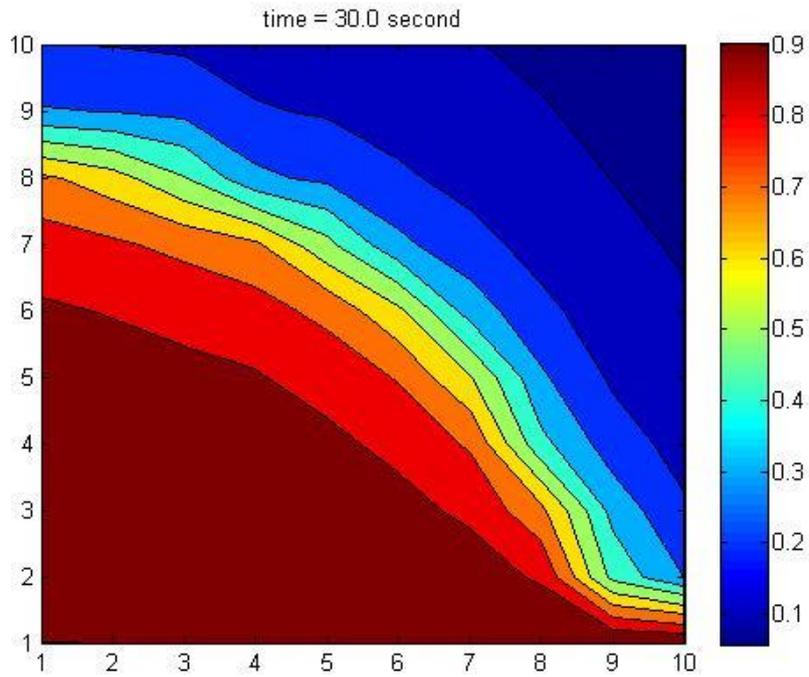


(a) 未加檔板

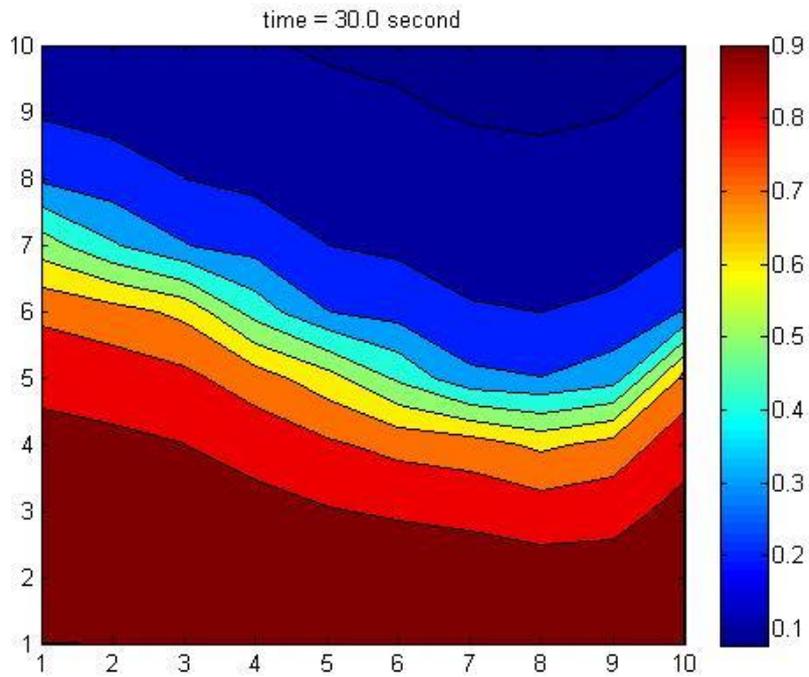


(b) 加檔板

圖 4-28 時間 2.0 秒時塔內剩餘濃度分佈圖



(a) 未加檔板



(b) 加檔板

圖 4-29 時間 30.0 秒時塔內剩餘濃度分佈圖

第五章 結論

經過對填充式濕式洗滌塔的流程分析及效率研究後，我們可以得到以下結論：

1. 有加孔洞檔板的洗滌塔比原始洗滌塔有較好的流場均勻化狀況。
2. 有加孔洞檔板的洗滌塔壓力差比起原始洗滌塔大約有 11% 的成長。
3. 在分析廢氣與洗滌水的過濾效率上，我們認為採用填充物體積為最大洗滌水體積比起其他模式較為合理。
4. 剩餘體積的理論公式中，雖然係數的採用並無實驗值可以搭配，然而我們相信各個係數應能代表不同的物質特性，在本研究中， $k_2 = -1$ 應該較能代表水的特性。
5. 廢氣流場的均勻化狀況，會影響塔中廢氣剩餘的濃度，剩餘的濃度逐漸的累積無法去除之後就會影響出口各個地方的廢氣濃度，因此就會影響整體的過濾效率。
6. 廢氣的過濾效率中，有加檔板改善者較原始洗滌塔有大約 3% 的改善。

參考文獻

1. 李世偉 “旋風式集塵器內粒子飛行軌跡之研究” 交通大學 機械工程研究所 碩士論文 1996
2. “廢氣濕式處理”，1995，工業污染防治手冊，經濟部工業局 P1~8.
3. “半導體製造業污染防治技術”，1995，ISBN957-00-5392-5，經濟部工業局 P69-70
4. 呂世傑 “文式洗滌器之性能分析” 交通大學 機械工程研究所 碩士論文 2001
5. Cooper, C. D. ;Alley, F. C. Air pollution Control:A Design Approach, second Ed., Chapter13, Waveland
6. 黃俊超”高科技產業無機酸鹼廢氣組成與填充式濕式洗滌塔控制效率之研究” 國立交通大學環境工程研究所碩士論文，2003。
7. “濕式洗滌塔之硫酸液滴處理效率提升研究”，2007，工業污染防治手冊第101期，P49~64
8. 鄭淵源 “濾材吸附有害氣體過程之數值計算” 交通大學 機械工程研究所 碩士論文 2000
9. A Buonicore & L.Theodore. “Air Pollution Control Equipment” , Springer-Verlag ,1994
- 10.S. Cavert et al. “Wet Scrubber System Study : Vol I , Scrubber Handbook “, PB 213-016, 1972
- 11.Rajamami Rajagopalan, Chi Tien, “Trajectory Analysis of Deep-Bed Filtration with the Sphere-in-cell Porous Media Model” , AIChE Journal, Vol. 22, pp. 523-533, 1976
12. 陳石法 ” 矩形空間中移動物體之動態流場與熱傳導特性研究” 交通大學 機械工程研究所 博士論文 2001

13. 葉威廷 “噴霧氣流對毒性氣體消滅之理論分析” 交通大學 機械工程研究所
碩士論文 2002
14. Warren L. McCabe and Julian Smith “Unit Operation of Chemical
Engineering” 4th Edition McGraw-Hill Book Co. 1985
15. H. Darcy, Les fontains publiques de la ville de dijon, Paris, “Victor
Dallmont” , 1856.
16. P. Forchheimer, Wasserbewegung durch boden, “Z. Ver. Deutsch Ing. ” ,
45, ppt 1782-1788, 1901.
17. J. Bear, “Dynamics of fluid in porous media” , Elsevier, New York,
1972.
18. S. Ergun, “Fluid flow through packed columns” , Chem. Eng. Prog. 48,
ppt 89-94, 1952

