

行政院原子能委員會核能研究所

委託研究計畫研究報告

多孔性除濕輪體氣流及運轉負載特性模擬分析研究

**Simulation and analysis of the air flow and operating load  
characteristics of porous desiccant wheel**

計畫編號：110B007

受委託機關(構)：成功大學材料科學及工程學系

計畫主持人：李旺龍

報告日期：110 年 11 月 22 日

## 目錄

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 目錄 .....                              | I  |
| 中文摘要 .....                            | 1  |
| 英文摘要 .....                            | 2  |
| 壹、計畫緣起與目的 .....                       | 3  |
| 貳、研究方法 .....                          | 6  |
| 一、氣流特性相關文獻蒐集 .....                    | 6  |
| 二、VOCs 及吸附特性相關的文獻蒐集 .....             | 12 |
| 三、建立氣流、溫度場及應力場數學模型 .....              | 22 |
| (一)、動量守恆方程式 .....                     | 24 |
| (二)、能量守恆方程式 .....                     | 25 |
| (三)、本構方程式 .....                       | 26 |
| 四、貫穿曲線(Breakthrough Curve, BTC) ..... | 30 |
| 參、結果與討論 .....                         | 32 |
| 一、氣流通過多孔陶瓷除濕輪體後之氣流特性分析 .....          | 32 |
| (一)、網格測試 .....                        | 32 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| (二)、氣流特性驗證 .....   | 35 |
| (三)、氣流特性分析 .....   | 40 |
| 1. 10 PPI 除濕輪..... | 44 |
| 2. 30 PPI 除濕輪..... | 53 |
| 3. 60 PPI 除濕輪..... | 62 |
| 二、應力分析.....        | 70 |
| 三、除濕輪吸附試驗 .....    | 76 |
| (一)、氣體製備 .....     | 76 |
| (二)、實驗設備規格 .....   | 79 |
| 1. 氣體吸附反應測試槽 ..... | 79 |
| 2. 空氣採樣器 .....     | 81 |
| 3. 乾式流量校正器 .....   | 81 |
| 4. 氣味偵測儀 .....     | 82 |
| (三)、試驗結果 .....     | 83 |
| 肆、結論 .....         | 87 |
| 參考文獻 .....         | 88 |

## 中文摘要

本計畫採用有限元素法建立多孔性除濕輪模型，分析製程與再生氣流通過除濕輪時氣流的交互作用及除濕輪的軸承負載特性，並進行揮發性有機物之吸附特性試驗，期使擴展環保除濕輪之功能性用途，作為未來功能性鍍材設計開發之基石，以利各產業之需求。

多孔性除濕輪數學模型的建立是根據達西定律來修正 Navier-Stokes 方程式、能量守恆方程式，並分析熱泵低溫乾燥系統中九種流速條件下及三種不同孔徑之除濕輪的流體流速、溫度及壓力分佈，並整合除濕輪、軸承及周圍密封元件，分析各種不同負載條件下，除濕輪乾燥系統的應力分佈。此外，本計畫也針對多孔性除濕輪進行揮發性有機物之吸附特性試驗，使用特定孔徑之除濕輪通過四種濃度的有機物進行吸附測試，以獲得吸附動力及貫穿曲線之操作參數，之後藉由獲得之實驗數據，分析多孔性除濕輪之吸附特性下的 Yoon-Nelson 模型之模擬結果。

## 英文摘要

This project uses the finite element method to establish a porous desiccant wheel model for analyzing the interaction between process and regeneration air flow when they pass through the desiccant wheel. Moreover, this model could analyze bearing load characteristics of the desiccant wheel as well. In order to extend the functional properties of environmental desiccant wheel and make it become the cornerstone of the design and development of functional plating materials which satisfies the needs of various industries in the future, we conduct the test of the adsorption characteristics of volatile organic compounds. The mathematical model is established by modified Navier-Stokes equation and energy conservation equation. In the heat pump low-temperature dehumidification system, we use it to analyze temperature and pressure distribution of the desiccant wheel which is under the nine flow rate conditions and three different pore diameters. Furthermore, we integrate the desiccant wheel, bearing and surrounding sealing elements to analyze the stress distribution of the desiccant wheel when it is under different load conditions. At the same time, this project conducts the adsorption tests of the desiccant wheel through four concentrations of volatile organic compounds to obtain the operation parameters of adsorption kinetics and breakthrough curves. Finally, the experimental data is used to analyze the Yoon-Nelson model of the adsorption characteristics of the porous desiccant wheels.

## 壹、計畫緣起與目的

鋁為地殼中含量最豐富的金屬，且具有優異的材料特性，例如密度小、耐腐蝕、導電度高等，因此被廣泛應用在運輸工具、航太、機械等產業。但鋁之活性高，在冶煉過程中易發生氧化，故一般會加入鹽類混合物，使低熔點鹽類先在金屬上層形成爐渣保護層，進而隔絕熔融狀態的鋁與外界氣體接觸產生金屬氧化物，避免原料的浪費，增加鋁的冶煉比例。此外爐渣還可吸收金屬液中的非金屬夾雜物，當金屬冷卻達一定程度時，去除爐渣層可得到純度更高之金屬，而吸收不純物後的表層熔液冷卻後形成鋁渣。鋁渣屬於一般事業廢棄物，但其為高敏感物質，易與水起化學反應，量多時甚至會產生易燃氣體，若處理不當，除了有害金屬離子會對環境造成汙染，與水反應後也會形成對人體有害的氣體。由於現今大眾對環境保護的概念增強，制定越來越多的環保法規，使鋁業考慮發展相關回收技術。由於多孔氧化鋁具有吸收氣體、蒸氣及水分之能力，且結構安定性佳，可以承受溫度快速的變化，遇水也不易收縮、膨脹、軟化或分解，最常應用於乾燥機內的吸附床。

根據除濕劑類型分類，除濕系統分為液體吸收式及固體吸附式兩種，固體吸附式系統又分為固定床式與轉輪式。固定床式除濕系統藉

由改變空氣流向，並間歇的吸附水氣及再生乾燥，轉輪式除濕系統則可連續進行除濕及再生，受到企業更廣泛的應用。在轉輪式乾燥系統中，除濕輪為最重要的元件，但氣流中的雜質會導致吸附孔道堵塞，使吸附能力降低，故在一段時間後需要更換新的除濕輪，然而國內乾燥設備使用的除濕輪多數從國外進口，導致耗材成本較高。因此核能研究所將鋁渣純化後進行高溫燒結，自行開發出環保氧化鋁系列除濕輪，減少廢棄物污染的同時，也藉此技術降低國內產品的成本，增加國際競爭力。一旦擁有自行生產除濕輪的技術，即可自行設計乾燥設備，價格將低於從國外進口，有效降低國內廠商的設備開銷。

全球乾燥設備的發展趨勢為高效率吸附、節約能源，為了因應未來更嚴格的能源規範，核能研究所將自製的除濕輪用於結合熱泵的低溫吸附式乾燥系統，利用冷凍機原理減少加熱再生氣流時消耗的熱量，以此達到節能效果，並可應用於農產品、塑膠與半導體等對熱敏感的領域。然而在增加效率方面遇到一些困難，由於系統中的氣流會產生交互作用，導致溫度與水氣在不同氣流間傳遞，使原本向出口移動的乾燥氣流受到水氣較多的氣流影響，致使乾燥效果不如預期；再生氣流的熱量傳遞給出口處的氣流，使其溫度升高，此情形易造成熱敏感物質損毀，而再生氣流溫度降低後，對於除濕輪的乾燥能力也

將下降，使除濕輪中殘留較多水氣，最終降低除濕效率。此外多孔除濕輪與組裝元件緊密結合時，接觸面積小易導致應力過大(如圖一)，進而導致除濕輪損毀，因此須考慮接觸區域是否應力分佈不均。若要解決上述問題須瞭解運行中的流速、溫度與應力分佈，使乾燥系統獲得更好的除濕能力。

揮發性有機物的主要來源為各類工業在生產過程使用的有機溶劑，若不經處理排放到大氣中將形成空氣汙染，會對人體的鼻腔、咽喉與眼部黏膜等造成危害，且人體易對其產生嗅覺適應性，即接觸一段時間後，較難察覺其味道。為了擴展除濕輪之功能性用途，將其用於吸附揮發性有機物。因此本研究實驗部分利用除濕輪之吸附特性，對揮發性有機物進行吸附實驗，測量不同濃度之揮發性有機物進入除濕輪後，濃度隨時間的變化，以便提升多孔性除濕輪吸附效能。

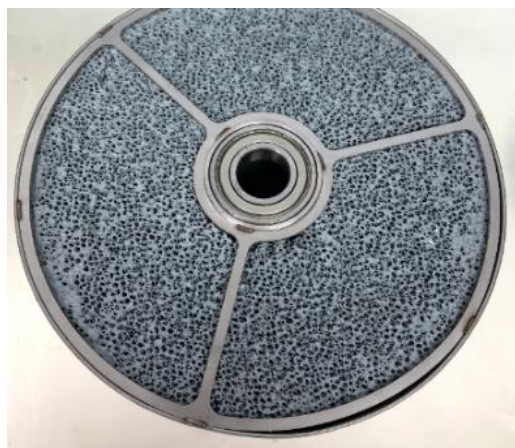


圖 1、除濕輪示意圖

## 貳、研究方法

### 一、氣流特性相關文獻蒐集

固體表面的分子受到向內部的力，處於不平衡的狀態，此時流體中的吸附質(adsorbate)會與吸附劑(sorbent)形成鍵結並發生吸附現象，使表面達到平衡狀態，因此提高除濕輪的表面積有助於增加吸附能力。多孔氧化鋁即具有良好的吸附氣體能力，常應用於乾燥機內的吸附床，而吸附式乾燥系統運作過程中包含流體的流動、熱傳與質傳。多孔介質內部比表面積較大，流體在多孔介質中流動時，極易受到擾動，故不能僅僅使用 Navier-Stokes 方程式描述其流動狀態。從 19 世紀開始，陸續有人進行相關研究，以期找到準確預測流體運動之方程式。而溫度會影響吸附效果。因此研究乾燥系統時，須耦合動量守恆方程式與能量守恆方程式，計算出滿足以上方程式的數值解，才可解決多孔氧化鋁內部流體之溫度、流速與壓力分佈的問題。

有關流體通過多孔介質的最早研究是在 1856 年，Darcy[1]在均勻介質中的單向低速流動實驗中發現流速與施加的壓力差之間的比例關係，並定義滲透率以描述流體通過多孔材料時，平均流速與壓力差之間的關係，適用於流速較低的情況。1893 年 Hazen[2]觀察到流體的黏度會影響流體的運動行為，並記錄不同溫度下，水通過過濾器時

達西方程式中的水力傳導係數，最後對達西定律進行修正。由於流體速度較高時，多孔固體內引起的形狀阻力(form drag)與摩擦所引發的表面阻力(surface drag)具有相等的重要性，因此 1901 年 Forchheimer[3]考慮流體在多孔性材料的慣性效應，於線性達西定律中加入二次項，使其更符合流體在高流速時的運動狀態。因流體流動時，流體黏度會影響流體流速，且在不同溫度下流體黏度會改變，故 1918 年 Krüger[4]不僅考慮流體溫度的變化，且考慮溫度對黏度造成的影響。當流體在多孔介質中流動時，壁會對其產生黏性剪切力，進而影響流體的流動，1947 年時 Brinkman[5]考慮黏性剪切力及剪切作用下導致的黏性耗散(viscous dissipation)，此時流體的溫度、黏度及熱量傳遞行為均會發生變化，並影響流體的流動特性，因此在原有的達西公式加入黏性耗散項(viscous dissipation)。此時尚未考慮填充床內顆粒的粒徑造成的影響，在 1952 年時，Ergun[6] 假設顆粒表面為平滑的，且忽略壁效應，獲得粒徑與填充床摩擦係數的關係式，提出可以預測通過填充塔的壓降的模型，並指出粒徑和孔隙率皆會影響壓降。

除了研究多孔介質對流體流動之影響外，眾人注意到由於多孔介質複雜之結構，使其具有獨特的熱傳特性，如比表面積大有利於散熱，為了探討多孔介質內之熱傳過程，1989 年，Vafai 與 Kim[7]對局

度熱平衡的多孔介質平板通道中的能量方程式進行理論推導，獲得流體溫度與速度的解析解。1998 年 Lee 和 Vafai[8]假設平板通道壁面的熱流為定值，進行充分發展熱傳的研究，獲得固相和液相溫度分佈的解析解。

2003 年 Mohamad[9]研究圓管和平板通道中部分填充與完全填充多孔介質對於強制對流且為層流狀態的流體的熱傳特性，分析通道中多孔介質厚度對壓降及熱傳效果的影響，最後發現完全填充多孔介質時，壓力降低的速率較低，且熱傳效率更高。2007 年 Haddad[10]等人使用數值模擬方法研究非局部熱平衡狀態下，氣體在多孔介質平板通道內發生強制對流時的速度滑移和層流現象，並以 Darcy - Brinkman - Forchheimer 方程式描述氣體在通道中的狀態。之後 Haddad 等人[11]將幾何改為圓管通道，繼續研究氣體的流動行為，得到速度場及溫度場的數值解，並了解各參數對研究結果的影響。

表 1 整理上述文獻後，依照所考慮之條件進行分類。由於流速會對流體的運動特性造成影響，流速低的時候以黏性力為主，但當流速上升時，慣性力逐漸增大，因此不可再忽略慣性力。此外由於多孔介質表面積大，流體通過時可能產生剪切力，導致能量耗散，Brinkman[5]考慮此狀況後修正原有的達西定律。了解流速與剪切力

對流動造成的影響後，眾人也在已有的模型上加入其他參數如溫度、孔隙率，探討不同條件下流體流動的變化。

表 1、氣流特性文獻整理表

| 作者                    | 黏度 | 慣性效應 | 黏性剪切力 | 粒徑與孔隙率 | 溫度 |
|-----------------------|----|------|-------|--------|----|
| Darcy(1856)[1]        | v  |      |       |        |    |
| Hazen(1893)[2]        | v  |      |       |        |    |
| Forchheimer(1901)[3]  | v  | v    |       |        |    |
| Krüger(1918)[4]       | v  |      |       |        |    |
| Brinkman(1947)[5]     | v  |      | v     |        |    |
| Ergun(1952)[6]        | v  | v    |       | v      |    |
| Vafai, Tien(1981)[12] | v  | v    | v     |        |    |
| Vafai 等人(1985)[13]    | v  | v    |       | v      | v  |
| Vafai, Kim(1989)[7]   | v  | v    | v     |        |    |

| 作者                  | 黏度 | 慣性效應 | 黏性剪切力 | 粒徑與孔隙率 | 溫度 |
|---------------------|----|------|-------|--------|----|
| Lee, Vafai(1998)[8] |    |      |       |        | v  |
| Mohamad[9]          | v  | v    |       |        | v  |
| Haddad 等人[10]       | v  | v    | v     |        |    |

## 二、VOCs 及吸附特性相關的文獻蒐集

吸附屬於一種傳質過程，物質內部的分子與周圍的分子皆具有吸引力，因此達成力平衡，而表面原子則缺乏來自外部的引力，受到向內部的力，此時流體為了降低表面張力使表面達到平衡狀態，會向表面移動並附著在表面上，故表面積大時具有較佳的吸附效果。在吸附過程中，固體稱為吸附劑(Adsorbent)，被吸附之流體則稱為吸附質(Adsorbate)，由於吸附通常為放熱反應，所以低溫環境有利於吸附發生。

吸附反應分為物理吸附(Physical Adsorption)及化學吸附(Chemisorption)。物理吸附主要作用力為凡得瓦力，當吸附質與吸附劑接近時，原子或分子產生偶極矩，造成吸附質與吸附劑產生吸引力，由於吸附能小，被吸附的物質很容易再脫附，吸附過程中吸附質不會進入吸附劑晶格內部，而是停留在表面與吸附劑達成平衡，因此物質的性質不會改變；化學吸附又稱為活性吸附，吸附質與吸附劑除了分子間的引力，還會形成離子鍵(強吸附)或是共價鍵(弱吸附)，擁有化學鍵的力，因此吸附能較物理吸附大，吸附質需要較高的溫度才可有足夠的能量脫附，且由於發生化學變化，物質原本的性質已被改變[14]。

表 2、物理吸附與化學吸附之比較

|       | 物理吸附      | 化學吸附    |
|-------|-----------|---------|
| 吸附力   | 凡德瓦力      | 化學鍵     |
| 吸附穩定性 | 不穩定，易脫附   | 較穩定     |
| 選擇性   | 不具選擇性     | 具有選擇性   |
| 吸附速率  | 較快        | 較慢      |
| 吸附熱   | 接近汽化熱     | 接近化學反應熱 |
| 分子層   | 單分子層或多分子層 | 單分子層    |

質傳方程式可分為靜態與動態兩種類型，前者以吸附等溫線描述，在定溫下，吸附劑上的吸附質數量為其壓力(氣體)或濃度(液體)的函數，吸附量幾乎以此方式進行歸依化，並比較不同材料的吸附能力。後者描述隨著時間改變時，吸附質濃度與吸附劑表面吸附質濃度之間的關係。

Freundlich 與 Kuster[15]在 1906 年時，提出第一個數學擬合的等溫線，此為被吸附物的質量與氣體壓力的經驗式，用來表示等溫條件下，單位質量的固體吸附劑之吸附量隨壓力改變的變化，適用於中、低濃度的吸附行為，在高濃度時，由於蒸氣壓較大，計算得到的飽和吸附量會大於實際結果。1918 年時 Langmuir[16]假設達到最大吸附量時，吸附僅發生在表面且吸附和脫附為可逆反應，最後根據統計熱力

學得出具有動力學基礎的半經驗式等溫線。1938 年 Bruanuer 等人[17]提出了 BET 等溫方程式，它與 Langmuir 吸附方程式類似，但可以考慮多層氣體分子吸附。以上為對於吸附等溫線之研究，之後進行許多靜態與動態質傳方程式的研究，且同時耦合能量方程式，了解在不同操作條件下多孔介質中的吸附現象。

動態質傳方程式則可追溯到 1972 年，Maclaine-Cross 與 Banks[18]忽略流體流動方向上的擴散和吸附遲滯現象，建立模型描述熱量和吸附質從流體轉移到多孔介質，再從多孔介質轉移到另一種流體的過程。1979 年時 Holmberg[19]使用有限差分法建立多孔介質內的熱傳質傳穩態模型，並計算出空氣溫度、濕度、吸附劑溫度和吸附劑水分含量的分佈。1984 年 Jurinak 與 Mitchell[20]僅考慮了氣固界面的阻力，忽略固體中的熱傳導和濕氣擴散，使用一維暫態模型來計算固體吸附劑和氣流之間的熱濕耦合。由於 Jurinak 與 Mitchell 未考慮固體對熱傳之影響，1993 年 San 與 Hsiau[21]將軸向表面擴散作為吸附劑中的主要質傳機制，因此使用一維固體熱傳導方程式說明固體內部的縱向熱阻。比起只考慮氣體之熱傳的氣側模型，同時考慮氣體及固體的熱傳係數可以獲得較精準之計算結果[22]，此種模型稱為氣固側模型。1999 年 Zhang 與 Wang [23]建立三維暫態模型，對吸附劑中

的熱傳與質傳耦合機制進行數值和實驗分析，探討溫度、壓力、速度和吸收的水及對吸附性能的影響，在該模型中使用線性驅動力方程式表示內部質傳阻力，並使用達西定律描述孔隙中流體的運動。2004年時 Inaba 等人[24]建立二維數值模型模擬濕空氣流入裝有球形吸附劑顆粒的矩形吸附床，並探討氣流溫度、濕度和流速等對吸附效率的影響。2009年時，Demir 等人[25]使用數值方法求解填充床的熱傳、質傳方程式，得到吸附劑床中的溫度、壓力、吸附密度和吸附物的濃度分佈，並研究不同孔隙率對環形矽膠吸附水的影響，研究成果發現孔隙率對溫度和吸附物濃度的分佈影響很大，且吸附時間隨孔隙率的增加而上升。

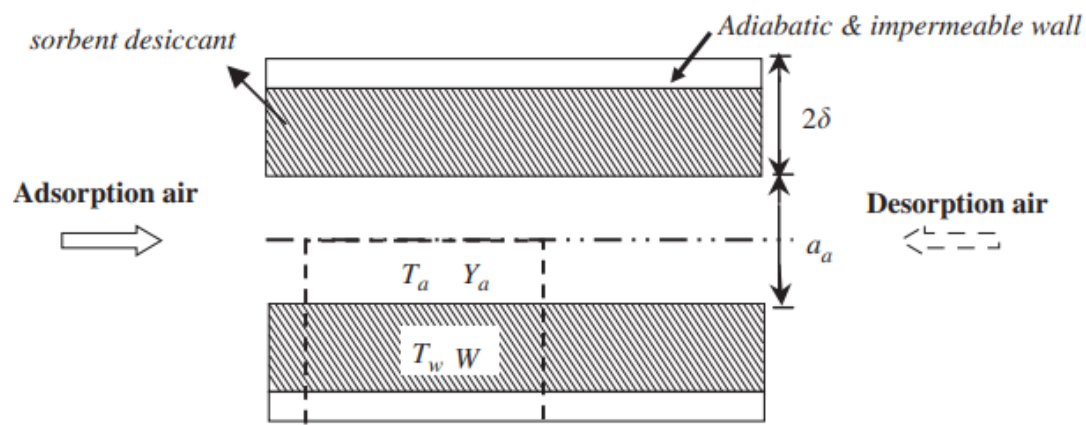


圖 2、氣側熱阻模型示意圖[26]

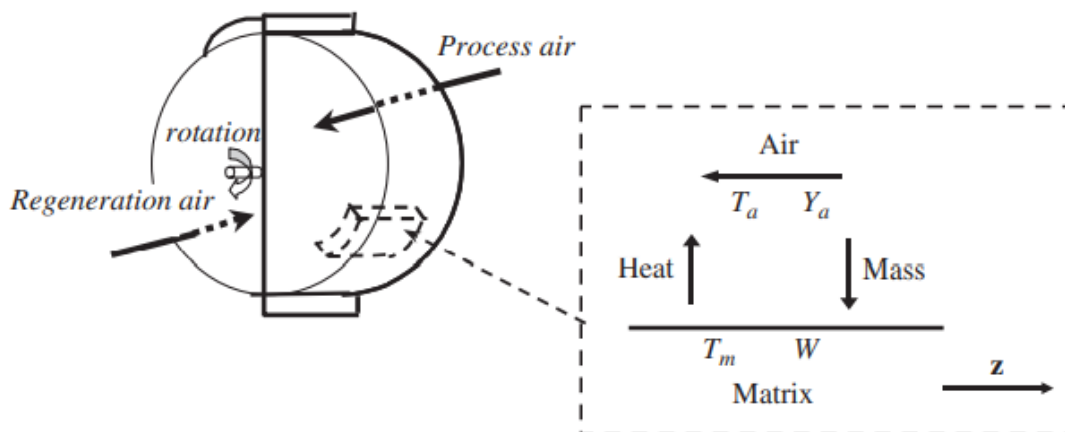


圖 3、氣固側熱阻模型[19]

多孔性材料的用途不僅限於乾燥功能，由於其優異的吸附能力，也可以使用於揮發性有機化合物。揮發性有機化合物是工業排放最常見的污染物之一，其中包括大多數溶劑，如稀釋劑、脫脂劑、清潔劑、潤滑劑和液體燃料[27]，若不處理將對環境與人體造成傷害，因此在此研究除濕能力的同時，也進行對於 VOCs 的吸附研究。2012 年 Puértolas[28]假設無徑向和軸向的熱傳質傳、吸附放出的熱能為定值，且氣相和固相達局部熱平衡，建立模型模擬丙烷在沸石固定床的吸附。除了對吸附能力的研究外，也有人針對吸附過程中質傳方式對吸附速率造成的影響進行研究，在 2013 年以前，眾人普遍認為揮發性有機化合物在吸附劑內部的傳遞機制為擴散，而 Zhang[29]等人發現吸附劑內部的對流傳質幾乎不影響軸向 VOC 的傳遞，但在高孔隙率

下將影響平均吸附速率。同年 Tefera[30]等人考慮對流的影響，建立二維非均質的計算流體動力學模型，模擬球形活性炭(BAC)吸附劑吸附氣流中的揮發性有機化合物(VOC)的過程，該模型預測了 VOC (丙酮、苯、甲苯)的貫穿曲線以及吸附苯的過程中所產生的壓降和溫度，並研究載氣溫度、表面速度、VOC 含量與粒徑造成的影響。2014 年 Dobre[31]等人模擬在各種操作條件下，氣流中 VOC (揮發性有機化合物)在固定床的多孔吸附劑顆粒上的吸附情況，並研究正己烷和 2-丙醇在固定床顆粒活性炭上的吸附效果，發現在較高的工作溫度、較低的表面速度或分子之沸點較高時，活性炭的飽和吸附容量會增加。2015 年 Gupta[32]等人為了研究市售的顆粒狀活性炭去除 VOC (即甲苯和二甲苯)時的吸附現象，進行實驗獲得甲苯和二甲苯的穿透曲線，並開發數學模型，預測等溫條件下吸附劑顆粒沿孔的徑向和色譜柱的軸方向上的溶質濃度隨時間的變化。2019 年 Laskar 等人[33]建立二維數學模型研究相對濕度對活性碳吸附揮發性有機化合物的能力之影響，並評估吸附劑溫度對吸附容量之影響。

表四針對上述吸附研究進行分類，1972 年 Maclaine 與 Banks[18]僅利用質傳方程式進行研究，之後的研究則多討論溫度造成的影響，溫度的影響又可分為吸附劑內部的熱傳過程與熱對流，此外有些研

究也會考慮吸附劑的孔隙率，並將此參數加入動量方程式與能量方程式中，使用較多參數描述流體流動及吸附現象，即可得到較精準之結果。

表 3、吸附特性文獻整理表

| 作者                                 | 擴散方向     | 溫度 | 吸附劑熱傳    | 對流 | 孔隙率 | 吸附質 |
|------------------------------------|----------|----|----------|----|-----|-----|
| Maclaine-Cross,<br>Banks(1972)[18] | x        | v  | x        | x  | x   | 水蒸氣 |
| Holmberg(1979)[19]                 | x        | v  | 軸向       | x  | x   | 水蒸氣 |
| Jurinak,<br>Mitchel(1984)l[20]     | 徑向       | v  | x        | v  | x   | 水蒸氣 |
| San, Hsiau(1993)[21]               | 軸向<br>表面 | v  | 軸向       | v  | x   | 水蒸氣 |
| Inaba 等人(2004)[24]                 | 徑向<br>軸向 | v  | 軸向<br>徑向 | v  | v   | 水蒸氣 |
| Demir 等人(2009)[25]                 | 徑向       | v  | 徑向       | v  | v   | 水蒸氣 |

| 作者                     | 擴散方向                   | 溫度 | 吸附劑熱傳        | 對流 | 孔隙率 | 吸附質      |
|------------------------|------------------------|----|--------------|----|-----|----------|
| Puértolas 等人(2012)[28] | 軸向<br><br>徑向<br><br>表面 | V  | 軸向           | X  | V   | 丙烷       |
| Zhang 等人(2013)[29]     | 徑向<br><br>軸向           | X  | X            | X  | V   | VOC      |
| Tefera 等人(2013)[30]    | 徑向<br><br>軸向           | V  | 軸向<br><br>徑向 | V  | V   | 丙酮、苯、甲苯  |
| Dobre 等人(2014)[31]     | 軸向                     | V  | X            | X  | V   | 正己烷、2-丙醇 |

| 作者                  | 擴散方向 | 溫度 | 吸附劑熱傳 | 對流 | 孔隙率 | 吸附質               |
|---------------------|------|----|-------|----|-----|-------------------|
| Gupta 等人(2015)[32]  | 徑向   | V  | X     | X  | V   | 甲苯、二甲苯            |
|                     | 軸向   |    |       |    |     |                   |
|                     | 孔擴散  |    |       |    |     |                   |
| Laskar 等人(2019)[33] | 表面擴散 | V  | X     | V  | V   | 水蒸氣、丙醇、<br>正丁醇、甲苯 |
|                     | 孔擴散  |    |       |    |     |                   |

### 三、建立氣流、溫度場及應力場數學模型

通過實驗無法測量某些參數，例如輪體溫度分佈、氣壓分佈與系統內的流速分佈等，因此數學模型是分析除濕輪及系統性能的有效方法，與進行實驗評估除濕輪性能相比，可花費較少的時間和成本達到相同的效果，但藉由數學模型計算出的結果成本較低，同時可以任意改變操作條件與其他參數，獲得大量的資料以研究其對所造成的影響，故本研究使用商用數值模擬軟體建立模型模擬運作中的吸附式乾燥系統。

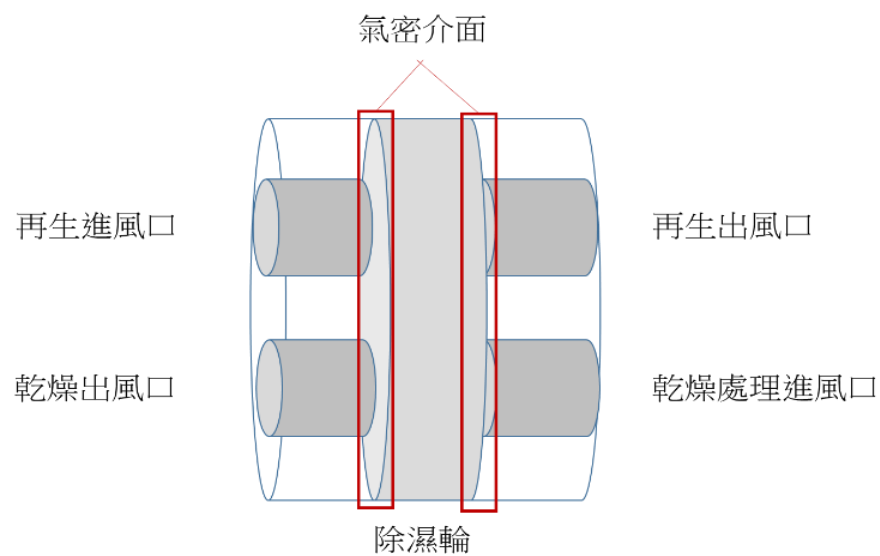


圖 4、除濕輪模型示意圖

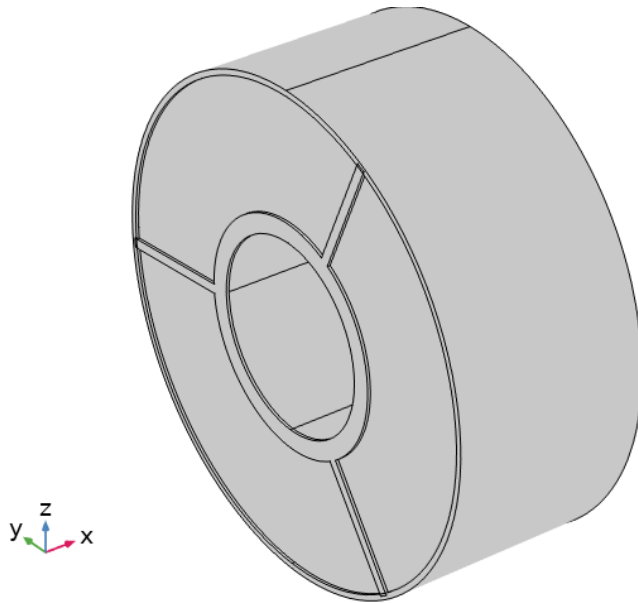


圖 5、除濕輪與軸承示意圖

在模擬分析開始前，須先廣泛蒐集與多孔性材料有關的資料，了解流體通過時所發生之所有現象及相關操作參數，再依據模型的需求確認其所需要之方程式。之後建立幾何模型(圖 4、圖 5)，並加入熱、流體及固體統御方程式的參數，依操作條件之要求設定邊界條件即可進行模擬分析。以下將說明主要使用的統御方程式。

### (一)、動量守恆方程式

根據達西定律(Darcy's law)，當壓力梯度造成流體在多孔介質中流動時，孔壁會阻礙動量傳遞到孔外部的流體，因此忽略流體中剪應力造成的動量傳遞。

$$\nabla p = -\frac{\mu}{k} \mathbf{v} \quad (1)$$

其中， $p$ 為壓力(Pa)， $\mathbf{v}$ 為速度(m/s)， $\mu$ 為黏度(Pa·s)， $k$ 為滲透率(m<sup>2</sup>)。

在均質的連續流體中，可以使用納維爾-斯托克斯方程式(Navier-Stokes equations)表示動量守恆，並用來描述流體動量變化、壓力變化、黏滯耗散與重力之間的關係。

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho_f (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho_f \mathbf{g} \quad (2)$$

其中， $\rho$ 為流體密度(kg/m<sup>3</sup>)， $t$ 為時間(s)。

發生滲流現象(Seepage)時，須對 Navier-Stokes 方程式做一些修正，首先將黏性項須使用  $\mu \mathbf{v}_p / K$  代替上式中的  $\mu \nabla^2 \mathbf{v}$ 。依據 Dupuit-Forchheimer 關係式上式中的  $\mathbf{v}$  須以  $\mathbf{v}_p / \epsilon_p$  代替，因此修正後的 Navier-Stokes 方程式應寫為：

$$\frac{1}{\epsilon_p} \rho_f \frac{\partial \mathbf{v}_p}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon_p^2} \rho_f (\mathbf{v}_p \cdot \nabla) \mathbf{v}_p = -\nabla p - \frac{\mu}{K} \mathbf{v}_p + \rho_f \mathbf{g} \quad (3)$$

其中， $\rho$ 為流體密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $\epsilon_p$ 為孔隙度， $\mathbf{v}$ 為速度( $\text{m}/\text{s}$ )， $\mathbf{v}_p$ 為滲流速度， $t$ 為時間( $\text{s}$ )， $p$ 為壓力( $\text{Pa}$ )， $\mu$ 為黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )， $K$ 為滲透率( $\text{m}^2$ )， $\mathbf{g}$ 為重力( $\text{m}/\text{s}^2$ )。

## (二)、能量守恆方程式

流體在多孔介質中流動時，熱能藉由熱傳導與熱對流擴散至整個除濕倫。該過程由以下的能量守恆方程式來描述，左側第一項為與時間變化有關的熱源，左側第二項與移動熱源有關，左側第三項為熱傳導所產生的熱源。式(5)為傅立葉熱傳導定律(Fourier's law of heat conduction)。

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (4)$$

其中， $(\rho C_p)_{eff}$ 為有效體積熱容量( $\text{J}/(\text{K} \cdot \text{m}^3)$ )， $\rho$ 為流體密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $C_p$ 為流體常壓熱容( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )， $T$ 為溫度( $\text{K}$ )， $t$ 為時間( $\text{s}$ )， $\mathbf{v}$ 為速度( $\text{m}/\text{s}$ )， $Q$ 為熱源( $\text{W}/\text{m}^3$ )， $\mathbf{q}$ 為熱傳導所產生的熱源( $\text{W}/\text{m}^2$ )，且根據傅立葉熱傳導定律(Fourier's law of heat conduction)  $\mathbf{q}$ 為：

$$\mathbf{q} = -k_{eff} \nabla T \quad (5)$$

其中， $k_{eff}$ 為等效熱傳導係數( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )。

由於多孔材料包含固體與流體，因此式(4)中須使用等效體積熱容量，並考慮上述兩者的影響，並以式(6)表示；同理，式(5)中也須使用等效熱傳導係數，並以式(7)表示。

$$(\rho C_p)_{eff} = \theta_p \rho_{p,s} C_{p,s} + (1 - \theta_p) \rho C_p \quad (6)$$

$$k_{eff} = \theta_p k_{p,s} + (1 - \theta_p) k_{p,l} \quad (7)$$

$\theta_p$ 為多孔介質的固相體積分率， $\rho_{p,s}$ 為多孔介質密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $C_{p,s}$ 為固相常壓熱容( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )， $k_{p,s}$ 為固體熱傳導係數( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )， $k_{p,l}$ 為流體熱傳導係數( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )。

為了獲得除濕輪運行時的流速分佈、氣壓分佈與溫度分佈，須耦合動量守恆方程式與能量守恆方程式，考慮動量與溫度的變化後，計算出流體在多孔介質中的流動過程。

### (三)、本構方程式

彈性力學也稱彈性理論，是固體力學的一個分支，研究彈性體由於受外力作用、邊界約束或溫度改變等原因而發生的應力、應變和位移問題。而描述材料的彈性變形行為經常使用廣義虎克定律(Hooke's law)作為材料應力-應變的關係式，從物理學的角度來看，它是材料內原子-原子間距離及位能之間交互影響的整體行為。對於處於三維

應力下的材料進行描述，則必須定義包含 36 個彈性常數的四階張量，

對應到二階的應力張量和應變張量：

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (9)$$

其中， $\varepsilon_{ij}$ 是在單位元素的應變， $S_{ijkl}$ 是四階柔性張量( $1/(N/m^2)$ )， $\sigma_{kl}$ 是二階應力張量( $N/m^2$ )， $\sigma_{ij}$ 是在單位元素的應力( $N/m^2$ )， $C_{ijkl}$ 是四階剛性張量( $N/m^2$ )， $\varepsilon_{kl}$ 是二階應變張量。

在不同晶系的情況下，材料內部會有各種不同的對稱行為，因此在各種特殊情況下材料彈性常數會進一步產生更多的簡化因此而減少。其中等向性材料之獨立變數僅有 2 個，分別為楊氏模數以及蒲松比。等向性材料之應力應變關係若以矩陣形式表示，可以寫為：

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中  $C_{44}$ 、 $C_{55}$ 、 $C_{66}$  可表示為：

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2} = \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \quad (11)$$

而本文假設線彈性材料為等向性材料，因此可簡化為

$$\sigma = E\varepsilon \quad (12)$$

$$\tau = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma \quad (13)$$

其中 $\sigma$ 為正向應力( $\text{N/m}^2$ )， $E$ 為楊氏模數( $\text{N/m}^2$ )， $\varepsilon$ 為正向應變， $\tau$ 為剪切應力( $\text{N/m}^2$ )， $\nu$ 為蒲松比， $\gamma$ 為剪切應變。藉由此方程式可計算除濕輪體的應力及應變。

### von Mises 降伏準則

在材料降伏之前，可假設其為對於應力的反應為線彈性、超彈性或黏彈性，但當材料之 von Mises 應力達到降伏強度時，將產生降伏並開始塑性變形(plastic deformation)，此時材料發生永久破壞，無法回到受負載前的狀態，為了避免上述情形，設計材料時需考慮塑性理論中的 von Mises 降伏準則。當材料承受負載時，von Mises 應力可將多軸負載之應力等效為單軸應力，其公式如下：

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (14)$$

其中 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 分別為直角坐標中 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸之正向應力； $\tau_x$ 、 $\tau_y$ 、 $\tau_z$ 則分別為 $xy$ 、 $yz$ 、 $zx$ 平面之剪應力。使用本構方程式分析除濕輪與組裝元件之應力分佈後，需考慮 von Mises 降伏準則，避免應力超過降伏強度造成材料損壞。

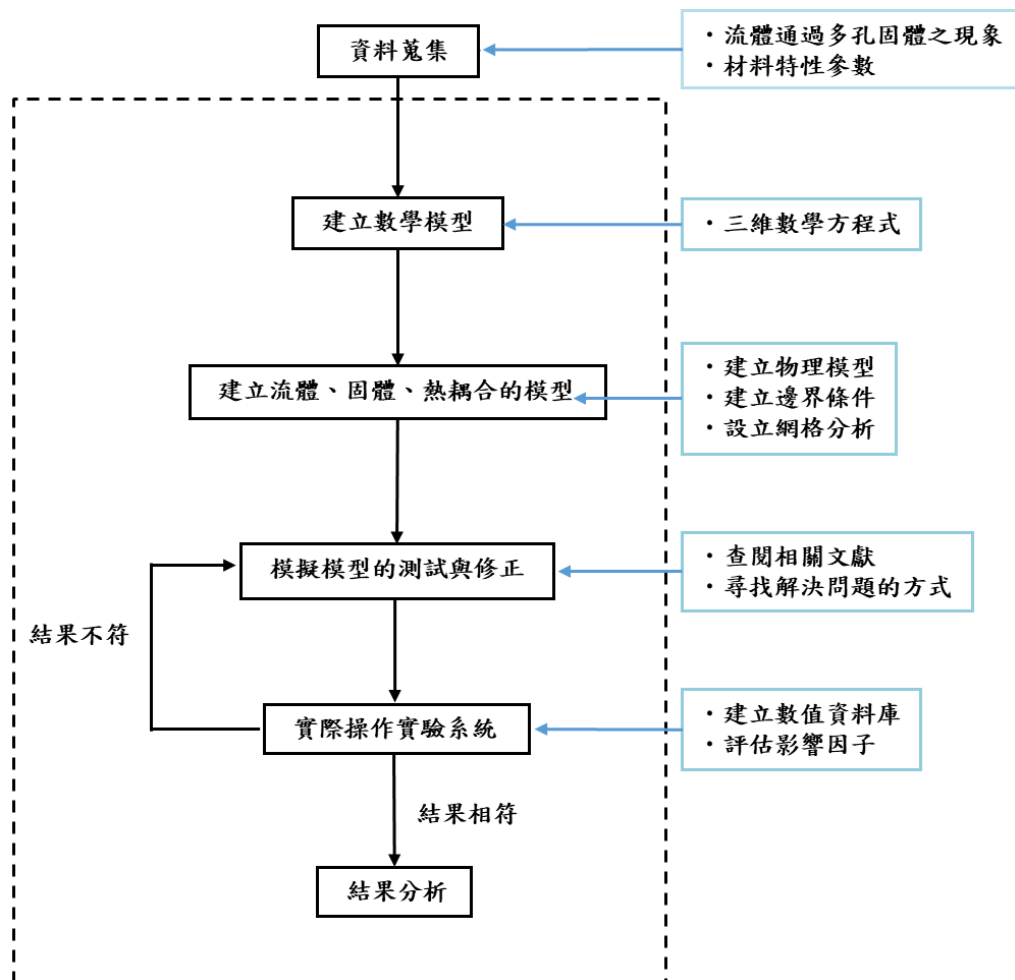


圖 6、數值模擬流程圖

#### 四、貫穿曲線(Breakthrough Curve, BTC)

貫穿曲線常作為分析吸附劑的方法，當流體剛接觸到吸附劑時，在吸附劑的作用下，出口的目標物濃度幾乎為零，但一段時間之後，出口處將逐漸檢測出目標物，即吸附劑的吸附能力隨時間增加而下降，最後出口測的目標物濃度將與入口一樣，此時吸附劑已經達到飽和，無法繼續吸附目標物。本計畫使用 Yoon-Nelson 模型模擬與預測吸附行為與規律，並假設氣流通過吸附床中的吸附劑時，部分氣體分子被吸附而部分氣體分子通過，且吸附劑飽和後無法繼續進行吸附，因此假設吸附分率的衰減率正比於貫穿分率( $f$ )與吸附分率( $r$ )的相乘。

$$-\frac{dr}{dt} \propto rf \quad (8)$$

假設 $k_b$ 為反應速率常數

$$-\frac{dr}{dt} = k_b rf \quad (9)$$

當  $f = 1 - r$  時，將上式積分可得

$$\ln \frac{f}{1-f} = -k_b(t - \tau) \quad (10)$$

$\tau$ 為貫穿濃度達到 50 % 的初始濃度所需要的時間。整理式(10)後

$$t = \tau + \frac{1}{k_b} \ln \frac{f}{1-f} \quad (11)$$

由於貫穿分率 $f = \frac{C}{C_I}$ ，式(11)可寫作

$$t = \tau + \frac{1}{k_b} \ln \frac{C}{C_I - C} \quad (12)$$

$C_i$ ：VOCs 初始濃度

$C$ ：VOCs 通過吸附劑之出口濃度

進行實驗並紀錄濃度的變化後，將實驗數據代入式(12)即可獲得不同濃度之丙酮氣體的吸附動力模型。

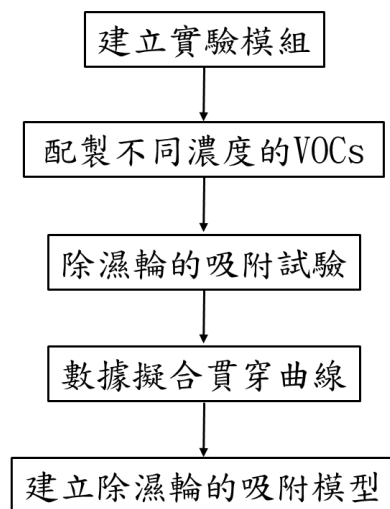


圖 7、實驗操作流程圖

## 參、結果與討論

### 一、氣流通過多孔陶瓷除濕輪體後之氣流特性分析

針對除濕輪運轉中除濕輪乾燥系統，模擬製程氣流與再生氣流分別通過 10、30、60 PPI 孔徑分佈之除濕輪體時，兩道氣流交互作用下的(1)流速分佈(2)氣溫分佈(3)氣壓分佈。

#### (一)、網格測試

有限元素法將模型切割成許多網格，再利用網格的節點將微分方程式離散求解，因此當網格較密時，求解時間較長而結果較精準，網格較疏時，可以降低計算時間，但結果就會較不準確。為了在求解時間及精確度中取得平衡以增進計算效率，在進行模擬前會先進行網格測試，由較疏的網格開始計算，再慢慢加密網格，當前後兩種網格的計算結果誤差小於 0.1% 以內，視為達到標準，之後便以此網格設定進行數值模擬。

表 4 為本研究所使用的材料參數表，之後將以此設定進行模擬，表 5 則為不同網格設定下的製程出口氣流流度及溫度，可看出 M7 的計算值與 M6 之誤差已小於 0.1%，因此將以 M6 作為網格設定進行後續數值分析。

表 4、材料參數表

| Parameter                     |         |                          |
|-------------------------------|---------|--------------------------|
|                               | Alumina | Air                      |
| Density[kg/m <sup>3</sup> ]   | 3991    | 1.1614 (293.15 K, 1 atm) |
| Viscosity[kg/(m · s)]         | N/A     | 0.028                    |
| Heat capacity[J/(kg · K)]     | 755     | 1007                     |
| Heat conductivity[W/(m · K)]  | 31.5    | 0.0263                   |
| Porosity                      | 0.875   | N/A                      |
| Permeability[m <sup>2</sup> ] | 3.02E-7 | N/A                      |

表 5、網格靈敏度測試

| Mesh name | DOF     | $\mathbf{v}$ , m/s | $\left  \frac{\mathbf{v}_{I+1} - \mathbf{v}_I}{\mathbf{v}_I} \times 100\% \right $ | $T$ , °C | $\left  \frac{T_{I+1} - T_I}{T_I} \times 100\% \right $ |
|-----------|---------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------|
| M1        | 380577  | 7.6046             | 15.716                                                                             | 36.78    | 5.514                                                   |
| M2        | 746282  | 8.7997             | 10.532                                                                             | 34.752   | 2.898                                                   |
| M3        | 1121255 | 9.7265             | 1.510                                                                              | 33.745   | 1.639                                                   |
| M4        | 1548441 | 9.8734             | 0.454                                                                              | 33.192   | 0.121                                                   |
| M5        | 1977269 | 9.9182             | 0.117                                                                              | 33.152   | 0.072                                                   |
| M6        | 2325970 | 9.9298             | 0.098                                                                              | 33.128   | 0.048                                                   |
| M7        | 2784147 | 9.9395             | N/A                                                                                | 33.112   | N/A                                                     |

## (二)、氣流特性驗證

本研究考慮乾燥系統中製程氣流與再生氣流造成的影響，在入口為 1 大氣壓且進氣溫度為定溫的情況下，分析不同流速下的氣流特性。為了證明數值解之正確性，使用 TESTO 410-2 多功能扇葉風速計量測乾燥機入口與出口的風速及溫度，量測位置如圖 8 所示，最後將與數值解比較以證明本模型的正確性。如圖 9 所示，在除濕輪模型中，氣流入口處為 1 大氣壓，出口處則為氣體實際流速，測量乾燥機運作時出口處的流速再代入模型後，即可計算入口處的氣流速度。表 6 為在 3 種不同條件下所量測到的流速與溫度，代入模型後與數值解之比較如表 7 及表 8，入口風速之誤差皆小於 10%，出口溫度之誤差則小於 15%。

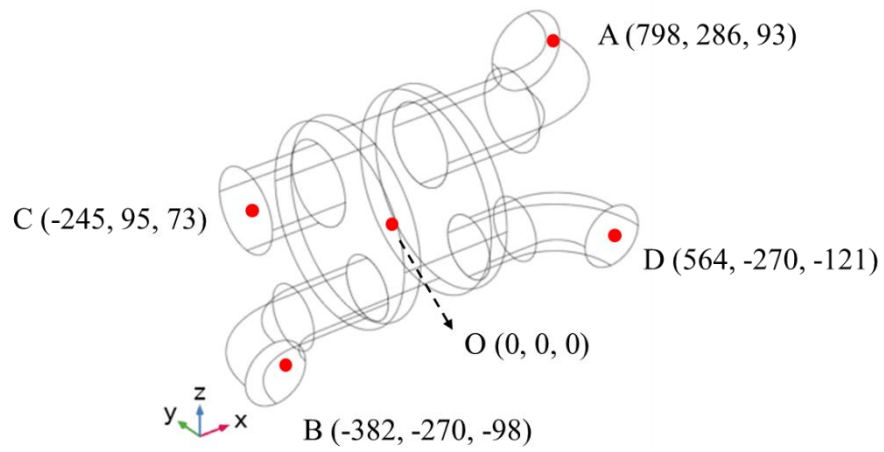


圖 8、風速與溫度測量位置

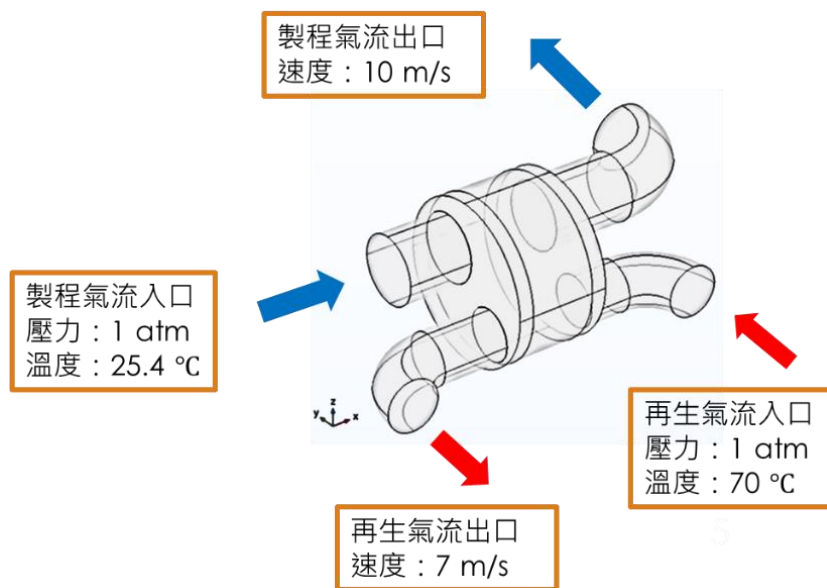


圖 9、乾燥系統示意圖

表 6、邊界條件設定

|     | 製程氣流出口風速    | 再生氣流出口風速    | 製程氣流入口溫度   | 再生氣流入口溫度   |
|-----|-------------|-------------|------------|------------|
|     | $v_p$ (m/s) | $v_r$ (m/s) | $v_p$ (°C) | $v_r$ (°C) |
| 第一組 | 10          | 7           | 25.4       | 70         |
| 第二組 | 1.3         | 2.3         | 30.4       | 40         |
| 第三組 | 1.5         | 3.2         | 30.3       | 50         |

表 7、數值解與測量值之風速誤差比較

|     | 位置     | 測量溫度(°C) | 數值解(°C) | 誤差    |
|-----|--------|----------|---------|-------|
| 第一組 | 製程氣流出口 | 35.2     | 33.112  | 5.93% |
|     | 再生氣流出口 | 41.3     | 40.85   | 1.09% |
| 第二組 | 製程氣流出口 | 32.1     | 34.67   | 8.01% |
|     | 再生氣流出口 | 33.0     | 32.72   | 0.85% |
| 第三組 | 製程氣流出口 | 33.1     | 34.38   | 3.87% |
|     | 再生氣流出口 | 36.6     | 37.42   | 2.24% |

表 8、數值解與測量值之溫度誤差比較

|     | 位置     | 測量速度(m/s) | 數值解(m/s) | 誤差     |
|-----|--------|-----------|----------|--------|
| 第一組 | 製程氣流入口 | 8         | 8.5618   | 7.02%  |
|     | 再生氣流入口 | 5         | 5.4179   | 8.36%  |
| 第二組 | 製程氣流入口 | 2.7       | 2.35     | 12.96% |
|     | 再生氣流入口 | 3.3       | 3.13     | 5.15%  |
| 第三組 | 製程氣流入口 | 3.4       | 3.32     | 2.35%  |
|     | 再生氣流入口 | 4.2       | 3.74     | 10.95% |

### (三)、氣流特性分析

溫度與濕度間的關係如圖 10 所示，空氣溫度較高時，可以儲存較多水氣，當含水量與低溫空氣相同時，高溫空氣的相對濕度較低，通過除濕輪時將除濕輪中的水分帶走的能力較佳。因此若再生氣流與製程氣流產生交互作用時，將無法達到預期的效果。且由於吸附反應會放出熱量，因此當除濕輪的溫度增加時，吸附速率將會下降，使乾燥效率降低。為了避免上述情況，以下將對 6 種流速下 10、30、60 PPI 之除濕輪進行模擬分析，了解氣流的(1)流速分佈(2)氣壓分佈(3)氣溫分佈。6 種流速如表 9 所示。

表 9、流速條件

|        | 製程氣流流速, $v_p$ (m/s) | 再生氣流流速, $v_r$ (m/s) |
|--------|---------------------|---------------------|
| case 1 | 2.5                 | 0.5                 |
| case 2 | 5                   | 3                   |
| case 3 | 7.5                 | 5.5                 |
| case 4 | 10                  | 8                   |
| case 5 | 12.5                | 10.5                |
| case 6 | 15                  | 13                  |

為了瞭解乾燥系統的流速、壓力與溫度分佈，以下將針對製程入口風管的 y-z 平面、製程入口側的除濕輪表面、除濕輪中央的 y-z 平面、製程出口側的除濕輪表面及製程出口風管的 y-z 平面進行分析，並分別以 A( $x = -45$  mm)、B( $x = 0$  mm)、C( $x = 100$  mm)、D( $x = 200$  mm)與 E( $x = 245$  mm)表示上述平面。

此外為了對製程氣流( $v_p$ )及再生氣流( $v_r$ )特性進行分析，選用製程氣流的進氣與出氣風管間的區域(圖 11)分析，對於再生氣流也選用進氣口及出氣口間的區域(圖 12)進行研究。x 軸表示除濕輪的軸向方向，0-200 mm 代表除濕輪體所放置的位置，-45-0 mm 以及 200-245 mm 的區域為氣密介面及風管中的數據，其中除濕輪與風管的距離為 45 mm。

# TOLUENE-NITROGEN SYSTEM

1.50 atm pressure

Enthalpy datum : liquid toluene 0.0°C, 0.00893 atm  
dry nitrogen 0.0°C, 1.00 atm

To obtain true enthalpy add enthalpy deviation to enthalpy at saturation

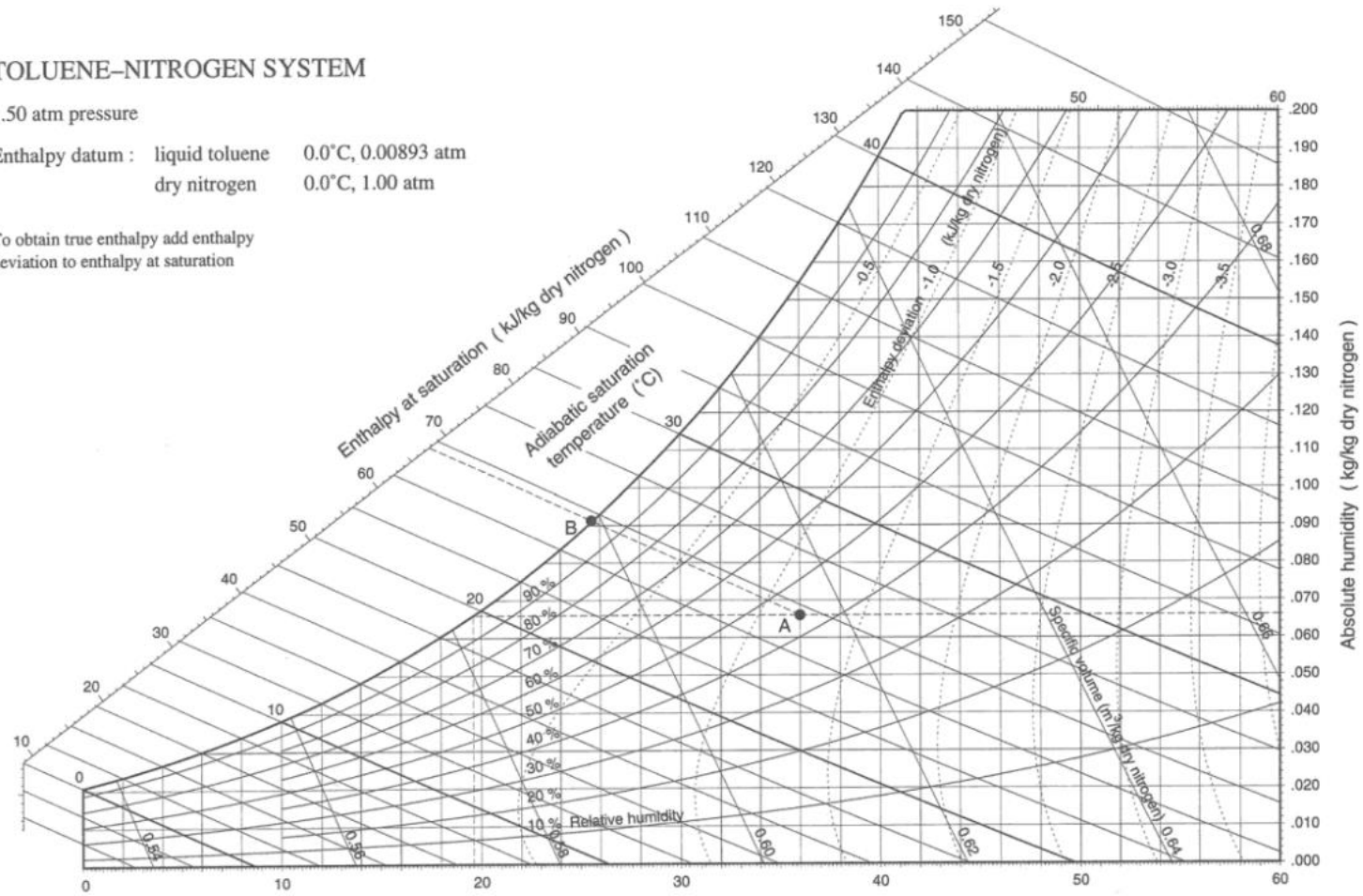


圖 10、濕度圖[34]

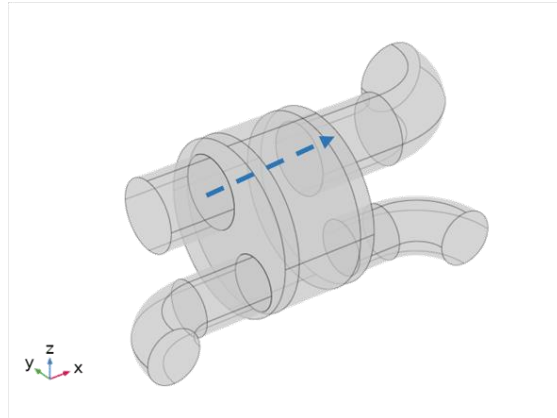


圖 11、製程氣流通過位置

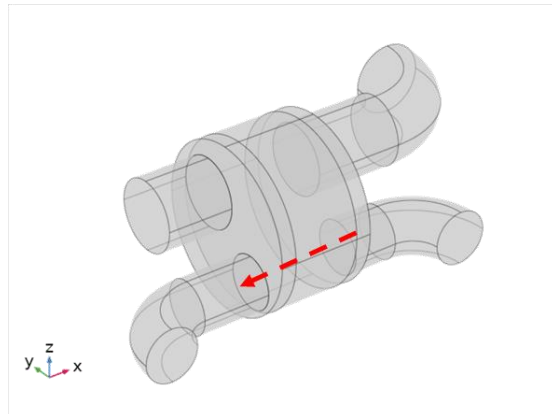


圖 12、再生氣流通過位置

## 1. 10 PPI 除濕輪

在 case 1 的流速條件下，控制再生氣流出口流速為  $v_r = 0.5 \text{ m/s}$ ，從壓力分佈圖(圖 13)中可以看到 A 和 E 面的再生風管壓力相近，因此流速較低，且製程風管的壓力較低，因此再生氣流會利用風管與除濕輪間的空間流向製程氣流。製程出口的壓力則明顯低於入口，因此氣流將穿過除濕輪，且由於壓力小於再生風管，所以不會受到再生風管影響，將直接流向出口。此外製程出口的壓力最低，因此對氣流的吸引力較強，故從流速分佈中可以看到 E 面的製程氣流流速最高。

另外也可從流速分佈(圖 14、圖 15)了解除濕輪對氣流流速的影響，可以發現氣流通過除濕輪前後速度並無明顯改變，說明 10 PPI 的除濕輪對氣流的作用有限，因此氣流可順利通過。從溫度分佈(圖 16)中可以看到即使 case 1 的流速較慢，再生出口溫度也接近 70 度，因此可以證明再生氣流( $v_r$ )已穿透除濕輪，且越靠近再生入口，截面中的高溫面積愈高，表示再生氣流受到製程氣流的吸引，因此會將熱量帶進製程氣流，使其溫度上升。

在 case 2 的流速條件下，控制製程氣流出口流速為  $v_p = 5 \text{ m/s}$ ，再生氣流出口流速為  $v_r = 3 \text{ m/s}$ ，從壓力分佈圖中可以看到氣流入口與出口具有明顯的壓力差，因此相較於 case 1，此時再生氣流較不會

流向製程氣流，因此 A 和 E 面的高溫面積也下降，表示再生氣流將流向出口，而不會與製程氣流產生交互作用，另外可以發現再生氣流通過 B 和 C 面時溫度較高，因此可以確認若再生氣流流速過低，則製程氣流與再生氣流的交互作用較強，當再生氣流流速上升後，則可以順利通過除濕輪，且較不易受製程氣流影響，因此熱量較不會傳遞至其他區域。

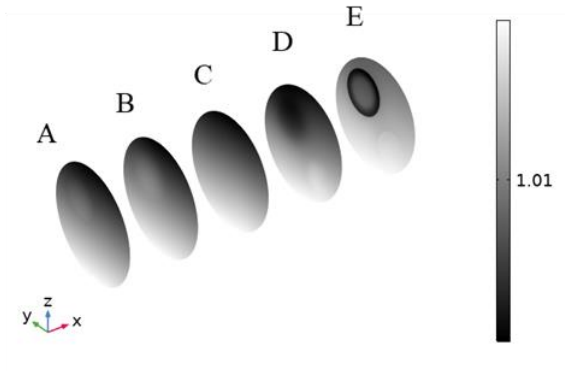
在 case 3 中，製程氣流出口流速為  $v_p = 7.5 \text{ m/s}$ ，再生氣流出口流速為  $v_r = 5.5 \text{ m/s}$ ，比對壓力分佈與流速分佈後，可以看到當入口與出口的壓力差愈大，流速則愈快，由於再生氣流快速通過除濕輪，因此熱量僅傳遞至較小的範圍，不會使其他區域溫度升高。而在 case 4-case 6 的流速條件下，由於流速增加，因此高溫區域較小，且氣流的流動方向不再隨流速增加而變化，因此溫度分佈也不再改變，說明此時氣流流速不再影響溫度分佈。

10 PPI 除濕輪對氣流影響較小，氣流皆可通過除濕輪，但如果再生氣流流速過低，則容易被另一道氣流吸引，兩道氣流間的交互作用較大，進而使氣流特性改變，除濕輪中溫度升高的範圍較大，因此再生氣流乾燥除濕輪的效果較好。增加流速則可降低交互作用，並使高溫區域更集中，此時再生氣流對除濕輪的乾燥效率將會下降。

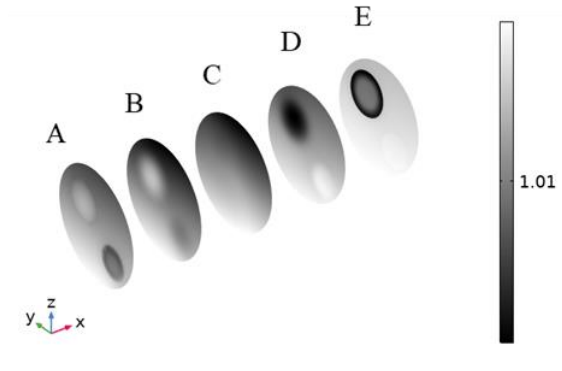
圖 17~20 中， $x$  軸座標表示除濕輪的軸向方向， $x = -45 \text{ mm}$  至  $x = 0$  與  $x = 0$  至  $x = 245 \text{ mm}$  的位置為風管與除濕輪間的區域，製程氣流與再生氣流較易在此處出現交互作用， $x = 0$  至  $x = 200 \text{ mm}$  則為除濕輪的位置，製程氣流的流動方向為  $x = -45 \text{ mm}$  至  $x = 245 \text{ mm}$ ，再生氣流則相反，由  $x = 245 \text{ mm}$  流向  $x = -45 \text{ mm}$ 。

從流速分佈中可以看出，製程氣流( $v_p$ )與再生氣流( $v_r$ )通過 10 PPI 之除濕輪時，流速受到較小的影響，最多約下降  $2 \text{ m/s}$ ，由於氣流易通過除濕輪，製程氣流的溫度幾乎不改變，始終維持  $25^\circ\text{C}$ ，而再生氣流的溫度則會隨流速而改變，當流速高時，再生出口的溫度與入口的溫度較接近，流速下降後，再生出口的溫度則較低。在 case 1 的條件下，由於再生氣流流速( $v_r$ )過低，較難通過除濕輪，且易受到製程氣流影響，除濕輪的溫度明顯降低，在靠近出口處除濕輪最低溫可達到  $62^\circ\text{C}$ ，然而製程氣流對最底部的除濕輪影響較小，因此再生氣流溫度仍維持較高的狀態，當其通過除濕輪流向再生出口時，則會使再生氣流溫度上升至  $67^\circ\text{C}$ 。流速增加後，有較多的再生氣流可以通過除濕輪，此時再生氣流較不易受製程氣流影響，溫度皆大於  $67^\circ\text{C}$ 。

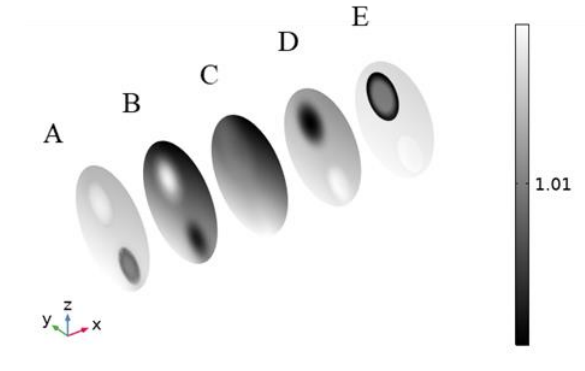
case 1



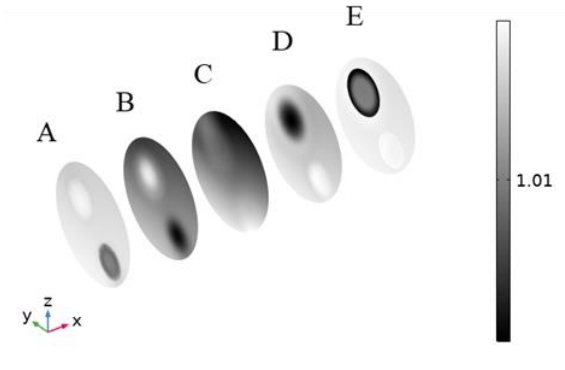
case 2



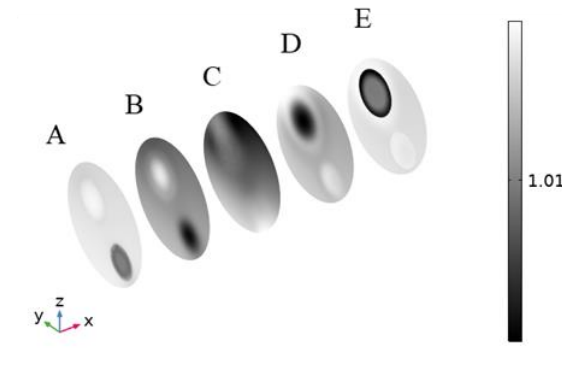
case 3



case 4



case 5



case 6

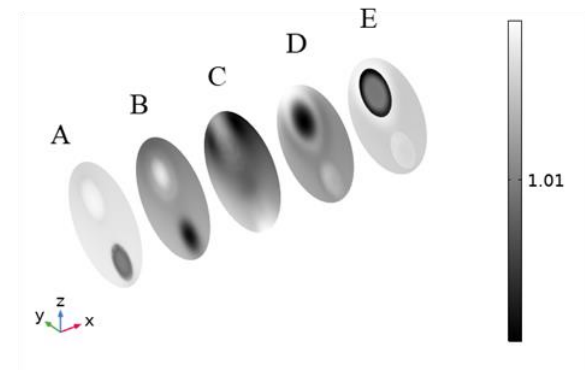
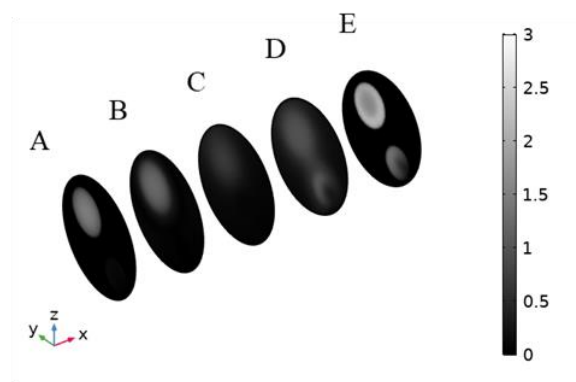
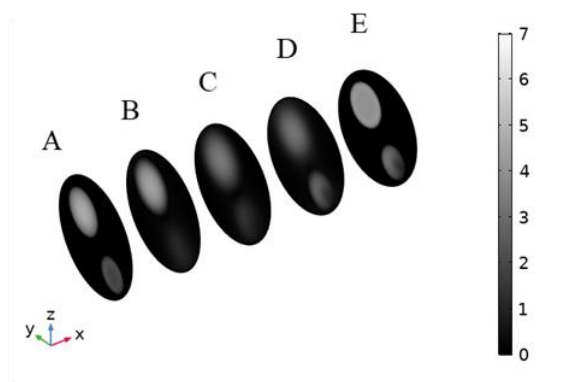


圖 13、10 PPI 除濕輪壓力(bar)分佈

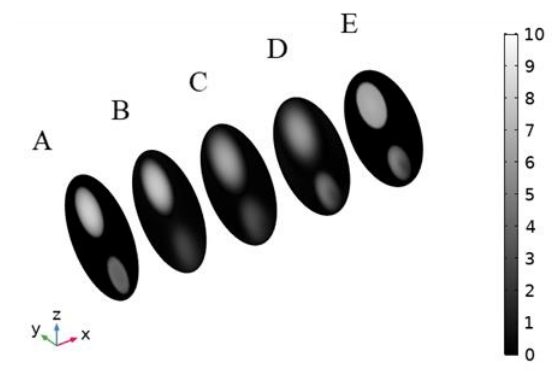
case 1



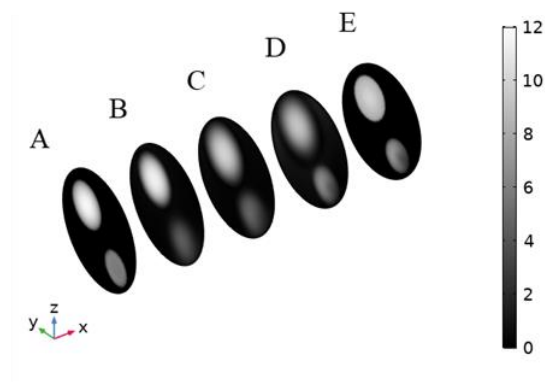
case 2



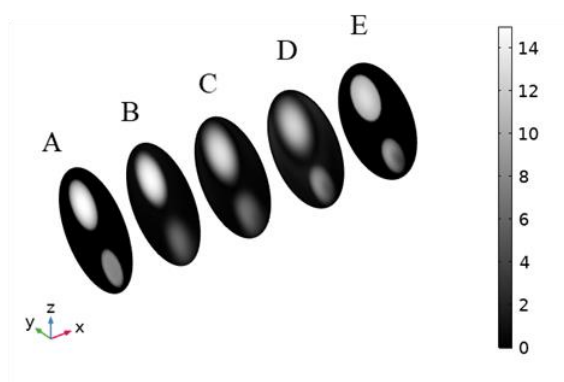
case 3



case 4



case 5



case 6

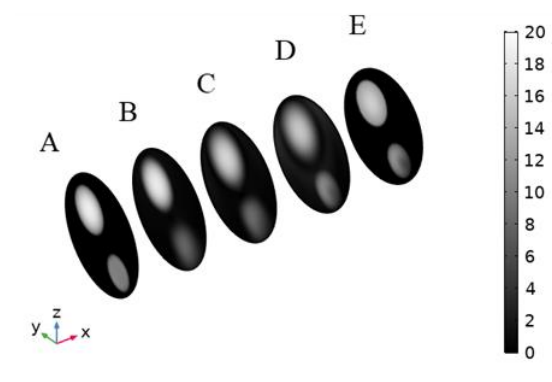
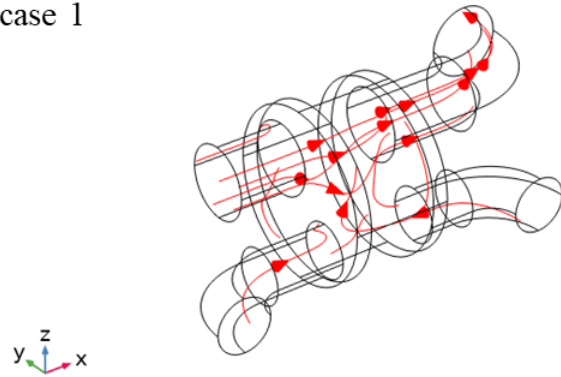
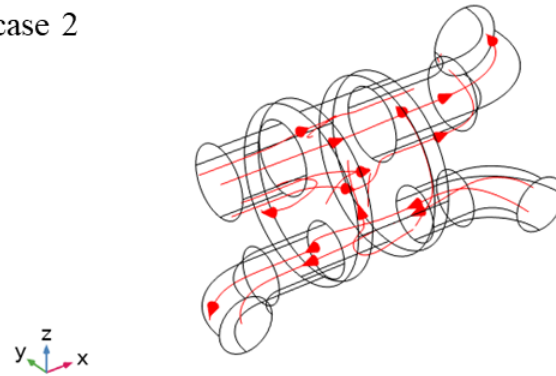


圖 14、10 PPI 除濕輪速度(m/s)分佈

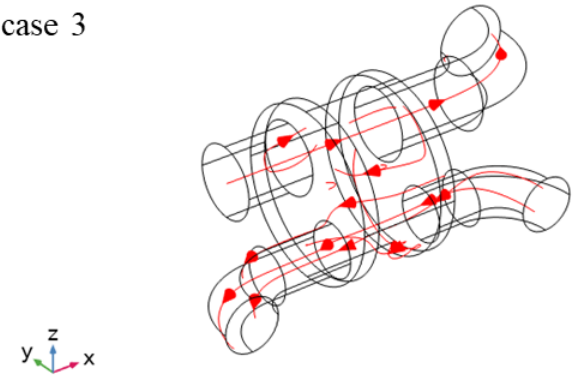
case 1



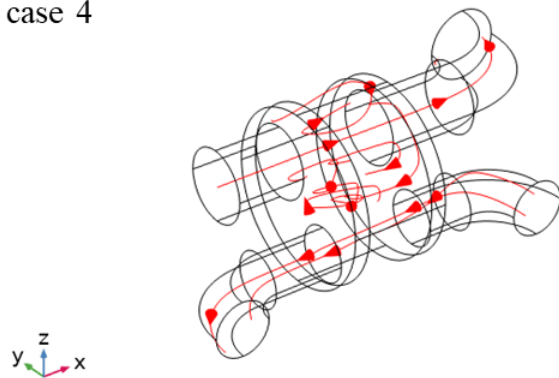
case 2



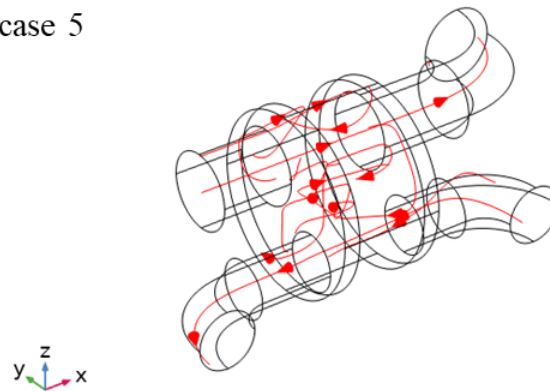
case 3



case 4



case 5



case 6

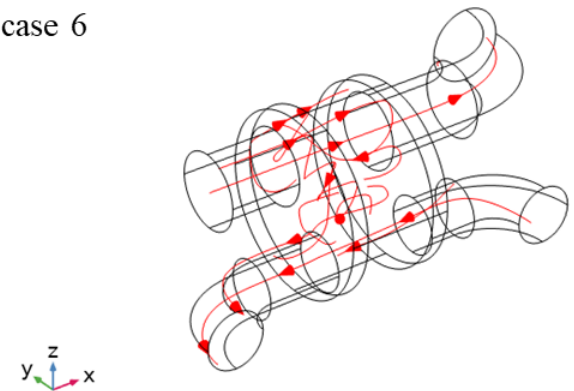
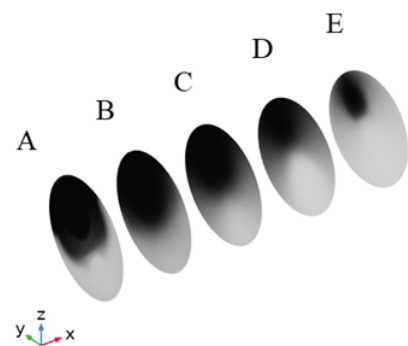
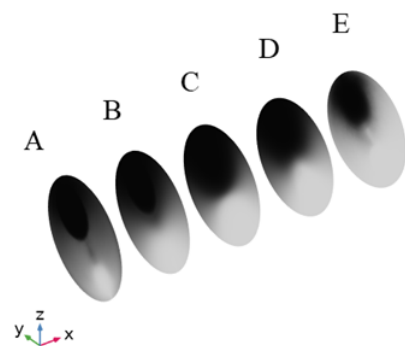


圖 15、10 PPI 除濕輪速度場分佈

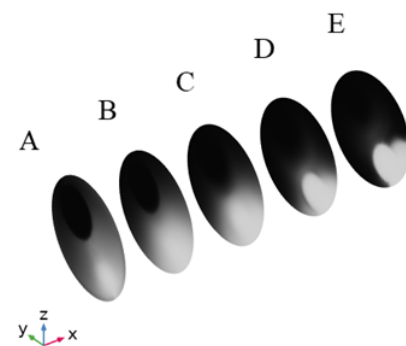
case 1



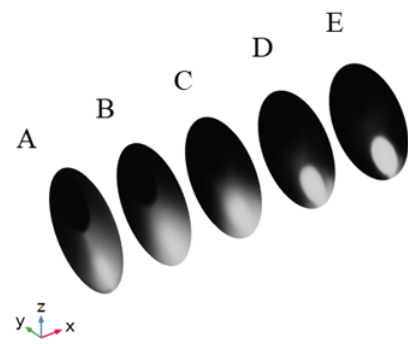
case 2



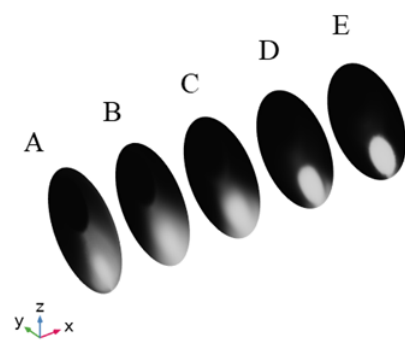
case 3



case 4



case 5



case 6

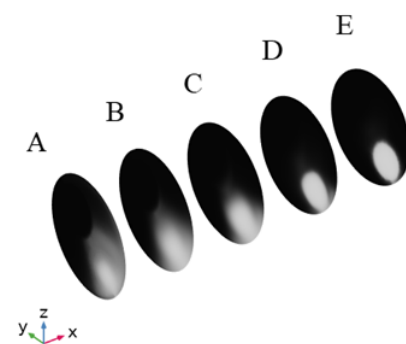


圖 16、10 PPI 除濕輪溫度(°C)分佈

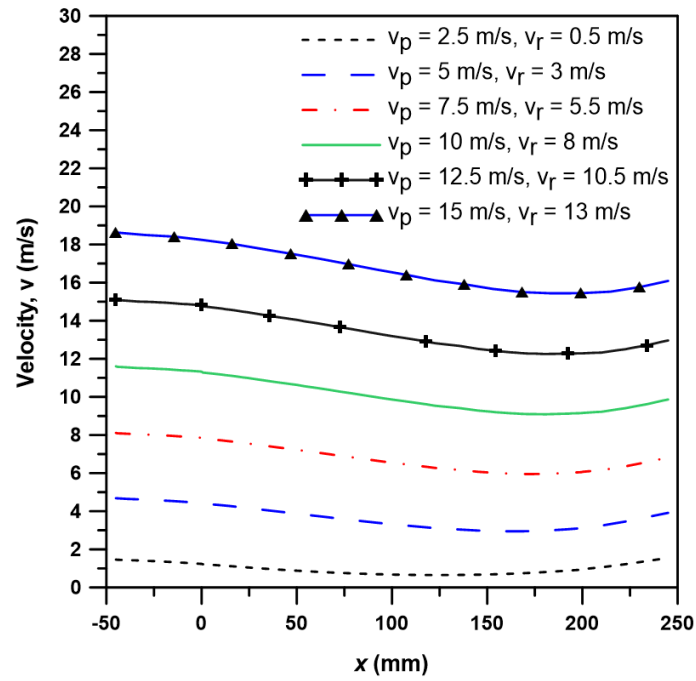


圖 17、10 PPI 除濕輪製程氣流流速分佈

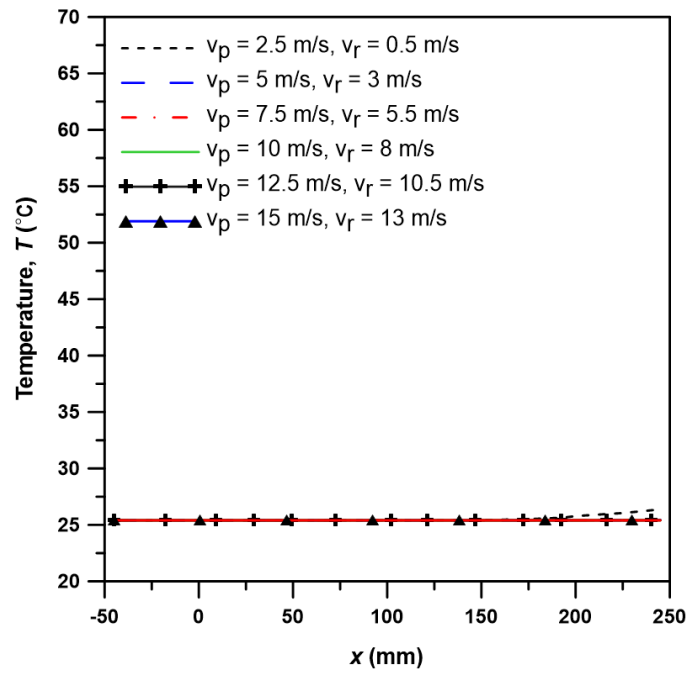


圖 18、10 PPI 除濕輪製程氣流溫度分佈

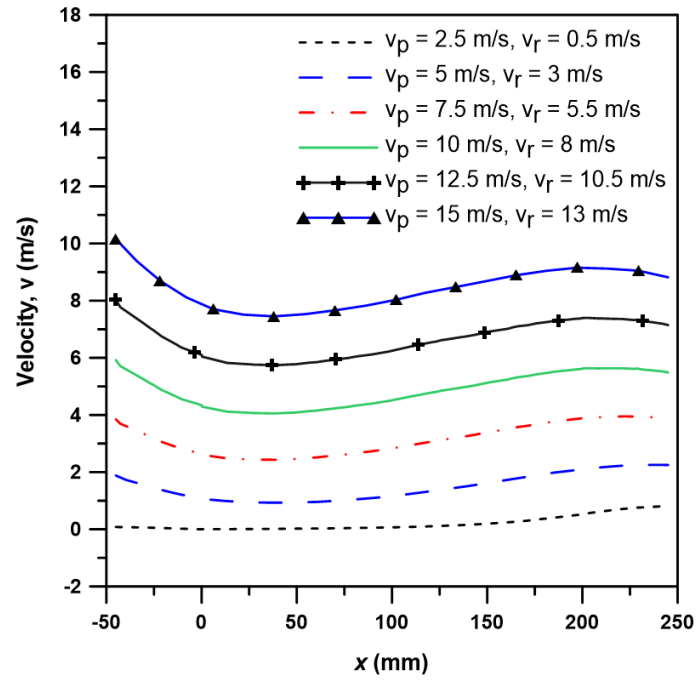


圖 19、10 PPI 除濕輪再生氣流流速分佈

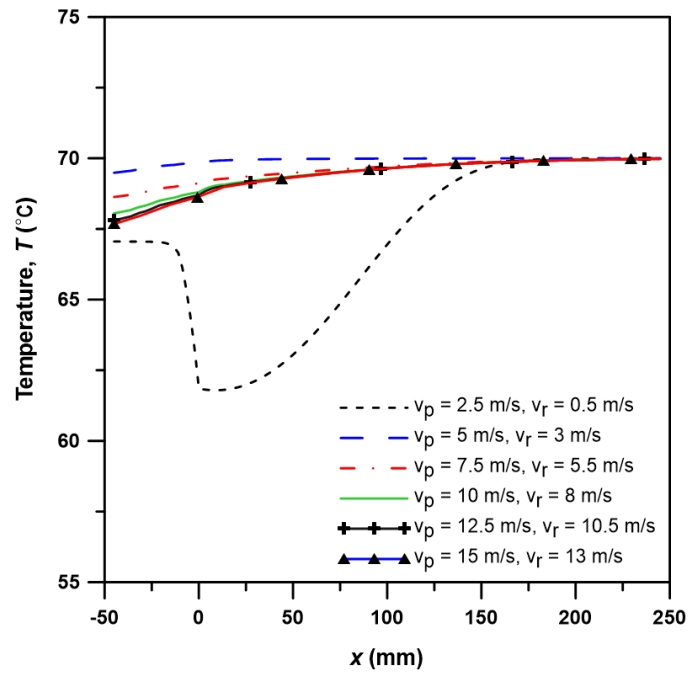


圖 20、10 PPI 除濕輪再生氣流溫度分佈

## 2. 30 PPI 除濕輪

圖 21~24 為除濕輪之壓力場、速度場及溫度場分布圖。與氣流通過 10 PPI 除濕輪的流速分佈(圖 13)與流動方向(圖 14)相比，30 PPI 的除濕輪明顯對通過的氣流施加較大的阻力，使氣流較難通過，因此除濕輪內的流速降低許多，當氣流較難通過除濕輪時，則會改變流動方向，較容易從入口流向同一側的出口，此時高溫的再生氣流流向製程出口，導致製程出口周圍的溫度升高。再生氣流流速( $v_r$ )較低時，較難穿過除濕輪，因此愈靠近再生出口，除濕輪溫度愈低，從溫度分佈中也可看到製程出口周圍的高溫區較大，當流速增加後，再生氣流才可以通過除濕輪，流向製程出口的氣流減少，氣流間的交互作用較小，因此製程出口周圍的溫度降低，而除濕輪的溫度將會增加。

吸附為放熱反應，根據勒沙特列原理，降低溫度將有助於吸附現象，提高溫度則有利於脫附，因此除濕輪中的溫度分佈將會影響除濕效果。而轉輪式乾燥機是利用除濕輪吸附製程氣流中的水分，再藉由再生氣流將除濕輪中的水分帶走，使除濕輪內的水始終小於氧化鋁的吸附容量，若要使乾燥機具備良好的除濕效果，須確保具有充足的低溫與高溫區域，若吸附速率與脫附速率相同時，則高溫與低溫區域所占體積相同可使乾燥機具備較佳的除濕能力。

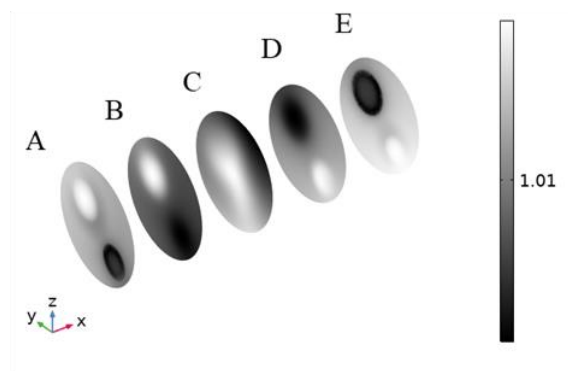
由氣流通過 10 PPI 除濕輪後的溫度分佈可以發現，流速較低時，低溫與高溫區域的體積較接近，因此吸附與脫附的水分相近，有助於提高除濕輪的乾燥效果，然而當流速上升後，低溫區域的體積增加，高溫區域的體積則下降，此時吸附的範圍大於脫附的範圍，難以即時去除除濕輪中的水分，故除濕效果將會下降。相反地，氣流通過 30 PPI 之除濕輪的流速較低時，除濕輪內的低溫區域較多，吸附效果大於脫附，提高流速後，高溫區域逐漸增加，此時脫附能力上升，再生氣流較能帶走除濕輪中的水分，使其重複利用，達到較好的除濕效率。經由研究結果可以發現流速低的條件下，使用 10 PPI 的除濕輪具有較好的乾燥效果，提高流速後，則較適合使用 30 PPI 之除濕輪。

圖 25-28 中， $x$  軸座標表示除濕輪的軸向方向， $x = -45 \text{ mm}$  至  $x = 0$  與  $x = 0$  至  $x = 245 \text{ mm}$  的位置為風管與除濕輪間的區域，製程氣流與再生氣流較易在此處出現交互作用， $x = 0$  至  $x = 200 \text{ mm}$  則為除濕輪的位置，製程氣流的流動方向為  $x = -45 \text{ mm}$  至  $x = 245 \text{ mm}$ ，再生氣流則相反，由  $x = 245$  流向  $x = -45 \text{ mm}$ 。

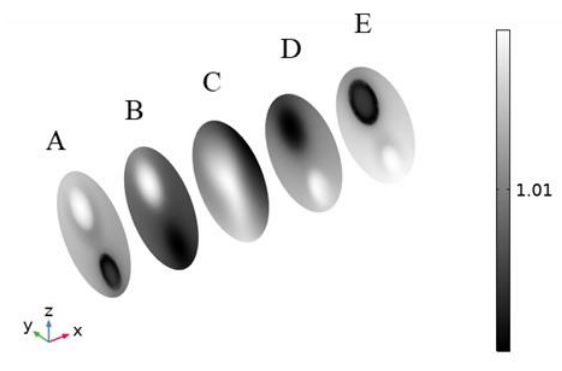
從製程氣流與再生氣流的流速分佈中，可以發現 30 PPI 之除濕輪對氣流的阻力較大，因此氣流進入除濕輪後，製程氣流流速( $v_p$ )最多會降低 8 m/s，再生氣流流速( $v_r$ )最多則會降低 6 m/s，當再生氣流

不易流向再生出口時，較易流至製程出口，此時若製程氣流流速( $v_p$ )較低，則熱量較會累積在製程出口處，導致溫度上升。在 case 1 的條件下，再生氣流流速過低，通過除濕輪的氣體較少，使除濕輪的溫度較低，因此除濕輪在靠近再生出口的位置溫度為 33°C，明顯低於入口處的 70°C，另外可發現在  $x = 0$  mm 的位置溫度快速降低，說明再生氣流一流出除濕輪，即受製程氣流影響，溫度將減少 3°C 至 30°C。

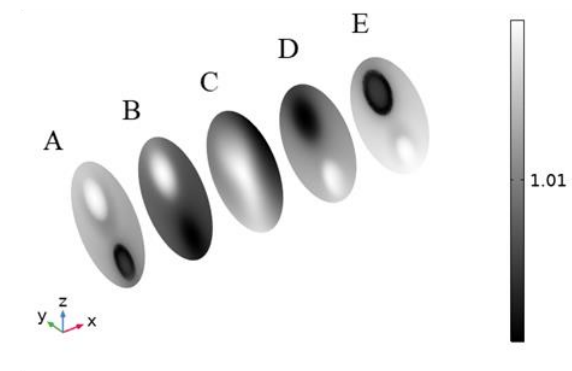
case 1



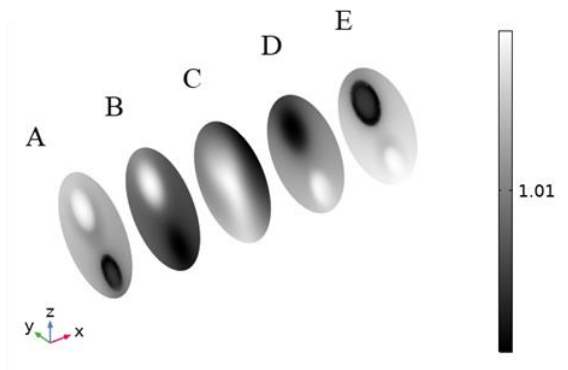
case 2



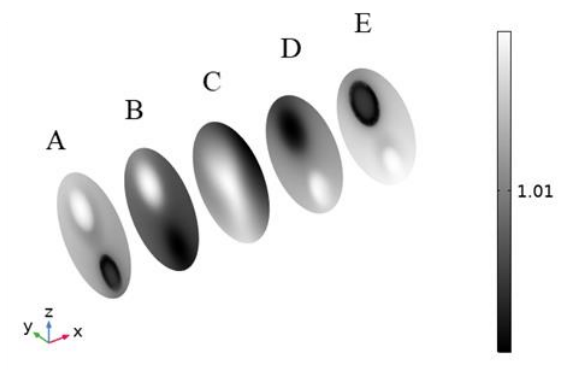
case 3



case 4



case 5



case 6

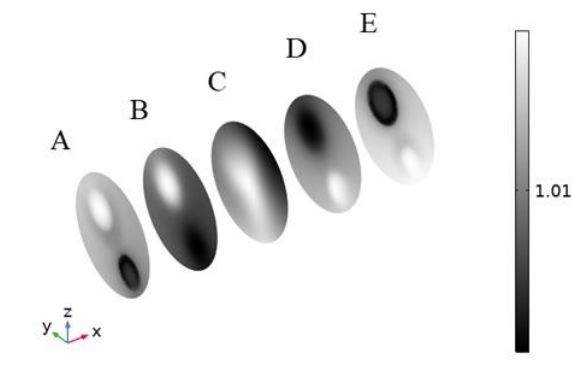
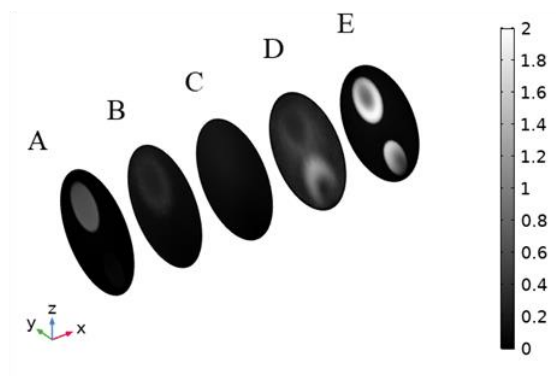
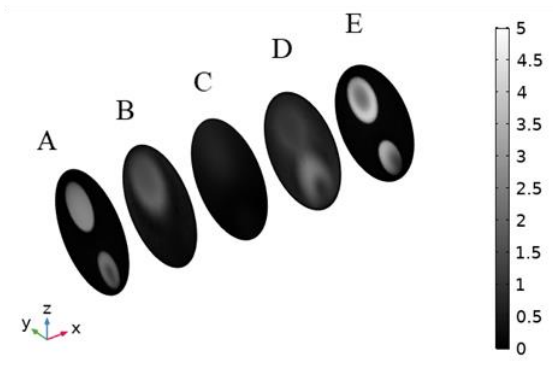


圖 21、30 PPI 除濕輪壓力(bar)分佈

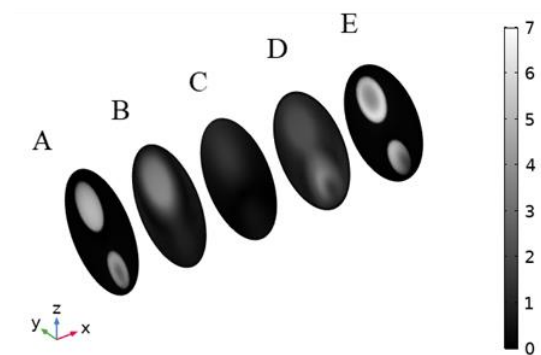
case 1



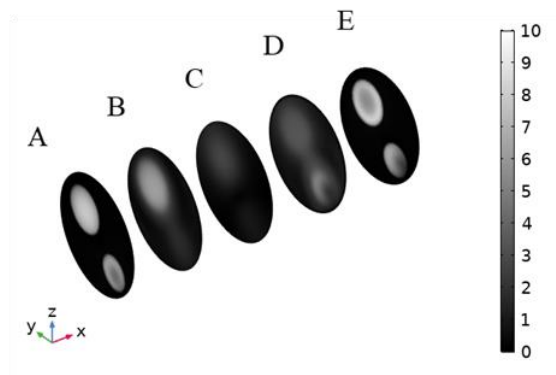
case 2



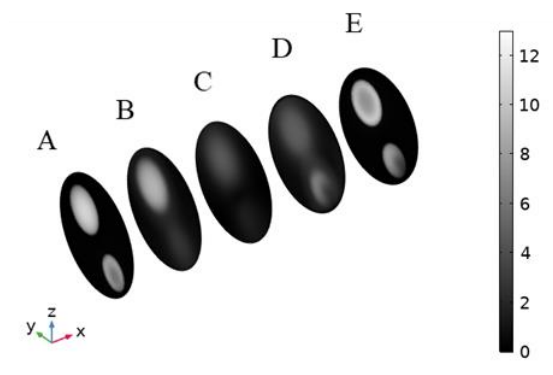
case 3



case 4



case 5



case 6

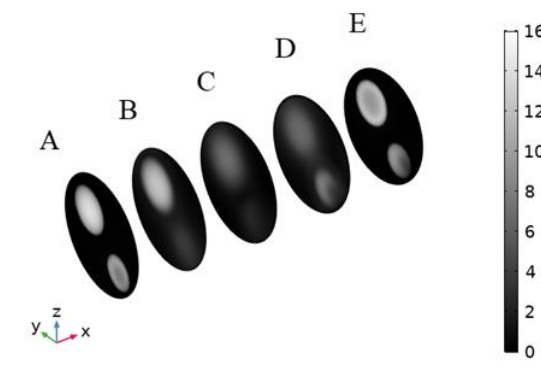
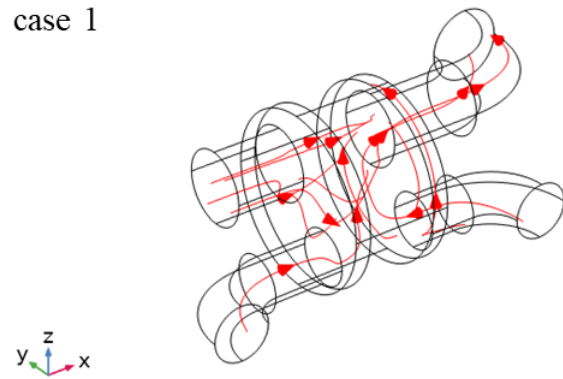
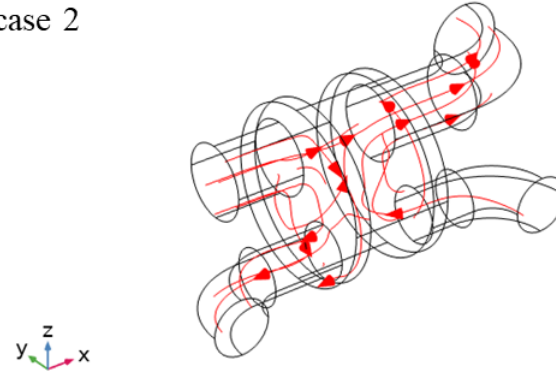


圖 22、30 PPI 除濕輪速度(m/s)分佈

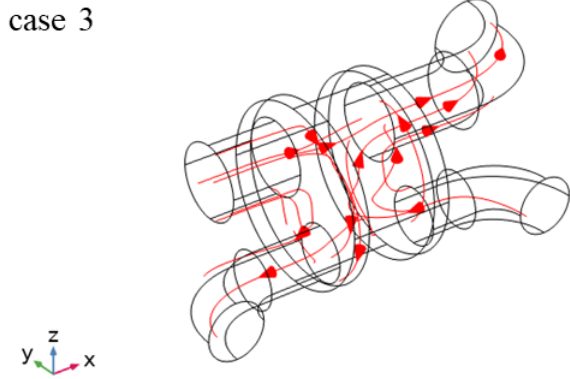
case 1



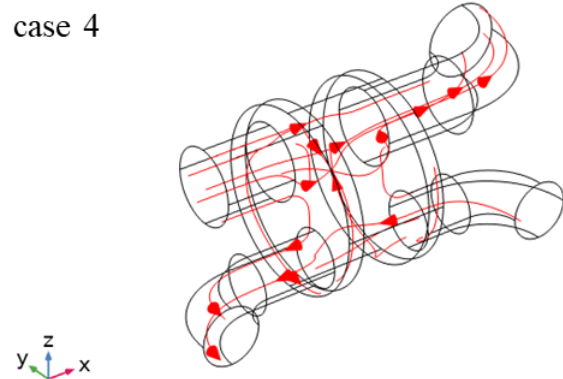
case 2



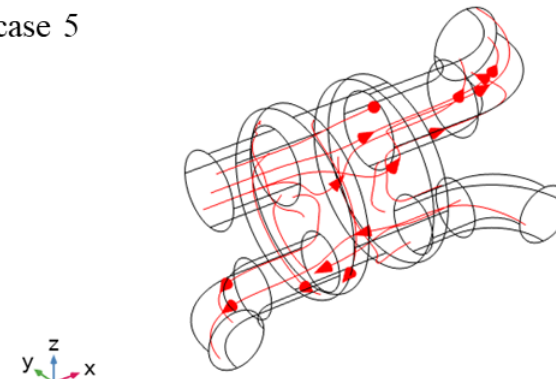
case 3



case 4



case 5



case 6

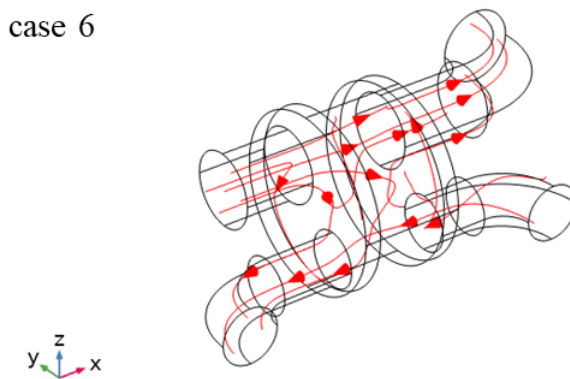
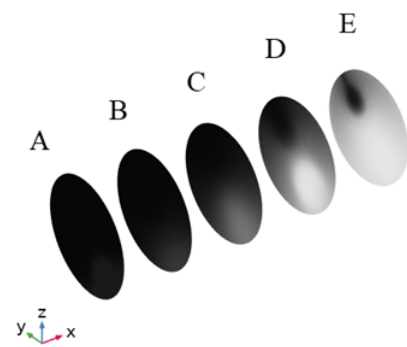
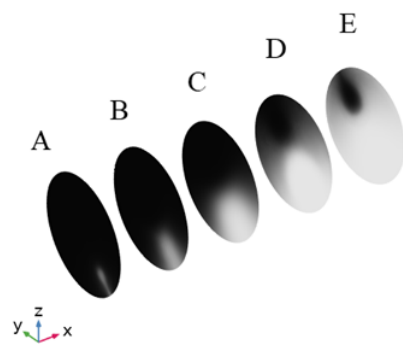


圖 23、30 PPI 除濕輪速度場分佈

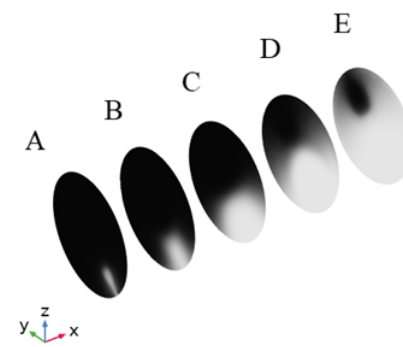
case 1



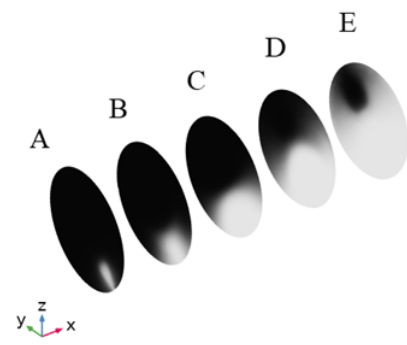
case 2



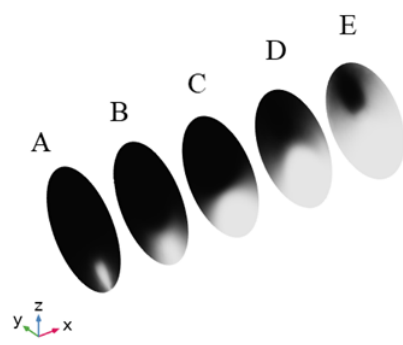
case 3



case 4



case 5



case 6

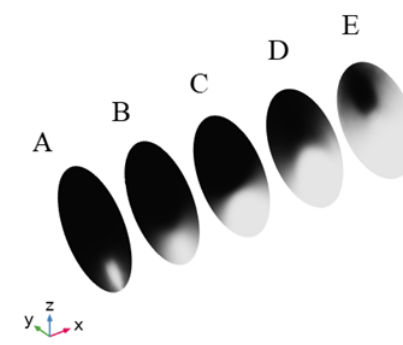


圖 24、30 PPI 除濕輪溫度(°C)分佈

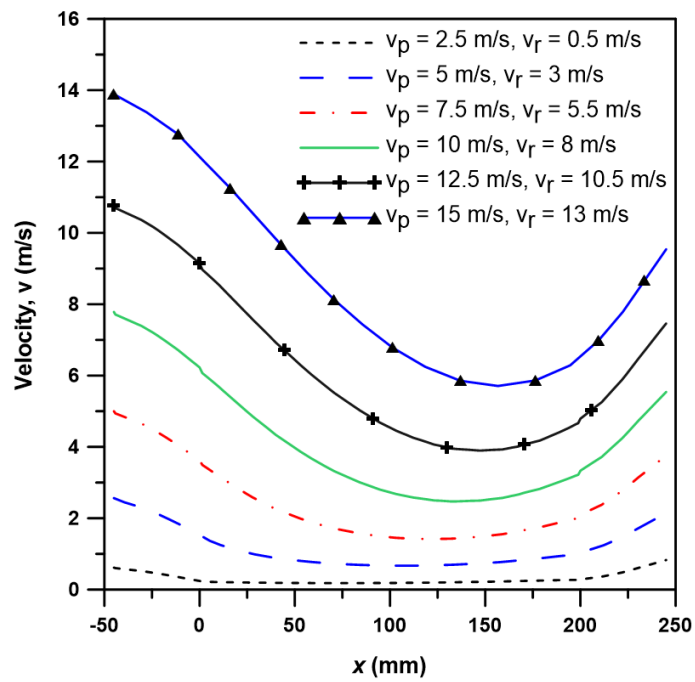


圖 25、30 PPI 除濕輪製程氣流流速分佈

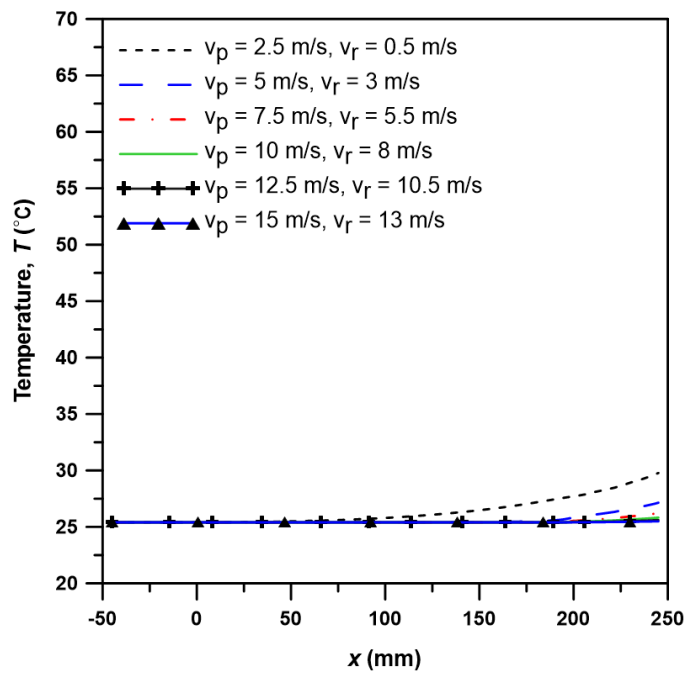


圖 26、30 PPI 除濕輪製程氣流溫度分佈

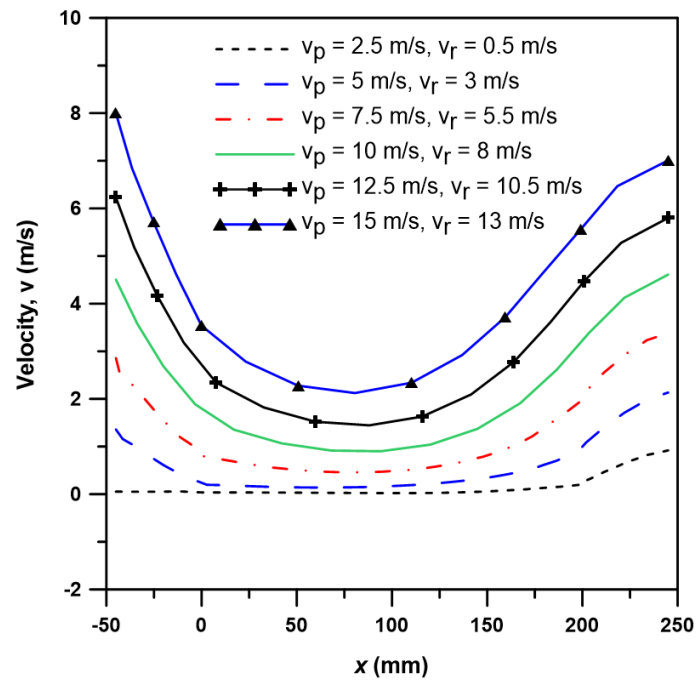


圖 27、30 PPI 除濕輪製程氣流流速分佈

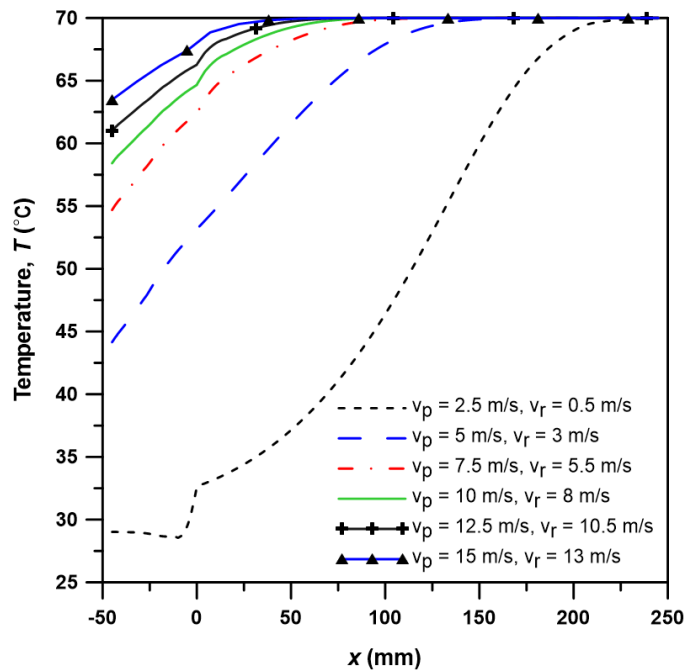


圖 28、30 PPI 除濕輪製程氣流溫度分佈

### 3. 60 PPI 除濕輪

圖 29~32 為除濕輪之壓力場、速度場及溫度場分布圖。60 PPI 的除濕輪結構更複雜，孔洞小且分佈密集，由於孔洞的總表面積大，將對氣流產生較大的阻力，從流速分佈中可以發現，氣流進入除濕輪後，流速下降幅度較大，由於氣流不易通過除濕輪，因此較偏好流向同側的氣流出口，因此相較於 30 PPI 除濕輪的溫度分佈(圖 24)，製程出口的溫度更高。

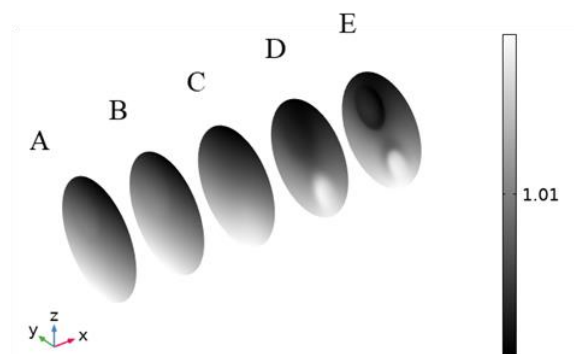
由於氣流難以通過除濕輪，即使流進除濕輪也容易轉而流向另一道氣流，並從另一道氣流的出口流出，因此可以從 case 1 的溫度分佈圖中發現，當再生氣流流速( $v_r$ )較慢時，熱量較會擴散至流道周圍，而非集中於再生氣流流道，使製程氣流溫度受到影響導致溫度升高。當氣流流速增加後，熱量將集中在再生氣流流道，另外可以發現 case 2 中 B 面的溫度下降，說明製程氣流進入除濕輪後受到阻力，因此也會轉而流向再生氣流，當流速增加時則可以較快帶走熱量，使 B 面溫度下降。之後隨著流速增加，氣流更有機會通過除濕輪，因此再生出口的溫度也會隨之上升。

圖 33-36 中， $x$ 軸座標表示除濕輪的軸向方向， $x = -45$ 至 $x = 0$ 與 $x = 0$ 至 $x = 245$  mm 的位置為風管與除濕輪間的區域，製程氣流

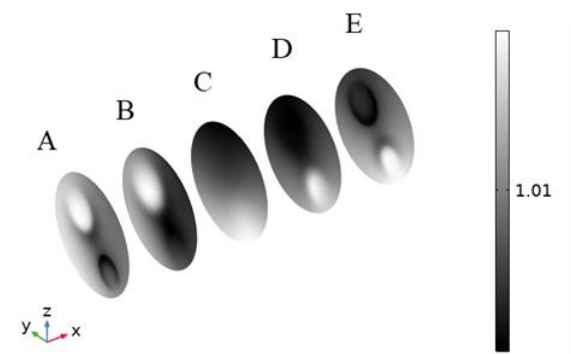
與再生氣流較易在此處出現交互作用， $x = 0$ 至 $x = 200$  mm 則為除濕輪的位置，製程氣流的流動方向為 $x = -45$  mm 至 $x = 245$  mm，再生氣流則相反，由 $x = 245$  mm 流向 $x = -45$  mm。

在不同 case 的條件下，60 PPI 之除濕輪內的氣流流速皆小於 2 m/s，與 10、30 PPI 的除濕輪相比，氣流受到更大的阻力，說明當除濕輪孔徑分佈較密集時，孔洞分佈較密集，使除濕輪表面積增加並對氣流造成更大的阻力。由於再生氣流不易流至再生出口，此時將傾向流到製程出口，因此可以看到製程出口溫度大於製程入口之溫度，而增加製程出口流速有助於帶走氣流，故可發現製程出口流速( $v_p$ )較低時溫度較高，增加流速後溫度較低，與製程入口的溫度較接近。由再生氣流的溫度分佈則可發現，當再生氣流流速( $v_r$ )較低時，再生出口溫度也較低，流速較高時則溫度較高，與製程氣流之溫度分佈對照後，可以確認氣流流速低時，氣流將會流向同一側之出風口。且在 case 1 的條件下，再生氣流最難通過除濕輪，此時氣流將在除濕輪內停留較長時間，因此可以藉由熱傳導效應使除濕輪溫度上升，故除濕輪內的溫度變化幅度較低。

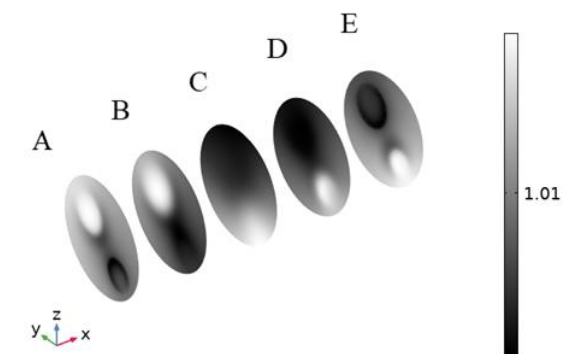
case 1



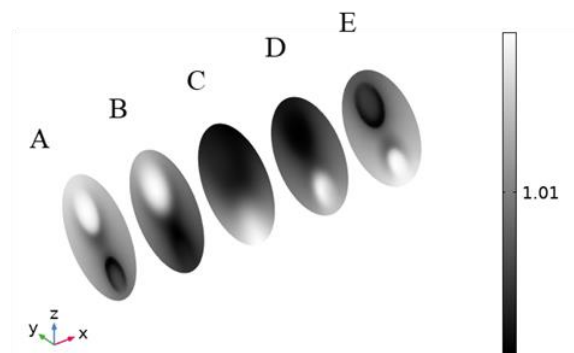
case 2



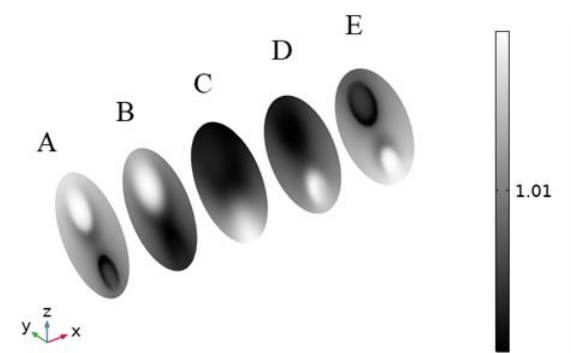
case 3



case 4



case 5



case 6

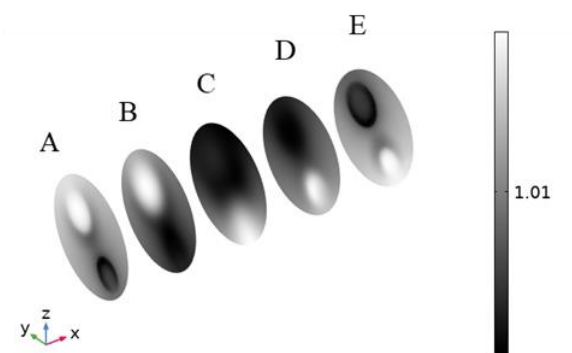
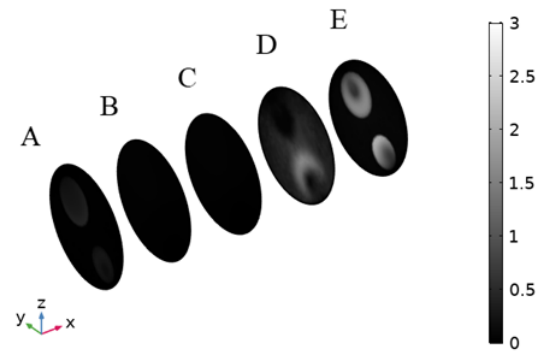
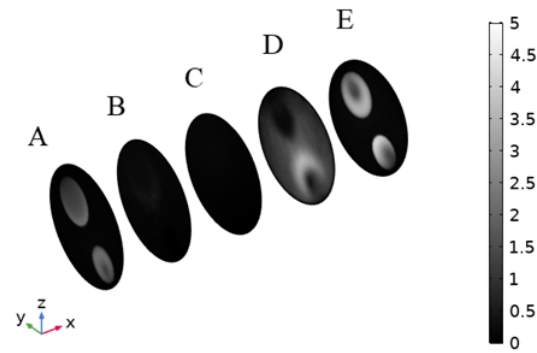


圖 29、60 PPI 除濕輪壓力(bar)分佈

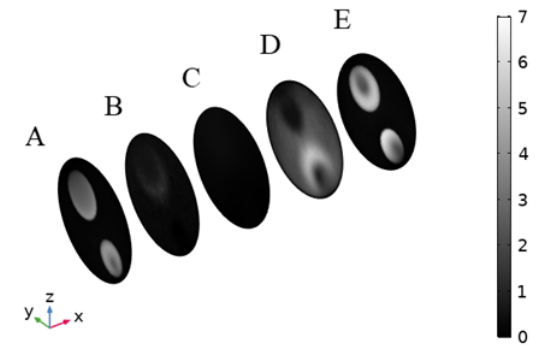
case 1



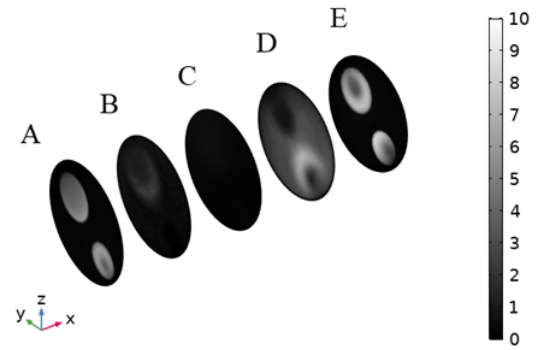
case 2



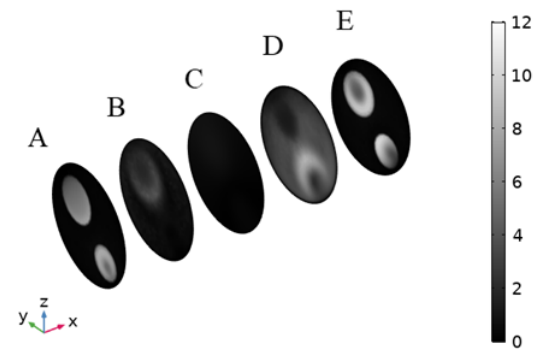
case 3



case 4



case 5



case 6

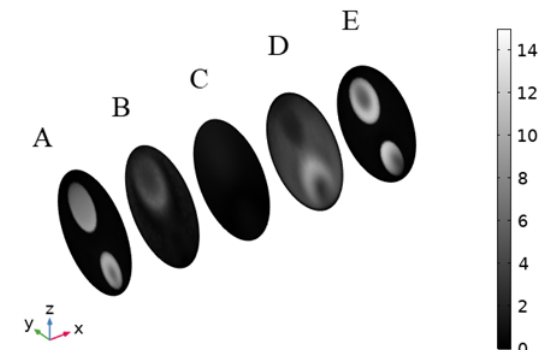
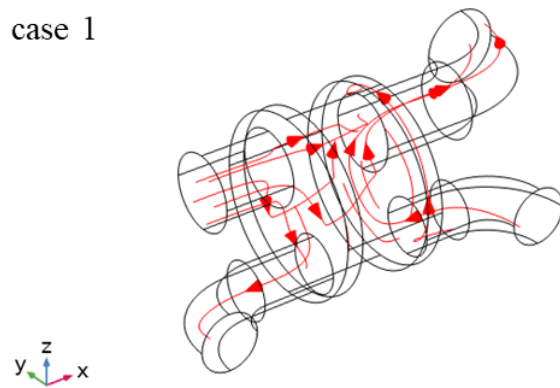
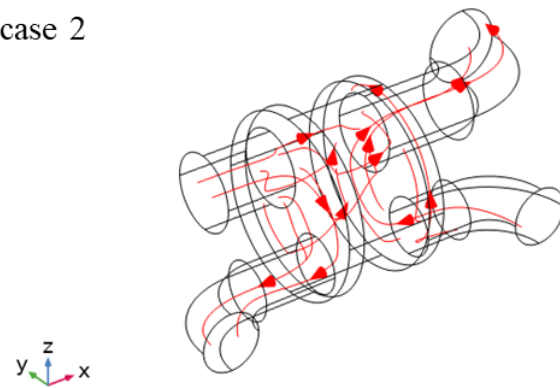


圖 30、60 PPI 除濕輪速度(m/s)分佈

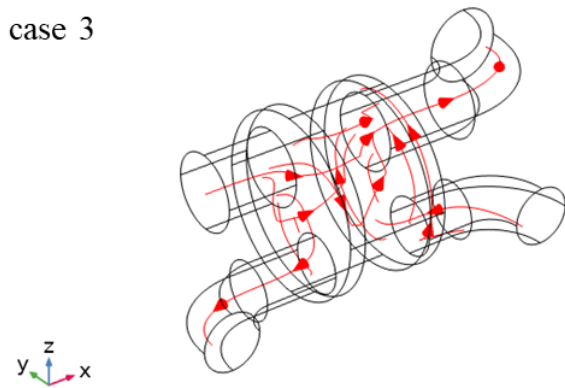
case 1



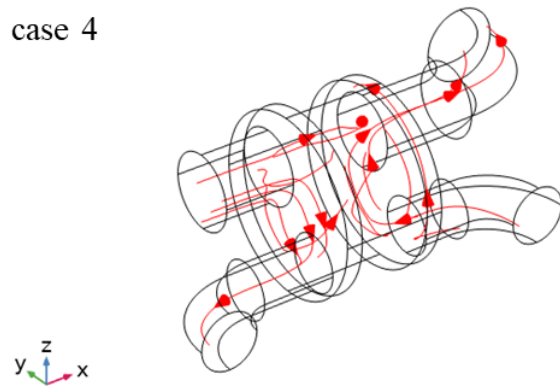
case 2



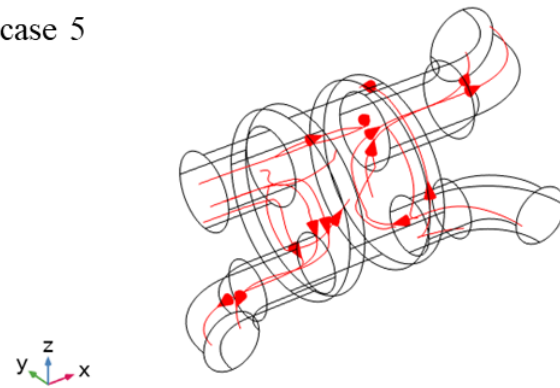
case 3



case 4



case 5



case 6

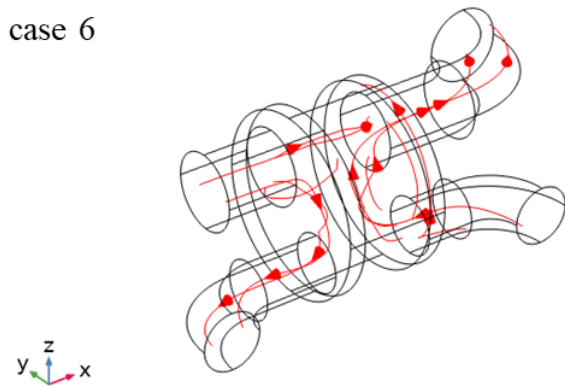
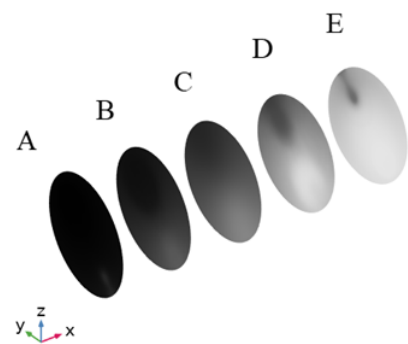
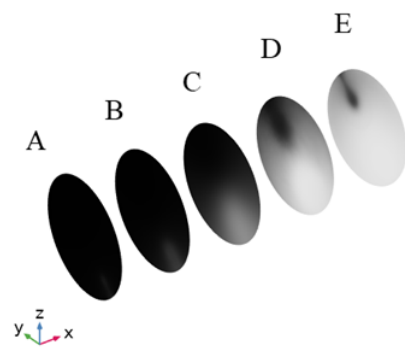


圖 31、60 PPI 除濕輪速度場分佈

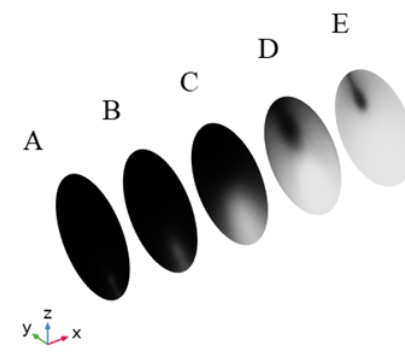
case 1



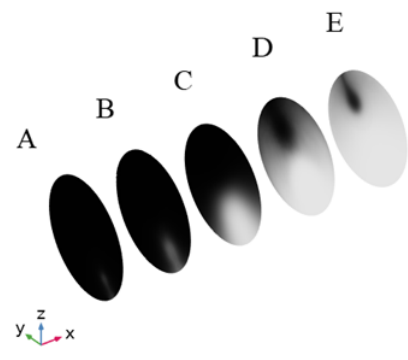
case 2



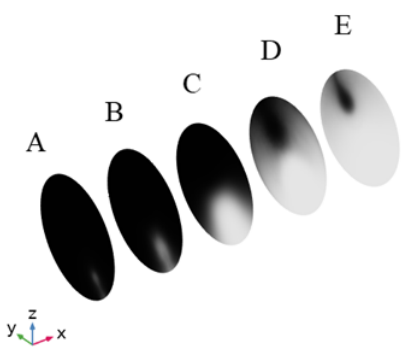
case 3



case 4



case 5



case 6

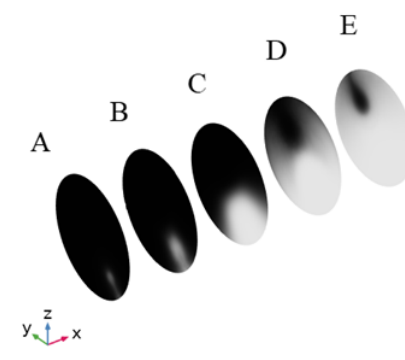


圖 32、60 PPI 除濕輪溫度(°C)分佈

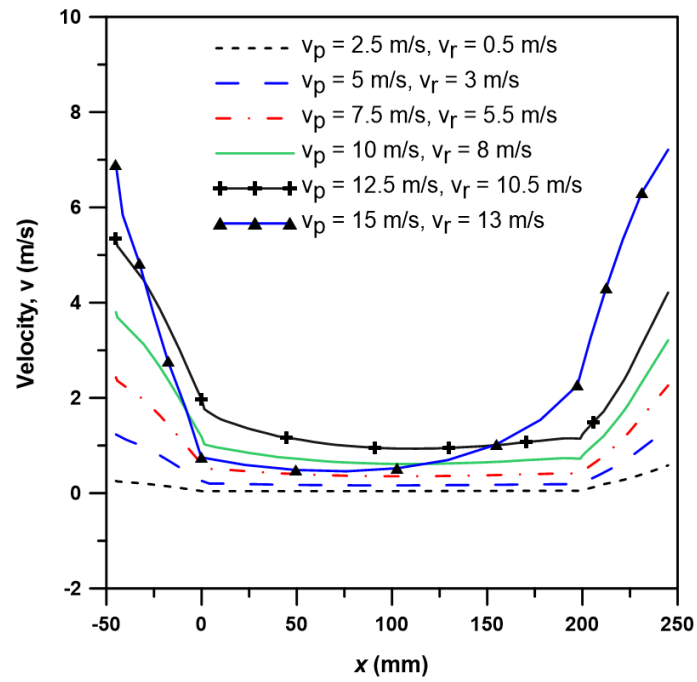


圖 33、60 PPI 除濕輪製程氣流流速分佈

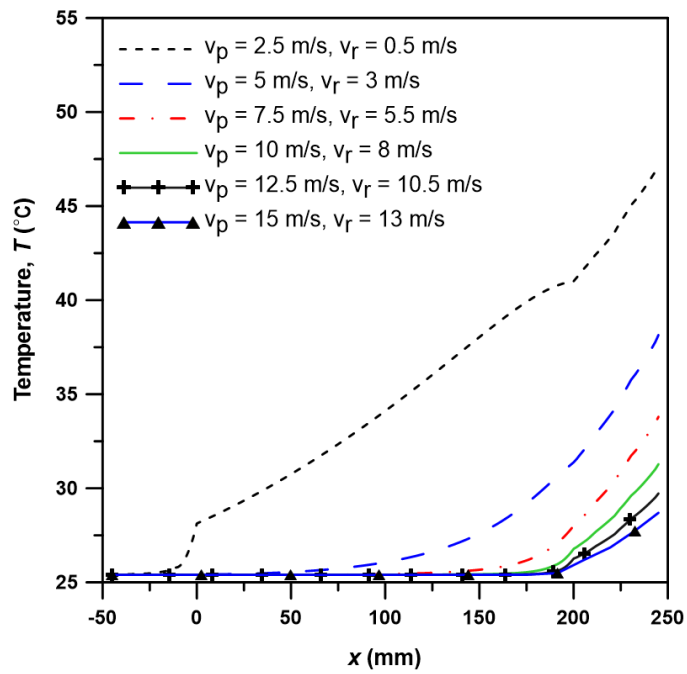


圖 34、60 PPI 除濕輪製程氣流溫度分佈

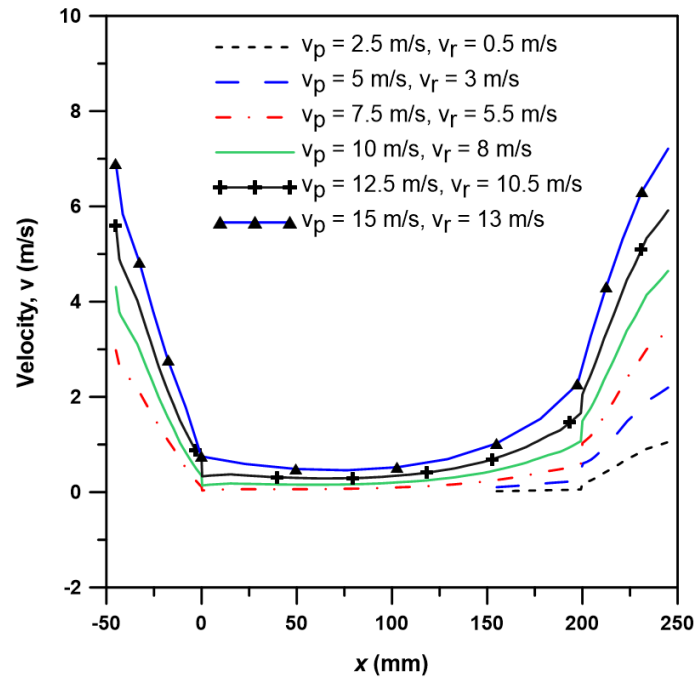


圖 35、60 PPI 除濕輪再生氣流流速分佈

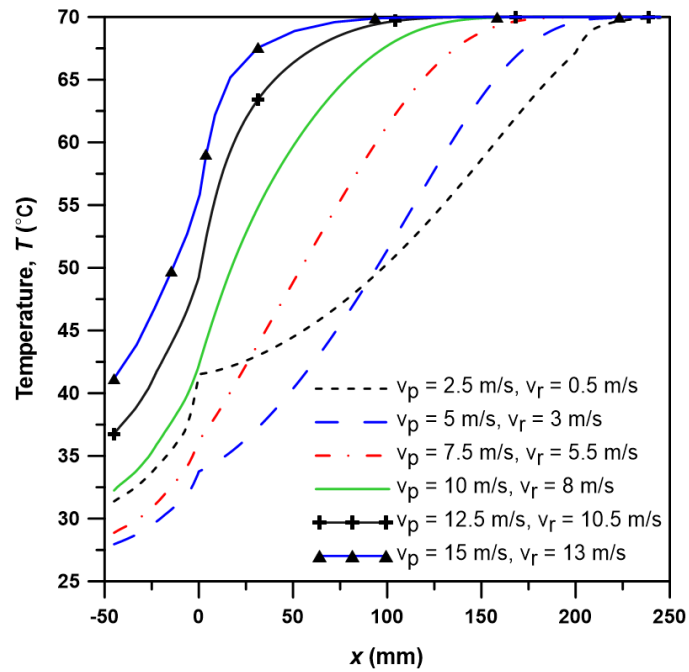


圖 36、60 PPI 除濕輪再生氣流溫度分佈

## 二、應力分析

在乾燥機中，除濕輪懸掛在軸承上，且藉由外部皮帶作用轉動，為了避免運作時輪體晃動及皮帶對輪體造成損壞，除濕輪周圍會被 304 不鏽鋼製成之封裝元件緊密固定，此時若接觸面積過小易導致應力過大，導致除濕輪損毀。為了降低應力對除濕輪的影響，本研究建立現有的除濕輪與封裝元件之模型，計算除濕輪外部元件與軸承裝配之應力場，之後將改變封裝元件之尺寸，並分析不同設計下的應力。尺寸設計如下：

表 10、支架尺寸設計

|   | 支架寬度(mm) | 支架厚度(mm) |
|---|----------|----------|
| a | 10       | 2        |
| b | 10       | 6        |
| c | 20       | 2        |
| d | 20       | 6        |

密封元件設計如圖 37 所示，藉由三根支架固定外側的除濕輪，直徑 50 mm 之除濕輪所使用的支架寬 10 mm、厚度則為 2 mm，除濕輪與密封元件的重量將由軸承負責支撐，在穩態條件下，應力分佈如圖 38a 所示，應力的最大值為  $31875.86 \text{ N/m}^2$ ，並出現在軸承兩側。

為了探討支架厚度對應力分佈之影響，將支架厚度增加至 6 mm，如圖 38b 所示，厚度增加後，最大應力值仍出現在軸承兩側，然而最大應力降至 29155.99 N/m<sup>2</sup>。

除了支架厚度，本研究將增加支架寬度至 20 mm，分別分析厚度為 2 mm 及 6 mm 下的應力分佈。如圖 38c 所示，當厚度為 2 mm 時，最大應力為 30787.55 N/m<sup>2</sup>，如圖 38d 所示，當厚度為 6 mm 時，最大應力為 30127.52 N/m<sup>2</sup>，由此可知，增加支架厚度並減少寬度可以降低最大應力值。

表 11、三根支架不同條件下之最大應力

|   | 支架寬度(mm) | 支架厚度(mm) | 最大應力(N/m <sup>2</sup> ) |
|---|----------|----------|-------------------------|
| a | 10       | 2        | 31875.86                |
| b | 10       | 6        | 29155.99                |
| c | 20       | 2        | 30787.55                |
| d | 20       | 6        | 30127.52                |

此外支架數量也將影響應力分佈，因此本研究將分析在兩根支架及四根支架的條件下，除濕輪及周圍元件之重量總和對軸承產生的最大附載，並針對表 10 中的四種條件進行應力分析。當支架數量為二時，應力分佈如圖 39 所示，在 a 尺寸時，最大應力為 30446.45 N/m<sup>2</sup>，b 尺寸為 27815.30 N/m<sup>2</sup>，c 尺寸為 30608.90 N/m<sup>2</sup>，d 尺寸則

為 29087.94 N/m<sup>2</sup>。

表 12、兩根支架不同條件下之最大應力

|   | 支架寬度(mm) | 支架厚度(mm) | 最大應力(N/m <sup>2</sup> ) |
|---|----------|----------|-------------------------|
| a | 10       | 2        | 30446.45                |
| b | 10       | 6        | 27815.30                |
| c | 20       | 2        | 30608.90                |
| d | 20       | 6        | 29087.94                |

穩態下之應力分佈如圖 40 所示，與三根支架相比，四根支架的最大應力將會增加，在 a 尺寸時，最大應力增至 37647.30 N/m<sup>2</sup>，b 尺寸為 33807.40 N/m<sup>2</sup>，c 尺寸為 38902.58 N/m<sup>2</sup>，d 尺寸則為 35375.73 N/m<sup>2</sup>。從圖 40 可發現與 y 軸平行的支架應力較小，此結果可說明其不具支撐的效果，反而將增加整體負載。

表 13、四根支架不同條件下之最大應力

|   | 支架寬度(mm) | 支架厚度(mm) | 最大應力(N/m <sup>2</sup> ) |
|---|----------|----------|-------------------------|
| a | 10       | 2        | 37647.30                |
| b | 10       | 6        | 33807.40                |
| c | 20       | 2        | 38902.58                |
| d | 20       | 6        | 35375.73                |

從上述結果可歸納出以下共同特點：

1. 減少支架數量可降低最大應力值。當支架數量多將造成軸承負載上升，進而增加最大應力值。
2. 在三種不同支架數量的條件下，支架寬度為 10 mm、厚度為 6 mm 時，最大應力皆為 a, b, c, d 四種條件中最小值，說明減少支架寬度並同時增加厚度可降低最大應力值，軸承受力分佈將較平均。

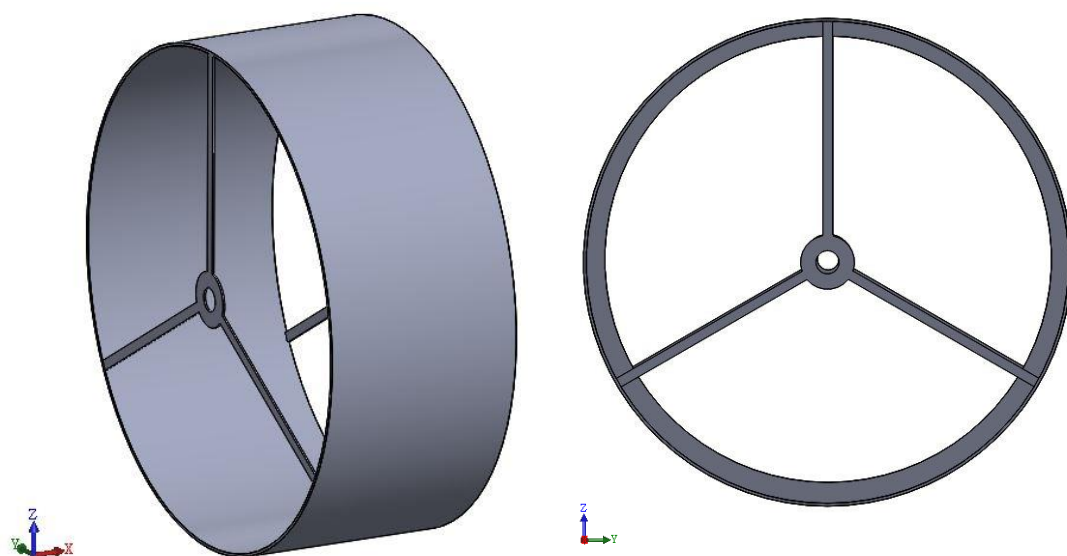


圖 37、封裝元件示意圖

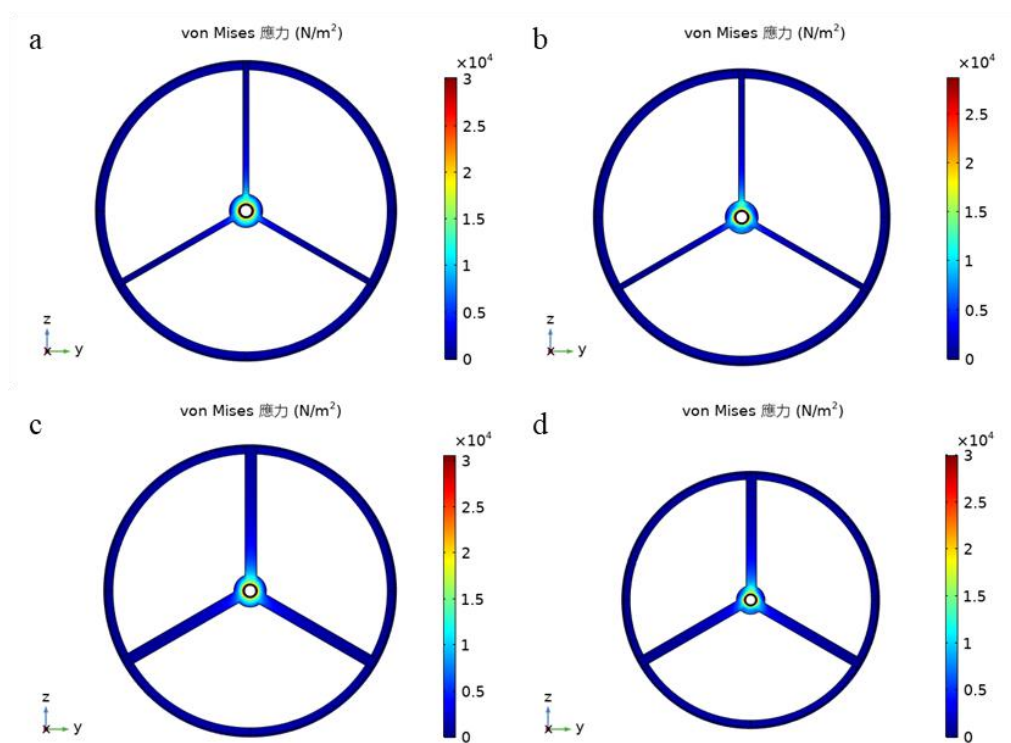


圖 38、三根支架不同厚度與寬度下之應力分佈

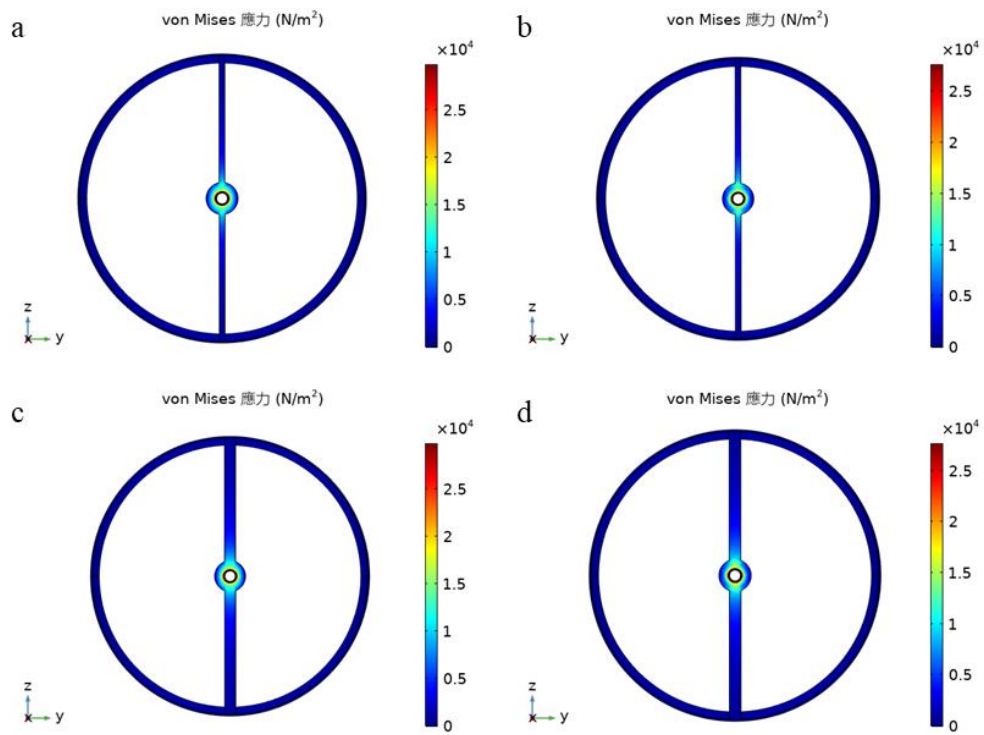


圖 39、兩根支架不同厚度與寬度下之應力分佈

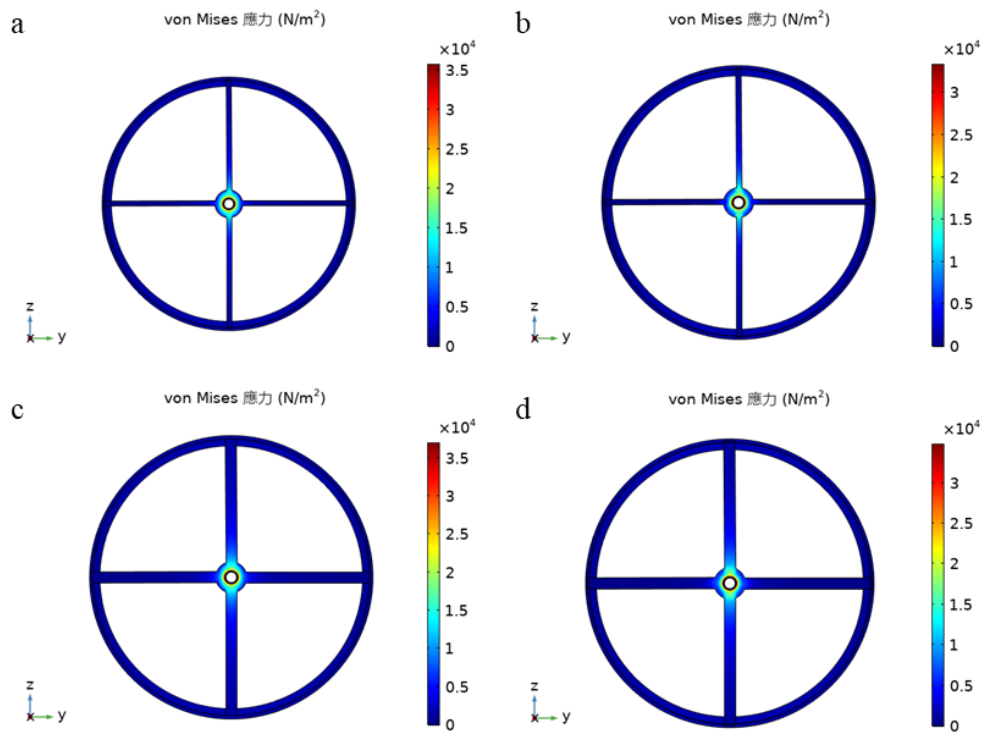


圖 40、四根支架不同厚度與寬度下之應力分佈

### 三、除濕輪吸附試驗

本計畫以化學計量方式配置四種濃度之丙酮氣體進行吸附試驗。使用液針將丙酮注入採氣袋，並藉由理想氣體方程式計算所需加入的氮氣體積，通入氮氣後將採氣袋置於 75°C 烘箱中 5 分鐘以上，確保丙酮完全氣化，即可獲得不同濃度之氣體。

實驗模組以不鏽鋼模具將除濕輪密封，實驗開始前，須先通入空氣進行 30 分鐘的氣密測試，確認氣壓無損耗。之後將模具一端接上採樣器進行氣體導流，另一端接流量校正器校正採樣器流量(流量設置為  $0.5 \pm 0.25$  L/min)，每次實驗前進行校正，當流量與額定流量誤差小於 5% 後，將流量校正器換成採氣袋，氣味偵測儀則放置於出口處記錄氣體濃度變化，此時即可開始進行實驗，當濃度達到貫穿濃度時則結束實驗。藉由實驗數據將得到吸附曲線，了解氣體濃度隨時間的變化，此外將實驗數據擬合 Yoon-Nelson 模型後，可獲得吸附動力及貫穿曲線之操作參數。

#### (一)、氣體製備

以化學計量方式配置四種濃度之丙酮氣體進行吸附試驗。首先使用液針將液態丙酮注入採樣袋(圖 41、圖 42)，並藉由理想氣體方程式計算所需加入的氮氣體積，通入氮氣後將採樣袋置於 75°C 烘箱中

5 分鐘以上，確保丙酮完全氣化，即可獲得不同濃度之氣體。當採氣袋中裝有 20 公升的 200 ppm 丙酮/氮氣時，丙酮氣體所佔的體積為 4 cm<sup>3</sup>，根據理想氣體方程式：

$$PV = nRT$$

其中， $P$  為氣體壓力(atm)， $V$  為氣體體積(L)， $n$  為氣體物質的莫耳數(mole)， $R$  為理想氣體常數( $0.082 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )， $T$  為氣體溫度(K)。

當溫度為 25°C 時，藉由理想氣體方程式可以算出採氣袋內有  $1.6369 \times 10^{-4}$  mole 的丙酮氣體，丙酮分子量為 58.08 g/mole，因此須注入採氣袋中的液態丙酮重量為  $9.5073 \times 10^{-3}$  g，由於液態丙酮密度為 0.784 g/cm<sup>3</sup>，計算後可以得到液態丙酮體積為  $1.2127 \times 10^{-3}$  cm<sup>3</sup>。氣體配製完成後，須將採氣袋放入黑色且不透光之容器中儲存，避免丙酮與陽光或其他物質作用分解成其他物質，且採氣袋內的氣體須於 1 週內使用完畢。



圖 41、液針



圖 42、注射液態丙酮



圖 43、通入 99.99%  $N_2$

## (二)、實驗設備規格

### 1. 氣體吸附反應測試槽

反應槽為模組化單元槽機構(圖 44)，單元槽外觀大致成圓餅狀，材質為 316 不鏽鋼，外尺寸外徑 170~180 mm、內徑 150~155 mm、厚度 55~60 mm。單元槽具有單側氣密條(O-Ring)設計，相接後可維持氣密，模組具有上下蓋(圖 45、圖 46)，兩側皆有不鏽鋼接頭向外接，接頭管徑適用 1/4 英吋氣管。本研究將 3 片 60 PPI 孔徑分布之除濕輪裝入單元槽，之後鎖緊上下蓋，即完成氣體吸附反應測試槽(圖 47)，進行氣密測試後則可開始針對 7.57、10.09、12.62 及 15.14 ppm 之丙酮氣體進行吸附試驗。

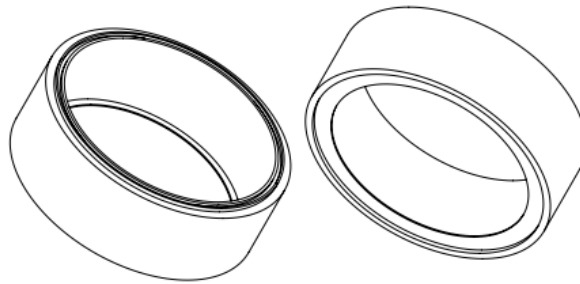


圖 44、單元體示意圖

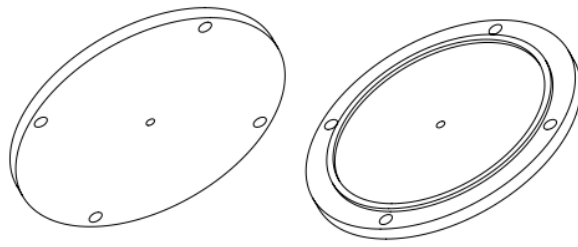


圖 45、上蓋示意圖

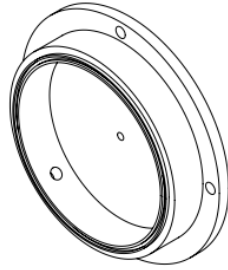


圖 46、下蓋示意圖



圖 47、氣體吸附反應槽

## 2. 空氣採樣器

本研究使用 SKC 公司的 AirChek Connect 藍芽傳輸觸控式空氣採樣器(圖 48)進行氣體導流，採樣時可以自動將壓力轉換成流量，連續採樣並提供準確及穩定的採樣流量，適用流量範圍為 0.005-5 L/min，氣體流量誤差小於 5%。



圖 48、空氣採樣器

## 3. 乾式流量校正器

空氣中的污染物濃度計算方式為：

$$\text{污染物濃度}(\mu\text{g}/\text{m}^3) = 10^{-3} \times \text{分析設備所得污染物含量}(\mu\text{g}) / \text{採樣時間}(\text{min}) \times \text{流量}(\text{L} \cdot \text{min})$$

由此可知採樣的流量會影響所得到的污染物濃度，若無法確認流

量數值，則會造成計算出的污染物濃度與真實濃度之誤差，因此實驗前須使用流量校正器(air sampling pump calibrator)校正空氣採樣器(air sampling pump)之流量。本研究使用 SKC 公司的 check-mate 流量校正器(圖 49)，流量準確度小於 1%，且具有高度再現性，並可連續顯示即時體積流量，流量測量範圍為 0.5-5 L·min。



圖 49、流量校正器

#### 4. 氣味偵測儀

實驗過程中，將以日本神榮的 OMX-SRM 氣味偵測儀(圖 50)監測氣體濃度的變化。具有可檢測之氣體時，傳感器的電導率將隨著空氣中氣體濃度的變化而改變，氣味偵測儀內的半導體感測器將電導率的變化轉換後，可得到與氣體濃度相對應的數位訊號。OMX-SRM 氣

味偵測可用於偵測乙醇、丙酮及氫氣等，工作溫度範圍為 0-40 (°C)。

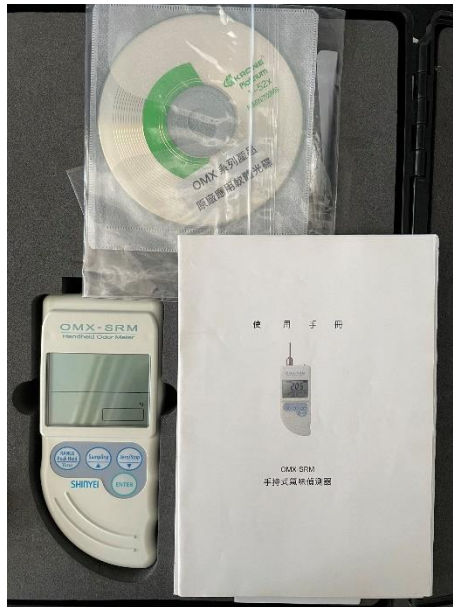


圖 50、氣味偵測儀

### (三)、試驗結果

60 PPI 之除濕輪對三種濃度的丙酮進行吸附試驗結果如圖 51 所示，並用此數據建立對應的 Yoon-Nelson model 吸附動力模型(圖 52)。吸附動力模型所得之參數如表 14 所示，實驗 50%貫穿時間與計算所得之理論 50%貫穿時間接近，且 $R^2$ 值皆大於 0.9，此外發現當氣體濃度較低時，除濕輪對丙酮氣體的反應速率常數( $k$ )較大，氣體濃度高時，單位重量的除濕輪則可吸附較多丙酮。

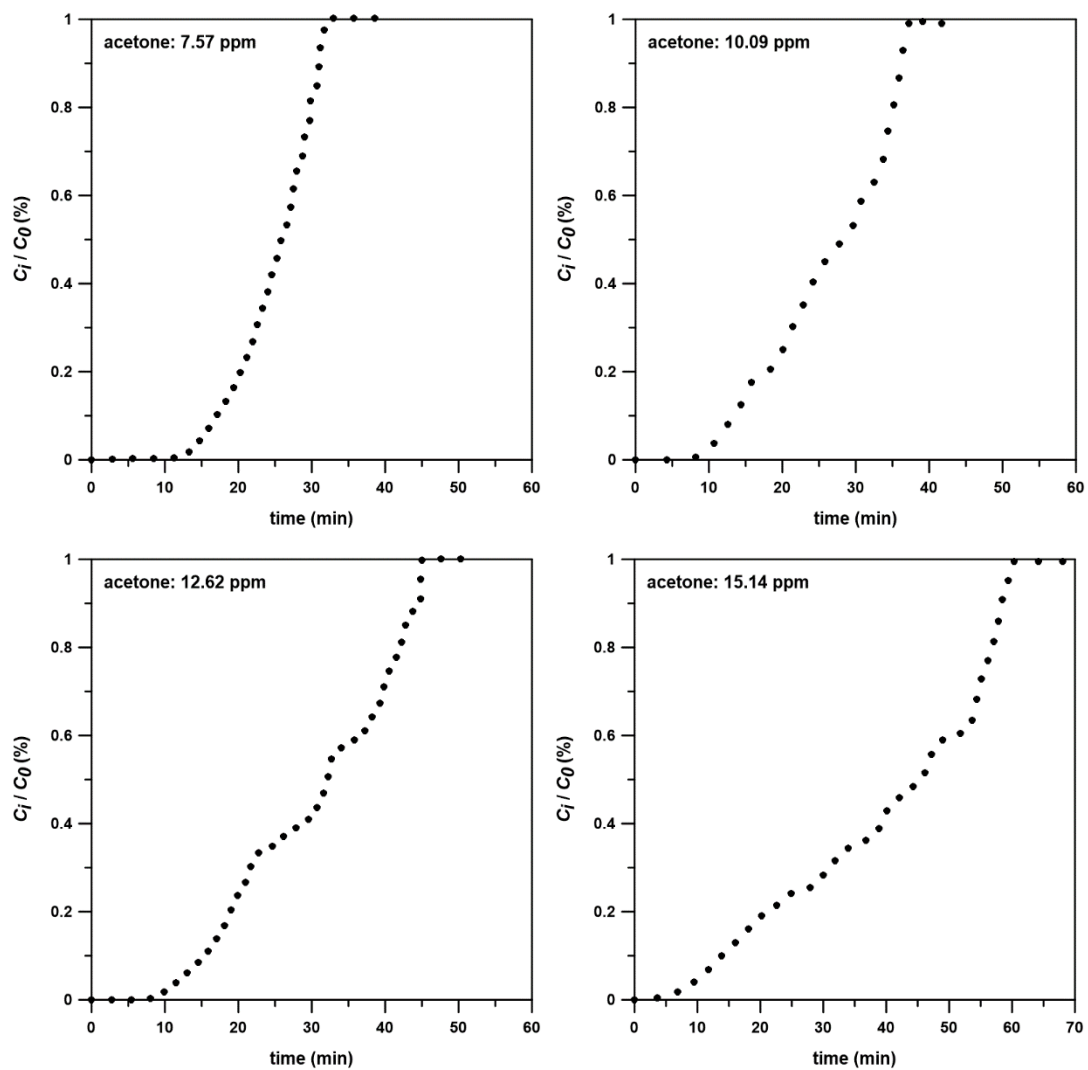


圖 51、不同濃度丙酮之吸附曲線

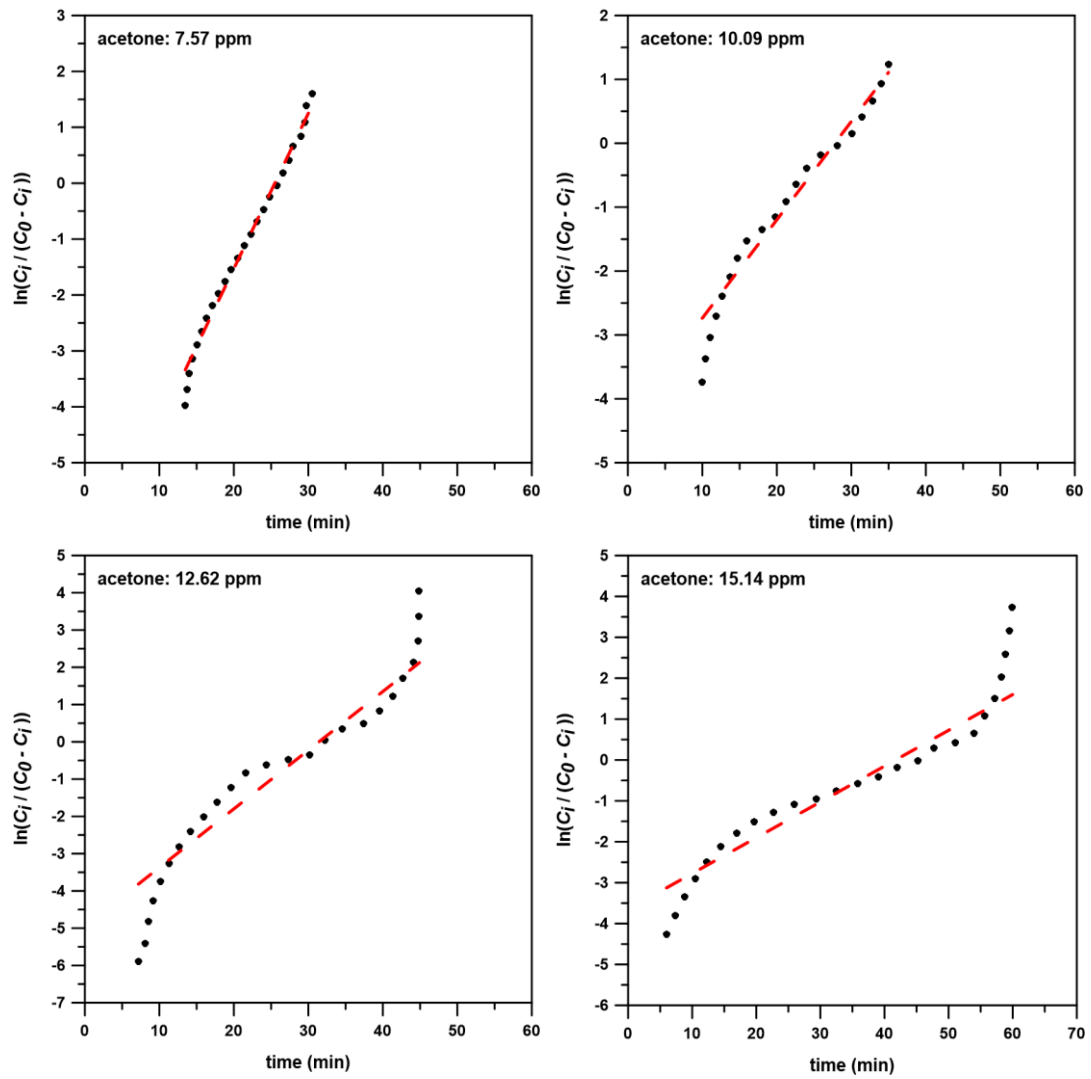


圖 52、不同濃度丙酮之 Yoon-Nelson model 吸附動力模型結果

表 14、吸附動力模型參數

| conc.<br>(ppm) | weight<br>(g) | $k$<br>(1/min) | $R^2$ | $\tau_{50,\text{exp}}$ | $\tau_{50,\text{theory}}$ | adsorption<br>capacity<br>( $\mu\text{g/g}$ ) |
|----------------|---------------|----------------|-------|------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|
| 7.57           | 795.9         | 0.28           | 0.99  | 25.5                   | 25.5                      | 0.16308                                       |
| 10.09          | 757.7         | 0.16           | 0.96  | 27.2                   | 27.8                      | 0.24158                                       |
| 12.62          | 786.9         | 0.15           | 0.90  | 32.2                   | 31.4                      | 0.35358                                       |
| 15.14          | 792.1         | 0.09           | 0.92  | 44.6                   | 41.7                      | 0.96402                                       |

#### 肆、結論

在氣流特性分析中發現當除濕輪結構較複雜時，氣流受到較大的阻力難以通過，且流速下降幅度較大，此時氣流傾向流至同一側的氣流出口，故除濕輪對空氣之除濕能力將下降，且製程出口的溫度較高也較有可能造成熱敏感物質損毀，若增加流速則可提高氣流通過除濕輪之能力，並避免上述問題。本研究設計不同的支架規格，並進行應力場分析。從結果可發現，減少支架數量及寬度並增加厚度時，軸承的應力最大值將會下降，說明受力較均勻，也較不易出現損毀。

本研究以 3 個除濕輪為一組，進行三種濃度的丙酮氣體之吸附試驗，獲得不同的吸附曲線，從吸附曲線中可了解達到除濕輪吸附容量所需時間，並進而計算單位吸附量，此外將實驗結果擬合 Yoon-Nelson model 後，獲得不同條件下的反應速率常數。研究結果發現，當氣體濃度低時，反應速率常數較高，單位吸附量則較低。

## 參考文獻

- [1] H. Darcy Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon Dalmont, Paris (1856).
- [2] Hazen, A. (1893). Some physical properties of sand and gravels with special reference to their use in filtration. Massachusetts State Board of Health, Twenty-fourth Annual Report.
- [3] P. Forchheimer Wasserbewegung durch Boden Z. (1901). Ver. Deutsch. Ing., 45, pp. 1782–1788.
- [4] E. Krüger. (1918). Die Grundwasserbewegung. Internationale Mitteilungen für Bodenkunde, p. 105.
- [5] H.C. Brinkman. (1947). A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. Appl. Sci. Res. A, 1, pp. 81-86.
- [6] S. Ergun. (1952). Fluid flow through packed columns. Chem. Eng. Prog., 48 (2), pp. 89-94.
- [7] Vafai K, Kim SJ. Forced convection in a channel filled with a porous medium: an exact solution[J]. Journal of Heat Transfer, 1989, 111: 1103-1106.
- [8] Lee DY, Vafai K. Analytical characterization and conceptual assessment of solid and fluid temperature differentials in porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42: 423-435.
- [9] Mohamad AA. (2003). Heat transfer enhancements in heat exchangers

- fitted with porous media, Part I: constant wall temperature[J].  
International Journal of Thermal Sciences, 42: 385–395.
- [10] Haddad O M, Al-Nimr M A, Al-Omary J S. (2007). Forced convection of gaseous slip-flow in porous micro-channels under Local Thermal Non-Equilibrium conditions[J]. Transport in Porous Media, 67(3):453-471.
- [11] Haddad O M, Al-Nimr M A, Sari M S. (2007). Forced convection gaseous slip flow in circular porous micro-channels[J]. Transport in Porous Media, 70(2):167-179.
- [12] Vafai K, Tien CL. Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer , 1981 , 24(2) : 195-203.
- [13] K. Vafai, R. L. Alkire, and C. L. Tien. (1985). An experimental investigation of heat transfer in variable porosity media, ASME, J. Heat Transfer 107, 642-647.
- [14] Noble, R., & Terry, P. (2004). Adsorption. In Principles of Chemical Separations with Environmental Applications (Cambridge Series in Chemical Engineering, pp. 182-213). Cambridge: Cambridge University Press.
- [15] Freundlich, H.M.F. (1906). Over the adsorption in solution. J. Phys. Chem., 57: 385-470.
- [16] Langmuir I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. J Am Chem Soc, pp. 1361-1403.
- [17] S. Bruanuer, P.H. Emmett, E. Teller. (1938). Adsorption of gases in

- multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc., 60, pp. 309-316.
- [18] I.L. Maclaine-Cross, P.J. Banks. (1972). Coupled heat and mass transfer in regenerators—predictions using an analogy with heat transfer. International Journal of Heat and Mass Transfer, 15 (6), pp. 1225-1241.
- [19] Holmberg, R. B..( 1979). "Combined Heat and Mass Transfer in Regenerators with Hygroscopic Materials," ASME JOURNAL OF HEAT TRANSFER, Vol. 101, pp.205-210.
- [20] Jurinak, J. J., & Mitchell, J. W. (1984). Effect of Matrix Properties on the Performance of a Counterflow Rotary Dehumidifier. Journal of Heat Transfer, 106(3), 638.
- [21] San, J. Y., & Hsiau, S. C. (1993). Effect of axial solid heat conduction and mass diffusion in a rotary heat and mass regenerator. International Journal of Heat and Mass Transfer, 36(8), 2051–2059.
- [22] T.S. Ge, F. Ziegler, R.Z. Wang. (2010). A mathematical model for predicting the performance of a compound desiccant wheel (a model of compound desiccant wheel) Appl. Therm. Eng., 30, pp. 1005-1015.
- [23] X.J. Zhang, Y.J. Dai, R.Z. Wang. (2003). A simulation study of heat and mass transfer in a honeycombed rotary desiccant dehumidifier. Applied Thermal Engineering, 23, pp. 989-1003.
- [24] H. Inaba; J. K. Seo; A. Horibe (2004). Numerical study on adsorption enhancement of rectangular adsorption bed. , 41(2), 133–146.

- [25] H. Demir, M. Mobedi, S. Ülkü. (2009). Effects of porosity on heat and mass transfer in a granular adsorbent bed. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, pp. 372-377.
- [26] Charoensupaya D, Worek WM.(1988). Parametric study of an open-cycle adiabatic, solid, desiccant cooling system. *Energy*, 13(9):739–47.
- [27] K.J. Kim, C.S. Kang, Y.J. You, M.C. Chung, M.W. Woo, W.J. Jeong, N.C. Park, H.G. Ahn. (2006). Adsorption–desorption characteristics of VOCs over impregnated activated carbons. *Catal. Today*, 111, pp. 223-228.
- [28] Puértolas, B., Navarro, M.V., Lopez, J.M., Murillo, R., Mastral, A.M., Garcia, T. (2012). Modelling the heat and mass transfer of propane onto a ZSM-5 zeolite. *Sep. Purif. Technol.* 86, 127–136.
- [29] G. Zhang, W.N. He, L. Fang, F. Ma. (2013). Numerical study on the contribution of convective mass transfer inside high-porosity adsorbents in the VOC adsorption process. *Indoor Built Environ*, 22 (3), pp. 551-558.
- [30] D.T. Tefera, M. Jahandar Lashaki, M. Fayaz, Z. Hashisho, J.H. Philips, J.E. Anderson, M. Nichols. (2013). Two-dimensional modeling of volatile organic compounds adsorption onto beaded activated carbon *Environ. Sci. Technol.*, 47, pp. 11700-11710.
- [31] T. Dobre, O.C. Pârvulescu, G. Iavorschi, M. Stroescu, A. Stoica. (2014). Volatile organic compounds removal from gas streams by adsorption onto activated carbon. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, pp.

3622-3628.

- [32] K.N. Gupta, N.J. Rao, G.K. Agarwal. (2015). Gaseous phase adsorption of volatile organic compounds on granular activated carbon. *Chem. Eng. Commun.*, 202, pp. 384-401.
- [33] Laskar, Imranul; Hashisho, Zaher; Phillips, John H.; Anderson, James E; Nichols, Mark (2019). Modeling the Effect of Relative Humidity on Adsorption Dynamics of Volatile Organic Compound (VOC) onto Activated Carbon. *Environmental Science & Technology*, (), acs.est.8b05664.
- [34] Shallcross, D. *Handbook of Psychrometric Charts: Humidity diagrams for engineers*. Springer Science & Business Media, 2012.