

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

(中文計畫名稱)乾燥除濕輪動態操作與材料耐候性研究分析  
(英文計畫名稱) A dynamic operational analysis and material  
weather resistance ability study of desiccant wheels

計畫編號：NL1070444

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：楊建裕

聯絡電話：03-4267368

E-mail address：cyyang@ncu.edu.tw

協同主持人：無

研究期程：中華民國 107 年 4 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣柒拾陸萬捌仟元

核研所聯絡人員：黃財富

報告日期：107 年 12 月 10 日

## 目 錄

目 錄.....	I
圖目錄.....	II
表目錄.....	III
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	14
參、主要發現與結論.....	20
肆、參考文獻.....	24

## 圖目錄

圖 1、一般吸附式除濕輪乾燥系統.....	4
圖 2、結合熱泵之吸附式除濕輪乾燥系統.....	4
圖 3、結合熱泵及廢熱回收之除濕輪乾燥程序.....	5
圖 4、傳統的沸石與改良沸石的示意圖.....	7
圖 5、為矽膠與複合材料的等溫吸附曲線.....	9
圖 6、氧化鋁與矽藻土的等溫吸附曲線示意圖.....	12
圖 7、設備外觀圖.....	15
圖 8、系統架構和流程示意圖.....	16
圖 9、除濕輪原理.....	17
圖 10、除濕輪基本圖示.....	18
圖 11、水汽吸附測試裝置圖.....	20
圖 12、FAM Z05 沸石不同時間吸附性能測試比較.....	21
圖 13、X13 沸石不同溫度吸附性能測試比較.....	22
圖 14、矽膠在不同吸附床溫度以及蒸發器溫度的水汽吸附率 .....	23

## 表目錄

表 1、循環式除濕輪乾燥機規格表.....	14
表 2、變數總表.....	19
表 3、四種吸附材料之耐候性、熱傳導係數和熱膨脹係數.....	20

## 中文摘要

本計畫預定配合核能所 107 年「節能環保高效低溫乾燥技術開發計畫」，進行除濕輪動態操作與材料耐候性研究分析，探討各種吸附材料之耐候性與熱物理性質。預訂工作項目包括：

1. 低溫乾燥除濕輪動態操作與材料耐候性之相關資料蒐集與探討。
2. 分析各種吸附材料與乾燥系統相關材料之耐候性、熱膨脹性、熱傳導等。
3. 建立除濕輪反應動力參數模型。
4. 改善節能環保低溫除濕乾燥設備的穩定性，並且使其結構優化。

## 英文摘要

This project is proposed to cooperate with the INER's 2018 research on High efficiency low-temperature drying technology development project. The dynamic operational analysis and material weather resistance ability of dehumidification wheels will be completed.

There are four proposed working items:

- (1) Desiccant wheels dynamic operational conditions and material weather resistance ability information collection.
- (2) Thermal properties of adsorption materials analysis.
- (3) Desiccant wheels dynamic operational model setup.
- (4) Stability improvement of energy-saving and environmental-friendly low temperature dryer

## 壹、計畫緣起與目的

根據工研院統計[1]指出，國內乾燥設備市場產值約新台幣 400 億元，近年逐年升高，國內急需節能且符合各式製程之乾燥設備。就全球而言，乾燥設備若分為常壓除濕乾燥、壓縮空氣乾燥、工業熱風乾燥設備、除濕防潮乾燥等四種類別，吸附乾燥設備產值分別約新台幣 1800、1700、450、380 億元，總值達新台幣 4300 億元以上。目前國內主要乾燥設備供應商，使用的蜂巢式矽膠轉輪都是進口，核心元件掌握在國外手中，導致設備成本偏高。另外多採電熱方式加熱再生空氣，耗電量高增加操作成本。

一般吸附式除濕輪乾燥系統如圖 1 所示，外界再生空氣經電熱器加熱程高溫空氣後，進入除濕輪，將輪內吸附材加熱而將其中之水汽帶走，成高溫潮濕空氣流出。而潮濕吸附材中水汽被帶走後成乾燥吸附材，再經由除濕輪轉動，將乾燥吸附材轉至另一風道。在另一風道中，室內之潮濕空氣經由冷凍機冷卻後成低溫潮濕空氣，進入除濕輪後將乾燥吸附材冷卻，而空氣中之水汽由吸附材吸附，而成乾空氣流出，達到室內除濕之目的。此種方式需要利用電熱器去加熱外界空氣，並用冷凍機去冷卻室內潮濕空氣，因此耗電高而除濕性效率低。

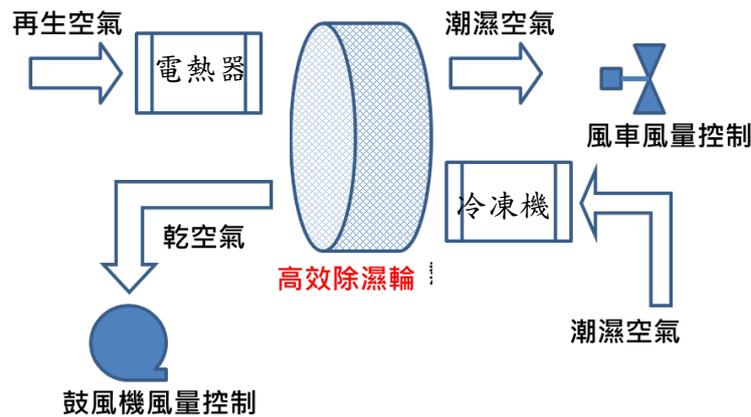


圖 1、一般吸附式除濕輪乾燥系統

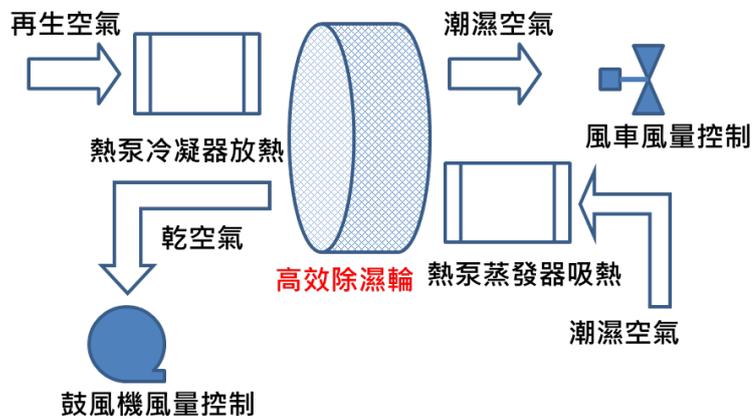


圖 2、結合熱泵之吸附式除濕輪乾燥系統

由於前述吸附除濕系統一邊使用電熱而另一邊使用冷凍機，此更能可由熱泵同時達成，因此業者開發出結合熱泵之吸附式除濕輪乾燥系統如圖 2 所示。利用熱泵冷凝器放熱以及蒸發汽吸熱同時達到加熱與降溫之功能，可節約能源使用一半以上。

此外，由於外界再生空氣流經除濕輪後，溫度仍高，可將其導至另一熱交換器，與流經除濕輪之室內低溫乾燥空氣進行熱交換，利用外汽於熱將室內空氣升溫，而降低其相對濕度。整體系統如圖 3 所示，雖然其除濕效率高，耗能少，但其結構遠較圖一所示之系統複雜，因此在設計上困難度較高。

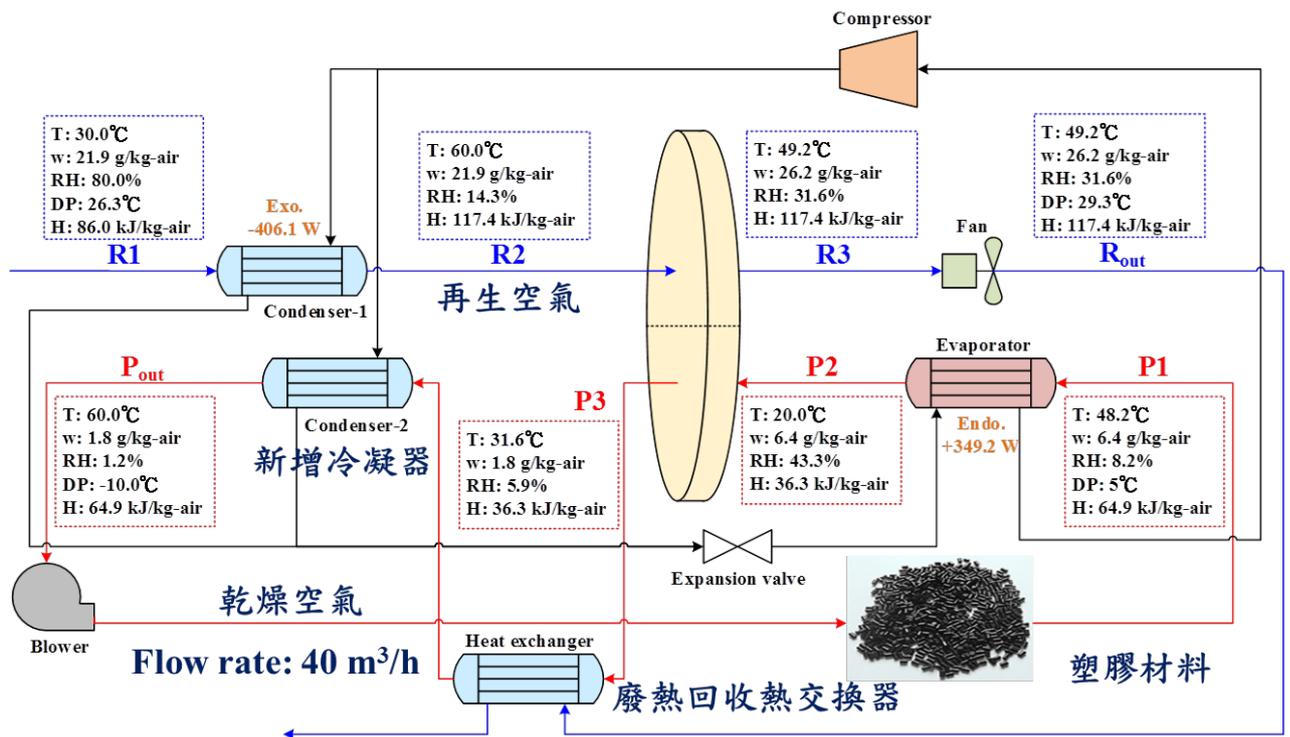


圖 3、結合熱泵及廢熱回收之除濕輪乾燥程序

除濕材料在全世界已經有好幾十年的歷史，他被廣泛運用於製藥、食品與電子等高科技廠。除濕材料應用於工商業的空調系統中可以有效的控制濕度，維持高科技場的生產良率或是保持產品的新鮮度。因應全球節能減碳的趨勢與環境保護的觀點，近年來除濕材料也被廣泛的應用於民生空調系統中，例如利用除濕材料製成的吸附式製冷系統受到很大的重視。吸附式製冷系統的工作原理是利用水取代 CFCs 當作冷媒，並在蒸發器利用固體吸附劑吸收水蒸氣使之保持低壓狀態，可使水持續蒸發並降低通過空氣的溫度達到冷凝的效果。矽膠、活性氧化鋁、活性碳、沸石、分子篩、氯化鋰與氯化鈣等是常見的除濕材料，各個材料各有其優缺點與適合的領域 [2-3]。

## 沸石與分子篩

沸石是一種含有水架狀結構的鋁矽酸鹽礦物，最早發現於 1756 年。瑞典的礦物學家（Cronstedt）發現有一類天然鋁矽酸鹽礦石在灼燒時會產生沸騰現象，因此命名為「沸石」。在希臘文中意為「沸騰的石頭」。此後人們對沸石的研究不斷深入。沸石因成分不同分為：方沸石（ $\text{Na}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]\cdot\text{H}_2\text{O}$ ）、鈣沸石（ $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}]\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ）。其含水量與外界溫度及水蒸氣的壓力有關，加熱時水分可慢慢逸出，但並不破壞其結晶構造。晶體結構中有許多空腔（籠）和連接空腔的通道，水分子位於其中，可由通道運輸。晶體和集合體形態及解理隨著晶體結構的不同而異，一般呈淺色，玻璃光澤，硬度 3—3.5，比重 2.0—2.4。沸石族礦物由低溫熱液作用形成，見於噴出岩，特別是玄武岩的孔隙中，也見於沉積岩、變質岩及熱液礦床和某些近代溫泉沉積中。1932 年，McBain 提出了「分子篩」（Molecular sieve）的概念。表示可以在分子水平上篩分物質的多孔材料。沸石用作分子篩，可以吸取或過濾其他物質的分子。雖然沸石只是分子篩的一種，但是沸石在其中最具代表性，因此「沸石」和「分子篩」這兩個詞經常被混用。除了天然產品外，也可由人工合成，人造沸石是：磺酸化聚苯乙烯，天然沸石：鋁矽酸鈉。

Wang 等人歸類沸石在蒸氣壓較低時有較佳的吸附能力，但是總除濕量通常不高，更需要 100°C 以上的溫度才能有效再生，雖然 Seiya Ito 等人經研究證實利用微波可以更有效率的再生沸石，但並不適合用在連續運轉的空調系統上；Hu 等人認為分子篩被廣泛應用於空壓乾燥系統是因為它可以降低露點溫度到 -70°C，但是價格相對其他材料比較昂貴。這兩種材料都屬於 Langmuir type，所以在低濕條件下

就可以有良好的吸濕能力，但相對的，必須加溫到很高的溫度使相對濕度下降到更低的程度才能有效的再生，Ali 等人透過材料的改良，可以改變沸石的等溫吸附曲線成為 sigmoid type，不僅降低再生所需的溫度，也提高了總吸附量，圖 4 為傳統的沸石與改良後的示意圖，傳統沸石在相對濕度 10% 以上可以吸附自身重量 10% 左右的水分，因此縱座標表示為 0.1，而如果環境被加溫使相對濕度下降到 5% 以下，傳統沸石因為在此狀態下最多只能吸濕自身重量的 5% 水分(縱座標表示 0.05)，因此就會把多餘的水分排出，達到脫附的目的，而改良後的沸石，只需要相對濕度 20% 的狀態就可以脫附，也表示在同樣狀態下環境必須被加溫的程度會比 5% 來的小，也就是說可以使用較低的溫度達到再生的效果。另一方面，改良後的沸石也可以在同樣相對濕度下(50%RH)，具有比傳統沸石更高的總吸濕量，傳統沸石僅能吸附自身重量 10% 的水分，而改良後的沸石可以吸附自身重量 20% 的水分。

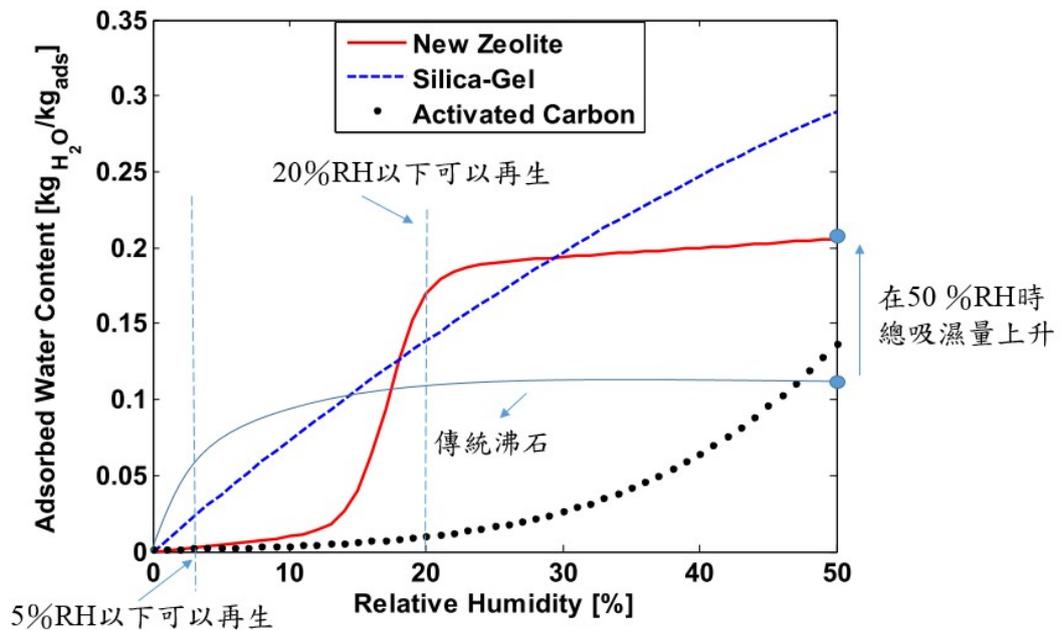


圖 4、傳統的沸石與改良沸石的示意圖

## 矽膠

矽膠是用得最為普遍的除濕劑，它又名氧化矽膠和矽酸凝膠，透明或乳白色顆粒。常用於乾燥劑及吸附劑，其化學組成為  $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ，屬於非結晶形之化合物，由 Si-O 四面體相互連結形成的骨架結構，骨架中的空間即為矽膠之孔隙，其製備方法以溶膠凝膠法最為普遍，溶膠凝膠法製備最大優點是能以化學法製作出擁有奈米等級微孔的多孔質材料。矽膠一般以一種無組織的形式存在，是膠態二氧化矽球形粒子的剛性、連續網格。一般商品含水量為 3~7% 這種所謂的水分，實際上是連接於表面矽原子的單層羥基，形成矽醇 Si-O-H，在低表面覆蓋度的情況下，水分子連接於矽醇基； $\text{Si} \cdot \text{O} \cdot \text{H} \dots \text{OH}_2$ ；在高表面覆蓋的情況下，水束內的氫鍵將佔優勢，此時鍵能或吸附熱接近於水的液化能。常規密度矽膠的比表面積為 750~850  $\text{m}^2/\text{g}$ ，平均孔徑為 2.2~2.6 nm。在濕度為 100% 條件下，它的吸附量能達到它自身重量的 40 %，吸收水分後不會膨脹，不化成溶液，仍然保持乾燥狀態。將矽酸凝膠浸泡在氯化鈷或者氯鈷酸銨 ( $(\text{NH}_4)_2\text{CoCl}_4$ ) 溶液中，再經乾燥活化就可以得到變色矽膠，可用於指示矽膠吸水的程度。這是因為無水氯化鈷 ( $\text{CoCl}_2$ ) 呈藍色，而六水合氯化鈷 ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 為紅色。Goldworthy 團隊發現矽膠和活性氧化鋁在各種水蒸氣壓力下都擁有平均的吸附能力，因此普遍被使用在民生系統上。因為矽膠屬於 linear type，隨著相對濕度上升而線性上昇，在不同相對濕度下都保持穩定的吸附能力，Jia 團隊成功利用浸泡法使氯化鈣注入矽膠的多孔中，製造出非常高除濕量的複合材料，圖 5 為矽膠與複合材料的等溫吸附曲線。同樣型態的等溫吸附線也會因為改質的不同而改變他的斜率，進而大幅提升他

的總吸濕量。

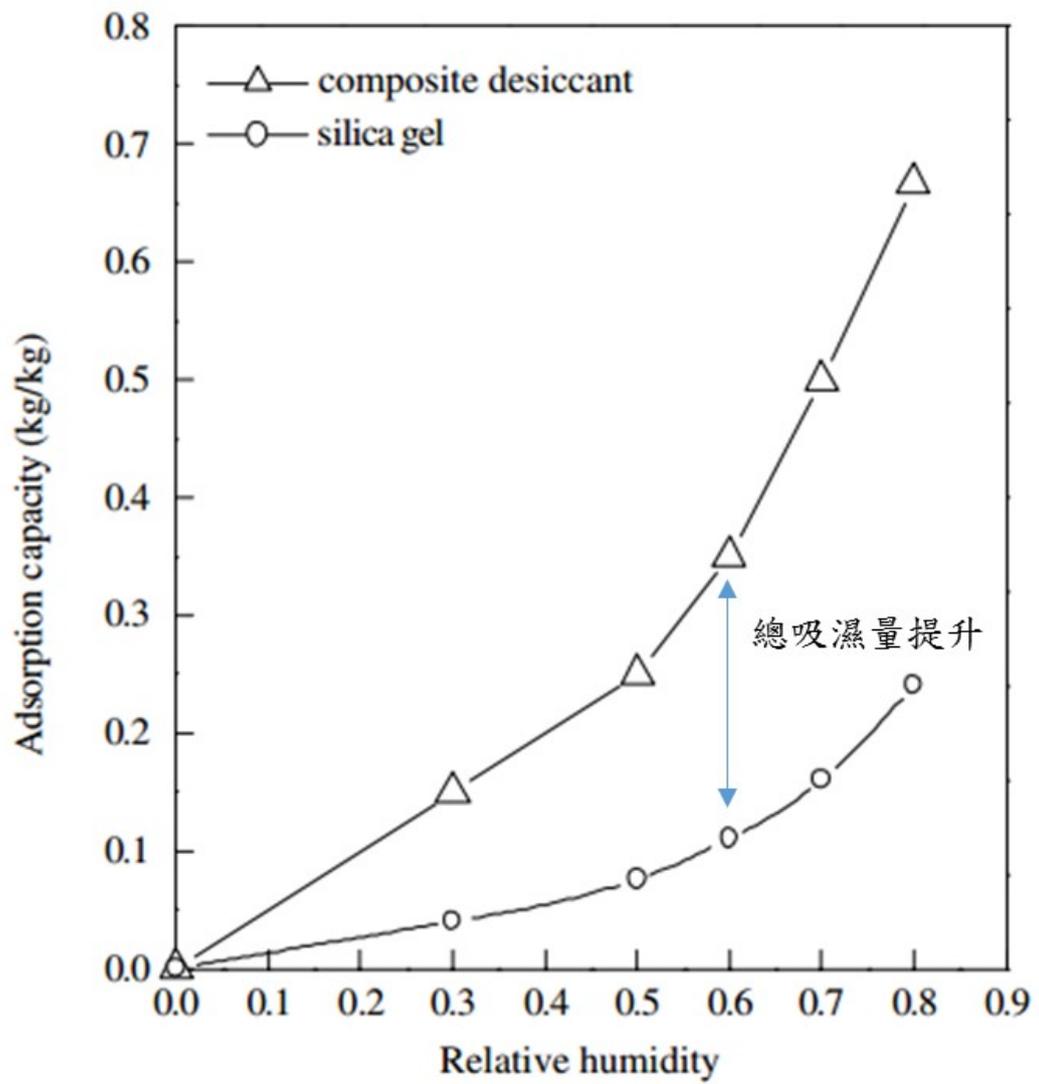


圖 5、為矽膠與複合材料的等溫吸附曲線

## 活性氧化鋁與矽藻土

氧化鋁 ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) 為自然界中含鋁最豐富的礦物之一，主要富含於製作氧化鋁及煉鋁用的礦石鋁礬土中，而目前工業上常用的氧化鋁，都是由鋁水合物再經過熱處理後所產生的，若對氧化鋁結晶進行熱處理，隨著加熱溫度的提高，其結構會依序發生脫水及一連串的改变，在溫度上升時，內部原子排列會做適當的調整並進行相的改变。首先，在約  $500^\circ\text{C}$  時會轉換為  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，然而由於  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  的晶徑極細且結晶性相當不佳，也無法得到結晶夠大的樣品，因此目前對於  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  的相關研究較缺乏；若繼續提高三水鋁石的加熱溫度，到達  $1,000 \sim 1,200^\circ\text{C}$  之間時， $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  會轉換為  $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，現今  $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$  重要的應用為切削工具的抗磨耗被覆材，由於其具有較小的晶粒、低孔洞密度及磊晶成長等特性。而加熱溫度在高於  $1,400^\circ\text{C}$  時將轉換成為  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ， $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  是目前所知最終的穩定相，同時被廣泛地應用。這三種不同晶相的氧化鋁其組成原子相同，但原子結合的方式各異，具有同分異構物的關係。而若將活性氧化鋁應用於吸濕功用時，由於其具有高比表面積  $300\text{m}^2/\text{g}$  以上、高吸濕率及最少磨耗率的優點，特殊的多孔性微結構造就了氧化鋁吸濕能力強的特性，高微孔顆粒結構的鋁氧化物能夠吸收的水分可達到其自身重量的 60%，且結構安定性佳，可以承受急遽的溫度變化，即使浸泡於水中也不會收縮、膨脹、軟化或分解，最常應用於乾燥機內的吸附床。活性氧化鋁又稱活性礬土，為高孔性或顆粒狀之氧化鋁體，具有吸收氣體、蒸氣及特定液體和水分之能力。使用過後可藉由加熱至  $170 \sim 300^\circ\text{C}$  來做再生。吸附之再生可重複多次。吸附熱基本上和矽膠的數值相同約為  $46.6\text{kJ/mol}$ 。

矽藻土是一種生物化學沉積岩，由矽藻的細胞壁沉積而成，淡黃色或淺灰色，質地軟而輕，可輕易的磨成粉末，密度低、多孔隙、有粗糙感，有極強的吸水性。烘箱乾燥的矽藻土的典型的化學組成為 80~90% 的二氧化矽，用 2~4% 的氧化鋁(歸因大多以粘土礦物)和 0.5 至 2% 的鐵氧化物。矽藻土是熱、聲和電的不良導體，因此可作輕質、絕緣、隔音材料；又用作游泳池的過濾物質、打磨物質、液體的吸附物、阿爾弗雷德·諾貝爾所發明硝化甘油炸藥中硝化甘油的吸附物、殺蟲物質等等。矽藻土也可當作絕緣物質。矽藻土殺蟲原理是藉由物理反應來殺蟲。矽藻土是由矽藻鑲嵌的外殼沈積形成，這種微生物具有似針一樣尖銳的外殼，可以侵入到昆蟲的表皮，使昆蟲維持生命的體液外漏死亡，當昆蟲爬行於矽藻土的表面時，會像人類光腳走在玻璃碎片中之一樣，最後造成體液流失過多而死亡。矽藻土本身具有多孔性結構，對部分化學物質與水有吸引力，會吸收昆蟲身體的外層蠟質，使害蟲脫水死亡，矽藻土具有調節濕氣的作用，被應用於建築物的調濕建材中，可依季節調節環境的相對濕度，不需要耗費能源或使用其他設備，只要利用毛細現象的原理，建材本身具有的吸濕與放濕特性進行室內濕度調節，能自動從較潮濕的環境中吸收水分並儲存於建材內，當環境濕度較低時水分釋放出來，達到控制濕度的目的。其應用範圍為相對濕度 40-60%，剛好符合人體舒適範圍 45-55%，因此近年來廣泛的被應用於油漆塗料上。矽藻土和氧化鋁的都屬於 sigmoid type 的等溫吸附曲線，會在相對濕度達到一定值後，展現很強的吸濕能力，隨相對濕度變化較為劇烈，但是因為矽藻土屬於天然產品，總吸濕量只有自身重量的 5-10%，而氧化鋁屬於人工產品，經過了純化與特殊處理，當作

除濕劑使用的氧化鋁最高可以吸收自身重量 60% 的水分，圖 6 為兩種材料的等溫吸附曲線示意圖。

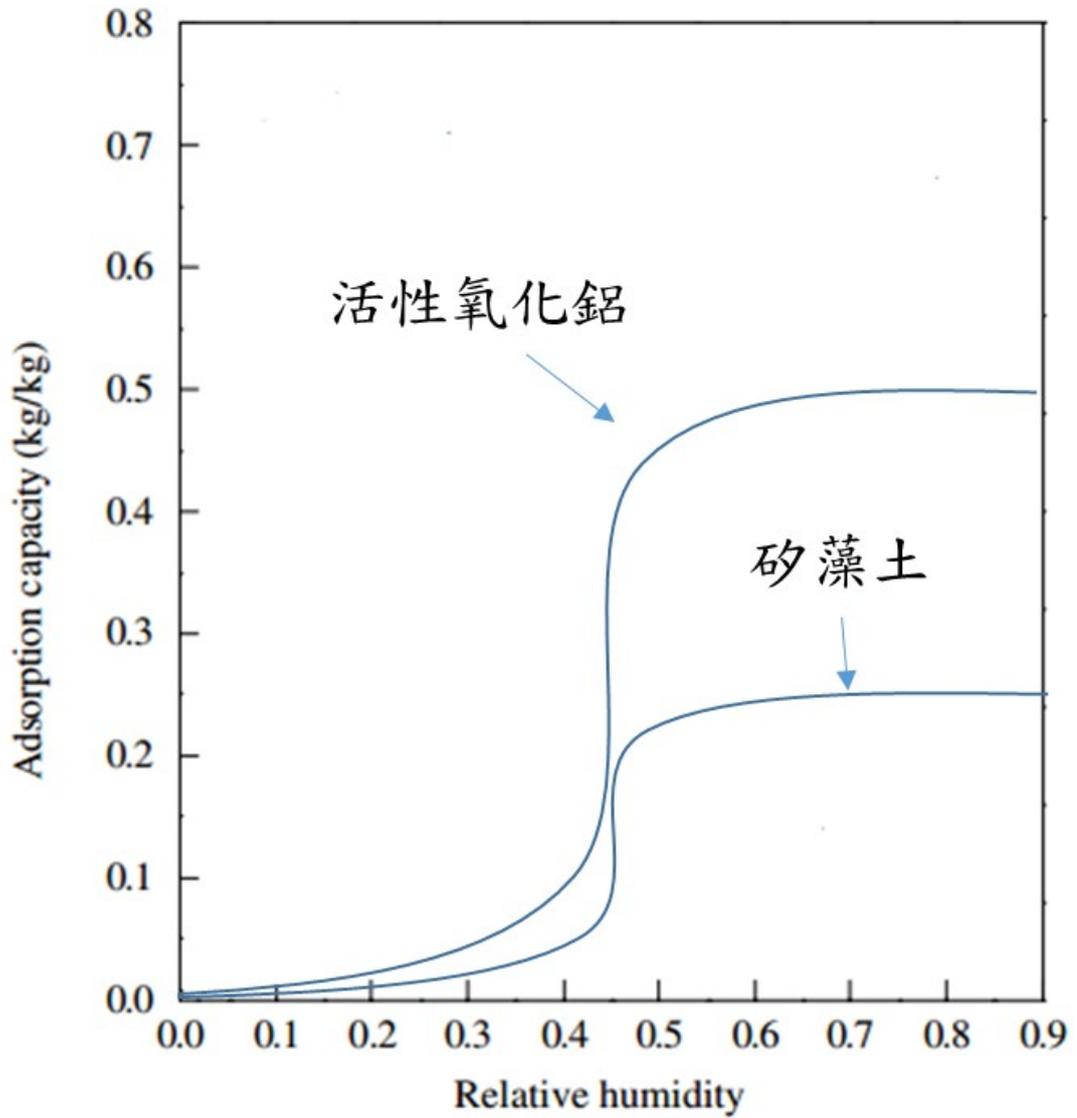


圖 6、氧化鋁與矽藻土的等溫吸附曲線示意圖

前述各項除濕輪乾燥系統中，吸附材之選擇為各項元件中之最重要部分，尤其是其耐候性，以及熱膨脹性、熱傳導等熱物理性質更為直接影響系統性能重要參數。

本計畫預定配合核能所 107 年「節能環保高效低溫乾燥技術開發計畫」，進行除濕輪動態操作與材料耐候性研究分析，探討各種吸附材料之耐候性與熱物理性質，並協助計畫辦理各項行政事務。

## 貳、研究方法與過程

循環式除濕輪乾燥系統的規格如表 1 所示，再生電熱功率 4 kW，乾燥風量 40m<sup>3</sup>/hr，最低露點溫度-20°C以下，如果加裝冷卻水循環系統，最低露點溫度-40°C以下。

表 1、循環式除濕輪乾燥機規格表

再生電熱功率(kW)	4.00
再生風車功率(kW)	0.20
乾燥電熱功率(kW)	4.00
乾燥風車功率(kW)	0.12
乾燥風量(m <sup>3</sup> /hr)	40.00
冷卻水需求流量(L/min)	5.00

循環式除濕輪乾燥系統的外觀如圖 7 所示，由物料桶和除濕輪乾燥機連接而成。潮濕塑料或食品等原料置於物料桶內，除濕輪乾燥機持續不斷地循環接受物料桶排出的潮濕空氣並提供乾燥空氣，將桶內原料脫水直到預定含水率。



圖 7、設備外觀圖

循環式除濕輪乾燥系統的架構和流程示意圖如圖 8 所示[4]，包括製程氣流和再生氣流，兩道氣流方向相反。全部乾燥系統主要包括孔洞吸附輪(1)，潮濕空氣鼓風機(2)，空氣管路(3)，物料桶(4)，蒸氣壓縮冷凍迴路(5)，再生熱風鼓風機(6)、空氣過濾器(7)和冷卻水迴路(8)。空氣管路(3)包括正壓低溫潮濕空氣管路(301)，乾燥空氣管路(302)，除濕空氣管路(303)，污染潮濕空氣管路(304)，潔淨潮濕空氣管路(305)，負壓低溫潮濕空氣管路(306)，冷卻乾燥空氣管路(307)，二次乾燥空氣管路(308)，環境空氣管路(309)，高溫再生空氣管路(310)和高溫潮濕空氣管路(311)。蒸氣壓縮冷凍迴路(5)包括壓縮機(501)，冷凝加熱器(502)，膨脹控制閥(503)，蒸發冷卻器(504)，高溫高壓氣態冷媒管路(511)，高溫高壓液態冷媒管路(512)，低溫低壓液態冷媒管路(513)，低溫低壓冷媒氣態管路(514)和冷媒(515)。冷凝加熱器(502)運轉溫度 50~80℃，蒸發冷卻器(504)



然後經過濾器、冷卻器、乾燥風車和冷卻器，最後回到除濕輪再脫水，如此持續不斷地循環。而再生氣流由再生風車驅動，外界空氣經過濾器、再生風車和再生電熱器升溫，吸收除濕輪的水分而排出外界。

除濕輪除濕和再生的原理如圖 9 所示，剖面可分為除濕區、再生區和冷卻區。除濕輪持續不斷地轉動循環，依序經過吸濕、再生和冷卻三個不同過程區域。經過除濕輪脫水的乾燥空氣，部份分流至冷卻區，將除濕輪預冷以提高除濕輪吸水性能。

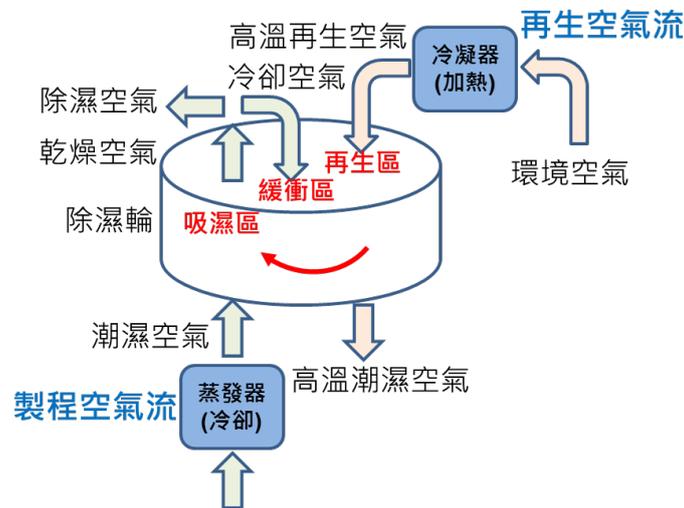


圖 9、除濕輪原理

除濕輪基本圖示如圖 10 所示[9]，以馬達轉輪皮帶組驅動，轉速  $N$ ，製程氣流經過除濕輪後，水分子被吸附，溫度( $T$ )上升，濕度比( $\omega$ )下降，再生氣流從對側經過除濕輪，吸收水分子，溫度( $T$ )下降，濕度比( $\omega$ )上升。為計算除濕輪動態操作特性，本計畫根據 Muzaffar Ali2013 發表[7]，列出除濕輪反應動力參數模型相關方程式如下：

除濕輪的水氣吸附量是相對濕度 $\phi$ 的函數，可以用 Freundlich 方程式表示如下：

$$q_{eq} = C(\phi)^{1/n} \quad (1)$$

表面擴散與溫度的關聯性如下所示[8]：

$$D_{sf} = D_0 \exp\left(-\frac{E_{at}}{RT}\right) \quad (2)$$

再生氣流與進程氣流之換熱量如下所示：

$$\dot{H} = \frac{\rho_{dw} C_{pc} (T_{reg} - T_{sin}) NL}{\beta_s \rho_a U_s} \quad (3)$$

水汽蒸發量被吸附材料吸收如下所示：

$$q = \left(\frac{2}{\pi}\right) \sqrt{D_{sf}} \sqrt{t} \rho_{ad} A_{ws} q_{eqsin} \quad (4)$$

製程氣流轉移至再生氣流排放之水氣量如下所示：

$$\dot{Q} = qAL\rho_{dr}N = \left(\frac{2}{\pi}\right) \sqrt{D_{sf}} \sqrt{3600\beta_s} \sqrt{N} \rho_{ad} A_{ws} q_{eqsin} AL\rho_{dw} \quad (5)$$

以上方程式變數的意義請參考表 2。

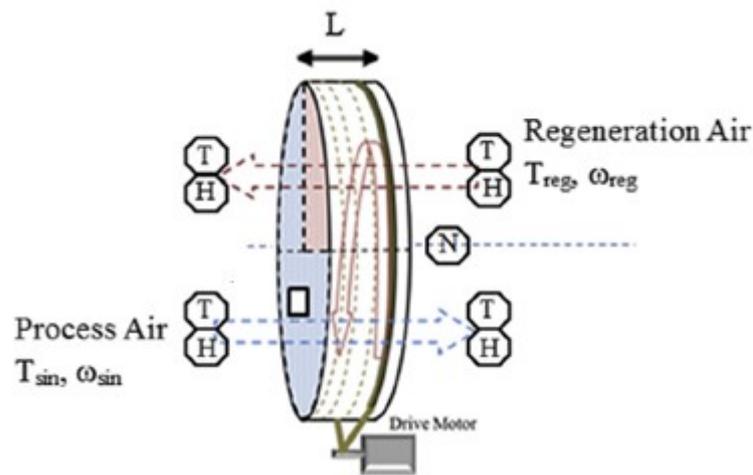


圖 10、除濕輪基本圖示

表 2、變數總表

A	cross sectional area of rotor ( $m^2$ )	$\beta$	fractional area of each zone (—)
C	adsorption constant (—)	$\phi$	relative humidity (0—1)
$C_{pc}$	specific heat capacity of desiccant wheel (kJ/kg K)	$\tau$	time constant (s)
D	diameter of desiccant wheel (m)	下標	
H	amount of sensible heat removed per hour (kJ/h)	a	air
L	length of desiccant wheel (m)	ad	adsorbent
N	rotation speed of desiccant wheel (rph)	dw	desiccant wheel
n	adsorption constant (—)	d	distributed
Q	amount of water vapor absorbed onto wheel during an hour (kg/h)	in	inlet
$q_{eq}$	equilibrium amount of water absorbed (kg of moisture/ kg of adsorbent)	pc	heat capacity of air at constant pressure
q	amount of water vapor absorbed onto wheel (kg of moisture/ kg of dry air)	reg	regeneration air
T	temperature (K)	s	process air
U	superficial velocity of air (m/s)	sf	surface
希臘字母		ws	wheel surface
$\rho$	density ( $kg/m^3$ )		

### 參、主要發現與結論

本文列出四種吸附材料之耐候性、熱傳導係數和熱膨脹係數如下表所示，陶瓷類有較佳的耐熱震性能，矽膠和聚丙烯酸鈉有較佳的耐酸鹼性能，熱傳導係數和熱膨脹係數都很低。

表 3、四種吸附材料之耐候性、熱傳導係數和熱膨脹係數

	耐酸鹼(PH)	耐熱震(°C)	熱傳導係數(W/mK)	熱膨脹係數(1/°C·10 <sup>-6</sup> (-6))	資料來源
氧化鋁陶瓷(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3~13	200	30~33	7.0~8.1	台灣飛羅得公司
矽鋁氮氧化物陶瓷	3~13	800	27	2.4~2.9	台灣飛羅得公司
矽膠(silica gel)	-	X	1.3~1.5	0.55~0.75	Fisher Scientific
聚丙烯酸鈉(sodium polyacrylate)	-	X			Fisher Scientific

為了解不同吸附材料之耐候性，本研究長期測試商業產品 FAM Z05 沸石吸附性能隨時間之改變。實驗裝置如圖 11 所示，主要元件包括吸附床、蒸發器以及電子荷重器 (Load cell)。利用恆溫槽控制蒸發器溫度以及吸附床吸/脫附壓力，利用另一恆溫槽控制吸附床溫度，使吸附床在控制溫度及壓力下量測其吸附之水重，而計算出其吸水率。

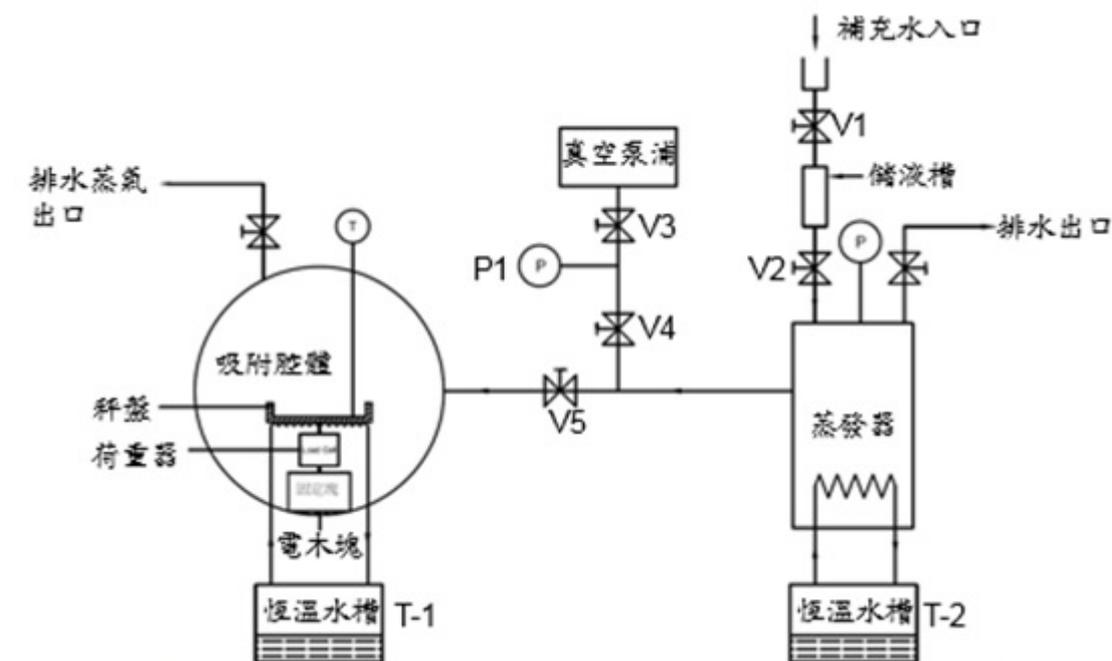


圖 11、水汽吸附測試裝置圖

圖 12 所示為沸石在 30°C 的情況下，改變蒸發器溫度，量測沸石吸附水汽重量，再換算成吸附率所得之圖。由於蒸發器溫度越高，蒸汽壓越大，水汽越不容易脫附出來，因此吸附率就越高。每隔約一個月測試一次，各次測試結果，除第一次外，其他各次的吸附率越來越低，明顯看出吸附性能隨時間而遞減，最大差異可到 7%，可能為此種沸石吸附性能會隨時間改變，對整體除濕系統影響很大，後續選擇吸附材料時應特別注意。

圖 13 為 X13 沸石在不同溫度情況下之吸附率測試結果比較，測試方法與圖 12 相同，但同時改變沸石溫度，沸石溫度越高，水汽越不容易吸附，因此吸附率越低。本研究共測試沸石溫度為 40、50、60°C，在蒸發器溫度從 5~35°C 時之吸附率。從圖可看出沸石之吸附率隨蒸發器溫度升高而增大，但隨沸石溫度增高而降低。

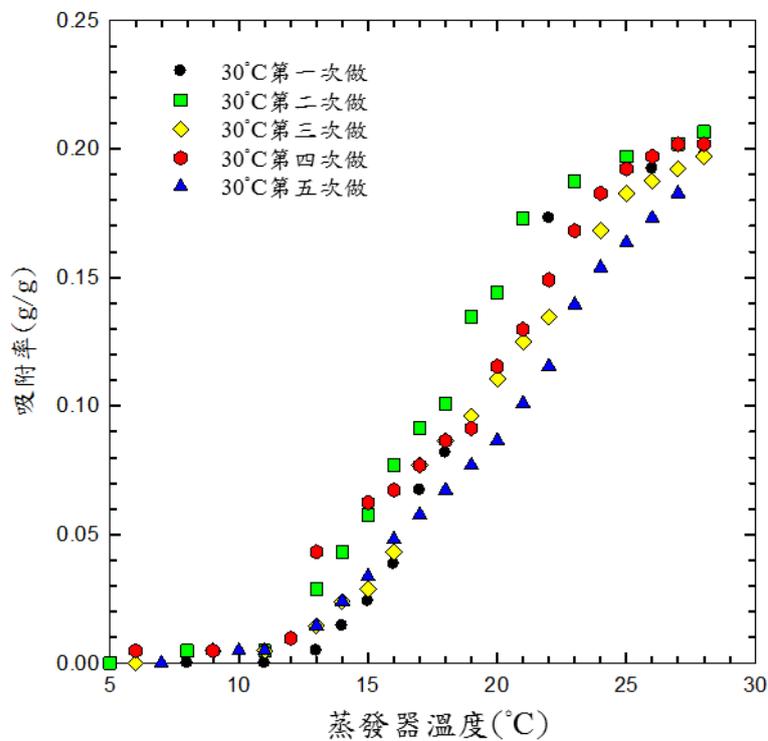


圖 12、FAM Z05 沸石不同時間吸附性能測試比較

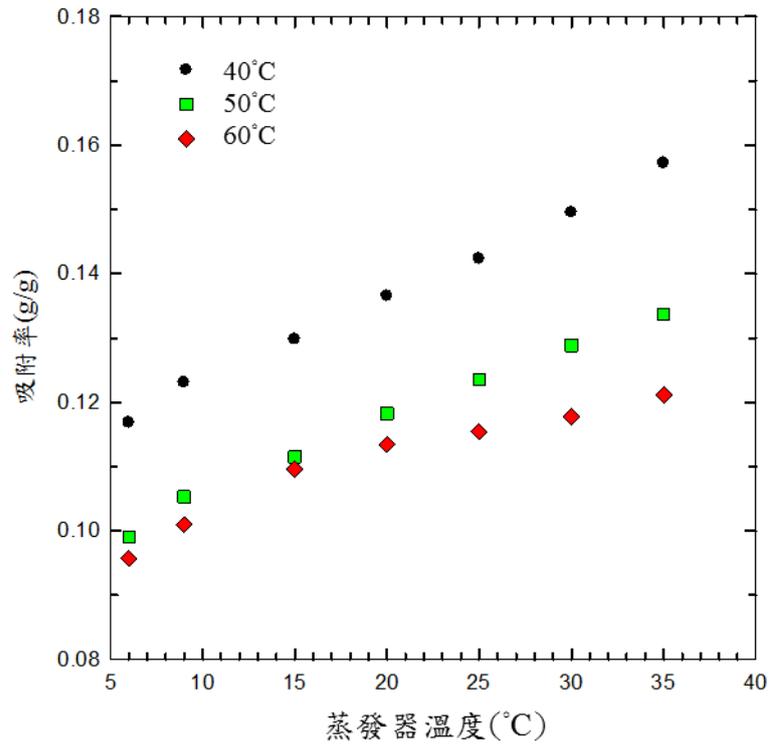


圖 13、X13 沸石不同溫度吸附性能測試比較

矽膠在不同吸附床溫度以及蒸發器溫度的吸附性能如圖 14[5]所示，當吸附床溫度高時，水汽脫附壓力高，而蒸發器溫度高時飽和蒸汽壓高，以至於脫附阻力大。因此整體而言，矽膠對水的吸附率隨蒸發器溫度上升而增加，但隨吸附床溫度上升而減少，此結果與先前工研院測試結果[6]一致。

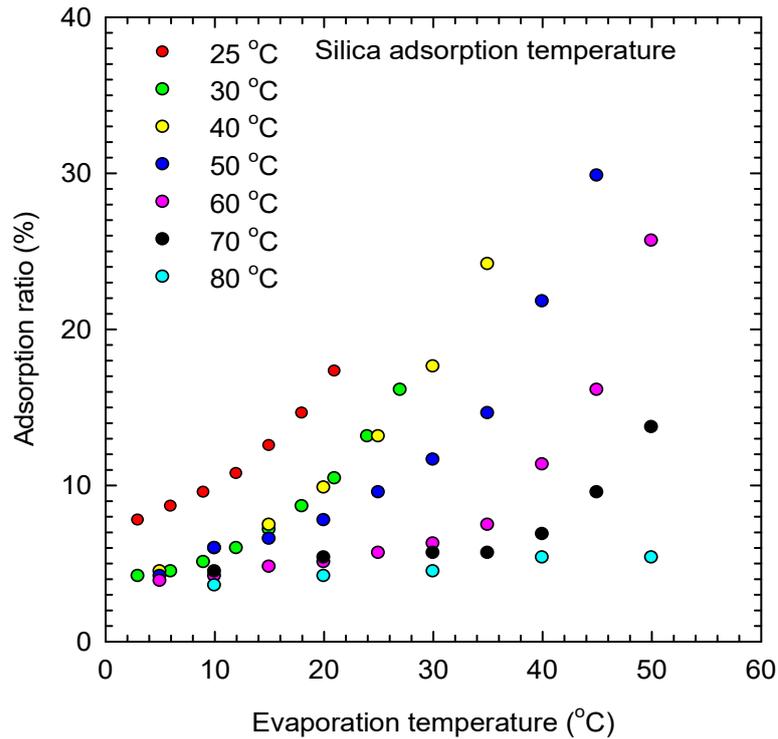


圖 14、矽膠在不同吸附床溫度以及蒸發器溫度的水汽吸附率

良好的吸附劑材料需具備高比表面積、材料高熱傳導係數及在很小的溫度變化範圍內具有很大的吸附量變化、材料穩定性及低成本。矽膠(Silica Gel)吸附熱可達 2,500~2,800 kJ/kg，且使用較低熱源溫度(50~100°C)；沸石(Zeolite)具有高吸附熱(3,300~4,200kJ/kg)，能吸收較低分壓的水蒸汽，但再生溫度較高，系統使用侷限在較高的熱源系統上。氧化鋁陶瓷具有較佳的耐熱震性能、高吸濕率及最少磨耗率的優點，多孔性微結構造就了氧化鋁吸濕能力強的特性，且結構安定性佳，可以承受急遽的溫度變化，即使浸泡於水中也不會收縮、膨脹、軟化或分解。

#### 肆、參考文獻

1. 工業技術研究院 綠能與環境研究所，吸附乾燥多功能應用與推廣計畫，106 年 6 月。
2. 王多美等人，鋁集塵灰再利用-提取氫氧化鋁之研究，中國礦冶工程學會 107 年年會。
3. 經濟部能源局，空調吸附除濕節能應用技術手冊，104 年 12 月。
4. 李恆毅等人，結合發泡式孔洞吸附輪與蒸氣壓縮冷凍迴路的乾燥系統，中國機械工程學會第三十五屆全國學術研討會。
5. 楊建裕、黃威智、陳又維、蔣政栓，2008，「小型太陽能吸附式空調系統研究」，國科會專題研究計畫（NSC 96-ET-7-008-001-ET）期末報告。
6. 李建宏等人，吸附材料發展現況與製冷應用，104 年 7 月。
7. Ali, M., Vukovic, V., Sahir, M. H., & Basciotti, D. (2013). Development and validation of a desiccant wheel model calibrated under transient operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 469-480.
8. Kodama, A., Hirayama, T., Goto, M., Hirose, T., & Critoph, R. E. (2001). The use of psychrometric charts for the optimisation of a thermal swing desiccant wheel. *Applied Thermal Engineering*, 21(16), 1657-1674.

9. Narayanan, R., Saman, W. Y., White, S. D., & Goldsworthy, M. (2011). Comparative study of different desiccant wheel designs. *Applied Thermal Engineering*, 31(10), 1613-1620.