

空調吸附除濕節能應用 技術手冊

經 濟 部 能 源 局 指 導

財團法人台灣綠色生產力基金會 編印

中 華 民 國 一 百 零 四 年 十 二 月

目錄

壹、前言.....	1
貳、吸附除濕原理	2
2.1 等溫吸附曲線.....	4
2.2 除濕材料.....	7
2.3 全熱交換器.....	17
2.4 除濕轉輪形式.....	21
2.5 低溫再生系統.....	23
參、改良式吸附除濕技術設計與應用	25
3.1 蓄能材料應用於週期式全熱交換器	26
3.2 矽膠風管應用於外氣空調系統	34
3.3 除濕轉輪結合熱泵應用於外氣空調系統	37
3.4 兩段式除濕轉輪結合熱泵應用於外氣空調系統	44
肆、吸附除濕系統之節能效益分析	48
伍、吸附除濕技術之應用案例介紹	54
5.1 自來水冷排結合週期式全熱交換器應用於某觀光區辦公室	54
5.2 除濕轉輪結合熱泵系統應用於某研究大樓人員休息室	57
5.3 氣對氣全熱交換器應用於某宿舍	60

圖目錄

圖 2.1 冷凝除濕系統與吸附除濕系統	3
圖 2.2 等溫吸附曲線基本型態示意圖	4
圖 2.3 水蒸氣壓力等溫吸附曲線	6
圖 2.4 傳統的沸石與改良沸石的示意圖	9
圖 2.5 為矽膠與複合材料的等溫吸附曲線	10
圖 2.6 氧化鋁與矽藻土的等溫吸附曲線示意圖	13
圖 2.7 高分子的等溫吸附曲線	16
圖 2.8 回復式全熱交換器	18
圖 2.9 再生式全熱交換器	18
圖 2.10 除濕材料以不同方式應用於空調系統	22
圖 2.11 多段式熱泵結合除濕轉輪系統	24
圖 3.1 基礎測試實驗架構圖	25
圖 3.2 蓄能材料應用於週期式全熱交換器系統實體圖	27
圖 3.3 蓄能材料應用於週期式全熱交換器運轉示意圖	28
圖 3.4 蓄能材料配置示意圖	30
圖 3.5 碳黑蓄能材料系統在 5 分鐘週期有效度增加量	31
圖 3.6 純鋁蓄能材料系統在 8 分鐘週期有效度增加量	32
圖 3.7 純鋁/碳黑蓄能材料系統在 5 分鐘週期有效度增加量	33
圖 3.8 矽膠風管應用於外氣空調系統示意圖	34
圖 3.9 太陽光入射強度和矽膠風管移除潛熱的能力	35
圖 3.10 矽膠風管操作一小時狀態	36
圖 3.11 除濕轉輪結合熱泵之空調除濕設備	37
圖 3.13 矽膠/高分子複合材料	39
圖 3.14 矽膠與複合材料在不同相對濕度下平均吸附率比較	40

圖 3.15 三種類型的除濕轉輪之壓降比較	40
圖 3.16 不同填充床除濕轉輪外觀	41
圖 3.17 兩段式除濕轉輪結合熱泵	44
圖 3.18 兩段式除濕轉輪結合熱泵操作狀態之空氣線圖	45
圖 3.19 多段式除濕轉輪結合熱泵操作狀態之空氣線圖	45
圖 3.20 除濕轉輪轉速對兩段式除濕轉輪結合熱泵系統的影響	47
圖 3.21 冷卻水塔應用於兩段式除濕轉輪結合熱泵系統	47
圖 4.1 各種除濕設備比較示意圖	50
圖 5.1 週期式全熱交換器	54
圖 5.2 自來水冷排系統	55
圖 5.3 自來水冷排結合週期式全熱交換器系統	55
圖 5.4 外氣處理過程空氣線圖	56
圖 5.5 除濕轉輪結合熱泵系統	58
圖 5.6 除濕轉輪結合熱泵系統安裝圖	58
圖 5.7 氣對氣全熱交換器安裝實體圖	60

表目錄

表 2.1 三種除濕系統比較	2
表 3.1 除濕轉輪結合熱泵系統性能測試	42
表 3.2 在同樣測試狀態下兩種除濕轉輪結合熱泵系統性能比較	43
表 4.1 五種除濕設備節能比較表	50
表 4.2 五種除溼系統的優缺點比較	53
表 5.1 自來水冷排結合週期式全熱交換器系統節能分析	56
表 5.2 複合材料除濕轉輪結合熱泵系統一整年除濕量分析	59
表 5.3 氣對氣全熱交換器全年效益評估表	61

壹、前言

台灣自身能源蘊藏量不豐富，進口能源約占了總需求的 97% 以上，近年隨全球暖化，國際能源價格持續上揚、電價上漲等因素，節約能源已勢在必行。政府及民間都在推動節能減碳政策，台灣地區夏季氣候炎熱，空調用電為建築耗電的主要來源，如何使空調節能，是許多人都非常關心的問題。然而人民對於生活水準的要求也日漸重視，辦公大樓之空調系統長時間運轉，鮮少引進室外新鮮空氣，造成多數大樓均是一氧化碳及二氧化碳等濃度過高的病態大樓，人民生活品質大幅下降，因此勢必要引進室外空氣來降低室內空氣污染物的濃度，但也會間接造成額外的空調負荷而增加能源消耗。

另一方面，伴隨著台灣節能減碳政策的推行，強制規定特定服務業及政府部門冷氣設定溫度在夏天不能低於 26°C，冬天不能高於 22°C，因此冰水主機系統的冰水供水溫度會被調高，達到降低冰水主機群用電的目的。但對於使用冷凝方式除濕的空調系統，提高冰水溫度亦將影響空調箱中盤管的除濕效果，使得室內的濕度偏高，人員的舒適感將受到影響，除濕系統的改良與節能方式也因此在近年來被廣泛的研究。

「吸附除濕技術(Desiccant adsorption)」是一種不需冷媒且低成本低耗能的除濕技術，被廣泛應用於農業、商業、工業、舒適住宅等，所以在引進外氣的同時，使用除濕材料對外氣進行除濕，可以有效的降低耗能達到節能與提高生活品質的目的。在國內外皆有學者進行研發與應用，在現今各國積極減少能源消耗，進而降低溫室氣體排放之競爭壓力下，「吸附除濕技術」極具推廣之價值。

財團法人台灣綠色生產力基金會（以下簡稱本會）受經濟部能源局委託，針對外氣空調機組效率提升方案進行研究，本會乃委請國立台灣大學機械系陳希立教授執筆，根據外氣空調節能技術原理、設計規劃及實際測試案例彙編撰此「吸附除濕技術手冊」，提供各能源用戶參考，而遺誤掛漏，必所難免，尚請學者先進，賜予指正為禱。

貳、吸附除濕原理

表 2.1 顯示常見的三種除濕系統，冷凝除濕的原理是把溫度降到露點溫度以下，使水氣凝結而排出空氣中，但為了達到所需的濕度範圍，會過度的降溫，因此必須再次加熱空氣才能達到人體舒適的溫度範圍，造成能源的浪費。圖 2.1 為冷凝除濕操作下空氣在的空氣線圖上的變化。除濕材料則是利用材料與水氣的物理或是化學鍵結力，直接抓取空氣中的水氣，抓取能力取決於當時的水蒸氣分壓與溫度，但是吸附過程通常會產生大量的吸附熱，使空氣溫度上升。圖 2.2 為除濕材料除濕系統在空氣線圖上的變化，除濕材料組成的除濕系統中，又分為固態除濕系統與液態除濕系統。液態除濕系統因為具有較高的除濕能力與可流動性，可以深入各種空隙使濕度快速平衡與穩定，但是液態除濕材料屬於鹽類，大部分對金屬都具有腐蝕性，因此系統的管材選用與維修保養方面較為耗費成本。固態除濕材料雖然除濕性能沒有液態除濕材料來的高，但是不會有腐蝕金屬的問題，加上成本便宜，非常適合應用於民生空調系統。所以本研究將對潛熱負荷較重的亞熱帶地區，在引進外氣的同時進行節能改善，固態除濕材料應用於空調系統降低潛熱的負荷將是本技術手冊的重點。

表 2.1 三種除濕系統比較

除濕方法	原理	缺點
冷凝除濕 (可順便降溫)	降低溫度使水結露排出	需要再熱
液態除濕材料 (具有高接觸面積 與流動性)	利用物理或化學吸附方法除去水分 ex：液態 CaCl_2 、PEG1000	具腐蝕性，維修不易
固態除濕材料 (穩定、容易維修)	利用物理或化學吸附方法除去水分 ex：固態 CaCl_2 、矽膠、沸石、吸水高分子	壓降大

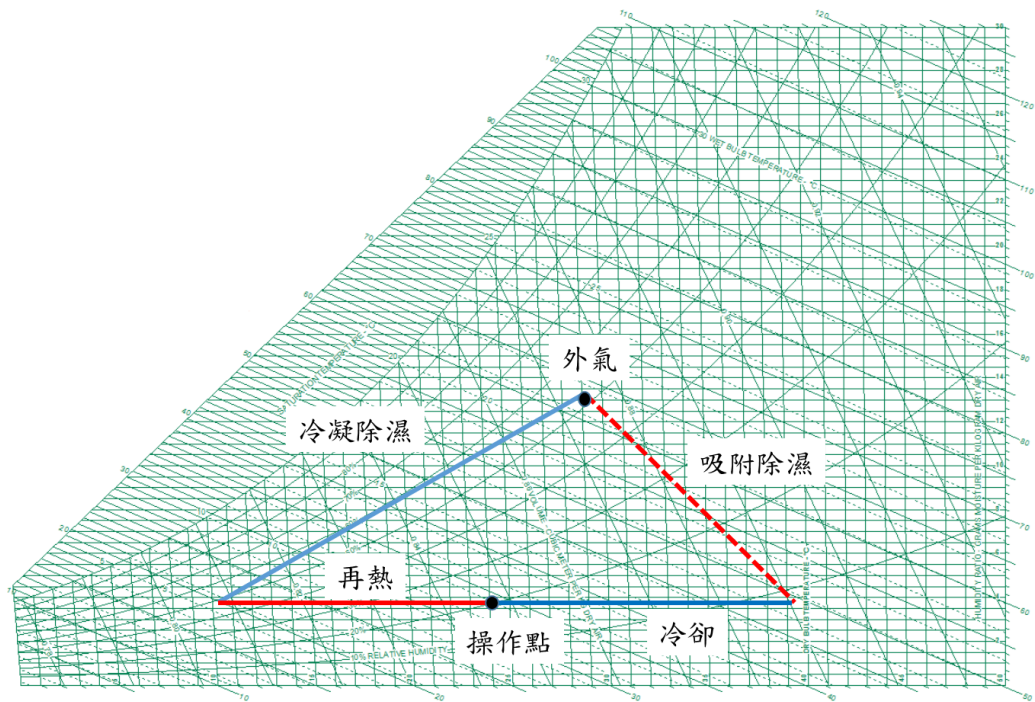


圖 2.1 冷凝除濕系統與吸附除濕系統

2.1 等溫吸附曲線

優良的除濕材料通常具備高的瞬時除濕能力與大的除濕容量，固態除濕材料通常是利用孔洞材料的吸附性質對空氣做除濕，因此可以依孔洞的不同分為 5 大等溫吸附曲線(Adsorption Isotherm)，其定義為當恆溫狀態下，一氣體吸附質對於固體吸附劑之吸附量與氣體平衡壓力間的關係曲線，常運用來解釋吸附機制與強度。Brunauer【1】依照吸附的相互作用將吸附等溫線分為五種等溫吸附曲線類型，如圖 2.3 所示。

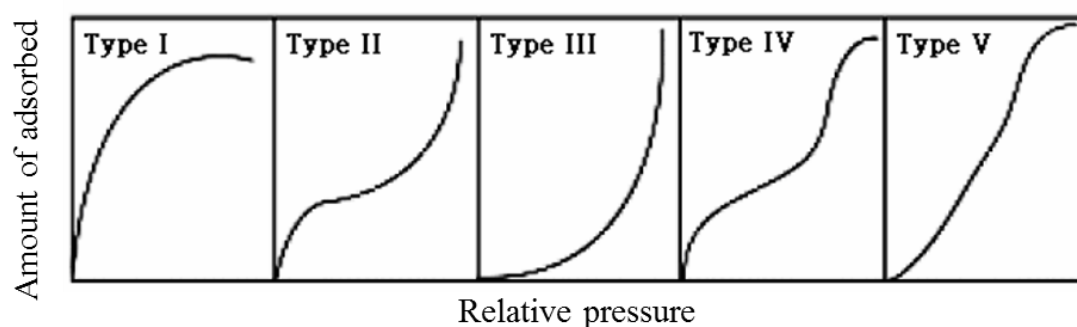


圖 2.2 等溫吸附曲線基本型態示意圖

Type I 等溫吸附曲線

此等溫吸附曲線為微孔洞(micro-pores)吸附劑之吸附行為，又名為 Langmuir-type isotherms。當壓力上升時，單層吸附質分子覆蓋整個吸附劑表面，並且逐漸填滿其孔隙，隨著壓力增至極限，氣體之吸附量快速增加使孔隙全部填滿，達到一水平最大值，其特徵是很平穩地接近吸附極限，亦即相當於一完整單層的吸附，常發生在壓力遠低於飽和蒸氣壓值之物理性吸附、一般化學吸附作用及具有微小孔洞的多孔性固體中。

Type II 等溫吸附曲線

為非孔隙(non-pores)吸附劑之吸附行為，基於曲線形狀又名為 S 型等溫吸附曲線，為常見之等溫吸附狀況。通常發生在無孔性固體表面

上之多層物理吸附，曲線先彎曲部分代表單層吸附形成，之後的部分則代表多層吸附現象，會接近吸附無限厚的膜，在大約相對壓力為0.3時，等溫線向上凸，第一層吸附大致完成。曲線當氣體在多孔性的固體表面上進行物理吸附時，也可形成此型等溫吸附曲線。此吸附模式最著名為BET方程式，故也稱BET等溫線。本研究之吸附材料氧化鋁對水的吸附屬於此類型。

Type III 等溫吸附曲線

為非孔隙(non-pores)或巨孔(macro-pores)吸附劑之吸附行為。此類的吸附曲線呈凹形，發生於當氣體分子和固體間之吸附力遠小於氣體分子間作用力時。一旦氣體分子被吸附，則吸附分子和吸附分子之間的作用力則會促進其他分子吸附之能力，故相對壓力值愈高，多層吸附現象愈明顯。此類曲線發生的特徵為吸附作用之反應熱等於或小於吸附質的液化熱。本研究之吸附材料矽膠對水的吸附屬於此類型。

Type IV 等溫吸附曲線

為中孔(mesopores)吸附劑之吸附行為。當相對壓力很小時其圖形和Type II 相似隨著壓力增加，氣體分子於孔洞中開始凝結而發生毛細冷凝現象(capillary condensation)，造成曲線中段吸附量持續上升，當冷凝現象持續到填滿所有較大孔隙時，曲線趨於另一水平線達到吸附飽和。由於冷凝在較大孔洞之吸附量較他型曲線多，在脫附時需將相對壓力降至較低才可使大量吸附質汽化出來，因此其脫附曲線常具有遲滯現象(hysteresis)發生。

Type V 等溫吸附曲線

為中孔(mesopores)或微孔(micro-pores)吸附劑之吸附行為。其發生原因和Type III 相似，且在高相對壓力時則有孔隙凝結的現象。通常此類型的等溫吸附曲線較為少見。在相對壓力增加的情況，會因為孔

隙表面積的限制使曲線轉平緩，為毛細冷凝現象的反應，因為在達到飽和壓力前就平緩下來，而且出現遲滯效應。

在量測材料的等溫吸附曲線時，通常測試氣體是使用穩定性高的氮氣，然而在除濕系統中，水氣對於材料的吸引力會影響等溫吸附曲線的變化，因此使用水蒸氣量測等溫吸附曲線較為符合除濕系統實際的需求，Wang 等人【2】把常用的除濕材料歸類為更加簡易的四種吸附曲線，如圖 2.4 所示，可以分為 Langmuir type、linear type、sigmoid type 和 drainage type。縱座標為每公克的除濕材料，在固定相對濕度下可以吸附多少克的水，橫坐標為相對濕度，可以發現除濕材料的除濕性能與相對濕度的關係非常重要。

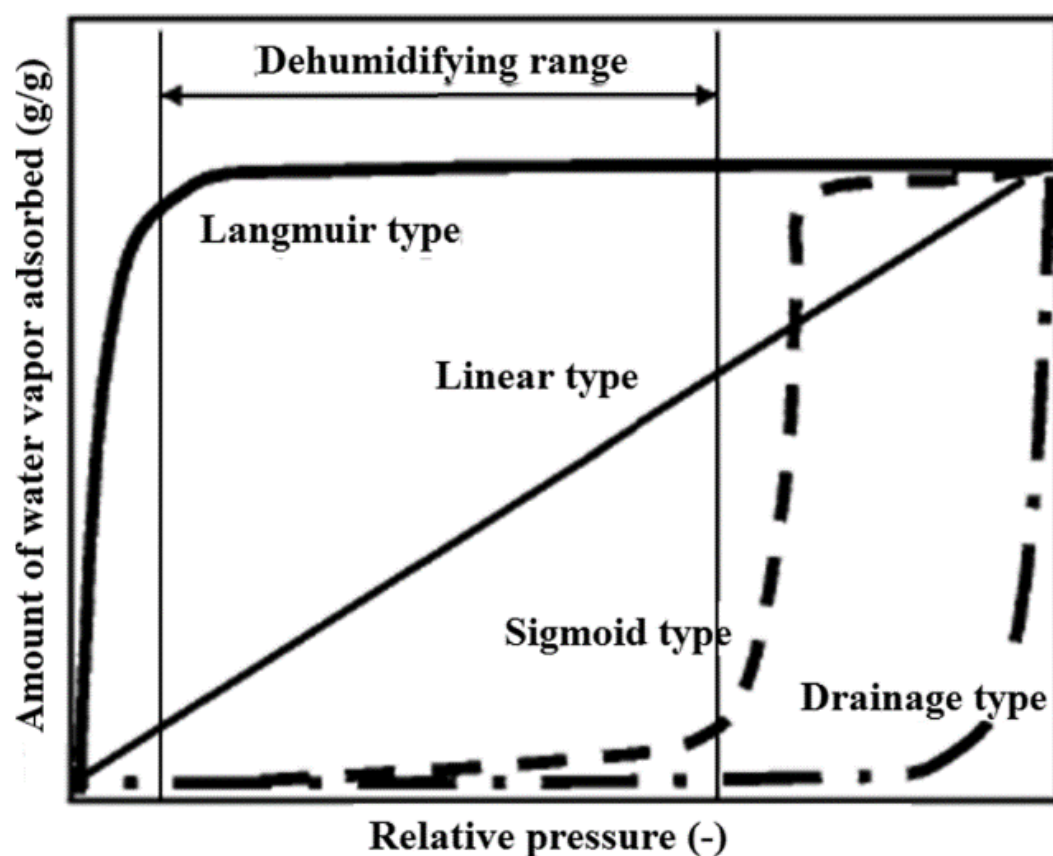


圖 2.3 水蒸氣壓力等溫吸附曲線【2】

2.2 除濕材料

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【3】，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【4】。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。

沸石與分子篩 (Langmuir type)

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【5】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【6】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【7】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【8】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 2.4 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。

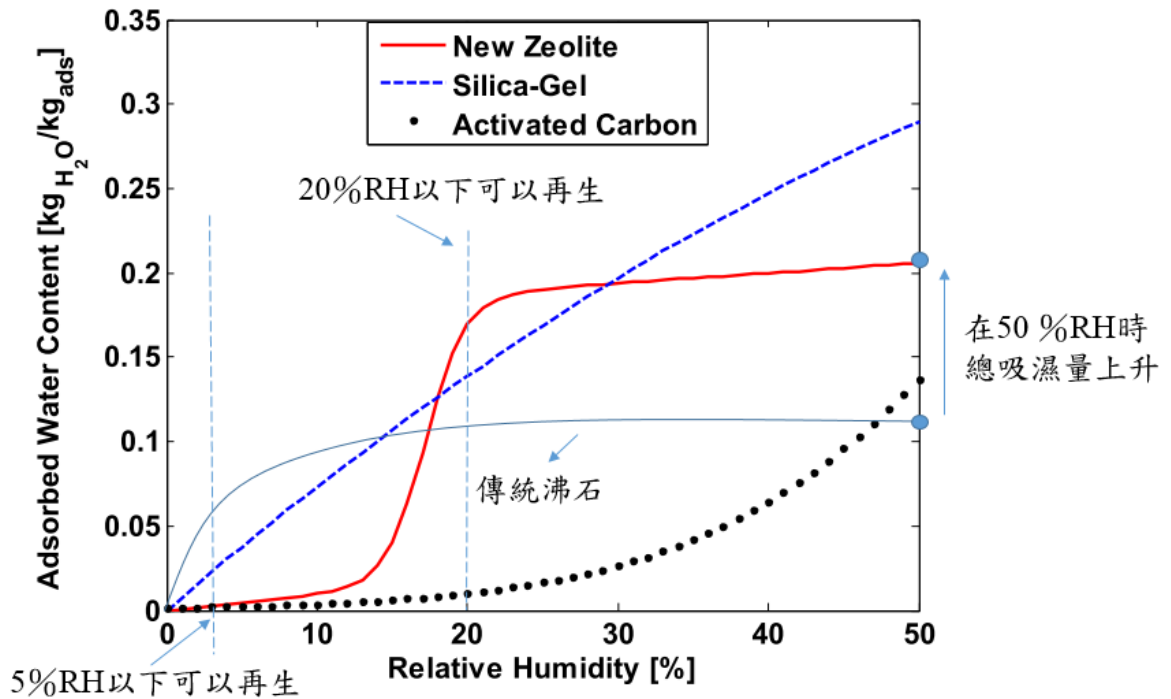


圖 2.4 傳統的沸石與改良沸石的示意圖【8】

矽膠 (linear type)

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； $\text{Si} \cdot \text{O} \cdot \text{H} \cdots \text{OH}_2$ ；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 m^2/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 (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【9】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升，在不同相對濕度下都保持穩定的吸附能力，Jia 團隊【10】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 2.5 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。

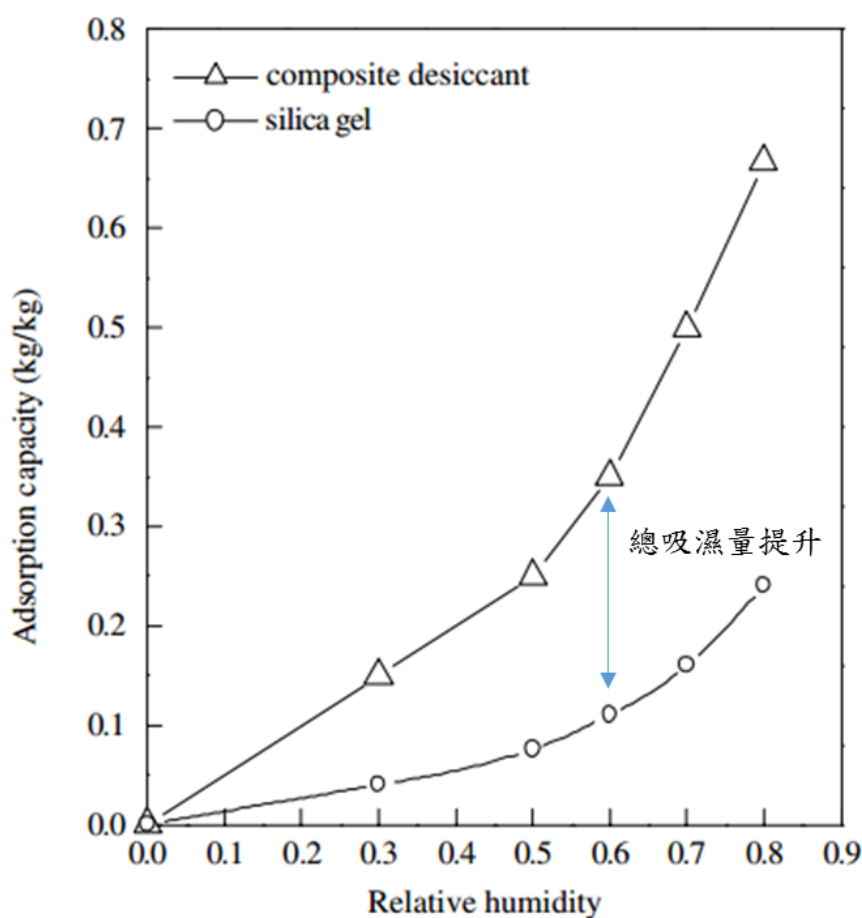


圖 2.5 為矽膠與複合材料的等溫吸附曲線【10】

活性氧化鋁與矽藻土 (sigmoid type)

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變，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變。首先，在攝氏約 500°C 時會轉換為 $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，然而由於 $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ 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 $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的相關研究較缺乏；若繼續提高三水鋁石的加熱溫度，到達攝氏 $1,000 \sim 1,200^\circ\text{C}$ 之間時， $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ 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 $170^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ 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 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【11】，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。其應用範圍為相對溼度 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 2.6 為兩種材料的等溫吸附曲線示意圖。

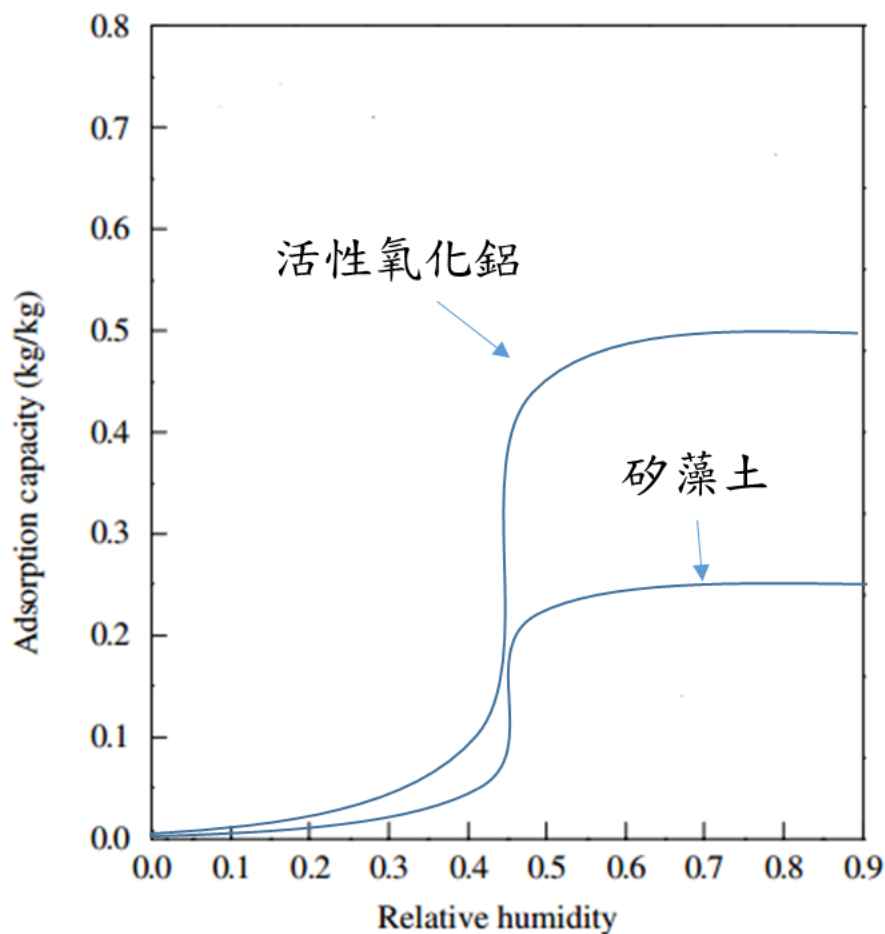


圖 2.6 氧化鋁與矽藻土的等溫吸附曲線示意圖

碳黑與高分子 (drainage type)

碳黑是黑色粉末狀或顆粒狀的無定形碳。主成分除了碳以外還有氧、氫等元素。結構上由於微晶碳是不規則排列，在交叉連接之間有細孔，在活化時會產生碳組織缺陷，因此它是一種多孔碳，堆積密度低，比表面積大。碳黑主要是用作為氣體或各種物質選擇性吸附的基材，用途廣泛，上自化學品、醫藥品的生產製程，下至廢水處理、含戴歐辛(dioxin)之廢氣處理等環保領域，也用於淨水、廢水處理、甜味料脫色、化學、醫藥和礦物加工、食品加工、空氣或其他氣體吸附純化與溶劑回收。一般而言，目前碳黑在水質的處理上大約佔其用途的 80%，包括 30%用於飲用水、22%用於工業及都市廢水、12%用於

甜味料之脫色、地下水用 7%、礦物用 5%、家庭用約 5%、食品加工用約 4%，以及其他包括化學製程的雜項約佔有 11%；至於在氣體上的用量約佔其 20%，包括 5.8%用於空氣淨化、5%用於溶劑回收、4%用於汽車，以及其他包括香煙濾嘴的雜項約佔有 5.2%。碳黑因碳的形狀與性質而有不同的應用領域。粉狀碳主要應用於化學品純化/脫色、水處理、飲料淨化、精製糖、製藥及食用等液相製程；粒狀碳除了可用於液相外，也可用於氣體吸收、溶劑回收、金的回收等氣相應用；蜂巢狀及纖維狀碳則多使用於大空間低濃度的氣相中，如吸附空氣中 VOCs(有機揮發性化合物)或毒性物質的濾網、影印機或室內空氣淨化器用除臭濾網等；纖維狀碳尚可做成口罩、防護衣及濾水器之濾心等。Habib 團隊【12】發表活性碳具有非常大的表面積與微孔，所以具有非常大的吸濕容量，非常適合用在吸附式製冷系統與除濕空調系統，但是 Hongyu 等人【13】經由研究指出碳黑因親水性較差，比較適合用在相對濕度大於 70%的狀況下。因為碳黑屬於 drainage type，只有在高相對濕度時才具有較高的吸濕能力，但相對的只需把相對濕度降至 50%以下即可有效的把水分脫附。

吸水性高分子 (Superabsorbent polymers, 簡稱 SAP, 也叫高吸水性樹脂, 超強吸水機, 高吸水性聚合物), 是一種能夠吸收並保留相對於其本身質量要大得很多的液體的新型功能高分子材料。吸水高分子, 屬於水凝膠, 能夠通過和水分子連接的氫鍵吸收溶液。因此, 高吸水性高分子吸水能力受溶液離子濃度影響。在去離子水和蒸餾水中, 高吸水性高分子可以吸收 500 倍於本身重量 (30-60 倍於本身體積), 但是如果放入 0.9%鹽水中, 吸收能力下降到 50 倍於本身重量。溶液中的價態陽離子的出現會妨礙高分子與水分子形成價鍵的能力。總吸收性和膨脹能力由和高分子的交聯類型和交聯度所控制。低密度

交聯高吸水性高分子通常具有較高吸水能力，並膨脹到比較大的程度。高交聯密度的高分子顯示出來低吸收能力和膨脹能力。膠的強度較強，能在適當的壓力下保持顆粒的形狀。高吸水性高分子最大的用途是一次性個人衛生用品，比如小孩兒尿布，成人安全內褲和衛生巾。上個世紀 80 年代，由於擔心和中毒性休克症有關，衛生棉條中不再使用高吸水性高分子。高吸水性高分子也被也可用於阻止水與地下電力通信電纜的漏電問題，還可以應用於園藝保水劑，以及廢物的泄漏之控制水的滲透液等，甚至可以應用於電影或者舞台劇中人工造雪。1978 年，日本首次將其投入商業化應用，用在衛生紙巾上，而美國最早將其用來照顧居家病人的一次性床墊。高分子除濕劑已經被研究近十年，因為它具有非常大的吸濕容量與價格便宜，近年來是研究的重點之一。根據 Lee 等人【14】的研究，超級除濕高分子(super desiccant polymer,SDP)的吸濕容量是傳統矽膠的 2-3 倍，再者，White 等人【15】利用高分子製成之除濕轉輪，可以在低再生溫度(40-50°C)與高相對濕度之處理空氣的狀態下，達到比矽膠更好的除濕效果。Cao 等人【16】測試高分子製成之薄除濕轉輪在各種不同空氣條件下的性能，發現高分子除濕轉輪在低入口溫度和高相對濕度的狀態下擁有較好的除濕能力。綜觀以上的文獻，可以發現高分子材料的除濕能力只有在特定的狀態下才會比矽膠好，在典型的狀態下還是略低於矽膠的，學者認為這是因為高分子除濕材料有比較小的擴散能力與較複雜的吸濕機制所造成的，但還需要更多的研究來證明。圖 2.7 為吸水高分子的等溫吸附曲線，可以看出溫度對於等溫吸附曲線的影響沒有相對濕度來的大，而高分子雖然不是孔洞材料，但等溫吸附曲線類似 drainage type，在高相對濕度時，吸附能力成指數上升。

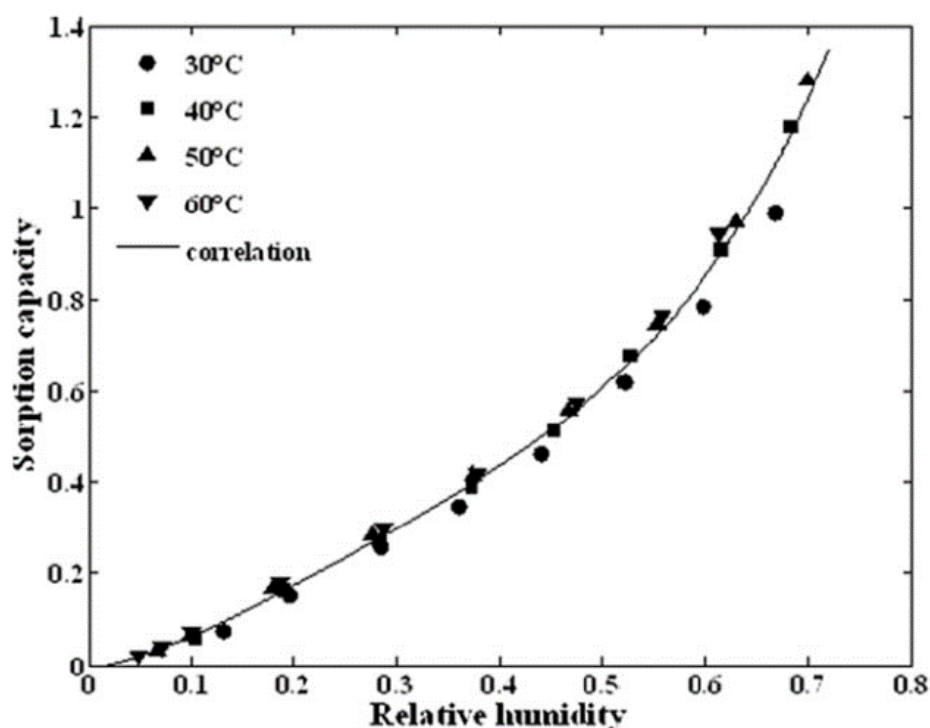


圖 2.7 高分子的等溫吸附曲線【14】

複合除濕材料

複合材料通常可以彌補單一除濕材料的缺點，而達到更好的效果。La【17】等人彙整了一系列液態除濕劑的相關研究，比方說使用氯化鋰當除濕劑可以得到比固態除濕劑大的除濕容量，但是液態除濕劑有潮解與腐蝕的問題。Jia 團隊【10】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，並且解決的潮解易漏和腐蝕的問題。近年來也有很多新穎的複合除濕劑材料【18-19】，Hongyu Huang 等人【20】結合矽膠與活性碳增加碳黑在相對濕度 40 % 以下的吸濕能力，C.S. Tretiak 等人【21】製造出一種新的黏土(clay)與氯化鈣(CaCl_2)複合材料，可使再生溫度下降到 50-57°C，Zeljko Knez 等人【22】結合矽膠與氧化鋁製成之凝膠(mixed $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ aerogels)，可以在 25 次除濕與再生連續運轉下擁有比單純矽膠更好的穩定性。因此以複合材料製作除濕轉輪可達到更好的效果與特殊目的。包括降低再生溫度、提高除濕性能、增加使用壽命等。

2.3 全熱交換器

最早把除濕材料應用於外氣空調系統的就是全熱交換器，在民生空調系統上，除濕空調系統也被用來降低潛熱的負荷。尤其在亞熱帶與熱帶地區的高濕度地區【23】，室內濕度的控制更是關係著人民的健康，通風不良與高濃度二氧化碳會造成病態大樓的產生，世界上部分國家已經立法強制改善【24-25】，然而從外氣引進新鮮空氣會造成室內空調系統的額外負荷，另一方面，為了回應減少二氧化碳排放的國際承諾，很多國家像是台灣限制冷房設定溫度不得低於 26℃，這樣的操作結果會使得除濕能力降低並造成人體的舒適感降低，為了改善彌補這兩項缺點，以除濕材料為基礎，很多種型式的全熱交換器(Total heat exchanger)和新型的除濕系統(Dehumidification systems)近年來蓬勃發展【26,27】，全熱交換器被證明是有效的節能方式之一，且很多種類的全熱交換器已經在全世界商業化，許多實際的研究成果都有計算系統的節能潛力，Yang 等人【28】發表一套低耗能的空調系統，此系統包含一個以氧化鋁為除濕材料的低溫再生的全熱交換器、輻射天花板冷排與商業冷氣機，相對於直接開窗引進外氣，此系統運轉一年後，每個月可以節省 13%-19%的能量。

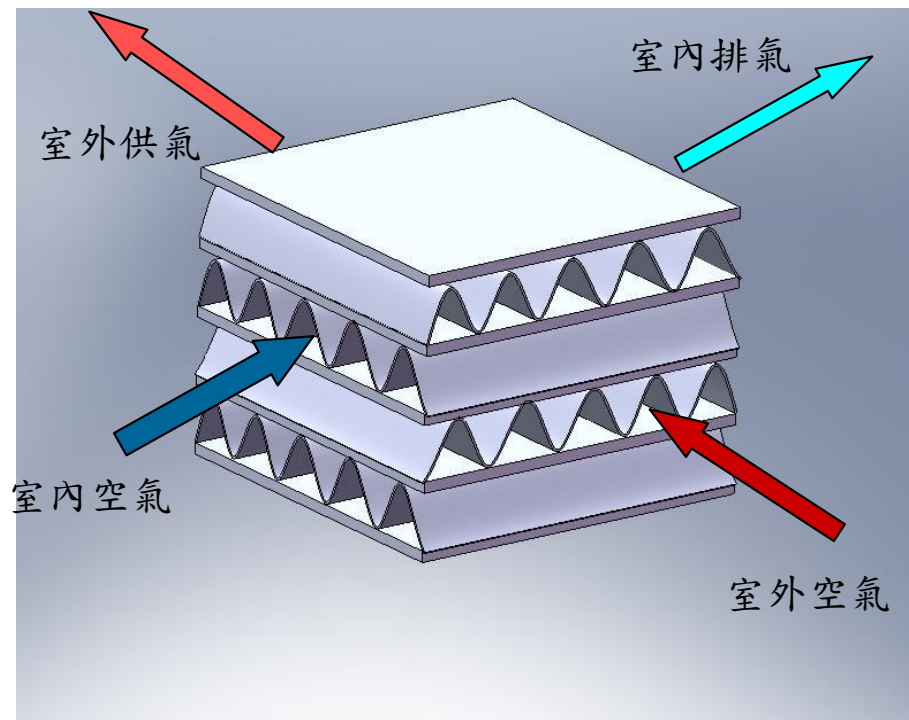


圖 2.8 回復式全熱交換器

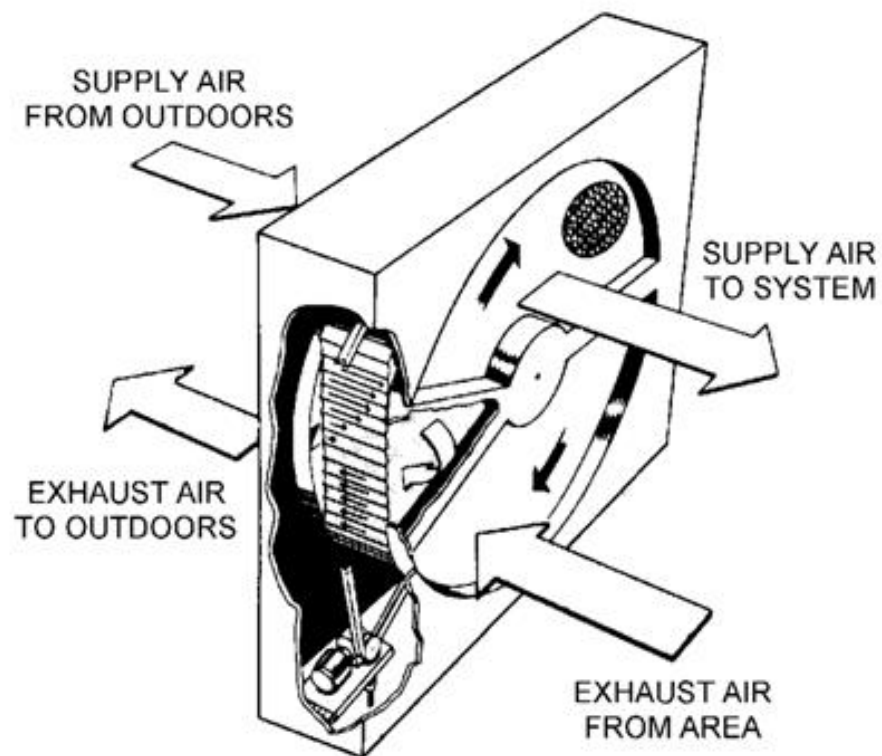


圖 2.9 再生式全熱交換器

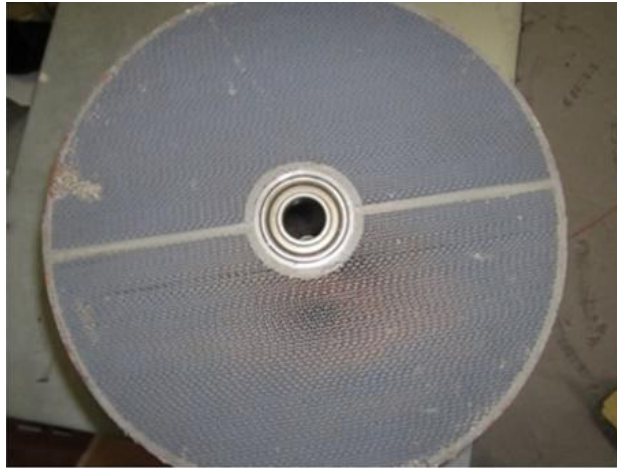
全熱交換器是一種氣體對氣體的熱交換器，顧名思義，全熱交換為顯熱交換與潛熱交換。顯熱交換是由於溫度不同，導致熱從高溫往低溫傳遞；潛熱交換則是因為水氣含量不同，形成水蒸氣壓力梯度，使得濕度由高往低傳遞。全熱交換器依其熱傳特徵可分為回復式(recuperator)與再生式(regenerator)兩種。回復式可分為平行流、逆流及交叉流，圖 2.8 所示為交叉流回復式全熱交換器(recuperator)，其原理為當工作流體(室外空氣)流經一工作界面時，熱量與濕氣便由工作流體(室外空氣)經過工作界面而傳至另一工作流體(室內空氣)。而回復式的特點乃在熱質交換模式是在同一時間下進行，因此為了能在熱交換同時提高熱傳的效率，回復式全熱交換器的材料本身，常選用熱傳係數較高的材質，且為了傳遞濕氣，工作界面常常會有一些孔隙來讓水氣通過。再生式全熱交換器(regenerator)的工作原理則如圖 2.9 所示，同樣需透過工作界面(除濕材料)來進行熱質傳遞，但與回復式最大的差異在於工作流體(室外空氣)與(室內空氣)之間的熱質傳遞並不是在同一時間發生，在(a)時間內，工作流體(室外空氣)流經工作界面(除濕材料)，將熱量與濕氣傳至工作界面，使得其本身的蓄濕蓄熱材料中將工作界面所獲得的熱量與濕氣儲存在內部。轉輪旋轉 180 度後，在(b)時間內，工作流體(室內空氣)流經工作界面時，熱交換材料便將在(a)時間內所儲存的熱量與濕氣釋放，且釋放的熱量與濕氣經由工作界面傳至工作流體(室內空氣)。由於再生式全熱交換器熱傳方式為蓄熱的特性，因此在選用材料上與回復式差異甚大，為了能有效將熱量儲存在熱交換材料中，需選用比熱較大的材料，以及熱傳導係數較低的材料，使其儲存熱量的能力提高。

回復式全熱交換器最常被使用的材料是薄膜紙【29-30】，但是此種材料經常被空氣中的灰塵阻塞，嚴重影響性能，需要被清洗或是更

換，且此種材料很貴，維護費用也不便宜，所以有很大的改善空間，要廣泛的應用於民生系統還需要一段時間。其他常見的再生式全熱交換器為轉輪型【31】，是由一個充滿除濕材料的圓柱型填充床轉輪所組成的，供氣與排氣通過轉輪，熱與濕會從空氣測轉移到轉輪的除濕材料上並保持在材料內，然後轉輪旋轉 180°，所以排氣的熱與濕會從材料再次釋放到供氣中達到熱交換。在文獻中，連續式、週期式與階段式運轉模式也常被研究，比方說 Chang 等人【32】利用薄膜紙做成的雙向流週期式全熱交換器，結合碳黑、鋁、碳黑/鋁之三種不同的儲能材料，研究對於周期式全熱交換器效能的提升，結果顯示在週期式運作下全熱交換器結合碳黑有最好的全熱效率，可以增加 11.7%。Binghooth et al. (8) 也利用除溼轉輪配合天花板冷排系統，可把相對濕度降到 40%，除溼能力可達到 2.673 kg/h。在除濕系統方面，主要是為了提升全熱交換器的潛熱能力而演化而來的，如果使用高溫低濕的空氣使除濕材料內的水分大量的排出，可以使材濕材料達到更高的除濕能力，但是相對的會產生很高的吸附熱與高溫再生時殘留的熱，因此顯熱回收能力會下降很多，甚至會使處理空氣的溫度比原本的還要高【33】，但在潛熱負荷較重的地區，單純的除濕系統會比全熱交換器來的更具節能潛力。

2.4 除濕轉輪形式

除濕材料的使用方式也已經被廣泛研究，如圖 2.10 所示，包括固體顆粒填充式【34-35】、蜂巢式除濕轉輪【36-37】、和流體化床【38-39】。填充式除濕轉輪壓降非常大，但是價格最便宜；蜂巢式除濕轉輪壓降非常小，但製作成本高；流體化床的特色是溫度較均勻也有利於吸附過程，但材料通常伴隨著容易碎裂與粉層汙染問題。壓降高會造成耗能與設計上的困難，而且當除濕轉輪和熱泵系統結合時，如果壓降過大造成質傳太小，容易影響冷凝器的散熱效果。把除濕劑直接塗佈於熱交換器是其中一種解決高壓降的方式，Zhao 等人【40】和 Napoleon 的團隊【41】都曾用浸泡法把除濕劑塗佈於熱交換器上，一方面可以降低壓降，一方面可以利用熱交換器帶走除濕過程中產生的熱，使除濕效果更好，作者進一步結合塗佈矽膠的熱交換器與熱泵，並測試其性能，系統最高的 COP 可以達到 5.7，且可以在外氣絕對溼度為 25 g/kg 與 33°C 時，減少最多 10 g/kg 的絕對溼度，但是除濕劑塗佈於全熱交換器後非常難維修，大大提升其維運成本，較不適合用在民生系統。雖然填充床成本較低，但因緊密堆疊的特性，產生壓力損失過大與出口溫度上升【42】的問題。而流體化床因為具有較高的熱質傳性質【43-44】，可以提升除濕性能與降低填充床的壓降，是具有潛力的新型除濕系統之一【45-46】。在 2010 年 Ahmed M. Hamed 【47】對一直立之矽膠流體化床進行熱傳與質傳的性能研究，並與矽膠填充床進行比較。其結果顯示，流體化床相對於填充床能更有效對空氣進行除濕工作，使空氣出口的濕度比填充床降低約 20%。Francisco 等人【48】把矽膠塗佈於外氣風管中，使得壓降大幅下降，再生端使用太陽能加熱系統，不僅使除濕設備不佔空間且壓降達到最低，除濕效果最高也可達到減少絕對濕度 3-4 g/kg，非常具有商業價值。



(a) 蜂巢式轉輪



(b) 填充床轉輪



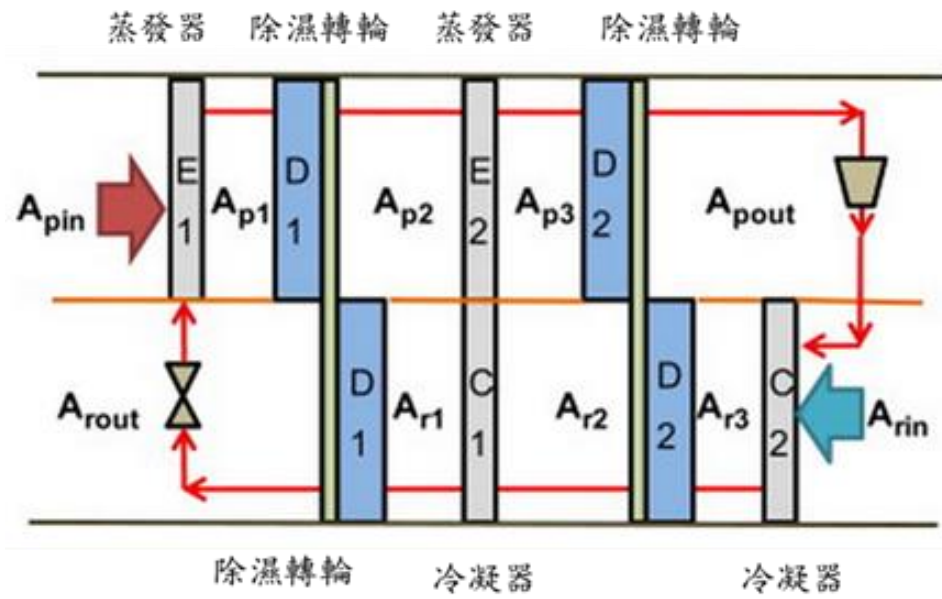
(c) 流體化床

圖 2.10 除濕材料以不同方式應用於空調系統

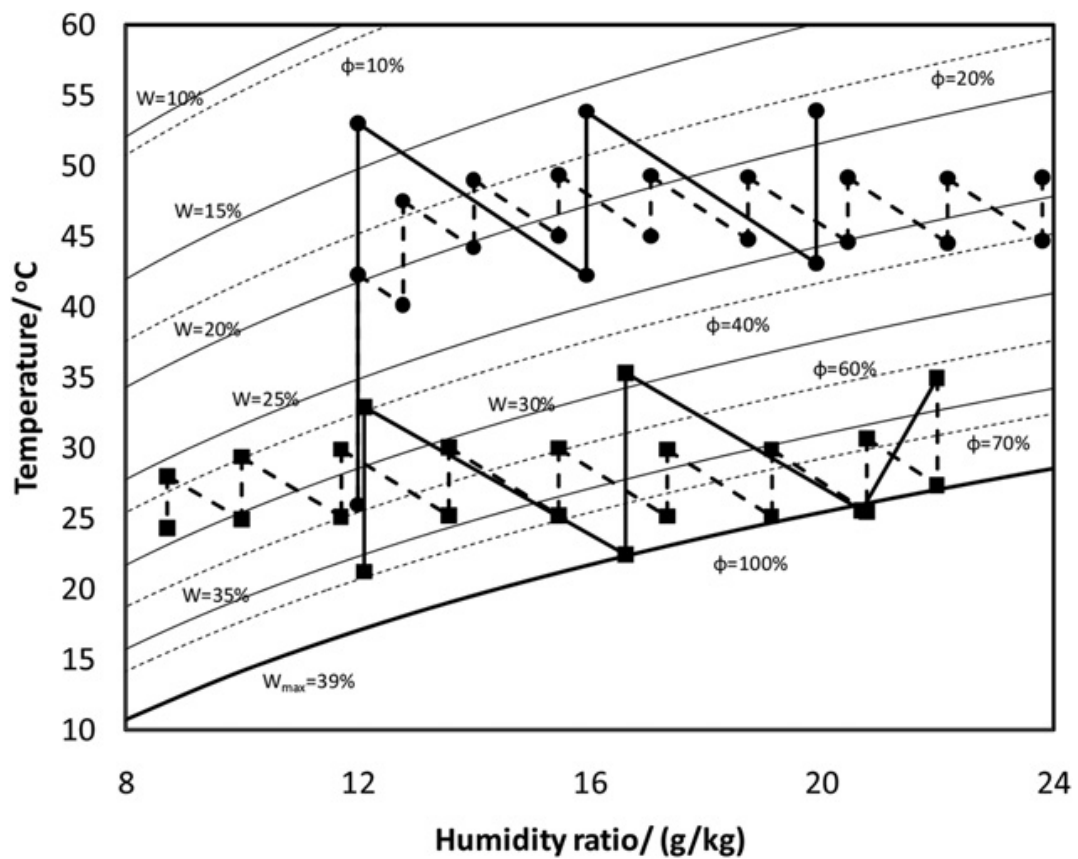
在系統運轉方面，蜂巢式與填充床形式的除濕轉輪一般都使用馬達帶動轉輪，使除濕端轉 180 度到達再生端【49】，或是利用閥件互相切換再生空氣與處理空氣的流向【50】，使兩個固定式的除濕材料床體交互的進行吸附與脫附功能。流體化床應用於除濕系統通常也需額外動力使系統可以循環操作，2012 年 Akihiko Horibe 等人【51】對雙流體化床連續吸附與脫附進行研究，利用高分子有機粉末作為吸附材料，而兩流體化床分別以螺旋管連接，配合馬達旋轉螺旋管將流體化床中的顆粒運送至另一流體化床中，使得系統能夠連續的吸附與再生。

2.5 低溫再生系統

吸附材料應用於除濕空調系統時，必須使用高溫熱源【52】或是低濕空氣【28】再生吸附材料，才能達到循環操作的目的，隨著節能減碳的國際趨勢，廢熱【53-54】與太陽能熱能【55-56】等再生能源應用於除濕系統的再生端蓬勃發展，但這類的熱源溫度並不高，最高只有 80°C，因此再生溫度在 80°C 以下的研究日趨重要，低的再生溫度會造成低的脫附能力，也就造成低的吸附量。傳統工業上使用的乾燥空氣都需要極低的乾燥程度，在相對濕度 5%-8% 之間，也就是壓力露點溫度要達到 -40°C 甚至 -70，以符合工業製程上的需求，所以再生溫度都在 120°C 到 200°C 之間，但因為本吸附技術手冊著重於民生空調的使用，只需達到人體舒適範圍之 45%-55% 之間，所以再生溫度可以不用到那麼高的溫度，並可使耗能降低。高分子除濕材料在低溫再生的環境下被證實具有比矽膠更高的除濕能力【14-16】，因此近年來備受重視，是非常具有潛力的新興材料，另一方面，流體化床因高的熱質傳效率，所以具有較好的吸附與脫附性能，在低溫再生條件下也可以保持良好的性能。雙效型熱泵因為可以同時產生冷水與熱水，被公認是一種高效率能源應用的節能設備，他的熱源也常常被應用於除濕系統的再生端，Tu【57】介紹一套除濕轉輪結合熱泵系統，在這套系統中，熱泵的冷源被用來對外氣降溫除濕，接著被處理過的外氣再被除濕轉輪第二次除濕，因此整體的除溼能力可以大幅上升，而熱泵的熱源可以用來對除濕轉輪再生，充分利用熱泵的冷與熱。兩階段式或是多階段式【57-59】之熱泵結合除濕轉輪系統可以使出口溫度下降並提高除濕性能，如圖 2.11 所示，但是相對的系統地複雜度會上升。Sheng 等人【60】利用高溫 70°C 的熱泵結合除濕轉輪提高再生能力，除濕性能也可提升到 7 g/kg。



(a) 系統示意圖



(b) 系統空氣線圖

圖 2.11 多段式熱泵結合除濕轉輪系統【57】

參、改良式吸附除濕技術設計與應用

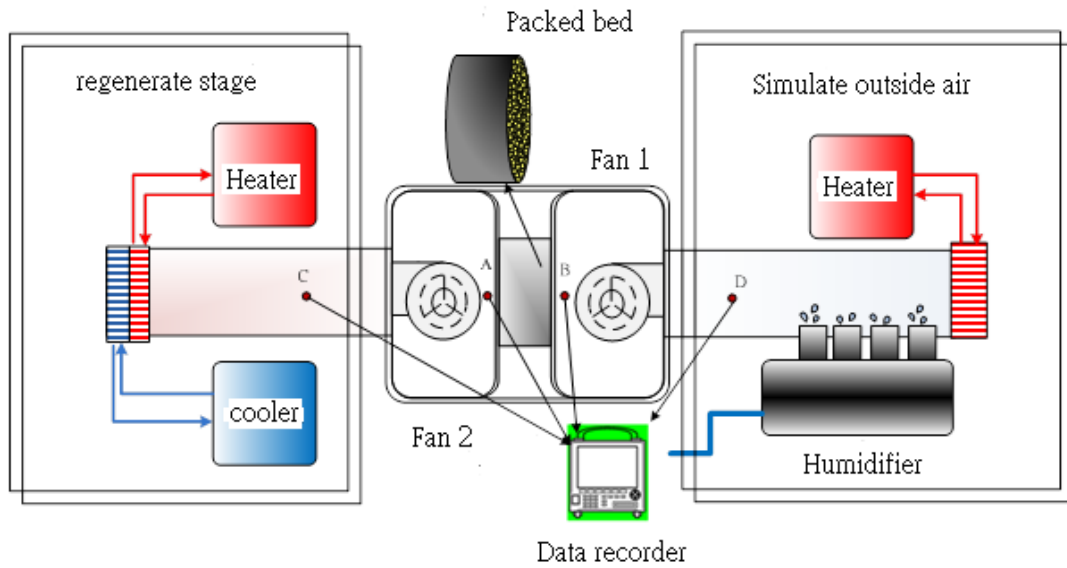


圖 3.1 基礎測試實驗架構圖

除濕材料的性能指標有瞬時吸附率、平均吸附率、總吸濕量與全熱有效性等。透過基礎的性能測試，進而分析探討各種吸附材料對於空氣中水份的吸附與再生能力。可由測量點A與B的溫度與相對濕度計算出溼度比 Y ，並由風速量測與管徑截面積得到風量 $\dot{m}_g$ ，瞬時吸附率 $\dot{m}_{ad}(\text{g/s})$ 與瞬時脫附率 $\dot{m}_{de}(\text{g/s})$ 分別定義為：

$$\dot{m}_{ad} = \dot{m}_g(Y_B - Y_A) \quad (1)$$

$$\dot{m}_{de} = \dot{m}_g(Y_B - Y_A) \quad (2)$$

對單位時間內的瞬時吸附率與瞬時脫附率各別積分，可得到總吸濕量 M_{ad} 與總脫附量 M_{de} ：

$$M_{ad} = \int_0^T \dot{m}_{ad} dt \quad (3)$$

$$M_{de} = \int_0^T \dot{m}_{de} dt \quad (4)$$

而平均吸附率 $\overline{\dot{m}_{ad}}$ (g/min)與平均脫附率 $\overline{\dot{m}_{de}}$ (g/min)分別定義為：

$$\overline{\dot{m}_{ad}} = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{m}_{ad} dt \quad (5)$$

$$\overline{\dot{m}_{de}} = \frac{1}{T} \int \dot{m}_{de} dt \quad (6)$$

T是操作週期的時間，週期運轉性能測試可以決定轉輪的轉速或是最佳的週期試運轉時間，利用吸附填充床之顯熱有效度(Sensible heat effectiveness)及潛熱有效度(Latent heat effectiveness)做為性能評估的指標。而有效度之定義如下所示，其中 $\dot{m}_{min}$ 為處理空氣或再生空氣供應之最小質量流率。

顯熱有效性 ε_s :

$$\varepsilon_s = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{\dot{m}_{os}(T_O - T_S)}{\dot{m}_{min}(T_O - T_R)} \quad (7)$$

潛熱有效性 ε_l :

$$\varepsilon_l = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{\dot{m}_{os}(Y_O - Y_S)}{\dot{m}_{min}(Y_O - Y_R)} \quad (8)$$

全熱有效性 ε_t :

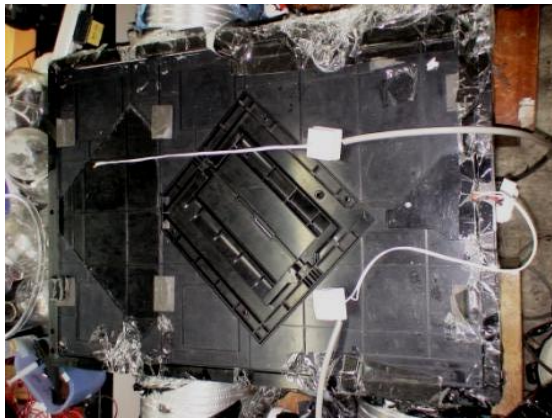
$$\varepsilon_t = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{\dot{m}_{os}(H_O - H_S)}{\dot{m}_{min}(H_O - H_R)} \quad (9)$$

其中Y為溼度比，T為溫度，H為焓值，下標O代表室外空氣，S代表供氣，R代表室內回風， $\dot{m}_{os}$ 代表外氣到供風的空氣質量流率。

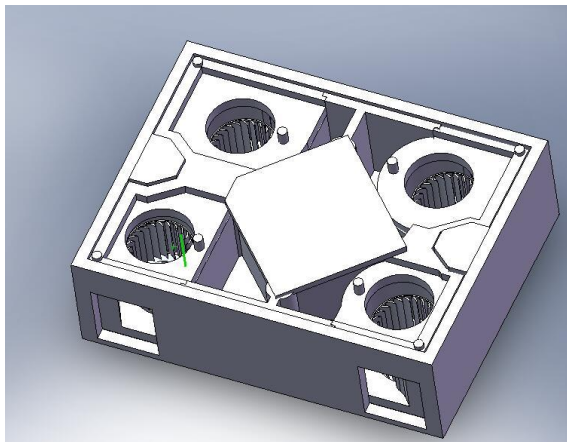
本吸附技術手冊使用能源因數(Energy factor, E.F.)來評估除濕系統的性能，EF係以單位耗電量所能除去空氣中多少的水量來衡量，此參數在台灣經常被用來評估此除濕系統節能與否，E.F. 愈高則代表除濕系統效率愈好，也就越節能。

$$E.F. = M_{ad}/W_{in} \quad (10)$$

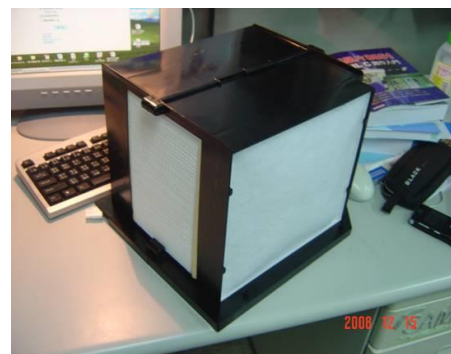
3.1 蓄能材料應用於週期式全熱交換器



(a) 實體圖



(b) 內部構造圖



(c) 回復式全熱交換器

圖 3.2 蓄能材料應用於週期式全熱交換器系統實體圖

回復式全熱交換器其中一個缺點就是潛熱有效性較低，在高濕度的亞熱帶區無法滿足需求，徐等人【32】利用再生式全熱交換器的原理，把蓄能材料的加裝於回復式全熱交換器的入出口，加強他能量回收的能力，圖 3.2 為系統實體圖，回復式全熱交換器的材質為高效機能紙，並利用兩組風扇(四個風扇)交替運轉，達到穩定供風的目的。詳細的工作原理如圖 3.3 所示，以夏天為例，在回復式全熱交換器的四個風道入出口加裝蓄熱或蓄濕的蓄能材料，正轉時開啟風扇 1 與風扇 4 負

壓吸風，使 24°C 、絕對溼度 11.2g/kg 的低溫低濕室內回風在排出室內的同時，通過蓄能材料與回復式全熱交換器，把部分能量儲存，在反轉時開啟風扇 2 與風扇 3 並關閉風扇 1 與風扇 4，使出入口的路徑相反，讓 35°C 、絕對溼度 18.5g/kg 的外氣通過剛剛低溫低濕的蓄能材料進行第一步的降溫除濕，再與回復式全熱交換器進入第二階段的热質傳交換達到最佳的降溫降濕效果，此時的蓄能材料(除溼材料)，是利用室內低濕的條件對除濕材料進行脫附，並再引進室外高濕的空氣時造成的濕度差達到除溼的目的。

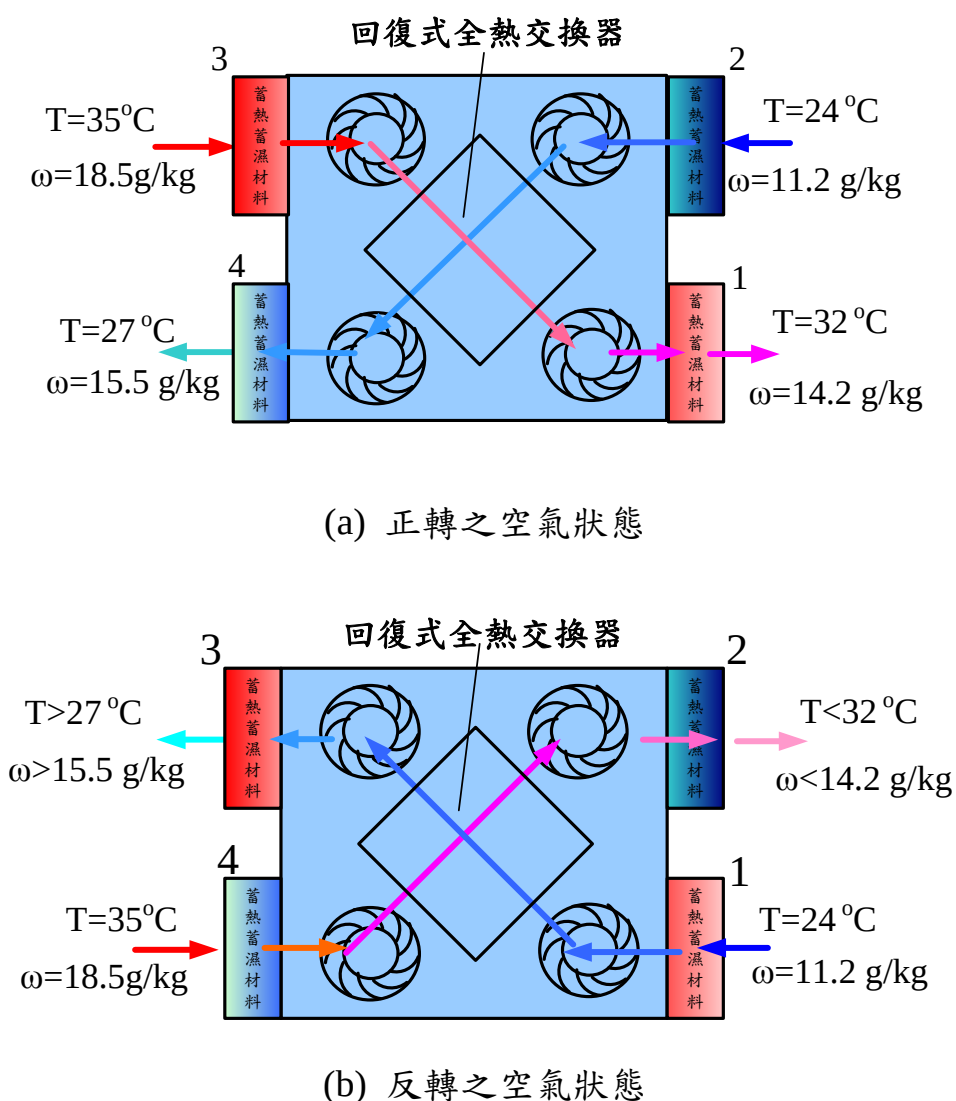


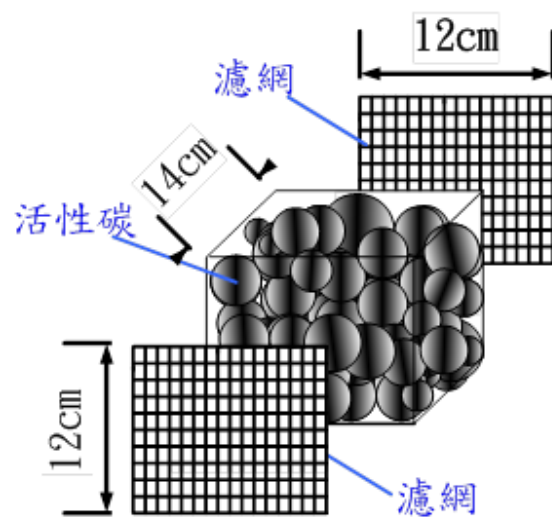
圖 3.3 蓄能材料應用於週期式全熱交換器運轉示意圖

由於週期式運轉的目的為利用在風扇正轉時，室內外供氣與排氣時經過其蓄熱蓄濕材料，將其熱能與質能儲存於材料中，於風扇反轉時能將在風扇正轉時所儲的熱能與質能釋放，使得室外供氣至室內的空氣能更趨近室內的狀態。因此將其細分為因溫差而造成的顯熱傳遞，以及由濕度比不同而導致的潛熱傳遞，因此在選擇材料上，則分為以提升顯熱有效度為主的蓄熱材料，另一為提高潛熱有效度的蓄濕材料。故在蓄熱材料選擇方面，則是選擇比熱為 $0.896\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ，熱傳係數為 $204\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ 的鋁，蓄濕材料則是採用比熱為 $0.93\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ 熱傳係數為 $0.017\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ，卻有高吸附能力的活性碳，利用其本身的孔隙將能將潮濕的空氣中水氣吸附著，對空氣進行減濕，而在乾燥環境下進行釋放水氣，對空氣進行加濕的作用，最後結合兩者特點，達到高全熱有效的目的，如圖3.4所示。

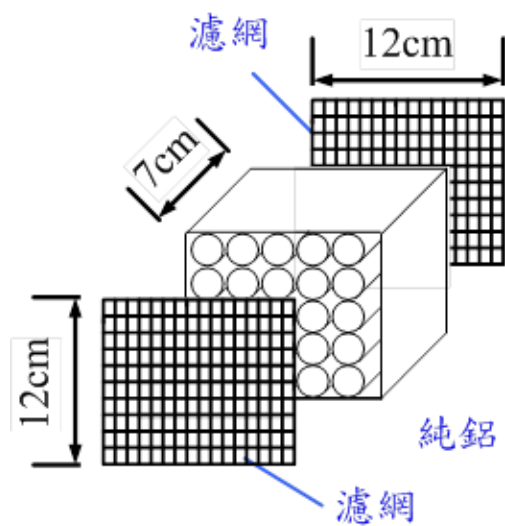
由於本研究的蓄熱蓄濕材料儲能釋能的能力與運轉的時間有關，而運轉週期乃指每次風扇正轉與反轉的時間，故須研究不同的運轉週期對於蓄熱蓄濕材料性能的影響。在實際測量運轉週期對材料儲能釋能的能力後，可知個材料最佳的運轉週期，因此分別設為5分鐘、8分鐘及10分鐘。若以運轉週期5分鐘為例，一次風扇正轉五分鐘和反轉5分鐘為一組實驗。並比較加裝蓄能材料的系統對回復式全熱交換器有效性的增加量。增加量的定義為加裝蓄熱蓄濕材料後的有效度減去未加裝蓄熱蓄濕材料的有效度，並除以未加裝蓄熱蓄濕材料的有效度，即可得到有效度的增加量比例。

有效度增加量：

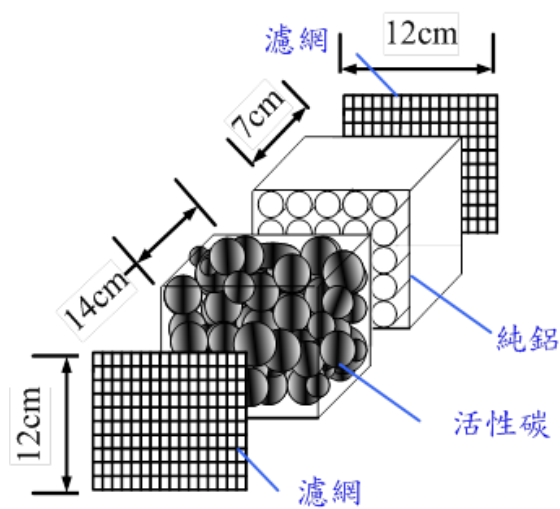
$$= \frac{\text{加裝蓄熱蓄濕材料的有效度} - \text{未加裝的有效度}}{\text{未加裝蓄熱蓄濕材料的有效度}} \quad (11)$$



(a) 碳黑



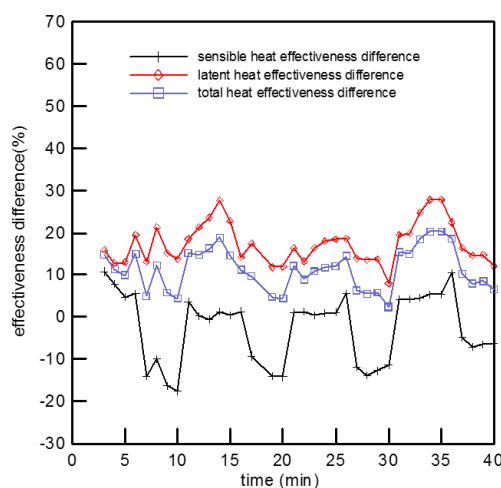
(b) 純鋁



(c) 碳黑+純鋁

圖 3.4 蓄能材料配置示意圖

碳黑蓄能材料系統在5分鐘週期有最佳的潛熱有效性提升度，圖3.5為碳黑5分鐘週期有效度的增加量，在顯熱有效度方面，在0~5、10~15、20~25及30~35分鐘風扇正轉時，顯熱有效度增加量近似於0%，風扇反轉時，顯熱有效度增加量近似-10%，亦即在活性碳在風扇反轉時對於顯熱有效度有負影響，一方面吸附除濕本身會伴隨著吸附熱的產生，使溫度提高，另一方面因為活性碳比熱雖大，但熱傳係數極小，因此在0~5分鐘，風口2的活性碳蓄濕材料儲的冷能並不多，使得在5~10分鐘反轉時，釋放冷能極小，使得溫度高於穩態室外供氣至室內的溫度，因此顯熱有效度呈現負值。潛熱有效度方面，由於活性碳對於水氣有良好的吸附能力，於風扇正轉反轉，均可將所儲的質能釋放，因此在潛熱有效度均有顯著的提高，全熱有效度的增加量與潛熱的趨勢近乎一樣，原因在於焓是顯熱與潛熱的總合，而潛熱占了焓約3/4，因此趨勢與潛熱有效度增加量相同。



平均顯熱有效度增加量：-2.45%

平均潛熱有效度增加量：17.3%

平均全熱有效度增加量：11.7%

圖 3.5 碳黑蓄能材料系統在 5 分鐘週期有效度增加量

純鋁蓄能材料系統在8分鐘週期有最佳的顯熱有效性提升度，圖3.6為純鋁8分鐘週期有效度的增加量，顯熱有效度增加均為正值，正反轉增加量的趨勢均在一開始為最高，之後隨時間而遞減。風扇正轉的時顯熱有效度增加可高達25%，反轉時顯熱有效度增加量最高可達

30%左右。由於鋁比熱不大，但熱傳係數極佳，使得之前風口2的純鋁所儲的冷能完全釋放，所釋放的冷能從一開始最大接著隨時間遞減至釋放結束，潛熱有效度在整個時間內的增加量，在正反轉均是由最高而隨時間遞減。室外空氣的水氣進室內前在經過較冷的純鋁表面會凝結成液態水，而進行除濕的作用，因此提高了潛熱有效度，同時因為各別在正與反轉的風口1與風口2純鋁從低溫逐漸變高溫，也使得凝結水的量也會變少，因而潛熱有效度增加量也是由最高而逐漸遞減。全熱有效度的增加量與潛熱的趨勢近乎一樣。

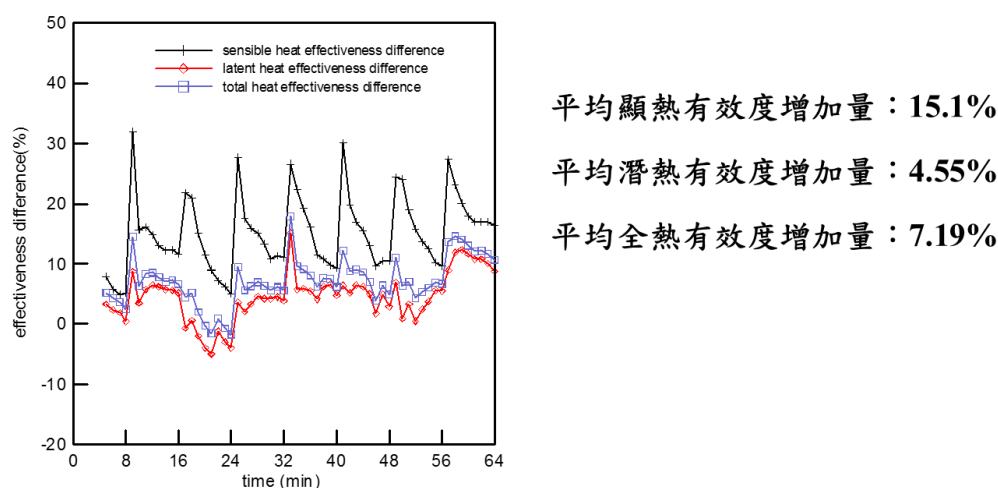
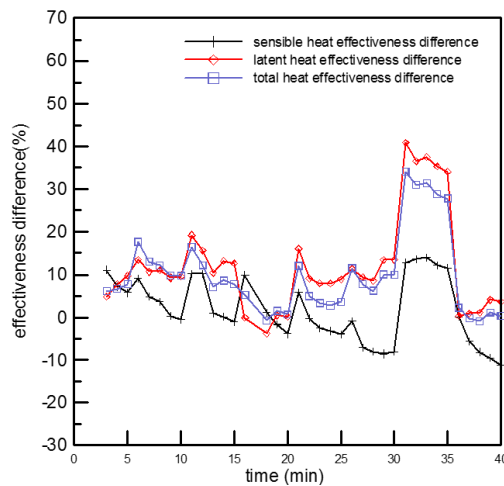


圖 3.6 純鋁蓄能材料系統在 8 分鐘週期有效度增加量

純鋁/碳黑蓄能材料系統在5分鐘週期有最佳的全熱有效性提升度，圖3.7為純鋁5分鐘週期有效度的增加量，在顯熱有效度方面，因為除濕材料吸附造成的溫昇抵銷部分純鋁的降溫作用，純鋁混活性碳系統相較於碳黑系統將增加的室內排至室外的溫度吸收，使得進入室內的室外供氣可維在一定的範圍，在潛熱有效度方面，活性碳較佳的吸濕能力且於風扇正轉反轉時，均可將所儲的質能釋放，故潛熱有效度增加量提升，但由擺放位置的關係，會使碳黑與空氣的接觸面積被部分的純鋁阻擋，室內回風對碳黑進行再生時效果降低，因此除溼性能也下降，但整體還是有12%的潛熱增加量，全熱有效度的增加量與潛熱的趨勢近乎一樣，全熱增加量為9.98%。



平均顯熱有效度增加量：1.96%

平均潛熱有效度增加量：12.0%

平均全熱有效度增加量：9.98%

圖 3.7 純鋁/碳黑蓄能材料系統在 5 分鐘週期有效度增加量

徐等人利用實驗方法找出此系統最佳運轉週期與適合蓄熱蓄濕材料組合。於穩態實驗，可知溫差、濕度比差及焓差與顯熱、潛熱及全熱有效度呈線型關係，且建立性能曲線，其室內外空氣狀態差異越大，全熱交換器性能會越高。活性炭蓄能材料全熱交換器系統，可明顯有效提高其潛熱有效度，潛熱有效度平均增加量最高於運轉週期五分鐘時可達17.3%。而鋁蓄能材料全熱交換器系統，因熱容量大，再加上其熱傳係數高，可使在短時間內能充分儲能釋能，故可提升顯熱有效度，且可利用純鋁表面溫度低而致空氣中的水氣冷凝達到除濕目的，故潛熱有效度亦有增加的效果。顯熱有效度於八分鐘有最高值15%。鋁/碳黑蓄能材料全熱交換器系統，兼具了鋁的儲熱放熱的良好能力與活性炭的極佳吸濕能力，因此在顯熱有效度於運轉週期五分鐘有1.96%的提升量和潛熱有效度有12%的提升量，而全熱有效度也因此有最高值9.98%。可以有效的利用再生式全熱交換器的蓄能原理提升回復式全熱交換器的有效性，研發出新型的外氣節能設備，利用兩組(四個風扇)的交替運轉，也可取代傳統再生式全熱交換器需要馬達帶動轉輪地的缺點，同時解決再生式耗能的缺點與回復式潛熱較低的缺點，是一套具有市場價值的新型全熱交換器。其缺點是加裝的蓄能材料會造成額外的壓降，會對風機造成額外的耗能。

3.2 矽膠風管應用於外氣空調系統

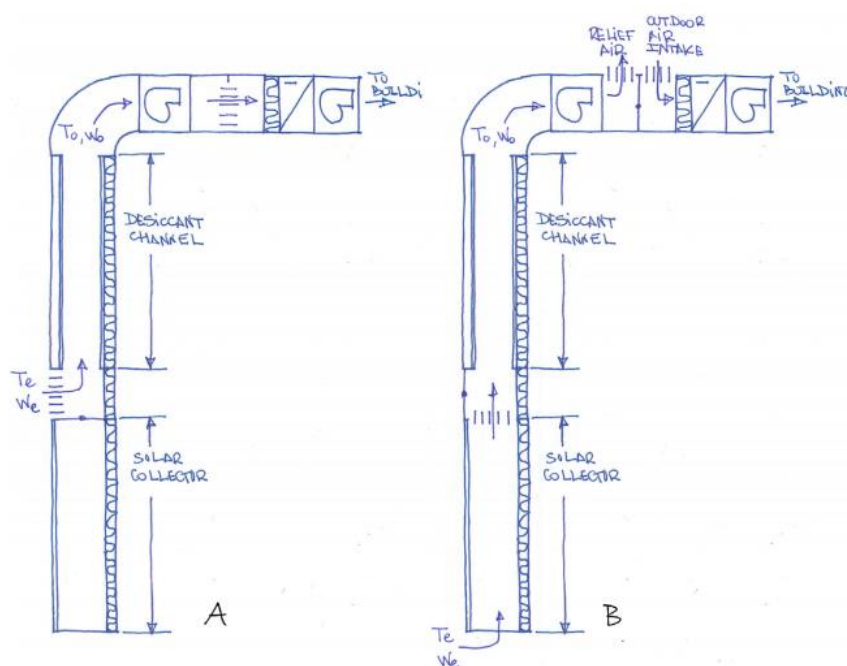


圖 3.8 矽膠風管應用於外氣空調系統示意圖【48】

吸附除溼系統壓降的問題一直是在應用端上的一個限制，雖然蜂巢式矽膠擁有比填充床式除濕轉輪較低的壓降，但是成本太貴且維修不易，並不適合應用於民生外氣系統，如何用低成本的方式降低壓降一直是近年來的研究重點，Francisco 等人【48】把矽膠除溼材料塗布於外氣空調系統的風管上，使壓降增加量趨近於零，並在管路末端加裝太陽能熱能系統提供一 60°C 的再生溫度使除濕材料可以連續運轉，系統示意圖如圖 3.8 所示， T_e 代表外氣的溫度， W_e 代表外氣的溼度，圖 A 表示外氣經過矽膠風管除溼後進入室內，圖 B 則表示再生矽膠風管的操作方式，首先調整第一個筏件關閉原本的進氣口並開啟第二個筏件讓風管最前端的進氣口打開，使外氣可以先經過太陽能集熱器系統加熱到 $50\text{-}60^{\circ}\text{C}$ 後再經過矽膠風管，再生矽膠風管並把濕氣帶走，經過出口端第三個筏件調整使再生後的高溫高濕空氣直接排出而不會進入室內，此時的引進外氣則直接開啟第四個筏件從最近距離引進外氣進入外氣空調系統，因此此系統需要四個筏件和吸附與

再生兩種操作模式。因為此系統是利用太陽能再生，完全的綠色能源並能與建築物完美的結合，壓降因此也達到最低，符合節能減碳與建築融於生活的雙重目標，但此系統的缺點是必須要有太陽光能，所以效能會隨太陽輻射變化量而變化，而外氣溫度、外氣濕度與太陽能輻射三個獨立變化參數中，以太陽能輻射影響此系統最劇烈，可以說如果除濕材料不用強制再生系統，其效能會降低非常多。圖 3.9 為典型的夏天氣候單天運轉情形，除溼性能隨著太陽能的入射強度而等比例上升，最高潛熱移除能力可以達到 30W/m^2 。

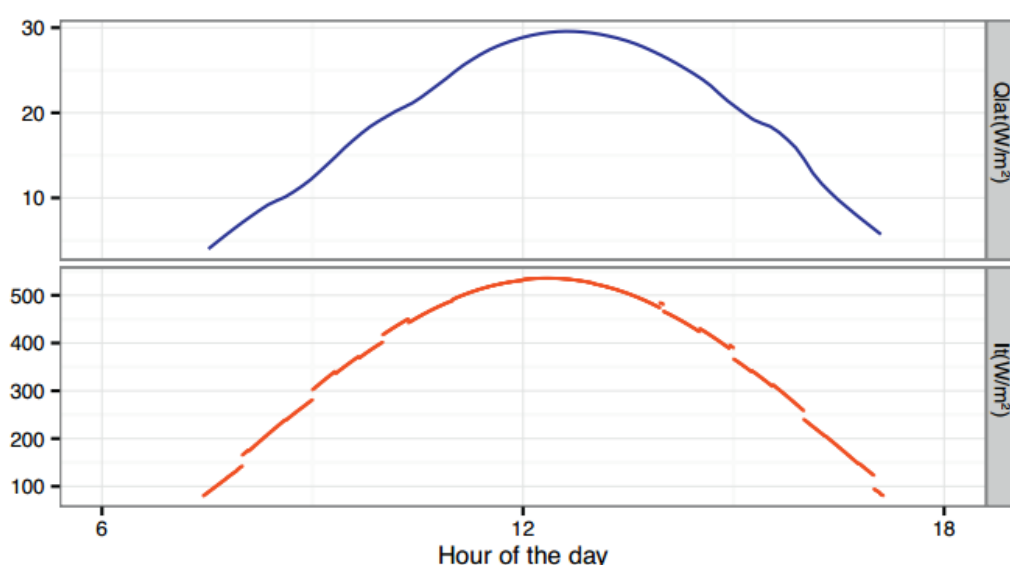
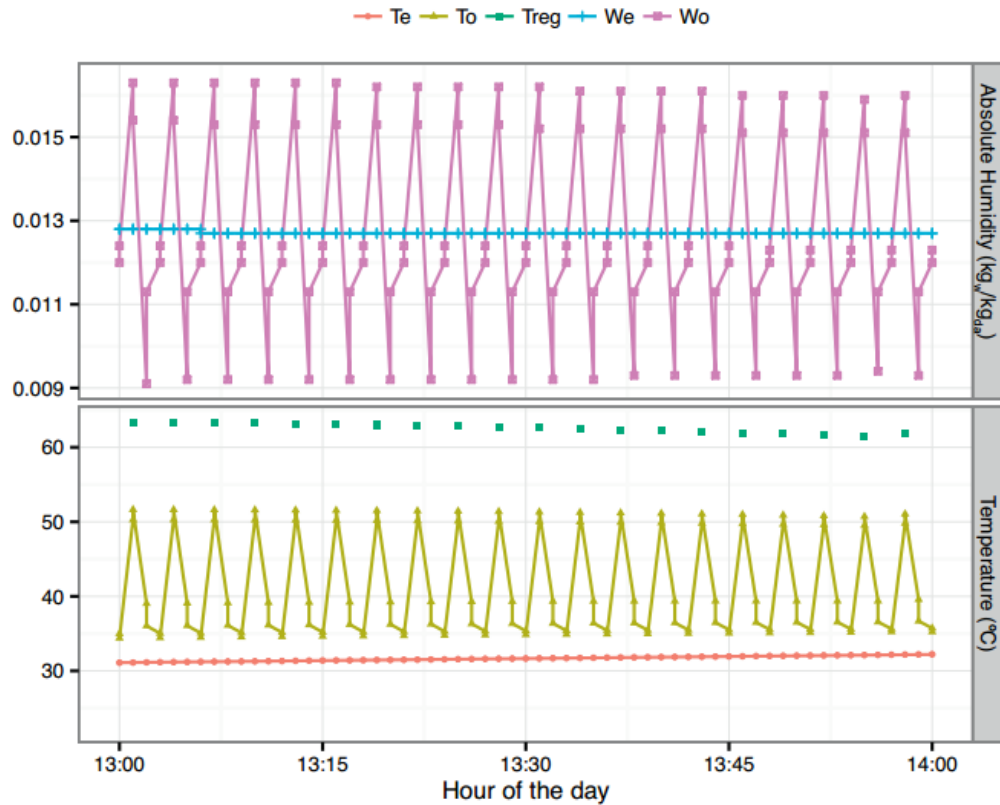


圖 3.9 太陽光入射強度和矽膠風管移除潛熱的能力【48】

圖 3.10 為此系統其中一小時的操作狀態，因為除濕材料相對於無限大的外氣，很容易達到飽和，所以階段式運轉的週期會在 10 分鐘以內，此系統所需的再生頻率為 2 分鐘，最多可以除去外氣絕對溼度 3.4 g/kg ，矽膠風管吸附過程所造成出口空氣的溫度上升在 $2\text{--}5^\circ\text{C}$ 之間。使用太陽能加熱系統可保持再生溫度在 60°C ，經過矽膠風管再生後，出口空氣的溫度保持在 $40\text{--}50^\circ\text{C}$ 。



Te：入口空氣溫度，To：出口空氣溫度，Treg：再生溫度

We：入口空氣絕對溼度，Wo：出口空氣絕對溼度

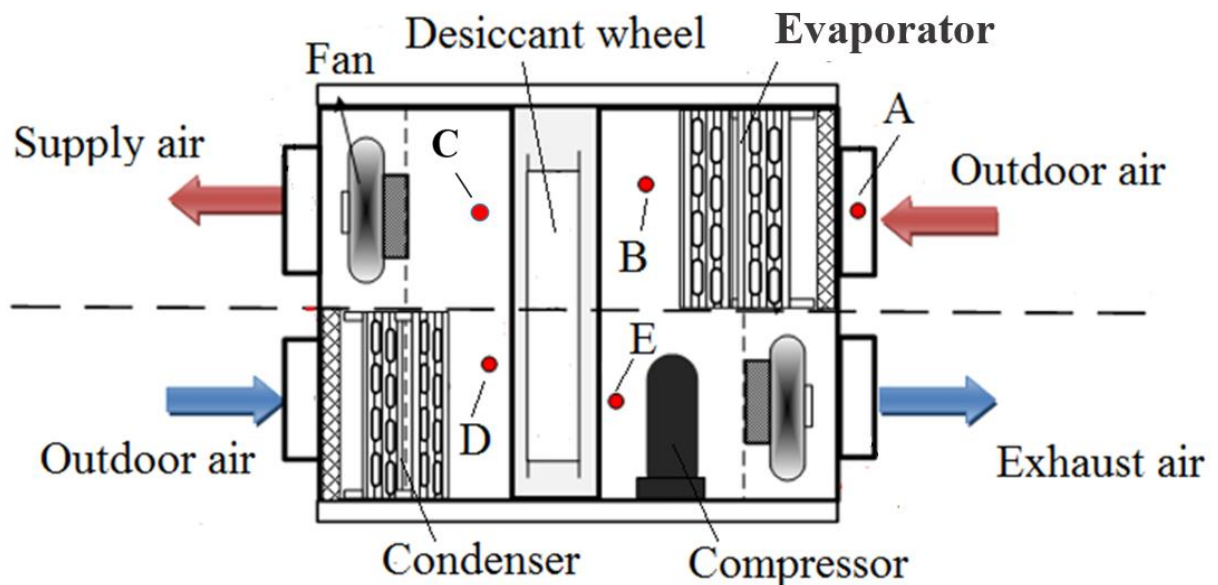
圖 3.10 矽膠風管操作一小時狀態【48】

矽膠塗佈於風管應用於外氣空調箱系統具有最低壓降的特性，有效降低耗能，配合太陽能再生系統可使系統耗能更低，並符合環保的目的，此系統隨太陽輻射的強度而變化，最高潛熱移除能力可達 30 W/m，非常具有市場價值，再生熱源可以利用太陽能儲熱水槽系統配合盤管取代現有系統，使熱源可以穩定的運作，就可以去除太陽輻射對系統的影響，直接塗佈除濕材料於風管中不僅可以降低壓降還可以節省安裝空間，非常適合新設的建築的外氣系統，然而因為吸附與再生來自於同一根風管，進入室內的外氣濕氣狀態會有忽高忽低的階段式變化，必須使用兩根風管交替切換，使供風可以穩定保持在一特定範圍，因此需要完整規畫的新設建築比較能使用這套系統。

3.3 除濕轉輪結合熱泵應用於外氣空調系統



(a)設備實體圖



(b)設備示意圖

圖 3.11 除濕轉輪結合熱泵之空調除濕設備

所有除濕材都需要使用高溫或低濕的空氣來使吸附的水分可以脫附，才能有效的再次吸附水分達到連續操作的目的，因此再生熱量的來源非常重要，太陽能因為受限於自然環境，因此使用廢熱或是熱泵等熱源會使系統較為穩定，陳等人【61】利用雙效型熱泵結合除濕轉

輪系統，應用熱泵的釋放熱對除濕轉輪進行再生，並利用熱泵的吸收熱對處理空氣做第一段的冷凝除濕，再經過除濕轉輪做第二段的吸附除濕，因為除濕材料在高相對濕度下擁有較高的儲濕能力，而經過蒸發器冷凝除濕後的相對濕度都在80-100%之間，因此非常有利於除濕轉輪進行除濕，此系統有效的利用雙效型熱泵的冷能與熱能，詳細系統圖如3.11所示。因為此系統的再生溫度在風量850CMH的狀態下可保持在40-50°C，因此從圖3.12的填充床式除濕轉輪之基礎材料測試下發現，在40°C在生環境下，矽膠擁有最佳的吸附能力，其中分子篩是Langmuir type，並無法在此溫度下有效再生，氧化鋁與矽藻土都是sigmoid type，但因為材料特性的關係，總吸濕量都不高，所以瞬時吸附率快速隨時間下降，高分子類似於drainage type，但吸濕機制較為複雜，瞬時吸附率較低，但在此再升溫度下可以有效的再生並可長時間運作，擁有和矽膠箱進的總吸濕量。如果要使此熱泵結合除濕轉輪設備應用於民生系統，勢必需要用便宜的方法取代蜂巢式矽膠除濕轉輪，雖然矽膠填充床的性能最高，但壓降過大，因此使用具有黏性的高分子除濕材料(聚丙烯酸鈉與聚丙烯酸)與矽膠進行混合製成複合材料，因為高分子具有可塑性，可以製成各種形狀，所以在製作過程中使用模具可使材料留下很多空氣流道，就能有效降低壓降，如圖3.13所示。另一方面，高分子的高吸濕量與在高相對濕度下比矽膠更高的除濕能力特性，都有利於此套系統。

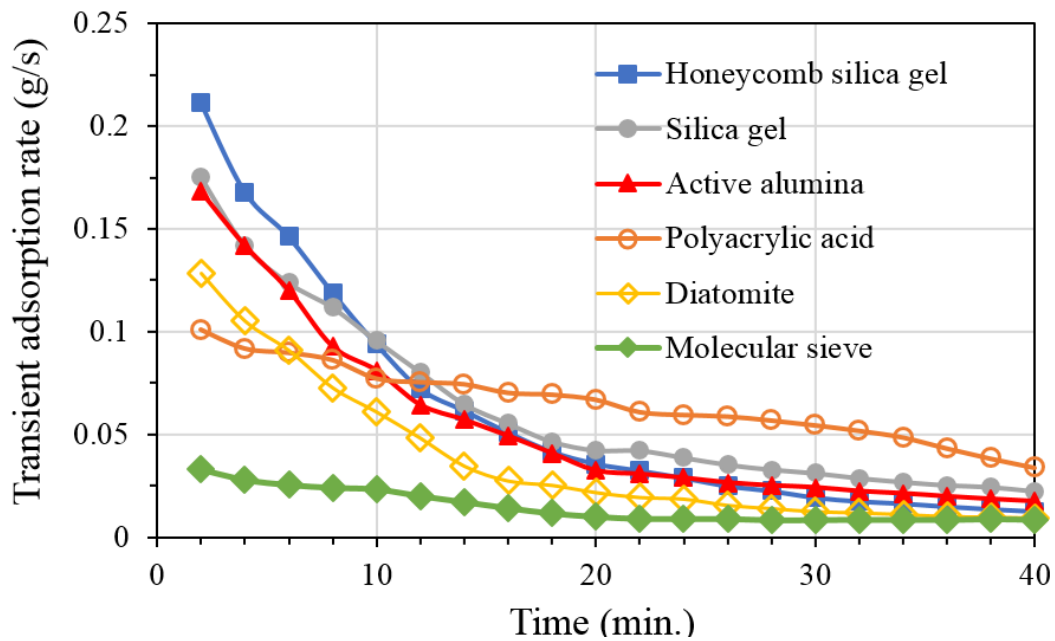


圖 3.12 五種填充床除濕材料的平均吸附率與蜂巢式矽膠轉輪之比較

(再升溫度=40°C)



圖 3.13 矽膠/高分子複合材料

圖 3.14 為不同相對濕度下矽膠與複合材料的比較，SG 代表矽膠 (Silica gel)，PS 代表聚丙烯酸鈉(sodium polyacrylate)，PA 代表聚丙烯酸(polyacrylic acid)，數字代表混合比例，所以 SG9PS1 代表矽膠與聚丙烯酸鈉以 9 比 1 的比例混合製成，高分子比例越高在高相對濕度時的除濕能力越好，而在相對濕度 90%時複合材料 SG8PS1PA1 擁有最

高的除濕能力，因此選擇此複合材料製成除濕轉輪應用於結合熱泵系統。圖 3.15 顯示三種除濕轉輪的壓降比較，蜂巢式矽膠的壓降最低，但是成本昂貴，複合材料製成的除濕轉輪擁有比填充床轉輪低的壓降，再風速 2.5 m/s 時可以降低 40% 的壓降，具有商業化的潛力。

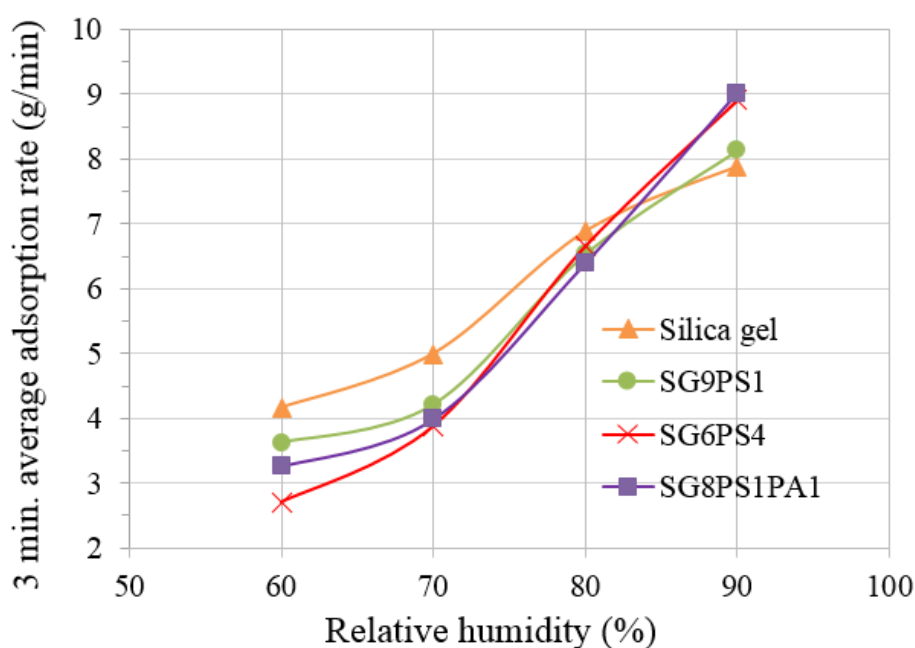


圖 3.14 矽膠與複合材料在不同相對濕度下之三分鐘平均吸附率比較

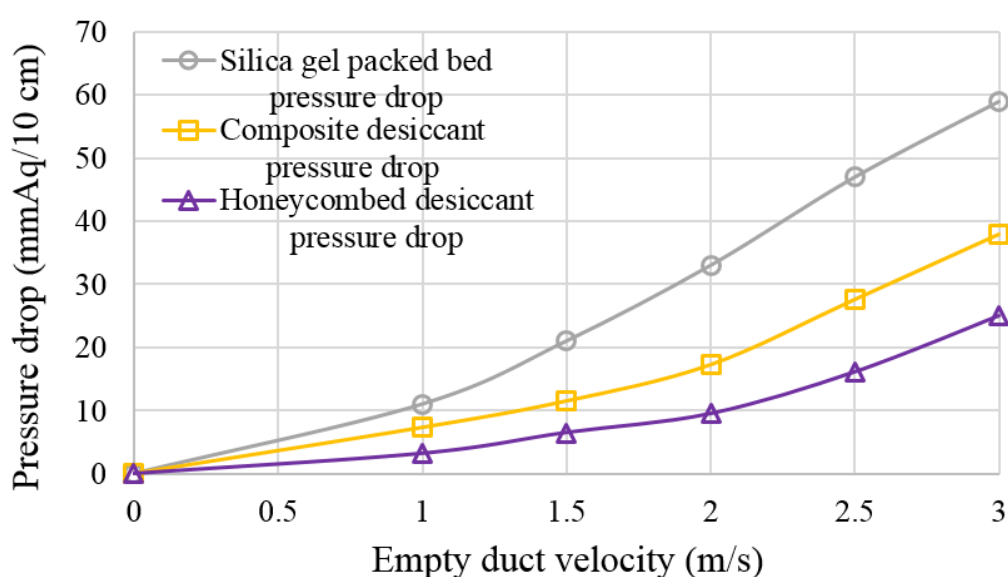
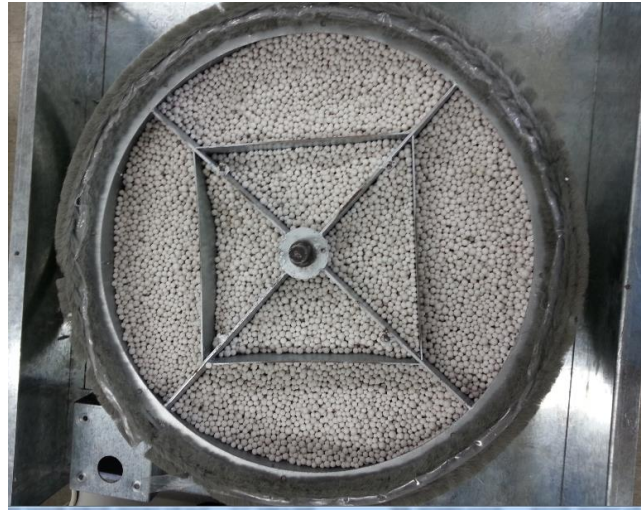


圖 3.15 三種類型的除濕轉輪之壓降比較



(a)矽膠顆粒填充床



(b)複合材料填充床

圖 3.16 不同填充床除濕轉輪外觀

圖 3.16 顯示了兩種除濕轉輪。因為複合材料除濕轉輪並非定做，所以需要以砂網包覆矽膠顆粒填充於周圍，減少漏風。實際測試結果如表 3.1 所示，量測點的位置如圖 3.11(b)所示，矽膠除濕轉輪因為壓降過大，使冷凝氣的散熱量下降，也間接導致蒸發器的冷凝除濕量下降，矽膠除濕材料是再生式全熱交換器使用的材料之一，可以把再生端低溫低濕之室內空氣(25°C)的能量回收，然而在除濕系統中，再生端使用的是高溫低濕的空氣(45°C)，此空氣狀態比外氣還高溫，如果把此高溫回收會造成除濕端的出口溫度提升，因此熱泵結合矽膠轉輪系統的出口溫度都比外氣高出 1-2°C。而複合材料因為具有空氣流道，可

以有效的降低壓降，使冷凝氣的散熱變好，蒸發器的性能也會因此提高，冷凝除濕量略比矽膠轉輪系統高，再者，複合材料在高相對濕度下(80-90%)的除濕能力比矽膠轉輪高，也使得吸附除濕量比矽膠轉輪系統高，而高分子本身屬於塑膠類材料，比熱低，熱傳導能力也差，在再生端能累積的能量不高，轉入除濕端時放出的能量相對而言也較低，因此複合材料系統的出口溫度都比外氣低 1-2℃。出口溫度越低對引進外氣造成的耗能越小。表 3.2 為同樣在 32℃、59%的夏天狀態下，矽膠除濕轉輪系統與複合材料除濕轉輪系統的性能比較表，冷凝除濕量與吸附除濕量都是複合材料除濕轉輪系統較高，耗電量也因為複合材料具有空氣流道，有效的降低風機與壓縮機的耗能，而使複合材料除濕轉輪系統的總耗電量較低，利用 Energy Factor (E.F.) 指標，一小時的總除濕量除以一小時的耗電量，可以發現複合材料的 E.F. 值可以從 1.72 kg/kW·hr 提升到 2.3 kg/kW·hr，增加 33%。

表 3.1 除濕轉輪結合熱泵系統性能測試

Desiccant	Outdoor air (A)			Evaporator (B)			Desiccant wheel (C)			Condenser (D)		Regenerated wheel (E)	
	T	RH	Y	T	RH	Y	T	RH	Y	T	Y	T	Y
	°C	%	g/kg	°C	%	g/kg	°C	%	g/kg	°C	g/kg	°C	g/kg
Silica gel	22	67	11	15	92	10	24	48	9	47	11	33	12
	26	61	13	18	89	12	27	47	11	48	13	36	13
	32	59	18	22	89	15	33	40	13	50	18	39	19
Composite material	22	72	12	15	89	9	21	49	8	46	12	32	13
	25	75	15	18	93	12	23	55	10	46	15	36	17
	27	71	16	19	90	12	24	54	10	46	16	36	17
	31	63	18	21	90	14	28	48	11	47	18	37	21
	32	59	18	21	91	14	29	45	11	47	18	38	20

表 3.2 在同樣測試狀態下兩種除濕轉輪結合熱泵系統性能比較

		Desiccant wheel combining with heat pump systems	
		Silica gel desiccant wheel	Composite desiccant wheel
Dehumidification	Condensation (kg/hr)	2.6	3.0
	Desiccant (kg/hr)	1.1	1.3
	Total (kg/hr)	3.7	4.3
Power consumption (kW)		2.15	1.86
E.F. (kg/kW·hr)		1.72	2.3

利用高分子的可塑性，在製作矽膠/高分子複合材料的過程中可以利用模具保留空氣流道，使複合材料除濕轉輪因空氣流道具有低壓降的特性，與填充床式除濕轉輪相比，可降低 40% 的壓降，應用於除濕轉輪結合熱泵系統中，可以有效的降低風機與壓縮機的耗能，另一方面，高分子材料在高相對濕度下的高吸濕特性，非常有利於除濕轉輪結合熱泵系統，因為處理空氣經過蒸發器第一段冷凝除濕後，空氣相對濕度保持在 80-90%，此時複合材料因具有高分子成分，可以提高複合材料的吸濕能力，加上高分子蓄能能力較矽膠低，使出口溫度可以下降 1-2°C，兩階段總除濕能力可使絕對濕度 18g/kg 的外氣降低 7g/kg 到達絕對濕度 11g/kg，與矽膠除濕轉輪結合熱泵系統相比，E.F. 值因為除濕量上升與耗電量下降而大幅提升 33%，達 2.3 kg/kW·hr，此套系統安裝方便，可應用於老舊建築的窗口或是外氣空調箱對外氣做預處理，轉輪也因為複合材料的低成本與高性能，可以取代蜂巢式矽膠轉輪系統，具有很高的商業價值，缺點再生時的殘留熱與吸附熱會造成較大的出口溫升，使外氣的總焓值下降沒有預期的多。

3.4 兩段式除濕轉輪結合熱泵應用於外氣空調系統

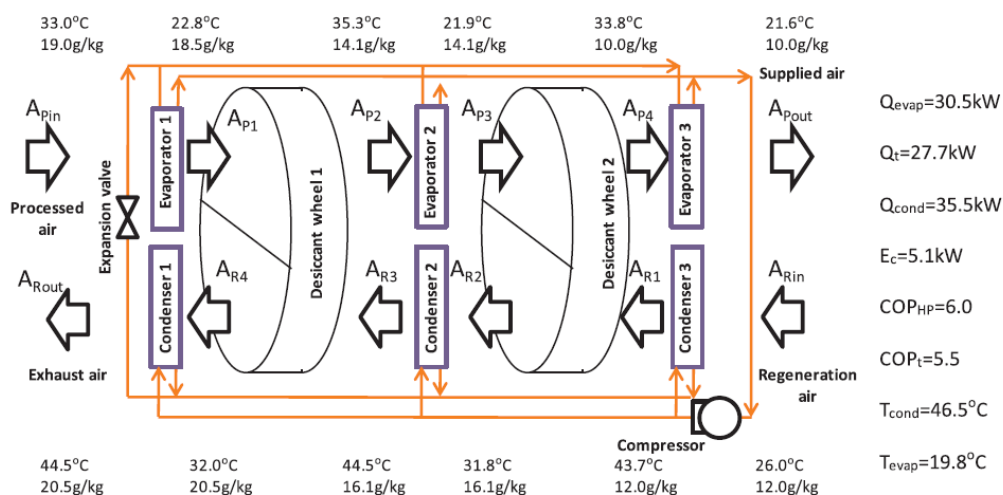


圖 3.17 兩段式除濕轉輪結合熱泵【59】

為了使除濕轉輪結合熱泵系統出口溫度可以下降，Rang Tu 等人【59】提出兩段式除濕轉輪結合熱泵系統，一樣使用蒸發器對外氣進行第一階段的冷凝除濕，但是蒸發器分成三階段，將兩個除濕轉輪安插於三個蒸發器之間，詳細系統圖如圖 3.17 所示，冷凝器也以對稱的方式分三階段架設於轉輪再生端的位置，外氣經過蒸發器後被降溫並且除濕，再經過除濕轉輪後會因為吸附除濕而使溫度再次上升而濕度再次下降，高溫低濕的狀態有利於蒸發器的性能提升，高溫造成高的溫差有利於蒸發器冷媒的蒸發，低濕可減少冷凝水的產生而降低蒸發器的額外耗功，所以再次經過蒸發器後，空氣溫度可以下降 10°C 並再次提升相對濕度，使第二個除濕轉輪在此高相對濕度下可以發揮較高的能力，經過 3 次蒸發器降溫與 2 次除濕轉輪的吸附除濕，出口空氣可以下降 11.4°C 並降低絕對濕度 9g/kg 。圖 3.18 顯示了系統操作狀態的空氣線圖，可以發現除濕材料除濕幾乎是等焓狀態，也就是降低的濕度造成的溫昇會使空氣狀態保持在相同的焓值，單段系統的蒸

發器與處理空氣的溫差會隨時間而變小造成效能些為減低，而多段系統因為中間有除濕轉輪提升溫度，可使溫差再次拉大，保持蒸發器的效能，多段與單段系統之蒸發器或是冷凝器的總熱傳面積是相等的，只是多段系統的蒸發器分成了三個部分，而單段式系統只有一個。

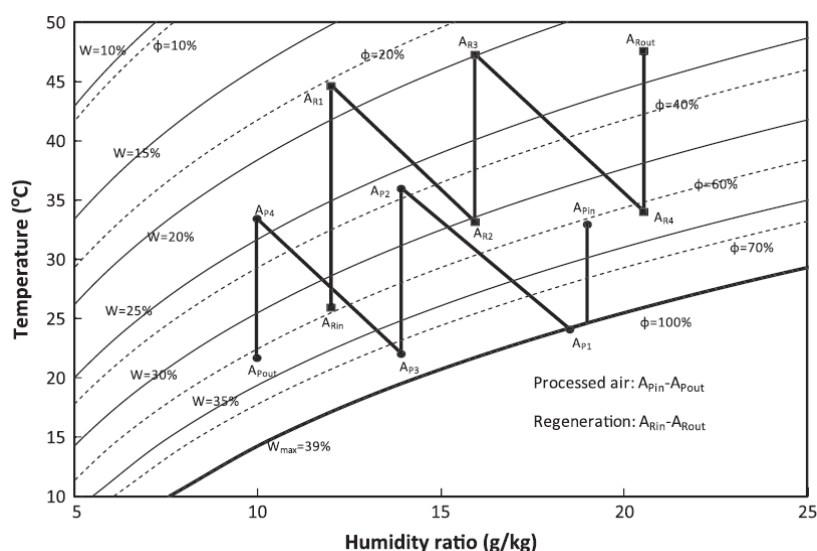


圖 3.18 兩段式除濕轉輪結合熱泵操作狀態之空氣線圖【59】

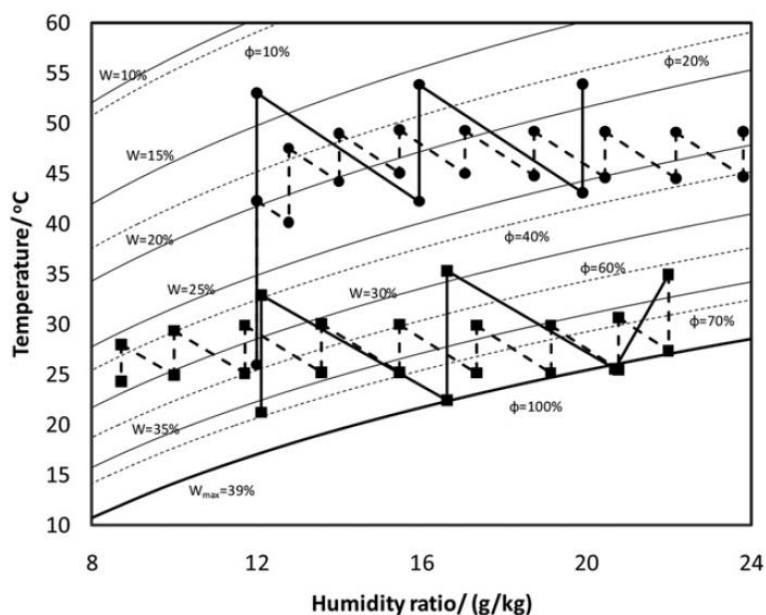


圖 3.19 多段式除濕轉輪結合熱泵操作狀態之空氣線圖【57】

Rang Tu 【57】等人也利用推導之經驗公式模擬多段式除濕轉輪結合熱泵的操作狀態變化，結果如圖 3.19 所示，越多段的除濕轉輪與蒸發器所形成的設備越能使出口空氣降低並達到更低的絕對濕度。但是相對的系統會變的很大型且複雜，轉輪所需的馬達數也增加，冷媒的壓降也變得很大，影響壓縮機的運作。

此系統中轉輪的轉速也是很重要的參數，如圖 3.20 所示，轉速越快代表除濕轉輪可以越快進入再生端再生，也就越能保持在最高效率的除濕狀態，然而轉速過快，會使除濕轉輪在再生端停留的時間減短，造成來不及反應完全，反而造成除濕性能下降，所以轉速有個最佳範圍，因為轉輪的周圍通常使用毛刷當作隔離層隔絕蒸發器的低溫空氣與冷凝器的高溫空氣，所以有時當轉速過快時，甚至會造成混風，根據多數的文獻顯示，轉速保持在 5-10 rph 之間通常有擁有較高的除濕效率。

為了提高冷凝器的 COP，利用冷卻水塔取代最後一個蒸發器並把低溫空氣送入冷凝器幫助冷凝器冷凝，圖 3.21 顯示了整個系統圖，冷卻水塔同樣可以把使外氣最終達到 21.7°C 與絕對濕度 10g/kg 的狀態，但是冷凝端因為蒸發冷卻的關係，使冷凝器入口溫度降低，冷凝器的性能因此上升，而再生溫度也從原本的 43-44°C 降低到 39-40°C，但是卻能保持降低外氣絕對濕度 9g/kg，也就是說只需用 40°C 的再生溫度就可以達到平常需要使用 150°C 以上再升溫度才能達到的除濕量，非常具有節能潛力。

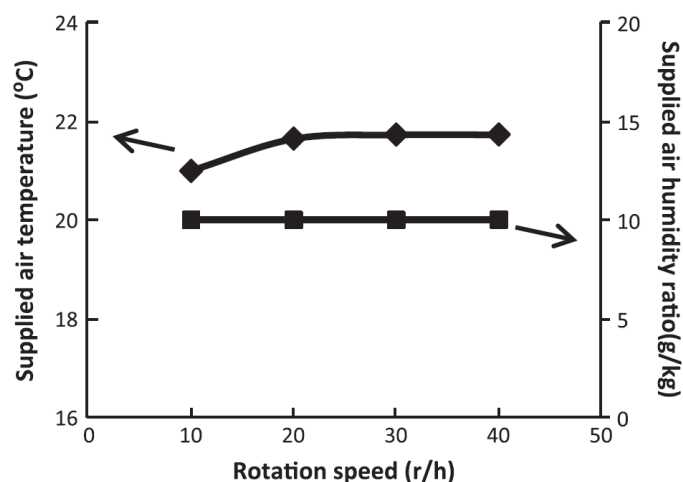


圖 3.20 除濕轉輪轉速對兩段式除濕轉輪結合熱泵系統的影響【59】

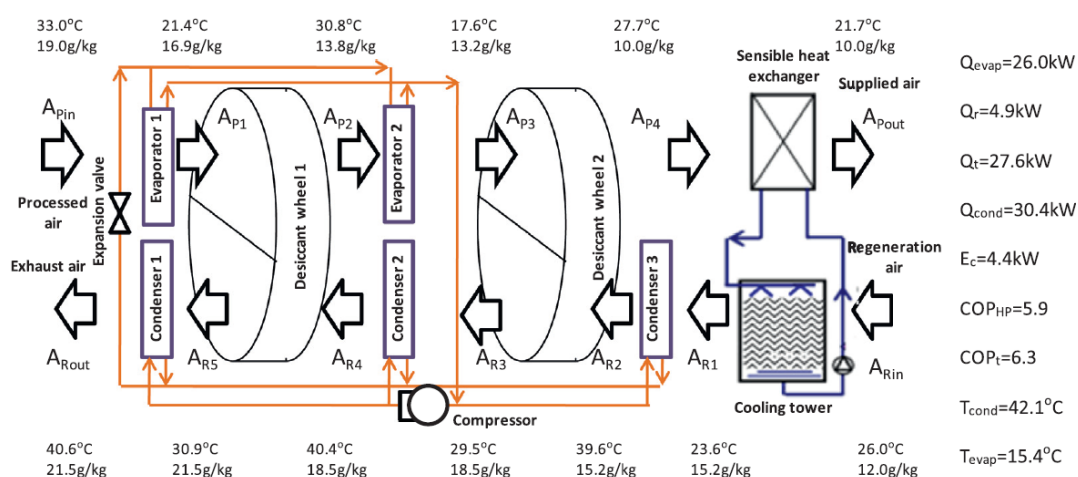


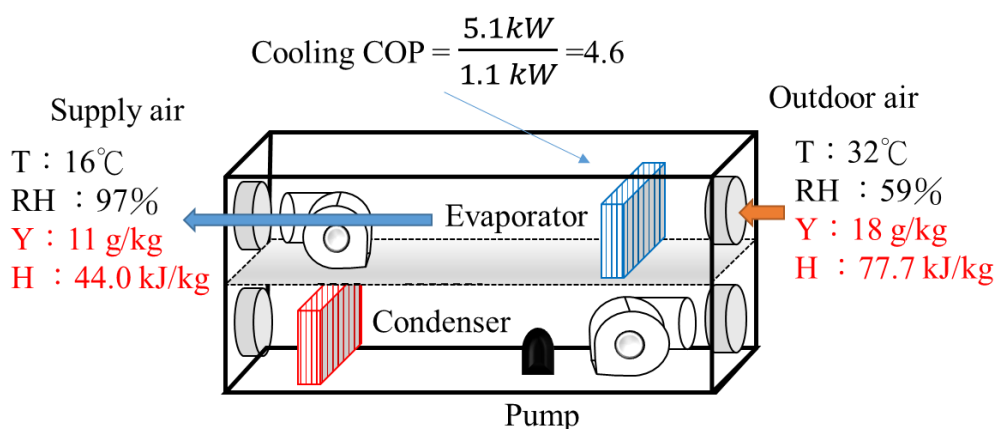
圖 3.21 冷卻水塔應用於兩段式除濕轉輪結合熱泵系統【59】

兩段式除濕轉輪結合熱泵系統可以有效的降低外氣溫度與達到更高的除濕量，在外氣為 33°C 與絕對濕度 19 g/kg 的狀態下，可使出口溫度下降 11.3°C，出口空氣絕對濕度下降 9g/kg，而使用的再生溫度只需 45°C，遠低於一般達到同樣絕對濕度條件所需的再生溫度，兩段式除濕轉輪結合熱泵系統也比單段除濕轉輪結合熱泵系統更能有效的降低出口溫度，從降低 1-2°C 提昇到降低 10°C，有效的降低外氣的焓值，對於外氣空調箱的節能非常有幫助，然而多段式系統所需的轉輪馬達數較多，系統較為複雜，成本會有些許的提升。

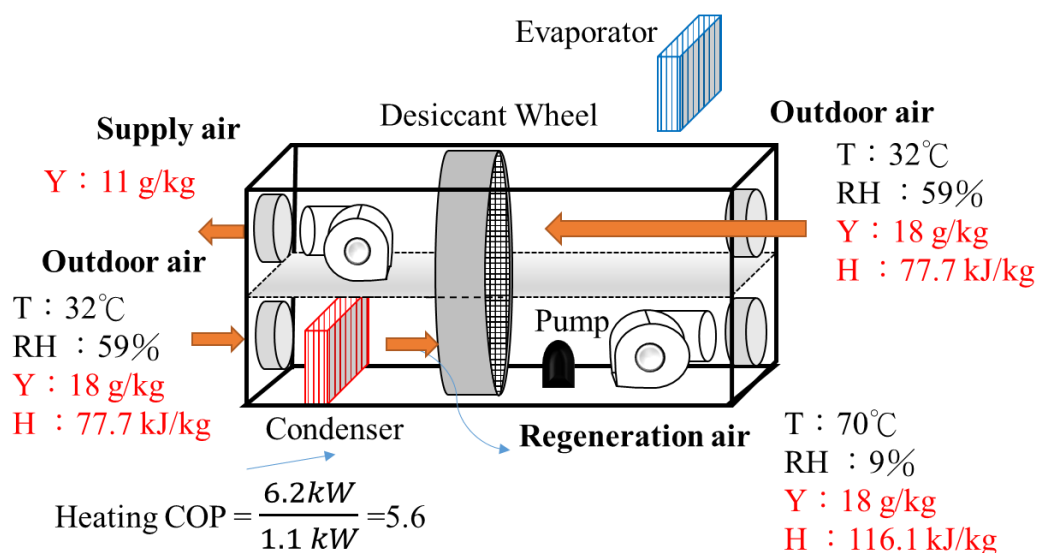
肆、吸附除濕系統之節能效益分析

比較—(a)冷凝除濕系統、(b)吸附除濕轉輪系統、(c)先經過除濕轉輪吸附除濕再經過蒸發器進行冷凝除濕的熱泵結合除濕轉輪除濕系統、(d)章節 3.3 之先經過蒸發器冷凝除濕再經過除濕轉輪吸附除濕的除濕轉輪結合熱泵系統與(e) 章節 3.4 之兩段式除濕轉輪結合熱泵系統—五種除濕系統的耗電量，在同樣 32°C 與相對濕度 59% 的外氣條件下，以章節 3.3 的複合材料除濕轉輪結合熱泵系統的性能做比較，使供風空氣狀態達到絕對濕度 11g/kg 。圖 4.1 (a)為冷凝除濕系統，利用蒸發器對空氣做降溫並因為冷凝水的產生使絕對濕度下降到 11g/kg ，根據空氣線圖得知必須達到 16°C 與相對濕度 98% 才能達到絕對濕度 11g/kg ，以同樣的熱泵性能，固定冷卻能力的 COP 為 4.6，計算所需的耗電量，以同樣處理風量計算結果為 1.85 kW ，加上同樣的兩個風扇耗能，總耗電量為 2.45 kW 。而在除濕轉輪除濕系統方面，如圖 4.1(b)，如文獻所說，要達到 7 g/kg 的除濕量使供風狀態到達 11g/kg ，必須使用 70°C 以上的再生溫度才能達成，因此以同樣的熱泵性能，固定加熱能力 COP 為 5.6，把外氣從 32°C 加熱到 70°C 需要耗電量為 1.73 kW ，以同樣的兩個風扇與同樣的轉輪馬達計算總耗電量，結果為 2.43 kW 。圖 4.1(c)為熱泵結合除濕轉輪系統，與章節 3.3 的除濕轉輪結合熱泵系統相比，差別在於轉輪的擺放位置，此系統的除濕轉輪擺放位置為蒸發器之前，此目的是為了使處理空氣被吸附除濕並提升溫度，可以保護並提升蒸發器的效能，使熱泵的 COP 上升，但是除濕轉輪的除濕過程幾乎是等焓過程，因此對焓值的下降並沒有明顯的幫助，因此根據文獻實驗數據可以知道在 45°C 再生環境下，出口溫度會上升 1.9°C 並降低絕對濕度 1.7 g/kg ，但計算得到的焓值並沒有比外氣下降很多，在固定 COP 的狀態下熱泵耗能還是需要 1.71 kW ，

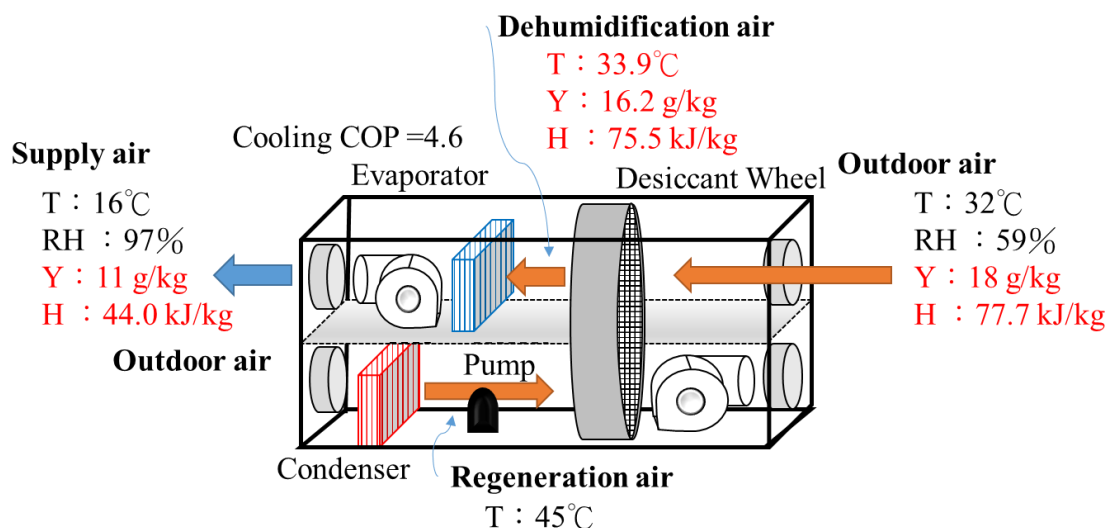
加上兩個風扇與除濕轉輪馬達的耗電，共需要 2.41 kW。如表 3.2 所示，複合材料除濕轉輪結合熱泵系統達到同樣條件只需要總耗電量 1.86 kW，極具有節能潛力。在兩段式除濕轉輪結合熱泵系統中，冷凝除濕、第一個除濕轉輪與第二個除濕轉輪的除濕比例為 0.5：4.4：4.1，總除濕量是 9 g/kg，如圖 3.16 所示，此時冷凝除濕量可以忽略，如果要使外氣絕對濕度降低 7 g/kg，以此兩段式除濕轉輪系統就可以達到，一樣使用 45°C 再生溫度，忽略蒸發器的影響，但與複合材料除濕轉輪結合熱泵系統相比，兩段式除濕轉輪系統多一個轉輪馬達，因此總耗電量為 1.96 kW，因為比較條件設定為使外氣降低到同樣的絕對濕度，而忽略溫度的變化，兩段式除濕轉輪系統雖然會比複合材料除濕轉輪系統多耗功，但是出口溫度可以比複合材料除濕轉輪系統多降低 8°C，有助於外氣焓值的降低，以外氣預處理設備而言更具節能潛力，但此模擬計算以除濕設備為主，出口的濕度變化是本計算的重點。



(a) 冷凝除濕系統示意圖



(b) 除濕轉輪除濕系統示意圖



(c) 熱泵結合除濕轉輪除濕系統示意圖

圖 4.1 各種除濕設備比較示意圖

表 4.1 五種除濕設備節能比較表

	Total power consumption (kW)	E.F. (kg/kW·hr)	Improve ratio (%)
冷凝除濕系統	2.45	1.73	-

除濕轉輪吸附除濕系統	2.43	1.75	1
熱泵結合除濕轉輪系統 (除濕轉輪在蒸發器之前)	2.41	1.78	2
除濕轉輪結合熱泵系統 (除濕轉輪在蒸發器之後)	1.86	2.3	31
兩段式除濕轉輪結合熱泵系統	1.96	2.19	25

表 4.1 顯示了五種除濕系統的比較表，並以 E.F.值當做指標 (kg/kW·hr)，因此忽略的溫度造成的影響，並以傳統冷凝除濕系統的耗能當作基準點，計算其他四種系統的改善比例，除濕轉輪吸附除濕系統幾乎沒有提升，但是此系統的熱源可以來自於太陽能或是廢熱等綠色能源，並不一定需要使用到冷媒，具有環保優勢。熱泵結合除濕轉輪系統因為擺放位置在蒸發器之前，有助於保護熱泵系統並提升其效能，但吸附除濕的同時對於降低外氣焓值並沒有太大的助益，因此如果要使外氣絕對濕度降低到 11 g/kg，還是需要利用蒸發器把溫度下降到 16°C，E.F.提升量只有 8%，除濕轉輪結合熱泵系統則可以有效的利用蒸發器的冷凝除濕與除濕轉輪的吸附除濕，以最低耗電量達到設定的目標。兩段式除濕轉輪結合熱泵系統雖然 E.F.提升量並不是最高，但此系統還可以使外氣降低 10°C，如果以降低外氣焓值來計算會比其他系統無法比擬的。

表 4.2 顯示了五種除濕設備的優缺點，冷凝除溼過程伴隨著降溫，可同時處理潛熱與顯熱，對於顯熱與潛熱負荷都重的區域(像是熱帶雨林區)，此系統可以用一個系統就達到降溫與除溼的目的，但是此系統的耗能較大，以除溼量與耗功的關係(E.F 值)而言並不是最優秀的，且是冷媒系統，較為不環保，有時溫度過低時需要再熱；除濕轉

輪系統可以利用再生能源的熱能再生轉輪，不須使用冷媒系統，具有潔淨與環保空調設備的特點，但是除溼過程伴隨著溫度上升，處理空氣幾乎保持等焓，所以在顯熱的負荷上反而增加，適合用在低溫高濕的環境(靠近南北極，或是高山上會下雪的區域)，可以用於提高溫度並除去濕氣；熱泵結合除濕轉輪系統可以利用轉輪使溫度上升並降低潛熱，使蒸發器處於有利的操作條件，進而達到高效率操作點，但為了達到所需的除溼量，熱泵還是必須降到與冷凝除溼一樣的溫度，加上除濕轉輪的除溼過程是等焓的，所以熱泵處理的總焓值是與冷凝除溼一樣的，對於除溼量而言並沒有增加太多的優勢，主要還是幫助熱泵的效能提升，較適合應用於低溫低濕的環境(乾冷的大陸型氣候區)，藉由提升蒸發器的能力進而提升冷凝器的加熱能力，主要可當作暖氣使用，相較於當作暖氣系統，當作除溼系統時的功用就沒那麼顯著；除濕轉輪結合熱泵系統擁有最高的除溼性能，與熱泵結合除濕轉輪系統相反，是利用蒸發器處理後的空氣狀態提高轉輪的除溼性能，使除濕轉輪保持在最高除溼性能的狀態，結合冷凝除濕與吸附除溼兩大除溼機制，使除濕能力達到最高，但是顯熱只能微微下降，適合用在顯熱負荷不高但潛熱負荷很高的區域(中緯度海島型國家)，像是台灣春秋之際，雖然不是很熱，但是溼氣很重，需要使用除濕系統才能使空氣保持在健康與適合人體的範圍；兩段式除濕轉輪結合熱泵系統可以進一步的使除溼轉輪結合熱泵系統的顯熱負荷下降，且除溼性能也能進一步提升，但是因為使用更多的轉輪馬達使耗電量上昇，E.F 值並沒有提升，加上冷媒的管路因為多段的關係變得較為複雜，較有維修保養上的問題，但是提高了顯熱的處理量可以使此設備適合的應用天後變廣，像是赤道到中緯度地區的海島型國家都較適合此同時具有良好顯熱與潛熱處理能力的低耗能設備。

表 4.2 五種除溼系統的優缺點比較

	優點	缺點
冷凝除濕系統	可同時處理潛熱與顯熱	耗能較大，需要再熱
除濕轉輪吸附除濕系統	可不須使用冷媒系統	處理空氣幾乎保持等焓
熱泵結合除濕轉輪系統 (除濕轉輪在蒸發器之前)	提升熱泵的效能	除溼性能不佳
除濕轉輪結合熱泵系統 (除濕轉輪在蒸發器之後)	最高的除溼性能	顯熱降低過少
兩段式除濕轉輪結合熱 泵系統	顯熱與潛熱性能都高	需要使用很多轉輪馬達 管路複雜、壓降過大

伍、吸附除濕技術之應用案例介紹

5.1 自來水冷排結合週期式全熱交換器應用於某觀光區辦公室

圖 5.1 為週期式全熱交換器運轉示意圖，其原理如章節 3.1 所示，利用除濕材料蓄能與除濕的原理製成，再利用兩組風機(四個風扇)交換運轉，在除濕材料再生階段回收室內低溫低濕的空氣能量，並在除濕階段把此能量放出對高溫高濕的外氣做降溫除濕，因為只需使用到風扇並以周期式的運轉，省略了傳統再生式全熱交換器的轉輪馬達，因此耗電量較傳統系統來的低。

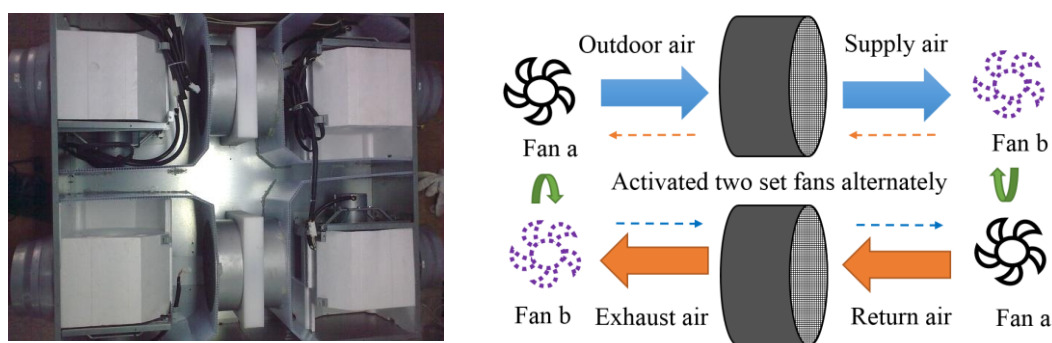


圖 5.1 週期式全熱交換器

圖 5.2 為自來水冷排系統示意圖，此觀光區有豐富的自來水與河水，利用長年低溫的自來水的冷能(18-22℃)，使用馬達抽水進入天花板冷盤管中，再使用一電風扇加強對流效應把冷源傳至室內，經過和室內空氣進行熱交換後把室內空氣降溫，並把熱水打回觀光區遊樂設施或是植物灌溉等所需用水區，天花板冷排降溫系統在國內外已經長期的被研究與建置，此系統因為只需風扇與馬達就可達到高效率的降溫所以稱之為微電空調系統，然而此系統最大的問題在於如果室內濕度過高再冷排降溫的過程中容易產生冷凝水，會在室內滴水造成人員的不舒適感。

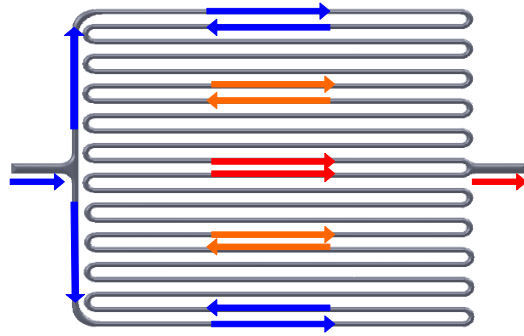


圖 5.2 自來水冷排系統

為了有效的減少冷凝水的產生並引進新鮮的外氣進入室內，自來水冷排結合週期式全熱交換器系統被安裝於此辦公大樓，如圖 5.3 所示，此系統包含了一個週期式全熱交換器、天花板冷盤管與傳統窗型冷氣機，系統會有自動的開機順序，詳細操作狀態如圖 5.4 所示，早上上班時，室內因為悶了一個晚上所以空氣品質不佳，但保有晚上關門前的低溫低濕狀態，因此先開啟週期式全熱交換器引進新鮮空氣(1-2)，並把外氣降溫除濕，再開啟天花板冷排進行第二階段的降溫(2-3)，因為外氣已經經過全熱交換器除濕，所以不會有冷凝水的產生，因為經過兩次降溫後，此時外氣的焓值已經比未經處理的外氣低很多，再開啟傳統冷氣機就可以迅速的把外氣降到設定溫度，實驗結果顯示傳統冷氣降到設定溫度所需時間經此系統處理後可以減少 66% 左右。

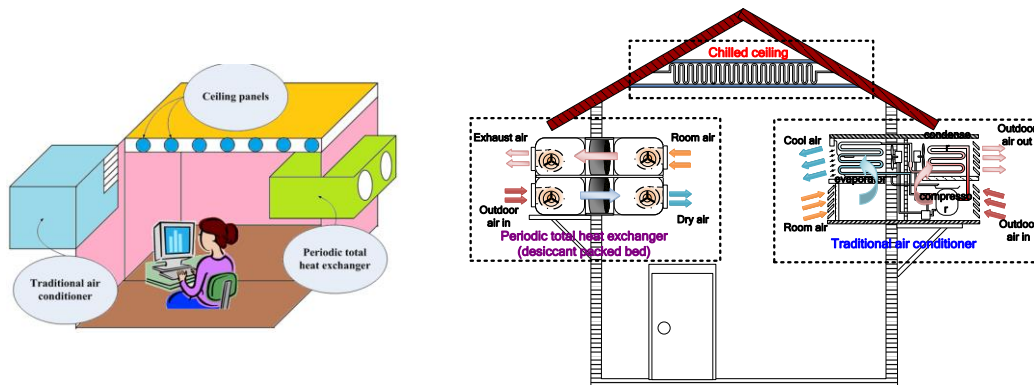


圖 5.3 自來水冷排結合週期式全熱交換器系統

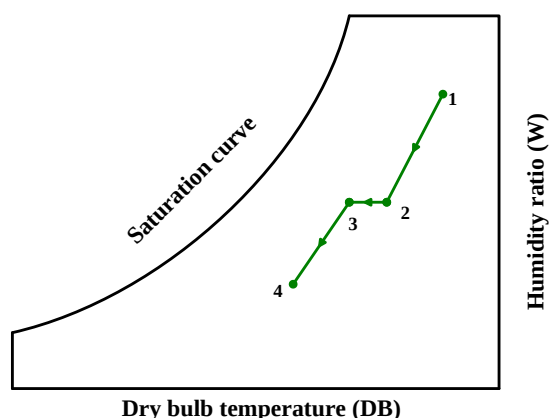


圖 5.4 外氣處理過程空氣線圖

表 5.1 自來水冷排結合週期式全熱交換器系統節能分析

	Outdoor air conditions			Supply air conditions			Energy Recovery	Energy saving ratio
	$T_{OA}(^{\circ}\text{C})$	ϕ_{OA}	$H_{OA}(\text{kJ/kg})$	$T_{SA}(^{\circ}\text{C})$	$Y_{SA}(\text{g/kg})$	$H_{SA}(\text{kJ/kg})$	ε_t	E
Jan	15.9	86%	40.50	NA	NA	NA	NA	NA
Feb	16.3	85%	41.26	NA	NA	NA	NA	NA
Mar	18.7	78%	45.43	NA	NA	NA	NA	NA
Apr	23.1	76%	57.51	25.5	11.6	55.2	65.8%	14.3%
May	25.9	71%	64.07	26.0	12.1	57.0	67.8%	17.9%
Jun	27.8	72%	71.27	26.3	12.9	59.2	66.4%	18.4%
Jul	30.6	65%	76.90	26.7	13.3	60.7	65.5%	12.4%
Aug	29.2	75%	78.52	26.5	13.7	61.6	60.1%	17.6%
Sep	27.3	70%	68.27	26.2	12.5	58.3	66.9%	18.4%
Oct	24.1	67%	56.31	25.7	11.3	54.6	66.8%	18.2%
Nov	21.2	74%	50.92	NA	NA	NA	NA	NA
Dec	17.8	77%	42.70	NA	NA	NA	NA	NA

表 5.1 呈現了一整年的運轉測試，因為冬天的自來水還是很低溫，而室內不會開冷氣，因此可直接開窗引進室外空氣，根據 2013 年氣象局的天氣資料比照本研究一整年的研究記錄結果，找尋與氣象局同樣的外氣條件的實驗數據，得到當時的全熱回收率實測值，如表 5.1 所示。接著利用此數據計算春夏秋天的節能效益，比較基礎是未裝設本研究開發的全熱交換器與冷排系統，而直接利用兩個風扇引進室外

新鮮空氣與排出室內空氣，結果的發現節能比例在 12-18%之間，具有很高的推廣價值。

詳細計算結果與條件設定如下：室外空氣通過氣對氣全熱交換器系統除濕側進行除濕降溫處理後，再經過冷凝盤管進行降溫處理，得到實驗量測值的空氣狀態並計算出焓值，與室內空氣混和送往室內空間空調機進行處理，經過室內空調機處理後的空氣狀態定為 13℃相對溼度 95%，而室內冷房條件設定為乾球溫度 26 °C 相對濕度 50%，即可得到各空氣狀態點的焓值，並假設室內空調機的 COP 為 3，直接引進外氣系統的外氣焓值較高，而改善後，經過自來水冷排結合週期式全熱交換器系統處理的外氣焓值較低，加上兩套系統同一時間都只有使用兩個風扇在耗能，因此可以非常簡單的計算出節能效益。

$$ESR = \frac{W_{sys,baseline} - W_{sys,improved}}{W_{sys,baseline}} \times 100\%$$

ESR 為節能比例(Energy saving ratio)。

5.2 除濕轉輪結合熱泵系統應用於某研究大樓人員休息室

圖 5.5 為除濕轉輪結合熱泵系統示意圖，詳細資料如章節 3.3 所示，圖 5.6 為現場安裝示意圖，此系統在除濕系能方面擁有較有優勢，如果使用在外氣空調系統當作外氣預處理裝置時，因為熱泵的耗能與成本都比全熱交換器來的大，加上單段除濕轉輪結合熱泵系統的出口溫度過高，計算出的節能效益與回收年限都沒有比全熱交換器來的高，但此系統的除濕能力很好，非常適合用在亞熱帶等高濕度地區，E.F. 值顯示每度電除濕量是所有相似的除濕設備中最高的，因此安裝於某研究大樓的人員休息室當作除濕設備使用。此系統的另一個特色是冬天可利用熱泵的加熱能力對外氣進行加溫後再引進室內，可以全年的運轉。

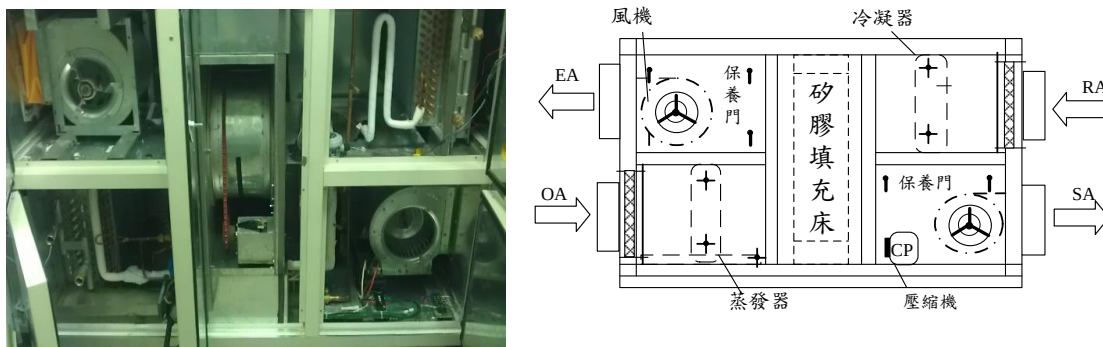


圖 5.5 除濕轉輪結合熱泵系統



圖 5.6 除濕轉輪結合熱泵系統安裝圖

表 5.2 為一年的除濕量計算結果，冬天可以把系統反轉，利用熱泵加熱外氣，並利用除濕轉輪對外氣微微加濕，使外氣保持在適合人體的狀態，春、夏與秋天可以對外氣進行降溫與除濕，根據 2014 年的平均外氣資料，比照實際測試時的實驗數據，得到春夏秋可以降低外氣多少焓值與每小時的除濕量，再以每天運作 8 小時為基準，每月固定運作 30 天，可計算出每個月的平均除濕量，結果顯示夏天的總除濕量最高，七月總除濕量可以高達 1744 公斤。同樣方式，在冬天時，根據實際測試結果比對 2014 年的平均外氣資料，使用相同天氣狀態下的實驗數值，以每天運作 8 小時與每月運作 30 天的計算方式，可以得到在此天氣狀態下系統可以提升外氣多少焓值，與每月可加濕

多少公斤的濕氣。結果顯示此套設備可以在四季都可以使用，並有良好的效果，可以降低引進室外空氣造成室內空調系統的負荷。

表 5.2 複合材料除濕轉輪結合熱泵系統一整年除濕量分析

	Outdoor air			The enthalpy variation of outdoor air (kJ/kg)	Total amount of dehumidification (kg/month)
	T (°C)	RH (%)	H (kJ/kg)		
Jan	15.3	68	34	+10.5	-298
Feb	16.1	70	36.4	+12.1	-238
Mar	20.5	79	50.9	-10.1	982
Apr	21.7	75	52.9	-12.6	1007
May	25	87	69.6	-20.1	1128
Jun	31.1	72	84.3	-23.4	1719
Jul	32.3	73	90.2	-24.2	1744
Aug	29	68	73.2	-21.5	1498
Sep	27.8	77	74.5	-22.8	1523
Oct	27.2	74	70	-20.7	1474
Nov	25.4	72	63	-16.6	1449
Dec	17	72	39.1	+13.4	-268

5.3 氣對氣全熱交換器應用於某宿舍

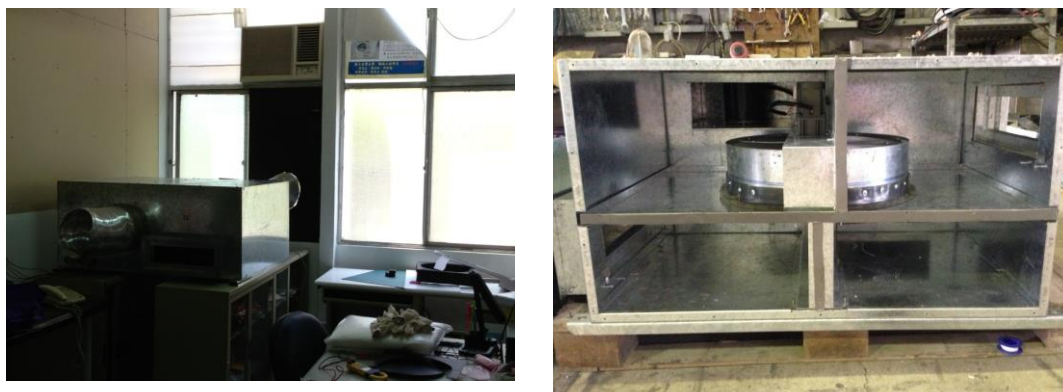


圖 5.7 氣對氣全熱交換器安裝實體圖

由於由高性能紙製成之全熱交換器很容易因為灰塵阻塞薄膜而降低熱質傳的效果，並需定期更換與清洗，加上成本昂貴，並不適合民生系統，因此使用低成本的氧化鋁填充床取代傳統性能紙全熱交換器，使用氧化鋁是因為經過基礎測試結果，在低溫 25°C 與 50% 的再生條件下，氧化鋁吸附曲線因為是 sigmoid type 的原故，因此可以擁有比矽膠更好的脫附能力，也因此達到更好的除濕能力。為了減少設備的體積，可以安裝於天花板的梁架上，系統採水平設計，也可以避免填充床在垂直時因為重力造成的漏風與不平均，圖 5.7 為氣對氣全熱交換器安裝實體圖，此宿舍冬季使用暖氣加溫，春夏秋季使用冷氣降溫，而外氣經過此設備可以利用排風時回收的能量對外氣進行預處理，降低外氣的焓值使室內暖氣或是冷氣的負荷下降，與直接引進外氣系統相比，可計算出節能效益，空調系統室內回風量為 2,800 CMH，外氣風量為 700 CMH，送風量為 3,500 CMH，另外空調系統之性能係數 (COP_{AC}) 為 3。春秋夏天室內冷房條件設定為乾球溫度 26°C 相對濕度 50%，室內空調機供風條件為 13°C 相對濕度 95%；冬季室內暖房條件設定為乾球溫度 22°C 相對濕度 50%，室內暖氣機 (COP_{AC}) 為 3，供

風條件為 40℃ 相對濕度 20%。藉由本研究長期量測與整理所得之 2010 年各月份早上九點至下午六點的天氣資料，評估系統於全年操作之節能效益。

經過一整年的實際量測，表 5.3 顯示其計算結果，在冬季可以有 7-9 % 的節能效益，春季與秋季有 11-13% 的節能效益，而夏天最高可以達到 21%，因為此套系統的耗電量不高，回收年限也在 3-4 年之間，填充床型式的轉輪成本低且方便維修，唯一缺點是壓降過大，但配合二氧化碳濃度控制，當達到需要引進外氣標準時再開啟此系統，可以有效的減少風機啟動時間，進而降低耗能。

表 5.3 氣對氣全熱交換器全年效益評估表

月份	外氣條件			用電量		節能 效益	節省 電費 (元)	CO2 減少 排放量(kg)
	T (°C)	RH (%)	H (kJ/kg)	改善 前 (kWh)	改善 後 (kWh)			
1	16.6	72.6	36.7	3,691	3,382	7.6%	1,361	146
2	17.0	77.4	40.7	3,442	3,180	7.5%	1,245	134
3	21.6	68.4	48	2,150	1,933	11.5%	1,223	131
4	22.1	73.6	53.4	2,230	1,960	13.5%	1,532	164
5	27.0	71.5	67.9	2,633	2,381	13.7%	1,841	197
6	27.8	75.3	70.3	2,586	2,401	13.8%	1,690	181
7	32.4	65.2	82.5	2,868	2,434	20.9%	3,234	347
8	30.8	66.8	83.2	2,860	2,434	21.4%	3,332	357
9	30.8	67.1	76.2	2,722	2,461	15.2%	2,217	238
10	25.3	74.4	62.8	2,434	2,209	12.6%	1,602	172
11	22.1	71.5	52	2,191	1,927	13.4%	1,499	161
12	17.1	65.5	36.9	3,565	3,213	9.2%	1,631	175
總計				33,372	29,915	13.2%	22,406	2,402

編後語

財團法人台灣綠色生產力基金會（簡稱綠基會），主要任務是配合國家能源政策，執行經濟部能源局委辦之各項節約能源技術服務計畫。藉由檢測、診斷找出產業、住商及政府機關部門能源使用缺失，尋找節能機會(政策、技術、設備、管理)，對能源用戶提供能源效率評估及改善規劃、製程、操作等服務工作外，亦製作節約能源海報、貼紙及出版各種節能成果專刊、節能技術手冊，而推廣節約能源的觀念。

此「空調吸附除濕節能應用技術手冊」之編撰，主要提供給能源管理者在引入新鮮外氣增加室內空氣品質時，一項可降低外氣空調負荷之方法與思維，進而自發性導入改善工作，並借此加強節約能源教育宣導，落實全民節約能源共識。

此手冊的編撰是在經濟部能源局的指導下，由國立臺灣大學陳希立教授主筆，本會配合協助資料彙整、編排、增修校對和封面規畫設計，並聘請國立台北科技大學 李文興委員、大弘冷凍空調工業技師事務所 鄭正仁委員及鈞元能源技術工程股份有限公司 趙宏耀委員審核後才得以印製完成，倉促間內容不免有所疏漏和缺失，還望產、官、學界的各位先進不吝指教正，得以使本手冊更形充實和完備。

參考文獻

- 【1】 S. Bnrnauerl, L.S. Deming, W. E. Deming and E. Teller. On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. Journal of the American Chemical Society, 62 (1940) 1723-1732.
- 【2】 W. Wang, L. Wu, Z. Li, Y. Fang, J. Ding, J. Xiao. An Overview of Adsorbents in the Rotary Desiccant Dehumidifier for Air Dehumidification. Drying Technology 2013, 31, 1334–1345.
- 【3】 S. Misha, S. Mat, M.H. Ruslan, K. Sopian. Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods. Renewable and sustainable energy reviews 2012;16:4686-4707.
- 【4】 X.Q. Zhai, R.Z. Wang. A review for absorption and adsorption solar cooling systems in China. Renewable and sustainable energy reviews 2009;13:1523-1531 .
- 【5】 L.W. Wang, R.Z. Wang, R.G. Oliveira. A review on adsorption working pairs for refrigeration. Renewable and sustainable energy reviews 2009;13:518-534
- 【6】 Seiya Ito, Hongyu Huang, Fujio Watanabe, Haoran Yuan, Masanobu Hasatani, and Noriyuki Kobayashi. Heat Transfer during Microwave-Assisted Desorption of Water Vapor from Zeolite Packed Bed. Drying Technology,2012; 30:15, 1707-1713
- 【7】 S.C. Hu, Y.K. Chuah, Power consumption of semiconductor fabs in Taiwan, Energy,2003;28:895-907
- 【8】 Ali Al-Alili, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher. Performance of a desiccant wheel cycle utilizing new zeolite material: Experimental investigation. Energy 81 (2015) 137-145
- 【9】 M. Goldworthy, S.D. White. Limiting performance mechanisms in desiccant wheel dehumidification. Applied Thermal Engineering 44 (2012) 21-28
- 【10】 Jia, C.X., Dai, Y.J., Wu, J.Y., Wang, R.Z., Experimental comparison of two honeycombed desiccant wheels fabricated with silica gel and composite desiccant material. 2006, Energy Conversion and Management;47: 2523-2534.
- 【11】 D.H. Vu, K.S. Wang, B.H. Bac, B.X. Nam. Humidity control materials prepared from diatomite and volcanic ash. Construction and Building Materials 2013, 38, 1066–1072.
- 【12】 Habib, K., Saha, B.B., Rahman, K.A., Chakraborty, A., Koyama, S.,Ng, K.C.

- Experimental study on adsorption kinetics of activated carbon/R134a and activated carbon/R507A pairs. *International Journal of Refrigeration* 2010;33:706-713.
- 【13】 Hongyu Huang, Toshinari Oikeb, Fujio Watanabeb, Yugo Osakac, Noriyuki Kobayashia, Masanobu Hasatan. Development research on composite adsorbents applied in adsorption heat pump, *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 1193–1198.
 - 【14】 J. Lee, D. Y. Lee, Sorption characteristics of a novel polymeric desiccant, 2012, *International Journal of Refrigeration*;35:1940-1949.
 - 【15】 S. D. White, M. Goldsworthy, R. Reece, T. Spillmann, A. Gorur, D. Lee, Characterization of desiccant wheels with alternative materials at low regeneration temperatures, *International Journal of Refrigeration*;34: 2011,1786-1791.
 - 【16】 T. Cao, H. Lee, Y. Hwang, R. Radermacher, H. H. Chun, Experimental Investigations on Thin Polymer Desiccant Wheel Performance, *International Journal of Refrigeration*; 44 (2014) 1-11.
 - 【17】 La, D., Dai, Y.J., Li, Y., Wang, R.Z., Ge, T.S., Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning, 2010, *Renewable and sustainable energy reviews*;14:130-147
 - 【18】 C.Y. Tso, Christopher Y.H. Chao, Activated carbon, silica-gel and calcium chloride composite adsorbents for energy efficient solar adsorption cooling and dehumidification systems, 2012, *International Journal of Refrigeration*;35:1626-1638
 - 【19】 X. Zheng, T.S. Ge, R.Z. Wang. Recent progress on desiccant materials for solid desiccant cooling systems. *Energy* 74 (2014) 280-294
 - 【20】 Hongyu Huang, Toshinari Oikeb, Fujio Watanabeb, Yugo Osakac, Noriyuki Kobayashia, Masanobu Hasatani. Development research on composite adsorbents applied in adsorption heat pump. *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 1193–1198.
 - 【21】 C.S. Tretiak, N. Ben Abdallah. Sorption and desorption characteristics of a packed bed of clay/CaCl₂ desiccant particles. *Solar Energy* 83 (2009) 1861-1870.
 - 【22】 Zeljko Knez, Zoran Novak. Adsorption of water vapor on silica, alumina, and

- their mixed oxide aerogels. *Chemical Engineering Journal* 46 (2001) 858-860.
- 【23】 A.S. Binghooth, Z.A. Zainal , Performance of desiccant dehumidification with hydronic radiant cooling system in hot humid climates, *Energy and Buildings*,2012;51:1-5.
- 【24】 室內空氣品質管理法，總統華總一義字第 10000259721 號令，中華民國 100 年 11 月 23 日。
- 【25】 室內空氣品質標準，行政院環境保護署環署，中華民國 101 年 11 月 23 日。
- 【26】 S. Misha, S. Mat, M.H. Ruslan, K. Sopian. Review of solid/liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods. *Renewable and sustainable energy reviews* 2012;16:4686-4707.
- 【27】 Review on physical and performance parameters of heat recovery systems for building applications, A.Mardiana, S.B.Riffat, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28(2013)174 – 190.
- 【28】 C.M. Yang, C.C. Chen, S.L. Chen. Energy-efficient air conditioning system with combination of radiant-cooling and periodic total heat exchanger. *Energy* 59 (2013) 467-477.
- 【29】 M. Nasif, R. AL-Walked, G. Morrison, M. Behnia, Membrane heat exchanger in HVAC energy recovery systems, systems energy analysis, *Energy and Buildings*42 (2010) 1833–1840.
- 【30】 Jingchun Min , Ming Su, Performance analysis of a membrane-based energy recovery ventilator: Effects of outdoor air state, *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 4036-4043
- 【31】 Simonson CJ. Heat and energy wheels. *Encyclopedia Energy Eng Technol* 2007:794–800.
- 【32】 Chih-Chung Chang, Ching-Hsien Lai , Cheng-Min Yang, Yuan-Ching Chiang, Sih-Li Chen, Thermal performance enhancement of a periodic total heat exchanger using energy-storage material, *Energy and Buildings* 67 (2013) 579–586.
- 【33】 M. Goldworthy, S.D. White. Limiting performance mechanisms in desiccant wheel dehumidification. *Applied Thermal Engineering* 44 (2012) 21-28.
- 【34】 A. Ramzy K., R. Kadoli, T.P. Ashok Babu, Improved utilization of desiccant material in packed bed dehumidifier using composite particles, *Renewable Energy* 36 (2011) 732-742.

- 【35】 A.E. Kabeel, Adsorption–desorption operations of multilayer desiccant packed bed for dehumidification, *Renewable Energy* 34 (2009) 255–265.
- 【36】 A.E. Kabeel, Solar powered air conditioning system using rotary honeycomb desiccant wheel, *Renewable Energy* 32 (2007) 1842–1857.
- 【37】 H. Inaba, T. Kida, A. Horibe, M. Kaneda, Sorption characteristics of honeycombtype sorption element composed of organic sorbent, *JSME International Journal Series B* 45 (2002) 183–191.
- 【38】 A. Horibe, S. Husain, H. Inaba, N. Haruki, Sorption characteristics of organic powder sorption material in fluidized bed with a cooling pipe, , *Journal of Thermal Science and Technology* 3 (2008) 207–218.
- 【39】 A. Horibe, Sukmawaty, N. Haruki, D. Hiraishi, Sorption–desorption operations on two connected fluidized bed using organic sorbent powder, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 65 (2013) 817-825.
- 【40】 Y. Zhao, T.S. Ge, Y.J. Dai, R.Z. Wang ,Experimental investigation on a desiccant dehumidification unit using fin-tube heat exchanger with silica gel coating. *Applied Thermal Engineering* 63 (2014) 52-58.
- 【41】 N. Enteriaa, K. Mizutania, Y. Monmab, T.Akisakab, N. Okazakib, Experimental investigation on a desiccant dehumidification unit using fin-tube heat exchanger with silica gel coating, *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 243-257.
- 【42】 Angrisani G, Roselli C, Sasso M. Effect of rotational speed on the performances of a desiccant wheel. *Appl Energy* 104 (2013) 268–75.
- 【43】 F. Pitié, C.Y. Zhao, J. Baeyens, J. Degreève, H.L. Zhang. Circulating fluidized bed heat recovery/storage and its potential to use coated phase-change-material (PCM) particles. *Applied Energy* 109 (2013) 505–513.
- 【44】 Hyun-Seok Kim, Yohsuke Matsushita, Motohira Oomori, Tatsuro Harada, Jin Miyawaki, Seong-Ho Yoon, Isao Mochida. Fluidized bed drying of Loy Yang brown coal with variation of temperature, relative humidity, fluidization velocity and formulation of its drying rate. *Fuel* 105 (2013) 415–424.
- 【45】 Ahmed M. Hamed. Experimental investigation on the adsorption/desorption processes using solid desiccant in an inclined-fluidised bed. *Renewable Energy* 30 (2005) 1913-1921.
- 【46】 S. Misha, S. Mat, M.H. Ruslan, K. Sopian. Review of solid/liquid desiccant in

- the drying applications and its regeneration methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 4686–4707.
- 【47】 Ahmed M. Hamed, Walaa R. Abd El Rahman, S.H. El-Eman. Experimental study of the transient adsorption/desorption characteristics of silica gel particles in fluidised bed. *Energy* 35 (2010) 2468-2483.
 - 【48】 Francisco Fernández-Hernández, José M. Cejudo-López, Fernando Domínguez-Muñoz, Antonio Carrillo-Andrés. A new desiccant channel to be integrated in building facades, *Energy and Buildings* 86 (2015) 318–327.
 - 【49】 Nan Wang, Jiangfeng Zhang, Xiaohua Xia. Desiccant wheel thermal performance modeling for indoor humidity optimal control. *Applied Energy* 112 (2013) 999–1005.
 - 【50】 Y. Zhao, T.S. Ge, Y.J. Dai, R.Z. Wang. Experimental investigation on a desiccant dehumidification unit using fin-tube heat exchanger with silica gel coating. *Applied Thermal Engineering* 63 (2014) 52-58.
 - 【51】 Akihiko Horibe, Sukmawaty, Naoto Haruki, Daiki Hiraishi. Continuous Sorption and Desorption of Organic Sorbent Powder in Two Connected Fluidized beds. *Journal of Thermal Science and Technology* 7 (2012) 564-576.
 - 【52】 D. La, Y.J. Dai, Y. Li, R.Z. Wang, T.S. Ge. Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 130–147.
 - 【53】 Giovanni Angrisani, Alfonso Capozzoli, Francesco Minichiello, Carlo Roselli, Maurizio Sasso. Desiccant wheel regenerated by thermal energy from a microcogenerator: Experimental assessment of the performances. *Applied Energy* 88 (2011) 1354–1365.
 - 【54】 Yu Jiang, Tianshu Ge, Ruzhu Wang. Performance simulation of a joint solid desiccant heat pump and variable refrigerant flow air conditioning system in EnergyPlus. *Energy and Buildings* 65 (2013) 220–230.
 - 【55】 Khoudor Keniar, Kamel Ghali, Nesreen Ghaddar. Study of solar regenerated membrane desiccant system to control humidity and decrease energy consumption in office spaces. *Applied Energy* 138 (2015) 121–132.
 - 【56】 T.S. Ge, Y.J. Dai, Y. Li, R.Z. Wang. Simulation investigation on solar powered desiccant coated heat exchanger cooling system. *Applied Energy* 93 (2012) 532–540.

- 【57】 Rang Tu, Xiao-Hua Liu, Yi Jiang. Performance analysis of a new kind of heat pump-driven outdoor air processor using solid desiccant. *Renewable Energy* 57 (2013) 101-110.
- 【58】 D. La, Y.J. Dai, Y. Li, Z.Y. Tang, T.S. Ge, R.Z. Wang. An experimental investigation on the integration of two-stage dehumidification and regenerative evaporative cooling. *Applied Energy* 102 (2013) 1218–1228.
- 【59】 Rang Tu, Xiao-Hua Liu, Yi Jiang. Performance analysis of a two-stage desiccant cooling system. *Applied Energy* 113 (2014) 1562-1574.
- 【60】 Ying Sheng, Yufeng Zhang, Ge Zhang. Simulation and energy saving analysis of high temperature heat pump coupling to desiccant wheel air conditioning system. *Energy* 83 (2015) 583-596.
- 【61】 陳志杰,「結合熱泵之吸附除濕空調系統性能研究」,博士論文,台灣大學, 2013。