

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學科(三)

佳作

033005

空氣鳳梨的水之呼吸—利用 3D 列印技術探討空
氣鳳梨鱗片對於水氣收集之影響

學校名稱： 新竹市立光華國民中學

作者：	指導老師：
國二 楊可婕	潘禕凌
國二 張芸熏	

關鍵詞： 空氣鳳梨、GAB 模型、3D 列印

摘要

我們觀察到不同種類的空氣鳳梨葉面上鱗片形狀、高度及密度等方面，有著不同的差異，因此我們決定探討這些鱗片變化對於水氣吸收的影響。利用 Autodesk Fusion 軟體設計出形狀、密度都不相同的空氣鳳梨鱗片模型，以 3D 列印機製作模板，並模擬不同模板收集水氣的情況；得到的數據利用 GAB 模型公式，算出集水力、集水效率及有效集水表面積；發現基本單位構形為四邊形的模板，在平面及傾角為 45 度時，具有良好的有效集水表面積；基本構形為六邊形的模板，當傾角為 30 度時，有最大的有效集水表面積；而模板的基本單元愈密集，及與地面的夾角愈小，則有效集水表面積則愈大；綜合以上所述，我們將研究結果做出集水效力最佳的模板，希望能為增加水資源的方法盡一份心力。

壹、前言

一、研究動機

在一次偶然的情況下，我們在書中看見空氣鳳梨，當時我們想了解為什麼這種植物為什麼不需要在土壤或是水中，只需要定時澆水就可存活，我們便把它拿下並且拿去詢問老師，在老師的細心講解下，我們了解到空氣鳳梨是一種空氣植物，它們並不需依賴土壤或是水來成長。它可以從空氣中的水分中獲取所需的物質，這是因為它們表面覆蓋著許多微小的毛狀結構，這些結構能夠幫助吸收空氣中的水分和養分，我們認為這可以運用在土壤貧乏之地去收集水氣，因此我們對這種植物產生濃厚興趣。

二、研究目的

(一) 空氣鳳梨葉片觀察

1. 觀察空氣鳳梨鱗片形狀差異
2. 觀察空氣鳳梨鱗片圍繞氣孔形狀之差異

(二) 利用 GAB 模型探討不同 3D 列印鱗片模型比較集水力之差異

1. 探討不同鱗片模板放置不同角度對集水力之影響
2. 探討不同鱗片模板密集度不同對集水力之影響
3. 探討不同鱗片模板排列形狀不同對收集水力之影響
4. 空氣鳳梨和 3D 列印模板集水力的比較

三、文獻探討

(一) 空氣鳳梨的吸附力

在 2002 年 Luigi Brighigna 教授利用兩種空氣鳳梨，主要的實驗方法是利用 GC／MS 氣相色譜質譜儀來測定殘留在這兩種植物上的 PAHs 量，並且與儀器所記錄的雨量及懸浮微粒進行比較，結果顯示，空氣中的污染粒子的確會吸附在空氣鳳梨表面，甚至進到空氣鳳梨內部，附著於空氣鳳梨的污染物也的確與儀器監測的結果形成正相關（彭士桓，2017）。在另一個文獻中，提到其葉片具有減少懸浮微粒的能力，顯示其具有空氣淨化效果；上述能力

應與毛狀體結構有關，於是測量去毛後的吸附能力，得知毛狀體是影響吸附能力的關鍵。也有探討吸附微粒後植株與對照組的抗氧化能力，發現微粒會對空氣鳳梨造成氧化壓力並影響生理代謝（吳思儀、洪禎林，2023）。

（二）GAB 模型

Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) 模型是一種廣泛應用於描述材料水分吸附行為的理論模型，特別在食品科學、材料科學和環境工程領域中表現出顯著的應用價值。該模型由 Guggenheim、Anderson 和 de Boer 於 20 世紀中葉分別提出，並結合了 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 模型的單層吸附理論與多層吸附特性，成為研究水分吸附等溫線的重要工具。

GAB 模型的核心方程式為：

$$m = \frac{m_0 C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)}$$

其中， m 為材料的含水量 (g 水/g 乾物質)， m_0 為單層吸附量， C 為與單層吸附熱相關的常數， K 為與多層吸附熱相關的常數， a_w 為水活度 (相對濕度) (Anderson, Robert B., 1946)。這方程式能夠準確描述水分吸附等溫線，尤其是在相對濕度範圍從 0.05 到 0.9 時具有優異的擬合效果，超越了 BET 模型的局限性 (BET 通常適用於相對濕度 < 0.5 的情況)。

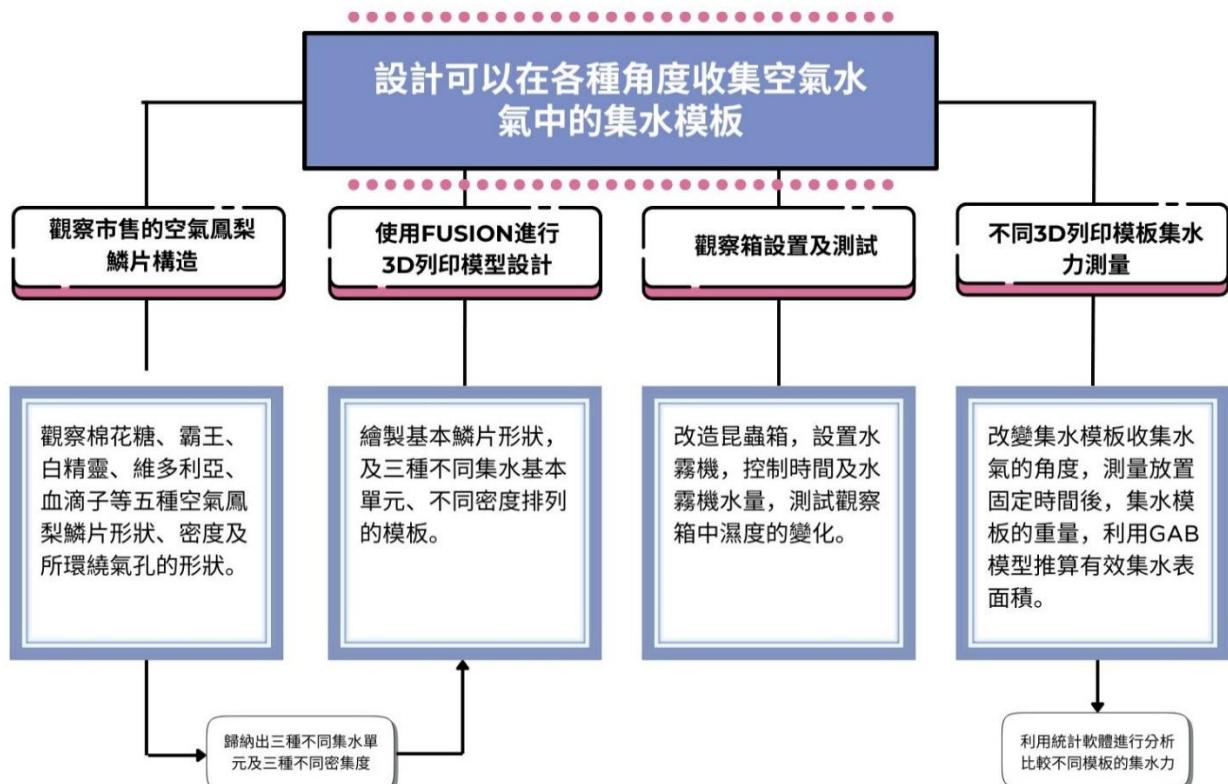
貳、設備及器材

空氣鳳梨品種	圖片	數量
棉花糖 (<i>Tillandsia Cotton Candy</i>)	 〈摘自蝦皮購物網站空氣鳳梨-純粹愛玩鳳網頁〉	1 株
霸王 (<i>Tillandsia xerographa</i>)	 〈摘自蝦皮購物網站空氣鳳梨-純粹愛玩鳳網頁〉	1 株
白精靈 (<i>Tillandsia ionantha White</i>)	 〈摘自蝦皮購物網站空氣鳳梨-純粹愛玩鳳網頁〉	1 株
維多利亞 (<i>Tillandsia Victoria</i>)	 〈摘自蝦皮購物網站空氣鳳梨-純粹愛玩鳳網頁〉	1 株
血滴子 (<i>Tillandsia espinosae</i>)	 〈摘自蝦皮購物網站空氣鳳梨-純粹愛玩鳳網頁〉	1 株

實驗器材	數量	實驗器材	數量
昆蟲箱	1 個	加濕器	1 台
溼度計	1 個	剪刀	1 把
解剖顯微鏡	1 台	溫度計	1 個
風扇	1 台	膠帶	1 捲
吹風機	1 台	塑膠板	1 張
廚房紙巾	數張	泡棉膠	1 捲
魔術黏土	1 包	培養皿	11 個
鑷子	1 個	量筒	1 個

紀錄設備	數量
手機	1 台
電腦	1 台
3D 列印機	1 台

參、研究方法與過程



一、 觀察空氣鳳梨葉片

(一) 觀察空氣鳳梨鱗片形狀差異

1. 從不同種類的空氣鳳梨中取下 1 片葉子，將葉子置於解剖顯微鏡下用特定倍率 (40X) 觀察，並以手機拍照記錄。
2. 利用電腦將照片放大後，觀察不同種類空氣鳳梨鱗片形狀的樣式，用 Autodesk Fusion 軟體畫出相似的鱗片模型。

(二) 觀察空氣鳳梨鱗片圍繞氣孔形狀之差異

1. 從不同種類的空氣鳳梨中取下 1 片葉子，利用膠帶去除葉片上較密集的鱗片，在將葉子置於解剖顯微鏡下，用特定倍率 (40X) 觀察鱗片圍繞氣孔的形狀，並以手機拍照記錄。
2. 利用電腦將照片放大後，觀察不同種類空氣鳳梨鱗片圍繞氣孔形狀，用 Autodesk Fusion 軟體畫出相似的鱗片模型。

Fusion 軟體將已畫好的鱗片模型，以四邊形、五邊形及六邊形排列成基本單元。

3. 將以四邊形、五邊形及六邊形的基本單元，以 3*3、5*5 及 7*7 的排列方式製作集水模板。
4. 將以上的模板利用 3D 列印機列印，仿空氣鳳梨鱗片的集水模板即製作完成(如圖八)。

二、 觀察箱設計

- (一) 改裝舊有的昆蟲觀察箱，加入溼度計及溫度計，並將箱頂的透氣孔以波浪板封死，確保水氣不會由此散逸。
- (二) 將昆蟲箱的開口，以波浪板封閉後開一小孔，方便放置水霧產生器的電源線，並製作一活動的門，方便器材的拿取，設計圖如圖九，實景圖如圖十。
- (三) 觀察箱內放置一活動塑膠板，用以調整角度使模板可以與地面形成各種不同夾角，以收集空氣中的水氣。

三、 利用不同 3D 列印鱗片模型比較集水力之差異

- (一) 探討鱗片模型排列形狀不同對收集水力之影響
 1. 利用不同形狀（長方形、五邊形與六邊形）所構成的基本單元 3D 列印模板，秤重並記錄初始重量。
 2. 在加濕器內加入 30 毫升的水，並將加濕器及放在培養皿上的模型，置入密閉的觀察箱之中（如圖一），記錄箱內的濕度及溫度。
 3. 將加濕器開啟並計時 20 分鐘，並關閉箱門，20 分鐘之後，用鑷子將模板分別拿出，用紙巾吸乾模板背面的水氣（如圖七）。
 4. 使用電子秤測量模板重量，並加以記錄及計算重量前後的差異。
 5. 利用模板前後重量差/模板重量，即得到每片模板集水力的數值。
- (二) 探討鱗片模型密集度不同對集水力之影響

1. 將不同密集度的 3D 列印模板 (3*3、5*5、7*7)，秤重並記錄初始重量。
2. 在加濕器內加入 30 毫升的水，並將加濕器及放在培養皿上的模型，置入密閉的觀察箱之中（如圖一），記錄箱內的濕度及溫度。
3. 將加濕器開啟並計時 20 分鐘，並關閉箱門，20 分鐘之後，用鑷子將模板分別拿出，用紙巾吸乾模板背面的水氣（如圖七）。
4. 使用電子秤測量模板重量，並加以記錄及計算重量前後的差異。
5. 利用模板前後重量差/模板重量，即得到每片模板集水力的數值。

(三) 探討不同鱗片模型放置不同角度對集水力之影響

1. 將不同形狀及密集度的 3D 列印模板，秤重並記錄初始重量。
2. 再觀察箱中置入一塑膠板，使其與箱底呈現 30 度的夾角，靠放在箱壁上。
3. 在加濕器內加入 30 毫升的水，將加濕器及放在培養皿上的模型放在塑膠板上，置入密閉的觀察箱之中（如圖三），記錄箱內的濕度及溫度。
4. 將加濕器開啟並計時 20 分鐘，並關閉箱門，20 分鐘之後，用鑷子將模板分別拿出，用紙巾吸乾模板背面的水氣（如圖七）。
5. 使用電子秤測量模板重量，並加以記錄及計算重量前後的差異。
6. 利用模板前後重量差/模板重量，即得到每片模板集水力的數值。
7. 將置於培養皿中的模板，利用塑膠板調整不同角度使其呈 45 度、60 度及 90 度夾角(如圖五)，重複步驟 3-6。

(四) 探討兩種空氣鳳梨的集水力

1. 取棉花糖 (*Tillandsia Cotton Candy*) 及白精靈 (*Tillandsia ionantha White*) 的葉片各一片，秤重並記錄初始重量。
2. 在加濕器內加入 30 毫升的水，並將加濕器及放在培養皿上的模型，置入密閉的觀察箱之中（如圖一），記錄箱內的濕度及溫度。
3. 將加濕器開啟並計時 20 分鐘，並關閉箱門，20 分鐘之後，用鑷子將葉片分別拿出，使用電子秤測量葉子重量，並加以記錄及計算重量前後的差異。

5. 利用葉子前後重量差/葉片重量，即得到每片葉子集水力的數值。



圖一 觀察箱內物件配置圖

〈以上照片為自行拍攝〉



圖二 觀察箱內加濕器開啟運作圖

〈以上照片為自行拍攝〉



圖三 觀察箱內加入塑膠板後物件配置圖

〈以上照片為自行拍攝〉



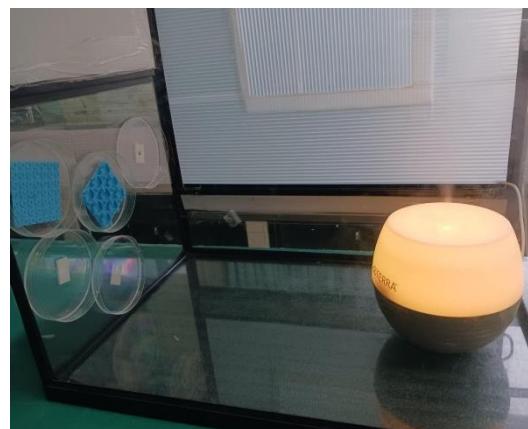
圖四 觀察箱內加入塑膠板後加濕器運作圖

〈以上照片為自行拍攝〉



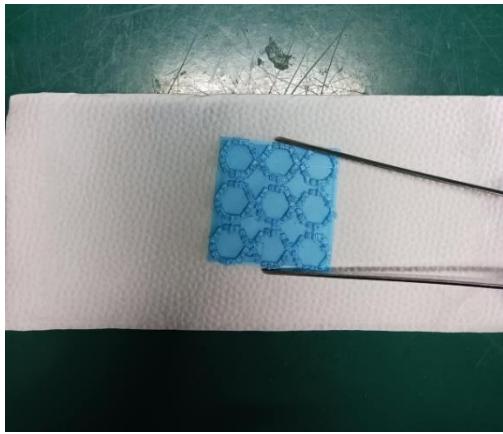
圖五 模板黏於觀察箱後物件配置圖

〈以上照片為自行拍攝〉

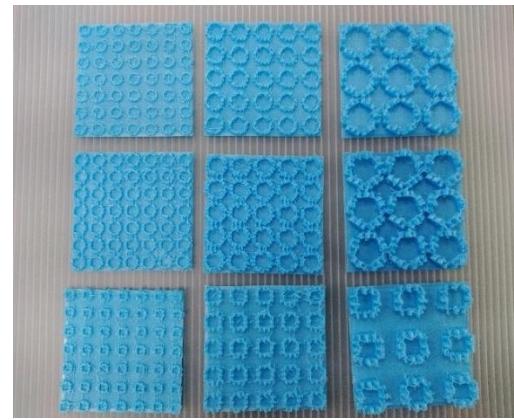


圖六 模板黏於觀察箱後加濕器開啟運作圖

〈以上照片為自行拍攝〉



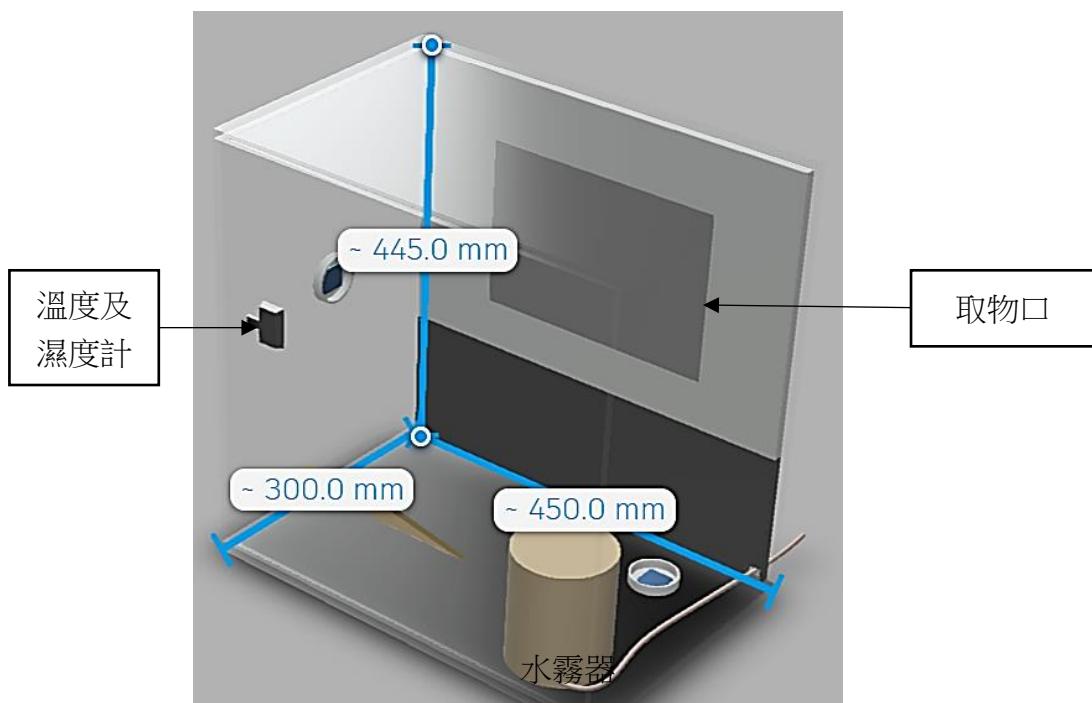
圖七 擦拭模板背面多餘水氣圖



圖八 3D 列印集水器模板

〈以上照片為自行拍攝〉

〈以上照片為自行拍攝〉



圖九 觀察箱設計圖〈以上圖表為自行製作〉



圖十 觀察箱實景圖

〈以上照片為自行拍攝〉

肆、研究結果

一、觀察空氣鳳梨鱗片形狀與氣孔形狀差異

(一) 棉花糖 (*Tillandsia Cotton Candy*)：鱗片圍繞著呈現近似圓形的凹洞生長，它的鱗片生長十分密集，樣貌尖且細短。(如圖十一、十二)



圖十一 棉花糖 (*Tillandsia Cotton Candy*) 鱗片形狀
〈以上照片為自行拍攝〉



圖十二 棉花糖 (*Tillandsia Cotton Candy*) 鱗片圍繞氣孔形狀
〈以上照片為自行拍攝〉

(二) 白精靈 (*Tillandsia ionantha White*)：細毛沿著近似五邊形的凹洞生長，而鱗片和凹洞的分布數量較少，但是鱗片的長度看起來較長，因此利用膠帶除去鱗片後，凹洞反而變得不明顯。(如圖十三、十四)



圖十三 白精靈 (*Tillandsia ionantha White*) 鱗片形狀
〈以上照片為自行拍攝〉



圖十四 白精靈 (*Tillandsia ionantha White*) 鱗片圍繞氣孔形狀
〈以上照片為自行拍攝〉

(三) 維多利亞 (*Tillandsia Victoria*)：鱗片沿著近似六邊形的凹洞生長，且分布的密度介於棉花糖及白精靈中間，鱗片較棉花糖來得稀疏，但是同樣具有較長的鱗片。(如圖十五、十六)



圖十五 維多利亞 (*Tillandsia Victoria*) 鱗片形狀
〈以上照片為自行拍攝〉



圖十六 維多利亞 (*Tillandsia Victoria*)
鱗片圍繞氣孔形狀
〈以上照片為自行拍攝〉

(四) 血滴子 (*Tillandsia espinosae*) : 鱗片沿著圓形的凹洞生長，鱗片生長密集，與棉花糖相同，但是鱗片的長度較棉花糖來得短。(如圖十七、十八)



圖十七 血滴子 (*Tillandsia espinosae*) 鱗
片形狀
〈以上照片為自行拍攝〉



圖十八 血滴子 (*Tillandsia espinosae*) 鱗
片圍繞氣孔形狀
〈以上照片為自行拍攝〉

(五) 霸王 (*Tillandsia xerographa*) : 鱗片沿著近似圓形的凹洞生長，鱗片分布十分密集與棉花糖相同，但鱗片長度較短與血滴子較為相近。(如圖十九、二十)



圖十九 霸王 (*Tillandsia xerographica*) 鱗片
形狀

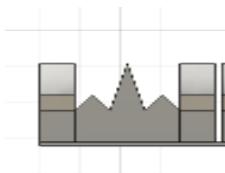
〈以上照片為自行拍攝〉



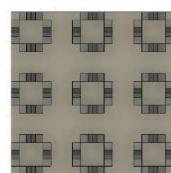
圖二十 霸王 (*Tillandsia xerographica*) 鱗
片圍繞氣孔形狀

〈以上照片為自行拍攝〉

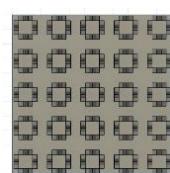
(六) 綜合以上觀察，我們利用 Autodesk Fusion 軟體模擬出空氣鳳梨鱗片的基本單元（如圖十九），再利用這個基本單元去圍出四邊形、五邊形及六邊形等不同形狀的集水單元，接著將不同形狀的集水單元，在相近面積的模板上以 $3*3$ 、 $5*5$ 、 $7*7$ 來排列，總共做出 9 種模板（如圖二十一～圖三十）進行集水能力的測試。



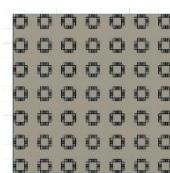
圖二十一 鱗片基
本單元圖



圖二十二 四邊形
 $3*3$ 模板



圖二十三 四邊形
 $5*5$ 模板



圖二十四 四邊形
 $7*7$ 模板



圖二十五 五邊形
 $3*3$ 模板



圖二十六 五邊形
 $5*5$ 模板



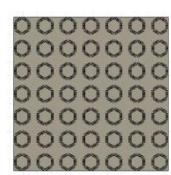
圖二十七 五邊形
 $7*7$ 模板



圖二十八 六邊形
 $3*3$ 模板



圖二十九 六邊形
 $5*5$ 模板



圖三十 六邊形 $7*7$
模板

〈圖二十一至圖三十皆自行繪製〉

二、利用不同 3D 列印鱗片模型比較集水力之差異

(一) 以 GAB 模型推算不同模板的吸水力、吸水速率及有效集水表面積

1. 吸水力 ($m_{\text{increment}}$) 及吸水速率：以四邊形 3*3 模板放置於平面為例，平均初重為 4.4233g，平均末重為 4.464g，測量時間為 20 分鐘

$$m_{\text{increment}} = \frac{\text{吸附水重}}{\text{原始重量}} \quad \text{吸水速率} = \frac{m_{\text{increment}}}{20}$$

則四邊形 3*3 模板在 0 度平面上所測得的 $m_{\text{increment}} \doteq 0.00435 \text{ g/g}$ ，集水速率 $\doteq 0.0002175 \text{ g/g-min}$ 。

2. m_0 的計算：我們因為受實驗設備的限制，無法固定箱內的濕度，找出單點的平衡集水量，因此我們在 20 分鐘內，固定將濕度由 42% 上升到 82%，將常數 C 設為 10，K 設為 0.9，和一般文獻所使用的值相同，藉此求出 m_0 的值。計算過程如下：

$$m = \frac{m_0 CK a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + CK a_w)}$$
$$m_{\text{increment}} = m(20) - m(0)$$
$$a_w = 0.42 \text{ (初始)} : m(0) = 1.38m_0$$
$$a_w = 0.82 \text{ (最終)} : m(20) = 3.686m_0$$
$$\text{增量} : m(20) - m(0) = 2.306m_0$$
$$\text{假設 } C = 10, K = 0.9.$$
$$m_0 = \frac{m_{\text{increment}}}{2.306}$$

則四邊形 3*3 模板在 0 度平面上，所計算出來的 $m_0 \doteq 0.001886 \text{ g/g}$

3. 有效集水表面積：對於任意 m_0 ，表面積公式為

$$S = 3.55 \times 10^3 \cdot m_0$$

則四邊形 3*3 模板在 0 度平面上，所計算出來的有效集水表面積為 $8.22 \pm 5.07 \text{ m}^2/\text{g}$ ，利用以上推導步驟依序算出其他模板及空氣鳳梨的集水力、集水速率及有效集水表面積，將其數據整理於表一、表二、表三、表四及表五。

表一 在 0 度平面以 GAB 模型模擬下各種不同模板的集水力比較表

形狀與密度	初重 (g)	吸附水重 (g)	集水力 (g/g)	集水速率 (g/g·min)	有效集水表 面積 (m ² /g)
四邊形 3*3	4.442 ± 0.002	0.0193 ± 0.0117	0.00435 ± 0.0027	0.000218 ± 0.000135	8.22 ± 5.07
四邊形 5*5	3.239 ± 0.002	0.0223 ± 0.0126	0.00689 ± 0.0039	0.000344 ± 0.000195	13.02 ± 7.37
四邊形 7*7	2.551 ± 0.003	0.0283 ± 0.0184	0.01110 ± 0.0072	0.000555 ± 0.000360	20.97 ± 13.61
五邊形 3*3	5.384 ± 0.003	0.0213 ± 0.0082	0.00396 ± 0.0015	0.000198 ± 0.000075	7.48 ± 2.84
五邊形 5*5	3.988 ± 0.003	0.0177 ± 0.0063	0.00444 ± 0.0016	0.000222 ± 0.000080	8.39 ± 3.02
五邊形 7*7	2.715 ± 0.003	0.0203 ± 0.0065	0.00748 ± 0.0024	0.000374 ± 0.000120	14.14 ± 4.53
六邊形 3*3	4.274 ± 0.006	0.0377 ± 0.0270	0.00882 ± 0.0063	0.000441 ± 0.000315	16.66 ± 11.91
六邊形 5*5	3.062 ± 0.004	0.0323 ± 0.0172	0.01055 ± 0.0056	0.000528 ± 0.000280	19.94 ± 10.59
六邊形 7*7	2.179 ± 0.006	0.0137 ± 0.0070	0.00628 ± 0.0032	0.000314 ± 0.000160	11.87 ± 6.05

註：數據基於 GAB 模型計算，濕度範圍 42%-82% ($aw_{initial} = 0.42$, $aw_{final} = 0.82$), $C = 10$, $K = 0.9$ ，時間為 20 分鐘。標準差基於三次測量計算 ($n = 3$)。

表二 在傾斜 30 度平面以 GAB 模型模擬下各種不同模板的集水力比較表

形狀與密度	初重 (g)	吸附水重 (g)	集水力 (g/g)	集水速率 (g/g-min)	有效表面積 (m ² /g)
四邊形 3*3	4.438 ± 0.006	0.0117 ±	0.00264 ±	0.000132 ±	4.98 ± 0.99
		0.0022	0.00052	0.000026	
四邊形 5*5	3.236 ± 0.002	0.0167 ±	0.00515 ±	0.000258 ±	9.73 ± 4.20
		0.0074	0.00222	0.000111	
四邊形 7*7	2.548 ± 0.003	0.0117 ±	0.00458 ±	0.000229 ±	8.64 ± 0.86
		0.0012	0.00046	0.000023	
五邊形 3*3	5.380 ± 0.000	0.0177 ±	0.00328 ±	0.000164 ±	6.20 ± 1.13
		0.0032	0.00060	0.000030	
五邊形 5*5	3.983 ± 0.002	0.0177 ±	0.00444 ±	0.000222 ±	8.38 ± 1.79
		0.0035	0.00094	0.000047	
五邊形 7*7	2.708 ± 0.001	0.0130 ±	0.00480 ±	0.000240 ±	9.06 ± 2.09
		0.0030	0.00111	0.000055	
六邊形 3*3	4.249 ± 0.004	0.0190 ±	0.00447 ±	0.000224 ±	8.44 ± 0.75
		0.0017	0.00040	0.000020	
六邊形 5*5	3.051 ± 0.001	0.0190 ±	0.00623 ±	0.000311 ±	11.76 ± 1.24
		0.0020	0.00066	0.000033	
六邊形 7*7	2.126 ± 0.006	0.0200 ±	0.00941 ±	0.000470 ±	17.77 ± 2.69
		0.0030	0.00142	0.000071	

註：數據基於 GAB 模型計算，濕度範圍 42%-82% ($aw_{initial} = 0.42$, $aw_{final} = 0.82$) , $C = 10$, $K = 0.9$, 時間為 20 分鐘。標準差基於三次測量計算 ($n = 3$)。

表三 在傾斜 45 度平面以 GAB 模型模擬下各種不同模板的集水力比較表

形狀與密度	初重 (g)	吸附水重 (g)	集水力 (g/g)	集水速率 (g/g·min)	有效集水表面積 (m ² /g)
四邊形 3*3	4.446 ± 0.001	0.0183 ± 0.0021	0.00412 ± 0.00047	0.000206 ± 0.000024	7.79 ± 0.89
四邊形 5*5	3.245 ± 0.001	0.0123 ± 0.0050	0.00379 ± 0.00154	0.000190 ± 0.000077	7.16 ± 2.91
四邊形 7*7	2.554 ± 0.001	0.0170 ± 0.0030	0.00666 ± 0.00117	0.000333 ± 0.000059	12.59 ± 2.21
五邊形 3*3	5.395 ± 0.006	0.0137 ± 0.0045	0.00254 ± 0.00083	0.000127 ± 0.000042	4.80 ± 1.57
五邊形 5*5	3.988 ± 0.003	0.0113 ± 0.0035	0.00283 ± 0.00088	0.000142 ± 0.000044	5.35 ± 1.66
五邊形 7*7	2.730 ± 0.008	0.0103 ± 0.0031	0.00377 ± 0.00113	0.000189 ± 0.000057	7.12 ± 2.13
六邊形 3*3	4.270 ± 0.003	0.0117 ± 0.0020	0.00274 ± 0.00047	0.000137 ± 0.000024	5.18 ± 0.89
六邊形 5*5	3.061 ± 0.001	0.0133 ± 0.0067	0.00434 ± 0.00219	0.000217 ± 0.000109	8.20 ± 4.14
六邊形 7*7	2.176 ± 0.004	0.0093 ± 0.0025	0.00427 ± 0.00115	0.000214 ± 0.000058	8.07 ± 2.17

註：數據基於 GAB 模型計算，濕度範圍 42%-82% ($aw_{initial} = 0.42$, $aw_{final} = 0.82$) , $C = 10$, $K = 0.9$, 時間為 20 分鐘。標準差基於三次測量計算 ($n = 3$)。

表四 在傾斜 60 度平面以 GAB 模型模擬下各種不同模板的集水力比較表

形狀與密度	初重 (g)	吸附水重 (g)	集水力 (g/g)	集水速率 (g/g·min)	有效集水表 面積 (m ² /g)
四邊形 3*3	4.432 ± 0.003	0.0080 ±	0.00181 ±	0.000090 ±	3.41 ± 0.43
		0.0010	0.00023	0.000011	
四邊形 5*5	3.233 ± 0.002	0.0090 ±	0.00278 ±	0.000139 ±	5.26 ± 1.53
		0.0026	0.00081	0.000041	
四邊形 7*7	2.547 ± 0.002	0.0073 ±	0.00288 ±	0.000144 ±	5.43 ± 1.85
		0.0025	0.00098	0.000049	
五邊形 3*3	5.379 ± 0.001	0.0077 ±	0.00143 ±	0.000071 ±	2.69 ± 0.72
		0.0021	0.00038	0.000019	
五邊形 5*5	3.978 ± 0.001	0.0087 ±	0.00218 ±	0.000109 ±	4.11 ± 2.77
		0.0059	0.00147	0.000073	
五邊形 7*7	2.707 ± 0.001	0.0083 ±	0.00308 ±	0.000154 ±	5.81 ± 2.13
		0.0031	0.00113	0.000056	
六邊形 3*3	4.248 ± 0.002	0.0083 ±	0.00196 ±	0.000098 ±	3.70 ± 2.00
		0.0045	0.00106	0.000053	
六邊形 5*5	3.051 ± 0.001	0.0077 ±	0.00251 ±	0.000126 ±	4.75 ± 0.36
		0.0006	0.00019	0.000009	
六邊形 7*7	2.126 ± 0.002	0.0067 ±	0.00314 ±	0.000157 ±	5.92 ± 2.81
		0.0032	0.00149	0.000074	

註：數據基於 GAB 模型計算，濕度範圍 42%-82% ($aw_{initial} = 0.42$, $aw_{final} = 0.82$) , $C = 10$, $K = 0.9$, 時間為 20 分鐘。標準差基於三次測量計算 ($n = 3$)。

表五 在傾斜 90 度平面以 GAB 模型模擬下各種不同模板的集水力比較表

形狀與密度	初重 (g)	吸附水重 (g)	集水力 (g/g)	集水速率 (g/g·min)	有效集水表面積 (m ² /g)
四邊形 3*3	4.448 ± 0.000	0.0027 ±	0.000599 ±	0.0000300 ±	1.40 ± 0.64
		0.0005	0.000122	0.0000061	
四邊形 5*5	3.246 ± 0.001	0.0027 ±	0.000910 ±	0.0000455 ±	1.57 ± 0.70
		0.0012	0.000790	0.0000395	
四邊形 7*7	2.553 ± 0.000	0.0057 ±	0.00222 ±	0.000111 ±	3.48 ± 1.85
		0.0012	0.00045	0.000023	
五邊形 3*3	5.382 ± 0.003	0.0033 ±	0.00061 ±	0.000031 ±	1.15 ± 0.57
		0.0016	0.00030	0.000015	
五邊形 5*5	3.983 ± 0.001	0.0057 ±	0.00143 ±	0.000072 ±	2.70 ± 1.09
		0.0023	0.00058	0.000029	
五邊形 7*7	2.711 ± 0.002	0.0057 ±	0.00210 ±	0.000105 ±	3.97 ± 1.40
		0.0020	0.00074	0.000037	
六邊形 3*3	4.270 ± 0.002	0.0043 ±	0.00101 ±	0.000051 ±	1.91 ± 0.79
		0.0018	0.00042	0.000021	
六邊形 5*5	3.061 ± 0.001	0.0047 ±	0.00154 ±	0.000077 ±	2.91 ± 0.06
		0.0001	0.00003	0.000002	
六邊形 7*7	2.179 ± 0.001	0.0053 ±	0.00243 ±	0.000122 ±	4.59 ± 0.87
		0.0010	0.00046	0.000023	

註：數據基於 GAB 模型計算，濕度範圍 42%-82% ($aw_{initial} = 0.42$, $aw_{final} = 0.82$), $C = 10$, $K = 0.9$ ，時間為 20 分鐘。標準差基於三次測量計算 ($n = 3$)。

表六 以 GAB 模型模擬下不同種類空氣鳳梨的集水力比較表

空氣鳳梨種類	初重 (g)	吸附水重 (g)	集水力 (g/g)	集水速率 (g/g·min)	有效集水表面積 (m ² /g)
小精靈	0.184 ± 0.033	0.0050 ±	0.0279 ±	0.00140 ±	52.74 ±
		0.0017	0.0117	0.00059	22.17
棉花糖	0.145 ± 0.001	0.0030 ±	0.0208 ±	0.00104 ±	39.31 ±
		0.0017	0.0119	0.00058	22.50

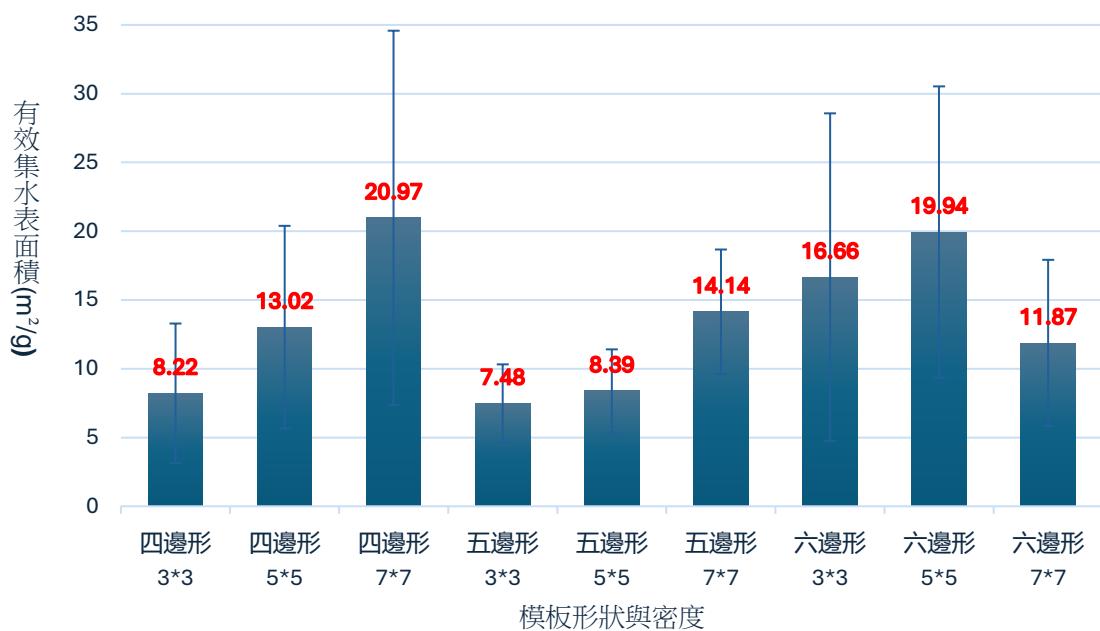
註：數據基於 GAB 模型計算，濕度範圍 42%-82% ($aw_{initial} = 0.42$, $aw_{final} = 0.82$), $C = 10$, $K = 0.9$ ，時間為 20 分鐘。標準差基於三次測量計算 ($n = 3$)。

(二) 探討不同鱗片模板放置不同角度對集水力之影響

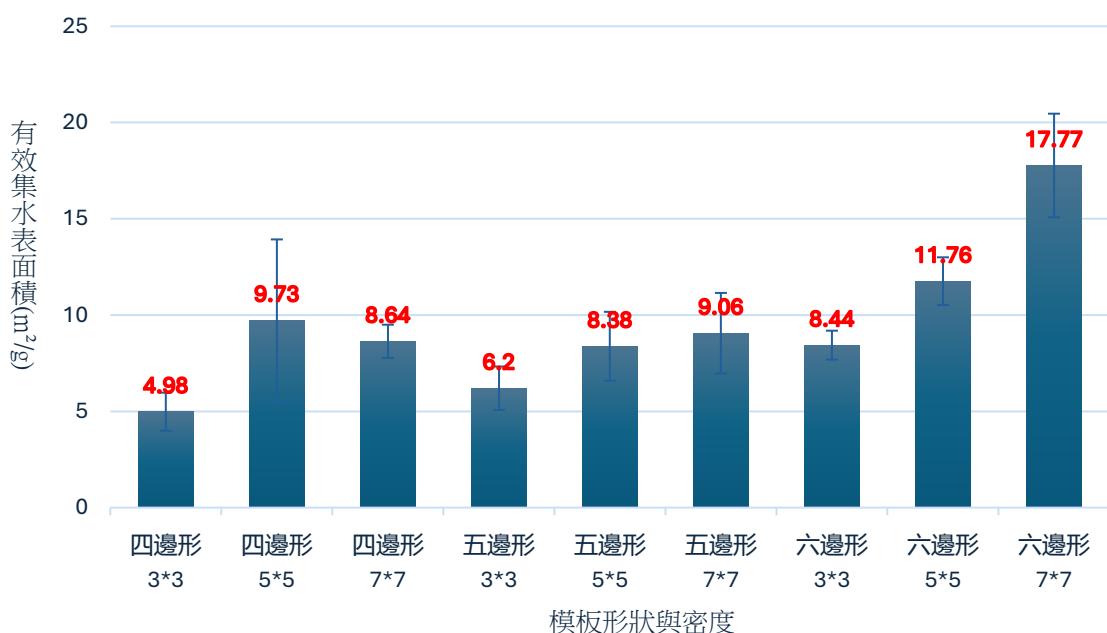
1. 由表一到表五的結果我們可以發現，在不同角度的放置下，無論是哪一種模板，以平放來得最佳，其次是 30 度角，最差的則是 90 度角。
2. 五種不同放置角度下，若模板的基本單元密集度越高，則有效集水的表面積也會隨之增加。

(三) 探討不同鱗片模板密集度不同對集水力之影響

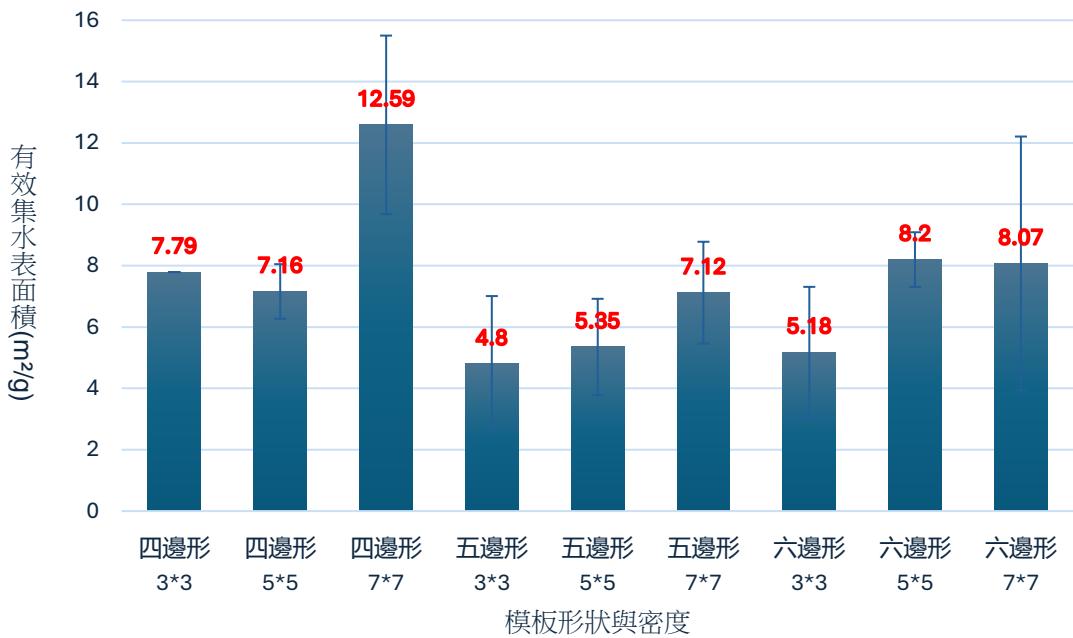
1. 當鱗片模板放置角度為 0 度時，我們將其有效集水表面積製作成長條圖，結果如圖三十一，當基本單位形狀為四邊形和五邊形時，皆是密集度為 7*7 的較佳，而在形狀為六邊形時，卻是 5*5 的較佳。
2. 當鱗片模板放置角度為 30 度時，我們將其有效集水表面積製作成長條圖，結果如圖三十二，在形狀為四邊形和五邊形時，密集度 7*7 和 5*5 的差異卻不大，但在形狀為六邊形時，卻是密集度為 7*7 的較佳，且都較其他密集度的模板效果更加突出。
3. 當鱗片模板放置角度為 45 度時，我們將其有效集水表面積製作成長條圖，結果如圖三十三，在形狀為四邊形和五邊形時，密集度為 7*7 的模板較佳，且都較其他密集度的模板效果更加突出，但在形狀為六邊形時，密集度 7*7 和 5*5 的模板差異卻不大。
4. 當鱗片模板放置角度為 60 度時，我們將其有效集水表面積製作成長條圖，結果如圖三十四，無論何種形狀，密集度為 7*7 模板集水的有效面積較佳，且都較其他密集度的模板效果更加突出，唯有在四邊形的模板效果較差。
5. 當鱗片模板放置角度為 90 度，我們將其有效集水表面積製作成長條圖，結果如圖三十五，無論鱗片排列形狀為何，皆是密集度 7*7 的較好。



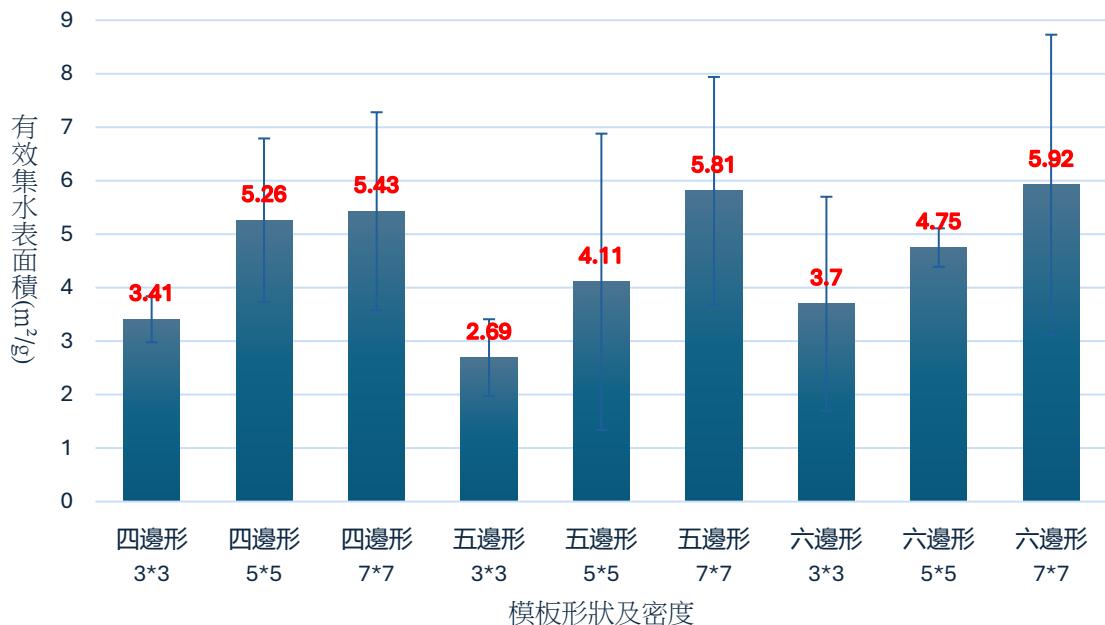
圖三十一 不同模板在平面的有效集水表面積圖



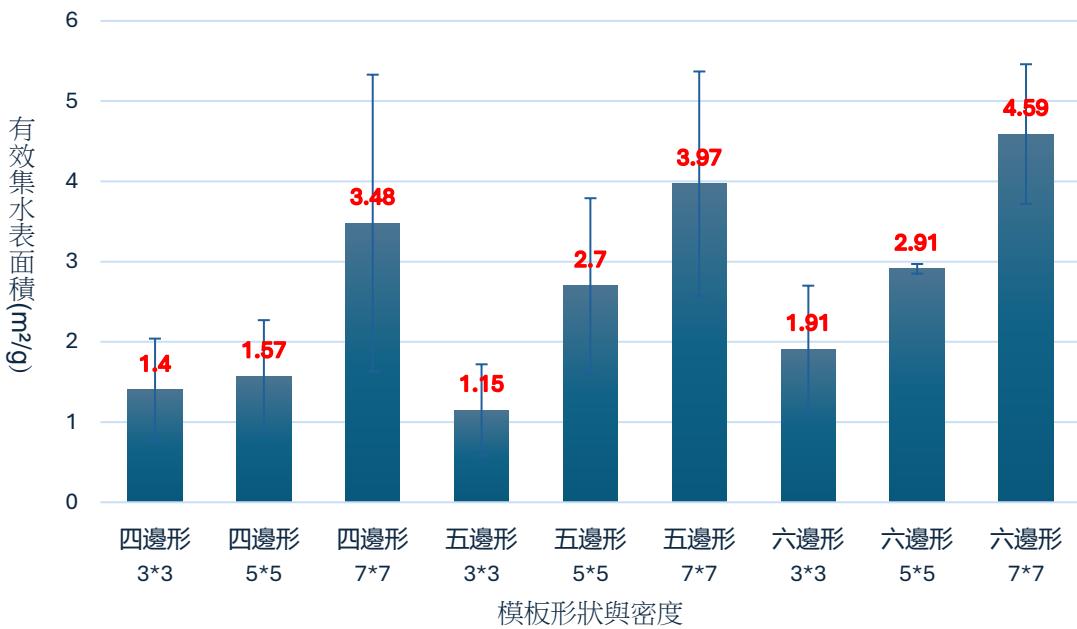
圖三十二 不同模板在傾斜 30 度平面的有效集水表面積圖



圖三十三 不同模板在傾斜 45 度平面的有效集水表面積圖



圖三十四 不同模板在傾斜 60 度平面有效集水表面積圖



圖三十五 不同模板在傾斜 90 度平面有效集水表面積圖

(四) 探討不同鱗片模板排列形狀不同對於集水力之影響

- 由圖三十一到圖三十五來看，我們可以發現，在平面擺放時，基本單位四邊形 7*7 的模板的有效集水表面積為最大，表示基本單位四邊形 7*7 的模板，集水力最佳。在不同的角度下，不同鱗片模版排列形狀，似乎有相對應的最佳角度；在 30 度時，以六邊形為最佳，而在 45 度時，則以四邊形為最佳；但隨著角度的增大，形狀的效應也隨之遞減，反而是密集度對於有效集水表面積影響更大。
- 為了證明我們的推測，我們利用統計軟體 SPSS，將以上數據進行三因子 ANOVA 分析，其結果如下表七。分析結果顯示，有效集水表面積隨角度增加從 0 度的 $13.41\text{ m}^2/\text{g}$ 降至 90 度的 $2.63\text{ m}^2/\text{g}$ ，呈顯著負相關 ($p < 0.001$)。最小集水單元形狀為六邊形的平均有效集水表面積最高 ($8.78\text{ m}^2/\text{g}$)，五邊形最低 ($6.09\text{ m}^2/\text{g}$)，呈現顯著相關 ($p = 0.001$)。模板密集度也會影響有效集水表面積，從 3*3 ($6.43\text{ m}^2/\text{g}$) 增至 7*7 ($9.88\text{ m}^2/\text{g}$) ($p < 0.001$)。然而，不同變因的交互效應均不顯著：角度×形狀 ($F = 1.06$, $p = 0.406$)、角度×密度 ($F = 0.07$, $p = 0.999$)、形狀×密度 ($F = 0.08$, $p = 0.989$)，三因子交互 ($F \approx 0$, $p \approx 1$) 也無效應，組內變異 ($SSW = 192.85$) 佔比低，反應由主效應主導。

表七 不同角度、形狀與密度對有效集水表面積 (m^2/g) 的三因子 ANOVA 分析結果

變異來源	離均差平方 和 (SS)	自由度 (DF)	均方和 (MS)	F (檢定)	P (顯著)
組間 (角度)	926.43	4	231.61	36.02	< 0.001
組間 (形狀)	108.97	2	54.49	8.47	0.001
組間 (密度)	159.87	2	79.94	12.43	< 0.001
組間 (角度×形狀)	54.32	8	6.79	1.06	0.406
組間 (角度×密度)	3.42	8	0.43	0.07	0.999
組間 (形狀×密度)	1.95	4	0.49	0.08	0.989
組間 (角度×形狀×密度)	0.00	16	0.00	-	-
組內	192.85	30	6.43		
全體	1282.57	44			

(五) 空氣鳳梨和 3D 列印模板集水力的比較

- 由表六來看，我們可以發現，空氣鳳梨棉花糖比白精靈收集到更多水氣，且這兩株植物的結果比所有模型的效率更佳，兩者的有效集水表面積都遠大於我們所設計出來的模板（棉花糖： $52.74\ m^2/g$ ，白精靈： $39.31\ m^2/g$ ）。
- 用白精靈和我們所做的模板比較，可以發現當形狀四邊形且密集度為 7*7 時，和白精靈的集水力最為接近，兩者有效集水表面積的差異為 $18.34\ m^2/g$ （四邊形 7*7： $20.97\ m^2/g$ ，白精靈： $39.31\ m^2/g$ ），較其他模板為佳。

伍、討論

一、觀察空氣鳳梨葉片

(一) 我們發現空氣鳳梨的鱗片因種類不同而長度也有所不同，且會出現長短參差不齊排列的情況，所以我們建立一個「山」的基本單元，藉以模仿此種結構；並試著調整 3D 列印模型的大小，使其達到機器所能列印的最小狀態。

(二) 空氣鳳梨鱗片包圍氣孔的方式，也因種類不同而有所不同，經我們觀察的結果，選取四邊形、五邊形及六邊形等排列方式，為模板上最小的集水單元，探討是否會因其形狀不同而有不同的集水力差異。

二、利用不同 3D 列印鱗片模板比較集水力之差異

(一) 探討不同鱗片模板放置不同角度對集水力之影響

無論是哪一種模板，都是以平行地板放置為最佳，推測這是因為水分垂直落下，較容易被平放的模板收集，且不會受到地心引力的影響而導致水分的流失；「山」形的結構也不會出現互相遮蔽的情形，進而增加有效集水的表面積。

(二) 探討鱗片模型排列形狀及密集度不同對於集水力之影響

1. 排列形狀的影響：

(1) 我們發現無論模板處在何種角度，六邊形的排列所得到的有效集水表面積，都優於其他兩種形狀，尤其是模板出現傾角時，形狀的影響更為明顯，在傾斜 90 度的狀態下，六邊形的最大有效集水面積，是其他形狀的 1.3 到 1.15 倍（四邊形： $3.48 \text{ m}^2/\text{g}$ 、五邊形： $3.97 \text{ m}^2/\text{g}$ 、六邊形： $4.59 \text{ m}^2/\text{g}$ ）。我們推測是因為六邊形構成的形狀，能夠在不同角度及不同密集度中，皆能使「山」形構造完整的暴露在水氣中，達到較好的集水效果，而其他形狀可能因為構造較難留住蓄積的水分，當模板形成較大的傾角時，這些集水構造所圍成的集水區，並無法留住水分，使得有效集水表面積縮小。

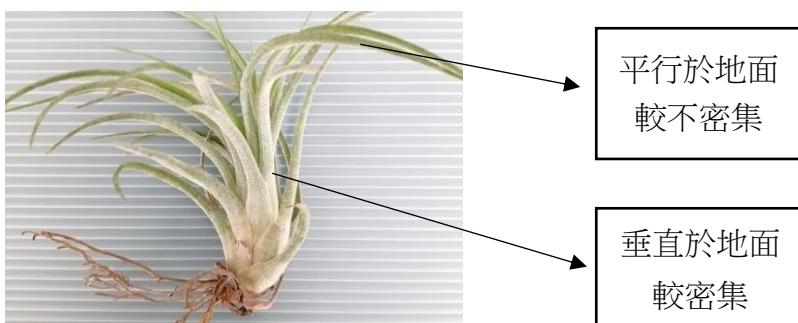
(2) 在平面擺放時，我們發現除了五邊形之外，四邊形及六邊形都有良好有效集水表面積，尤其是六邊形無論在何種密集度下，有效集水表面積都能接近或

超過 $10\text{m}^2/\text{g}$ ($3*3$: $16.66\text{ m}^2/\text{g}$ 、 $5*5$: $19.96\text{ m}^2/\text{g}$ 、 $7*7$: $11.86\text{ m}^2/\text{g}$)，但在排列密度高的情況下，四邊形 $7*7$ 的模板卻表現得比六邊形的模板好 ($20.97\text{ m}^2/\text{g} > 11.86\text{ m}^2/\text{g}$)，但綜觀以上各項結果，我們認為有可能是六邊形 $7*7$ 的模板在測量時出現誤差，才出現下降的情況，但還是需要更進一步的實驗才能證實。

(3) 在具有傾斜角度時，小角度的傾斜 (30 度內)，六邊形 $7*7$ 的模板表現較為突出 ($17.77\text{ m}^2/\text{g}$)，而在 30 到 45 度之間，卻是四邊形 $7*7$ 的模板表現最佳 ($12.59\text{ m}^2/\text{g}$)，當傾斜角度持續增大時，就沒有如此明顯的差距；因此我們推測，在小角度的傾斜範圍時，不同的傾角有適配的形狀，而當傾角增大時，密集度的影響大過於形狀的影響，使得形狀與傾角的適配度消失，所以在 ANOVA 的分析中才顯示交互作用不顯著，僅由單因子影響不同傾角的有效集水表面積。

2. 排列密度的影響：

我們發現當模板與地面的夾角愈大，基本單元的密集度影響有效集水表面積愈大，當角度來到 90 度時，無論何種形狀，集水有效表面積皆為 $3*3 < 5*5 < 7*7$ ，基本單元愈密集，有效的集水表面積愈大。我們推測因為在垂直的狀態，受到地心引力的影響，水分較不容易附著在模板上，但若基本單元較為密集，比較容易蓄積因地心引力下流的水分，我們和空氣鳳梨植栽(如圖三十六)對照後可發現，與地面垂直的葉片，鱗片排列較為密集，此空氣鳳梨鱗片的分布情形和我們的實驗結果相同。



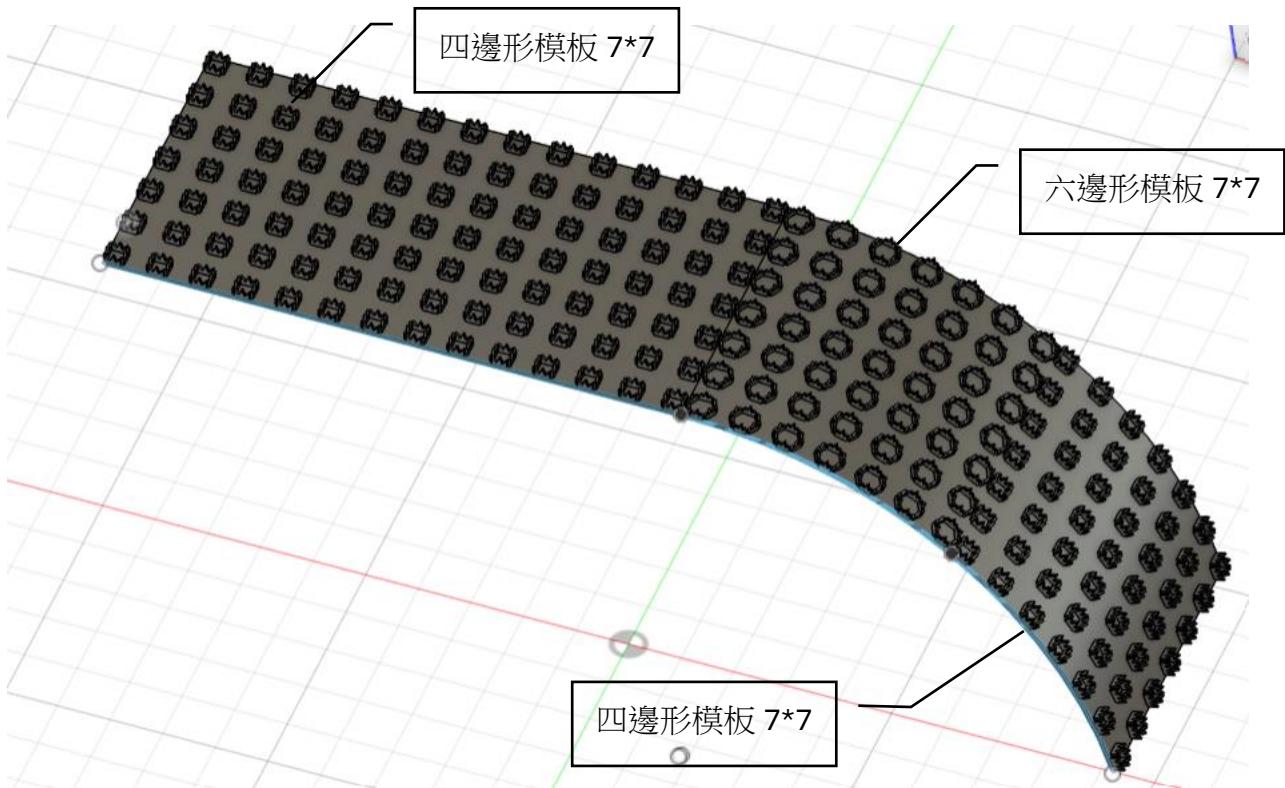
圖三十六 空氣鳳梨植株 (以上照片為自行拍攝)

三、 空氣鳳梨和 3D 列印模板集水力的比較

我們從實驗結果可以發現，空氣鳳梨和模板的數據結果還有一段距離，無法較空氣鳳梨的結果好。我們推測是因為我們使用的 3D 列印材料為 PLA，模型表面較為光滑不易收集水氣，而空氣鳳梨葉片表面布滿鱗片較為粗糙，和我們使用的材質相差許多；即使如此，有效集水表面積最佳的四邊形 7*7 的模板，和白精靈的有效集水表面積雖然還有一段距離，若未來有機會可以找出更加親水的材質，必能製造出更貼近空氣鳳梨集水效力的模板，應用於乾燥區域用以收集空氣中的水資源。

陸、結論

- 一、空氣鳳梨靠著葉片吸收水分和養分，各種品種空氣鳳梨的葉子都有明顯差異，氣孔形狀大致有圓形、四邊形、五邊形和六邊形，葉片彎曲角度不同，鱗片和氣孔密集度也有所不同，若葉片與地面角度愈接近垂直，鱗片的密集度則愈大。
- 二、在濕度大於 42%的環境中，只要具有突起的細小構造，皆能從空氣中凝聚水氣，無論是何種形狀或密集度的模板，都能從空氣中收集水氣。
- 三、模板的集水單元形狀、密集度與傾角決定模板的集水力的大小；當模板角度與地面夾角小於 30 度時，以六邊形的集水單元表現最好，當與地面夾角介於 30 度至 45 度之間時，則以四邊形集水單元表現最好；當角度逐漸增加，則需選擇排列密集的模板，才可收集較多水分，當模板為平行地面時，收集水氣的效率最高。而模板基本集水單元形狀為四邊形時，有效集水表面積較為穩定，提供良好的水氣凝結效果。
- 四、在我們所設計出來的模板中，以四邊形 7*7 的有效集水表面積為最大，但離空氣鳳梨的集水力仍有一段距離，若未來能以更親水的材料製造集水模板，或者使用更精密的 3D 列印機器列印出密集度更高或精細度更佳的模板，相信能夠製造出超越空氣鳳梨的集水力的模板。
- 五、綜合所有因素，我們認為可以將集水模板的基本單元在平面設計成四邊形，因為這種形狀在平面時具有良好的集水力，並且增加模板的長度以增加集水的表面積；在斜面上設計兩種形式，並使傾斜的角度，不超過 45 度；在較平緩的第一段，接上六邊形 7*7 的模板，隨著傾角變大時，則接上四邊形 7*7 的模板，將兩種模板加以組合，就能成為最大效率的集水裝置，收集多方向的水氣。未來更能將這個裝置與自動偵測系統結合，在不同的濕度下，利用不同型式的模板，自動調整不同角度，應用於降水稀少的區域，收集空氣中的水氣，就能多一個得到水源的途徑。最後成品模板如下圖：



圖三十七 最後成品模板設計圖〈以上圖片為自行繪製〉

柒、參考文獻資料

- 一、彭士桓(2017)。它才不是鳳梨！地表最強植物「空氣鳳梨」的歷史與應用。泛科學網站，2024年9月1日，取自：泛科學網站專欄文章網頁
- 二、吳思儀、洪禎林(2023)。中華民國第56屆中小學科學展覽會高級中等學校組植物學科。鳳言鳳語—空氣鳳梨毛狀體與吸收路徑探討，台灣科學教育館，取自：台灣科學教育館歷屆科展作品網頁
- 三、Anderson, Robert B. (1946). Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller Equation. American Chemical Society, 68(4), 686 - 691.

【評語】033005

1. 研究主題在以 3D 列印模型探討空氣鳳梨葉片之鱗片形態對吸收水氣之影響，以植物仿生概念的科學發想，具原創價值。
2. 有系統設計不同鱗片外型和排列方式進行加濕器的水氣收集，模擬測試最佳角度和組合應用。
3. 但由於 3D 列印模擬的材料特性與鱗片大小和空氣鳳梨植株葉片表面鱗片構造實體差異，可能影響實驗結果的擬真效果與數據代表性。
4. 建議可精進評估水氣收集效率的實驗步驟的和量測方法說明，並提出具體應用發展的可能構想。

作品海報

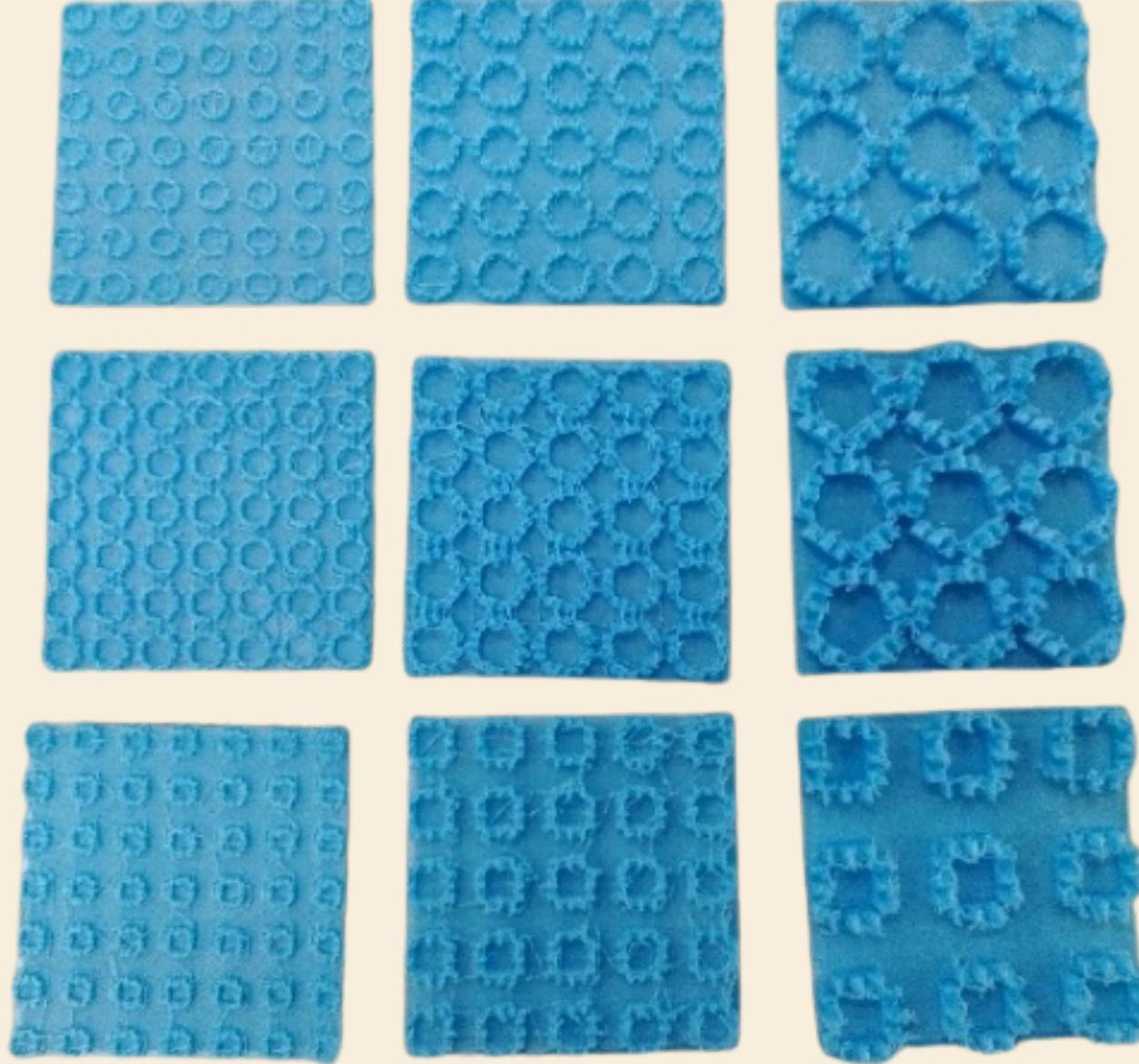
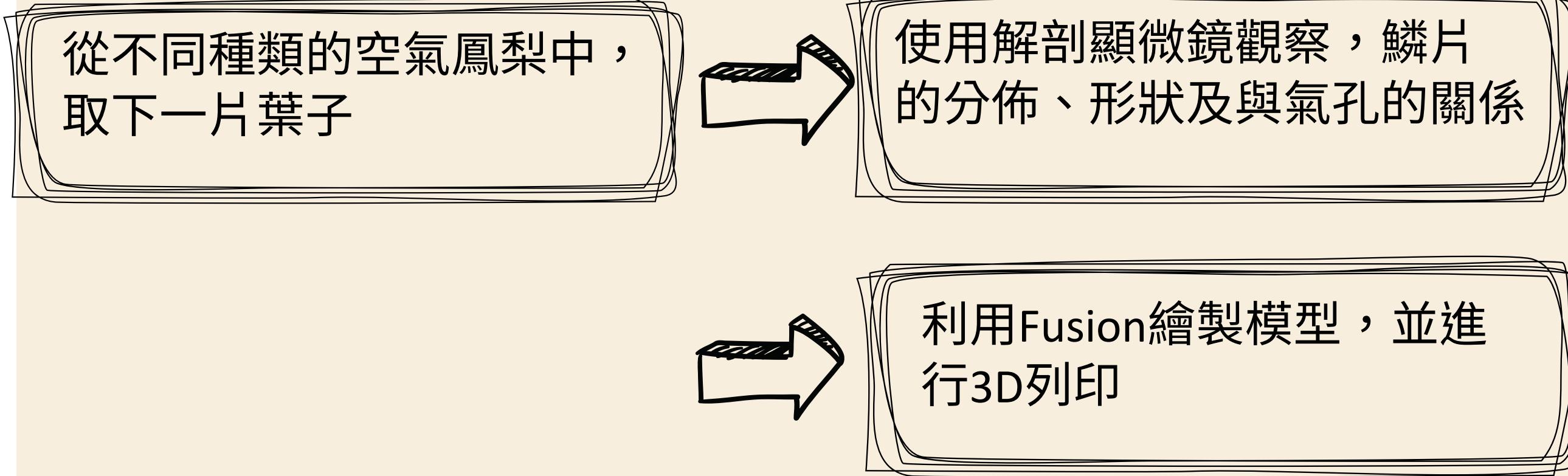
空氣鳳梨的水之呼吸—
利用 3D 列印技術探討空氣鳳
梨鱗片對於水氣收集之影響

摘要

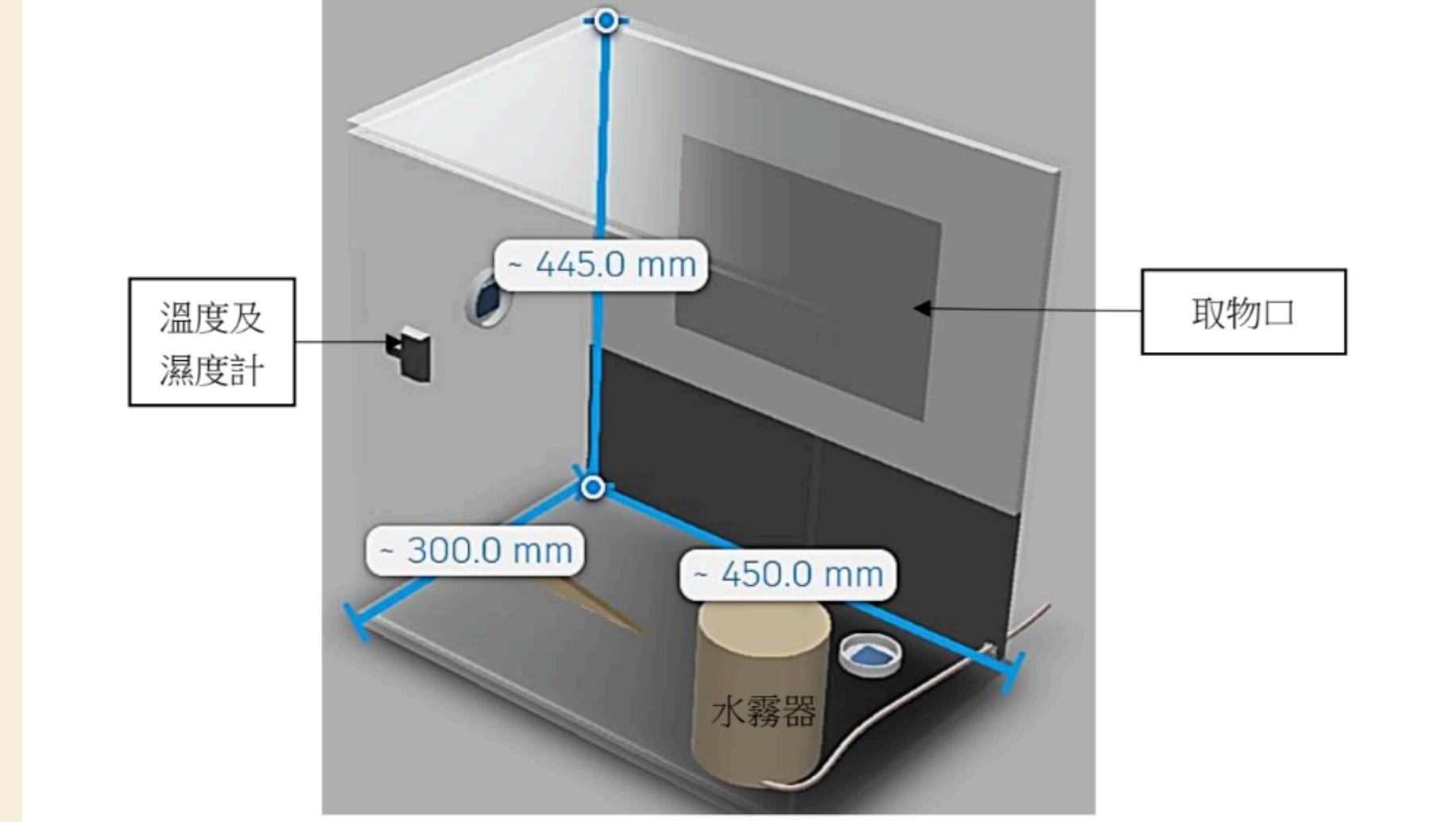
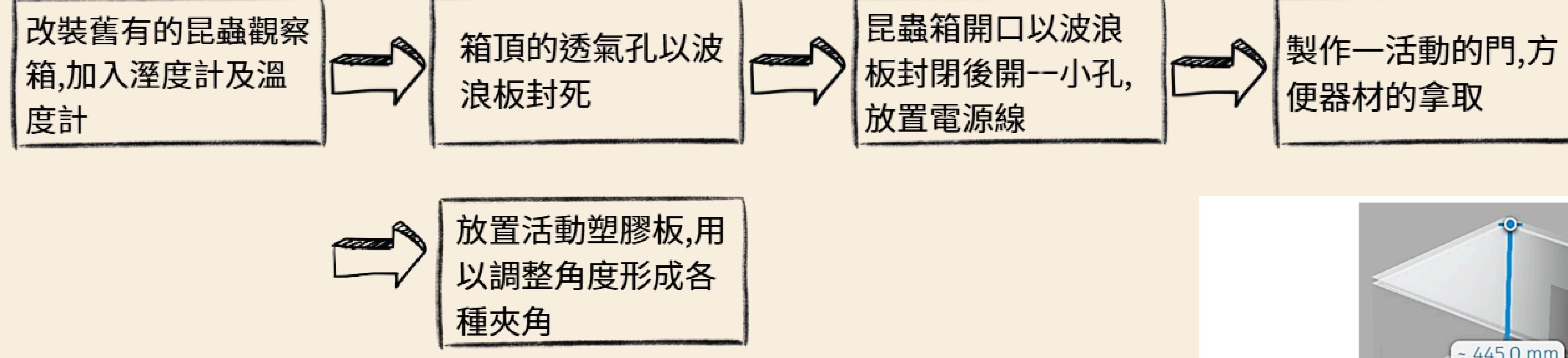
我們觀察到不同種類的空氣鳳梨在葉面鱗片的形狀、高度與密度上有所差異，因此本研究探討這些結構變化對水氣吸收的影響。我們利用Autodesk Fusion設計不同形狀與密度的鱗片模型，透過3D列印製作模板，並模擬其在不同傾角下的集水能力。藉由GAB模型公式，計算集水力、集水效率與有效集水表面積。結果顯示：四邊形模板在0°與45°時表現良好，但需隨角度增加提高密度；而六邊形模板在30°時擁有最佳有效集水表面積。整體而言，基本單元愈密集、與地面夾角愈小，有效集水表面積愈大。本研究成果有助於設計高效集水模板，期望為乾燥地區的水資源開發提供新方向。

研究方法與過程

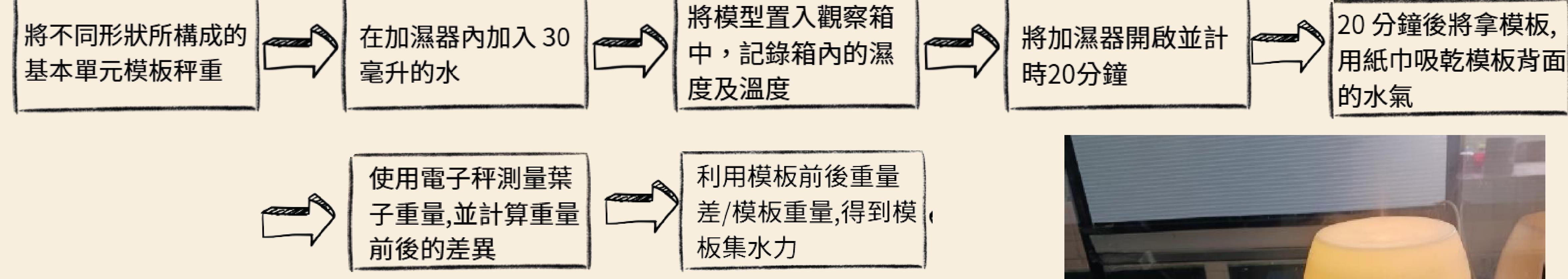
一、觀察空氣鳳梨葉片差異



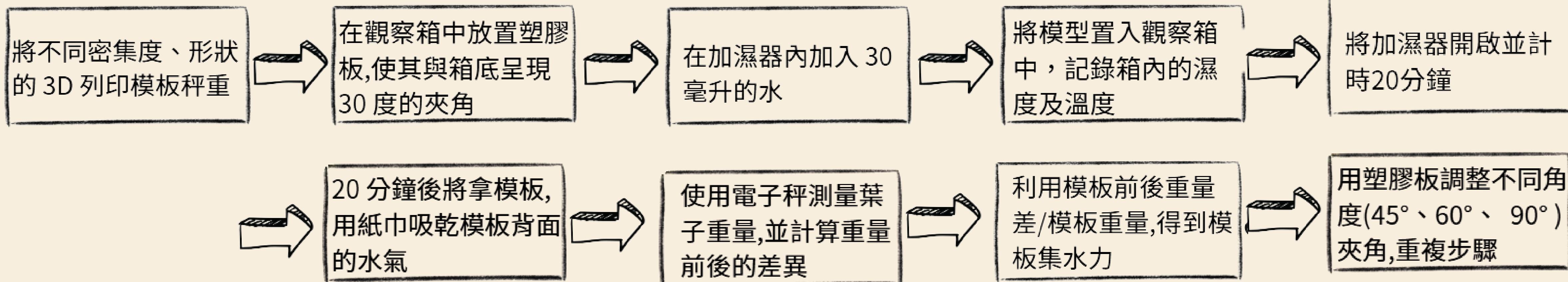
二、觀察箱設計



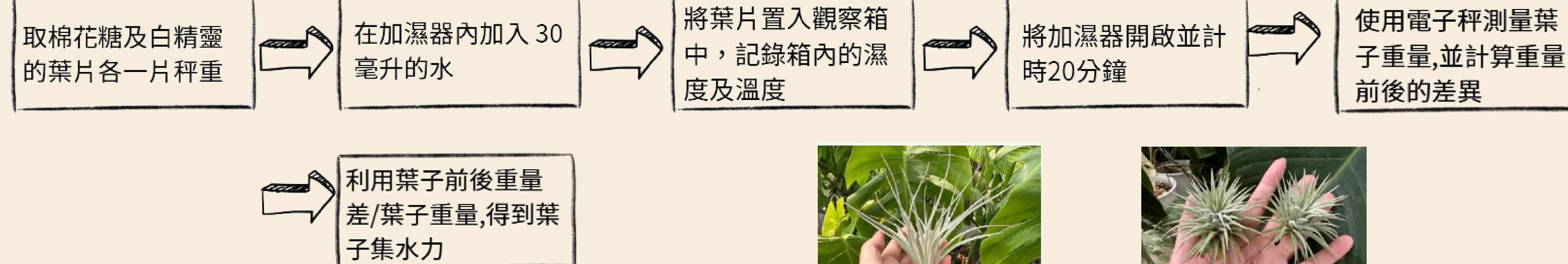
三、探討不同鱗片模型集水力之影響



四、探討不同鱗片模型放置不同角度對集水力之影響



五、探討兩種空氣鳳梨的集水力



實驗結果

一、觀察空氣鳳梨鱗片形狀與氣孔形狀差異

棉花糖：鱗片圍繞著近似圓形的凹洞生長，它的鱗片生長十分密集，樣貌尖且細短。



血滴子：鱗片沿著圓形的凹洞生長，鱗片生長密集，與棉花糖相同，但是鱗片的長度較棉花糖來得短。



霸王：鱗片沿著近似圓形的凹洞生長，鱗片分布密度與棉花糖相似，但鱗片長度較短與血滴子較為相近。



維多利亞：鱗片沿著近似六邊形的凹洞生長，分布的密度介於棉花糖及白精靈中間，同樣具有較長的鱗片。

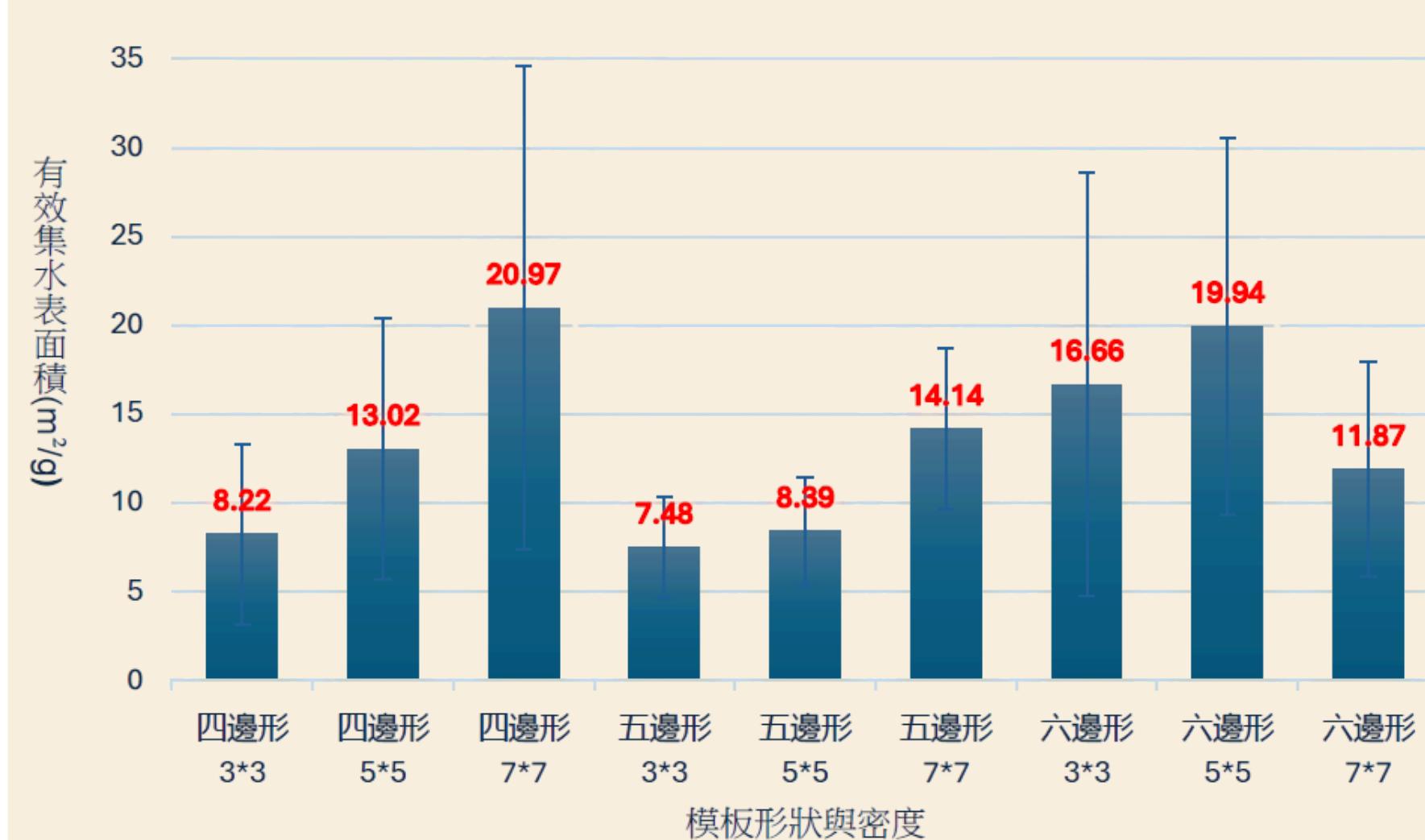


白精靈：鱗片沿著近似五邊形的凹洞生長，而鱗片和凹洞的分布數量較少。

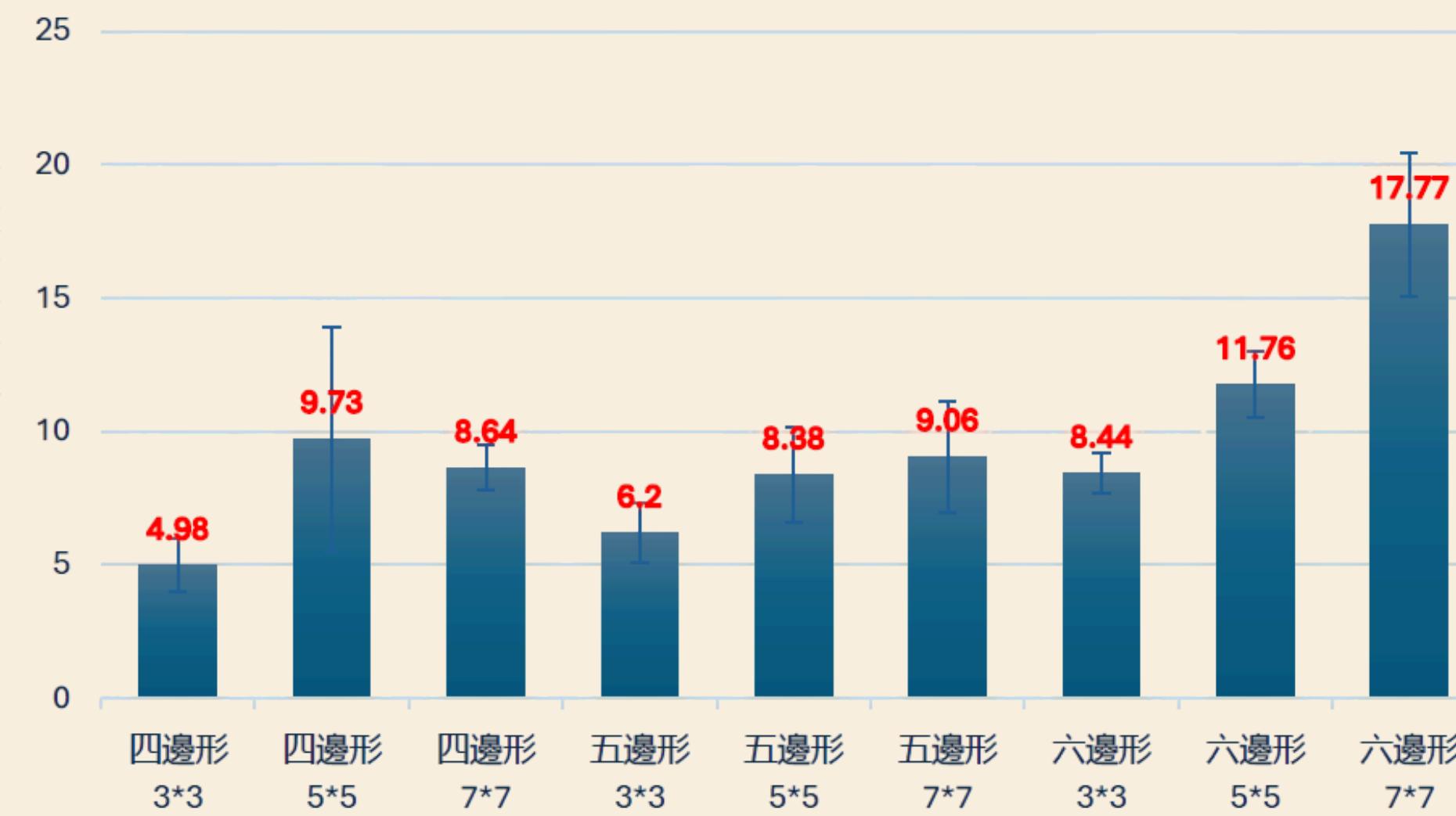


綜合以上觀察，我們利用Autodesk Fusion軟體模擬出空氣鳳梨鱗片的基本單元，再利用這個基本單元去圍出四邊形、五邊形及六邊形等不同形狀的集水單元，接著將不同形狀的集水單元，在相近面積的模板上以 3×3 、 5×5 、 7×7 來排列，總共做出9種模板進行集水能力的測試。

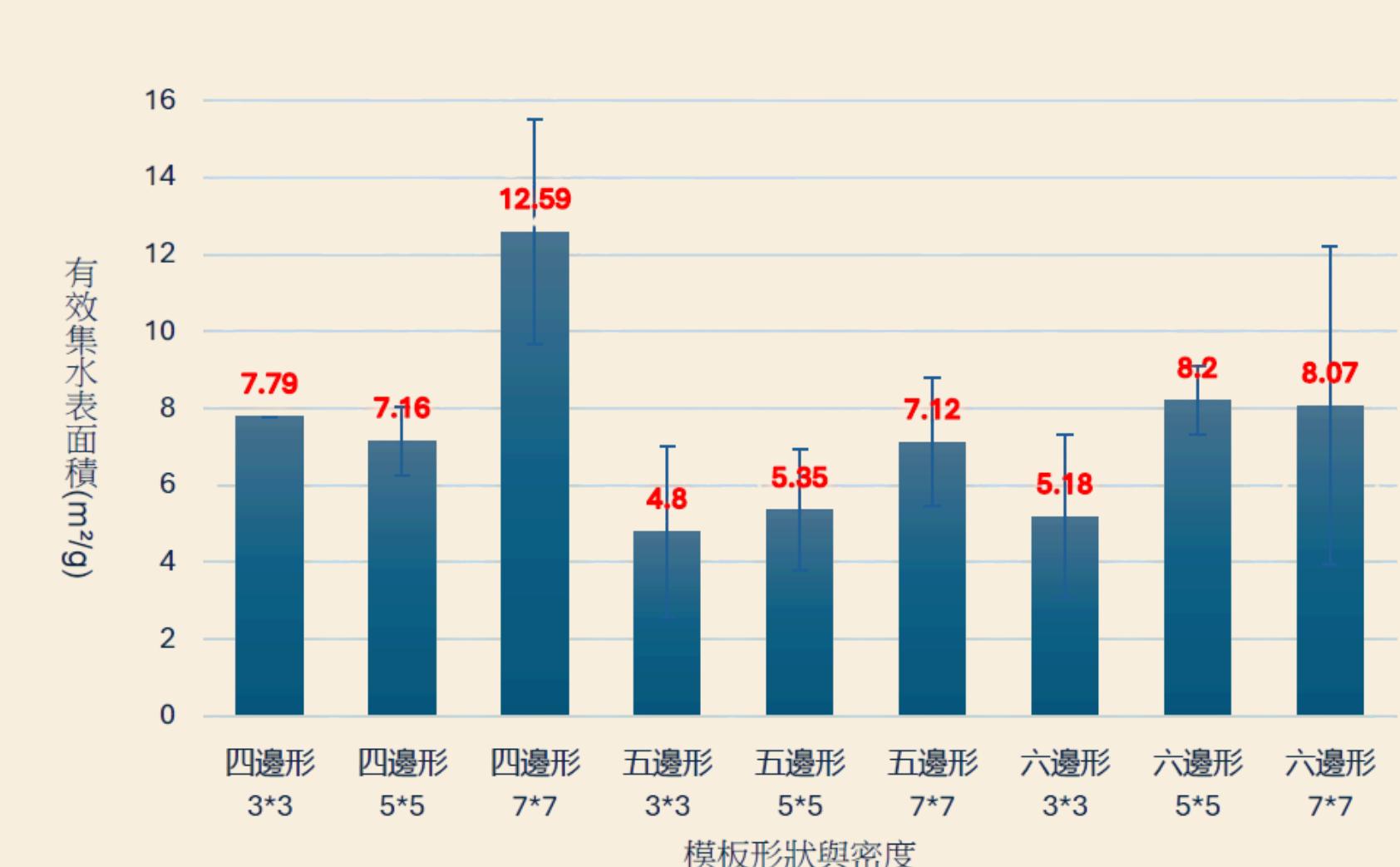
二、探討模板基本單元形狀、密集度與傾角不同對集水力之影響



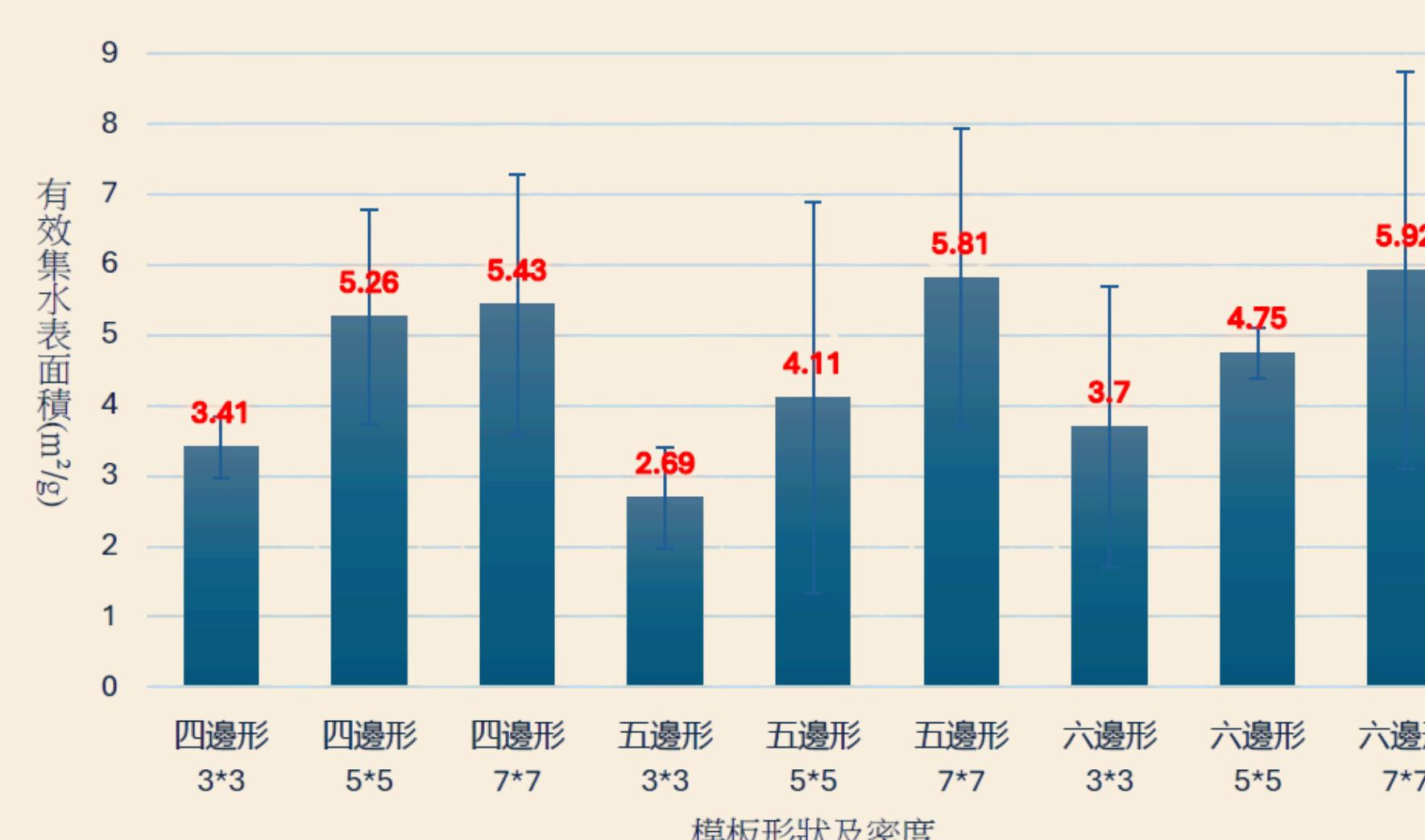
不同模板在平面的有效集水表面積圖



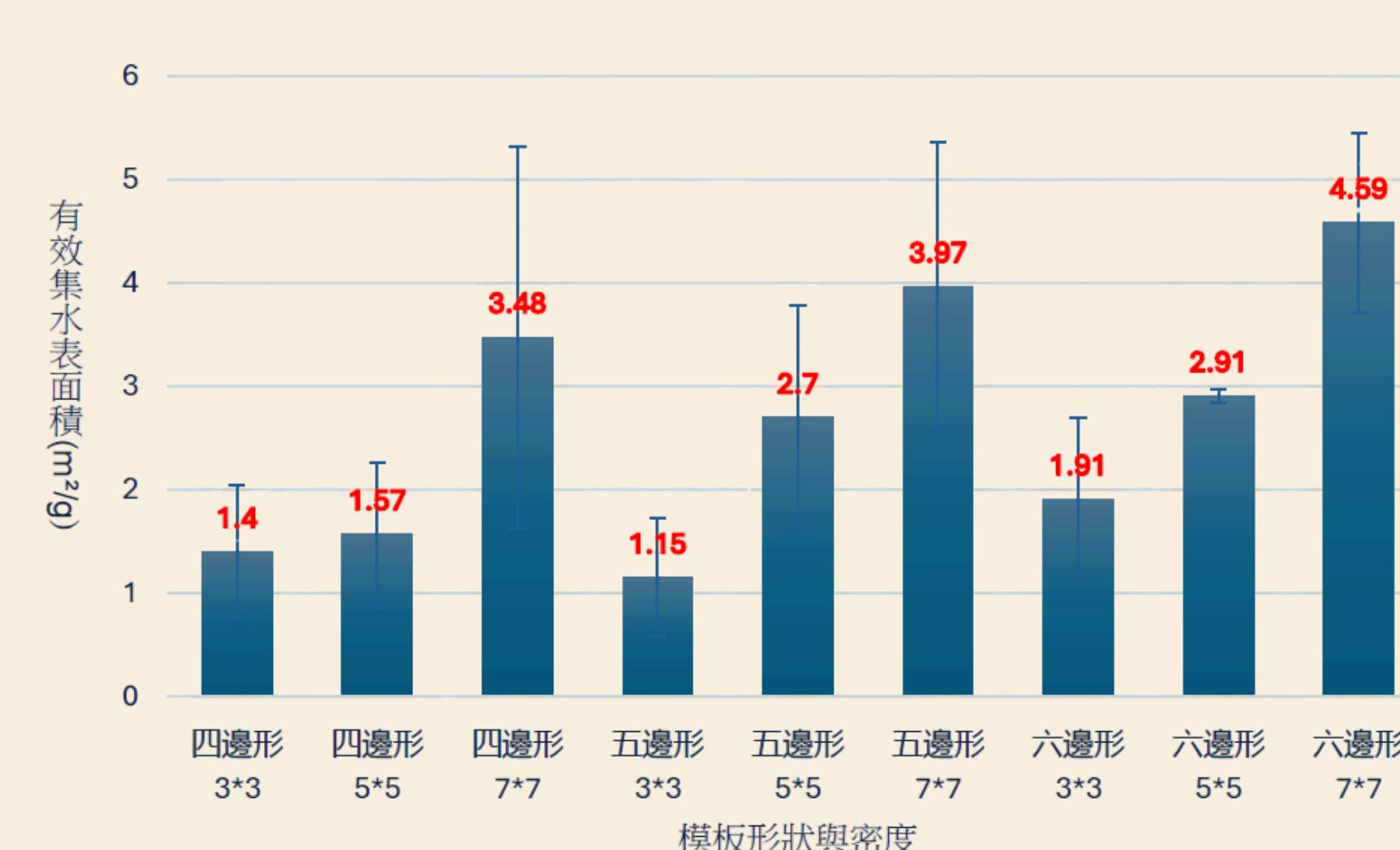
不同模板在傾斜30度平面有效集水表面積圖



不同模板在傾斜45度平面有效集水表面積圖



不同模板在傾斜60度平面有效集水表面積圖



不同模板在傾斜90度平面有效集水表面積圖

1. 不同模板相對應不同的最佳角度：0度時，基本單位四邊形 7×7 的模板，集水力最佳；30度時，六邊形為最佳；45度時，四邊形為最佳。但隨著角度的增大，形狀的效應也隨之遞減，而是密集度對於有效集水表面積影響更大。

2. 我們利用統計軟體SPSS，將以上數據進行三因子ANOVA分析，有效集水表面積隨角度增加(從0度的 $13.41 \text{ m}^2/\text{g}$ 降至90度的 $2.63 \text{ m}^2/\text{g}$)，呈顯著負相關 ($p < 0.001$)。形狀為六邊形的平均有效集水表面積最高 ($8.78 \text{ m}^2/\text{g}$)，五邊形最低 ($6.09 \text{ m}^2/\text{g}$)，呈現顯著相關 ($p = 0.001$)。模板密集度會影響有效集水表面積，從 3×3 ($6.43 \text{ m}^2/\text{g}$) 增至 7×7 ($9.88 \text{ m}^2/\text{g}$) ($p < 0.001$)。

三、空氣鳳梨和3D列印模板集水力的比較

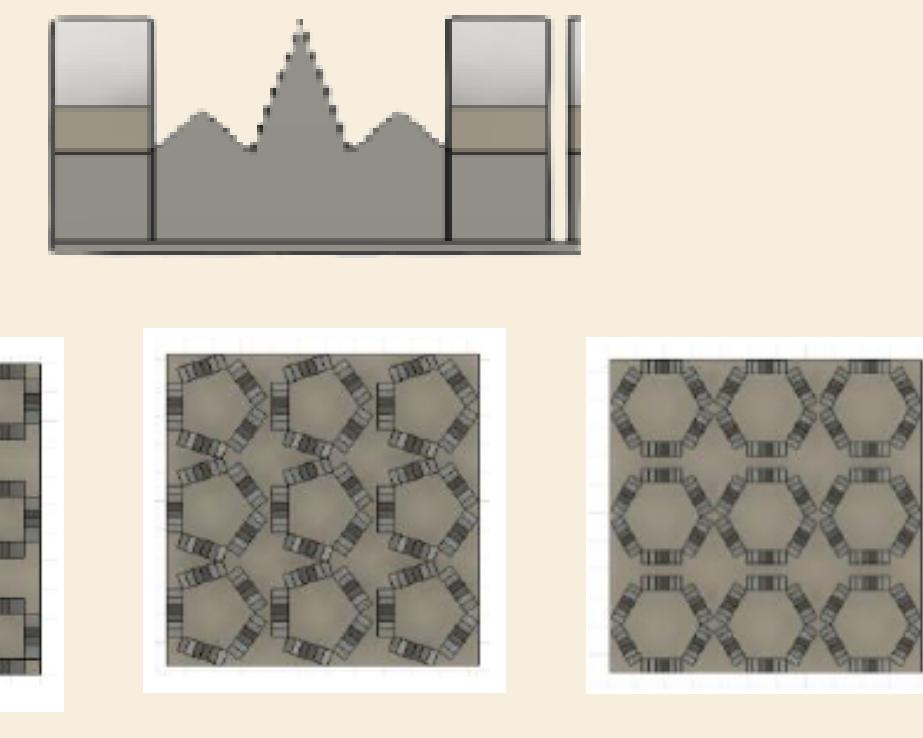
1. 空氣鳳梨棉花糖的有效集水表面積較白精靈來得大，且這兩株植物的結果比所有模型的效率更佳 (棉花糖： $52.74 \text{ m}^2/\text{g}$ ，白精靈： $39.31 \text{ m}^2/\text{g}$)。

2. 形狀四邊形且密集度為 7×7 時，和白精靈的集水力最為接近，兩者有效集水表面積的差異為 $18.34 \text{ m}^2/\text{g}$ (四邊形 7×7 ： $20.97 \text{ m}^2/\text{g}$ ，白精靈： $39.31 \text{ m}^2/\text{g}$)

討論

一、空氣鳳梨葉片的觀察

- 我們發現空氣鳳梨的鱗片會出現長短參差不齊排列的情況，所以我們建立一個「山」的基本單元，藉以模仿此種結構；並調整3D列印模型的大小，使其達到最小的極限。
- 經觀察的結果，我們選取四邊形、五邊形及六邊形等排列方式，作為模板上最小的集水單元，探討集水力差異。



二、利用不同3D列印鱗片模板比較集水力之差異

- 探討鱗片模型基本形狀不同對於集水力之影響：六邊形的排列所得到的有效集水表面積，都優於其他兩種形狀；小角度的傾斜（30度內），六邊形7*7的模板表現較為突出 ($17.77 \text{ m}^2/\text{g}$)；而在30到45度之間，卻是四邊形7*7的模板表現最佳 ($12.59 \text{ m}^2/\text{g}$)，當傾斜角度持續增大時，就沒有如此明顯的差距；因此我們推測，在小角度的傾斜範圍時，不同的傾角有適配的形狀，而當傾角增大時，密集度的影響大過於形狀的影響，使得形狀與傾角的適配度消失，所以在ANOVA的分析中才顯示交互作用不顯著，僅由單因子影響不同傾角的有效集水表面積。
- 探討鱗片模型排列密集度不同對於集水力之影響：我們發現當模板與地面的夾角愈大，基本單元的密集度影響有效集水表面積愈大，當角度來到90度時，無論何種形狀，集水有效表面積皆為 $3*3 < 5*5 < 7*7$ ，基本單元愈密集，則有效的集水表面積愈大。我們推測因為在垂直的狀態，容易受到地心引力的影響，水分較不容易附著在模板上，但若基本單元較為密集，就比較容易蓄積因地心引力下流的水分。
- 探討不同鱗片模板放置不同角度對集水力之影響：無論是哪一種模板，都是以平行地板放置為最佳，推測這是因為水分垂直落下，較容易收集，且不會受到地心引力的影響而導致水分的流失，「山」形的結構也不會互相遮蔽，進而增加有效集水的表面積。

三、空氣鳳梨和3D列印模板集水力的比較

- 我們從實驗結果可以發現，空氣鳳梨和模板的數據結果還有一段距離，無法較空氣鳳梨的結果好。我們推測是因為我們使用的3D列印材料為PLA，模型表面較為光滑不易收集水氣，因此，四邊形7*7的模板和白精靈的有效集水表面積還有一段距離。若未來有機會可以找出更加親水的材質，必能製造出更貼近空氣鳳梨集水效力的模板。
- 在傾角為90度時，六邊形的最大有效集水面積，是其他形狀的1.3到1.15倍（四邊形： $3.48 \text{ m}^2/\text{g}$ 、五邊形： $3.97 \text{ m}^2/\text{g}$ 、六邊形： $4.59 \text{ m}^2/\text{g}$ ）。推測是因為六邊形構成的形狀，皆能使構造暴露在水氣中，達到較好的集水效果，而其他形狀可能因為構造較難留住蓄積的水分。我們和空氣鳳梨植栽對照後可發現，與地面垂直的葉片，鱗片排列較為密集，此空氣鳳梨鱗片的分布情形和我們的實驗結果相同。



結論

一、葉片的彎曲角度和鱗片的密集度相關

葉片彎曲角度不同，鱗片和氣孔密集度也有所不同，若葉片與地面角度愈接近垂直，鱗片的密集度則愈大。

二、模板的集水單元形狀、密集度與傾角決定模板的集水力大小

當模板為平行地面時，收集水氣的效率最高；夾角小於30度時，以六邊形的集水單元表現最好；夾角介於30度至45度之間時，則以四邊形集水單元表現最好；當角度逐漸增加，則需選擇排列密集的模板，才可收集較多水分。基本集水單元形狀為四邊形時，有效集水表面積較為穩定，提供良好的水氣凝結效果。

三、綜合我們的研究，重新設計集水模板，結合不同形狀集水單元的優勢

- 我們認為可以將集水模板平面設計成四邊形，在斜面上設計兩種形式，在較平緩的第一段，接上六邊形7*7的模板，隨著傾角變大時，則接上四邊形7*7的模板，將兩種模板加以組合，就能成為最大效率的集水裝置，最後成品模板如下。
- 未來若能以更親水的材料製造集水模板，或用更精密的3D列印機器列印出精細度更佳的模板，並將這個裝置與自動偵測系統結合，在不同的濕度下，自動調整不同角度，應用於降水稀少的區域，增加另一種可運用的水資源。

