

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	100020
參展科別	工程學
作品名稱	以智慧型高親水薄膜提升汗液感測靈敏度 Enhancing Sweat Sensing Sensitivity with SmarHydrophilic Thin Films
得獎獎項	三等獎 盧森堡國際科學博覽會

就讀學校	臺北市私立復興實驗高級中學
指導教師	馬瑪宣 廖英志
作者姓名	陳芯愛

關鍵詞 親水性薄膜、PAA/CNC、汗液監測

作者簡介



我是陳芯愛。青春期的我也面臨青春痘的困擾，時不時冒出的青春痘，開啟我的戰「痘」計劃。偶然間我發現痘痘貼對我非常有效。我的實驗就是從痘痘貼出發，希望藉由這種特性能夠對監測身體的健康狀況有所貢獻。謝謝老師的帶領和鼓勵。，這次參加科展最大的成果就是持續多思考、保持好奇的心，就能發現許多科學的奧妙！

2025年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別：北區

科別：工程學科

作品名稱：以智慧型高親水薄膜提升汗液感測靈敏度
Enhancing Sweat Sensing Sensitivity with
Smart Hydrophilic Thin Films

關鍵詞：親水性薄膜、PAA/CNC、汗液監測（最多三個）

編號：

（編號由國立臺灣科學教育館統一填列）

摘要

本研究主要是以晶片和織布進行結合，以電極收集訊號分析受測者的鈉濃度和汗液流量，研發長期保持潤濕和擁有穩定性的高親水性薄膜 Polyacrylic acid / Cellulose nanocrystals (PAA / CNC) 感測器。製備不同濃度比例的PAA / CNC光固化水凝膠，進行接觸角、FTIR 圖譜、溶脹比 (Swelling Ratio)、SEM、EIS 潤濕面積分析並比較選擇出PAA /10 CNC的濃度比例作為最佳的汗液感測電極。利用CNC與PET片間貼合度強化結果，能有效提升薄膜親水性，降低電極與織布中的親疏水性差異，加強電極感測靈敏度，相較於對照組，電容值結果顯示約提升5~10倍的靈敏度。本研究開發一個靈敏且穩定即時監測汗液的薄膜，並結合藍芽應用於智慧裝置。

ABSTRACT

This study primarily focuses on integrating chips with fabrics to collect signals via electrodes and analyze the sodium concentration and sweat flow of the subjects. A highly hydrophilic polyacrylic acid/cellulose nanocrystals (PAA/CNC) film sensor, capable of maintaining long-term wetness and stability, was developed. Photocurable PAA/CNC hydrogels with various concentration ratios were prepared, and their contact angles, FTIR spectra, swelling ratios, SEM, and EIS wetted area analyses were conducted. The optimal concentration ratio of PAA/10CNC was selected as the sweat sensing electrode. The enhanced adhesion between CNC and PET sheets effectively improved the hydrophilicity of the film, reduced the hydrophilic and hydrophobic differences between the electrodes and the fabric, and enhanced electrode sensing sensitivity. Compared to the control group, the capacitance results showed a sensitivity improvement of approximately 5 – 10 times. This study developed a sensitive and stable film for real-time sweat monitoring and incorporated Bluetooth functionality for smart device applications.

壹、研究動機

隨著時代演進，人們逐漸有對健康意識的重視，因而對於人類代謝循環中很重要的汗液，有對於是否能再結合科技加上能即時測得人類代謝數據的儀器，因而有了現在的非侵入式汗水感測器。由於非侵入式的汗水感測器，可以改善侵入式造成的感染和污染等衛生問題。藉由感測汗水濃度，所測得之數據能讓使用者即時了解汗液當中某些物質，監測身體的狀況。

貳、研究目的及研究問題

一、目的與研究問題

近年來，人們越來越重視健康問題，導致對實時生物感測器的需求不斷增長。在各種感測方法中，汗液檢測因其真實性和非侵入性而受到關注。然而，汗液感測電極的應用和量產往往受限於不耐水洗、汗液與電極接觸不穩定、電極與晶片連接等因素而受到限制。在本研究中，我們提出了一種電子元件和織物之間的新型集成方法。將感測電極塗佈於低成本、高柔性的聚對苯二甲酸乙二酯 (PET) 基板上。通過特殊的電極設計圖案及改質，可用於分析汗液成分流量。我想知道：

1. 親水吸水的聚丙烯酸/纖維素奈米晶體 (PAA / CNC) 光固化水凝膠薄膜是否能增強PET表面的親水性和薄膜黏附性，以確保長期潤濕穩定性?
2. 不同比例的 PAA / CNC，是否會影響光固化水凝膠薄膜的親水性? 哪一個比例為最佳的薄膜組成?
3. 在汗液感測應用中，設計電極圖案，用以感應汗液中的鈉濃度和汗液流量。
4. 驗證PAA / CNC親水薄膜可以有效改善電極與織物之間的親水性差異，提高汗液流量感測之靈敏度。
5. 利用藍芽將智慧衣物跟薄膜進行整合，以利實時監測的目的。

參、研究設計

一、實驗架構圖

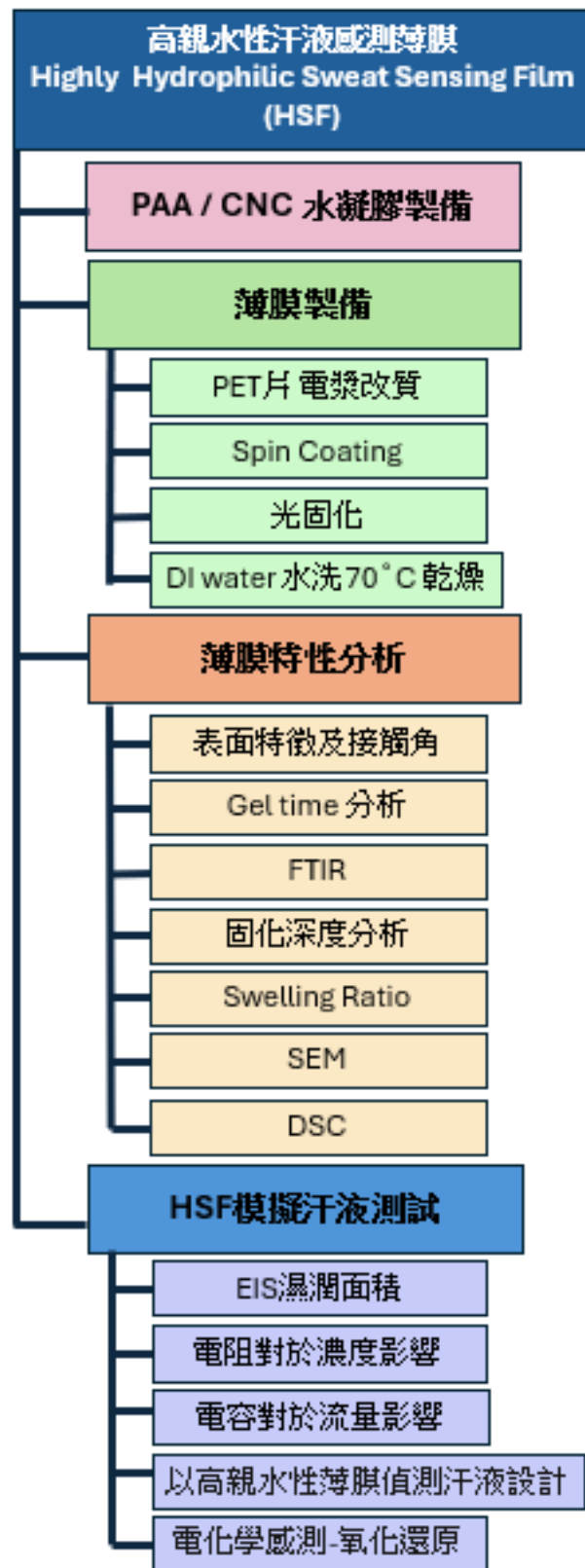


圖1.本研究實驗架構(由作者自行繪製)

二、實驗設備

表1. 實驗相關設備(由作者自行編製)

實驗設備	廠商	型號
電化學儀	CH Instrument	CHI6271E
公自轉攪拌機	THINKY	ARE-310
大氣電漿機	-	自組裝
UV燈箱	TOPBIO	2020-2
霍氏轉換紅外光譜儀(FTIR)	Perkin Elmer	Spectrum100
SEM	Hitachi	S-4801
相機	Olympus	Stylus
旋轉塗佈機	Collect	SP-M1-S
流變儀	TA	HR2
熱壓機台	CUYI	-

三、實驗材料

表2. 實驗相關材料(由作者自行編製)

實驗藥品與材料	廠牌	規格
DI water	Merck Millipore	>18.2M Ω /cm
Cellulose nanocrystals (CNCs)	Nanografi Nano	-
Acrylic acid (AA)	帝一化工	98%
網刷碳膠電極PET片	Cymmetrik enterprise	-
N,N'-methylenebisacrylamide(MBA)	Sigma	≥99.5%
2,4,6-trimethylbenzoyldiphenylphosphine oxide (TPO)	雙鍵化工	-
Sodium chloride	ACROS ORGANICS	99.5%
雙面熱熔膠膜	大和產業科技有限公司	-
Potassium ferrocyanide	Alibaba	-
Potassium ferricyanide	Alibaba	-
Potassium chloride	YAKURI PURE CHEMICAL	-
頭帶	由實驗室提供	
吸水布		
晶片		

四、研究過程或方法

(一) PAA / CNC親水凝膠製備

1. 取丙烯酸(acrylic acid, AA)和光起始劑(2,4,6-trimethylbenzoyldiphenylphosphine oxide ,TPO)置於一個樣品瓶中，並利用公自轉機，以2000 rpm進行四分鐘的混合、2200 rpm進行三分鐘的消泡，使丙烯酸和光起始劑均勻混合。
2. 取奈米纖維素晶體(cellulose nanocrystals, CNC) (按不同比例呈倍數放大)和交聯劑 (MBA)和 DI water 另一個樣品瓶中，並利用公自轉機，以2000 rpm進行四分鐘的混合、2200 rpm進行三分鐘的消泡，使奈米纖維素晶體和 交聯劑 和 DI water 完全溶解。
3. 再將兩個樣品瓶進行混合，並放入公自轉機以 2000 rpm 進行四分鐘的混合、2200 rpm進行三分鐘的消泡，即完成 PAA / CNC 水凝膠配置。

(二) 按不同的PAA / CNC比例配置五種水凝膠

表3. A~E水凝膠樣本的PAA / CNC比例(由作者自行編製)

組別	A組樣本	B組樣本	C組樣本	D組樣本	E組樣本
溶液比例	PAA / 0CNC	PAA / 2CNC	PAA / 4 CNC	PAA / 8CNC	PAA / 10CNC

表4. A~E水凝膠前驅液之配方(由作者自行編製)

組別	比例	AA(g)	CNC(g)	MBA(g)	TPO(g)	DI water(g)	Total(g)
A	PAA / 0 CNC	2.5	0	0.05	0.025	7.425	10
B	PAA / 2 CNC	2.5	0.05	0.05	0.025	7.375	10
C	PAA / 4 CNC	2.5	0.1	0.05	0.025	7.325	10
D	PAA / 8 CNC	2.5	0.2	0.05	0.025	7.225	10
E	PAA / 10 CNC	2.5	0.25	0.05	0.025	7.175	10

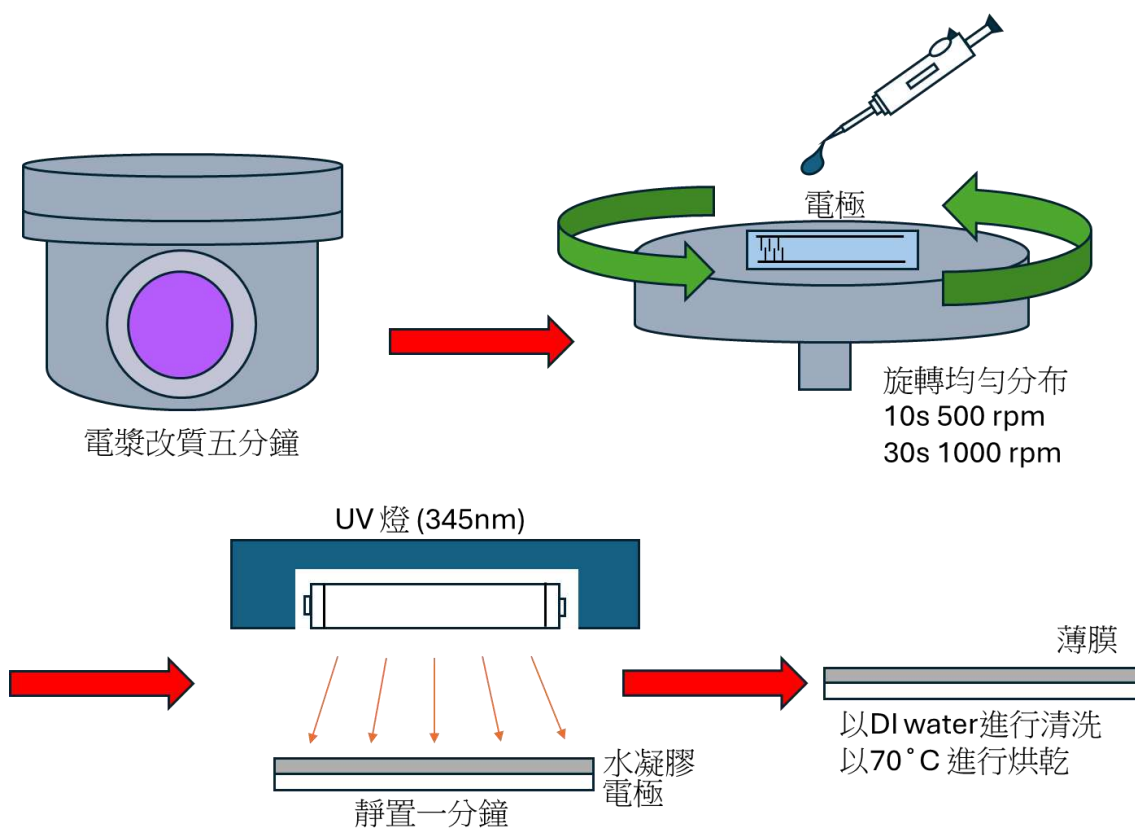
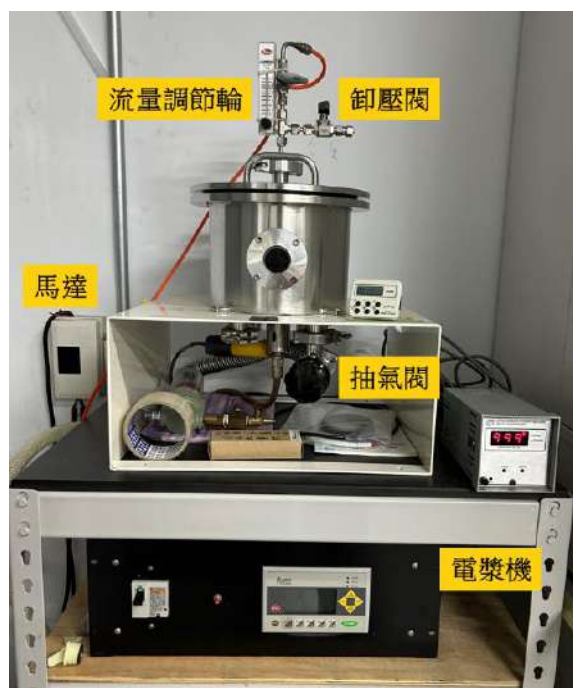


圖2.光固化水凝膠薄膜(HSF)製備示意圖(由作者自行繪製)

(三) PET 基板電漿改質



1. 先打開洩壓閥洩壓至壓力數值成約 999 TORR。
2. 打開蓋子並將 PET sample 放置在圓盤上，便蓋上蓋子，並轉緊卸壓閥，打開馬達。
3. 打開抽氣閥，數值調至大約 50 mTORR，再打開流量閥，並以流量調節輪調節流量。
4. 按下電漿機開關，待機器發出「嗶」聲，並同時按下五分鐘的碼表和 F₀ 鍵，使電漿機容器中呈現紫色。
5. 五分鐘後，再依序上述步驟將閥和開關關閉。
6. 打開卸壓閥將sample取出。
7. 關閉卸壓閥，關閉馬達。

圖3.電漿機的本體架構(由作者自行拍攝)

(四) 水凝膠薄膜製備 (Spin coating , 光固化)

1. 使用DIwater、酒精、丙酮清洗PET的表面髒污，再使用大汽電漿機改質電極表面五分鐘。
2. 使用移液管(Pipette)將配好的溶液滴到電極 (Electrode) 上，以旋轉塗布機 (Spin coating) 進行溶液的均勻分布，並操作參數 500 rpm 轉 10 s ，再以 1000 rpm 轉 30 s 。
3. 使用 345 nm 的 UV 燈照樣品一分鐘，使之完全固化。
4. 進行沖洗和烘乾。

(五) 親水薄膜之Gel time 方法

1. 在裝有待測物的試管裡，將其混合攪拌，並施加旋轉速率使其凝膠化。
2. 在計時十分鐘後，在磁力耦合器停止旋轉後取出樣本。
3. 再利用凝膠化試驗機量測親水薄膜的凝膠化時間。

(六) 親水薄膜之FTIR測量方法

1. 將傅立葉紅外線光譜儀開機，並暖機30分鐘。
2. 將親水薄膜放入載片中，再放入樣品槽中，便可開始利用軟體進行觀察與操作。

(七) 親水薄膜之溶漲比 (Swelling ratio)

將親水薄膜放入載片上，並利用熱機械分析儀 TMA 1600 觀察溫度、時間和外力作用不同之下的形變方法。

(八) 汗液成分

根據文獻[1]，人類總共有約 200-400 萬個小汗腺，存在於無毛（手掌、腳掌）和無毛（多毛）皮膚上，手掌和腳底的腺體密度最高（~250-550 個腺體 / cm²）小汗腺汗液主要是水和氯化鈉，但也含有許多其他源自組織液和小汗腺本身的化學物質的混合物。汗液是一種非常複雜的化學物質的水性混合物。主要是水和氯化鈉，另含有多種不同濃度的其他溶質和一些微量營養素和非微量營養素。微量營養素包括電解質 Na 和 Cl（汗水中濃度最高的成

分)、K、維生素和微量礦物質。非微量營養素成分則包括代謝物、蛋白質、胺基酸和毒物。本研究監測汗液中的鹽類作為主要參考值。

(九) 不同汗水濃度比例汗水的電化學儀測定

計算：(取溶液 50ml 計算出不同濃度時所需的氯化鈉克數)

1. 6.25mM	2. 25mM	3. 100mM
$\frac{x}{\frac{58.5}{0.05}} = 6.25 \times 10^{-3}$	$\frac{x}{\frac{58.5}{0.05}} = 25 \times 10^{-3}$	$\frac{x}{\frac{58.5}{0.05}} = 100 \times 10^{-3}$
$x = 6.25 \times 10^{-3} \times 0.05 \times 58.5$	$x = 25 \times 10^{-3} \times 0.05 \times 58.5$	$x = 100 \times 10^{-3} \times 0.05 \times 58.5$
≈ 0.018	≈ 0.073	≈ 0.29

圖4.計算汗液濃度所需之NaCl量(由作者自行編製)

1.先取 NaCl，秤出各溶液比例所需的溶質

(1) 6.25mM =>0.018g

(2) 25mM=>0.073g

(3) 100mM=>0.29g

2.並個別加入 50ml 的 DI water，並攪拌至完全溶解

3.準備兩個電極（實驗組 A / 對照組 B）

4.並將電極利用電漿機打電漿

5.並 coating PAA / 10 CNC 在 A 組上，利用電化學儀監測，並觀察監測A/B組的差異

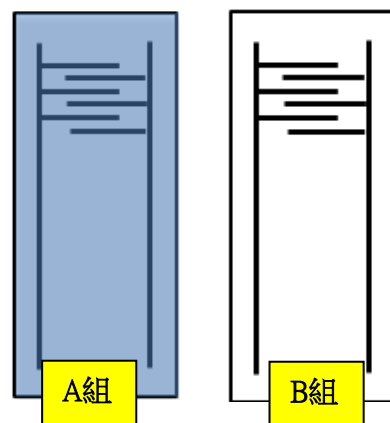


圖4.A組:有塗佈PAA / 10 CNC 的感測電極

B組:沒有塗佈的感測電極

(由作者自行繪製)

(十) 電化學阻抗圖譜 (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS) 測量

在完成 PAA/ CNC 水凝膠的合成與分析後，我們選擇使用擁有最好親水性以及強交聯效果最佳的 **E組樣本 (PAA/ 10 CNC)**，做為之後製作親水薄膜的配方。我們利用EIS分析來測量改善不同濕潤性的親水薄膜。

1. 滴入 100 μL 的 100 mM 氯化鈉 (NaCl) 水溶液在覆蓋高親水性汗液感測薄膜(HSF)的織布上，分析和觀察電極上隨時間變化的電容大小。
2. 將塗佈好的電極浸泡在水中一個星期後，再進行一次濕潤度的測試。

電化學儀設定

Init E (V)···0

Amplitude (V)···0.05

Frequency (HZ)···10

Sample Interval (sec)···2

Run time (sec)···1500

Cycle(below 10 HZ)···5

Quiet Time (sec)···2

Bias DC Current···Below 1 H

Sensitivity (A/V)···Automatic

(由作者自行編製)

(十二) 親水電極與織物整合

在完成 PAA/ CNC 水凝膠的合成與分析後，我們選擇使用擁有最好親水性以及強交聯效果最佳的 **E組樣本 (PAA/ 10 CNC)**，做為之後製作親水薄膜(Highly Hydrophilic Sweat Sensing Film , HSF)的配方。我們利用EIS分析來測量改善不同濕潤性的親水薄膜。

1. 將PAA/CNC光固化水凝膠電極和切割出電極圖案的雙面熱熔膠，透過熱壓機進行黏合的動作。將其和吸水布進行整合，切割出1公分×1公分的熱熔膠膜進行熱壓黏合。

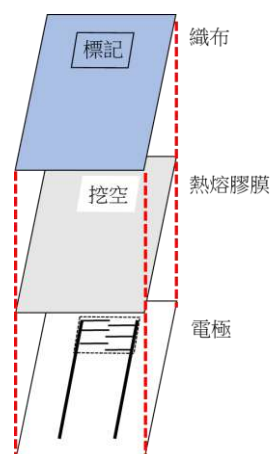


圖5.整合電極和織布示意圖
(由作者自行繪製)

2. 將黏合的產物和軟排線進行接合，再插入晶片中。

3. 放入頭帶中，以Fabric面面向頭戴的內側和1公分 × 1公分的熱熔膠膜進行熱壓黏合，最後便可得智慧衣物汗液傳感器。

(十三) 無線感測裝置(由作者自行拍攝)

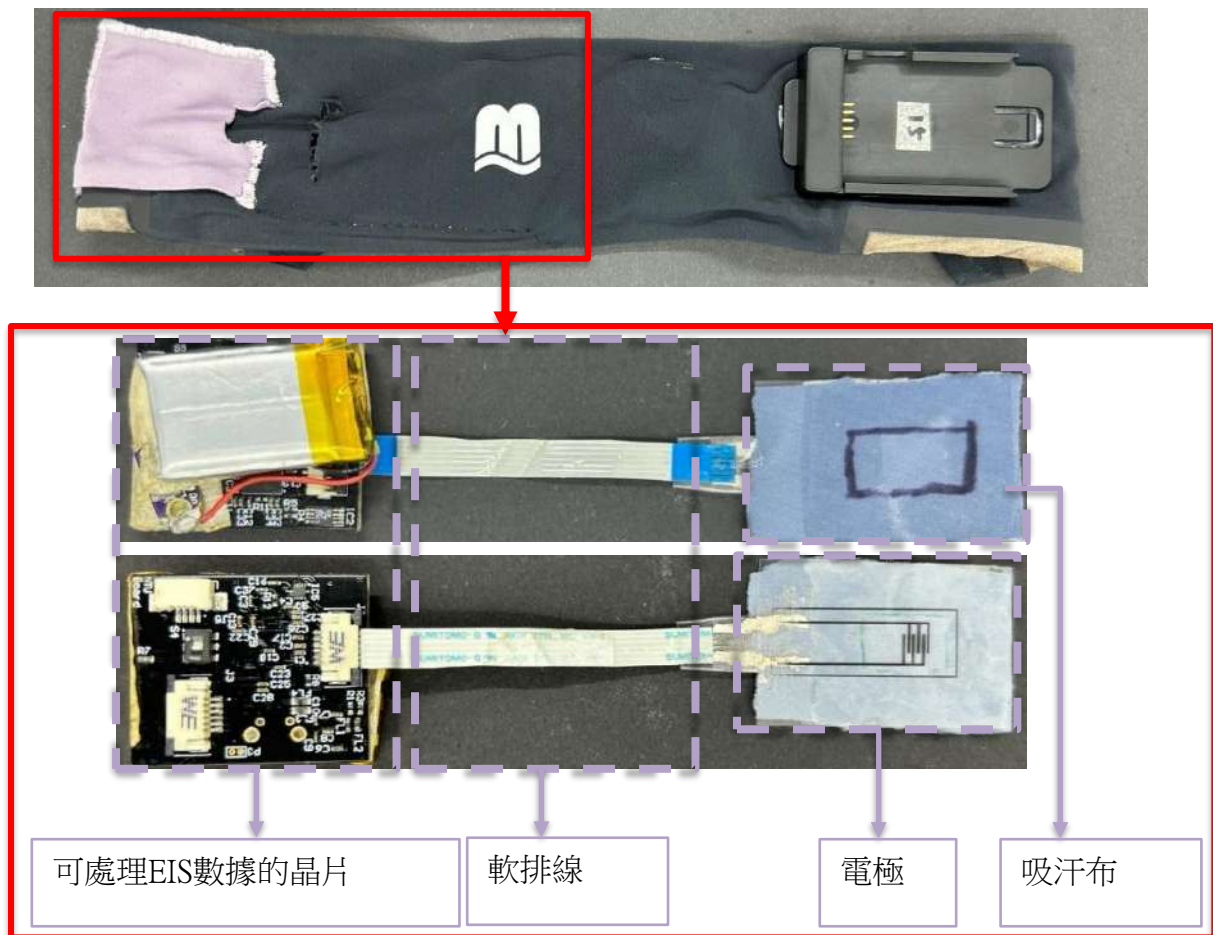


圖6.無線感測器裝置架構(由作者自行拍攝和編制)

1. 頭帶兩端分別做一條約1公分的開口，並將軟排線從頭帶背側分別穿出兩個開口。
2. 在左側縫製約 4.5 × 4.5 小口袋，置入晶片
3. 固定親水薄膜及吸水布在頭帶的內側，並用軟排線做連接

肆、研究結果

一、薄膜特性分析

(一)薄膜外觀

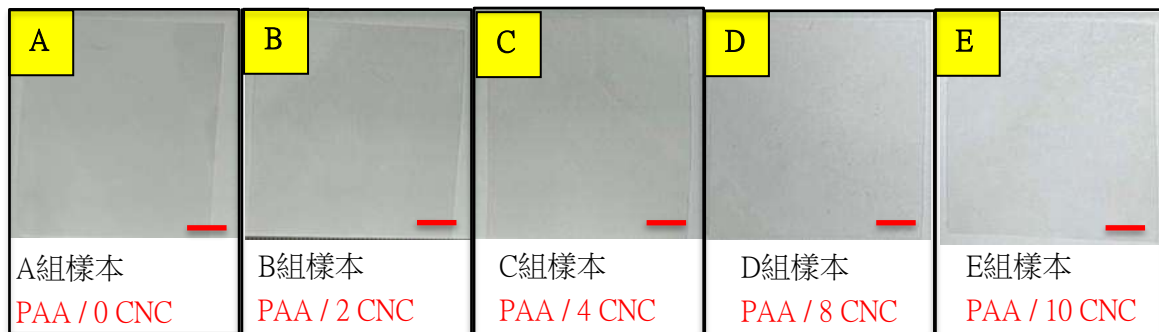


圖7. 五組薄膜樣本coating於PET片的外觀 (由左至右)A : PAA / 0 CNC ; B : PAA / 2 CNC ; C : PAA / 4 CNC ; D : PAA / 8 CNC ; E : PAA / 10 CNC 圖中的比例尺為1 cm 。

(由作者自行拍攝)

說明：五組薄膜樣本coating水凝膠後外觀上有明顯的光澤，但五組間並無顯著差異，因此接下來的實驗設計使用顯微鏡進行細部觀察。

(二) 於PET基板coating五種薄膜之樣本接觸角實驗

目的：學習接觸角的測量和原理，並了解親疏水性。

說明：

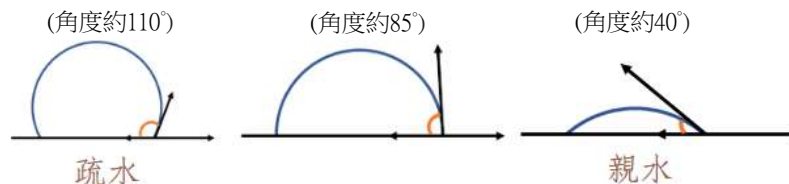


圖8.經過觀測發現量測角度值愈大，則愈疏水；而若量測角度值愈小，則愈親水。(由作者自行繪製)

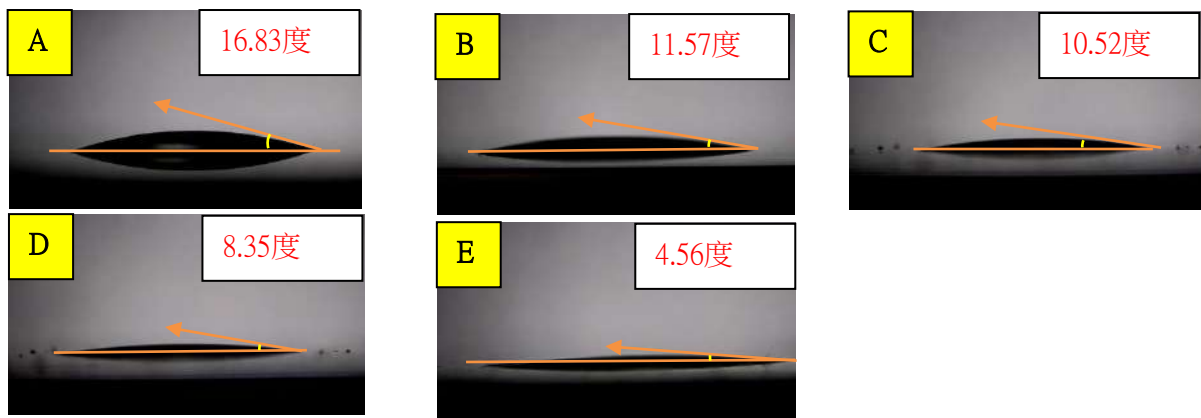
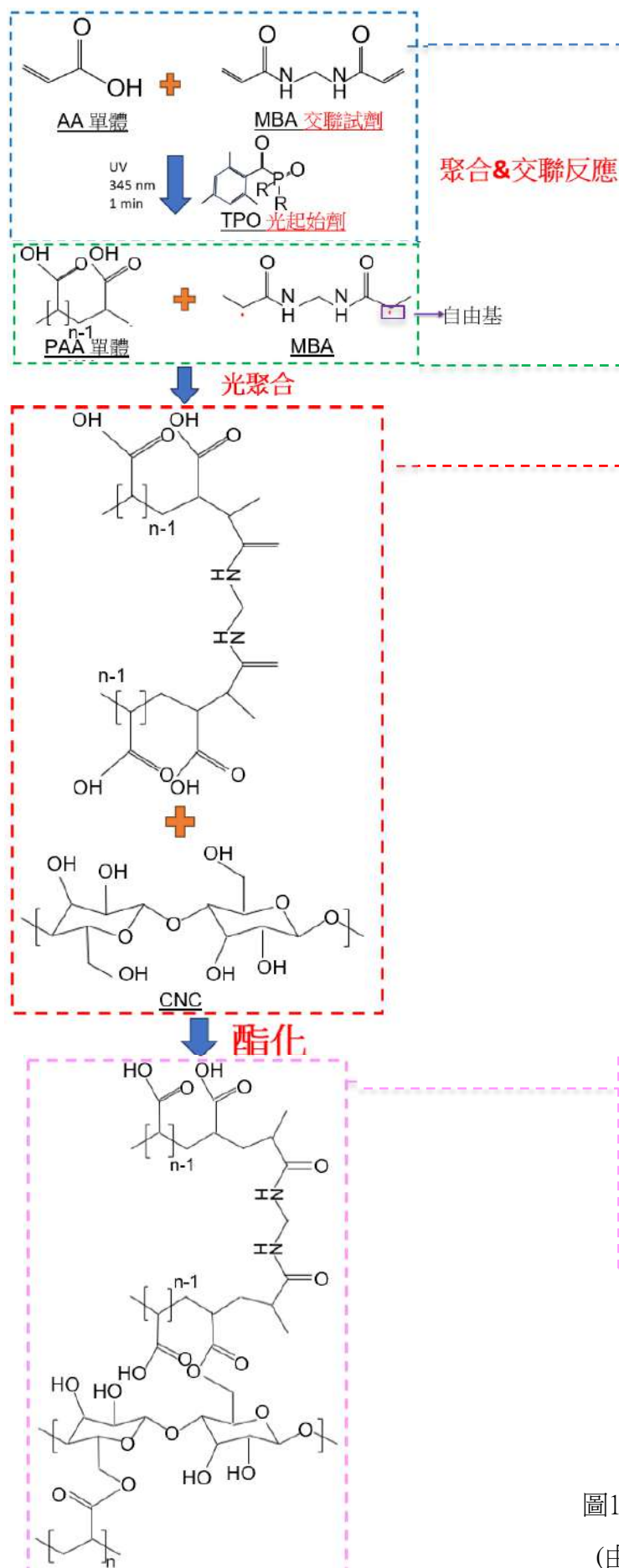


圖9. 五種薄膜樣本coating後於PET基板後的接觸角大小 A : PAA / 0 CNC ; B : PAA / 2 CNC ; C : PAA / 4 CNC ; D : PAA / 8 CNC ; E : PAA / 10 CNC 。（由作者自行拍攝）

說明：

A組 PAA / 0 CNC 接觸角為 16.83° ; B組 PAA / 2 CNC 接觸角為 11.57° ; C組 PAA / 4 CNC 接觸角為 10.52° ; D組 PAA / 8 CNC接觸角為 8.35° ; E組 PAA / 10 CNC接觸角為 4.56° 。因此可從中推知接觸角最小的 PAA/ 10 CNC親水薄膜最親水。

(三)合成PAA/CNC水凝膠的化學反應過程示意圖



(1) 將AA丙烯酸單體(Acrylic Acid)和MBA(N,N'-methylenebisacrylamide)交聯劑進行交聯。

(2) 加入TPO光起始劑(2,4,6-trimethylbenzoyldiphenylphosphine oxide)進行聚合，經過345nm和一分鐘的利用UV燈進行光固化。

(3) 產生出PAA聚合物和擁有自由基的MBA。

(4) PAA會和MBA自由基會進行聚合和結合，產生其聚合物。

(5) 在PAA和MBA的水溶液中加入CNC，因為CNC擁有很高的親水性，但它擁有OH基，導致在收集汗液的過程會導致CNC跟著汗水一起流失，因此要加入AA，增加其穩定性。

(6) 使兩溶液進行融合，PAA聚合物和CNC進行酯化。

(7) 最後產生PAA / CNC水凝膠，製作成具高親水性且又穩定的親水薄膜。

圖10. PAA / CNC 水凝膠製備化學反應示意圖
(由作者自行繪製)

(四) PAA/CNC 之Gel time分析

目的：

利用流變儀測量不同濃度的 PAA / CNC 並觀察是否有固化反應及了解固化所需時間。

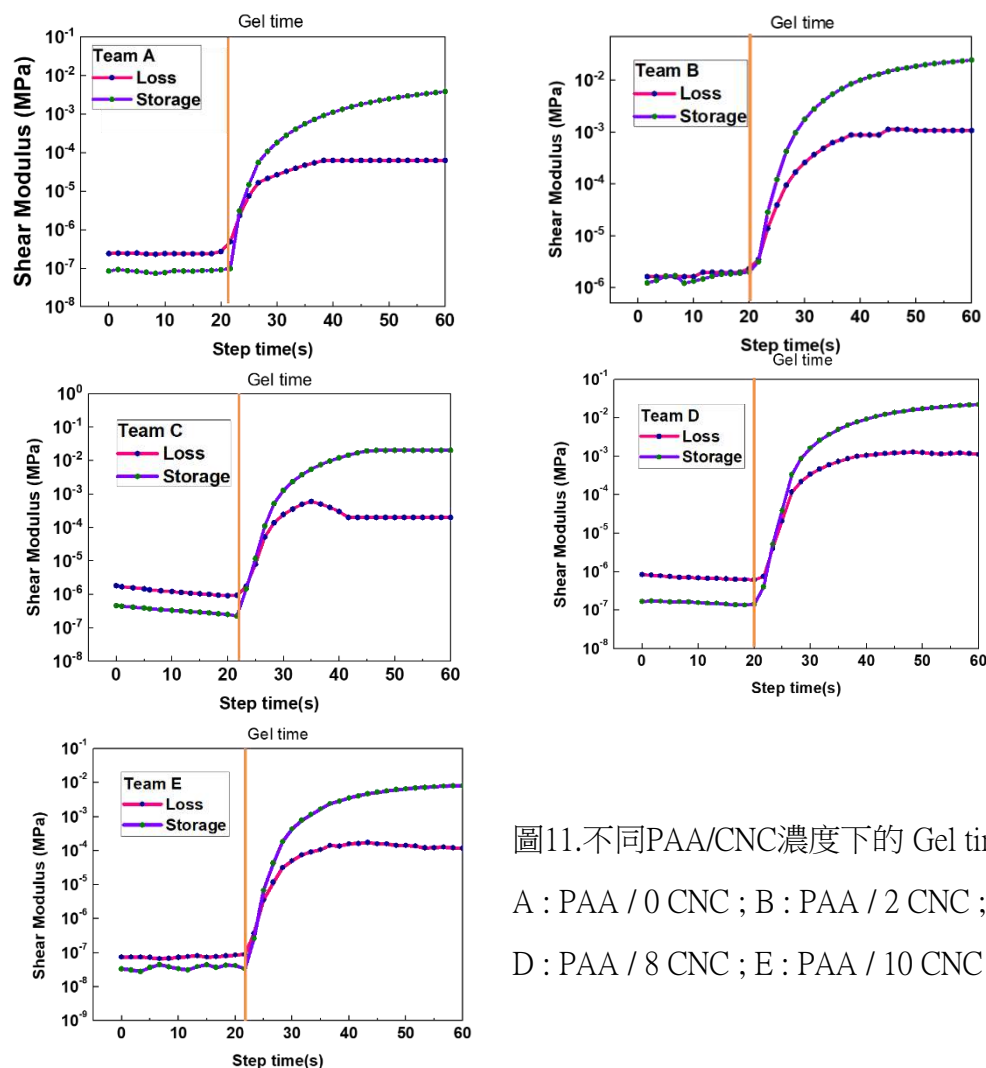


圖11.不同PAA/CNC濃度下的 Gel time 波峰值會不同
A : PAA / 0 CNC ; B : PAA / 2 CNC ; C : PAA / 4 CNC ;
D : PAA / 8 CNC ; E : PAA / 10 CNC 。 (由作者自行繪製)

說明：

1. 以流變儀去測量液體中的 Storage modulus (測量的材料的彈性模量)，透過觀察兩者變化，藉此來了解固化的狀況以及 Gel time。
2. Storage modulus 是一種彈力儲存能量的能力，Loss modules則是利用熱散失能量所帶來的能力。若當 Loss modules 大於 Storage modulus 則材料處於黏性液體狀，另外 Loss modules 小於 Storage modulus 則材料為彈性固態狀。
3. 在光固化材料照光前，材料都是處於液態狀態，在照光後因為 Storage modulus會漸漸超過 Loss modules，因此光固化材料固化。
4. 從其交叉的點上辨識 Gel time。本實驗我們是從20秒的時候開始照光，可以觀察到以UV光照，不同濃度的CNC皆可進行固化，並且固化時間約在5秒左右。
5. A組 PAA / CNC 的固化時間約在23.3秒，所以固化需時3.3s。

(五) PAA/CNC 水凝膠樣本之FTIR圖譜分析

目的:

透過穿透式傅立葉變換紅外光譜分析儀(Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR)觀察實驗樣品PAA與CNC的官能基。

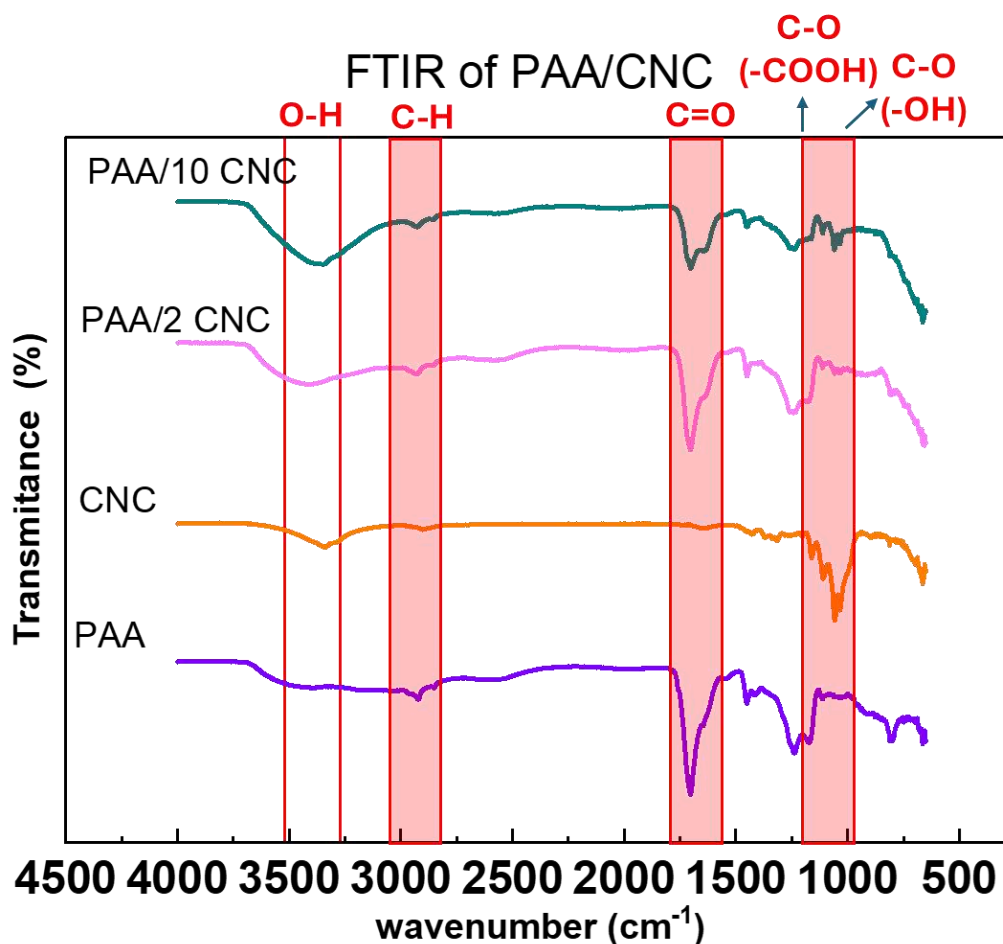


圖 12.不同PAA/CNC濃度下的FTIR 圖譜 (由作者自行繪製)

表5.FTIR 對應之官能基特徵峰值 [2][3] (由作者自行編製)

Frequency Range	Absorption (cm ⁻¹)	Appearance	Group
4000-3000 cm ⁻¹	3700-3584	medium, sharp	O-H stretching
3000-2500 cm ⁻¹	3000-2840	medium	C-H stretching
1500-2000 cm ⁻¹	1720-1740	strong	C=O stretching
1670-1600 cm ⁻¹	1648-1638	strong	C=C stretching
1600-1300 cm ⁻¹	1550-1500	strong	N-O stretching
1000-1250 cm ⁻¹	1124-1205	strong	C-O stretching

說明：

在這次研究中利用了四種不同比例PAA/CNC比例的樣品：

1.表6.詳細FTIR 對於HSF的官能基

Wavenumber(cm^{-1})	Place	官能基
1034	CNC	C-O(on C-OH)
1242	PAA	C-O(on COOH)
1700		C=O
2850	脂肪族飽和對稱	C-H
3250-3600		O-H

- 2.在加入CNC後在峰值 $3250\text{-}3600\text{cm}^{-1}$ 處發現隨著CNC含量的增加，OH峰值則越明顯，而因為OH變多，因此使得水凝膠更親水。
3. PAA / 2 CNC水凝膠在 1034cm^{-1} 處有一C-OH的峰值的peak變弱，甚至消失。因此可得知CNC中的-OH基與PAA中的-COOH基進行了酯化反應，讓C-OH基大部分都被消耗掉。
4. 隨著CNC的濃度上升，在PAA / 10 CNC時的 1034cm^{-1} 處有出現C-OH的峰值，和 1242cm^{-1} 處C-O(COOH上)的峰值的減少，明顯看出OH基無法被完全反應完，代表著在濃度 2 CNC和 10 CNC 中OH反應量，找出OH基沒有完全被反應完全的，使PAA / 10 CNC有更多OH基可以增進親水性。

(六)溶脹比 (Swelling Ratio)

目的:

為了觀察水凝膠的重量（W）隨著時間增加而產生的變化，於是將水凝膠再次泡入水中，把水凝膠表面的水分擦乾後秤重，並且以溶脹比公式算出各種不同濃度水凝膠隨著時間增加的溶脹比。

溶脹比公式：

$$\text{Swelling ratio} = (W - W_d) / W_d \times 100\%$$

低濃度CNC含量

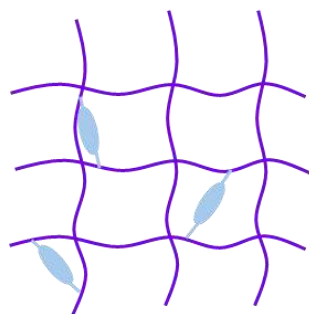


圖13. 低CNC 濃度的 PAA / CAA 交聯示意圖

(由作者自行繪製)

高濃度CNC含量

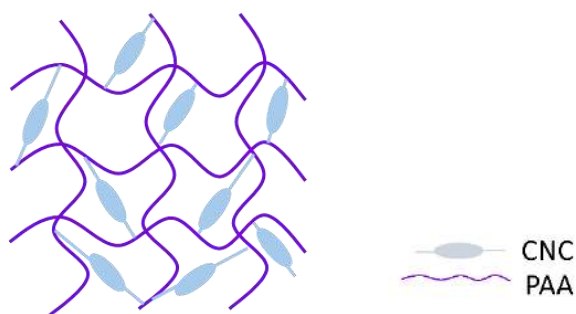


圖14. 高CNC 濃度的 PAA / CAA 交聯示意圖

(由作者自行繪製)

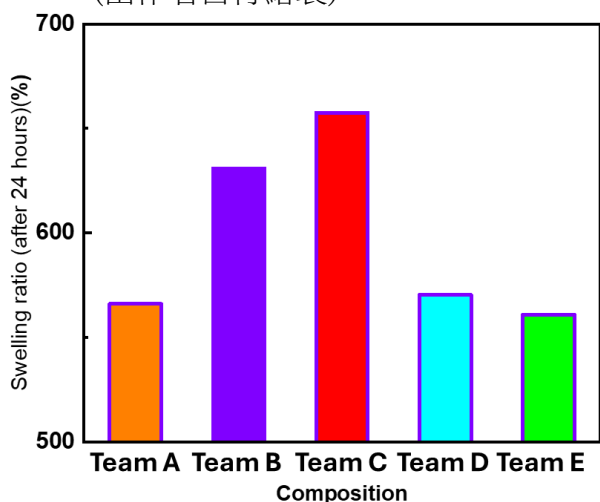


圖15. 不同PAA/CNC濃度的溶脹率

(由作者自行繪製)

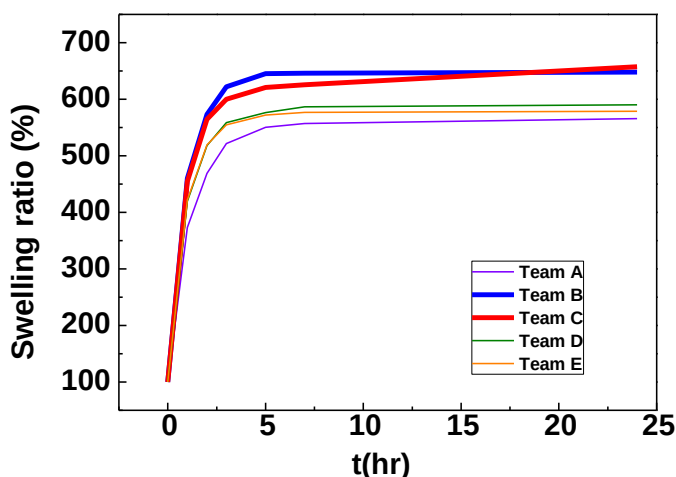


圖16. 不同PAA/CNC濃度經過不同時間的溶脹變化

(由作者自行繪製)

說明:

1. 從實驗結果中可得知隨著時間增加，發現水凝膠與水接觸後會有吸收大量水分的特性。PAA/CNC水凝膠在加入CNC多重交聯劑後增加溶脹比。
2. 因此證明PAA/CNC水凝膠提升吸水速度及吸收能力，溶脹比可達到 657%。有添加CNC的PAA水凝膠比沒有填料的PAA水凝膠吸收更多的水。因CNC含有許多OH基團，因此纖維素的親水性吸引水分子，水凝膠膨脹並將結構空隙膨脹打開，因此水分能夠不斷持續滲透，增加溶脹的程度。

說明:

- 3.在吸水反應中，水分子擴散到聚合物鏈中，促使聚合物鬆弛，誘導形成膠狀（溶漲）區域。
- 4.但PAA水凝膠在CNC濃度超過 PAA / 8 CNC時，反而較 PAA / 2 CNC 與 PAA / 4 CNC 產生較少的溶脹比。因為過量的交聯材料會導致形成緻密的基體，將會降低吸水速度和吸收能力，當加入越多CNC 時，便可大幅提升PAA / CNC水凝膠的交聯程度，因此最終本研究選擇使用 PAA / 10 CNC 作為親水水凝膠薄膜的製備材料。

(七)SEM分析

目的:

利用掃描式顯微鏡，觀察各個不同濃度的凝膠表面

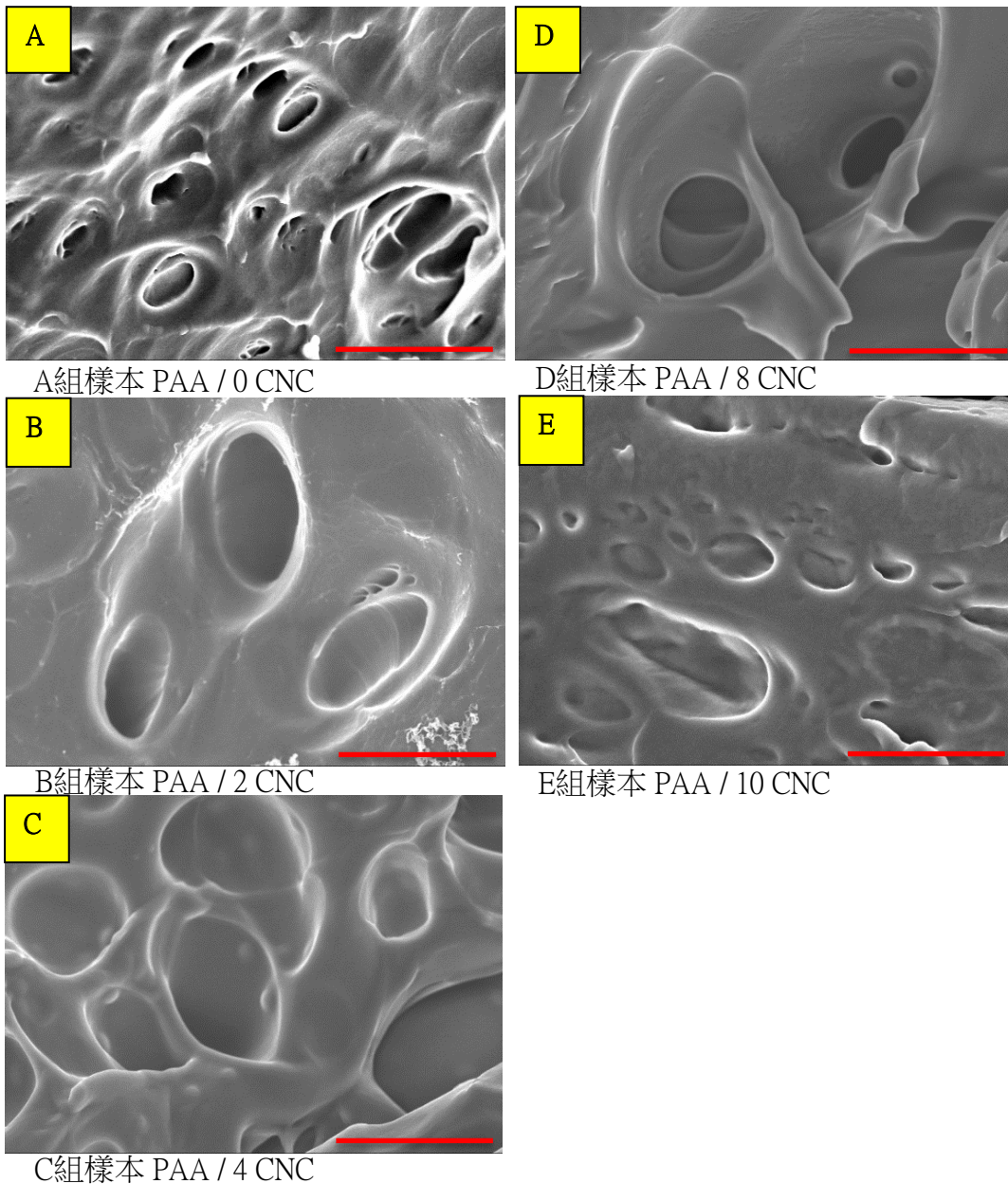


圖17.PAA / CNC 水凝膠薄膜之SEM橫切面圖（比例尺為 $20\ \mu\text{m}$ ）（由作者自行拍說明:

為了避免熱乾的過程中，因為處於乾燥狀態，在製樣的過程中的擠壓，導致SEM掃描無法觀察到孔洞結構。首先將 PAA / CNC 浸泡於水中兩天，使水凝膠呈現高溶脹，接著將水凝膠分成數個片狀結構，再進行氮氣凍乾程序，使其保留多孔的結構。經過以上步驟之後，便可以以SEM掃描進行各濃度 PAA / CNC 水凝膠斷面，隨著CNC濃度大小對於孔洞大小的改變並分析 CNC 和溶脹比的關係。

得到結果：

1: PAA / CNC 水凝膠是由類似海綿的多孔結構組成。其中又以 PAA / 4 CNC 擁有最大的孔洞，排序在第二的是PAA/2CNC。

2:對應水凝膠的溶解比：最高的是 PAA / 4 CNC，次高的是 PAA / 2 CNC。而 PAA / 0 CNC則是有最小的孔洞，溶解比也最小。

另外其他濃度比例的水凝膠也有符合溶漲比的趨勢。

(八)PAA / CNC 水凝膠之 DSC 熱分析

目的:為了將電極與織布的整合

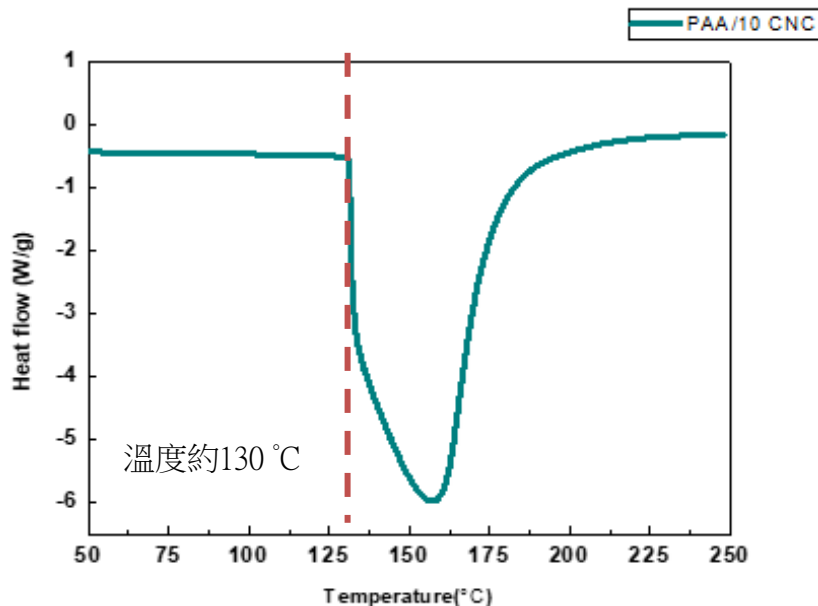


圖18.PAA / 10 CNC 之 DSC 分析圖 (由作者自行繪製)

說明:

在120 °C 熱壓15秒後進行熱壓式熱熔膠膜黏合，可將電極與織布進行整合。另外可用「差示掃描量熱法」(Differential scanning calorimetry, DSC)關注 PAA / CNC 親水薄膜在高溫熱壓的情形下 PAA / CNC 親水薄膜是否造成熔融或裂解等現象。

從實驗結果得知，PAA / 10 CNC 於約攝氏 130°C 始逐漸熔融，因此選擇不會因為在熱壓過程中熔融而失去其親水效果的 PAA / 10 CNC 進行實驗。

(九) EIS 潤濕面積分析

目的:

觀察薄膜在長時間下的親水性。

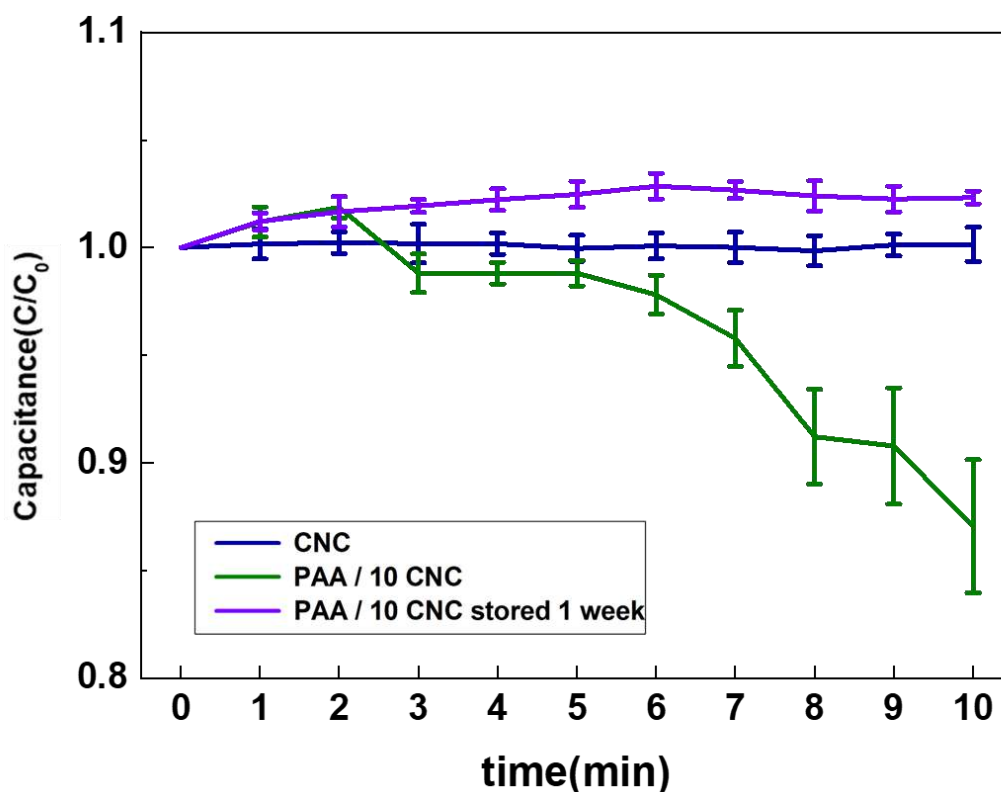


圖19. PAA / 10 CNC薄膜對於電極與織布間濕潤性的影響及實驗示意圖 (由作者自行繪製)

說明:

增加AA，可以發現 PAA / 10 CNC 十分鐘後電容值不改變，另外有明顯改善 CNC 易溶於水的特性，代表 CNC 和 PAA 的交聯可提升電極和織布間的濕潤性，也不會因為薄膜接觸到水後導致 CNC 溶於水而失去親水性。一周後的測定，雖然電容值的改變在容許的誤差範圍內，但發現仍然保有極好且穩定的濕潤性，因此可以確定此薄膜，使織布和電極間有濕潤性。

對比coating前後電容值是否隨時間改變而有所影響，從中可以發現:單純只有 CNC 還未coating之前，時間久了之後電容值會逐漸下降(因為CNC容易溶於水的特性)，而放置一周後的 PAA / 10 CNC 依然能保持穩定的狀態。因此可得之增加 AA 有助於穩定親水薄膜的穩固性。

(十)電阻與鹽度分析

目的:測量電擊與織布整合裝置對於不同氯化鈉濃度的變化

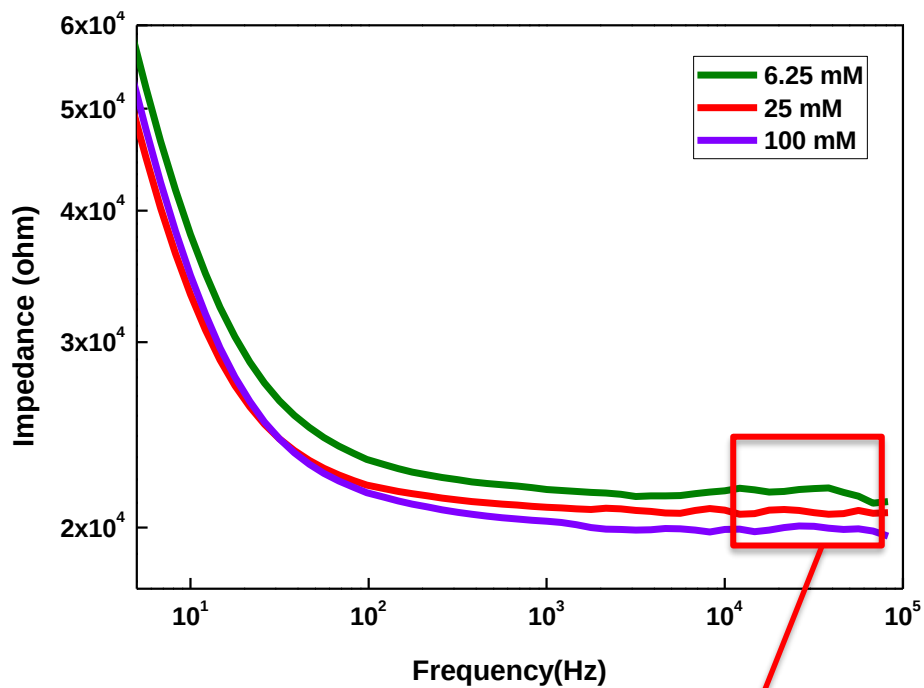


圖20.不同氯化鈉濃度下的阻抗圖 (由作者自行繪製)

說明:

1. 電阻在高頻的時候較穩定
2. 濃度愈高，則電阻值越小；
濃度愈低，則電阻值越大。

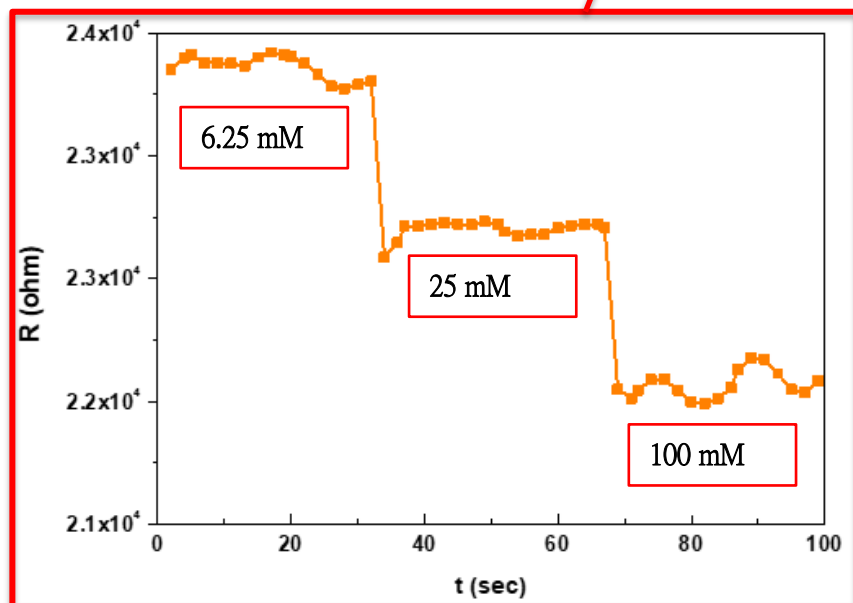


圖21.不同氯化鈉濃度下電阻和時間的關係圖 (由作者自行繪製)

說明:

利用電阻值差異分辨出 NaCl 的濃度大小

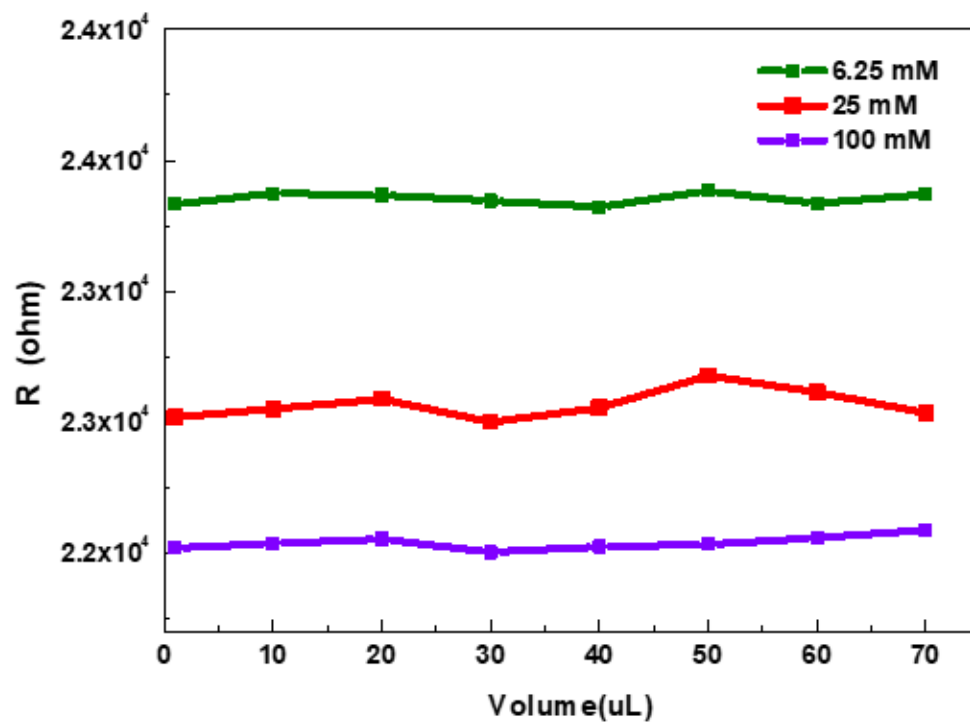


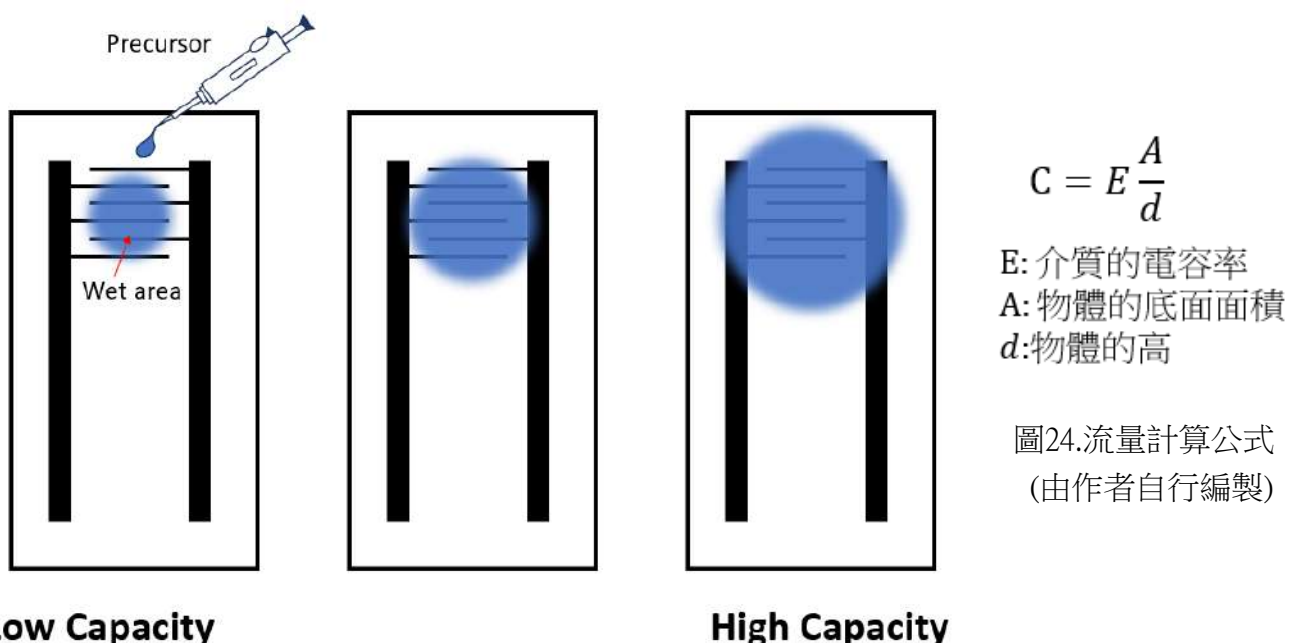
圖22.不同體積下各別 (6.25 mM、25 mM、100mM)濃度的電阻值變化
(由作者自行繪製)

說明:

1. 觀察添加的體積量不會影響電阻值。
2. 利用電阻值的不同，分辨出 NaCl 的濃度大小。

(十一)流量感測分析

目的:證明流量與濃度間的關係和測量獨立性



Low Capacity

High Capacity

圖23.流量感測實驗分析示意圖 (由作者自行繪製)

說明:

利用電容測量，在不同體積的汗液下，所影響的不同濕潤面積流量變化。

因為訊號變化小，可以從中觀察出水量變化率，如圖24.的公式。

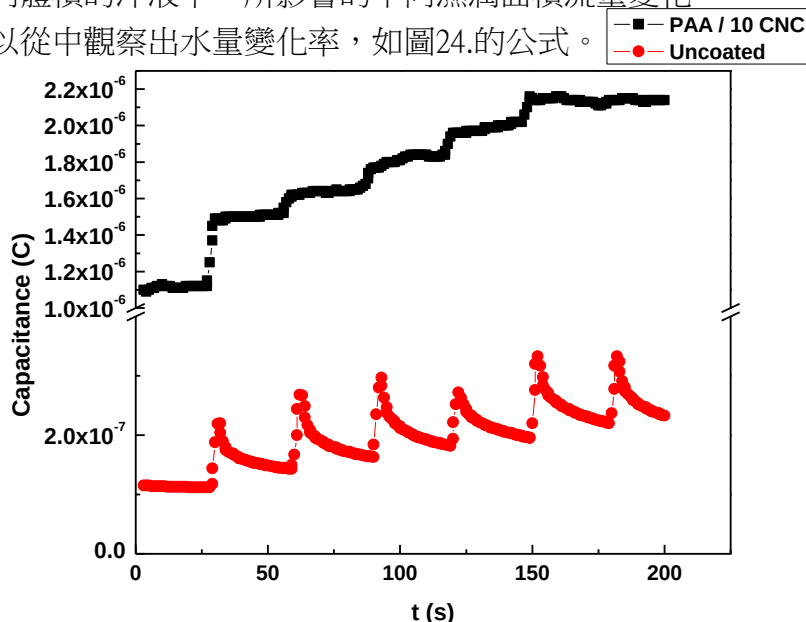


圖25.對親水薄膜進行相同注入量的滴定，觀察電容變化關係圖。

(上方線為已塗佈 PAA / 10 CNC 的電極; 下方線為未經塗佈的電極) (由作者自行繪製)

說明:

從此圖中可以看出在coating前後的電容穩定程度，因為有 coating 具有親水性的 PAA/ 10 CNC 在電極表面，因此可看出幅度較為平緩，以每30秒加5 μ L，從中可觀察到未 coating 的折線圖隨著溶液的增加，對比上方已 coating 的圖會呈現不穩定下降的趨勢，另外也可得知增加 Coated有助於更多水分子吸附。

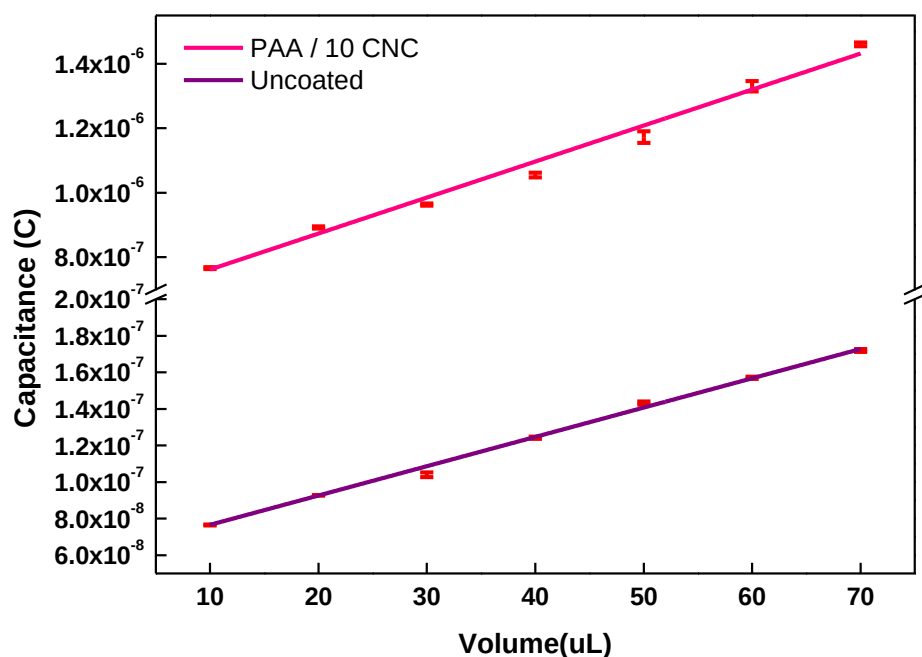


圖26.比較有 coating 和 non-coating 感測電極下的不同電容量。(由作者自行繪製)

說明:

1. 依照電容值以及體積變化，可以看出呈現正相關的線性。
(無論是有無 coating 的結果)
2. 有 coated 可助於訊號放大。(電容值較大) (Coated 有助於更多水分子吸

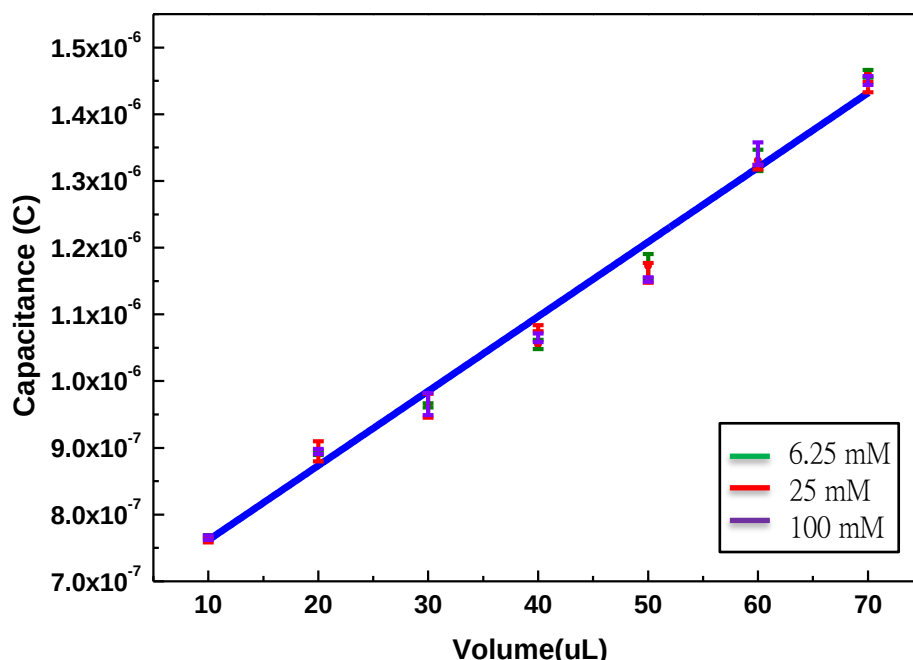


圖27. 比較有不同濃度 NaCl 的溶液的電容值變化。(由作者自行繪製)

說明:

隨著體積的增加，電容值不受濃度的不同而有所變化。

(十二) 以高親水性薄膜偵測汗液設計

對照組

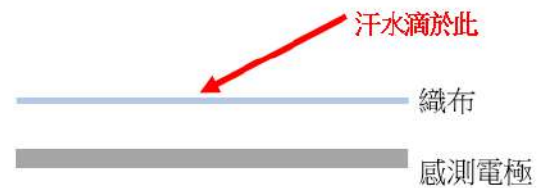
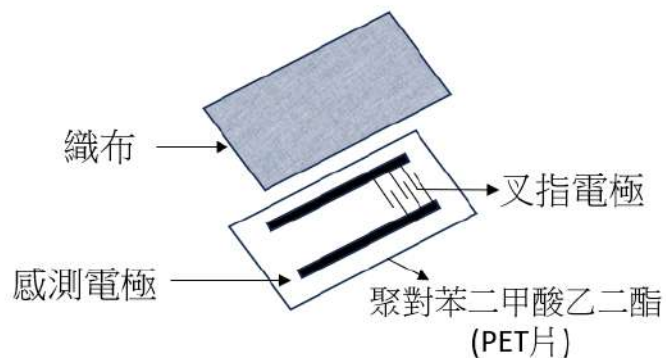


圖28. 高親水性薄膜偵測汗液設計對照組
(由作者自行繪製)

實驗組

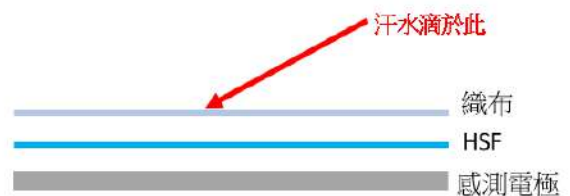
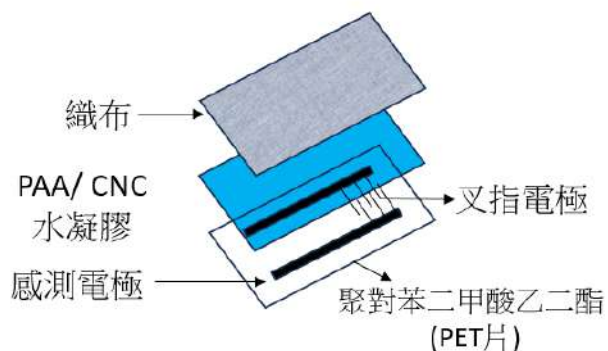


圖29. 高親水性薄膜偵測汗液設計實驗組
(由作者自行繪製)

說明:

設計一組實驗組和對照組，分別為有無 PAA / 10 CNC 水凝膠的設計圖。實際對比有無水凝膠的親水性薄膜，偵測汗液的量、收集狀況和影響。

經過實際比對，發現和觀察出:

1. 有無 PAA / 10 CNC 水凝膠的親水性薄膜的親疏水性有明顯的差距，影響了汗液的偵測。
2. 由於有塗佈 PAA / 10 CNC，因此 CNC 親水性的特性可以更加準確的偵測汗液的各項數據。

(十三) 電化學感測-氧化還原

目的:

了解循環伏安法的基本原理和電化學的實驗操作，並使用電化學一中循環伏安法的CV，觀測鐵和亞鐵的氧化還原反應。

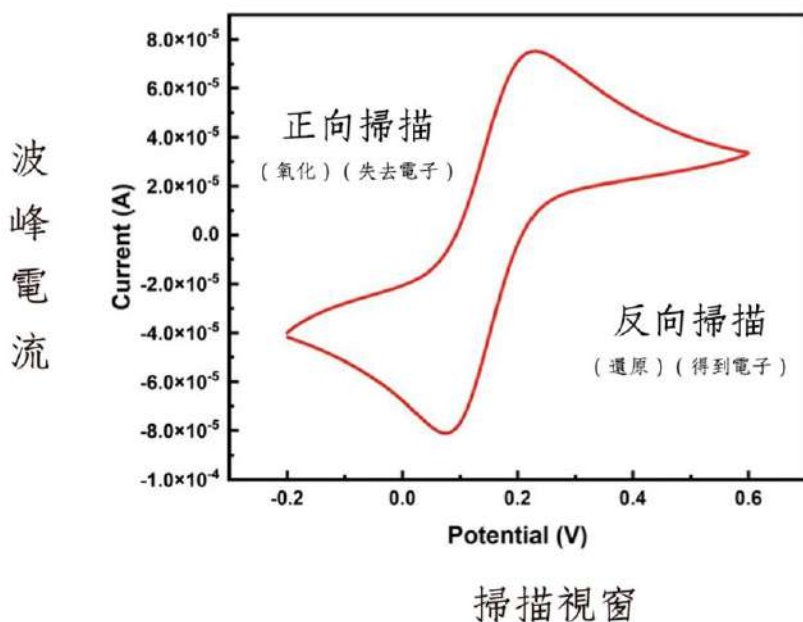


圖 30.氧化波峰電流值和電位是指從負電位開始往正電位進行掃描氧化反應時的最大氧化反應值。另外從相反方向進行量測，從正電位往負電位的方向掃描時，測得的就是還原波峰的電流值和電位。(由作者自行繪製)

說明:

從實驗的結果可證明在氧化反應時，電極將失去電子，而從電極得到電子則稱為還原反應。

利用循環伏安法測量電池改變電壓的電流值。測量中發現波峰間的分離代表電極表面具有不可逆的電子轉移。從負電位往正電位為正向掃描，而相反方向掃描則反向掃描。

Randles - Sevcik 方程式

$$ip = (2.69 \times 10^5) n^{\frac{3}{2}} A D^{\frac{1}{2}} C v^{\frac{1}{2}}$$

圖31.為波峰電流和掃描速率之間的關係(由作者自行繪製)



圖32.為波峰電流和掃描速率之間的關係(由作者自行繪製)

二、實時無線汗液分析

(一)汗液監測器成品(由作者自行拍攝)



圖33.智慧無線汗液感測衣物正面(由作者自行拍攝)

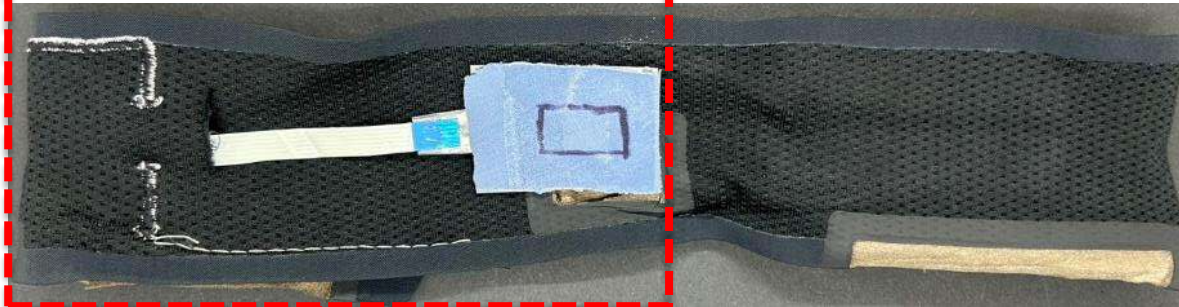


圖34.智慧無線汗液感測衣物反面(由作者自行拍攝)

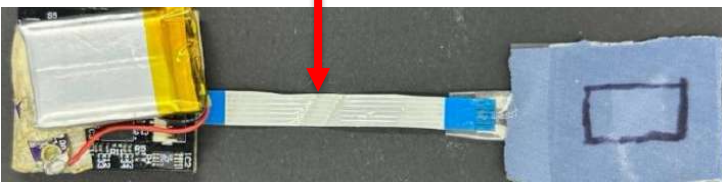


圖35.汗液監測感測器正面
(由作者自行拍攝)



圖36.汗液監測感測器反面
(由作者自行拍攝)

說明:

結合塗佈過 PAA/ 10 CNC 溶液的汗液監測感測器與織布，利用軟排線和行動裝置進行連接，以利汗液實時地被監測、觀察受測者的汗液各項數值，最後再放入設計好的吸水頭帶。利用完成的智慧頭帶感測器進行實際的操作、穩定效果、彙整汗液流量及濃度的範圍數值，以達到未來實際應用的效果和準確性。

(二)模擬汗液反應實際監測的氯化鈉濃度校正

目的:

校正出不同 NaCl 濃度，求得校正線，以利得知隨著濃度改變的電阻值，提升實時感測的離子濃度準確性。

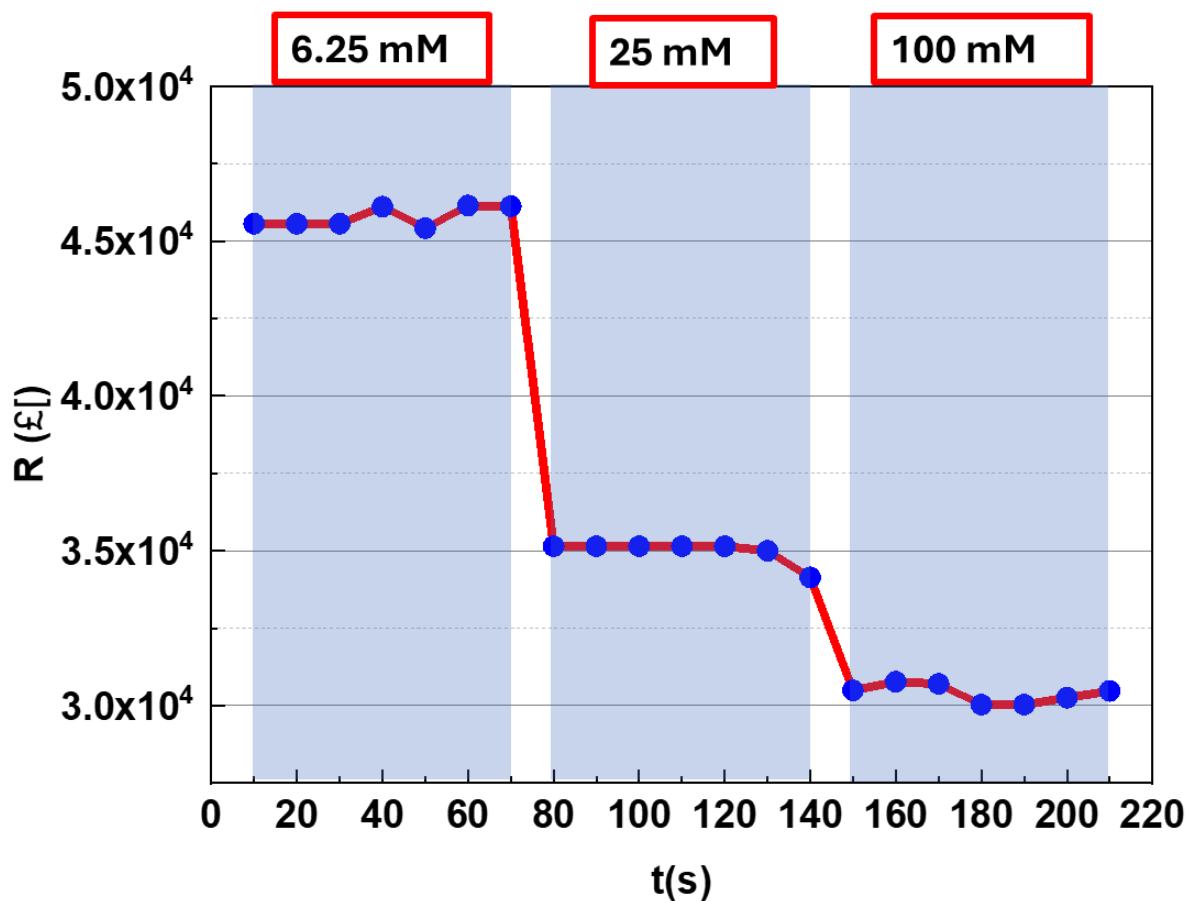


圖37. NaCl(aq) 濃度利用汗水感測器的校正前後對比(由作者自行繪製)

說明:

為了實際應用智慧衣物，校正各項數據更能順利監測數值準確度。

利用調配不同濃度的 NaCl 測量電阻值，計算出一條校正線，以利準確實時監測受測者的汗液離子濃度。

(三)模擬汗液反應實際監測的流量校正

目的:

校正出不同 NaCl 流量，求得校正線，以利得知隨著流量改變的電容值，提升實時感測的流量準確性。

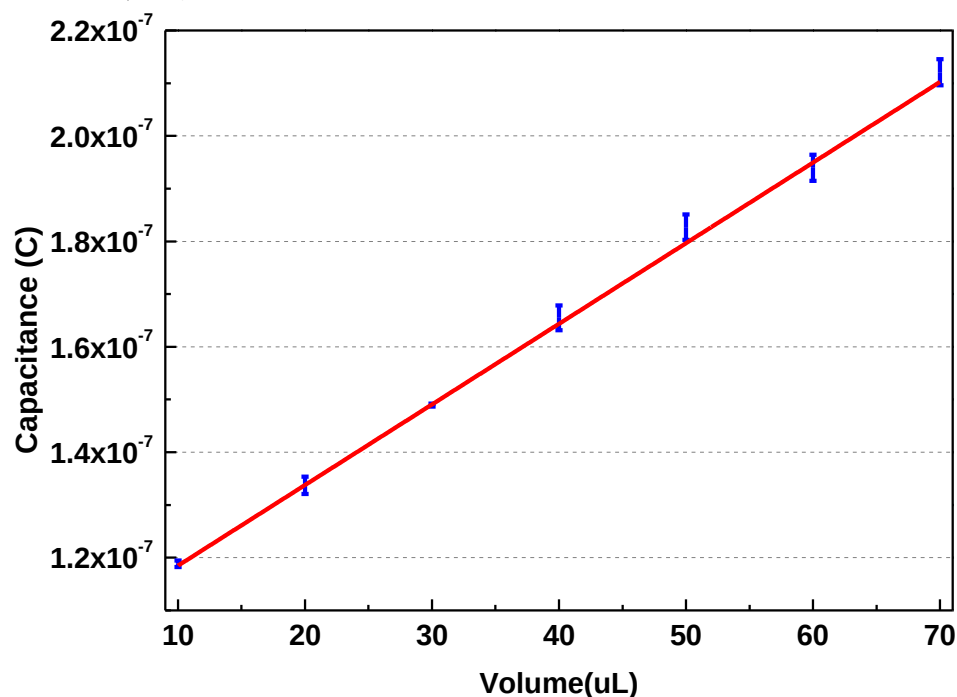


圖38.測量不同體積 NaCl(aq) 電容數值，得知流量利用汗水感測器的校正前後對比 (由作者自行繪製)

說明:

利用不同 NaCl(aq) 流量測量電容值，計算出一條校正線，以利準確實時監測受測者的流量感測。隨著時間的增加，當加入不同體積的氯化鈉水溶液時，可以使電容值在數秒內達到恆定值的狀態。但是必須保持在測試序列中，每個速率變化的反應時間大約在 30 秒。在實驗中，必須保持收集器能夠徹底吸收液體而不會溢出，並有效將流體輸送到電極上，才能將訊號發送到晶片，再將得到的流量分析。

(四)不同NaCl濃度改變的連續性測試

目的:

觀察 NaCl 在濃度改變下的測試。

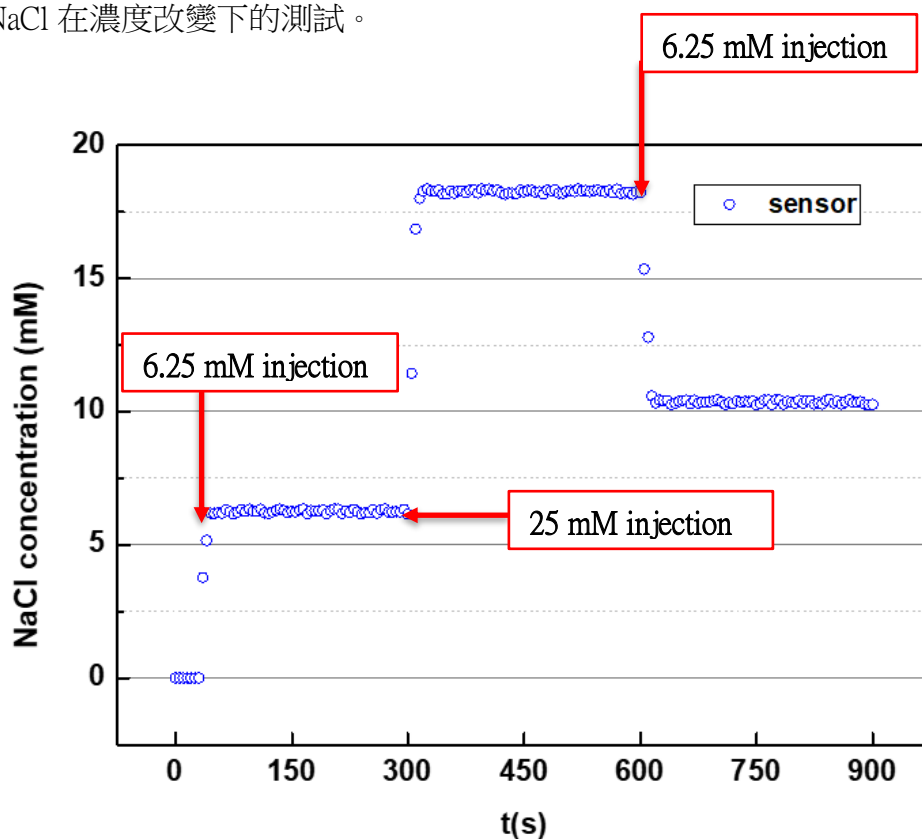


圖39.測量不同濃度 NaCl(aq) 的電阻數值，得知濃度利用汗水感測器的校正前後對比
(由作者自行繪製)

說明:

1. 圖39中，從第30秒當加入6.25 mM氯化鈉溶液時，電極很快就感測到 6.25mM 的濃度
2. 第300秒加入25 mM 之NaCl溶液，數值卻顯示約18mM的濃度。織布已先浸過6.25 mM 之溶液，而加入25 mM 之溶液時，兩者會相互混合，導致濃度數值下降。
3. 第 600-900 秒的濃度也是因被先前濃度稀釋而數值有所落差。然而我們仍能觀察出待測物的濃度穩定地隨時間變化，且變化在短時間就能達到穩定值。

另外本研究吸汗布與改質後的電極直接黏合，以達到立即性的感測使得遲滯時間較短，具有靈敏性。更有效了解到待測物的汗水流量及離子濃度變化趨勢。

(五) 不同 NaCl 流量改變的連續性測試

目的:

訂定預期值，並觀察比較實際流量值。

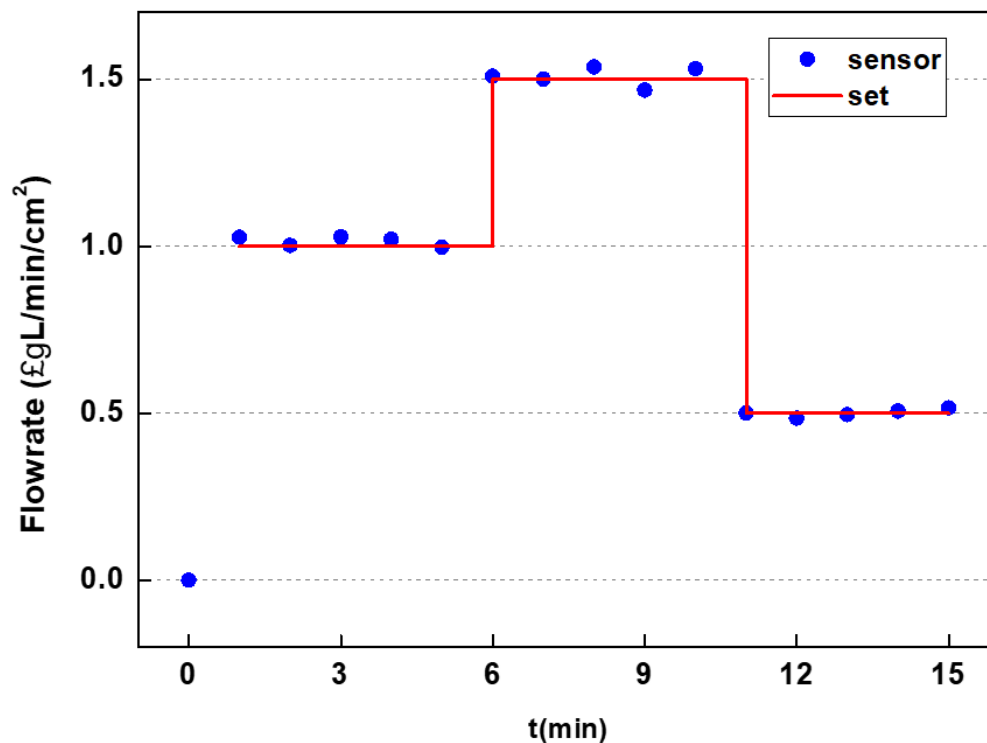


圖40.NaCl_(aq)流量利用汗水感測器的校正前後對比(由作者自行繪製)

說明:

圖40中我們可以觀察到 NaCl_(aq) 流量之測量結果與預設值相近，誤差小於5%。此外，該測試序列中每個速率變化步驟的響應時間均小於30 秒，隨著時間加入不同體積之氯化鈉水溶液時，短時間電容值變化便達穩定值。從中此實驗可以證明收集器能夠完全地吸收液體並且不會溢出，以利有效地進行準確分析待測物的流量分析。

(三)測試實時監測感測器結合於智慧衣物

目的:

實時監測感測器結果。

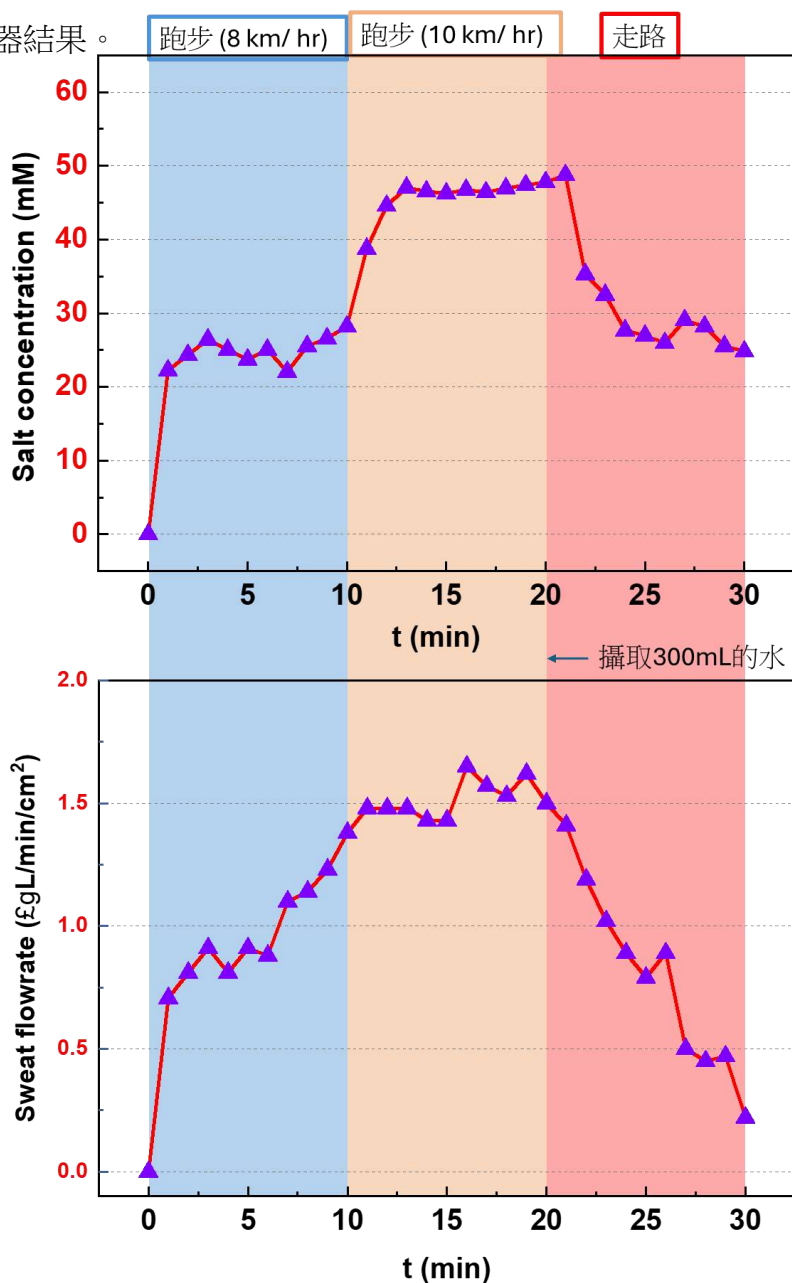


圖41.NaCl的濃度和流量利用汗水感測器的實際測試。(由作者自行繪製)

說明:

此項分析可以分成三個部分，分別為以每小時八公里的速度跑十分鐘，再以每小時十公里的速度跑十分鐘，最後補充 300毫升 的水後以較慢的行走方式運動。

結果:

0~10(min):隨著跑步時間增加，身體為能適時的散熱和排放多餘熱量，增加排汗速率。

10~20(min):隨著跑步速率的增加，出汗量以及汗液濃度都有所增加，劇烈的運動，促使身體排放更大量的熱量，而提高了出汗量；汗液的濃度則是因為電解質的吸收能力受到出汗量的影響而下降。

伍、討論

一、HSF的高親水性薄膜特色如下：

(一) 使用綠色材料合成 (Green material)

CNC，全名為纖維素奈米晶體（Cellulose nanocrystals, CNCs），是一種源自樹木的天然材料。透過將木材切碎、研磨，再經過純化及酸水解處理，纖維素可製成纖維素奈米晶體（CNC）。由於CNCs具有生物可降解性、可再生性、可持續性和優越的機械性能，它們在生物醫學、光子學和材料工程等領域擁有廣泛的應用。本研究採用光固化技術，將PAA與CNC交聯，成功塗覆於PET基板上，並使處理後的PET成為超親水材料。由於CNCs來自天然資源，因此我們的HSFs可被視為一種環境友好的綠色材料。[4]

(二) 薄膜的超親水特性，使汗液偵測穩定

在加入 CNC 後，其薄膜呈現高度親水性，具穩定性和親水性，可使汗液偵測過程呈現穩定且不會被 CNC 溶於水的特性所影響，保留了 AA 和 CNC 的特性和優點。

(三) 薄膜的延展性佳，使其完全貼合皮膚

延展度佳，可以使高親水性薄膜感測器貼合皮膚，提升感測過程精準度。

二、利用電阻測量 NaCl 濃度的大小

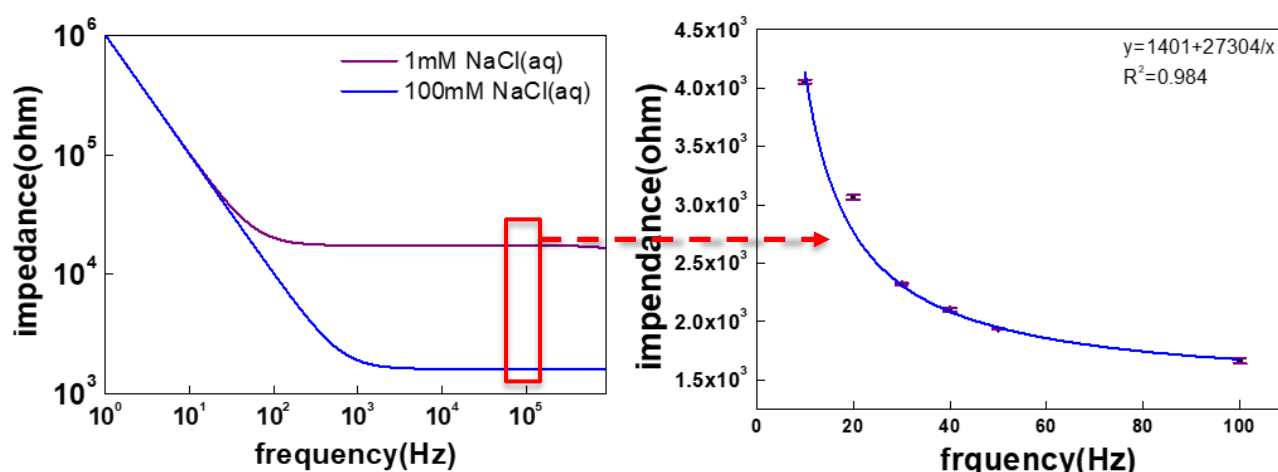


圖42.不同濃度下的 NaCl 在隨著頻率的改變時的電阻變化過程(由作者自行繪製)

三、利用電容測量NaCl流量大小

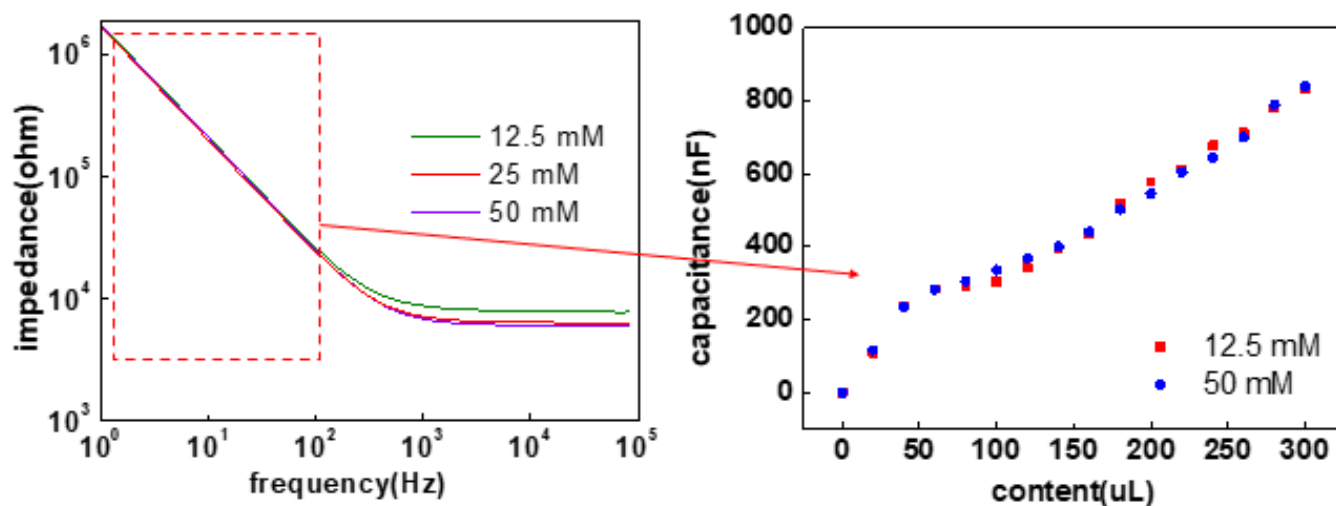


圖43.不同濃度下，訊號變化不同時，觀察水量的變化率 ($C = E \frac{A}{d}$)。(由作者自行繪製)
在量測汗液流量大小的研究中，可以看出使用不同模擬汗液溶液中的NaCl濃度大小不同時，在頻率低時對於電容影響不大，反而與流量(體積)較為相關。

四、CNC的親水性

(一)

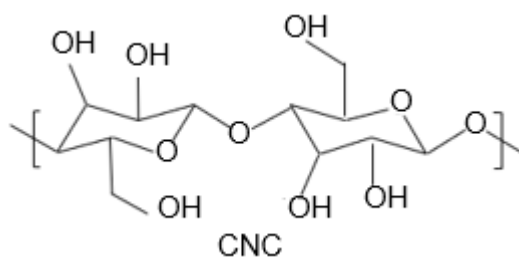


圖44. CNC結構式(由作者自行繪製)

(二) OH 基容易溶於水，因此具有許多OH官能基的高親水性 CNC 溶於水導致汗水感測時親水薄膜失去作用，無法長期使用及監測。

(三)在親水薄膜製作過程中添加 AA 丙烯酸單體(Acrylic Acid)，固定 CNC 在電極上的穩定度

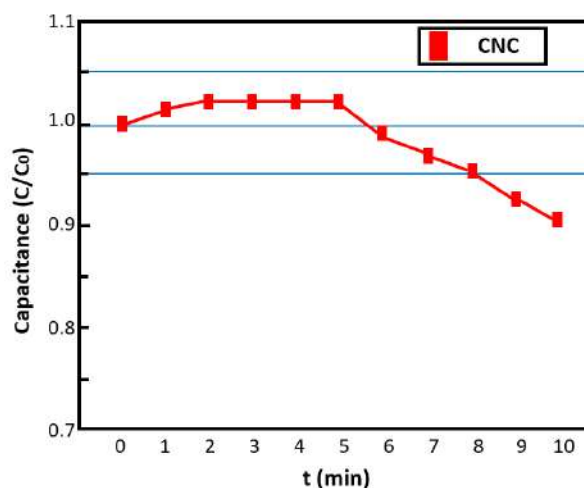


圖45. CNC 隨著時間的增加，電容逐漸減少的過程。(由作者自行繪製)

陸、結論

（一）薄膜特性分析

1. 利用不同比例的 CNC 含量，和電極進行結合，並觀察濃度對於親疏水性的外觀差異以及各項調查的數值關係，從而推得，含有較高比例的 PAA / 10 CNC 的親水薄膜可以最為最佳薄膜濃度範本。
2. PAA / 10 CNC 的 CNC 含量較多，親水能力較其他組別好。

（二）於PET基板coating五種薄膜之樣本接觸角實驗

1. 經過觀測發現量測接觸角度值愈大，則愈疏水；而若量測接觸角度值愈小，則愈親水。
2. 合成不同濃度親水溶液，並將其合成在PET片上進行實驗，觀察外觀的差異，利用高倍率相機進行觀察、量測以及紀錄。從而看出 PAA / 10 CNC 以4.56的最小接觸角，取得作為最親水性的代表。

（三）合成PAA/CNC水凝膠的化學反應過程示意圖

1. 藉由結構式的觀察，可以更深入探討每個材料的功用及互相反應的過程。
2. 從中也得知進一步處理 CNC 因具有易溶於水的 OH 官能基，所導致在量測過程中量測不穩定且使用後期可使親水薄膜失去作用，因此以添加具有黏合性的AA單體作為固定CNC穩定的解決方案。

（四）PAA/CNC 之 Gel time 分析

1. 利用流變儀觀測不同濃度所需要的固化時間，從而得知材料從 Storage modulus 進入到 Loss modules，便是處於彈性固態的狀態。
2. 從中可以看出固化時間沒有明顯的差別。

（五）五種 PAA / CNC 水凝膠樣本之 FTIR 圖譜分析

1. 利用穿透式傅立葉轉換紅外線分析儀，觀察隨著波數的增加，溶液的官能基含量比例。藉此推得溶液中含有的官能基。
2. 在介於1500~1750的範圍有明顯的波峰，對應到官能基峰值表，可以推的含有 C=O官能基的含量多寡；在介於 1000~1500 的範圍有明顯的波峰，對應到官能基峰值表，可以推得含有 C-O（-COOH）官能基的含量多寡，進行不同親水薄膜樣本濃度之間的比較。

(六) 溶脹比 (Swelling Ratio)

1. 溶脹比為水凝膠的重量隨著時間增加的變化。
2. 觀察不同PAA/CNC濃度的溶脹率關係和經過不同時間的溶脹率的變化，PAA/CNC 水凝膠在加入CNC多重交聯劑後增加溶脹比。明顯看出 0 CNC和不
論是2 CNC 或 4 CNC 或 8 CNC 或 10 CNC，有添加CNC的PAA水凝膠比沒有填料的PAA水凝膠吸收更多的水。

(七) EIS 潤濕面積分析

1. 觀察有無CNC和有添加CNC，經過時間的增加，親水性的數值(電容值)會跟著減少。另外，若將已經Coating過的親水薄膜放置一周，則不受影響，依舊保持穩定的狀態。
2. 沒有塗佈 PAA 的電容值明顯下降。

(八) 感測汗液濃度

1. 離子濃度愈高，電阻值愈小，從中可以觀察到【電阻和濃度成反比】。

(九) 感測汗液流量

1. 離子濃度愈高，電阻值可以由 $C = E \frac{A}{d}$ 此公式進行計算。

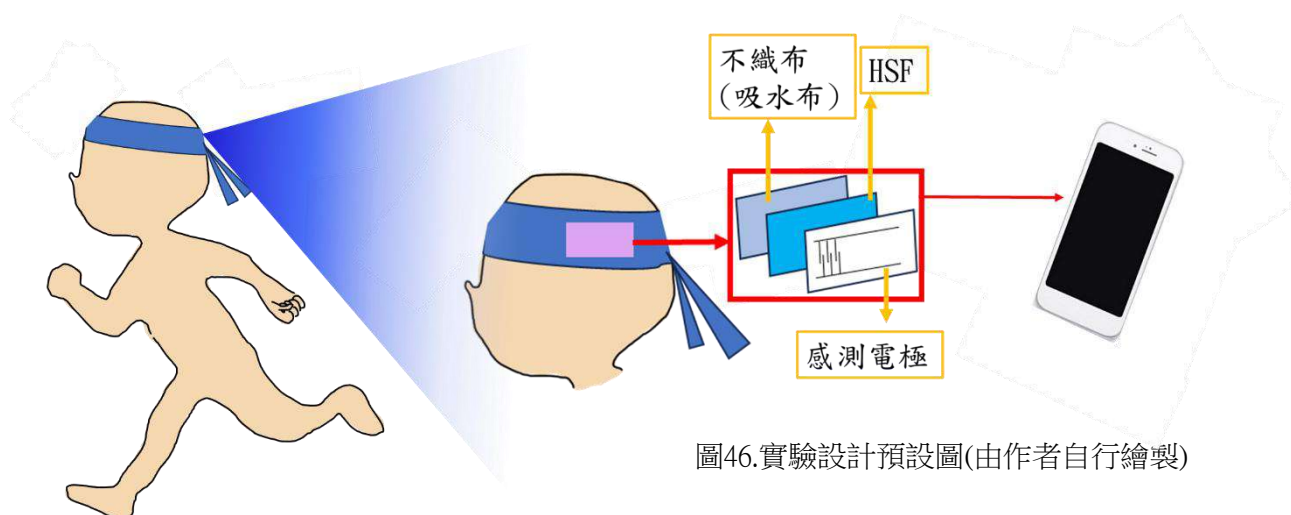
(十) 以高親水性薄膜偵測汗液設計

1. CNC親水性的特性可以準確的偵測汗液的各项數據。

(十一) 電化學感測-氧化還原

1. 利用赤血鹽和黃血鹽進行混合觀察，並且使用電化學儀中循環伏安法的CV，觀測鐵和亞鐵的氧化還原反應。

(十二) 結合智慧頭帶，並計算出校正線，以及進行連續性測試，以利實時監測的準確性。



柒、參考資料及其他

- [1] Lindsay B. Baker Physiology of sweat gland function: The roles of sweating and sweat composition in human health. *Temperature* (Austin). 2019; 6(3): 211 – 259. Published online 2019 Jul 17. doi: 10.1080/23328940.2019.1632145. PMCID: PMC6773238. PMID: 31608304
- [2] (MERCK , 2023 , IR SPECTRUM TABLE BY FREQUENCY RANGE)
- [3] FTIR Functional Group Database Table with Search - InstaNANO.<https://instanano.com/all/characterization/ftir/ftir-functional-group-search/> (accessed April 4th, 2024).
- [4] Abbasi Moud A. Advanced applications of cellulose nanocrystals: a mini review . *ChemRxiv*. 2022; doi:10.26434/chemrxiv-2022-0cckl This content is a preprint and has not been peer-reviewed.

【評語】 100020

這份研究報告探討高親水薄膜以提升汗液感測之靈敏度，在研究架構、內容和實用性方面都表現出色，使用 CNC 作為環保材料的選擇，符合當前可持續發展的趨勢，且對於未來的智能穿戴設備發展具有重要的參考價值。