

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

CHÂU NGỌC MAI

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VẬT LIỆU POLYME VI CẤU TRÚC  
ỨNG DỤNG PHÁT TRIỂN  
THIẾT BỊ PHÁT ĐIỆN NANO MA SẮT

Ngành: Kỹ thuật Vật liệu

Mã ngành: 9520309

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2024

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn 1: TS. LA THỊ THÁI HÀ

Người hướng dẫn 2: TS. BÙI VĂN TIẾN

Phản biện độc lập:

Phản biện độc lập:

Phản biện:

Phản biện:

Phản biện:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại

.....  
.....

vào lúc          giờ          ngày          tháng          năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia Tp.HCM
- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM

# CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

## 1.1 Tính cấp thiết

Thiết bị phát điện nano ma sát (triboelectric nanogenerator – TENG) là công nghệ mới hiệu quả nhất để thu hồi chuyển hoá năng lượng cơ học cho đến ngày nay bởi nó có thể chuyển đổi năng lượng cơ học không ổn định như chuyển động hàng ngày của con người (chạm tay, đi bộ) và các hiện tượng tự nhiên (gió, sóng, mưa) thành điện năng dựa trên hiệu ứng ma sát điện và cảm ứng tĩnh điện. Bên cạnh nhiều ưu điểm bao gồm TENG được chế tạo đơn giản, giá thành thấp và có khả năng chế tạo từ nhiều loại vật liệu khác nhau, hiệu quả phát điện đầu ra của TENG vẫn còn hạn chế, giới hạn khả năng mở rộng ứng dụng của TENG trong các lĩnh vực thực tế. Để cải thiện điều này, nhiều nghiên cứu đã chứng minh việc chế tạo các vi cấu trúc micro, nano có thể giúp cải thiện hiệu quả phát điện đầu ra của TENG nhờ tăng diện tích ma sát hiệu dụng và giảm mức độ thất thoát điện tích của vật liệu ma sát. Trong đó, vi cấu trúc được nghiên cứu chế tạo rộng rãi nhất được chứng minh cải thiện nhiều lần hiệu quả của TENG là cấu trúc xếp nhờ vào tỉ lệ surface-to-volume cao và có nhiều lỗ xốp như các “hồ trữ điện” hạn chế thất thoát điện tích, nhưng lại có diện tích tiếp xúc bề mặt nhỏ, cơ tính và độ bền rất kém, rất dễ bị phá huỷ cấu trúc khi TENG hoạt động thời gian dài. Cấu trúc bề mặt micropattern cung cấp diện tích ma sát bề mặt hiệu dụng lớn, cơ tính cao, khả năng các micropattern biến dạng theo chiều ngang lớn, nhưng không thể lưu giữ điện tích nên dễ xảy ra thất thoát ra môi trường, làm giảm hiệu quả phát điện của TENG. Ngoài ra, việc lựa chọn loại polyme có các nhóm chức cho/nhận điện tử cũng đóng vai trò quyết định đến hiệu quả phát điện đầu ra của TENG. Do đó, Luận án Tiến sĩ này được thực hiện với tiêu đề “**Nghiên cứu chế tạo vật liệu polyme vi cấu trúc ứng dụng phát triển thiết bị phát điện nano ma sát**” nhằm chế tạo các vật liệu vi cấu trúc mới trên các loại polyme khác nhau và đánh giá khả năng phát điện của chúng. Từ đó, chọn ra loại vật liệu vi cấu trúc có hiệu quả phát điện cao nhất, phù hợp với từng ứng dụng trong thực tế.

## 1.2 Mục tiêu nghiên cứu

**Mục tiêu chung:** Chế tạo thành công màng vi cấu trúc cho TENG hiệu năng cao, và phát triển các ứng dụng của TENG trong thực tế

Từ mục tiêu chung này, các mục tiêu cụ thể của đề tài như sau:

- Tận dụng tối đa nguồn nguyên liệu phế thải chế tạo thành công các màng cấu trúc honeycomb trật tự cao, vừa có khả năng phát điện tốt, vừa có thể làm khuôn mẫu, có giá trị sử dụng cao theo hướng kinh tế tuần hoàn, giảm ô nhiễm môi trường;
- Chế tạo thành công màng vi cấu trúc convex dựa trên khuôn lõm trật tự cao và màng vi cấu trúc spongy, có khả năng phát điện tốt, và làm tiền đề cho loại cấu trúc mới;
- Chế tạo thành công màng hybrid convex-spongy có hiệu quả cao nhất cho TENG hiệu năng cao;
- Thiết kế và chế tạo thành công một số ứng dụng thực tế dựa trên TENG.

## 1.3 Nội dung nghiên cứu

Luận án bao gồm 04 nội dung chính sau:

- **Nội dung 1:** Khảo sát và chế tạo thành công màng honeycomb trật tự cao bằng phương pháp IPS, đánh giá tính chất và khả năng phát điện của màng, chế tạo thiết bị thu năng lượng từ các màng honeycomb.
- **Nội dung 2:** Khảo sát và chế tạo màng convex trên khuôn honeycomb trật tự cao, đánh giá tính chất và khả năng phát điện của màng, chế tạo thiết bị thu năng lượng từ các màng convex.
- **Nội dung 3:** Khảo sát và chế tạo màng xốp spongy, đánh giá tính chất và khả năng phát điện của màng.
- **Nội dung 4:** Khảo sát và chế tạo màng hybrid sử dụng phương pháp IPS  $\mu\text{M}$ , đánh giá tính chất và khả năng phát điện của màng.

## 1.4 Ý nghĩa của luận án

Thiết bị phát điện ma sát TENG xuất hiện như một hướng đi hoàn toàn mới với tiềm năng thực hiện ước mơ biến chuyển động hằng ngày của con người hoặc

năng lượng gió, sóng biển vô tận thành điện năng sử dụng được, giảm thiểu sự khai thác quá mức của nhiên liệu hoá thạch truyền thống. Tuy nhiên, vẫn chưa có nhóm nhà nghiên cứu nào thực hiện toàn bộ nghiên cứu về TENG ở Việt Nam. Nghiên cứu về thiết bị phát điện nano ma sát TENG hiệu năng cao hứa hẹn sẽ được ứng dụng làm các thiết bị thu năng lượng vô tận, đưa giấc mơ tái tạo năng lượng sóng và gió vô tận thành điện năng, sử dụng các thiết bị thông minh không cần pin truyền thống, giải quyết vấn đề năng lượng toàn cầu.

### **1.5 Đóng góp của luận án**

Trong luận án này, các vi cấu trúc bao gồm xốp honeycomb, convex đồng đều, trật tự cao, và xốp spongy đã được chế tạo thành công bằng phương pháp Improved Phase Separation (IPS) và IPS micromolding mới được đề xuất, và cũng đã khảo sát hệ thống ảnh hưởng của các thông số chế tạo đến cấu trúc nhằm nâng cao tối đa khả năng phát điện của thiết bị TENG. Cấu trúc hybrid convex-spongy lần đầu được đề xuất và chế tạo bằng phương pháp IPS micromolding và ứng dụng vào TENG. Từ đó, luận án đề xuất cơ chế hình thành các vi cấu trúc nêu trên. Ngoài ra, luận án đã chứng minh và đề xuất cơ chế tăng cường hiệu quả tăng cường hiệu điện thế đầu ra của các vi cấu trúc, đặc biệt là cấu trúc hybrid convex-spongy mới. Cuối cùng, TENG được chế tạo và ứng dụng vào các thiết bị thực tế nhằm đưa các nghiên cứu ở phòng lab đến gần hơn với cuộc sống con người. Trong đó, các ứng dụng đã được luận án thử nghiệm thành công bao gồm thiết bị thu hồi năng lượng từ giọt nước mưa, năng lượng sóng biển, và năng lượng cơ học từ các máy móc.

### **1.6 Tính mới của luận án**

Khi thế giới đang hướng đến năng lượng xanh, sạch, thay thế nguồn năng lượng hoá thạch truyền thống, thiết bị phát điện nano ma sát TENG được cho là công nghệ mới nhất và hiệu quả nhất cho đến ngày nay nhưng lại chưa được nghiên cứu rộng rãi ở Việt Nam. Luận án này có thể được xem là nghiên cứu tiền đề, mang công nghệ mới này vào Việt Nam. Đồng thời, để tăng cường tối đa hiệu điện thế đầu ra của TENG, nghiên cứu này sử dụng phương pháp phân pha nâng cao IPS được phát minh vào năm 2019, và đề xuất phương pháp IPS micromolding

mới để chế tạo màng cấu trúc. Trên thế giới hầu như chưa có nghiên cứu nào khảo sát hệ thống ảnh hưởng của các yếu tố đến khả năng tạo vi cấu trúc bằng phương pháp IPS này, cũng như chưa khám phá được tiềm năng ứng dụng của nó trên các loại nhựa phế thải, góp phần bảo vệ môi trường. Cấu trúc hybrid convex-spongy và phương pháp IPS $\mu$ M cũng lần đầu tiên được đề xuất, chưa được công bố trước đây. Ngoài ra, nghiên cứu này cũng tập trung vào thiết kế và chế tạo các thiết bị thực tế, hứa hẹn sẽ đem lại hiệu quả tích cực và mang công nghệ tiềm năng này vào thực tế đời sống con người. Khả năng ứng dụng của TENG cũng là mặt hạn chế của các nghiên cứu về TENG, đặc biệt là ở đất nước đang phát triển, cần có các công nghệ mới như Việt Nam.

## CHƯƠNG 2 THỰC NGHIỆM

### 2.1 Chế tạo và đánh giá khả năng phát điện của màng honeycomb

Màng honeycomb được chế tạo bằng phương pháp Improved Phase Separation (IPS) với mục tiêu đạt được cấu trúc đồng đều, trật tự cao để tăng cường tối đa hiệu điện thế của TENG. Phương pháp IPS gồm 2 bước: (i) Gạc phủ (bar-coating) dung dịch polyme lên bề mặt để tạo màng phẳng, (ii) Nhúng phủ (dip-coating) màng phẳng trên đế vào hệ dung môi/phi dung môi. Màng honeycomb được chế tạo trên ba loại vật liệu: polycarbonate phế thải (PC), polyimide (PI) và poly(vinyl chloride) phế thải (PVC). Màng *hc-PC*, *hc-PVC* và *hc-PI* vừa được dùng làm màng ma sát, vừa được dùng làm khuôn để chế tạo màng cấu trúc convex, yêu cầu phải phù hợp với tính chất của cặp polyme/dung môi đối nghịch: *hc-PVC* dùng chế tạo *c-PI*, *hc-PI* dùng chế tạo *c-PVDF*.

#### 2.1.1 Khảo sát chế tạo màng cấu trúc *hc-PC*

Sau khi thu gom các tấm chắn phế thải này từ bãi rác, chúng được rửa sơ bộ với nước, sau đó cắt nhỏ thành các mảnh và rửa lại lần nữa với nước để loại bỏ bụi bẩn, đất cát bám vào. Sau đó, các mảnh này được hoà tan vào dung môi chloroform tạo dung dịch đồng nhất để thực hiện phương pháp IPS. Màng *hc-PC* được khảo sát dưới sự ảnh hưởng của các yếu tố bao gồm độ dày màng phẳng trước khi nhúng phủ (nồng độ dung dịch polyme), hàm lượng phi dung môi

MeOH trong hỗn hợp ChL/MeOH, độ ẩm, nhiệt độ của môi trường và vật liệu để chế tạo màng.

→ Đánh giá hình thái cấu trúc bề mặt *hc-PC* (OM, SEM - ImageJ, WCA) và đánh giá tính chất điện; Chế tạo thiết bị thu năng lượng giọt nước rơi (*R-TENG*); Chế tạo màng *c-PDMS* và *c-TPU* ứng dụng cho cảm biến chuyển động ngón tay (finger motion detection sensor - FD-sensor).

### **2.1.2 Khảo sát chế tạo màng cấu trúc *hc-PI***

Tương tự như quy trình chế tạo PC nhưng bỏ qua bước xử lý rác thải do sử dụng PI nguyên sinh và sử dụng cùng hệ dung môi với *hc-PC* ChL/MeOH. Màng *hc-PI* được khảo sát dưới sự ảnh hưởng của các yếu tố bao gồm độ dày màng phẳng trước khi nhúng phủ (nồng độ dung dịch polyme), hàm lượng phi dung môi MeOH trong hỗn hợp ChL/MeOH.

→ Đánh giá hình thái cấu trúc bề mặt *hc-PI* (OM, SEM - ImageJ, WCA) và đánh giá tính chất điện; Chế tạo thiết bị thu năng lượng dao động trên đầu xe ô tô (*V-TENG*); Được sử dụng làm khuôn cho màng *c-PVDF* và *cs-PVDF* do thoả mãn tính chất đối nghịch của cặp polyme PI/PVDF và cặp dung môi ChL/acetone.

### **2.1.3 Khảo sát chế tạo màng cấu trúc *hc-PVC***

THF và MeOH được lựa chọn làm cặp dung môi/phi dung môi tạo màng *hc-PVC* từ màng bọc thực phẩm phế thải. Màng *hc-PVC* được khảo sát dưới sự ảnh hưởng của hàm lượng phi dung môi khác nhau.

→ Đánh giá hình thái cấu trúc bề mặt *hc-PVC* (OM, SEM - ImageJ, WCA) và đánh giá tính chất điện; Chế tạo thiết bị thu năng lượng sóng biển (*O-TENG*); Được sử dụng làm khuôn cho màng *c-PI* do thoả mãn tính chất đối nghịch của cặp polyme PI/PVC và cặp dung môi ChL/acetone@cyclohexanone.

## **2.2 Chế tạo và đánh giá khả năng phát điện của màng convex**

Để chế tạo được màng convex bằng phương pháp IPS $\mu$ M, ngoài khuôn mẹ cấu trúc honeycomb đồng đều trật tự cao, hai yếu tố quan trọng nhất là: cặp vật liệu đối nghịch và cặp dung môi đối nghịch (phương pháp hoà tan đối nghịch –

antagonistic solubility). Màng convex được chế tạo trên các vật liệu polyimide, và poly(vinylidene fluoride-*co*-hexafluoropropylene) (PVDF).

### **2.2.1 Khảo sát chế tạo màng cấu trúc *c*-PI**

Trong trường hợp của cặp *c*-PI và *hc*-PVC, cặp dung môi ChL và hỗn hợp acetone/cyclohexanone được lựa chọn. Màng *hc*-PVC chế tạo từ các hàm lượng MeOH 0, 5 và 10 vol. % được dùng để sao chép tạo thành các màng *c*-PI.

→ Đánh giá hình thái cấu trúc bề mặt màng convex (SEM), đánh giá tính chất điện; Chế tạo thiết bị thu năng lượng gió (*W*-TENG).

### **2.2.2 Khảo sát chế tạo màng cấu trúc *c*-PVDF**

Để chế tạo *c*-PVDF, *hc*-PI được lựa chọn làm khuôn mẹ với cặp dung môi đối nghịch acetone và ChL. Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch PVDF đến màng *c*-PVDF được khảo sát ở 6, 13 và 19 wt. %.

→ Đánh giá hình thái cấu trúc bề mặt màng convex (SEM), đánh giá tính chất điện; Thông số chế tạo được sử dụng làm tiền đề chế tạo màng *cs*-PVDF.

## **2.3 Chế tạo và đánh giá khả năng phát điện của màng *s*-PVDF**

Màng *s*-PVDF được chế tạo sử dụng các phi dung môi bao gồm methanol, ethanol, 2-propanol, ethylene glycol và nước tạo thành dung dịch ba cấu tử. Màng có khả năng tạo thành cấu trúc xốp đồng đều được lựa chọn để đánh giá khả năng phát điện.

→ Đánh giá hình thái cấu trúc lỗ xốp (SEM - ImageJ, WCA), đánh giá tính chất điện; Thông số chế tạo được sử dụng làm tiền đề chế tạo màng *cs*-PVDF.

## **2.4 Chế tạo và đánh giá khả năng phát điện của màng hybrid *cs*-PVDF**

Để chế tạo cấu trúc convex-spongy trên vật liệu PVDF, luận án này đề xuất phương pháp Improved Phase Separation 02 giai đoạn: (i) Giai đoạn 1: Chế tạo cấu trúc convex sao chép cấu trúc *hc*-PI bằng phương pháp spin-coating và khảo sát ở các tốc độ khác nhau (600, 900 và 1200 rpm); (ii) Giai đoạn 2: Chế tạo cấu trúc spongy bằng phương pháp bar-coating dung dịch PVDF ba cấu tử lên trên



màng convex thu được và khảo sát ở các nồng độ dung dịch khác nhau (25, 50 và 75 mg·mL<sup>-1</sup>).

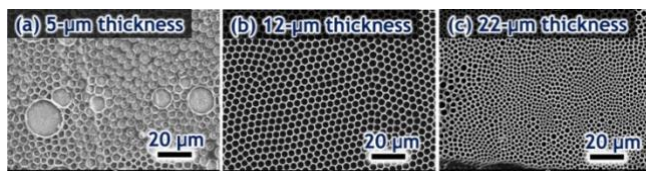
→ Đánh giá hình thái cấu trúc bề mặt convex và lỗ xốp (OM, SEM - ImageJ), đánh giá tinh thể (XRD), độ truyền qua (UV-Vis) và đánh giá tính chất điện.

## CHƯƠNG 3 KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

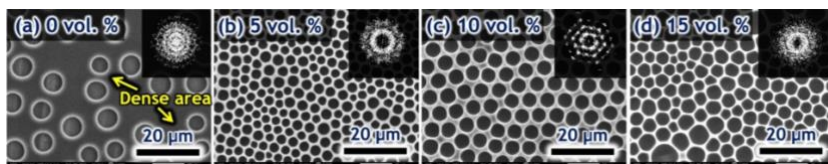
### 3.1 Chế tạo màng cấu trúc honeycomb trật tự cao bằng phương pháp IPS và đánh giá khả năng phát điện

#### 3.1.1 Trên vật liệu PC phế thải

Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch polyme đến cấu trúc honeycomb trên *hc*-PC được thể hiện trên Hình 3.1. Màng chế tạo ở nồng độ PC 5, 8 và 12 wt. % có các độ dày tương ứng là ~ 5, 12 và 22  $\mu\text{m}$ . Màng phim càng dày, lớp gel sau khi hoà tan trên bề mặt PC có độ nhớt càng cao, từ đó tăng khả năng ổn định giọt droplet và tăng lực mao quản theo chiều ngang (lateral capillary force), làm ngăn cản việc hấp thụ nước vào giọt droplet và không bị hợp nhất với các giọt bên cạnh. Do đó, các lỗ xốp bề mặt có kích thước nhỏ hơn được tạo thành trên màng phim dày hơn, và ngược lại.

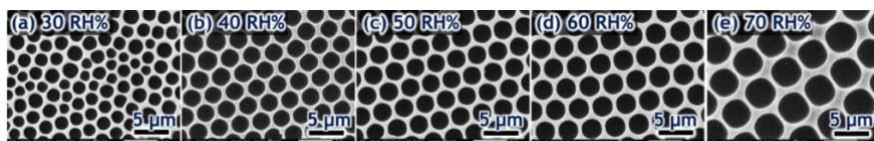


Hình 3.1 Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch PC đến hình thái cấu trúc màng *hc*-PC: (a) 5 wt. %; (b) 8 wt. %; (c) 12 wt. ( $\sim 30^\circ\text{C}$ , 60 RH%, [MeOH] 10 vol. %)

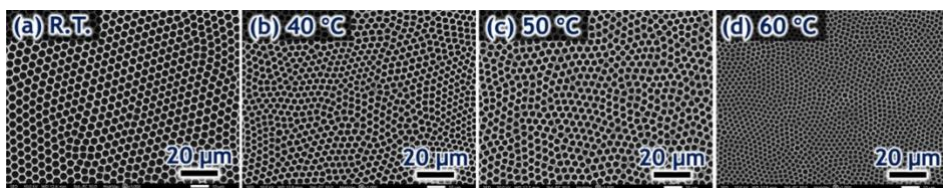


Hình 3.2 Ảnh hưởng của hàm lượng MeOH trong hỗn hợp ChL/MeOH đến hình thái vi cấu trúc bề mặt của các màng *hc*-PC: (a) 0 vol. %; (b) 5 vol. %; (c) 10 vol. %; (d) 15 vol. % ( $\sim 30^\circ\text{C}$ , 60 RH%, [PC] 8 wt. %)

Hai yếu tố môi trường được khảo sát bao gồm độ ẩm (Hình 3.3) và nhiệt độ (Hình 3.4). Có thể thấy xu hướng tăng dần kích thước lỗ khi tăng độ ẩm giống với ảnh hưởng của tăng hàm lượng MeOH ở phần trên. Điều này là do khi dung môi ChL bay hơi và nhiệt độ bề mặt giảm đột ngột, nước từ độ ẩm môi trường bị hấp thụ vào pha phi dung môi, từ đó gây ra ảnh hưởng đến quá trình phân pha và ảnh hưởng đến hình thái lỗ xốp. Nhiệt độ có thể ảnh hưởng đến tốc độ bay hơi và nhiệt độ bề mặt của màng khi diễn ra quá trình phân pha nên có thay đổi ít nhiều kích thước lỗ xốp.



Hình 3.3 Ảnh hưởng của độ ẩm môi trường đến hình thái bề mặt vi cấu trúc màng *hc-PC*: (a) 30 RH%; (b) 40 RH%; (c) 50 RH%; (d) 60 RH%; (e) 70 RH% (~ 30°C, [PC] 8 wt. %, [MeOH] 10 vol. %)

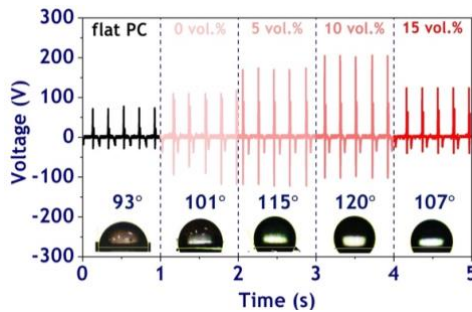


Hình 3.4 Ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường đến hình thái vi cấu trúc màng *hc-PC*: (a) Nhiệt độ phòng (R.T.); (b) 40 °C; (c) 50 °C; (d) 60 °C (~ 60 RH%, [PC] 8 wt. %, [MeOH] 10 vol. %)

Đối với nhiệt độ, độ đồng đều, trật tự của màng honeycomb hầu như không bị ảnh hưởng khi thay đổi nhiệt độ. Tuy nhiên, do nhiệt độ có thể ảnh hưởng đến tốc độ bay hơi và nhiệt độ bề mặt của màng khi diễn ra quá trình phân pha nên nhiệt độ càng cao, tốc độ bay hơi càng nhanh và làm giảm thời gian hấp thụ nước từ hơi ẩm không khí vào các giọt droplet, làm cho các lỗ xốp nhỏ dần trong khi khoảng cách giữa các lỗ xa dần và mật độ lỗ xốp cũng lớn dần. Ở điều kiện phòng (40 – 60 RH%, R.T.), mặc dù kích thước lỗ xốp thu được khác nhau nhưng vẫn giữ được cấu trúc honeycomb đồng đều, trật tự cao. Do đó, phương pháp IPS

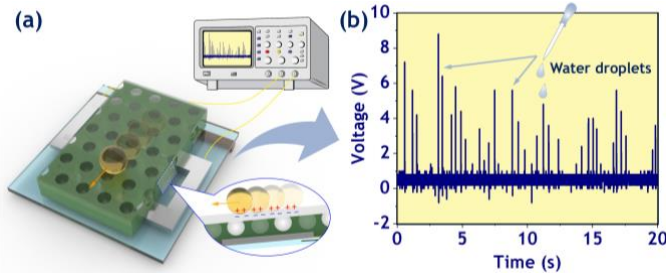
giúp tiết kiệm đáng kể công sức, năng lượng và chi phí điều khiển chính xác độ ẩm so với phương pháp Breath Figure, và có thể mở rộng quy mô chế tạo kích thước lớn dễ dàng hơn.

Có thể thấy rằng hàm lượng MeOH có ảnh hưởng lớn nhất đến độ đồng đều và trật tự của vi cấu trúc, do đó màng được chế tạo từ các hàm lượng MeOH khác nhau được lựa chọn để khảo sát ảnh hưởng của các vi cấu trúc tạo thành đến khả năng phát điện (Hình 3.5). TENG chế tạo từ màng đồng đều trật tự cao nhất có thể tạo được hiệu điện thế 202 V, công suất  $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ở tải  $6 \text{ M}\Omega$ , tăng cấp 40 lần so với màng phẳng.



Hình 3.5 Ảnh hưởng của hàm lượng MeOH đến hiệu điện thế đầu ra của TENG từ màng PC ( $\sim 30^\circ \text{C}$ , 60 RH%, [PC] 8 wt. %)

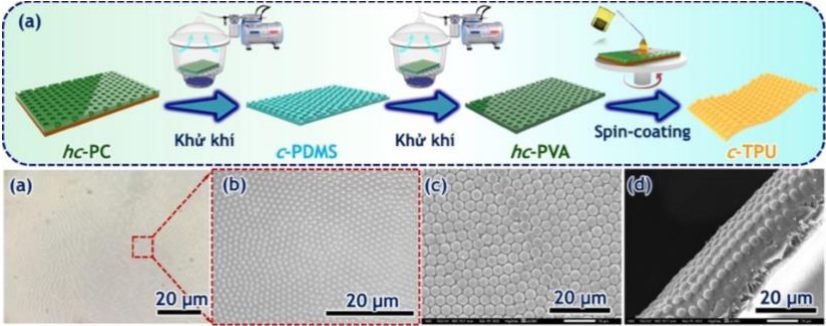
*R*-TENG (Raindrop energy harvester) thu năng lượng giọt nước được chế tạo dựa trên bề mặt trượt nước (slippery liquid-infused porous surface – SLIPs) trên khung xương *hc*-PC nhằm tận dụng tối đa nguồn rác thải từ tấm chắn sáng.



Hình 3.6 (a) Minh họa của *R*-TENG thu năng lượng giọt nước mưa rơi. (b) Tín hiệu điện thế của *R*-TENG khi nhỏ giọt nước lên bề mặt

Trong mô hình này, *R*-TENG tạo ra được dòng điện nhờ vào sự ma sát giữa giọt nước (mang điện tích dương) và dầu silicone (mang điện tích âm). Hình 3.6 cho thấy hiệu điện thế thu được từ năng lượng giọt nước rơi khoảng 6 V ở độ cao 30 cm, bề mặt *R*-TENG nghiêng góc 5 °.

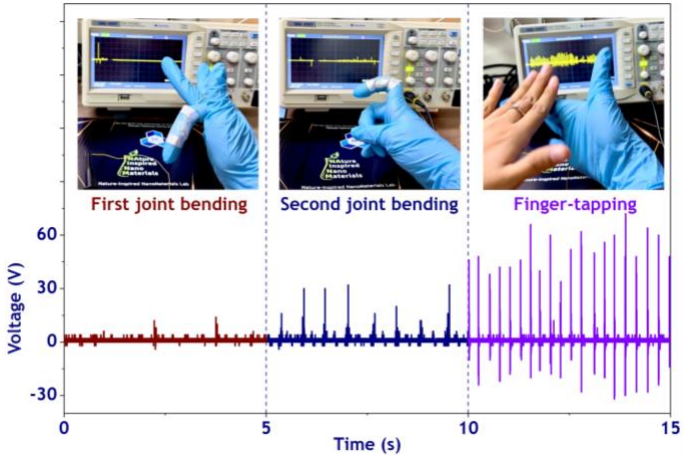
Ngoài việc được ứng dụng trực tiếp làm màng ma sát cho TENG, *hc*-PC có thể được dùng để làm khuôn mẫu cho cấu trúc convex trên các vật liệu khác như PDMS bằng cách sao chép cấu trúc lõm của *hc*-PC, hoặc chế tạo khuôn *hc*-PVA bằng cách sao chép ngược lại cấu trúc convex của *c*-PDMS. Khuôn *hc*-PVA là một lựa chọn tối ưu để chế tạo cấu trúc convex cho các loại vật liệu polyme không hoà tan trong nước như *c*-TPU. Với khả năng tương thích sinh học, tính linh hoạt và khả năng kéo giãn tuyệt vời, TPU là một ứng viên tiềm năng ứng dụng cho các thiết bị liên quan đến con người, trong đó có cảm biến phát hiện chuyển động ngón tay kéo giãn.



Hình 3.7 Quy trình chế tạo *c*-TPU bằng phương pháp IPS<sub>μ</sub>M

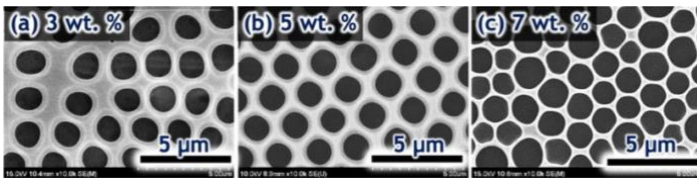
Hình 3.8 là thiết bị FD-sensor kích thước 3 cm được đeo ở giữa đốt tay thứ hai của ngón tay. Trong thiết bị này, *c*-TPU đóng vai trò như màng ma sát tích điện dương và *c*-PDMS đóng vai trò như màng tích điện âm, chúng đều có tính linh hoạt cao, có khả năng kéo giãn tốt, có tính truyền sáng tốt, và đặc biệt là khả năng tương thích sinh học với con người. Hai bề mặt convex được sử dụng với mục đích tạo ra khoảng hở tự nhiên giữa hai bề mặt ma sát và hoạt động không cần phải có khoảng cách tách rời lớn. Ở mép trên và dưới của thiết bị có dán điện cực

nhôm và nối dây điện với oscilloscope. Thiết bị được đeo vào ngón tay với sự hỗ trợ của băng keo.

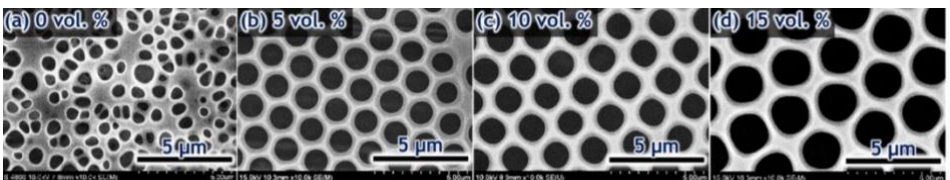


Hình 3.8 Tín hiệu điện của *FD*-sensor hoạt động dưới các trạng thái chuyển động khác nhau của ngón tay

### 3.1.2 Trên vật liệu *PI* nguyên sinh



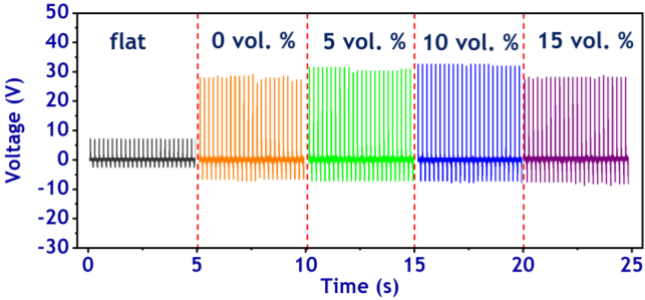
Hình 3.9 Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch polymer đến hình thái bề mặt vi cấu trúc màng *hc-PI* ( $\sim 30^\circ\text{C}$ , 60 RH%, [MeOH] 10 vol. %)



Hình 3.10 Ảnh hưởng của hàm lượng MeOH trong hỗn hợp ChL/MeOH đến hình thái bề mặt vi cấu trúc màng *hc-PI* ( $\sim 30^\circ\text{C}$ , 60 RH%), [PI] 5 wt. %)

Ở nghiên cứu trên PC, có thể nhận thấy nồng độ dung dịch polymer và hàm lượng

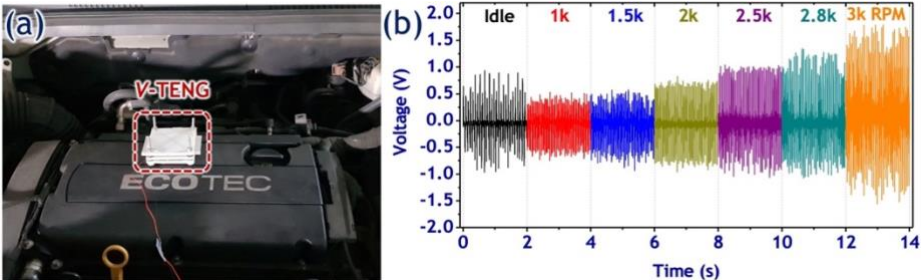
MeOH đóng vai trò quan trọng nhất đến khả năng hình thành cấu trúc đồng đều trật tự cao. Hơn nữa, phương pháp IPS có ưu điểm có thể tạo được vi cấu trúc đồng đều, trật tự cao trong môi trường tự nhiên, do đó được ưu tiên chế tạo và tìm ra điều kiện tốt nhất ở điều kiện phòng.



Hình 3.11 Ảnh hưởng của hàm lượng MeOH đến hiệu điện thế của PI-TENG

Hình 3.9 cho thấy rằng mặc dù không quá khác biệt về kích thước lỗ trung bình nhưng độ đồng đều, trật tự lỗ và mật độ lỗ xốp bị ảnh hưởng lớn khi thay đổi nồng độ polyme. Nồng độ 5 wt. % là phù hợp nhất để tạo được *hc*-PI đạt được độ đồng đều, trật tự cao nhất. Đối với hàm lượng MeOH (Hình 3.10), vi cấu trúc đồng đều trật tự cao được tạo thành ở khoảng 5 đến 10 vol. %.

Hiệu điện thế tỉ lệ thuận với độ đồng đều, trật tự của màng *hc*-PI và đạt được giá trị cao nhất ở 35 V đối với cấu trúc đồng đều, trật tự cao nhất (chế tạo ở hàm lượng MeOH = 10 vol. %). *hc*-PI cho thấy khả năng tăng cường mật độ công suất đến 22 lần, đạt giá trị  $\sim 1.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  so với  $0.05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  của màng phẳng ở tải 100 M $\Omega$ .

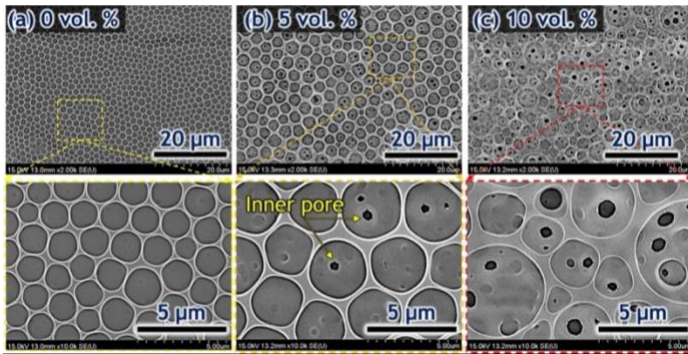


Hình 3.12 Tín hiệu điện của V-TENG trên đầu xe ô tô

V-TENG (Vibration energy harvester) thu năng lượng dao động được chế tạo từ màng *hc*-PI do độ bền nhiệt, bền hoá học, bền cơ học tuyệt vời của PI. Do đó, PI rất tiềm năng để ứng dụng làm thiết bị hoạt động ở các môi trường khắc nghiệt, có tần số dao động lớn và nhiệt độ môi trường xung quanh cao như trên động cơ đầu xe ô tô, thiết bị thu năng lượng gió, máy nén khí, máy bơm chân không... Kết quả hiệu điện thế thu được từ V-TENG trên động cơ đầu xe ô tô khi xe hoạt động tạo ra các tốc độ góc khác nhau của động cơ như trạng thái rỗi (idle), tốc độ 1k, 1.5k, 2k, 2.5k, 2.8k và 3k rpm (Hình 3.12). Khi động cơ tăng tốc từ 1k đến 3k rpm, dao động tăng lên đáng kể làm cho điện thế đầu ra cao hơn. Tuy nhiên, ở trạng thái rỗi, sự không ổn định của động cơ làm cho các đỉnh hiệu điện thế có giá trị cao hơn so với các dao động thấp hơn 2k. Ứng dụng này chứng minh tính ưu việt của V-TENG chế tạo từ *hc*-PI khi hoạt động ở môi trường khắc nghiệt.

### 3.1.3 Trên vật liệu PVC phế thải

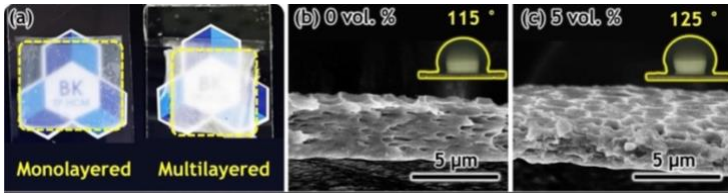
So với màng *hc*-PC, *hc*-PVC chế tạo từ hỗn hợp THF/MeOH có khả năng tạo thành hệ thống lỗ xốp đơn/đa lớp ở tỉ lệ thích hợp (Hình 3.13).



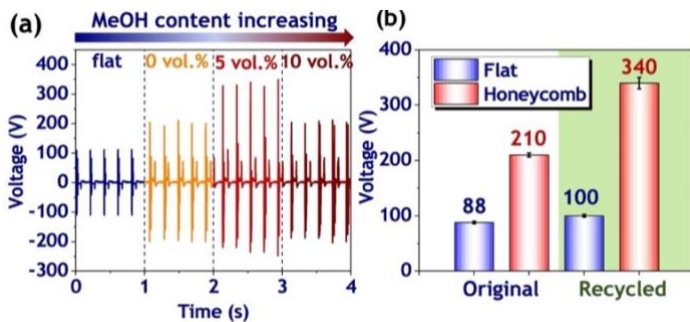
Hình 3.13 Ảnh hưởng của hàm lượng MeOH trong hỗn hợp THF/MeOH đến hình thái bề mặt vi cấu trúc màng *hc*-PVC (~ 30 °C, 60 RH%, [PVC] 10 wt. %)

Hàm lượng MeOH 0 vol.% sẽ tạo ra dãy xốp đơn lớp, trong khi màng đa lớp sẽ tạo thành khi thêm vào MeOH. Lúc này, các lỗ xốp nhỏ có thể được quan sát thấy (inner pore). Đó là do sự hợp nhất một phần giữa 2 giọt droplet theo chiều dọc, vùng giao nhau này sau khi bay hơi để lại các lỗ xốp nhỏ lơ lửng giữa lỗ xốp trên

và dưới. Màng *hc*-PVC đơn lớp cho thấy độ trong suốt cao hơn so với đa lớp (Hình 3.14) với góc thấm ướt của màng đa lớp cao hơn



Hình 3.14 Ảnh hưởng của hàm lượng MeOH trong hỗn hợp THF/MeOH đến cấu trúc đa lớp của màng *hc*-PVC



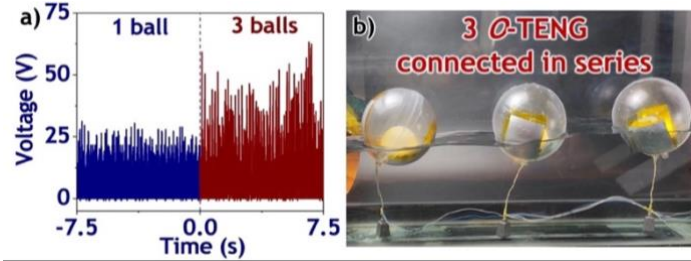
Hình 3.15 (a) Ảnh hưởng của nồng độ MeOH đến hiệu điện thế đầu ra của TENG. (b) Sự tăng cường hiệu điện thế đầu ra của *hc*-PVC-TENG so với flat PVC-TENG đối với nhựa nguyên sinh và tái chế

Màng *hc*-PVC đơn lớp và đa lớp lần lượt cho thấy khả năng tăng cường hiệu quả phát điện gấp đôi và gấp 3.4 lần so với màng phẳng (đạt 200 và 340 V). So với vật liệu PVC nguyên sinh, hiệu điện thế của màng PVC từ màng bọc thực phẩm có xu hướng đạt giá trị cao hơn. Từ so sánh này có thể thấy với phương pháp IPS, các màng bọc thực phẩm bỏ đi cũng có thể tái sử dụng và tạo ra được dòng điện thậm chí cao hơn gấp nhiều lần màng flat PVC chế tạo từ nhựa nguyên sinh.

*O*-TENG (Ocean wave energy harvester) thu năng lượng sóng biển được chế tạo sử dụng *hc*-PVC nhằm hướng đến mục tiêu tận dụng tối đa nguồn nhựa phế thải từ màng bọc thực phẩm. Hình 3.16 cho thấy khả năng thu năng lượng sóng biển chuyển hoá thành điện năng của *O*-TENG. Ngoài ra, mắc kết nối ba quả cầu *O*-TENG giúp tăng hiệu điện thế gấp 3 lần so với một quả, đạt giá trị 60 V. Từ kết

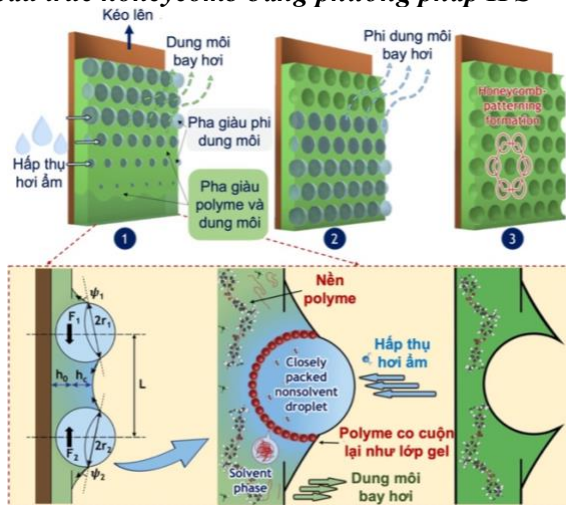


quả trên có thể thấy, càng nhiều đơn vị *O*-TENG, hiệu quả phát điện của hệ càng lớn do điện tích thu được từ hệ TENG tỉ lệ thuận với số đơn vị thiết lập. Nhờ đó, *O*-TENG là một ứng cử viên sáng giá cho ước mơ thu năng lượng xanh quy mô lớn khi triển khai hệ hàng trăm hoặc hàng nghìn đơn vị *O*-TENG, đặc biệt là dùng để thắp sáng đèn hải đăng giữa biển, nơi xa với đất liền và không thể lắp đặt nguồn điện truyền thống.



Hình 3.16 (a) Hiệu điện thế của một và nhiều đơn vị *O*-TENG dưới sóng biển nhân tạo. (b) Ảnh thực tế của ba đơn vị *O*-TENG trong bể nhân tạo

### 3.1.4 Đề xuất cơ chế giải thích các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình hình thành cấu trúc honeycomb bằng phương pháp IPS



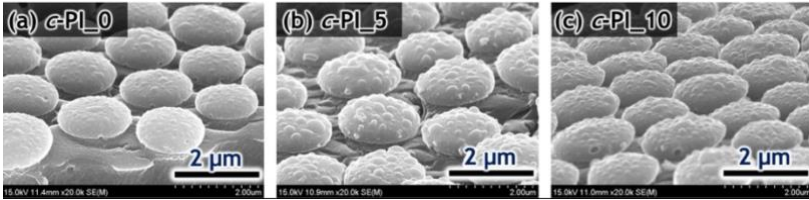
Hình 3.17 Đề xuất cơ chế minh họa cho phương pháp IPS

Cơ chế của phương pháp IPS được đề xuất bao gồm 4 giai đoạn: (1) Hoà tan một phần bề mặt màng phim; (2) Sự bay hơi làm lạnh bề mặt và tạo mầm giọt droplet;

(3) Sự phát triển và tự sắp xếp của giọt droplet thành trật tự tổ ong; (4) Sự bay hơi của dung môi và giọt droplet.

### 3.2 Chế tạo vi cấu trúc convex bằng phương pháp IPSuM và đánh giá khả năng phát điện

#### 3.2.1 Trên vật liệu PI



Hình 3.18 Ảnh hưởng của khuôn cấu trúc *hc*-PVC đến hình thái bề mặt *c*-PI

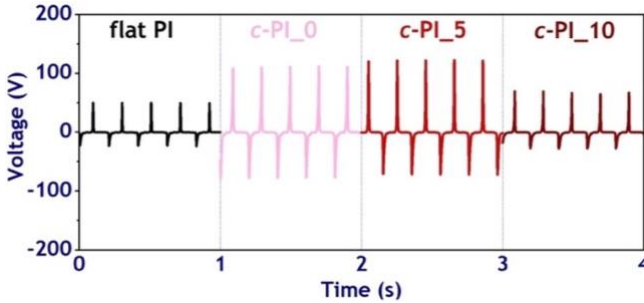
Bảng 3.1 Đường kính và khoảng cách pattern từ ảnh SEM của các màng *c*-PI

Thông số	<i>c</i> -PI_0	<i>c</i> -PI_5	<i>c</i> -PI_10
Đường kính pattern (μm)	1.7	2.4	3.3

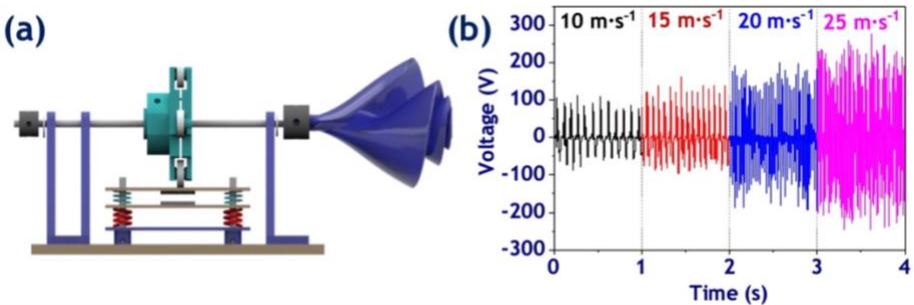
Hình 3.18 và Bảng 3.1 cho thấy ảnh hưởng của các khuôn *hc*-PVC có cấu trúc bề mặt khác nhau (chế tạo từ các hàm lượng MeOH 0, 5 và 10 vol. %) đến hình thái cấu trúc lõi *c*-PI (viết tắt là ***c*-PI<sub>x</sub>**, x là hàm lượng MeOH chế tạo khuôn). Tăng dần theo hàm lượng MeOH chế tạo khuôn dẫn đến sự sao chép *c*-PI có đường kính và khoảng cách lớn hơn. Đối với khuôn *hc*-PVC ở hàm lượng MeOH 5 và 10 vol. % có sự xuất hiện của các lỗ inner pore, các pattern sau khi sao chép cũng có các pattern nhỏ hơn trên bề mặt, làm cho bề mặt có phần gồ ghề hơn trên *c*-PI<sub>5</sub> và *c*-PI<sub>10</sub>. Độ cao của pattern đạt được khoảng 0.24 μm, khá tương đồng giữa ba mẫu *c*-PI.

Đối với hiệu quả phát điện của màng PI, khi có mặt vi cấu trúc trên màng *c*-PI<sub>0</sub> (đường kính 1.7 μm), hiệu điện thế tăng hơn gấp đôi, đạt 111.91 V. Khi đường kính tăng lên 2.4 μm, hiệu điện thế đạt giá trị cao nhất ở 122.20 V. Khi đường kính tiếp tục tăng đến 3.3 μm và khoảng cách giữa các pattern giảm xuống, hiệu điện thế bắt đầu giảm còn 69.48 V (Hình 3.19). Mật độ công suất trung bình của

*c*-PI\_5-TENG đạt  $1.42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ở tải  $100 \text{ M}\Omega$ , cao hơn  $\sim 30$  lần so với flat PI ( $0.049 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).



Hình 3.19 Ảnh hưởng của hàm lượng MeOH đến hiệu điện thế của TENG



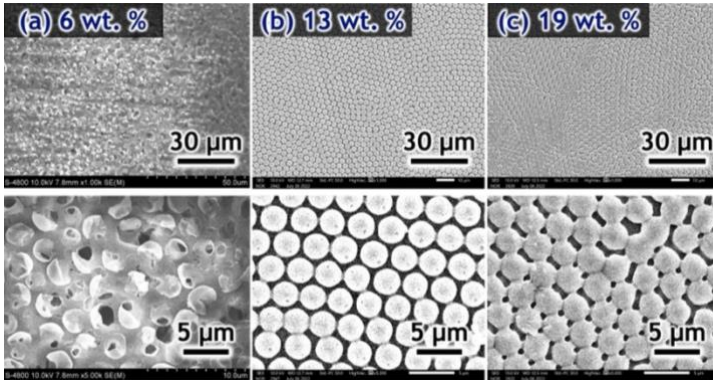
Hình 3.20 (a) Mô hình *W*-TENG. (b) Tín hiệu điện thế của *W*-TENG

*W*-TENG (Wind energy harvester) thu năng lượng gió được chế tạo từ màng *c*-PI tận dụng đặc tính bền nhiệt, bền hoá học, bền cơ học của PI đã nhắc đến ở phần trên. Hình 3.20 cho thấy tốc độ gió càng lớn, tín hiệu của hiệu điện thế tạo ra bởi *W*-TENG càng lớn. Các giá trị hiệu điện thế của *W*-TENG trong hệ thống cối xoay gió là 110 V, 162.26 V, 200 V và 276 V, tương ứng với các tốc độ gió 10, 15, 20 và  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Điều này là do sự tăng cường số vòng đầy (tần số đầy) và lực đẩy lên trên đế phía trên của TENG.

### 3.2.2 Trên vật liệu PVDF

Hình 3.21 cho thấy ở nồng độ thấp (6 wt. %), màng tạo thành có các vi cấu trúc bị xấp trên bề mặt, không thể tạo thành cấu trúc convex hoàn hảo do khi chế tạo ở điều kiện phòng, độ ẩm không khí cao làm cho các nước dễ dàng bị hấp phụ

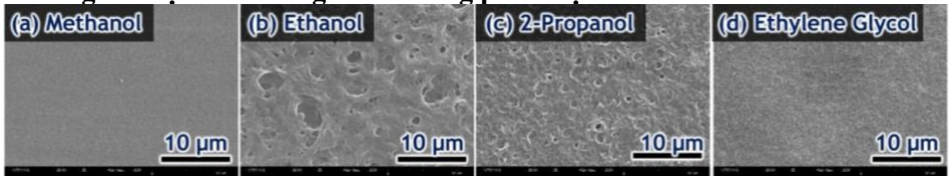
vào dung dịch có độ nhớt thấp. Ở nồng độ cao hơn (13 wt. %), màng sao chép hoàn toàn cấu trúc honeycomb, thu được các pattern đồng đều, trật tự cao, cải thiện được hiện tượng xốp trên convex. Tuy nhiên, khi nồng độ quá lớn (19 wt. %), độ nhớt dung dịch tăng đáng kể làm cho khả năng điền đầy khuôn khó khăn hơn nên convex thu được có xu hướng dính vào nhau mà không tách rời ra như mong muốn. Do chỉ có màng ở nồng độ PVDF 13 wt. % đạt được cấu trúc convex đồng đều, trật tự, không ghép sát nên được lựa chọn để thử nghiệm khả năng phát điện so với màng phẳng PVDF.



Hình 3.21 Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch polyme đến cấu trúc *c*-PVDF

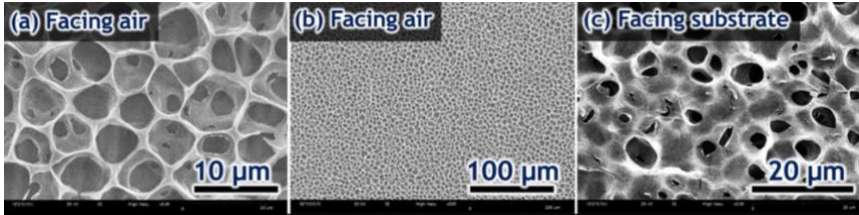
Khi có mặt các convex đồng đều, trật tự, không ghép sát, hiệu điện thế thu được tăng gần 2 lần, đạt 480 V, cao hơn gấp ~ 2 lần màng phẳng và tạo ra mật độ công suất  $2.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ở tải  $2 \text{ M}\Omega$  (Hình 3.27).

### 3.3 Chế tạo màng vi cấu trúc spongy *s*-PVDF bằng phương pháp IPS 01 giai đoạn và đánh giá khả năng phát điện



Hình 3.22 Ảnh hưởng của phi dung môi đến hình thái cấu trúc xốp *s*-PVDF: (a) MeOH; (b) Ethanol; (c) 2-Propanol; (d) Ethylene glycol

Hình 3.22-21 cho thấy phi dung môi MeOH tạo được màng đặc nhất, không thể tạo được cấu trúc xốp như mong muốn, tương tự như ethylene glycol. 2-propanol thì bề mặt có xốp một phần nhưng không đồng đều và không có sự lặp lại trên toàn bộ bề mặt màng trong khi ethanol cho thấy khả năng tạo các lỗ xốp rất lớn trên bề mặt. Khi sử dụng phi dung môi là nước, cấu trúc xốp đồng đều được tạo thành trên toàn bộ màng phim với hình thái bề mặt.



Hình 3.23 Hình thái cấu trúc xốp *s*-PVDF chế tạo từ nước của bề mặt tiếp xúc không khí và bề mặt tiếp xúc đế

Màng flat PVDF tạo được dòng điện  $\sim 250$  V, trong khi màng *s*-PVDF đạt  $\sim 544$  V (Hình 3.27), phù hợp với các nghiên cứu trước khi màng xốp có thể tăng cường đáng kể diện tích ma sát hiệu dụng và đóng vai trò như “hồ lưu trữ điện tích”, làm tăng điện thế đầu ra. Bên cạnh đó, màng *s*-PVDF có thể tạo được mật độ công suất  $3.33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  ở tải  $5 \text{ M}\Omega$ .

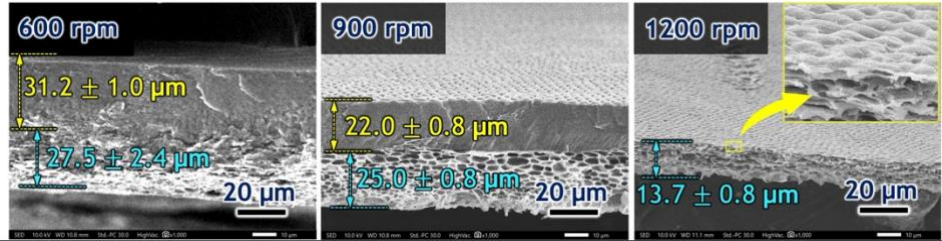
### 3.4 Chế tạo màng hybrid convex-spongy PVDF bằng phương pháp IPS $\mu$ M 02 giai đoạn và đánh giá khả năng phát điện



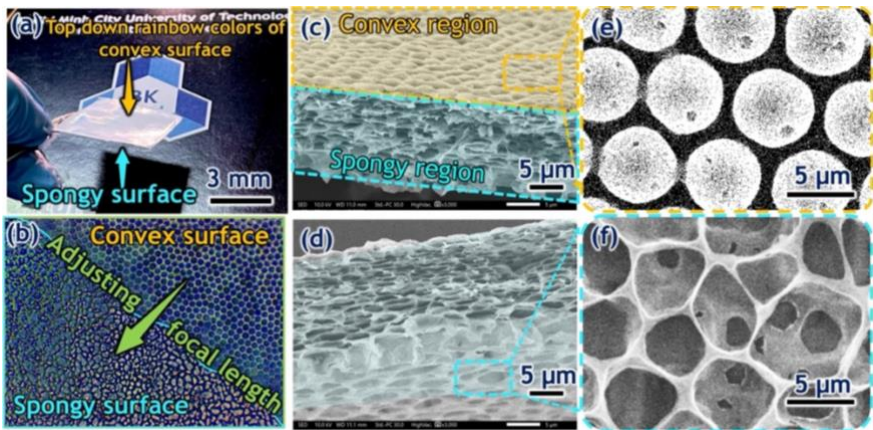
Hình 3.24 Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch PVDF trong acetone/nước

Ở nồng độ  $25 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ , cơ tính màng rất yếu và không thể tách ra khỏi khuôn. Màng *cs*-PVDF có cảm quan đồng đều nhất khi chế tạo ở nồng độ  $50 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  do màng có màu trắng đục trên toàn bộ bề mặt. Ở nồng độ cao hơn ( $75 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$

<sup>1</sup>), quá trình phân pha bắt đầu khó xảy ra do độ nhớt lớn, làm cho bề mặt xốp không đồng đều. Từ kết quả này có thể thấy  $50 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  là điều kiện tốt nhất để chế tạo được màng *cs*-PVDF.



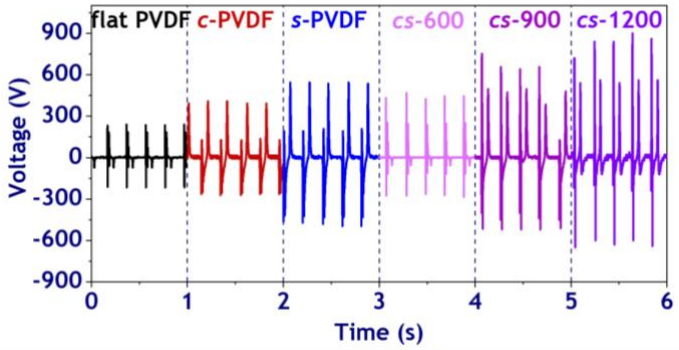
Hình 3.25 Ảnh hưởng của tốc độ spin-coating đến hình thái màng *cs*-PVDF



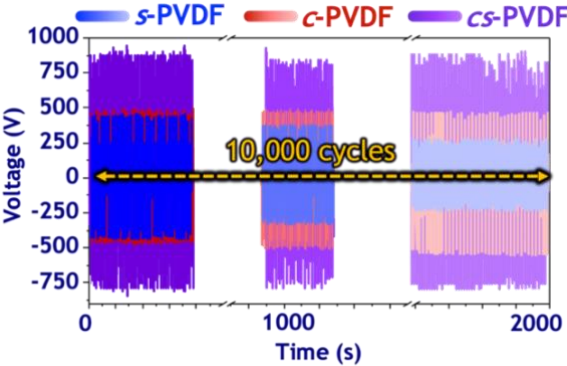
Hình 3.26 Hình thái bề mặt của màng *cs*-PVDF. (a-b) Ảnh SEM mặt cắt lần lượt hướng từ trên xuống và hướng từ dưới lên của *cs*-PVDF. (c) Ảnh SEM bề mặt convex của *cs*-PVDF. (d) Ảnh SEM bề mặt spongy của *cs*-PVDF

Tốc độ spin-coating khác nhau ảnh hưởng đáng kể đến độ dày của lớp giao thoa giữa cấu trúc convex và spongy, gọi là *interlayer*. Kết quả mặt cắt ngang của các mẫu *cs*-PVDF trong Hình 3.25 cho thấy tốc độ spin-coating càng lớn, độ dày *interlayer* càng nhỏ, độ xốp càng lớn do ở tốc độ thấp, lượng dung dịch PVDF còn lại trên bề mặt sau khi spin-coating lớn, cùng với nồng độ dung dịch cao (13 wt. %), làm tăng nồng độ chung của dung dịch ba cấu tử sau khi bar-coating lên bề mặt. Nồng độ dung dịch ba cấu tử cao làm cho độ nhớt lớn, gây cản trở quá trình phân pha của hệ và làm cho độ xốp nhỏ hơn đáng kể. Ảnh vi cấu trúc *cs*-

PVDF có thể được quan sát rõ ràng trên Hình 3.26. Với các màng đơn cấu trúc như *c*-PVDF và *s*-PVDF, hiệu điện thế đạt được lần lượt là 480 V và 544 V, cao hơn tương ứng gấp ~ 2 lần so với màng flat PVDF không có cấu trúc. Riêng đối với các màng *cs*-PVDF, màng *cs*-600 có hiệu điện thế gần như tương đương với màng *c*-PVDF (~ 500 V) do độ dày interlayer lớn, hiệu ứng tĩnh điện bị giảm đi đáng kể. Khi giảm độ dày interlayer như ở màng *cs*-900, hiệu điện thế tăng dần lên 752 V và tăng đến 900 V khi interlayer không đáng kể (*cs*-1200). Màng *cs*-PVDF có giá trị mật độ công suất tức thời tăng gấp 4.7 lần so với màng flat, đạt  $4.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .



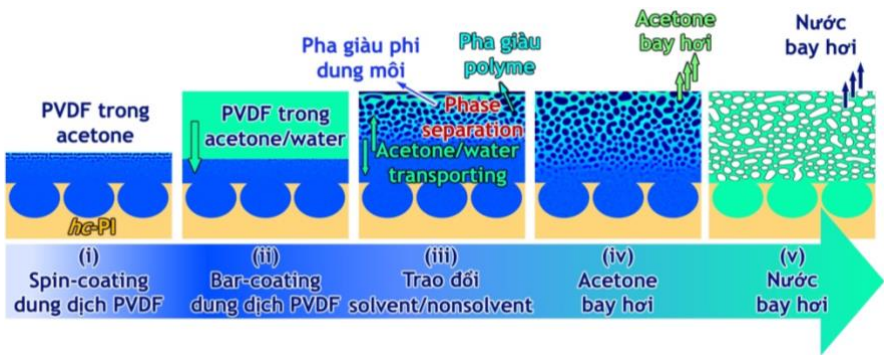
Hình 3.27 Hiệu điện thế đầu ra thực tế của flat PVDF, *c*-PVDF, *s*-PVDF, *cs*-PVDF chế tạo ở các tốc độ spin-coating khác nhau



Hình 3.28 Độ bền của các màng vi cấu trúc *s*-PVDF, *c*-PVDF và *cs*-PVDF sau 10,000 chu kỳ hoạt động

Hình 3.28 chứng minh độ bền sau khi hoạt động 10,000 chu kỳ của cấu trúc *cs*-PVDF so với cấu trúc *s*-PVDF và *c*-PVDF. Có thể nhận thấy màng cấu trúc *s*-PVDF bị giảm hiệu điện thế khi hoạt động theo thời gian do cấu trúc spongy có tính chất cơ lý kém, dễ bị biến đổi cấu trúc làm giảm hiệu quả phát điện. Trong khi đó, nhờ có độ bền và ổn định của cấu trúc convex, sự kết hợp của convex và spongy trong *cs*-PVDF làm cho độ bền hoạt động chung của màng được cải thiện đáng kể khi không có sự giảm sút đáng kể hiệu điện thế sau 10,000 chu kỳ tiếp xúc – tách rời.

- Đề xuất cơ chế tạo thành cấu trúc convex-spongy PVDF



Hình 3.29 Minh họa cơ chế tạo thành cấu trúc convex-spongy PVDF

Cơ chế tạo thành cấu trúc convex-spongy trên PVDF đề xuất gồm 05 bước: (i) Sao chép cấu trúc honeycomb bằng phương pháp spin-coating; (ii) Bar-coating dung dịch PVDF trong acetone/nước lên trên màng convex; (iii) Trao đổi solvent/nonsolvent (acetone/nước); (iv) Bay hơi acetone; (v) Bay hơi nước.

### 3.5 Cơ chế tăng cường tính chất điện của các vi cấu trúc

Cấu trúc honeycomb có các ưu điểm: (i) Sự tăng cường diện tích bề mặt hiệu dụng; (ii) Giảm thiểu sự thất thoát điện tích ra ngoài không khí nhờ cấu trúc xếp đống; (iii) Lớp bottom skin rất mỏng giảm tối đa hiện tượng “thất thoát điện tích xuống điện cực”; (iv) Tăng góc tiếp xúc nước trên bề mặt.

Cấu trúc convex đóng góp các ưu điểm: (i) Độ bền cấu trúc và tính ổn định cao; (ii) Tăng diện tích tiếp xúc hiệu dụng; (iii) Khả năng biến dạng chiều ngang; (iv)



Hiệu ứng lưu giữ điện tích; (v) Hiệu quả tăng cường điện ma sát.

Cấu trúc spongy đóng góp các ưu điểm: (vi) Tỷ lệ surface-to-volume lớn; (vii) Hiệu ứng lưu giữ điện tích như “hồ trữ điện”.

Từ đó, sự kết hợp cấu trúc convex và spongy trong màng *cs*-PVDF sở hữu tất cả 07 ưu điểm của hai cấu trúc nói trên.

## CHƯƠNG 4 KẾT LUẬN

Trong luận án này, các vi cấu trúc bao gồm honeycomb, convex đồng đều, trật tự cao, xếp spongy và hybrid convex-spongy đã được chế tạo thành công, và ảnh hưởng của các thông số chế tạo đến cấu trúc và khả năng phát điện của thiết bị TENG cũng đã được khảo sát hệ thống.

**Đối với phương pháp Improved Phase Separation (IPS) tạo màng honeycomb:** Các polyme nhiệt dẻo tan trong dung môi bay hơi nhanh (THF, ChL...) có thể tạo được cấu trúc honeycomb đồng đều, trật tự cao bằng phương pháp IPS ở điều kiện phòng; Hệ dung môi ảnh hưởng hình thái đơn/đa lớp của màng honeycomb (ChL tạo đơn lớp, THF tạo đa lớp); Hàm lượng phi dung môi MeOH càng lớn, các giọt droplet có thể tích càng lớn và tạo thành các lỗ xếp càng lớn; Nồng độ polyme tạo màng phẳng càng lớn, các lỗ xếp càng nhỏ; Nhiệt độ và độ ẩm chỉ ảnh hưởng kích thước lỗ xếp; Vật liệu đế ảnh hưởng đến hình thái lỗ xếp nhưng không ảnh hưởng đến độ đồng đều, trật tự.

**Đối với phương pháp phân pha tạo màng spongy:** PVDF trong hệ acetone/nước có khả năng xảy ra quá trình “liquid-liquid demixing delay” tạo được cấu trúc spongy. Nước đóng vai trò quyết định quá trình phân pha xảy ra và hình thái cấu trúc lỗ xếp đồng đều.

**Đối với phương pháp IPS micromolding tạo màng convex:** Cấu trúc khuôn, cặp dung môi/polyme đối nghịch và nồng độ dung dịch polyme đóng vai trò quyết định đến màng cấu trúc convex.

**Đối với phương pháp IPS micromolding 02 giai đoạn tạo màng convex-**

**spongy:** Spin-coating tạo convex với tốc độ spin-coating càng lớn, độ dày interlayer càng nhỏ; Bar-coating cấu trúc spongy với nồng độ dung dịch PVDF càng lớn, độ xốp càng nhỏ.

**Về khả năng tăng cường hiệu quả phát điện:** Màng honeycomb có khả năng cải thiện diện tích ma sát hiệu dụng, các lỗ xốp như hồ chứa điện và lớp bottom skin giảm thất thoát điện xuống điện cực. Màng honeycomb đơn lớp đồng đều, trật tự cao PC (8 wt. %), PI (5 wt. %) sử dụng hệ CHL/MeOH đạt được ở hàm lượng MeOH 10 vol. %, cải thiện hiệu điện thế gấp 2.6 và 5.83 lần so với màng phẳng. Màng honeycomb PVC đa lớp sử dụng hệ THF/MeOH đạt được ở nồng độ polyme 10 wt. %, hàm lượng MeOH 5 vol. %, cải thiện 2.5 lần hiệu điện thế màng phẳng; Màng convex có khả năng chịu biến dạng theo chiều ngang, có các “khuỷu tay” tăng hiệu quả ma sát và diện tích ma sát hiệu dụng. Màng convex PI và convex PVDF cho hiệu quả phát điện tốt nhất ở nồng độ lần lượt là 10 wt. % và 13 wt. %, cải thiện hiệu điện thế gấp ~ 2.5 và 2 lần màng phẳng; Màng spongy có các lỗ xốp đóng vai trò như “hồ trữ điện”, giảm thất thoát điện tích. Màng spongy PVDF ( $50 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ) sử dụng hệ acetone/nước tỉ lệ 95/5 cải thiện hiệu điện thế gấp 4 lần màng phẳng; Màng convex-spongy có hiệu quả phát điện cao nhờ sự hội tụ ưu điểm và bù trừ nhược điểm của cấu trúc convex và spongy. Màng convex-spongy PVDF có hiệu quả phát điện tốt nhất được chế tạo ở nồng độ dung dịch PVDF 13 wt.%, tốc độ spin-coating 1200 rpm, nồng độ dung dịch bar-coating PVDF  $50 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  trong acetone/nước tỉ lệ 95/5, cải thiện hiệu điện thế, mật độ công suất tức thời và mật độ công suất trung bình lần lượt gấp ~ 4 lần, 5.3 lần và 10 lần so với màng phẳng, cải thiện độ bền hoạt động sau hơn 10,000 chu kỳ so với màng s-PVDF.

**Về khả năng ứng dụng thực tế:** Màng vì cấu trúc honeycomb và convex đã chế tạo thành công cũng được ứng dụng làm thiết bị thu hồi năng lượng từ giọt nước mưa, năng lượng sóng biển, năng lượng cơ học từ các máy móc, cảm biến chuyển động tự cấp nguồn.

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

### Tạp chí quốc tế

1. **Ngoc Mai Chau**, Phuong Mai Tran, Thu Ha Le, Thi Thai Ha La\*, Van-Tien Bui\*, “Ultra-Stretchable and Shape-Memorable Output-Boosted Triboelectric Nanogenerator Utilizing Highly Ordered Microdome-Crowning Thermoplastic Polyurethane for Finger-Motion Detection Sensor”, *Mater. Adv.*, 2023 (SCIE, Q1, IF = 5.4).
2. **Ngoc Mai Chau**, Thu Ha Le, Thi Thai Ha La\*, Van-Tien Bui\*, “Industrially Compatible Production of Customizable Honeycomb-Patterned Poly(Vinyl Chloride) using Food-Wrapping Waste for Power-Boosting Triboelectric Nanogenerator and Ocean Wave Energy Harvester”, *J. Sci.: Adv. Mater. Devices*, vol. 8, no. 4, 100637, 2023 (SCIE, Q1, IF = 8.0)
3. **Ngoc Mai Chau**<sup>#</sup>, Gia Huy Nguyen Hoang<sup>#</sup>, Thang Van Le, Van-Tien Bui\*, Thi Thai Ha La\*, “Large-area customizable honeycomb patterned polycarbonate derived from roofing sheet waste for a slippery liquid-infused porous surface”, *Polymer*, vol. 285, pp. 126321, 2023 (SCIE, Q1, IF = 5.0).
4. **Ngoc Mai Chau**<sup>#</sup>, Van-Tien Bui<sup>#,\*</sup>, Dai Phu Huynh, Nghia Dinh Huynh, Dukhyun Choi\*, and Huynh Nhat Do, “Honeycomb-Patterned Polyimide-Based Triboelectric Nanogenerator with Excellent Thermal Stability and Enhanced Electrification Performance,” *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 5, no. 8, pp. 9791–9800, 2022 (SCIE, Q1, IF = 6.959).
5. Van-Tien Bui, Nghia Dinh Huynh, **Ngoc Mai Chau**, Wook Kim, Hakjeong Kim, Il-Kwon Oh, Dai Phu Huynh\*, Dukhyun Choi\*, “High-temperature operatable triboelectric nanogenerator using microdome-patterned polyimide for self-powered sensors,” *Nano Energy*, vol. 101, p. 107612, 2022 (SCIE, Q1, IF = 19.069).
6. **Ngoc Mai Chau**, Thu Ha Le, Dai Phu Huynh, Thi Hien Truong, Minh Tuan Nguyen Dinh, Thi Thai Ha La\*, Van-Tien Bui\*, “Surface patterning of GO-S/PLA nanocomposite with the assistance of an ionic surfactant for high-performance triboelectric nanogenerator,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 14, pp. 20047–20056, 2021 (SCIE, Q1, IF = 5.164).

### **Tạp chí trong nước**

1. **Ngoc Mai Chau**, Thu Ha Le, Dai Phu Huynh, Thi Hien Truong, Thi Thai Ha La, Van-Tien Bui\*, “Phase-separated porous PVDF-co-HFP thin film for High-power triboelectric nanogenerator,” *Vietnam J. Sci. Technol.*, vol. 59, no. 6A, pp. 51–59, Mar. 2022.

### **Kỹ yếu hội nghị quốc tế**

1. **Ngoc Mai Chau**, Van-Tien Bui\*, Thi Thai Ha La\*, “Development of Polymeric Materials with Rationally Designed Nano- and Micro-structures for High-Performance Triboelectric Nanogenerator and Self-Powered Sensor”, *International Conference on Science, Technology, and Innovation for Sustainable Development (STISD 2023)*.

### **Đề tài nghiên cứu khoa học**

1. Nghiên cứu phát triển vật liệu polymer cấu trúc lục giác ứng dụng phát triển thiết bị phát điện nano ma sát hiệu suất cao và cảm biến tự cấp nguồn cho Internet vạn vật – Thành viên chính, Đề tài Cấp B ĐHQG.
2. FROM WASTE TO WATER-MONITORING SENSORS: High-Performance Triboelectric Nanogenerator Taking Advantage of Polymeric Wastes for Self-Powered Water-Monitoring Sensors – Chủ nhiệm, Đề tài Hợp tác Quốc tế KURITA.