

# NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ, CHẾ TẠO CƠ CẤU HAI TRẠNG THÁI CÂN BẰNG WATERBOMB ORIGAMI ĐỂ TÌM TẦN SỐ ĐÁP ỨNG PHỤC VỤ THU HOẠCH NĂNG LƯỢNG

NGÔ TIẾN HOÀNG

Khoa Công nghệ cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh  
ngotienhoang@iuh.edu.vn

DOIs: <https://doi.org/10.46242/jstiuh.v67i01.5029>

**Tóm tắt.** Bài báo này mô tả một thiết bị thu hoạch năng lượng dựa trên sự dao động của cơ cấu hai trạng thái cân bằng waterbomb origami thông qua chuyển đổi năng lượng áp điện. Thiết bị này có khả năng khai thác năng lượng băng thông rộng từ các rung động xung quanh tần số thấp. Thiết kế này sử dụng tính ổn định vốn có trong cấu trúc waterbomb origami để tăng băng thông đáp ứng tần số của nó. Việc gấp dọc theo mô hình tạo ra các nếp gấp của cơ cấu origami có thể tạo điều kiện cho các biến dạng uốn cong lớn từ đó tìm ra tần số đáp ứng thích hợp. Kích thước nhỏ gọn và trọng lượng nhẹ của cơ chế origami khiến nó thuận tiện cho việc tích hợp vào các vật chủ khác nhau chịu rung động. Hiệu suất của cơ cấu waterbomb origami được thực nghiệm dưới các kích thích bên ngoài với các cường độ dao động khác nhau như 0.1mm, 0.5mm và 1mm. Giải thuật bậc 4 Runge-Kutta trong Matlab được sử dụng để giải quyết các bài toán tìm các giá trị ban đầu trong hệ phi tuyến. Kết quả thực nghiệm và giải tích trong Malab được so sánh và cho kết quả sai khác trong khoảng 5%.

**Từ khóa:** bistable waterbomb origami mechanism, tần số đáp ứng, nếp gấp.

## 1. GIỚI THIỆU

Origami là một nghệ thuật gấp giấy cổ xưa được phát hiện ở Trung Quốc hơn 2000 năm trước [1]. Việc thực hành gấp origami trong nhiều nền văn hóa có thể được đề cập đến các kỹ thuật biến các tấm phẳng thành cấu trúc ba chiều [2]. Nghệ thuật cắt và gấp giấy, kirigami và các kỹ thuật liên quan đến dán, cắt và gấp có thể được coi là các biến thể của origami [2]. Biến dạng đáng kể có thể xảy ra trong quá trình gấp và mở các cơ chế dựa trên origami. Các cơ chế gấp giấy với các biến thể độ cứng được thiết kế và các hành vi gấp/mở đã thấy các ứng dụng linh hoạt trong kiến trúc [3, 4], pin lithium-ion [5], các hệ thống dựa trên hàng không vũ trụ [6, 7], dụng cụ phẫu thuật [8, 9], di động có thể thu gọn hiển thị [10], logic cơ học [11], rô-bốt thu nhỏ [12–14], ống dẫn sóng có thể điều chỉnh [15] và thu hoạch năng lượng [16–20]. Một trong những tính năng hấp dẫn của các cơ cấu này được lấy cảm hứng từ origami là tính đa ổn định của chúng [21–24]. Lechenault và Adda-Bedia [25] đã nghiên cứu hình dạng cân bằng của cơ chế origami một đỉnh với các hình dạng hình nón. Họ phát hiện ra rằng cơ chế thể hiện tính lưỡng tính mà nó có thể chuyển từ cấu hình siêu bền này sang cấu hình siêu bền khác thông qua các nếp gấp một cách nhanh chóng. Waitukaitis và cộng sự. [26] đã chỉ ra rằng tính phi tuyến tính trong các chuyển động gấp của cơ chế origami cho phép có năm trạng thái ổn định. Yasuda và cộng sự. [27] đã chứng minh khả năng gấp đôi của cơ chế gấp giấy origami có thể thể hiện nhiều cấu hình hình học mà không làm thay đổi các mẫu nếp gấp. Fang và cộng sự. [28] xếp chồng một số ô đơn vị origami có thể xếp chồng lên nhau để đạt được tính đa ổn định. Các ô đơn vị của chúng được hình thành bằng cách kết nối hai tờ Miura-ori. Filipov và Redoutey [29] đã khám phá các hành vi cơ học của một hình paraboloid origami hyperbolic để thu được một cơ chế có thể phân hủy với các trạng thái ổn định đối xứng. Tính đối xứng trong hành vi của nó được quy cho độ vênh cục bộ trên chu vi của cơ chế origami trong quá trình chuyển đổi paraboloid hyperbol giữa hai trạng thái ổn định của nó. Tính đa ổn định được điều khiển về mặt hình học của cơ chế origami có tiện ích tiềm năng cho các cơ cấu chuyển đổi, các loại chốt và cơ chế khuếch đại chuyển động. Tính đa ổn định như vậy cũng là một đặc tính mong muốn cho việc thiết kế siêu vật liệu với cấu trúc có thể lập trình về hình dạng và đặc tính khối [26]. Hành động chuyển trạng thái cân bằng tức thời của cơ cấu origami đa trạng thái ổn định chịu tải trọng động ngụ ý một đáp ứng băng thông rộng đi kèm với độ cứng hay biến thể hình học đột ngột trong quá trình chuyển trạng thái cân bằng. Các đặc tính phi tuyến mạnh mẽ của các cơ chế origami đa trạng thái ổn định có thể được khai thác cho các ứng dụng khác nhau trong giám chấn [30], cảm biến [31], khử rung [32] và

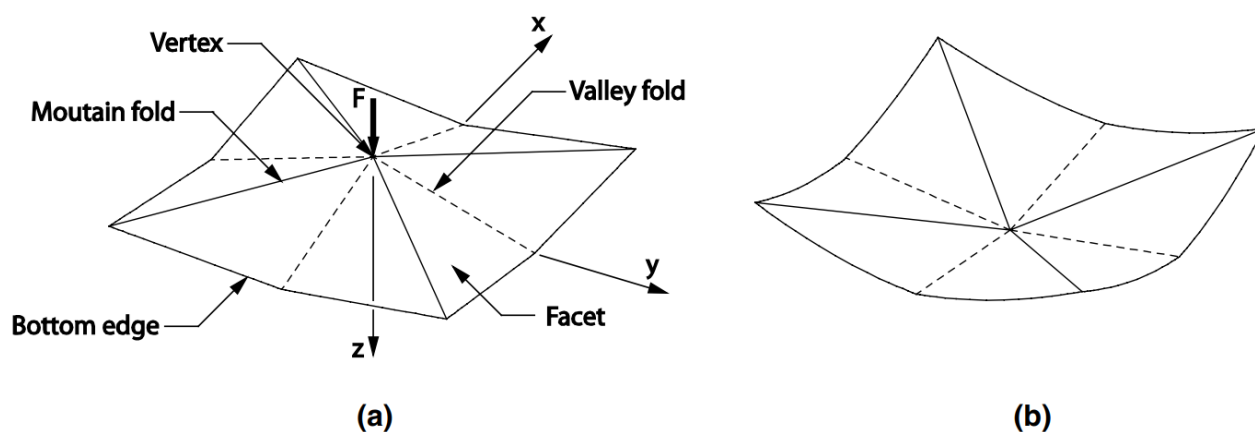
cách ly [33]. Tính đa ổn định liên quan đến hiện tượng mất ổn định trong các cấu trúc nhiều vị trí cân bằng có thể được khai thác cho các ứng dụng khai thác năng lượng băng thông rộng. Khai thác năng lượng phi tuyến tính kết hợp với các cấu trúc đa ổn định đã được chứng minh là có khả năng hoạt động trên dải tần số rộng hơn và cung cấp nhiều năng lượng hơn so với các đối tác tuyến tính của chúng. Arrieta và cộng sự [34] đã chế tạo một thiết bị khai thác băng thông rộng bằng cách thêm các miếng dán áp điện linh hoạt vào một tấm vật liệu có thể phân hủy được. Công suất trung bình lớn trong dải tần số rộng được thu hoạch do các dao động phi tuyến tính của thiết bị ổn định kép. Lee và Inman [35] đã chứng minh rằng một lớp màng mỏng có thể phân hủy đã cải thiện khả năng tạo ra năng lượng so với các máy thu cộng hưởng tuyến tính bằng cách khai thác động lực băng thông rộng của nó. Việc khai thác năng lượng rung động trong dải băng thông rộng cũng có thể đạt được bằng các thiết bị có nhiều bậc tự do cơ học. Toyabur và cộng sự [36] đã phát triển một máy thu năng lượng áp điện-điện từ đa phương thức để thu được công suất đầu ra cao hơn từ các rung động xung quanh thấp. Dưới sự kích thích, việc gấp nếp các cấu trúc origami có thể nhanh chóng và tương hỗ giữa các nếp gấp. Tính phi tuyến do hình học gây ra trong đáp ứng tần số của các cấu trúc origami có thể được sử dụng để khai thác năng lượng băng thông rộng từ các rung động xung quanh. Tính phi tuyến bắt nguồn từ các trạng thái hai vị trí cân bằng của cơ chế origami được sử dụng để phát triển thiết bị thu năng lượng origami hai trạng thái cân bằng. Cơ cấu origami có thiết kế truyền thống ở dạng waterbomb với bốn nếp gấp “thung lũng” (valley folds) xen kẽ bởi bốn nếp gấp “núi cao” (mountain folds). Một mô hình phân tích cho thiết kế của thiết bị được mô tả. Đáp ứng tần số của thiết bị được nghiên cứu để mô tả các hành vi động phi tuyến tính của nó. Hiệu suất khai thác năng lượng băng thông rộng được đặc trưng bằng thực nghiệm.

## 2. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG

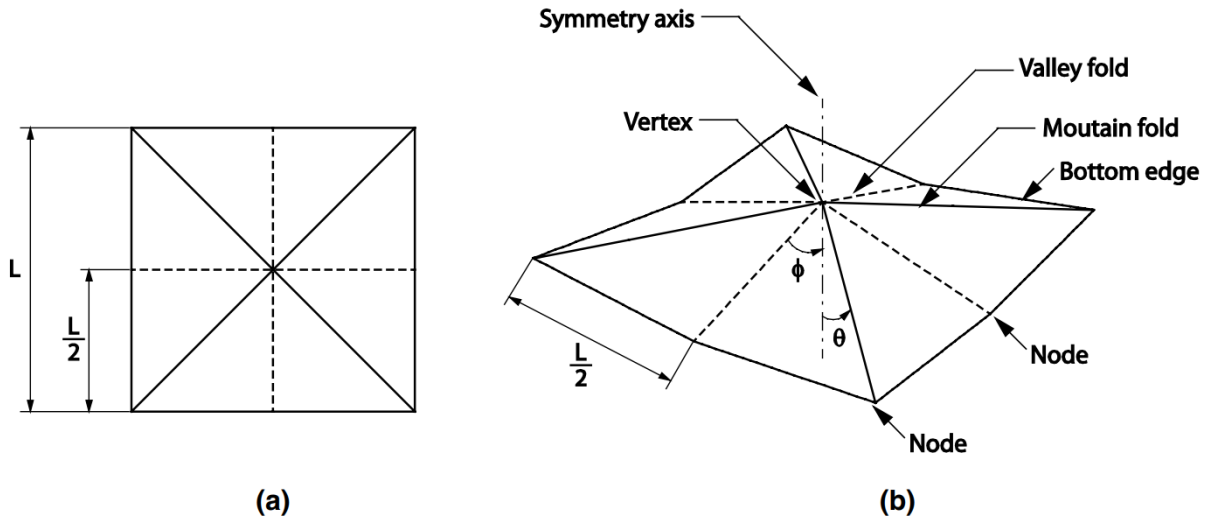
Sự biến dạng lớn trong các cơ chế origami bắt nguồn từ việc gấp và mở, điều này cung cấp một lộ trình đầy hứa hẹn để chuyển đổi một phần năng lượng rung động xung quanh thành điện năng. Các cơ chế origami đa ổn định trải qua sự thay đổi hình học đáng kể khi chịu các kích động bên ngoài có thể đóng vai trò là thiết bị cơ khí để thu năng lượng rung động trong một dải tần số tương đối rộng. Các cấu trúc origami khác nhau có thể được khai thác để đạt được tính đa ổn định do biến hóa hình học tạo ra nhiều biến thể khác nhau. Trong nghiên cứu này, một cơ cấu waterbomb origami với tám nếp gấp được sử dụng để thu năng lượng băng thông rộng từ các rung động xung quanh. Hình 1a cho thấy cấu hình ổn định thứ nhất của cơ cấu origami với bốn nếp gấp “núi cao”, bốn nếp gấp “thung lũng” và tám bề mặt, trong đó có một đỉnh hướng lên trên. Một hệ tọa độ Descartes cũng được thể hiện trong hình. Dưới ảnh hưởng của tải trọng bên ngoài,  $F$ , theo phương  $z$ , cơ chế origami bị tác động để chuyển trạng thái sang cấu hình ổn định thứ hai của nó như trong hình 1b, khi đó đỉnh của cơ cấu hướng xuống dưới. Khi cơ cấu waterbomb origami trong trạng thái chuyển đổi qua lại cấu hình giữa hai trạng thái cân bằng, các nếp gấp “núi cao” và các nếp gấp “thung lũng” vẫn giữ nguyên cấu hình của nó. Biến dạng cục bộ tại các nếp gấp bảo vệ các mặt hay nói cách khác không ảnh hưởng đến các bề mặt của cơ cấu, từ đó cung cấp nền tảng để lưu trữ năng lượng cơ học bên trong. Hình 2a cho thấy một mô hình nếp gấp phẳng trước khi nó được gấp lại thành cơ cấu waterbomb origami. Hình 2b minh họa các tham số hình học của cơ chế origami. Đỉnh và các nút của cơ chế được chỉ định trong hình. Mỗi mặt được bao quanh bởi một nếp gấp “núi cao”, một nếp gấp “thung lũng” và một cạnh dưới cùng (bottom edge).  $\theta$  là góc giữa nếp gấp “núi cao” và trục đối xứng đi qua đỉnh. Góc giữa nếp gấp “thung lũng” và trục đối xứng là  $\varphi$ . Chiều dài cạnh của đáy quả bom nước hình vuông là  $L$ . Vị trí của các đỉnh và các nút của cơ chế origami có thể được xác định bởi ba tham số này. Động lực học gấp và mở của cơ cấu origami liên quan đến sự thay đổi góc lớn giữa các bề mặt liên kề của nó. Một thiết bị thu hoạch năng lượng dựa trên cơ cấu origami có thể được hình thành bằng cách gắn các màng áp điện bên trên các nếp gấp “núi cao” hoặc nếp gấp “thung lũng” nơi động lực học của nếp gấp được kích hoạt bởi sự rung động xung quanh. Năng lượng từ các lực tác nhân bên ngoài, các dao động xung quanh được khai thác bằng các biến dạng cục bộ của màng áp điện trên các nếp gấp từ đó hướng chuyển động của các điện tích về phía các điện cực. Công suất đầu ra có thể được nhân lên nhờ một dãy các màng áp điện được gắn trên các nếp gấp của cơ cấu origami dưới tác dụng của các dao động. Động lực học cơ chế gấp/mở tại các nếp gấp và sự chuyển tiếp tức thời giữa hai trạng thái cân bằng có thể tạo ra tần số băng thông rộng, đây là điều mong muốn đối với các thiết bị khai thác, thu hoạch năng lượng.

### 3. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG

Sự biến dạng lớn trong các cơ chế origami bắt nguồn từ việc gấp và mở, điều này cung cấp một lộ trình đầy hứa hẹn để chuyển đổi một phần năng lượng rung động xung quanh thành điện năng. Các cơ chế origami đa ổn định trải qua sự thay đổi hình học đáng kể khi chịu các kích động bên ngoài có thể đóng vai trò là thiết bị cơ khí để thu năng lượng rung động trong một dải tần số tương đối rộng. Các cấu trúc origami khác nhau có thể được khai thác để đạt được tính đa ổn định do biến hóa hình học tạo ra nhiều biến thể khác nhau. Trong nghiên cứu này, một cơ cấu waterbomb origami với tám nếp gấp được sử dụng để thu năng lượng băng thông rộng từ các rung động xung quanh. Hình 1a cho thấy cấu hình ổn định thứ nhất của cơ cấu origami với bốn nếp gấp “núi cao”, bốn nếp gấp “thung lũng” và tám bề mặt, trong đó có một đỉnh hướng lên trên. Một hệ tọa độ Descartes cũng được thể hiện trong hình. Dưới ảnh hưởng của tải trọng bên ngoài,  $F$ , theo phương  $z$ , cơ chế origami bị tác động để chuyển trạng thái sang cấu hình ổn định thứ hai của nó như trong hình 1b, khi đó đỉnh của cơ cấu hướng xuống dưới. Khi cơ cấu waterbomb origami trong trạng thái chuyển đổi qua lại cấu hình giữa hai trạng thái cân bằng, các nếp gấp “núi cao” và các nếp gấp “thung lũng” vẫn giữ nguyên cấu hình của nó. Biến dạng cục bộ tại các nếp gấp bảo vệ các mặt hay nói cách khác không ảnh hưởng đến các bề mặt của cơ cấu, từ đó cung cấp nền tảng để lưu trữ năng lượng cơ học bên trong. Hình 2a cho thấy một mô hình nếp gấp phẳng trước khi nó được gấp lại thành cơ cấu waterbomb origami. Hình 2b minh họa các tham số hình học của cơ chế origami. Đỉnh và các nút của cơ chế được chỉ định trong hình. Mỗi mặt được bao quanh bởi một nếp gấp “núi cao”, một nếp gấp “thung lũng” và một cạnh dưới cùng (bottom edge).  $\theta$  là góc giữa nếp gấp “núi cao” và trục đối xứng đi qua đỉnh. Góc giữa nếp gấp “thung lũng” và trục đối xứng là  $\varphi$ . Chiều dài cạnh của đáy quả bom nước hình vuông là  $L$ . Vị trí của các đỉnh và các nút của cơ chế origami có thể được xác định bởi ba tham số này. Động lực học gấp và mở của cơ cấu origami liên quan đến sự thay đổi góc lớn giữa các bề mặt liên kề của nó. Một thiết bị thu hoạch năng lượng dựa trên cơ cấu origami có thể được hình thành bằng cách gắn các màng áp điện bên trên các nếp gấp “núi cao” hoặc nếp gấp “thung lũng” nơi động lực học của nếp gấp được kích hoạt bởi sự rung động xung quanh. Năng lượng từ các lực tác nhân bên ngoài, các dao động xung quanh được khai thác bằng các biến dạng cục bộ của màng áp điện trên các nếp gấp từ đó hướng chuyển động của các điện tích về phía các điện cực. Công suất đầu ra có thể được nhân lên nhờ một dãy các màng áp điện được gắn trên các nếp gấp của cơ cấu origami dưới tác dụng của các dao động. Động lực học cơ chế gấp/mở tại các nếp gấp và sự chuyển tiếp tức thời giữa hai trạng thái cân bằng có thể tạo ra tần số băng thông rộng, đây là điều mong muốn đối với các thiết bị khai thác, thu hoạch năng lượng.



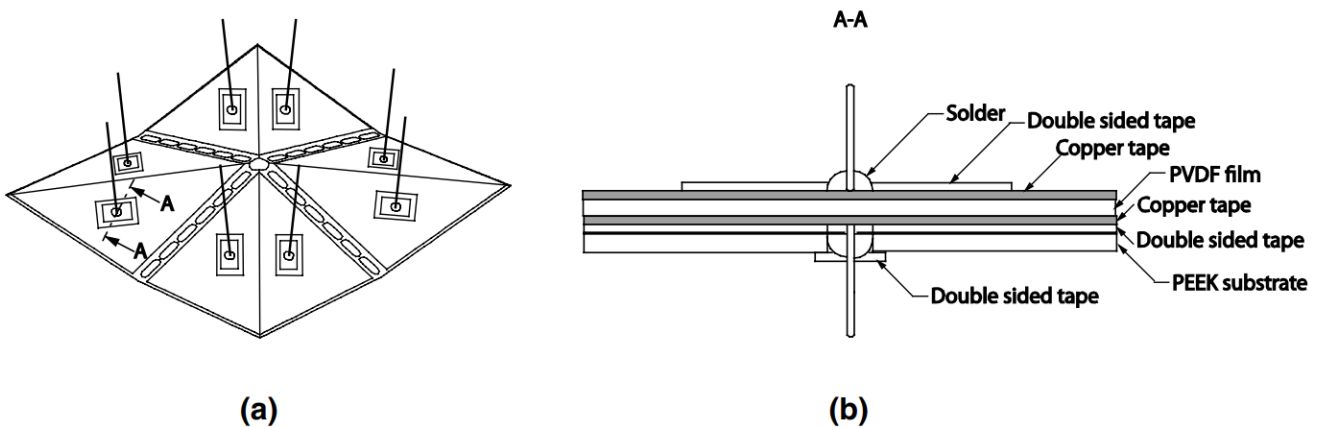
Hình 1. Một cơ cấu origami ở vị trí cân bằng ổn định thứ nhất (a) và thứ hai (b).



Hình 2. a) Một mẫu nếp gấp phẳng; b) Thông số hình học của cơ chế origami.

#### 4. THÍ NGHIỆM

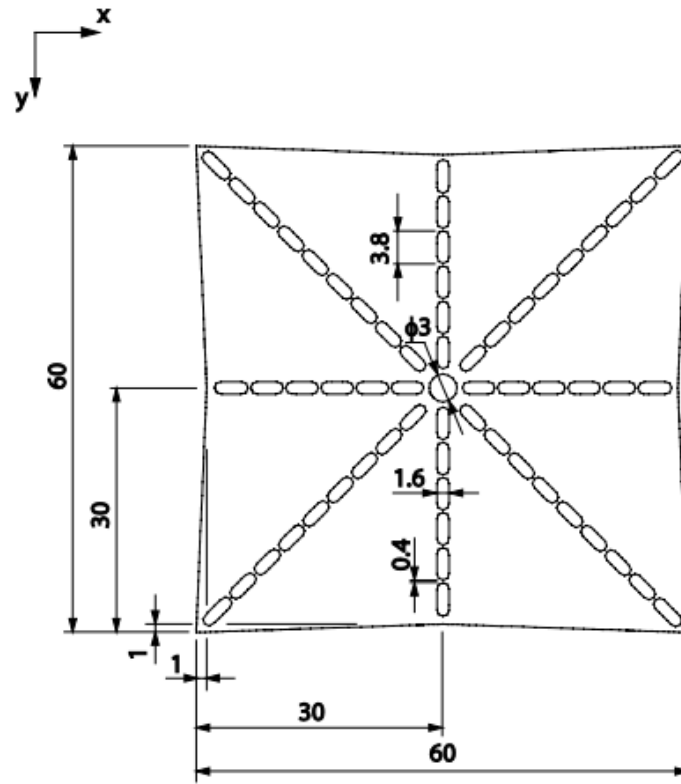
Hình 3a cho thấy một sơ đồ của cơ cấu origami thu hoạch năng lượng hoàn thiện. Mỗi màng áp điện lắp qua một nếp gấp “núi cao” và chiếm hai bề mặt liền kề nhau. Hình 3b là một mặt cắt ngang để mô tả các lớp vật liệu có trong thiết bị hoàn chỉnh. Cấu trúc hỗn hợp của cơ cấu origami bao gồm lớp nền vật liệu nhựa, lớp áp điện, băng keo đồng dẫn điện và các dây điện kết nối. Vật liệu nền là lớp polyetheretherketone (PEEK) (PEEK1000, Welldercia Enterprise Co., Ltd., Taiwan) với độ dày chỉ khoảng 0.2 mm. PEEK là loại nhựa kỹ thuật hiệu suất cao với độ bền kéo cao, độ giãn dài lớn, chống mài mòn và độ rã rất thấp. Như được hiển thị trong hình 3a, các rãnh hột xoài được thiết kế dọc theo tất cả các nếp gấp “núi cao” và “thung lũng” để giảm độ cứng của các nếp gấp, tạo điều kiện thuận lợi cho chuyển động giống như bản lề giữa nếp gấp “núi cao” và nếp gấp “thung lũng”. Lớp vật liệu áp điện (Metallized piezo film sheets, Measurement Specialties, Inc., US) được chế tạo từ nhiều lớp vật liệu trong đó có lớp polyvinylidene fluoride (PVDF) 110  $\mu\text{m}$  nằm giữa hai lớp màng vật liệu bạc (Ag) có độ dày 6  $\mu\text{m}$ . Màng PVDF có hệ số áp điện  $d_{31}$  là  $23 \times 10^{-12}$  (m/V) và điện dung 1,36 nF. Màng PVDF được dán trên bề mặt lớp nền PEEK bằng băng dính hai mặt (Core series 4 1000, 3M Co., US). Các băng keo này có độ dày 50  $\mu\text{m}$  được gắn vào các điện cực bạc trên và dưới của màng PVDF để tạo điều kiện thuận lợi cho việc hàn các dây dẫn. Việc lắp ráp màng áp điện và chất nền nhựa được lấy cảm hứng từ một quy trình được báo cáo bởi Zou và Harne [37].



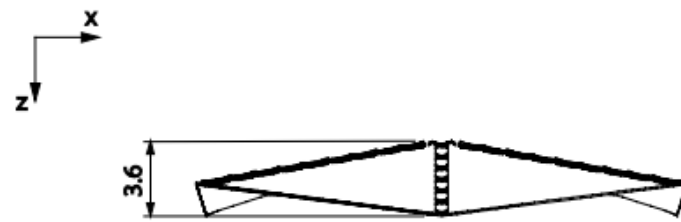
Hình 3. a) Sơ đồ hoàn chỉnh của thiết bị thu hoạch năng lượng; b) Mặt cắt ngang của thiết bị.

Các nguyên mẫu của cơ cấu origami có chiều dài với  $L = 60$  mm,  $\theta = 7^\circ$  và  $\phi = 5^\circ$  đã được chế tạo để khảo sát trạng thái hai vị trí cân bằng và khả năng thu hoạch năng lượng của cơ cấu hai vị trí cân bằng origami. Các kích thước được hiển thị trong hình 4a, b. Hình 5 minh họa các bước chế tạo thiết bị. Một tấm PEEK được cắt thành mẫu như trong Hình 5a bằng máy cắt laser (MS640DZ 60 W, Mingcheng Co., Taiwan). Chỉ được hàn trên bề

mặt lớp băng keo đồng, sau đó lớp này sẽ được dính trên lớp màng PVDF (hình 5b). Làm tương tự cho lớp băng keo đồng thứ hai sẽ thu được hai lớp điện cực băng keo đồng như trên hình 5b. Ngoài ra, cụm này sẽ được cố định trên các bề mặt còn lại để phòng trường hợp một cụm bị hỏng trong quá trình thử nghiệm. Một băng keo hai mặt được dán ở mặt trước của tấm PEEK. Sau đó, tấm PEEK được lật lại và ép lên bốn màng PVDF thông qua các dây dẫn (xem hình 5c). Một lớp băng keo hai mặt khác có đục lỗ ở tâm được đặt trên mỗi cụm dây hàn-băng keo đồng-chì để tránh bị bong ra. Tiếp theo, bộ phận lắp ráp được lật lại và tám băng keo đồng có đầu hàn được cố định trên bốn lớp màng PVDF. Sau đó, các băng keo đồng này được cố định tại chỗ bằng băng keo hai mặt (xem hình 5d). Tiếp theo, cụm lắp ráp ở dạng phẳng được gấp dọc theo mô hình nếp gấp để tạo thành các nếp gấp “núi cao” và nếp gấp “thung lũng” như trong hình 5e và f tương ứng. Cuối cùng, các dây dẫn được hàn vào các điện cực ở mặt sau và mặt trước của cơ chế origami như trong Hình 5g và h. Hai trạng thái cân bằng của cơ cấu origami có thể được đặc trưng bởi: (i) đường cong thể năng-độ dịch chuyển thể hiện hai giá trị thể năng cực tiểu cục bộ và một giá trị thể năng cực đại cục bộ và/hoặc (ii) mối quan hệ dịch chuyển lực với một giá trị cực đại và một giá trị cực tiểu của lực khi cơ cấu di chuyển từ vị trí cân bằng ổn định thứ nhất sang vị trí cân bằng ổn định thứ hai. Thể năng có thể thu được bằng cách lấy tích phân lực với biến số là chuyển vị. Hình 6 cho thấy bố trí thí nghiệm để tìm mối quan hệ giữa lực và chuyển vị của cơ cấu hai vị trí cân bằng origami. Đỉnh chóp của cơ cấu origami được đẩy bởi đầu dò của cảm biến tải trọng (LSB-2 lb, FUTEK Advanced Sensor Technology, Inc., USA) để thu được các mối quan hệ chuyển vị với lực. Một nam châm vĩnh cửu được gắn vào đầu dò để giữ cơ chế origami khi xảy ra hiện tượng giật nhanh (lực trở nên âm). Một bộ khuếch đại analog (IAA100, FUTEK Advanced Sensor Technology, Inc., USA) đã được sử dụng để khuếch đại đầu ra của cảm biến tải trọng. Cảm biến tải trọng được cố định trên một đường dẫn tuyến tính và di chuyển bằng động cơ servo (HIWIN Technologies Corp., Taiwan). Sự dịch chuyển của cơ cấu origami được phát hiện bởi một bộ mã hóa tuyến tính có trong hệ thống động cơ servo. Một vật nặng (lumped mass) được kết nối với cơ chế origami để: (i) tạo điều kiện cố định từ tính trong quá trình thử nghiệm tĩnh và (ii) tăng lực quán tính trong quá trình thí nghiệm động học. Hình 7 trình bày bản vẽ phân rã của việc lắp ráp cơ cấu origami với các thiết bị cố định cho thí nghiệm tĩnh và động. Một hệ tọa độ Descartes cũng được thể hiện trong hình. Thiết bị cố định bao gồm một tấm đế (base plate), sáu thanh dẫn (six rods), hai đầu nối (two connectors), bốn tấm cố định ổ lăn (four bearing housings) và sáu ổ lăn. Hai vị trí ngàm (anchor) của cơ cấu origami được kẹp bởi hai đầu nối, mỗi đầu nối có hai thanh được vặn vào. Các thanh này được hỗ trợ bởi vỏ ổ lăn bên trái và bên phải. Cụm lắp ráp của hai vị trí ngàm origami - đầu nối - các thanh dẫn cho phép cơ cấu chuyển động theo phương x theo hệ tọa độ đã chọn. Hai thanh còn lại được đưa qua một lỗ có đường kính 3 mm ở đỉnh chóp của cơ cấu origami và qua lỗ tâm của vật nặng (lumped mass), là một chốt có một lỗ xuyên qua tâm trục của nó. Hai thanh này cũng được cố định vào chốt hồi ren trong và vật nặng bằng các đai ốc xiết chặt vào các ren trên thanh dẫn. Cụm lắp ráp thanh dẫn – đỉnh chóp origami – vật nặng có thể trượt qua các ổ lăn trước và sau theo hướng z. Hình 7 là ảnh chụp sơ đồ bố trí thí nghiệm để tìm tần số đáp ứng của hệ thống dưới tác dụng của các kích thích từ máy tạo dao động. Nguyên mẫu của cơ cấu origami được cố định vào máy tạo dao động (a shaker, APS113, APS Dynamics, Inc., Germany). Tín hiệu sóng hình sin được tạo ra bởi máy phát xung (function generator, WW5062, Tabor Electronics, Ltd., Israel) và bộ khuếch đại (amplifier, APS125, APS Dynamics, Inc., Germany) khuếch đại tín hiệu để điều khiển máy tạo dao động (a shaker). Biên độ rung của cơ cấu origami và máy dao động được đo bằng hai cảm biến dịch chuyển laze (LK-H150, KEYENCE corporation, Japan). Như thể hiện trong Hình 7, hai điểm đánh dấu, A và B, trên máy dao động và đồ gá lắp ráp cơ cấu origami, tương ứng, phản xạ tia laze trở lại các cảm biến. Dữ liệu rung được ghi lại bằng mô-đun thu thập tín hiệu động (NI-USB 9234, National Instruments corporation, USA). Một gia tốc kế (an accelerometer, 352A24, PCB Piezotronics, Inc., US) được gắn vào máy dao động để kiểm soát gia tốc của máy nhằm thu được đáp ứng tần số của cơ cấu origami dưới các kích thích bên ngoài với gia tốc không đổi.

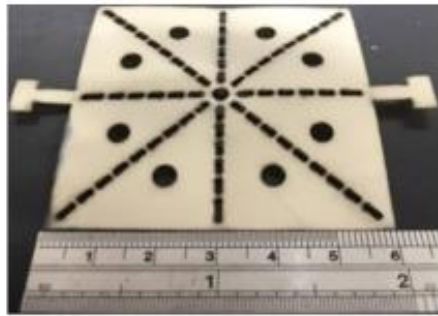


(a)

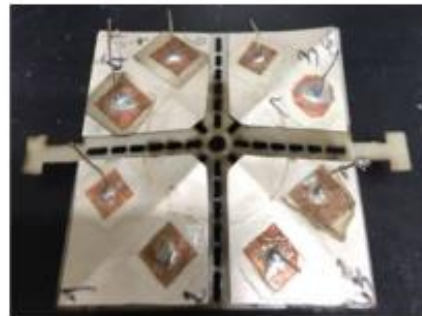


(b)

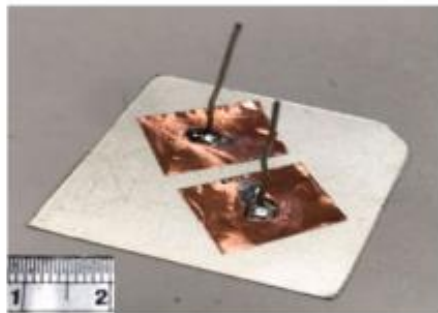
Hình 4. Kích thước của cơ cấu origami. a) Hình chiều đứng; b) Hình chiều cạnh.



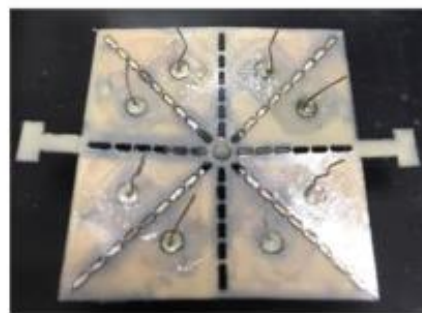
(a)



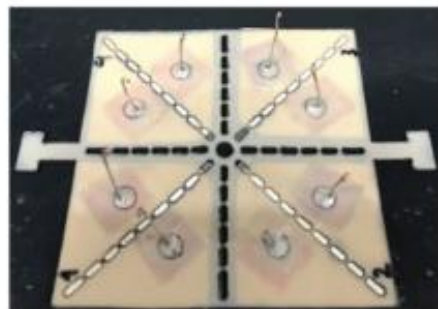
(e3)



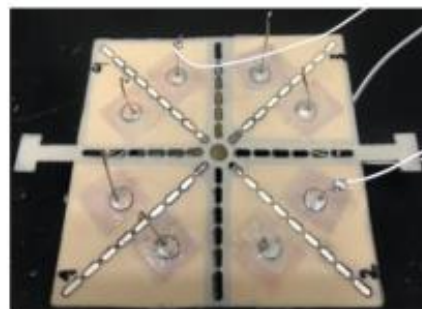
(b)



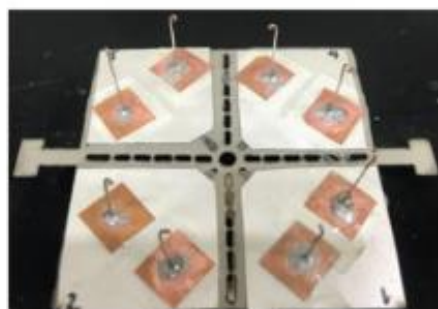
(f)



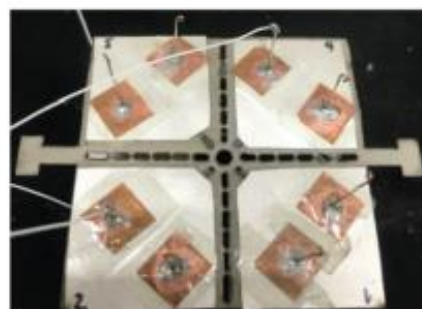
(c)



(g)

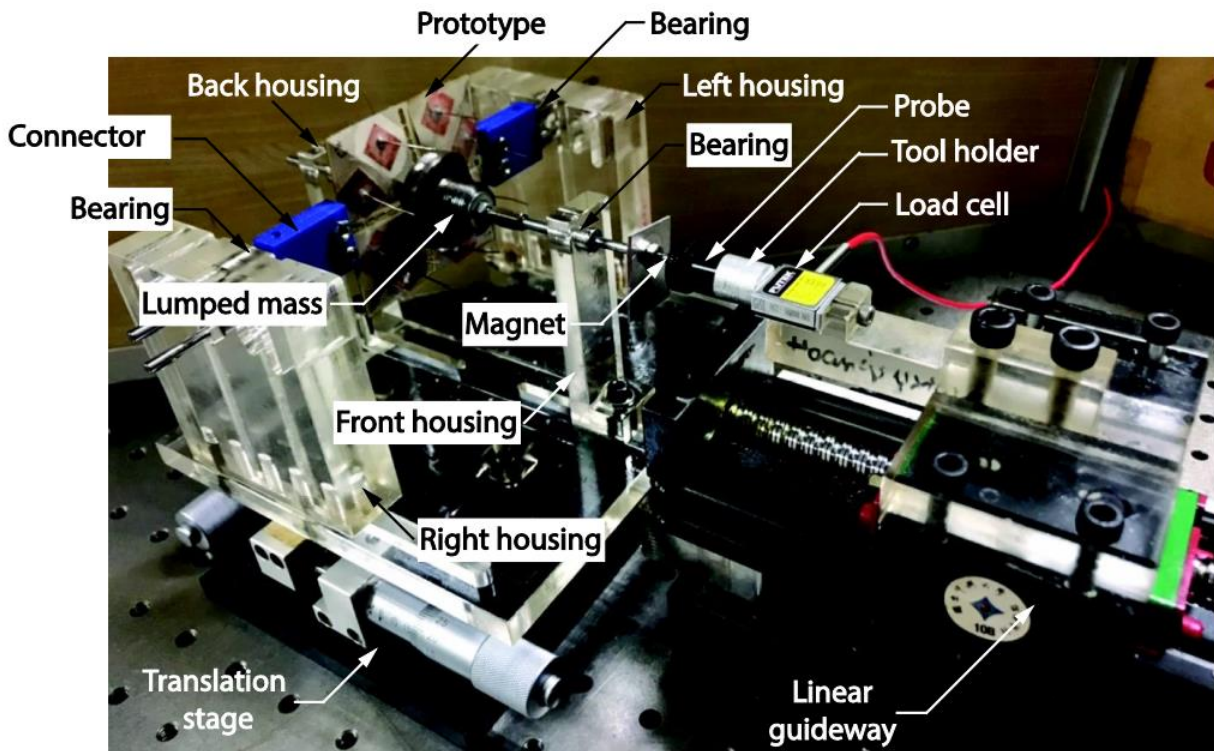


(d)

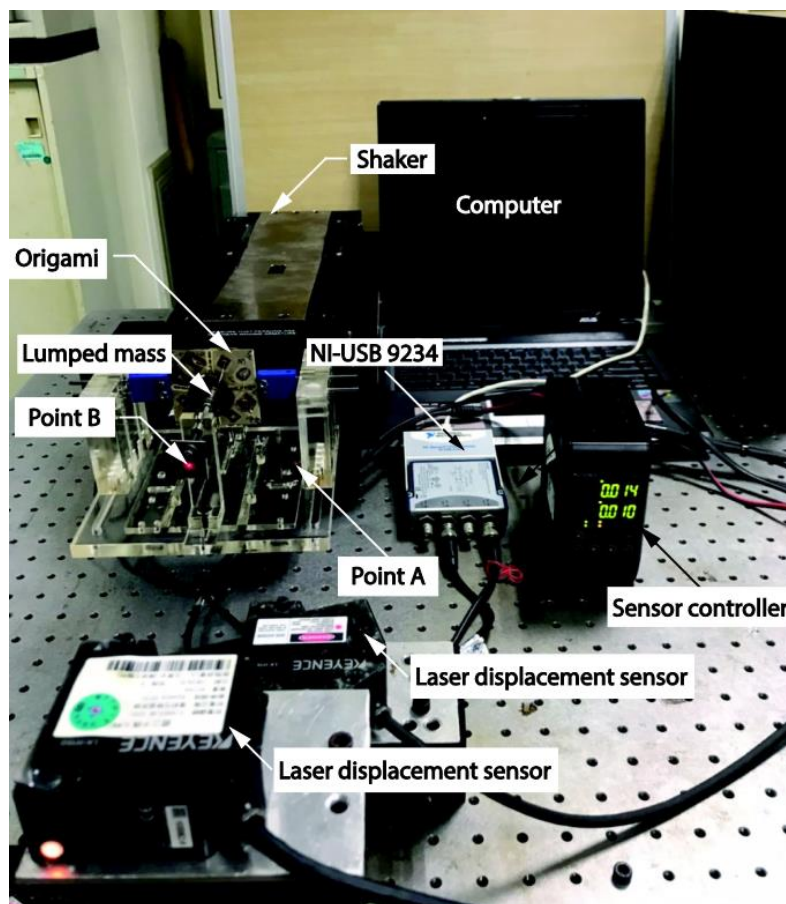


(h)

Hình 5. Quy trình chế tạo: a) Cắt laser từ tấm phôi PEEK; b) Hàn chì trên băng keo đồng; c) Lắp ghép tấm PEEK với lớp màng PVDF; d) Tấm băng keo đồng có dây hàn được cố định trên cụm đã được lật lại; e) Gấp tạo hình thành các nếp gấp “núi cao”; f) Gấp tạo hình thành các nếp gấp “thung lũng”; g) Dây điện được hàn vào dây dẫn ở mặt sau của cụm lắp ráp; h) Dây điện được hàn vào dây dẫn ở mặt trước của cụm lắp ráp.



Hình 6. Hình ảnh bố trí thí nghiệm để thu được kết quả mối liên hệ giữa lực và chuyển vị.



Hình 7: Bố trí thí nghiệm động.



## 5. GIẢI TÍCH

Các hành vi động học chung của cơ cấu origami dưới tác động kích thích bên ngoài được nghiên cứu thông qua mô hình vật lý được mô tả trong Hình 8. Mục đích của mô hình vật lý là cung cấp một công cụ để ước tính ban đầu hiệu suất của thiết bị, chẳng hạn như tần số cộng hưởng chính và dải tần số quét từ 2Hz đến 20Hz. Một phần tử lò xo có lực  $f$  là hàm của chuyển vị  $\delta$ ,  $f(\delta)$ , được đặt giữa vật nặng  $m$  ( $= 50$  g) và máy dao động (shaker) để biểu diễn mối quan hệ lực-độ dời phi tuyến tính của cơ cấu origami. Độ giãn dài của lò xo được coi là độ dịch chuyển tuyệt đối của khối lượng vật nặng,  $z_m$ , tham chiếu với độ dịch chuyển tuyệt đối của shaker,  $z_s$ . Khối lượng của lớp màng PVDF, băng keo và lớp nền PEEK không đáng kể so với khối lượng của vật nặng (lumped mass). Hệ số giảm chấn  $c = 0,5$  (N.giây/m) đã được sử dụng để mô phỏng giảm chấn cơ học. Dạng hình sin của kích động bên ngoài có cường độ  $A$  và tần số góc  $\omega$ . Phương trình chuyển động của cơ cấu origami dưới tác động của ngoại lực là:

$$m \frac{d^2\delta}{dt^2} + c \frac{d\delta}{dt} + f(\delta) = mA\omega^2 \sin(\omega t) \quad (1)$$

Hàm  $f(\delta)$  thu được từ các thí nghiệm có liên quan đến các hiện tượng phi tuyến tính, chẳng hạn như các nếp gấp, sự uốn các bề mặt và sự trượt tại ngàm của cơ cấu so với ổ lăn. Thời gian bước được chọn đủ dài để đảm bảo rằng các quá trình quá độ được thực thi và đạt đến trạng thái ổn định. Giá trị của  $f(\delta)$  được nội suy tại giá trị của  $\delta$  từ đường cong chuyển vị-lực trong thực nghiệm của cơ cấu origami. Khi chuyển vị tiếp tục tăng, lực đạt đến giá trị tối thiểu, sau đó tăng lên để đạt được giá trị bằng 0, đây là trạng thái cân bằng ổn định thứ hai của cơ cấu origami. Cuối cùng, lực tiếp tục tăng đều khi độ dịch chuyển tăng. Khi cơ cấu origami dịch chuyển khỏi vị trí cân bằng ổn định đầu tiên của nó theo hướng  $-z$ , độ lớn của lực tăng dần lên trong phạm vi dịch chuyển được xem xét. Cấu hình hai vị trí cân bằng của cơ cấu origami được xác minh bằng thử nghiệm tĩnh.

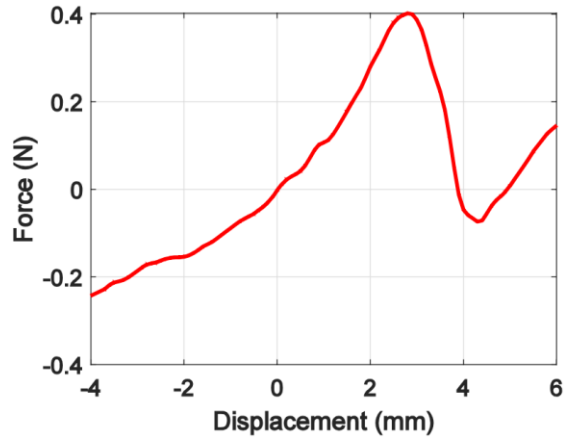
## 6. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 5.1 Thí nghiệm tĩnh học

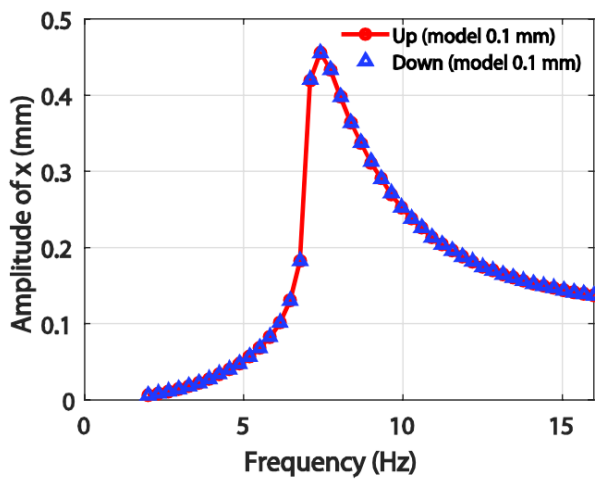
Hình 9 cho thấy kết quả thực nghiệm tĩnh học đường cong chuyển vị-lực của cơ cấu origami nguyên mẫu. Các thí nghiệm được thực hiện năm lần và các giá trị trung bình của lực được vẽ trong hình. Cơ chế origami ban đầu nằm ở vị trí cân bằng ổn định đầu tiên. Khi đỉnh chóp của cơ cấu origami được tác dụng một chuyển vị theo phương  $+z$ , lực tăng nhanh, sau đó đạt giá trị cực đại. Khi đỉnh di chuyển xa hơn theo hướng  $+z$ , lực bắt đầu giảm, đạt giá trị bằng 0, sau đó trở về âm (tác động đây biến thành tác động kéo bởi nam châm giữa vật nặng và đầu dò của cảm biến tải trọng trong trạng thái tĩnh, thử nghiệm như trong Hình 6. Khi độ dịch chuyển tiếp tục tăng, lực đạt đến giá trị tối thiểu, sau đó tăng lên để đạt được giá trị bằng 0, đây là trạng thái cân bằng ổn định thứ hai của cơ cấu origami. Cuối cùng, lực tiếp tục tăng đều khi độ dịch chuyển tăng. Khi cơ cấu origami dịch chuyển khỏi vị trí cân bằng ổn định đầu tiên của nó theo hướng  $-z$ , độ lớn của lực tăng dần đều trong phạm vi dịch chuyển được xem xét. Cấu hình hai trạng thái cân bằng của cơ cấu origami được xác minh bằng thử nghiệm tĩnh. Như thể hiện trong hình, các giá trị lực thay đổi bất thường gần chuyển vị bằng không (vị trí cân bằng ổn định đầu tiên). Điều này có thể là do các đặc tính ma sát giữa các ổ lăn và thanh dẫn hướng (xem Hình 7). Ma sát giữa ổ lăn và các thanh dẫn được kiểm soát bằng chất bôi trơn và có thể tạo thêm lực cần thiết để di chuyển cơ cấu origami. Các sai số trong lắp ráp giữa các chi tiết cũng là yếu tố ảnh hưởng đến giá trị của đường cong thực nghiệm lực-chuyển vị. Bước nhảy của dải tần số quét là 0.1 mm.

### 5.2 Thí nghiệm động học

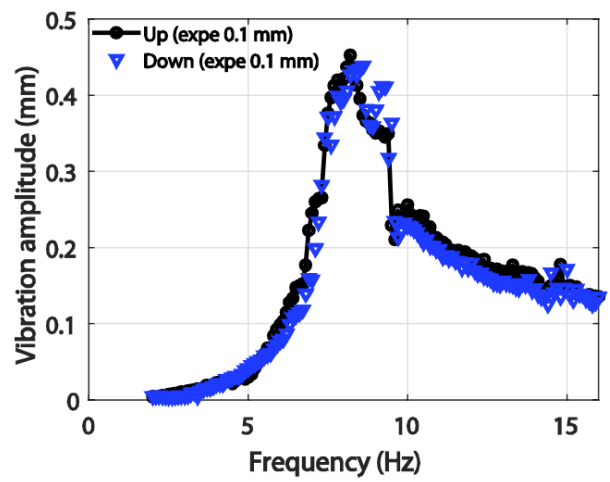
Hình 10a, b lần lượt biểu thị đáp ứng tần số của biên độ rung động của cơ cấu origami dựa trên lý thuyết (model) và thí nghiệm (experiment), trong đó máy dao động (shaker) có biên độ dao động là 0,1 mm. Kết quả lý thuyết dự đoán tần số cộng hưởng gần 7,4 Hz. Đỉnh của tần số cộng hưởng trong thử nghiệm là gần 7,8 Hz, sau đó xuất hiện các phản hồi không ổn định. Một sự thay đổi đột ngột về biên độ xảy ra gần 9,4 Hz dựa trên các thí nghiệm. Tần số cộng hưởng 14,8 Hz có thể được xác định như là một tần số điều hòa cộng hưởng phụ của dạng dao động riêng tại 7,8 Hz (xem Hình 10b). Giá trị của tần số cộng hưởng chính của các thí nghiệm, 7,8 Hz, gần với giá trị



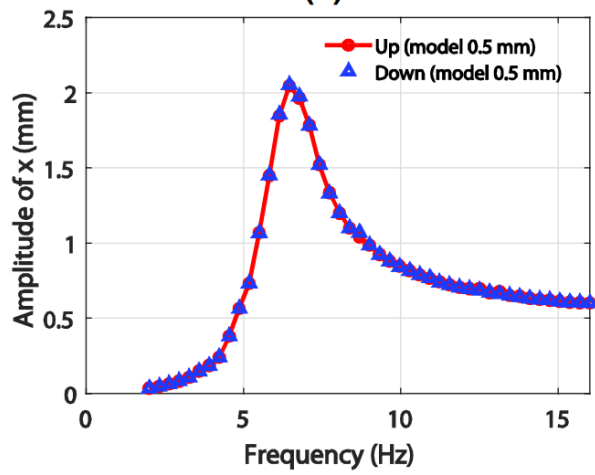
Hình 9: Đường cong chuyển vị-lực thực nghiệm nguyên mẫu được chế tạo.



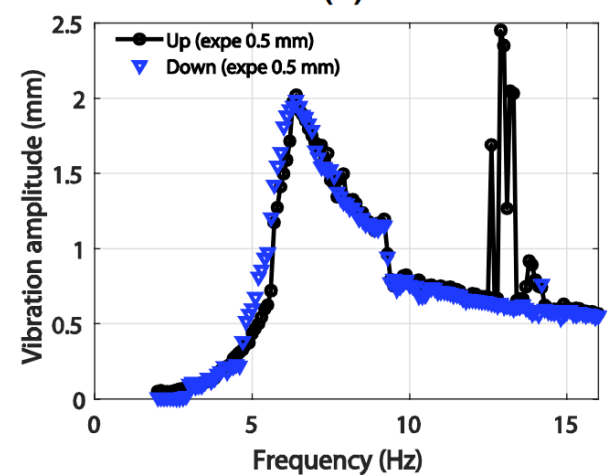
(a)



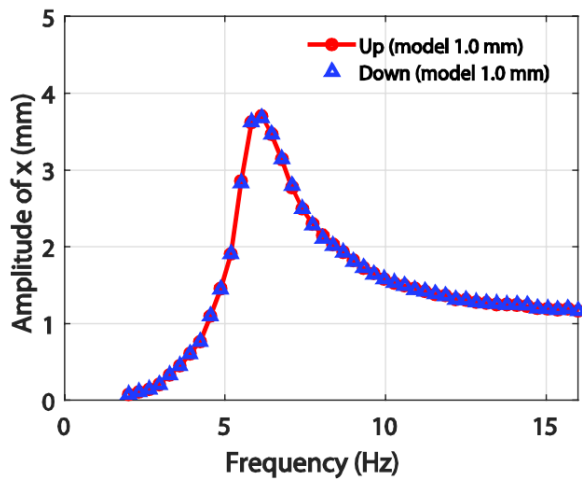
(b)



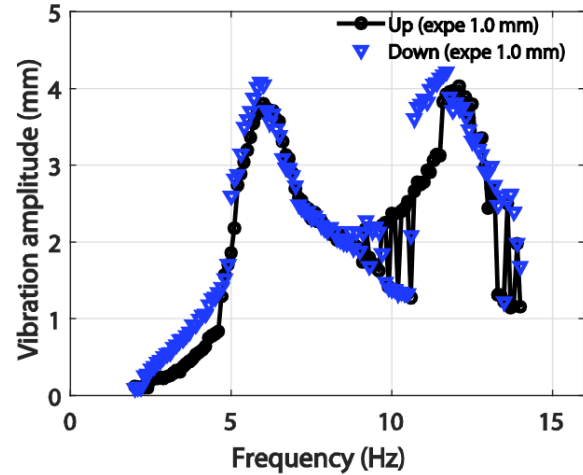
(c)



(d)



(e)



(f)

Hình 10: Đáp ứng tần số của biên độ dao động của nguyên mẫu được chế tạo. Dự đoán mô hình với biên độ rung của máy rung là 0,1 mm (a), 0,5 mm (c) và 1,0 mm (e). Kết quả thí nghiệm với biên độ dao động của máy lắc là 0,1 mm (b), 0,5 mm (d) và 1,0 mm (f).

dựa trên lý thuyết, 7,4 Hz. Hiện tượng nhảy đột ngột có thể được nhìn thấy gần 7,4 Hz và 7,8 Hz tương ứng dựa trên các dự đoán của lý thuyết và các thí nghiệm. Các hành vi phi tuyến tính của hệ thống không thể được dự đoán đầy đủ bằng mô hình vật lý vật nặng đơn giản cho trường hợp kích thích bên ngoài nhỏ. Hình 10c, d hiển thị đáp ứng tần số cho trường hợp có biên độ dao động của máy dao động biên độ 0,5 mm tương ứng dựa trên lý thuyết và thí nghiệm. Các thí nghiệm cho thấy rằng ảnh hưởng của biên độ kích thích cao hơn chủ yếu có thể nhìn thấy gần cộng hưởng điều hòa phụ thứ 2 của dạng dao động riêng tại 6,5 Hz ( $2 \times 6,5 \approx 13$  Hz). Trong vùng gần tần số 12,9 Hz, biên độ thay đổi lên xuống rất nhanh trong quá trình quét tần số tiến (upsweep) của các thí nghiệm, điều này có thể được giải thích bằng sự xuất hiện của các sóng điều hòa phi tuyến tính và hiện tượng nhiễu loạn xung quanh. Các đáp ứng thông qua thực nghiệm thể hiện các dao động xen kẽ giữa vị trí cân bằng thứ nhất và vị trí cân bằng thứ hai gần tần số cộng hưởng chính và cộng hưởng hạ âm. Khi rời xa các tần số cộng hưởng này, các đáp ứng thực nghiệm quay trở lại các dao động về một trong các vị trí cân bằng ổn định. Các biến dạng vĩnh viễn của cơ cấu origami có thể phát sinh do rã, chảy dẻo, nứt vi mô, v.v. sau khi thử nghiệm động kéo dài. Trong quá trình quan sát thí nghiệm thấy rằng độ cứng của cơ cấu origami suy giảm sau các kích thích điều hòa lặp đi lặp lại. Hàm dịch chuyển lực,  $f(\delta)$ , được chia tỷ lệ theo hệ số 0,83 để giải thích cho việc giảm độ cứng sau khi tải lặp đi lặp lại. Nhìn chung, có thể nhận thấy sự đáp ứng tương đối tốt giữa các dự đoán của lý thuyết và kết quả thực nghiệm. Các đáp ứng tần số cho trường hợp có biên độ dao động của máy rung 1,0 mm dựa trên lý thuyết và các thí nghiệm được thể hiện tương ứng trong Hình 10e, f. Quan sát trong Hình 10f, trong quá trình quét tần số lên gần 4,6 Hz, 5,1 Hz và 11,5 Hz, hệ thống nhảy từ biên độ thấp lên biên độ cao. Khi tần số quét đi xuống, ba vòng lặp trễ ( $4,6 - 2,2 = 2,4$  Hz,  $6,0 - 5,1 = 0,9$  Hz và  $11,5 - 10,7 = 0,8$  Hz) được xác định. Hiệu ứng của các kích thích cao hơn cũng có thể được nhìn thấy trong các dải tần số (8,7 Hz, 10,7 Hz) và (13 Hz, 14 Hz) trong đó chuyển động không đều xảy ra dựa trên các thí nghiệm.

## 7. KẾT LUẬN

Một cơ cấu waterbomb origami đã được đề xuất, chế tạo và đặc trưng hóa để khai thác năng lượng các dao động xung quanh. Cấu hình hai trạng thái cân bằng của cơ cấu origami có lợi để thu được các dao động xung quanh ở tần số thấp. Cấu trúc waterbomb origami đã được tích hợp thành công với màng áp điện PVDF để tạo ra một thiết bị thực tế có khả năng biến dạng và tính linh hoạt tuyệt vời. Hiệu suất của thiết bị đã được nghiên cứu bằng cách quét dải tần số thấp từ 2Hz đến 20Hz dưới các mức biên độ rung động khác nhau và gia tốc của các kích thích bên ngoài. Ảnh hưởng của hành vi động học phi tuyến tính của cơ cấu origami đối với sự dao động đã được thảo luận.

## 8. THẢO LUẬN

Như trình bày ở công thức (1), giá trị  $\delta$  tìm được thông qua thực nghiệm với mô hình động học ở hình 11:

$$\delta = z_m - z_s$$

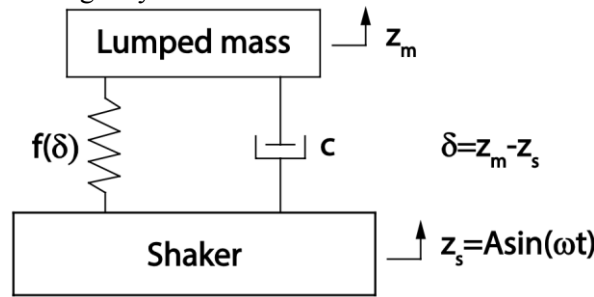
Trong đó:  $z_m$ : độ dịch chuyển tuyệt đối của shaker

$z_s$ : độ dịch chuyển tương đối của lumped mass

Để giải phương trình vi phân dao động (1), bộ giải thuật bậc 4 Runge-Kutta được sử dụng để tìm các giá trị ban đầu của bài toán. Biểu thức (1) có thể được nội suy tại giá trị  $\delta$  từ đường cong lực-chuyển vị thực nghiệm. Để thu được cộng hưởng phụ bậc 2 quan sát được trong thí nghiệm, các số hạng bậc hai phải được đưa rõ ràng vào trong hàm (1). Mỗi quan hệ chuyển vị-lực phi tuyến tính bậc cao của cơ cấu origami có thể được khai triển bằng đa thức bậc cao, ví dụ như đa thức 13 bậc như sau:

$$f(\delta) = -0.00004\delta^{13} + 0.0006\delta^{12} + 0.00006\delta^{11} - 0.03017\delta^{10} + 0.05426\delta^9 + 0.612\delta^8 - 1.164\delta^7 - 6.255\delta^6 + 7.999\delta^5 + 29.18\delta^4 - 16.8\delta^3 - 29.6\delta^2 + 107.7\delta$$

Trong hình 10d và 10f, dải tần số khoảng từ 12Hz-15Hz xuất hiện các dao động có biên độ lớn bất thường. Điều này có thể được giải thích do hệ thống thực nghiệm có nhiều sai số lắp ghép và chế tạo. Khi tần số tăng dần lên hệ thống sẽ phản ứng với các sai số trên. Trong hình 5, sau khi cắt lớp PVDF bằng máy lazer thì 2 lớp silver sẽ bị dính do nhiệt độ dẫn đến hiện tượng short circuit. Để giải quyết vấn đề trên, cắt bỏ lớp rìa xung quanh bên ngoài bị cháy do nhiệt độ khi cắt bằng máy lazer.



Hình 11: Mô hình vật lý của hệ thống.

## 9. CÔNG VIỆC TIẾP THEO

Trong phần đầu tiên này, bài báo nghiên cứu tập trung vào việc xác định được trạng thái hai vị trí cân bằng của cơ cấu origami, từ đó đi tìm tần số đáp ứng (resonance frequency). Kết quả được so sánh giữa lý thuyết và thực nghiệm như mô tả trong bài báo. Dựa trên tần số đáp ứng đã tìm được trong bài báo này, công việc tiếp theo sẽ là thu hoạch năng lượng lớn nhất có thể cụ thể ở đây là hiệu điện thế và công suất đầu ra của thiết bị tại các tần số đáp ứng và tại dải băng thông (bandwidth) tần số thích hợp.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. H. Aitken, "Some notes on the history of paper. Bibliographical Society," 1913.
- [2] J. Rogers, Y. Huang, O. G. Schmidt, and D. H. Gracias, "Origami in MEMS and NEMS," MRS Bulletin, vol. 41, pp. 123–129, 2016.
- [3] A. G. Sorguc, I. Hagiwara và S. A. Selcuk, "Origamics in architecture: A medium of inquiry or design in architecture," METU Journal of the Faculty of Architecture, vol. 26, pp. 235–247, 2009.
- [4] L.-T. Luan, L.-D. Thang, N.-M. Hung, Q.-H. Nguyen và H.-X. Nguyen, "Optimal design of an origami-inspired kinetic façade by balancing composite motion optimization for improving daylight performance and energy efficiency," Energy, vol. 219, 2021.
- [5] Z. Song, T. Ma, R. Tang, Q. Cheng, X. Wang, D. Krishnaraju, R. Panat, R. Chan, C. K. Yu, H., and H. Jiang, "Origami lithium-ion batteries," Nature Communications, vol. 5, 2014.
- [6] J. Morgan, S. P. Magleby and L. L. Howell, "An approach to designing origami-adapted aerospace mechanisms," Journal of Mechanical Design, vol. 138, 2016.
- [7] A. Yellowhorse and L. L. Howell, "Deployable lenticular stiffeners for origami-inspired mechanisms," Mechanics Based Design of Structures and Machines, no. 46, vol. 5, pp. 634–649, 2018.

- [8] M. Salerno, K. Zhang, A. Menciasci and J.S. Dai, “A novel 4-DOFs origami enabled, SMA actuated, robotic end-effector for minimally invasive surgery,” In: Proceedings of the 2014 IEEE international conference on robotics & automation (ICRA), Hong Kong, China, May 31 – June, pp. 2844–2849, 2014.
- [9] H. Suzuki and R. J. Wood, “Origami-inspired miniature manipulator for teleoperated microsurgery,” *Nature Machine Intelligence*, vol. 2, pp. 437–446, 2020.
- [10] J. A. Faber, A. F. Arrieta and A. R. Studart, “Bioinspired spring origami,” *Science*, vol. 359, pp. 1386–1391, 2018.
- [11] N. Treml, A. Gillman, P. Buskohl and R. Vaia, “Origami mechanologic,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, no. 115, vol. 27, pp. 6916–6921, 2018.
- [12] S. Miyashita, S. Guitron, K. Yoshida, S. Li, D.D. Damian and D. Rus, “Ingestible, controllable, and degradable origami robot for patching stomach wounds,” In: Proceedings of the 2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), Stockholm, Sweden, May 16–21, pp. 909–916, 2016.
- [13] H. Shigemune, S. Maeda, Y. Hara, N. Hosoya and S. Hashimoto, “Origami robot: A self-folding paper robot with an electrothermal actuator created by printing,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21, 2746–2754, 2016.
- [14] C. H. Belke and J. Paik, “Mori: A modular origami robot,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, pp. 2153–2164, 2017.
- [15] M. Thota and K. W. Wang, “Tunable waveguiding in origami phononic structures,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 430, pp. 93–100, 2018.
- [16] K. Tao, H. Yi, Y. Yang, L. Tang, Z. Yang, J. Wu, H. Chang and W. Yuan, “Miura-origami-inspired electret/triboelectric power generator for wearable energy harvesting with water-proof capability,” *Microsystems & Nanoengineering*, no. 6, vol. 56, 2020.
- [17] R. Miranda, E. Babilio, N. Singh, F. Santos and F. Fraternali, “Mechanics of smart origami sunscreens with energy harvesting ability,” *Mechanics Research Communications*, vol. 105, 2020.
- [18] S. Li, “Double-folding paper-based generator for mechanical energy harvesting,” *Frontiers of Optoelectronics*, vol. 10, pp. 38–43, 2017.
- [19] Y. Wang, Y. Wu, Q. Liu, X. Wang, J. Cao, G. Cheng, Z. Zhang, J. Ding and K. Li, “Origami triboelectric nanogenerator with double-helical structure for environmental energy harvesting,” *Energy*, vol. 212, 2020.
- [20] J. J. Park, P. Won and S. H. Ko, “A Review on hierarchical origami and kirigami structure for engineering applications,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*, vol. 6, pp. 147–161, 2019.
- [21] B. H. Hanna, J. M. Lund, R. J. Lang, S. P. Magleby and L. L. Howell, “Waterbomb base: a symmetric single-vertex bistable origami mechanism,” *Smart Materials and Structures*, vol. 23, 2014.
- [22] J. L. Silverberg, J.-H. Na, A. A. Evans, B. Liu, T. C. Hull, C. D. Santangelo, R. L. Lang, R. C. Hayward and I. Cohen, “Origami structures with a critical transition to bistability arising from hidden degrees of freedom,” *Nature Materials*, vol. 14, pp. 389–393, 2015.
- [23] N.A. Pehrson, S.P. Magleby and L.L. Howell, “An origamibased thickness-accommodating bistable mechanism in monolithic thick-sheet materials,” In: Proceedings of the 2018 international conference on reconfigurable mechanisms and robots (ReMAR), Delft, Netherlands, June 20–22, 2018.
- [24] H. Sharma and S. H. Upadhyay, “Geometric design and deployment behavior of origami inspired conical structures,” *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2020.
- [25] F. Lechenault and M. Adda-Bedia, “Generic bistability in creased conical surfaces,” *Physics Review Letters*, vol. 115, 2015.
- [26] S. Waitukaitis, R. Menaut, G.-G. Chen and M. Van Hecke, “Origami multistability: From single vertices to metasheets,” *Physical Review Letters*, vol. 114, 2015.
- [27] H. Yasuda, Z. Chen and J. Yang, “Multitransformable leafout origami with bistable behavior,” *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 8, 2016.
- [28] H. Fang, K. W. Wang and S. Li, “Asymmetric energy barrier and mechanical diode effect from folding multi-stable stacked-origami,” *Extreme Mechanics Letters*, vol. 17, pp. 7–15, 2017.
- [29] E. T. Filipov and M. Redoutey, “Mechanical characteristics of the bistable origami hyper,” *Extreme Mechanics Letters*, vol. 25, pp. 16–26, 2018.
- [30] D. R. Johnson, M. Thota, F. Semperlotti, and K. W. Wang, “On achieving high and adaptable damping via a bistable oscillator,” *Smart Materials and Structures*, vol. 22, 2013.
- [31] J. Zhao, C. Sun, N. Kacem, H. Wang, R. Gao, P. Liu and Y. Huang, “A nonlinear resonant mass sensor with enhanced sensitivity and resolution incorporating compressed bistable beam,” *Journal of Applied Physics*, vol. 124, 2018.
- [32] D. R. Johnson, R. L. Harne and K. W. Wang, “A disturbance cancellation perspective on vibration control using a bistable snap-through attachment,” *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 136, 2014.
- [33] A. D. Shaw, S. A. Neild, D. J. Wagg, P. M. Weaver and A. Carrella, “A nonlinear spring mechanism incorporating a bistable composite plate for vibration isolation,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, pp. 6265–6275, 2013.
- [34] A. F. Arrieta, P. Hagedorn, A. Erturk and D. J. Inman, “A piezoelectric bistable plate for nonlinear broadband energy harvesting,” *Applied Physics Letters*, vol. 97, 2010.

- [35] A. J. Lee and D. J. Inman, "A multifunctional bistable laminate: Snap-through morphing enabled by broadband energy harvesting," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 29, pp. 2528–2543, 2018.
- [36] R. M. Toyabur, M. Salauddin, H. Cho and J. Y. Park, "A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric-electromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations," *Energy Conversion and Management*, vol. 168, pp. 454–466, 2018.
- [37] C. Zou and R. L. Harne, "Adaptive acoustic energy delivery to near and far fields using foldable, tessellated star transducers," *Smart Materials and Structures*, vol. 26, 2017.

## **RESEARCH, DESIGN AND FABRICATION OF BISTABLE WATERBOMB ORIGAMI MECHANISM TO DETECT RESPONSE FREQUENCY FOR ENERGY HARVESTING**

TIEN HOANG NGO

*Faculty of Mechanical Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City  
ngotienhoang@iuh.edu.vn*

**Abstract.** This paper describes an energy harvesting device based on the oscillation of the bistable waterbomb origami mechanism through piezoelectric energy conversion. This device is capable of harnessing broadband energy from low frequency ambient vibrations. This design uses the stability inherent in the waterbomb origami structure to increase its frequency response bandwidth. Folding along the pattern creates folds of the origami mechanism that can facilitate large bending distortions from which to find the appropriate frequency response. The compact size and light weight of the origami mechanism make it convenient for integration into different hosts subject to vibration. The performance of the origami waterbomb mechanism was tested under external excitation with different vibration intensities such as 0.1mm, 0.5mm and 1mm. The Runge-Kutta quaternary algorithm in Matlab is used to solve problems of finding initial values in a nonlinear system. The experimental and analytical results in Malab were compared and the results differed by about 5%.

**Keywords:** bistable waterbomb origami mechanism, frequency response, folding.

*Ngày gửi bài: 08/06/2023*

*Ngày chấp nhận đăng: 13/09/2023*