

# THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH CƠ CẤU BIẾN ĐỔI CHUYỂN ĐỘNG TỊNH TIẾN THÀNH CHUYỂN ĐỘNG XOAY DƯỚI TÁC DỤNG CỦA BỘ THANH TRUYỀN ĐỘNG NHIỆT BIÊN DẠNG CHỮ V

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.v57i03.4385>*

**Tóm tắt.** Một kết cấu mềm dùng để biến đổi chuyển động tịnh tiến thành chuyển động xoay được phát triển. Để đạt được sự biến đổi truyền chuyển động này, bộ truyền chuyển động tịnh tiến dạng chữ V được sắp xếp đối xứng nhau. Chuyển động tịnh tiến này được thực hiện bởi hai thanh truyền động nhiệt kiểu chữ V. Với sự đột phá trong ngành công nghệ kỹ thuật cao, cơ cấu mềm này có thể được sử dụng trong một số các ứng dụng vi quang học như bộ chuyển mạch quang học, đo đặc các nhiễu xạ, bộ giảm cường độ quang học, v.v... Các phân tích phần tử hữu hạn được thực hiện để dự đoán các hành vi của cơ chế biến đổi truyền động. Kết cấu đạt tỷ số truyền xấp xỉ 1.1 độ/ $\mu\text{m}$ . Các kết quả mô phỏng cũng cho thấy sự phân bố nhiệt độ đồng đều hơn dọc theo cơ cấu truyền động nhiệt cho phép giãn nở nhiệt tổng thể lớn hơn và do đó chuyển động tuyến tính cũng lớn hơn, điều này giúp củng cố đầu ra chuyển động quay thuận lợi hơn, từ đó thu được một góc xoay lớn hơn.

**Từ khóa:** biến đổi chuyển động tịnh tiến thành chuyển động quay, tỷ số truyền, cơ cấu truyền động nhiệt kiểu chữ V.

## 1. GIỚI THIỆU

Bộ vi định vị quay có thể nhìn thấy từ các ứng dụng trong ổ đĩa cứng [1], các bàn trượt xoay độ [2] và bộ điều chỉnh vi mô [3]. Lau và cộng sự. [1] đã phát triển một bộ xoay vi mô được điều khiển bằng sự giãn nở nhiệt của vật liệu tổng hợp silicon/polyme. Yi và cộng sự. [2] đã trình bày cơ chế định vị ba bậc tự do (DOF) vi mô với bản lề uốn. Nó yêu cầu 12 cơ cấu truyền động áp điện để đạt được vị trí hai bậc tự do và một bậc tự do xoay trên một tấm nền. Chao và cộng sự. [3] đã báo cáo một bàn xoay bao gồm có ba chuyển động tịnh tiến và chín bản lề uốn. Để đạt được độ chính xác cao, họ đã sử dụng các phần tử gốm áp điện làm thiết bị truyền động. Arefin và cộng sự. [4] trình bày một bàn xoay được kích hoạt bởi sự giãn nở nhiệt của các thanh trở nhiệt. Lin, chao và các cộng sự [5] đã thành lập một hệ số dẫn nhiệt biên dạng để giải quyết bài toán nhiệt dẫn từ cơ cấu truyền động ra môi trường xung quanh.

Bằng cách sử dụng một quy trình chế tạo wafer chi phí thấp, Janak và cộng sự. [6] đã phát triển một thiết bị micro gương silicon đơn tinh thể tự do được truyền động bằng nhiệt. Thiết bị với một bộ bốn cơ cấu truyền động nhiệt được đặt ở các mặt đối diện của tấm gương trung tâm thông qua các lò xo uốn. Micro gương đã được nghiên cứu để thu được độ lệch góc lặp lại lên đến  $10^\circ$ , thời gian đáp ứng nhiệt 8-13ms. Tuy nhiên, khi độ lệch góc tăng hơn  $10^\circ$ , hành vi chuyển mạch không thể lặp lại được. Tất cả các thành phần cấu trúc của thiết bị được chế tạo bằng silicon đơn tinh thể và sử dụng công nghệ gia công micro-technology ăn mòn sâu cho đến khi bản thân vật liệu chi tiết đột ngột thay đổi biên dạng. ban đầu của nó. Thiết bị này rất hữu ích cho các mạng truyền thông quang học hoặc các ứng dụng quét quang học.

Butler và cộng sự. [7] đã sử dụng mảng thiết bị truyền động tương thích CMOS để định vị bề mặt quét micro và bộ gương micro xoay. Một hệ thống điều khiển xung kỹ thuật số dựa trên máy tính đã được phát triển để định vị chính xác vị trí gương.

Enikov và cộng sự. [8] đã chỉ ra giải pháp phân tích của bài toán nhiệt điện và cơ nhiệt của cơ cấu truyền động kiểu V bằng cách sử dụng lý thuyết thanh dầm. Kết quả giữa tính toán lý thuyết, phân tích phần tử hữu hạn (FEA) và các quan sát thực nghiệm đạt tỷ lệ sai số rất nhỏ. Tuy nhiên, ở các mức độ nhiệt độ cao hơn, thanh bị biến dạng vĩnh về một bên dẫn tới giảm độ dịch chuyển của cơ cấu truyền động.

Hussein và cộng sự. [9] đã phát triển một mô hình phân tích động học của cơ cấu truyền động nhiệt-điện hình chữ U. Trong nghiên cứu này, sự phân bố nhiệt trên cơ cấu truyền động và sự dịch chuyển do nhiệt tác động đã được các tác giả tính toán. Các dạng trạng thái điện-nhiệt trong cánh tay robot của bộ truyền động được minh họa bằng cách cung cấp giải pháp chính xác PDEs (partial differential equations). Theo

kết quả của họ, phương pháp phần tử hữu hạn FEA và các thí nghiệm nói chung phù hợp chặt chẽ với các phương pháp giải tích (analytical models) về sự phân bố nhiệt và sự dịch chuyển.

Guan và cộng sự. [10] giới thiệu cơ cấu truyền động hình chữ Z cung cấp độ cứng nhỏ hơn mà không bị xoắn và cung cấp sự dịch chuyển lớn hơn. Tất cả các thông số thiết kế, chiều rộng và chiều dài của dầm trung tâm ảnh hưởng rất lớn đến chuyển vị, độ cứng, lực đầu ra và độ ổn định của thiết bị. Do đó, phân tích phần tử hữu hạn FEA đã được thực hiện để đánh giá hiệu suất của thiết kế. Thí nghiệm ba dây thiết bị của cơ cấu truyền động nhiệt hình chữ Z cho kết quả gần với kết quả phân tích phần tử hữu hạn. Các đặc tính của thiết bị như độ cứng, độ dịch chuyển, nội lực được suy ra dưới dạng hàm của kích thước thiết bị.

Yang và cộng sự. [11] cho thấy một thiết kế của cơ cấu truyền động nhiệt dạng đĩa vòng làm bằng vật liệu micro polysilicon đã được chế tạo bằng phương pháp MUMPs. Công việc này tập trung thiết kế một cơ cấu truyền động dạng đĩa vòng, trực tiếp tạo ra chuyển động quay tròn. Kết quả của phân tích phần tử hữu hạn, thử nghiệm và phương pháp giải tích về tần số cộng hưởng cho thấy tỷ lệ khác biệt nhỏ. Tuy nhiên, một phân tích đầy đủ (phương pháp giải tích và thử nghiệm) về đặc tính lực của công trình này không được nghiên cứu. Ngoài ra, kích thước của cơ cấu truyền động có thể ảnh hưởng đến thiết kế.

Bài báo này nghiên cứu một kết cấu biến đổi chuyển động tịnh tiến sang chuyển động xoay, trong đó các cơ cấu truyền động điện nhiệt kiểu chữ V được bố trí một cách đối xứng xung quanh đĩa quay. Các phân tích cơ-nhiệt-điện được thực hiện để xác nhận sự hoạt động của cơ cấu biến đổi chuyển động. Tỷ số truyền của chuyển động tịnh tiến và chuyển động xoay được tính toán.

Lott và cộng sự. [12] đã tạo ra một chùm các thanh truyền động nhiệt dạng chữ V ở kích thước micro bằng cách bố trí các cụm thanh truyền động nhiệt đối xứng qua một thanh dẫn hướng với một góc nghiêng nhỏ so với phương ngang. Khi sự chênh lệch điện áp được đưa vào tại các bản cực, dòng điện chạy vào các thanh truyền động nhiệt và truyền qua thanh dẫn hướng. Mật độ dòng điện cao gây ra hiện tượng nóng, giãn nở nhiệt. Kết quả của quá trình này là thu được một sự dịch chuyển theo phương thẳng đứng của thanh dẫn hướng trên cùng một mặt phẳng. Thiết bị được chế tạo bằng phương pháp Multi-User MEMS Processes (MUMPs). Trong nghiên cứu này, phần mềm mô phỏng phân tích kỹ thuật ANSYS được sử dụng để dự đoán sự dịch chuyển của thanh dẫn hướng ở trạng thái cân bằng. Để so sánh kết quả mô phỏng ANSYS, họ thí nghiệm cơ cấu trong môi trường chân không và môi trường tự nhiên với cùng một điều kiện như trong ANSYS. Kết quả so sánh cho thấy rằng, thí nghiệm trong môi trường chân không đem lại độ tin cậy cao và sai số không vượt quá 5% so với kết quả mô phỏng ANSYS.

Yan và cộng sự. [13] trình bày một cơ cấu truyền động nhiệt bao gồm hai thanh có bề rộng nhỏ, dài đóng vai trò dẫn điện trực tiếp và một thanh còn lại có bề rộng lớn hơn rất nhiều và không có điện cực đưa vào. Do cả ba thanh được chế tạo cùng một vật liệu (tức là sẽ cùng hệ số dẫn nở nhiệt) nhưng do thiết kế hình học không giống nhau dẫn đến hai thanh có bề rộng nhỏ sẽ cung cấp sự dịch chuyển lớn hơn so với thanh còn lại dưới tác dụng của điện áp. Cơ cấu truyền động nhiệt được chế tạo bằng phương pháp Multi-User MEMS Processes (MUMPs). Mô phỏng phân tích kỹ thuật (FEA) được sử dụng để dự đoán nhiệt độ tối đa và sự dịch chuyển của cơ cấu theo phương thẳng đứng trong cùng một mặt phẳng dưới tác dụng của dây điện áp đưa vào. Để kiểm chứng kết quả trong FEA, mô hình lý thuyết (Analytical) và thí nghiệm được thực hiện với cùng một điều kiện biên và cho kết quả đáng tin cậy với sự sai khác giữa ba phương pháp rất nhỏ. Tuy nhiên, tại điện áp cao cụ thể lớn hơn 7V thì hai thanh bề rộng nhỏ va chạm lẫn nhau do sự biến dạng quá lớn dưới tác dụng của điện áp cao.

Trong hệ thống MEMS, Kim và cộng sự. [14] giới thiệu một thiết bị có khả năng di chuyển đồng thời theo hai phương X và Y với sự hỗ trợ của cơ cấu đòn bẩy và hệ thống các chùm thanh truyền động dạng chữ V tác dụng lên hệ thống đòn bẩy. Để có thể dịch chuyển theo phương X thì hệ thống các thanh truyền động nhiệt và cơ cấu đòn bẩy sẽ bố trí theo phương vuông góc với phương X và tương tự như vậy với phương Y. Để dự đoán được nhiệt độ, sự biến dạng và lượng dịch chuyển theo phương X và Y, phần mềm mô phỏng kỹ thuật ANSYS được sử dụng. Ngoài ra, mô hình lý thuyết (Analytical) cũng được phát triển để kiểm chứng kết quả của ANSYS. Trong báo cáo này, sự sai khác trong kết quả thu hoạch sự dịch chuyển theo phương X, Y dưới tác dụng của dây điện áp đặt vào của cả hai phương pháp trên vào khoảng dưới 1%. Điều này chứng tỏ rằng, các thông số tính toán thiết kế và phương pháp gia công là đáng tin cậy. Tuy nhiên, khi thí nghiệm dưới dải tần số từ 10Hz-10kHz để tìm tần số cộng hưởng thì cả hai bản di trượt theo phương X và Y không cho kết quả cộng hưởng tại cùng một tần số. Lý do có thể giải thích kết quả trên là di khối lượng của hai bản di trượt X và Y khác nhau.

Lin và cộng sự. [15] trình bày cấu trúc điện-nhiệt ở hai dạng treo (suspended structure) và dạng liền khối

(attached structure). Trong cấu trúc dạng treo, khoảng cách từ chi tiết đến lớp nền là 2  $\mu\text{m}$ . Để giải quyết bài toán đặc tính truyền nhiệt tại vị trí cân bằng, phần mềm mô phỏng kỹ thuật ANSYS được sử dụng với 2000 phần tử lưới cho một nửa mô hình vì cấu trúc đối xứng. Kết quả của ANSYS được sử dụng tính toán hệ số biên dạng (shape factor). Hệ số biên dạng ảnh hưởng lên toàn bộ quá trình truyền tải nhiệt. Hệ số này không có đơn vị và nó liên quan đến tỷ lệ giữa độ dày và bề rộng của chi tiết. Ngoài ra, để đánh giá khả năng tiêu thụ năng lượng giữa hai cấu trúc, kết quả của ANSYS và thí nghiệm được so sánh với nhau cho thấy rằng cấu trúc dạng treo tiêu thụ ít năng lượng hơn. Điều này chứng tỏ rằng, cấu trúc treo có các hiệu ứng cách ly nhiệt hay tránh thất thoát nhiệt hiệu quả hơn. Tuy nhiên, ở nhiệt độ cao, mô hình không còn đáng tin cậy kể cả khi bỏ qua các điều kiện đối lưu nhiệt (heat convection), bức xạ nhiệt (heat radiation) và các đặc tính vật liệu được giả định là không thay đổi.

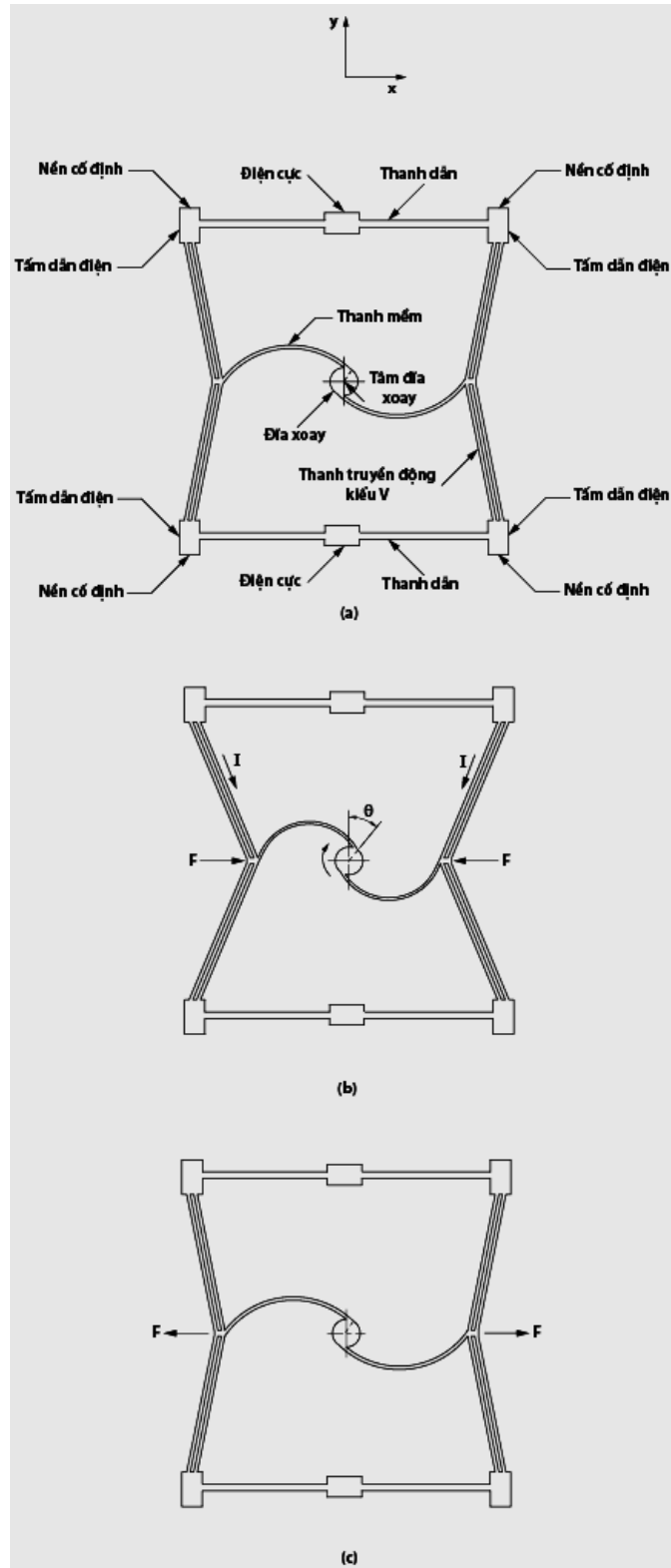
Để khai thác các ưu điểm của bộ truyền động áp điện và khuếch đại sự dịch chuyển của các bộ truyền động, Na và các cộng sự. [16] đã thiết kế một cơ cấu kết cấu sử dụng mô hình động học của liên kết bảy khâu bản lề bất đối xứng để biến đổi chuyển động tịnh tiến thành chuyển động quay. Trong kết cấu này, liên kết bảy khâu bản lề là một hệ thống bất đối xứng với hai bậc tự do, hai vòng lặp trên dưới cùng với các khớp bản lề xoay và bản lề uốn giúp sự khuếch đại chuyển động hiệu quả hơn. Trong quá trình phát triển thiết kế, để tìm vị trí thích hợp của hai chốt tâm xoay đặt ở trên và dưới cùng, phân tích phần tử hữu hạn được thực hiện bằng cách sử dụng mô-đun cơ học kết cấu trong COMSOL. Theo như kết quả phân tích mô phỏng COMSOL, độ dịch chuyển dọc trục theo phương X tăng lên thì góc quay của cơ cấu kết cấu tăng lên tỷ lệ thuận. Để kiểm tra kết quả mô phỏng, thí nghiệm được thực hiện cho kết quả dịch chuyển 70  $\mu\text{m}$  thu được 1.52o so với mô phỏng là 1.2o. Tuy nhiên, kết cấu này yêu cầu dịch chuyển lớn để có thể đạt được góc xoay cải thiện hơn.

## 2. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG

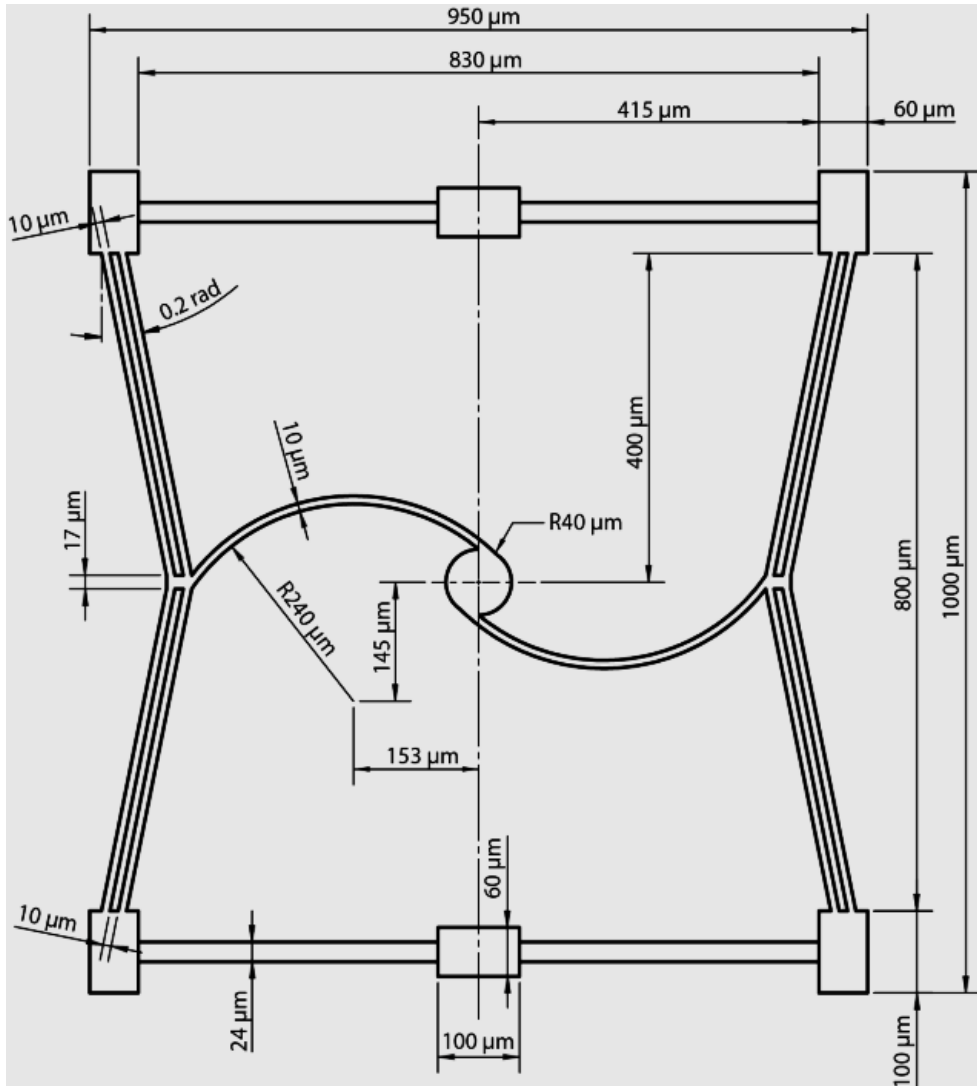
Hình 1 (a) là một sơ đồ của một bộ biến đổi chuyển động tịnh tiến thành chuyển động xoay. Nó bao gồm một đĩa quay, hai thanh cong hình học và hai thanh truyền động điện nhiệt kiểu chữ V. Sự bố trí đối xứng của hai thanh truyền động điện nhiệt này tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình xoay của đĩa quay. Khi một dòng điện, I, chạy qua cơ cấu truyền động điện nhiệt dạng chữ V được cố định ở hai đầu của nó (xem Hình 1 (b)), sự giãn nở nhiệt do định luật Joule sẽ đẩy chóp hướng ra ngoài để tạo ra chuyển động tịnh tiến làm cho đĩa quay xoay theo chiều kim đồng hồ với một góc xoay  $\theta$ . Sau khi ngắt dòng điện, cơ cấu truyền động điện nhiệt chữ V rút lại và đĩa xoay quay trở về vị trí ban đầu của nó (xem Hình 1 (c)). Các kích thước của thiết bị được minh họa trong Hình 2. Các thông số vật liệu được sử dụng trong các mô phỏng này được liệt kê trong Bảng 1.

Bảng 1: Thông số vật liệu dùng trong phân tích

Thông số	Giá trị
Mô đun đàn hồi của Silicon	$130 \times 10^3 \text{MPa}$
Hệ số Poisson ratio của Silicon	0.28
Hệ số dẫn nhiệt tại 20°C	$1.5494 \times \frac{10^8 \text{pW}}{\mu\text{m} \cdot \text{C}}$
Hệ số cản trở nhiệt tại 20°C	$2.5604 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$
Hệ số dẫn nở nhiệt của Silicon	$3.0600 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Độ dày của lớp không khí	1 $\mu\text{m}$



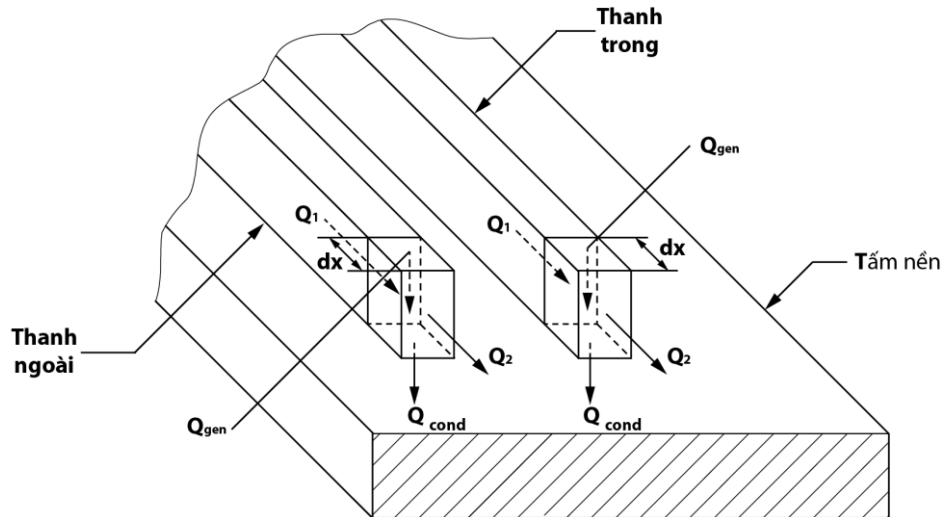
Hình 1. Nguyên lý hoạt động của thiết bị.



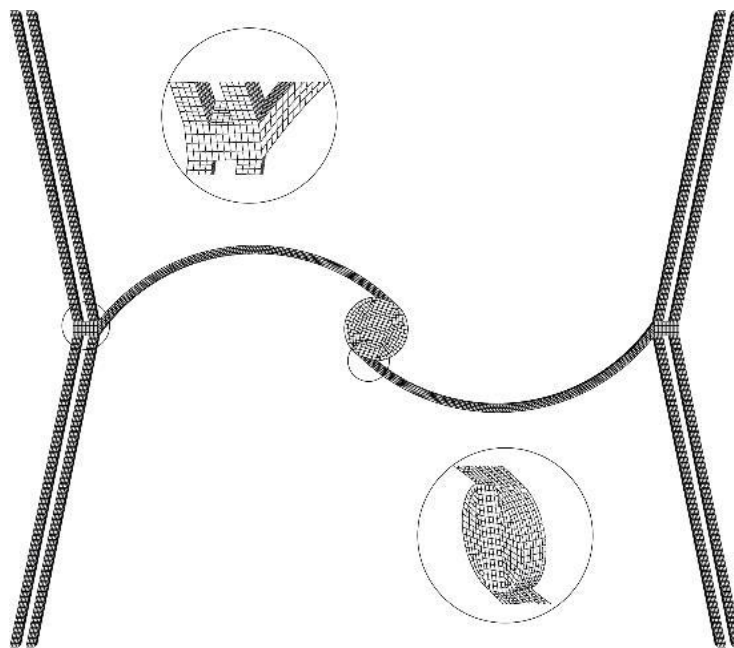
Hình 2. Kích thước của thiết bị.

### 3. MÔ PHỎNG

Để có thể thu thập được các hành vi nhiệt và cơ học của thiết bị, các phân tích phần tử hữu hạn ba chiều được thực hiện. Các phân tích kết hợp được chia thành hai bước. Đầu tiên, phân tích nhiệt-điện được thực hiện để tìm phân bố nhiệt độ của thiết bị dưới tác dụng của dòng điện. Sau đó, phân tích cơ-nhiệt được sử dụng để tính toán góc xoay của đĩa quay dựa trên sự phân bố nhiệt độ. Do quy mô kích thước của thiết bị, tổn thất nhiệt do đối lưu tự do là không đáng kể và không được đưa vào phân tích. Ảnh hưởng của tán xạ được cho là nhỏ và có thể được bỏ qua một cách hợp lý. Sự dẫn nhiệt từ thiết bị qua không khí xung quanh đến bề mặt là không đáng kể và phải được tính đến. Hình 3 minh họa các đường truyền nhiệt liên quan đến một phần tử vô cùng nhỏ của cơ cấu truyền động điện nhiệt. Trong hình,  $Q_{gen}$  là nhiệt sinh ra do dòng điện được đưa vào. Nhiệt dẫn vào và nhiệt dẫn ra khỏi cơ cấu truyền động điện nhiệt lần lượt được đánh dấu là  $Q_1$  và  $Q_2$ .  $Q_{cond}$  là sự thất thoát nhiệt dẫn truyền qua khe hở không khí giữa thiết bị và tấm nền. Dòng điện được đặt vào giữa các đầu cố định (miếng đệm neo) của cơ cấu truyền động điện nhiệt. Phần mềm thương mại, ABAQUS, được sử dụng để phân tích phần tử hữu hạn. Vật liệu của thiết bị là Silicon, các đặc tính được liệt kê trong Bảng 1. Hình 4 thể hiện sự chia lưới cho thiết bị. Một lưới phân tích độ nhạy được thực hiện để đảm bảo sự hội tụ của kết quả.

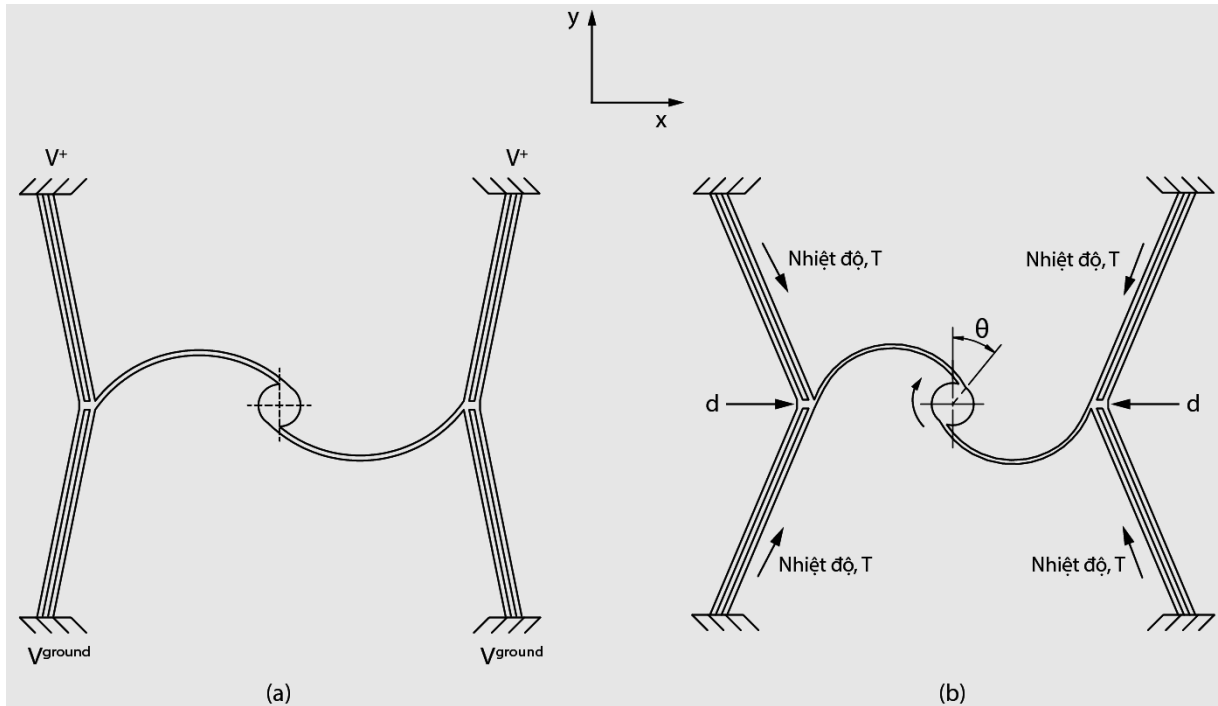


Hình 3. Phân tích sự truyền nhiệt của một phần tử vô cùng nhỏ trong cơ cấu truyền động nhiệt dạng chữ V.



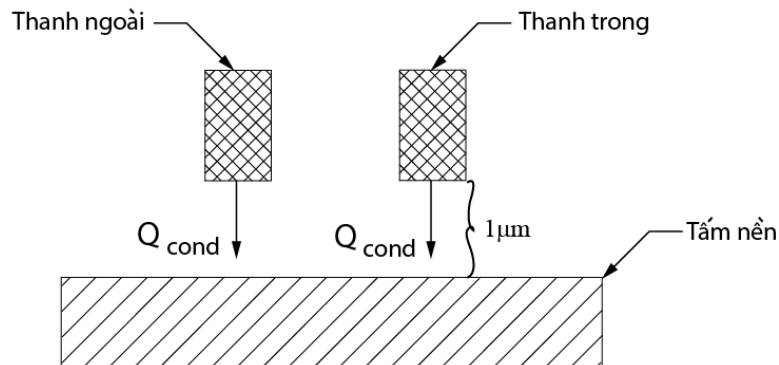
Hình 4. Mô hình chia lưới để phân tích phần tử hữu hạn.

Trong mô phỏng kỹ thuật ABAQUS, điều kiện biên được thiết lập như trên hình với hai bước. Bước đầu tiên hình 5 (a) là mô phỏng điện nhiệt, bốn vị trí ngoài cùng của hai cụm thanh truyền động dạng chữ V được cố định xuống tấm nền. Hai vị trí trên cùng theo phương y dương nhận điện áp dương và hai vị trí dưới cùng theo phương y âm nhận điện áp bằng 0A, từ đó tạo thành một vòng điện áp kín. Nhiệt độ môi trường ban đầu được thiết lập là 20°C. Kết quả của bước này là tập hợp các dải nhiệt độ phân bố đều dọc theo thanh truyền động dạng chữ V. Nhiệt độ cao nhất sẽ tập trung tại vị trí giữa hay vị trí cao nhất theo phương x. Sau đó, mô phỏng nhiệt-cơ hình 5 (b) được tiến hành bằng cách nạp dữ liệu nhiệt phân bố ở bước đầu tiên. Do sự giãn nở nhiệt trong hệ thống thanh truyền động, kết quả thu được ở bước này là sự dịch chuyển d của thanh truyền động tỷ lệ với góc xoay  $\theta$ . Trong mô phỏng điện-nhiệt sử dụng phần tử DC3D8E với số lượng là 53792 phần tử. Ở chiều ngược lại, trong mô phỏng nhiệt-cơ sử dụng phần tử C3D8R với số lượng là 53792 phần tử. Cả hai bước mô phỏng đều được thực hiện ở trạng thái cân bằng (steady state) với thời gian tối đa là 1 giây, bước nhảy 0.1 giây. Bởi vì kích thước của chi tiết ở dạng micro nên thất thoát nhiệt do đối lưu tự do là không đáng kể và ảnh hưởng của bức xạ nhiệt được cho là nhỏ nên không đưa vào mô hình mô phỏng phân tích kỹ thuật.



Hình 5. Điều kiện biên được dùng trong mô phỏng phân tích ABAQUS: (a) Trong mô phỏng điện-nhiệt; (b) Trong mô phỏng nhiệt-cơ.

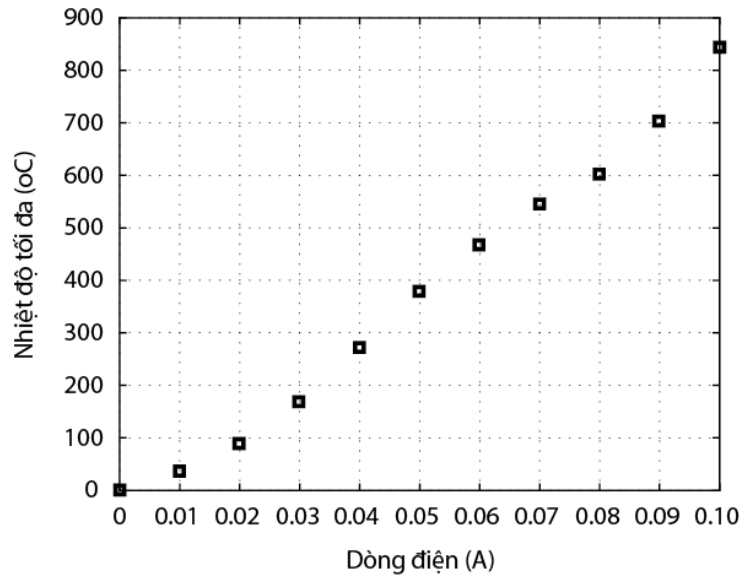
Trong mô phỏng điện-nhiệt, sự dẫn nhiệt  $Q_{cond}$  từ chi tiết xuống lớp nền được xem xét trong hình 6 với khoảng cách là  $1 \mu m$  và hệ số dẫn nhiệt là  $0.026e6$  (pW/mC). Điều này dẫn đến nhiệt độ trong chi tiết sẽ bị giảm đi do bị thất thoát xuống tấm nền.



Hình 6. Nhiệt dẫn truyền từ chi tiết xuống tấm nền  $Q_{cond}$  với khoảng cách  $1 \mu m$ .

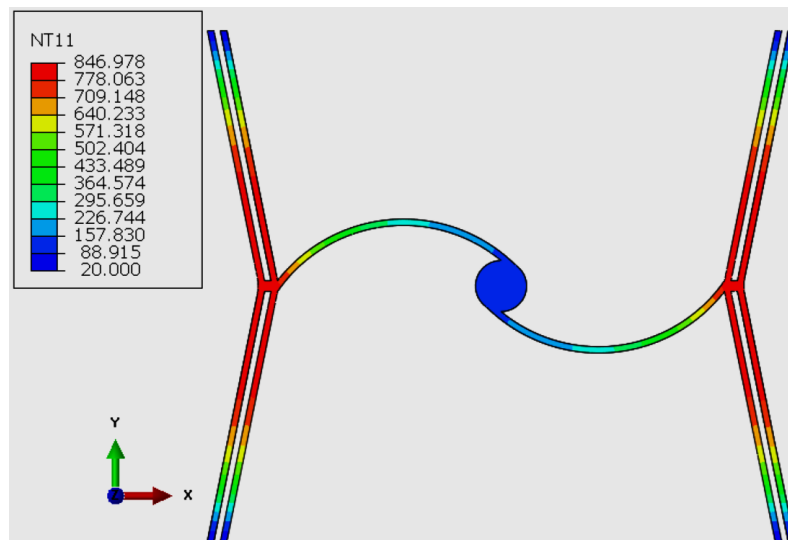
#### 4. PHÂN TÍCH

Để đảm bảo thiết bị hoạt động ổn định, nhiệt độ sinh ra bên trong chi tiết khi áp dòng điện vào là một yếu tố rất quan trọng. Chính vì vậy, nhiệt độ tối đa để khảo sát trong mô phỏng này cần nhỏ hơn  $900^{\circ}C$  trong khi nhiệt độ nóng chảy của vật liệu Silicon là  $1400^{\circ}C$ . Trong mô phỏng kỹ thuật điện-nhiệt, phương pháp thử và lặp lại phép thử được tiến hành trong miền điện áp tăng dần tuần tự bắt đầu từ  $0A$ , bước nhảy  $0.01A$  cho đến khi đạt đến nhiệt độ tối đa cho phép khoảng  $900^{\circ}C$ . Kết quả trong hình 7 cho thấy rằng điện áp đặt vào trong khoảng từ  $0$  đến  $0.1A$  sẽ thu được nhiệt độ trên cơ cấu từ  $0^{\circ}C$  đến  $900^{\circ}C$ . Tại mỗi vị trí đặt giá trị điện áp sẽ thực hiện một mô phỏng điện-nhiệt độc lập với cùng một điều kiện. Từ đó có tất cả 10 bước mô phỏng độc lập (không bao gồm giá trị  $0A-0^{\circ}C$ ) cho từng giá trị điện áp đưa vào. Trong hình 7 chỉ rõ xu hướng rằng nhiệt độ sinh ra trong chi tiết tăng tỷ lệ thuận với chiều tăng của dây điện áp từ  $0A$  đến  $0.1A$  đặt vào tại vị trí các bản cực.



Hình 7. Nhiệt độ tối đa tại mỗi vị trí dòng điện được đưa vào.

Trên hình 8, sự phân bố nhiệt độ trong cơ cấu tại mức điện áp 0.1A được trình bày. Vì tính chất đối xứng của hệ thống thanh truyền động nhiệt chữ V nên trị số nhiệt độ chỉ được biểu thị tại 1/2 của chi tiết. Hệ tọa độ Oxy cũng được biểu diễn trong hình 8. Kết quả trên hình 8 cho thấy xu hướng rõ ràng rằng nhiệt độ cao (biểu thị ở gam màu đỏ) sẽ phân bố tập trung tại vị trí đỉnh chóp của thanh truyền động nhiệt V hay vị trí giao nhau giữa thanh mềm và thanh truyền động V và nhiệt độ giảm dần đến vị trí của đĩa xoay nối với thanh mềm thể hiện ở gam màu xanh. Nguyên nhân lý giải cho kết quả trên là do kết cấu thanh truyền động V nghiêng một góc 0.2 rad và sự dẫn truyền nhiệt bên trong kết cấu hội tụ xung quanh khu vực đỉnh chóp. Càng đi xa đỉnh chóp nhiệt độ sẽ giảm dần do sự thất thoát nhiệt trong quá trình truyền dẫn trên đơn vị chiều dài của chi tiết.



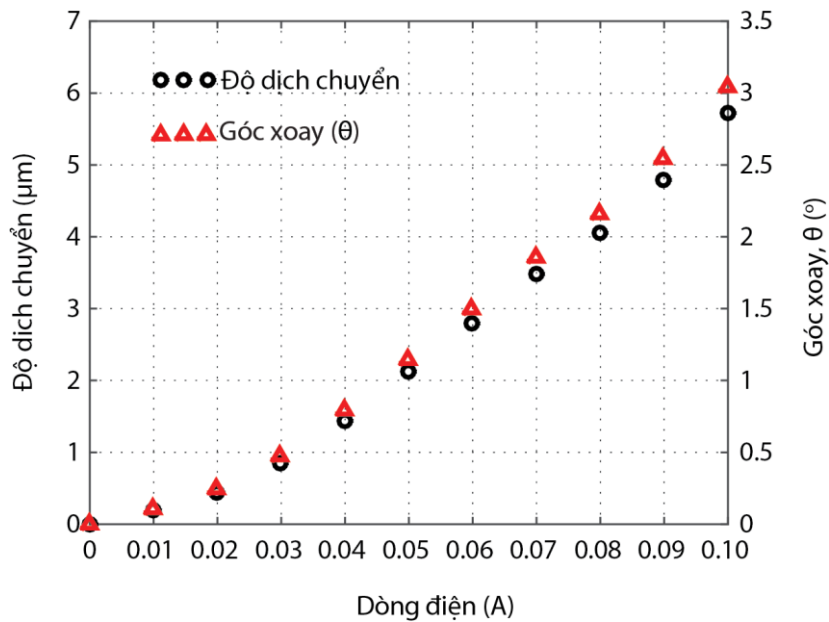
Hình 8. Sự phân bố nhiệt độ từng vị trí trên thiết bị.

Hình 9 trình bày lượng dịch chuyển  $d$  của cơ cấu truyền động nhiệt V được biểu diễn bằng dấu tròn màu đen và góc  $\theta$  thu được của đĩa xoay được biểu diễn bằng hình tam giác màu đỏ so với dây điện áp từ 0A đến 0.1A đã xác định ở hình 9. Xu hướng rõ ràng rằng độ lớn của  $d$  và  $\theta$  tăng dần đều tỷ lệ thuận với chiều tăng của điện áp. Điểm quan trọng trong hình 9 cũng như là của nghiên cứu này là tỷ lệ giữa góc xoay  $\theta$  và lượng dịch chuyển  $d$  được biểu diễn bằng biểu thức  $\theta/d$  cần phải đảm bảo càng lớn càng tốt có nghĩa là giá trị góc xoay  $\theta$  phải luôn lớn hơn lượng dịch chuyển  $d$ . Từ vị trí điện áp 0A đến 0.03A, tỷ lệ  $\theta/d$  gần như



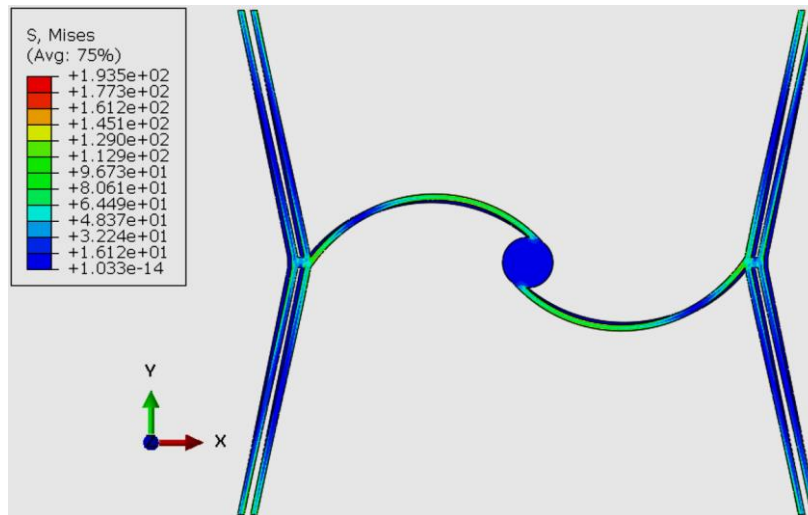
THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH CƠ CẤU...

bằng 1 tức là cơ cấu truyền động V dịch chuyển 1  $\mu\text{m}$  thì đĩa xoay quay được  $1^\circ$ . Nhưng tại điểm đặt điện áp từ 0.04 đến 0.1A thì tỷ lệ  $\theta/d$  tăng dần đều một cách rõ ràng như trong hình 9. Tỷ lệ truyền tải  $\theta/d = 1.1$  đạt giá trị lớn nhất tại 0.1A với  $\theta = 3.1^\circ$  và  $d = 2.8 \mu\text{m}$ .



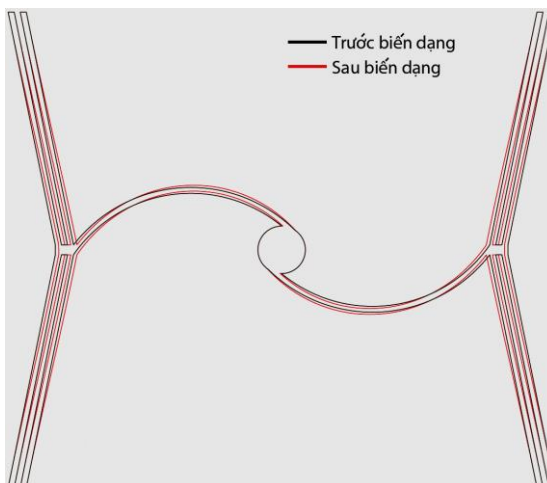
Hình 9. Góc xoay và độ dịch chuyển lớn nhất thu được dưới tác dụng của dòng điện tại từng thời điểm.

Hình 10 biểu diễn ứng suất sinh ra trong chi tiết tại nhiệt độ cao nhất tương ứng với mức điện áp đặt vào 0.1A. Dựa trên hình 10 cho thấy ứng suất tập trung lớn nhất tại vị trí đỉnh chóp của cơ cấu truyền động V với giá trị là 193.5 MPa. Nguyên nhân một cách rõ ràng là khu vực đỉnh chóp này cũng là vị trí tập trung nhiệt độ cao nhất được biểu diễn trên hình 8 dẫn đến sự biến dạng lớn nhất của chi tiết xảy ra tại đây. Ngoài ra, ứng suất còn tập trung tại bốn vị trí cố định của hai cụm thanh truyền động nhiệt V do có các phản lực liên kết gây ra và trên thanh mềm tại vị trí kết nối với đĩa xoay do biên dạng cong của thanh mềm.



Hình 10: Ứng suất sinh ra trong chi tiết tại cường độ dòng điện 0.1A

Sự biến dạng của chi tiết trước và sau khi đặt điện áp 0.1A được thể hiện trên hình 11. Trong hình 11, biên dạng màu đen biểu thị cho trạng thái ban đầu của chi tiết khi chưa đặt điện áp và biên dạng màu đỏ thể hiện sự biến dạng của chi tiết sau khi đưa điện áp 0.1A. Sự biến dạng lớn tập trung xung quanh vị trí giữa thanh mềm với thanh truyền động V và thanh mềm với đĩa xoay. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy mức độ cân bằng hay không có hiện tượng biến dạng lệch, xoắn xảy ra dưới tác động của điện áp lớn và biến dạng lớn.



Hình 11: Sự biến dạng của chi tiết trước và sau khi đặt điện áp 0.1A.

## 5. CÔNG VIỆC TIẾP THEO

Phần đầu tiên của đề tài này như đã trình bày ở những nội dung trên sẽ tập trung vào việc đưa ra ý tưởng, thiết kế và sau đó sử dụng mô hình mô phỏng để phân tích ý tưởng. Công việc tiếp theo cho đề tài này sẽ là chế tạo và thử nghiệm thiết bị thực tế để kiểm tra sự đáp ứng của hệ thống khi có điện áp đặt vào. Thiết bị được chế tạo bằng phương pháp ăn mòn (Etching) trong hệ vi cơ điện tử (MEMS) nên cần có thiết bị, máy móc chuyên dụng, chế tạo trong phòng sạch và phải có nhiều kinh nghiệm chế tạo cũng như tốn rất nhiều thời gian và chi phí rất lớn.

## 6. THẢO LUẬN

Trong nghiên cứu này, nhiệt độ là một trong những nhân tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến khả năng đáp ứng của hệ thống. Như đã trình bày mục 4, dải điện áp từ 0A-0.1A được thành lập từ phương pháp thử và lặp để chi tiết có thể đạt đến mức nhiệt độ gần 900oC – mức nhiệt độ an toàn dưới giới hạn chảy của Silicon là 1400oC. Như vậy, thiết bị sử dụng lượng nhiệt độ này để khiến cho các thanh truyền động biến dạng và thu được sự dịch chuyển. Trong hệ thống vi cơ điện tử (MEMS), sự giải nhiệt có một số tác động sau:

- Thứ nhất, trong hệ thống MEMS, các thông số tán xạ nhiệt, bức xạ nhiệt là không đáng kể [4,8,9,10,15] vì kích thước chi tiết là rất nhỏ (chỉ ở micro mét), điều này dẫn tới sự giải nhiệt, gia tăng nhiệt diễn ra rất nhanh và không cần thiết phải thêm các thiết kế giải nhiệt.
- Thứ hai, nếu thêm các thiết kế giải nhiệt trong hệ thống MEMS sẽ tạo ra một hệ thống cồng kềnh, khó thiết kế và rất khó khăn trong chế tạo.
- Thứ ba, thiết bị được mô phỏng với nhiệt độ thích hợp (nhỏ hơn nhiều so với giới hạn chảy vật liệu) nên sự giải nhiệt sẽ giảm sự dịch chuyển của thanh truyền động V dẫn tới góc xoay sẽ nhỏ hơn.
- Thứ tư, sự giải nhiệt đã được trình bày và giải thích thông qua thông số  $Q_{cond}$  trong mục 3 của nghiên cứu này.

## 7. KẾT LUẬN

Do lợi ích đáng kể, thiết bị truyền động nhiệt điện micro vẫn còn được tiếp tục phát triển và sử dụng cho các thiết kế mới. Nghiên cứu này trình bày một cơ cấu biến đổi chuyển động tịnh tiến sang chuyển động xoay. Các cấu trúc liên kết thiết kế khác nhau cho cơ cấu truyền động này cũng được xem xét để đạt được tỷ số truyền tối đa. Nghiên cứu này cũng trình bày sự thiết kế và mô hình hoá quá trình truyền chuyển động với các kết quả so sánh. Một điều rõ ràng rằng, việc giảm kích thước của đĩa xoay sẽ thu được góc xoay lớn hơn. Người ta cũng nhận thấy rằng, góc nghiêng của cơ cấu truyền động nhiệt giảm cũng làm tăng góc xoay của đĩa quay. Dựa trên các phân tích phân tử hữu hạn về điện-nhiệt-cơ, thiết bị đạt tỷ số truyền giữa chuyển động tịnh tiến và chuyển động xoay là 1.1 độ/ $\mu\text{m}$  khi dòng điện đưa vào là 0,1 A. Nhiệt độ cực đại và ứng suất cực đại thấp hơn rất nhiều so với điểm nhiệt độ nóng chảy điển hình và giới hạn chảy của vật liệu silicon.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. K. Lau, J. Yang, C. P. Tan and N. B. Chong, An electro-thermally activated rotary micro-positioner for slider-level dual-stage positioning in hard disk drives, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 26, 2016.
- [2] B.-J. Yi, G. B. Chung, H. Y. Na, W. K. Kim and I. H. Suh, Design and experiment of a 3-DOF parallel micromechanism utilizing flexure hinges, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, pp. 604-611, 2003.
- [3] D. Chao, G., Zong and R. Liu, Design of a 6-DOF compliant manipulator based on serial-parallel architecture, *2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, vols. 1 and 2, IEEE (2005), pp. 765-770.
- [4] M. Arefin, M. Packirisamy and A. K. W. Ahmed, Disc type thermal actuator with straight beams for angular motion, *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, pp. 988-999, 2013.
- [5] L. Lin and M. Chiao, Electrothermal responses of lineshape microstructures, *Sensor and Actuators A*, vol. 55, pp. 35-41, 1996.
- [6] J. Singh, T. Gan, A. Agarwal, Mohanraj, S. Liw, 3D free space thermally actuated micromirror device, *Sensor and Actuators A*, vol. 123-124, pp. 468-475, 2005.
- [7] J.T. Butler, V.M. Bright, J.R. Reid, Scanning and rotating micromirrors using thermal actuators, *Optical Scanning Systems: Design and Applications*, vol. 3131, 1997.
- [8] E.T. Enikov, S.S. Kedar, K.V. Lazarov, Analytical Model for Analysis and Design of V-Shaped Thermal Microactuators, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, no. 4, 2016.
- [9] H. Hussein, A. Tahhan, P. L. Moal, G. Bourbon, Y. Haddab and P. Lutz, Dynamic electro-thermo-mechanical modelling of a U-shaped electro-thermal actuator, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 26, 025010, 2016.
- [10] C. Guan and Y. Zhu, An electrothermal microactuator with Z-shaped beams, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 20, 2010.
- [11] P. Yang, M. Stevenson, Y. Lai, C. Mechefske, M. Kujath, T. Hubbard, Design, modeling and testing of a unidirectional MEMS ring thermal actuator, *Sensors and Actuators A*, vol. 143, pp. 352-359, 2008.
- [12] C.D. Lott, T.W. McLain, J.N. Harb, L.L. Howell, Modeling the thermal behavior of a surface-micromachined linear-displacement thermal mechanical microactuator, *Sensors and Actuators A*, vol. 101, pp. 239-250, 2002.
- [13] D. Yan, A. Khajepour and R. Mansour, Modeling of two-hot-arm horizontal thermal actuator, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 13, pp. 312-322, 2003.
- [14] Kim Y-S, Yoo J-M, Yang S H, Choi Y M, Dagalaks N G and Gupta S K, Design, fabrication and testing of a serial kinematic MEMS XY stage for multifinger manipulation, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 22, 2012.
- [15] L. Lin, M. Chiao, Electrothermal responses of lineshape microstructures, *Sensors and Actuators A*, vol. 55, pp. 35-41, 1996.
- [16] Na T-W, Kang D-H, JungJ-Y, Han J-H and Oh I-K, Linear-to-rotary motion converter using asymmetric compliant mechanics and single-crystal PMN-PT stack actuator, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 25, pp. 2221-2227, 2014.

## DESIGN AND ANALYSIS OF A COMPLIANT LINEAR-TO-ROTARY MOTION TRANSDUCTION MECHANISM BY AN ELECTROTHERMAL ACTUATOR

TIEN HOANG NGO

*Faculty of Mechanical Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City*

*ngotienhoang@iuh.edu.vn*

**Abstract.** A mechanism to convert linear motion to rotary motion is developed. The means to achieve the linear-to-rotary motion transduction is attributed to an asymmetric arrangement of two linear motion inputs. The linear motion is provided by chevron-type thermal actuators. With a break-through in the high tech technology, this rotary motion can be applied for various optical applications like, attenuation, switching and diffraction, etc. Finite element analyses were carried out to predict behaviors of the transduction mechanism. A transduction ratio of nearly 1.1 degree/ $\mu\text{m}$  is achieved. The simulation results also reveal that a more uniform temperature distribution along the thermal actuator allowing for a larger overall thermal expansion and therefore also a larger linear motion, which adds to the rotary motion output.

**Keywords:** linear-to-rotary, motion transduction, thermal actuator.

*Ngày gửi bài: 24/08/2021*

*Ngày chấp nhận đăng: 03/12/2021*