

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ KẾT CẤU ĐẾN ĐẶC TRƯNG ĐỘNG LỰC HỌC CỦA DẦM MICRO CÓ HÌNH DẠNG PHỨC TẠP

Vũ Văn Thế^{1,*}, Bùi Văn Tùng²

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

²Khoa Kỹ thuật cơ sở, Trường Sĩ quan Không quân

DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v18.n02.684

Tóm tắt

Bài báo tiến hành khảo sát xác định các thông số động lực học đặc trưng của hai dầm kích thước micro được ứng dụng phổ biến trong các thiết bị vi cơ điện tử khi thay đổi các thông số kết cấu của dầm. Kết quả nghiên cứu cho thấy các thông số kích thước của dầm có ảnh hưởng trực tiếp đến giá trị độ cứng tương đương và khối lượng quy đổi của dầm và quyết định đến đặc trưng động lực học của hệ dao động trong các thiết bị vi cơ điện tử. Chiều rộng dầm có mức độ ảnh hưởng mạnh mẽ đến các thông số động lực học theo hướng thuận, khi tăng chiều rộng lên 40%, độ cứng tương đương và khối lượng quy đổi tăng lần lượt là 162,15% và 33,58% với dầm gập; 166,44% và 40% với dầm chữ V. Trong khi đó, khi chiều dài tăng 40%, khối lượng quy đổi của dầm gập và dầm chữ V tăng lần lượt là 34% và 40%, nhưng độ cứng tương đương thay đổi theo chiều hướng giảm, 62,84% và 62,96% lần lượt cho dầm gập và dầm chữ V. Kết quả này cho phép người thiết kế đưa ra những thay đổi cần thiết về kích thước dầm theo hướng thiết kế mong muốn.

Từ khóa: Độ cứng tương đương; khối lượng quy đổi; dầm gập; dầm chữ V; hệ thống MEMS.

1. Đặt vấn đề

Hệ thống vi cơ điện tử (Micro-Electro-Mechanical System - MEMS) là một tổ hợp bao gồm các hệ thống cơ khí và hệ thống điện tử có kích thước cỡ micro kết hợp với nhau. Các thiết bị được chế tạo trên cơ sở công nghệ quang khắc ở kích cỡ micro, thực hiện các chức năng của hệ cơ khí và điện tử đều có thể được xem là MEMS [1]. Chúng được chế tạo hàng loạt bằng kỹ thuật xử lý mạch tích hợp (Integrated Circuit - IC) và có kích thước từ vài micromet đến vài milimet. Các thiết bị này có khả năng cảm nhận, điều khiển và hoạt động ở quy mô vi mô, đồng thời tạo ra các tác động ở mức vĩ mô. Với kích thước nhỏ, mức tiêu thụ năng lượng thấp, sản xuất hàng loạt, chi phí thấp và dễ tích hợp, các thiết bị MEMS đang được ứng dụng rộng rãi trong mọi lĩnh vực như công nghiệp chế tạo ô tô, thiết bị điện tử, y tế, truyền thông, giao thông vận tải và thậm chí cả quân sự với những vũ khí tầm xa có độ chính xác cao.

Trong các thiết bị MEMS, các cấu trúc cơ học thường được thiết kế nhằm đảm bảo

* Email: thevutb@gmail.com

chuyển động cho các khối quán tính nhờ các loại dầm đàn hồi đơn giản hoặc phức tạp. Tùy vào mục đích thiết kế khác nhau mà có thể sử dụng các dầm đàn hồi với hình dạng và kích thước khác nhau. Phổ biến nhất hiện nay là các dầm đơn [2-4] với cấu trúc đơn giản gồm một đoạn dầm đơn; dầm kiểu còng cua [4-6] gồm hai đoạn dầm vuông góc tại đầu dầm; dầm gấp (Folder Microbeam) [5-6] gồm hai hoặc nhiều đoạn dầm nối song song với nhau; dầm chữ V [7];... Các dầm này đều có một đầu cố định, đầu còn lại được liên kết với phần tử quán tính. Dưới tác dụng của ngoại lực kích thích, nhờ tính đàn hồi của các dầm treo, các phần tử quán tính sẽ chuyển động theo mục đích của người thiết kế. Đặc trưng chuyển động của các cấu trúc cơ học được quyết định bởi độ cứng tương đương của các dầm đàn hồi. Các thông số hình học của dầm như chiều dài, chiều rộng hay số đoạn dầm có ảnh hưởng lớn đến độ cứng tương đương và khối lượng quy đổi của cả hệ dao động, do đó ảnh hưởng đến tần số làm việc của cơ hệ trong các thiết bị MEMS [7].

Trong bài báo này, mô hình dầm gấp và dầm chữ V có cấu trúc phức tạp hơn được lựa chọn để phân tích nhằm xác định các giá trị thông số đặc trưng về động lực học cho các hệ dao động có sử dụng các mô hình này. Bài báo cũng tiến hành khảo sát sự ảnh hưởng của các thông số kết cấu như chiều dài, chiều rộng, góc chữ V của các mô hình dầm kể trên đến các thông số động lực học đặc trưng của dầm. Kết quả phân tích là cơ sở quan trọng cho quá trình tính toán và thiết kế các cấu trúc cơ học, các kích thước dầm cần được xác định nhằm tối ưu hóa cho các thông số hình học.

2. Mô hình tính toán

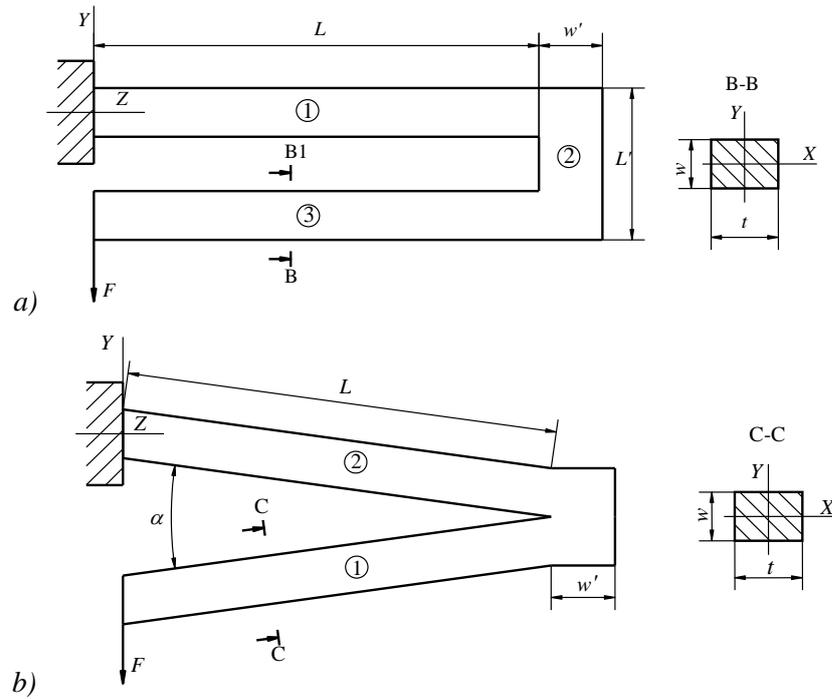
Dầm gấp và dầm kiểu chữ V là hai kiểu dầm có nhiều ưu điểm như khả năng tạo ra chuyển vị phẳng với độ dịch chuyển lớn, tần số hoạt động có thể được điều chỉnh trong phạm vi rộng, kích thước tổng thể của linh kiện MEMS có thể được thu nhỏ [6].

Đối với dầm gấp, các kích thước chính của kết cấu bao gồm chiều dài dầm L , chiều dài phần kết nối L' giữa hai thanh chính, chiều dày t , chiều rộng w và chiều rộng phần kết nối w' (Hình 1a). Chọn các thông số ban đầu như sau: $L = 300 \mu\text{m}$; $L' = 70 \mu\text{m}$; $w = 10 \mu\text{m}$; $w' = 25 \mu\text{m}$; $t = 30 \mu\text{m}$.

Đối với dầm kiểu chữ V, các kích thước cơ bản của dầm được mô tả như trên hình 1b gồm chiều dài dầm L , chiều rộng phần kết nối giữa hai thanh là w' , chiều dày t , chiều rộng w , góc α , với giá trị thông số thiết kế ban đầu: $L = 300 \mu\text{m}$; $w = 10 \mu\text{m}$; $w' = 25 \mu\text{m}$; $\alpha = 5^\circ$; $t = 30 \mu\text{m}$.

Một đầu của cả hai cấu trúc dầm này được ngàm cố định, đầu còn lại được định hướng chuyển vị theo phương y và chịu tác dụng của ngoại lực F như sơ đồ hình 1.

Vật liệu của các cấu trúc dầm trong các thiết bị MEMS nói chung thường được chọn là silicon với các đặc trưng cơ bản như trong bảng 1.

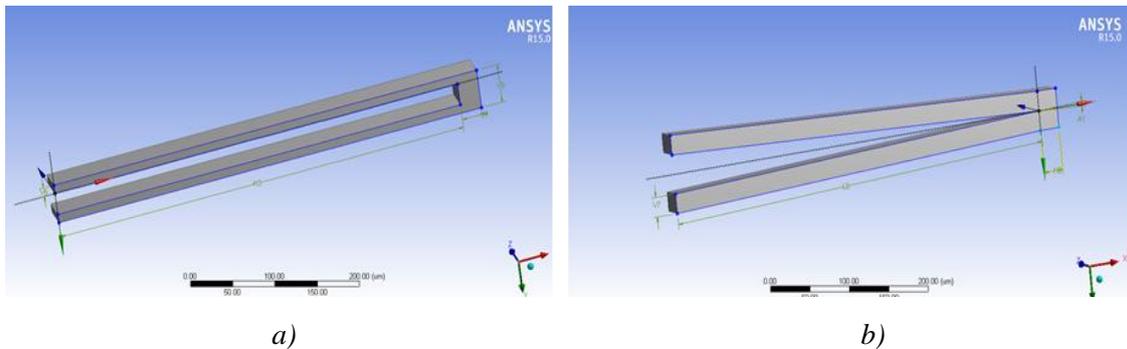


Hình 1. Cấu trúc dầm gập (a) và dầm chữ V (b).

Bảng 1. Đặc trưng vật liệu silicon

Đặc trưng	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng riêng	2330	kg/m ³
Hệ số Poisson	0,28	-
Mô đun đàn hồi	$1,69 \times 10^{11}$	Pa

Từ mô hình bản vẽ 2D tiến hành xây dựng mô hình 3D trong phần mềm ANSYS với các kích thước đã được xác định như trên. Mô hình được thể hiện trong hình 2.

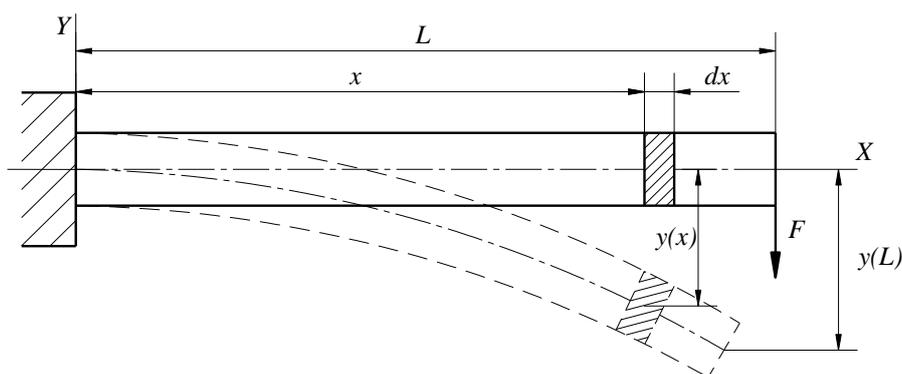


Hình 2. Mô hình 3D của dầm gập (a) và dầm chữ V (b) xây dựng trong ANSYS.

3. Khối lượng quy đổi của dầm

3.1. Dầm gập

Để thuận tiện cho việc tính toán, giả thiết rằng vận tốc của các phân tử mặt cắt dầm tỉ lệ thuận với chuyển vị của chúng và khối lượng phân bố đều dọc chiều dài dầm. Khi đó khối lượng quy đổi của dầm được xác định dựa trên nguyên tắc: Khối lượng quy đổi của động năng bằng tổng động năng của toàn bộ các bộ phận chuyển động trên dầm [8]. Hình 3 là sơ đồ tổng quát tính toán khối lượng quy đổi cho vi dầm.



Hình 3. Sơ đồ tổng quát tính toán khối lượng quy đổi.

Công thức xác định khối lượng quy đổi về phần tử di động cho một đoạn dầm đơn được xác định như sau [8]:

$$M = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{L_i} \times \int_0^{L_i} \left(\frac{\dot{y}_i(x)}{\dot{y}_i(L_i)} \right)^2 dx \quad (1)$$

trong đó: M là khối lượng quy đổi của vi dầm; x là tọa độ mặt cắt trên đoạn dầm thứ i ; m_i là khối lượng của đoạn dầm thứ i ; L_i là chiều dài của đoạn dầm thứ i ; $\dot{y}_i(L_i)$ là vận tốc của mặt cắt dầm tại vị trí $x = L_i$ trên đoạn thứ i ; $\dot{y}_i(x)$ là vận tốc của mặt cắt dầm tại vị trí có tọa độ x .

Theo giả thiết trên, ta có:

$$\frac{\dot{y}_i(x)}{\dot{y}_i(L_i)} = \frac{y_i(x)}{y_i(L_i)} \quad (2)$$

Kết cấu của dầm gập bao gồm ba đoạn 1, 2 và 3 (Hình 1a). Khối lượng quy đổi của dầm sẽ bằng tổng khối lượng quy đổi của từng đoạn quy về vị trí đầu của đoạn đó.

Hàm chuyển vị của đoạn dầm 1 sẽ được xác định dựa trên lý thuyết sức bền vật liệu và cơ học lý thuyết theo biểu thức dưới đây (3):

$$y_1(x) = \frac{F \times L \times (L' \times J_F + L \times J'_F) \times x^2}{2 \times E \times J_F \times (L' \times J_F + 2 \times L \times J'_F)} - \frac{F \times x^3}{6 \times E \times J_F} \quad (3)$$

trong đó: $J_F = \frac{t \times w^3}{12}$ là mô men quán tính của đoạn 1, 3; $J'_F = \frac{t \times w'^3}{12}$ là mô men quán tính của đoạn 2; E là mô đun đàn hồi của vật liệu.

Xét tại mặt cắt đầu dầm, tức tại $x = L$ thì công thức (3) trở thành:

$$y_1(L) = \frac{F \times L^3 \times (L' \times J_F + L \times J'_F)}{2 \times E \times J_F \times (L' \times J_F + 2 \times L \times J'_F)} - \frac{F \times L^3}{6 \times E \times J_F} \quad (4)$$

Từ biểu thức (2), (3), (4) khối lượng quy đổi của đoạn 1 được xác định như sau:

$$M_{F1} = m_{f1} \times \left(\frac{33}{140} + \frac{665 \times L^2 \times J_F'^2 + 1120 \times L \times L' \times J_F \times J_F'}{4900 \times (2 \times L' \times J_F + L \times J_F')^2} \right) \quad (5)$$

với m_{f1} là khối lượng của đoạn 1.

Xét đoạn 2, hàm chuyển vị trên đoạn 2 được xác định như sau:

$$y_2(x) = \frac{F \times x}{E \times A_F} \quad (6)$$

trong đó, $A_F = t \times w'$ là diện tích mặt cắt ngang đoạn 2.

Xét tại mặt cắt giữa hai đoạn 2 và 3, tức tại $x = L'$ thì biểu thức (6) trở thành:

$$y_2(L') = \frac{F \times L'}{E \times A_F} \quad (7)$$

Từ biểu thức (1), (2), (6), (7) xác định được khối lượng quy đổi của đoạn số 2 theo biểu thức sau:

$$M_{F2} = \frac{m_{f2}}{3} \quad (8)$$

trong đó m_{f2} là khối lượng đoạn 2.

Tính toán tương tự, biểu thức xác định khối lượng quy đổi cho đoạn số 3 như sau:

$$M_{F3} = m_{f3} \times \left(\frac{1}{7} + \frac{56 \times L^2 \times J_F'^2 - 35 \times L \times L' \times J_F \times J_F'}{245 \times (L' \times J_F - L \times J_F')^2} \right) \quad (9)$$

trong đó, m_{f3} là khối lượng đoạn 3.

Như vậy, khối lượng quy đổi của dầm gập sẽ được xác định như sau:

$$M_F = M_{F1} + M_{F2} + M_{F3} \quad (10)$$

3.2. Dầm chữ V

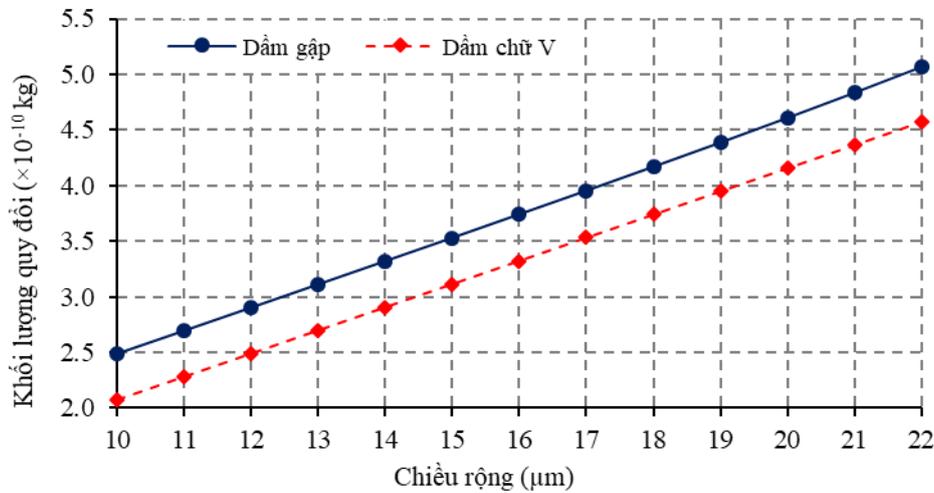
Chia dầm chữ V thành hai đoạn 1 và 2 (Hình 1b). Sử dụng phương pháp tương tự như đối với dầm gập và tham khảo tài liệu [7], biểu thức xác định khối lượng quy đổi của dầm chữ V như sau:

$$M_V = 2 \times m_{v1} \times \left(\frac{13 \times A_V^2 \times L^4 \times (\cos(\alpha/2))^2 + 1680 \times J_V^2 \times (\sin(\alpha/2))^2}{5040 \times J_V^2 \times (\sin(\alpha/2))^2 + 35 \times A_V^2 \times L^4 \times (\cos(\alpha/2))^2} \right) \quad (11)$$

trong đó: m_{v1} là khối lượng của đoạn dầm; $J_V = \frac{t \times w^3}{12}$ là mô men quán tính của đoạn dầm; $A_V = t \times w$ là diện tích mặt cắt ngang của đoạn dầm.

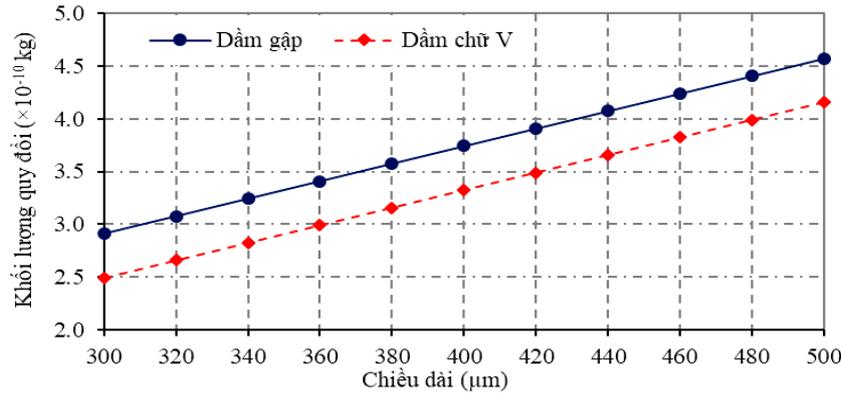
3.3. Ảnh hưởng của thông số kích thước đến khối lượng quy đổi của dầm

Dựa vào các biểu thức (10) và (11), khối lượng quy đổi của các dầm thay đổi theo các thông số kích thước của dầm được thể hiện như trên hình 4 và 5.



Hình 4. Mối quan hệ giữa chiều rộng và khối lượng quy đổi của dầm.

Theo kết quả trên các hình vẽ thấy rằng, khối lượng quy đổi của các dầm có quan hệ tuyến tính tăng theo các kích thước chiều rộng và chiều dài của chúng. Khi tăng chiều dài và chiều rộng các đoạn dầm lên 40%, khối lượng quy đổi tăng lần lượt 34% và 40% cho dầm gập; 33,58% và 40% cho dầm chữ V. Mặt khác, với cùng tiết diện mặt cắt thì khối lượng quy đổi của dầm chữ V luôn nhỏ hơn khối lượng quy đổi của dầm gập. Điều này là do trong kết cấu của dầm gập có thêm đoạn dầm kết nối 2 đặt tại đầu của đoạn dầm 1, năng lượng do đoạn dầm này gây ra cho động năng toàn hệ sẽ có giá trị lớn. Do đó, năng lượng được tạo ra thông qua kết cấu dầm gập sẽ lớn hơn và cần được chú ý tới trong quá trình tính toán thiết kế về tần số làm việc cho các thiết bị MEMS.



Hình 5. Mối quan hệ giữa chiều dài và khối lượng quy đổi của dầm.

4. Độ cứng tương đương của dầm

4.1. Phân tích kết cấu

Độ cứng tương đương của dầm gập có thể được xác định bằng giải tích trên cơ sở phương pháp năng lượng [8]. Với cấu trúc dầm trên hình 1a, độ cứng tương đương của dầm theo phương y có thể được xác định theo công thức [8, 9]:

$$K_F = \frac{E \times t}{4} \times \left(\frac{w'}{L}\right)^3 \times \left(\frac{L \times \gamma + 2 \times L}{2 \times L' \times \gamma + L}\right) \quad (12)$$

trong đó: K_F là độ cứng tương đương của dầm gập theo phương y ; E là mô đun đàn hồi của vật liệu; $\gamma = \left(\frac{w}{w'}\right)^3$ là hệ số hình dạng dầm.

Độ cứng tương đương của dầm chữ V theo phương y (Hình 1b) có thể được xác định theo công thức sau [9]:

$$K_V = \frac{E}{2 \times L \times \sqrt{\frac{L^4 \times (\cos(\alpha/2))^2}{144 \times J_V^2} + \frac{(\sin(\alpha/2))^2}{A_V^2}}} \quad (13)$$

trong đó, K_V là ký hiệu cho độ cứng theo phương y cho dầm chữ V.

Trong trường hợp coi ứng xử của dầm và vật liệu là tuyến tính, có thể xác định được độ cứng tương đương của dầm theo phương y bằng công thức:

$$K = \frac{F}{y_{\max}} \quad (14)$$

trong đó: K là độ cứng tương đương của dầm theo phương y ; y_{\max} là chuyển vị lớn nhất tại vị trí đặt lực theo phương y được xác định bằng mô phỏng.

Chuyển vị của đầu dầm đặt lực có thể được xác định bằng mô phỏng qua phần mềm ANSYS với ứng dụng phần tử hữu hạn FEM. Khi đó, phương trình mô tả chuyển động của hệ dầm được xem như một hệ dao động theo dạng:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P_{ex}\} \quad (15)$$

trong đó: $[M]$ - ma trận khối lượng; $[C]$ - ma trận cản; $[K]$ - ma trận độ cứng; $\{u\}$ - vectơ chuyển vị; $\{P_{ex}\}$ - vectơ ngoại lực.

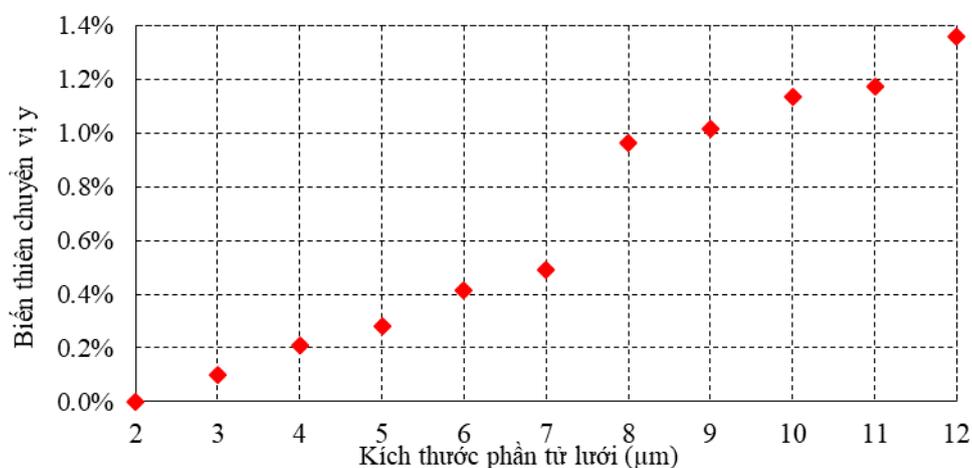
Trong các thiết bị MEMS, độ cản nhớt của không khí giữa các khối dầm di động và đế được xét đến. Các hệ số cản được xác định theo hàm Rayleigh [10]:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (16)$$

trong đó, α và β là các hệ số tắt dần Rayleigh và được định nghĩa là các hằng số.

Trong quá trình khảo sát chia lưới cho kết cấu với kích thước phần tử lưới thay đổi từ 2 μm - 12 μm , nhận thấy rằng khi kích thước phần tử lưới càng tăng thì mức thay đổi của chuyển vị đầu dầm cũng tăng dần, điều này sẽ làm giảm đi độ chính xác của bài toán mô phỏng. Theo kết quả phân tích trên hình 6, để đảm bảo độ chính xác trong mô phỏng, kích thước các phần tử trong mô hình chia lưới của cấu trúc nên chọn dưới 8 μm . Căn cứ vào cấu hình máy tính và mức độ đơn giản của cấu trúc dầm nghiên cứu, trong bài báo này, kích thước phần tử được chọn là 2 μm .

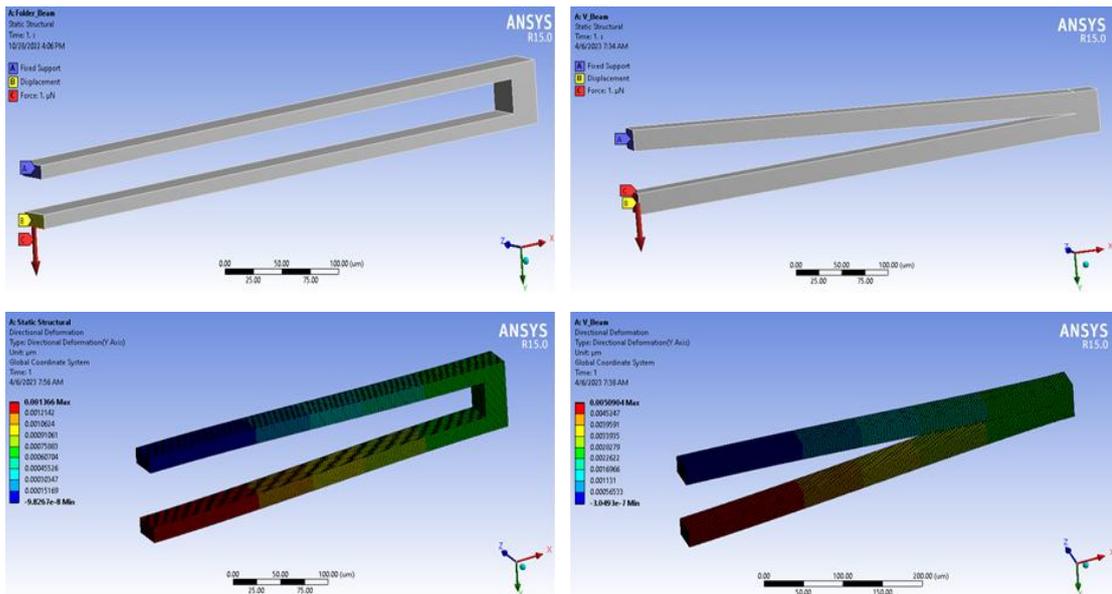
Kết cấu của dầm bao gồm các phần tử dạng khối lập phương nên phần tử được sử dụng để chia lưới có dạng Hexa20. Đây là phần tử lưới không gian ba chiều 3D có dạng đa giác sáu mặt với 20 node. Ưu điểm của phần tử này là đảm bảo cho kết quả mô phỏng có độ chính xác cao và số lượng phần tử là ít nhất (do đó có thể làm giảm thời gian tính toán) [5, 7]. Với kích thước phần tử đã chọn, số phần tử của dầm gấp là 31770 với 149868 node và 24450 phần tử với 117902 node cho dầm chữ V.



Hình 6. Sai khác chuyển vị theo kích thước phần tử lưới.

Trong phần **Setup** tiến hành thiết lập các điều kiện của bài toán. Vi dầm một đầu được ngàm cố định với lệnh **Fixed Support**. Đầu sát với thực tế chuyển động của vi dầm trong các thiết bị MEMS thì đầu còn lại được định hướng chuyển động theo phương y với lệnh **Displacement**. Tại đầu dao động này, đặt lực đơn vị $F = 1 \mu\text{N}$ trên phương y .

Trong phần **Solution**, kết quả cần thiết cho quá trình thiết kế được lựa chọn, thông số cần thiết ở đây là độ biến dạng của đầu dầm theo phương y được lựa chọn trong mục **Directional Deformation**. Lựa chọn kết quả giá trị biến dạng tối đa làm tham số để thiết kế.



Hình 7. Áp điều kiện biên và biến dạng của dầm sau đặt lực.

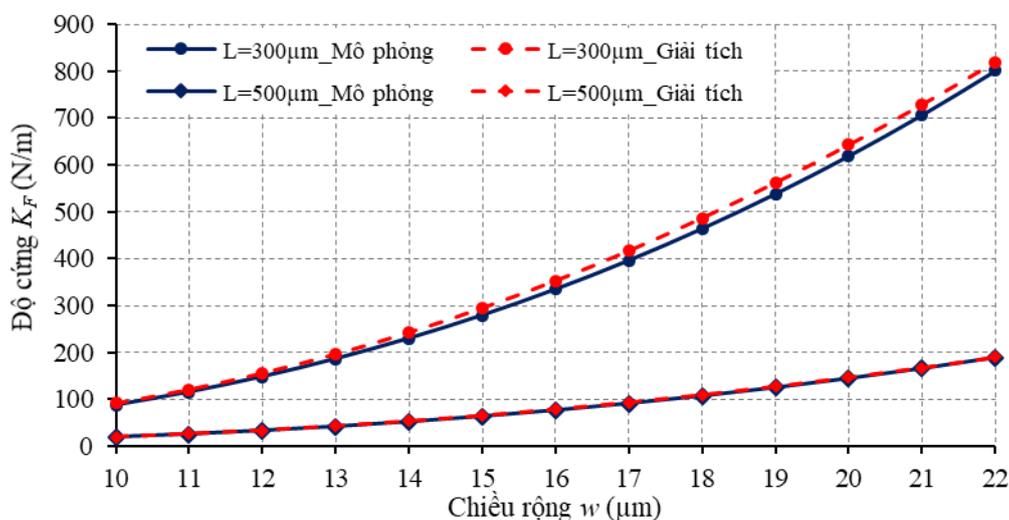
Tiến hành thay đổi các tham số theo ý định thiết kế trong mục **Parameters**. Các thông số được khảo sát ở đây bao gồm: chiều dài dầm L thay đổi từ $300 \mu\text{m}$ - $500 \mu\text{m}$; chiều rộng dầm w thay đổi từ $10 \mu\text{m}$ - $22 \mu\text{m}$. Giá trị ngoại lực $F = 1 \mu\text{N}$ được giữ nguyên, thông số đầu ra được xác định là độ cứng tương đương của dầm.

4.2. Ảnh hưởng của thông số kết cấu đến độ cứng của dầm

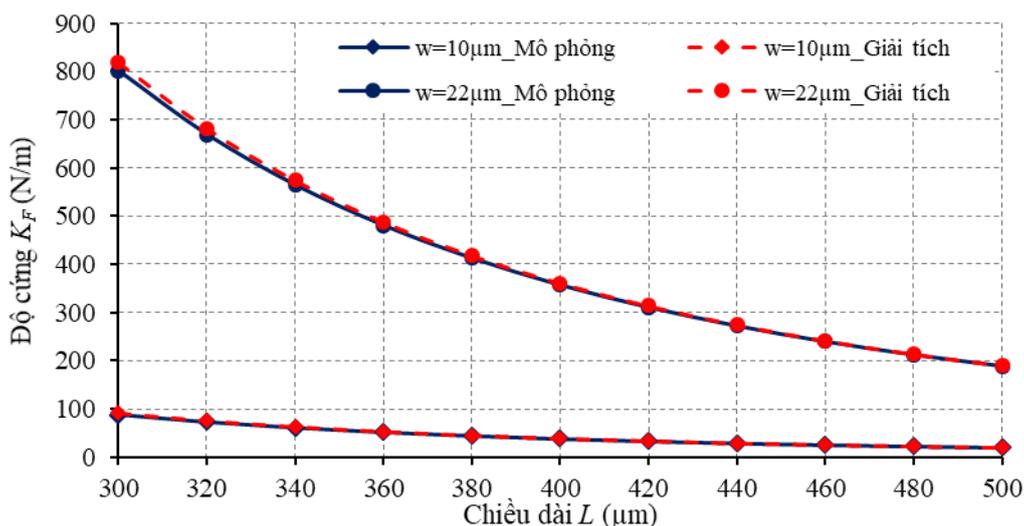
Kết quả tính độ cứng tương đương của dầm gập bằng mô phỏng và tính toán giải tích theo thông số kích thước của dầm được thể hiện trên hình 8 và 9.

Kết quả khảo sát cho thấy, khi tăng chiều rộng của các đoạn dầm, độ cứng tương đương của dầm tăng lên (Hình 8). Bên cạnh đó, độ cứng tương đương của dầm giảm xuống khi chiều dài đoạn dầm tăng lên (Hình 9). Kết quả này hoàn toàn phù hợp với thực tế đối với các dầm đàn hồi ở kích thước vĩ mô trong vùng giới hạn đàn hồi của vật liệu. Giá trị độ cứng tại mỗi kích thước tính theo hai phương pháp có sự sai khác.

Chênh lệch lớn nhất giữa kết quả mô phỏng và giải tích là 4,5%. Sai số giữa 2 phương pháp là thấp, do đó có thể sử dụng công cụ mô phỏng để tính toán độ cứng cho cấu trúc dầm gập nói riêng và đặc biệt là các cấu trúc có kết cấu phức tạp khó đưa ra lời giải bằng phương pháp tính toán giải tích.



Hình 8. Mối quan hệ giữa độ cứng theo chiều rộng của dầm gập.

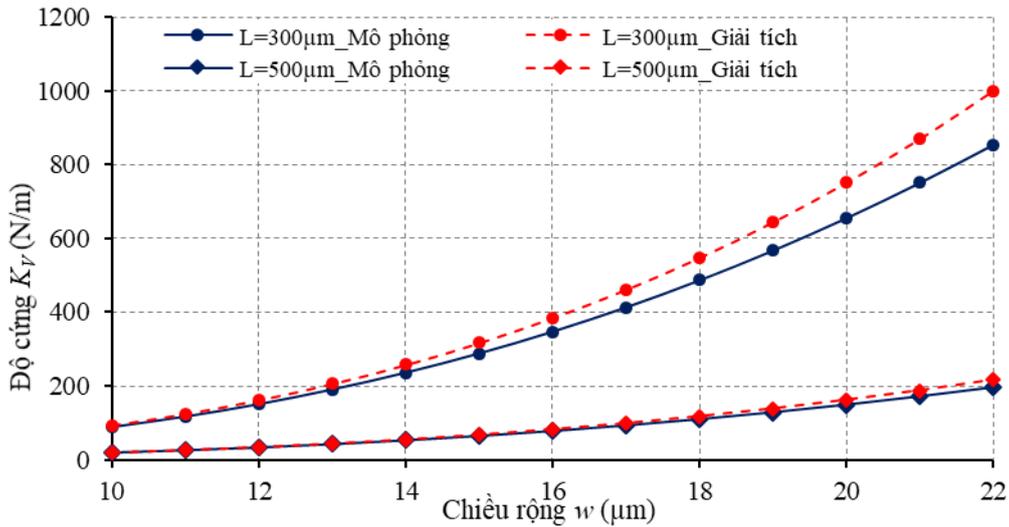


Hình 9. Mối quan hệ giữa độ cứng theo chiều dài của dầm gập.

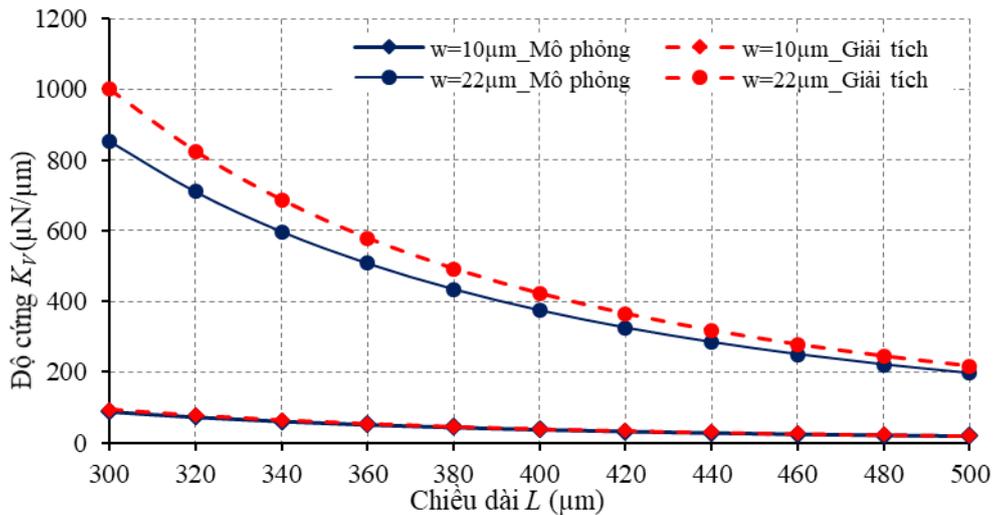
Hình 10 và 11 biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số kích thước đến độ cứng tương đương của dầm chữ V. Tương tự như dầm gập, khi chiều rộng và chiều dài tăng lên thì độ cứng cũng lần lượt tăng và giảm. Độ cứng tương đương ứng với mỗi giá trị kích thước tính theo hai phương pháp có sự sai khác. Sai lệch lớn nhất giữa kết quả mô phỏng và giải tích là 12,63%. Điều này có thể giải thích như sau: Quá trình xây dựng

công thức giải tích tính độ cứng tương đương, kết cấu dầm chữ V đã được đơn giản hóa cho quá trình phân tích lực, do đó đã bỏ qua đoạn dầm liên kết giữa hai nhánh chữ V của dầm (chiều rộng phần kết nối $w' = 25 \mu\text{m}$). Mặt khác, kích thước của phần tử lưới kết hợp với ảnh hưởng của khối lượng bản thân của dầm trong quá trình mô phỏng cũng sẽ làm cho độ cứng tương đương của dầm có sự sai khác so với kết quả giải tích.

Sự phụ thuộc của thông số đầu ra (độ cứng tương đương) đến các tham số đầu vào là chiều dài và chiều rộng dầm được thể hiện trong các đồ thị dạng mặt và dạng cột như thể hiện dưới đây.

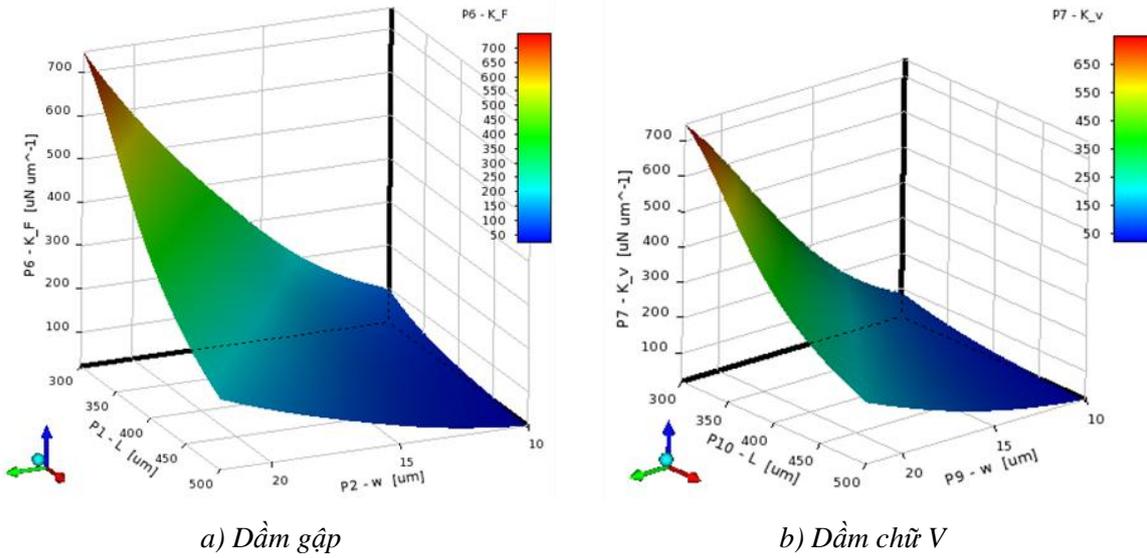


Hình 10. Mối quan hệ giữa độ cứng theo chiều rộng của dầm chữ V.

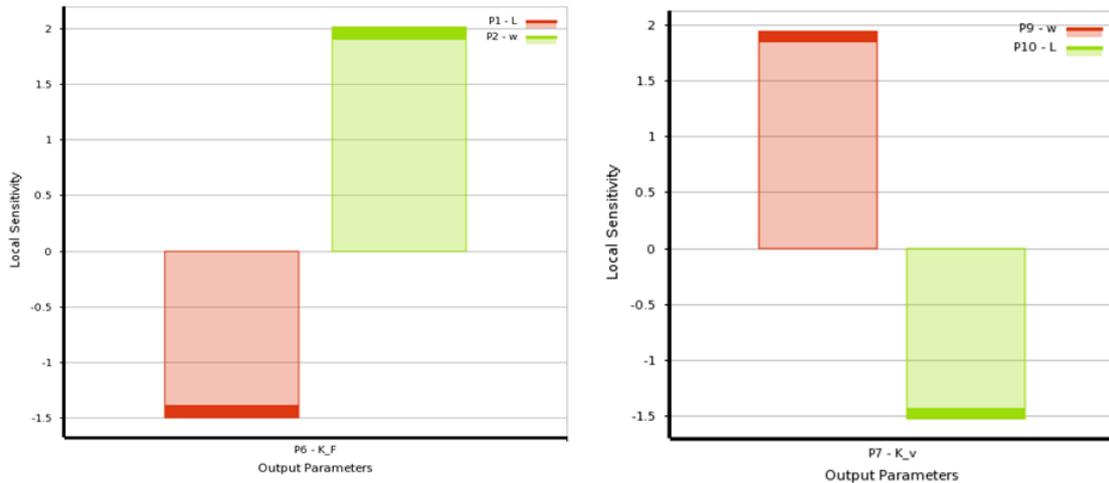


Hình 11. Mối quan hệ giữa độ cứng theo chiều dài của dầm chữ V.

Sử dụng mô đun **Response Surface** để phân tích đáp ứng bề mặt của các thông số kích thước hình học cho kết cấu. Thấy rằng, cả hai thông số hình học là chiều dài L và chiều rộng w đều ảnh hưởng rất lớn đến độ cứng của kết cấu. Trong đó, mối quan hệ giữa chiều dài L và độ cứng của kết cấu là tương quan nghịch biến, tức chiều dài càng tăng thì độ cứng càng giảm và ngược lại. Trong khi chiều rộng w và độ cứng dầm có mối quan hệ tương quan đồng biến, độ cứng tăng theo chiều tăng của chiều rộng. Quan hệ theo đáp ứng bề mặt giữa độ cứng tương đương và hai thông số kích thước dầm được thể hiện trên hình 12.



Hình 12. Đáp ứng bề mặt độ cứng của dầm.

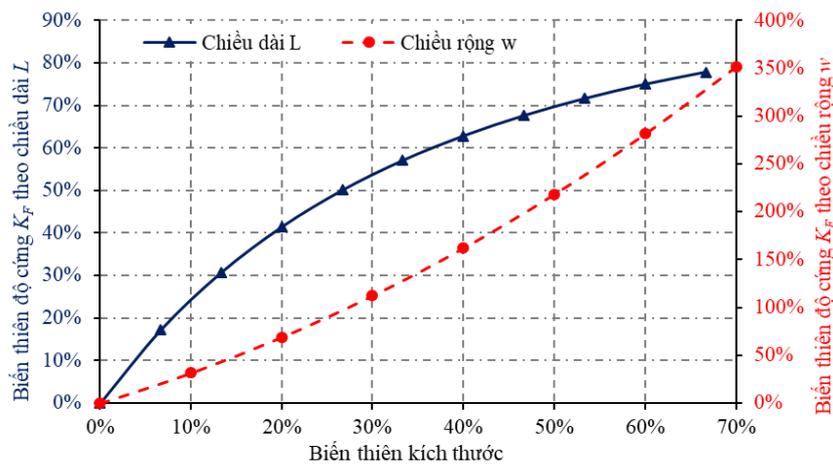


Hình 13. Phân tích độ nhạy cục bộ các tham số hình học của dầm.

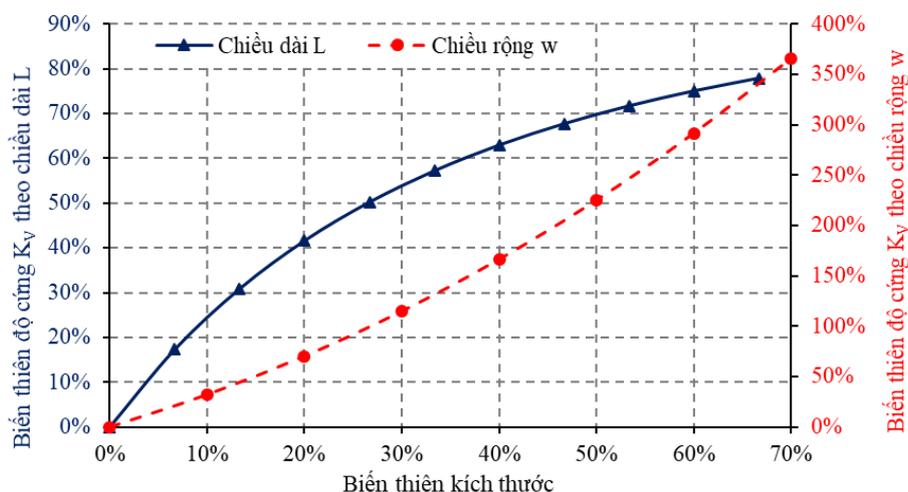
Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số kích thước đến độ cứng tương đương của các dầm, bài báo tiến hành xác định giá trị độ nhạy cục bộ của hai thông số kích thước được xác định trong phần **Local Sensitivity** (Hình 13). Giá trị độ nhạy cục bộ của một thông số là gradient hoặc đạo hàm riêng của các hàm đầu ra (độ cứng tương đương của dầm) với từng biến đầu vào (các thông số kích thước của dầm). Đối với dầm gập, độ nhạy cục bộ của chiều rộng dầm là +2,0163, chiều dài dầm là -1,497. Đối với dầm chữ V, độ nhạy cục bộ của chiều rộng dầm là +1,9411, chiều dài dầm là -1,5224. Các độ nhạy mang giá trị dương thể hiện sự ảnh hưởng tích cực của thông số đó đến kết quả đầu ra và ngược lại. Theo đó, giá trị độ nhạy của kích thước chiều rộng là dương, nên nó ảnh hưởng tích cực đến độ cứng của dầm (chiều rộng dầm càng lớn thì độ cứng càng tăng). Còn độ giá trị độ nhạy của kích thước chiều dài là âm, nên nó sẽ ảnh hưởng nghịch biến đến độ cứng của dầm (chiều dài dầm càng lớn thì độ cứng càng giảm). Điều này hoàn toàn phù hợp với thực tế hoạt động của các vi dầm. Như vậy, dấu “+” hay “-” cho phép xác định hướng tác động của các thông số đầu vào so với thông số đầu ra là thuận hay nghịch. Còn giá trị của chúng cho phép xác định mức độ ảnh hưởng của các thông số đến độ cứng tương đương của dầm. Thông số nào có giá trị độ nhạy cục bộ càng cao thì mức độ ảnh hưởng đến thông số đầu ra càng lớn. Theo đó, giá trị độ nhạy cục bộ của chiều rộng dầm là lớn hơn nên nó sẽ ảnh hưởng đến độ cứng mạnh hơn so với chiều dài dầm.

Hình 14 và 15 thể hiện mức độ ảnh hưởng của hai thông số kích thước dầm đến độ cứng tương đương của dầm trên phương y. Kết quả trên hình 14 cho thấy rằng:

- Khi giữ nguyên chiều dài dầm là $L = 400 \mu\text{m}$ và thay đổi chiều rộng w từ $10 \mu\text{m} - 22 \mu\text{m}$, thấy rằng khi chiều rộng tăng 40% thì độ cứng thay đổi 162,15% theo chiều tăng.
- Giữ nguyên chiều rộng dầm là $w = 16 \mu\text{m}$, thay đổi chiều dài L từ $300 \mu\text{m} - 500 \mu\text{m}$, thấy rằng khi chiều dài tăng 40% thì độ cứng thay đổi 62,84% theo chiều giảm.



Hình 14. Mức thay đổi độ cứng tương đương theo kích thước của dầm gập.



Hình 15. Mức thay đổi độ cứng tương đương theo kích thước của dầm chữ V.

Kết quả thu được trên hình 15 cho thấy:

- Khi giữ nguyên chiều dài dầm là $L = 400 \mu\text{m}$ và thay đổi chiều rộng w từ $10 \mu\text{m}$ - $22 \mu\text{m}$, thấy rằng khi chiều rộng tăng 40% thì độ cứng thay đổi 166,44% theo chiều tăng. Ngoài ra, khi chiều rộng tăng 70% thì độ cứng tăng lên hơn 350%.

- Giữ nguyên chiều rộng dầm là $w = 16 \mu\text{m}$, tiến hành khảo sát chiều dài L trong khoảng kích thước từ $300 \mu\text{m}$ - $500 \mu\text{m}$, thấy rằng khi chiều dài tăng 40% lần thì độ cứng thay đổi 62,96% theo chiều giảm.

Dựa trên giá trị độ nhạy của các thông số đầu vào, trong quá trình tính toán, thiết kế các cấu trúc để đảm bảo thông số đầu ra, cần quan tâm một số đặc điểm sau:

- Thứ nhất, cả hai thông số chiều dài và chiều rộng dầm đều ảnh hưởng nhiều đến độ cứng của kết cấu, do đó có thể coi đây là hai tham số thiết yếu để phục vụ cho bài toán tối ưu hóa thông số hình học.

- Thứ hai, tham số chiều rộng của dầm ảnh hưởng mạnh nhất đến độ cứng của dầm, do vậy trong quá trình thiết kế cần quan tâm đến tham số hình học này nhiều hơn các tham số khác để xác định được độ cứng theo ý định thiết kế một cách nhanh nhất và tối ưu nhất. Muốn thay đổi nhanh chóng độ cứng dầm, có thể tác động thông qua giá trị chiều rộng của dầm. Việc thay đổi chiều dài dầm được thực hiện khi muốn thay đổi độ cứng dầm không quá nhiều.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp xác định các đại lượng động lực học đặc trưng cho hai loại dầm micro có kết cấu phức tạp; phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số hình học là chiều dài L và chiều rộng w của kết cấu dầm đến thông số khối lượng quy

đổi và độ cứng tương đương của dầm gập và dầm dạng chữ V được sử dụng phổ biến trong các thiết bị MEMS. Thông qua công cụ phân tích của phần mềm ANSYS đã xác định được kích thước quan trọng và có ảnh hưởng lớn nhất đến độ cứng tương đương của dầm. Chiều rộng của các dầm có mức độ ảnh hưởng lớn nhất đến các thông số động lực học đặc trưng của dầm, khi tăng chiều rộng lên 40%, độ cứng tương đương và khối lượng quy đổi tăng lần lượt là 162,15% và 33,58% với dầm gập; 166,44% và 40% với dầm chữ V. Hệ số độ nhạy cục bộ tính cho các thông số chiều rộng của dầm gập và dầm chữ V lần lượt là +2,0163 và +1,9411, trong khi hệ số độ nhạy cục bộ cho chiều dài lần lượt là -1,497 và -1,5224. Kết quả của bài báo là cơ sở cho các phân tích với các cấu trúc phức tạp hơn và là cơ sở cho bài toán tối ưu hóa kết cấu nhằm giảm thời gian khảo sát, tính toán cho các cấu trúc dao động cơ học trong các thiết bị MEMS.

Tài liệu tham khảo

- [1] PRIME Faraday Partnership, *An-introduction-to-mems*, Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University, Loughborough, Leics LE11 3TU, 2002.
- [2] Van Hieu, D., Van Tam, L., Van Duong, N., Duy Vy, N., & Manh Hoang, C., “Design and Simulation Analysis of A Z Axis Microactuator with Low Mode Cross-Talk,” *Journal of Mechanics*, 36(6), pp. 881-888, 2020. DOI:10.1017/jmech.2020.48
- [3] Din, H., Iqbal, F. & Lee, B., “Modelling and optimization of single drive 3-axis MEMS gyroscope,” *Microsyst Technol*, 26, pp. 2869-2877, 2020. DOI: 10.1007/s00542-020-04840-7
- [4] Dang, V. H., Le, V. T., Hane, K., Chu, M. H., “Design and simulation analysis of an integrated xyz micro-actuator for controlling displacement of a scanning probe,” *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 59(1), pp. 143-156, 2021. DOI: 10.15632/jtam-pl/130549
- [5] Vu Van The, Chu Duc Trinh, “Determine the dynamic parameters in mechanical system of the crab-shaped MEMS vibratory gyroscope,” *Microsyst Technol*, 27, pp. 3429-3435, 2021. DOI: 10.1007/s00542-020-05128-6
- [6] Chu Mạnh Hoàng, *Cảm biến và vi chấp hành vi hệ thống cơ - quang - điện tử*, Hà Nội, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, 2021, tr. 169-170.
- [7] Hoàng Trung Kiên, Vũ Công Hàm, Nguyễn Văn Toàn, Phạm Hồng Phúc, “Một phương pháp tính toán các đại lượng quy đổi trong phương trình chuyển động của bộ vi kích hoạt điện nhiệt kiểu V-shaped,” *Tuyển tập Công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X*, tr. 694-702, 2017.
- [8] Vũ Công Hàm, “Một phương pháp xác định khối lượng quy đổi của thanh thẳng đàn hồi mang vật dao động,” *Hội nghị toàn quốc Máy và Cơ cấu 2015 TP. HCM*, 2015, tr. 395-404.
- [9] Phạm Hồng Phúc, Nguyễn Tiến Dũng, Hoàng Trung Kiên, *Thiết kế và chế tạo các bộ vi chấp hành dựa trên công nghệ vi cơ điện tử MEMS*, Hà Nội, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, 2020.
- [10] I. Chowdhury and Shambhu P. Dasgupta, *Computation of Rayleigh Damping Coefficients for Large Systems*, 2003.

STUDYING THE INFLUENCE OF STRUCTURAL PARAMETERS ON THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF COMPLEX GEOMETRY MICRO-BEAMS

Abstract: *This article conducts a survey to determine the characteristic dynamic parameters of two micro beams commonly used in micro-electro-mechanical devices by varying the structural parameters of the beams. The results show that the geometrical parameters of the beams directly affect the equivalent stiffness and the effective mass of the beams and change the dynamic characteristics of the vibratory system in the micro-electro-mechanical devices. The width of beams strongly affects the dynamic parameters, when the width is increased by 40%, the equivalent stiffness and the converted mass increase by 162.15% and 33.58% respectively with the folded beam; 166.44% and 40% for V-shaped beams. While, when the length is increased by 40%, the converted mass of the folded beam and V-shaped beam increases by 34% and 40% respectively, but the equivalent stiffness changes in the decreasing direction, 62.84% and 62.96% respectively for folded and V-shaped beams. These obtained results allow the designer to make necessary changes the geometrical parameters in purpose.*

Keywords: Equivalent stiffness coefficient; effective mass; folded beam; V-shaped beam; MEMS devices.

Nhận bài: 19/04/2023; Hoàn thiện sau phân biện: 10/07/2023; Chấp nhận đăng: 31/07/2023

