

# Thiết kế và mô phỏng hoạt động của vi chấp hành nhiệt điện silicon-polymer

Chữ Đức Trinh\*, Nguyễn Ngọc Việt, Đặng Văn Hiếu

Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

Ngày nhận bài 28.4.2015, ngày chuyển phản biện 6.5.2015, ngày nhận phản biện 17.6.2015, ngày chấp nhận đăng 22.6.2015

Bài báo trình bày về thiết kế và mô phỏng hoạt động của một vi chấp hành nhiệt điện silicon-polymer với kích thước nhỏ; điện áp hoạt động thấp; lực và độ dịch chuyển đầu ra lớn; tương thích với quy trình chế tạo CMOS. Hoạt động của cấu trúc được phân tích dựa trên lý thuyết cơ học cổ điển và phương pháp mô hình hóa phân tử hữu hạn. Các kết quả phân tích lý thuyết và mô phỏng phù hợp với các kết quả thực nghiệm. Cấu trúc vi chấp hành cải tiến được thiết kế dựa trên các mô hình đạt được về cơ học và truyền nhiệt. Vi chấp hành nhiệt điện silicon-polymer này có tiềm năng ứng dụng trong các bộ vi thao tác, mổ nội soi...

**Từ khóa:** phân tích phân tử hữu hạn, phương pháp Maxwell-Mohr, vi chấp hành nhiệt điện, vi kẹp.

**Chỉ số phân loại 1.3**

## DESIGN AND SIMULATION OF A SILICON-POLYMER ELECTROTHERMAL MICROACTUATOR

### Summary

This paper presents the design and simulation of a silicon-polymer electrothermal microactuator with small size; low driving voltage; large force and deflection; compatibility with CMOS technology... This proposed microelectromechanical silicon-polymer gripper has been analyzed based on traditional mechanical theories and finite element simulation. The analyzed and simulated results have met the experimental results. The proposed structure has been optimized using mechanical and heat transfer theories. This silicon-polymer microgripper has a high potential of applying in micromanipulator, minimally invasive surgery, and so on.

**Keywords:** electrothermal microactuator, FEA, Maxwell-Mohr method, microgripper.

**Classification number 1.3**

### Giới thiệu

Là một lĩnh vực công nghệ tiên phong, hệ thống vi cơ điện tử (MEMS) có thể tích hợp một số thành phần tương chừng không liên quan như y sinh với cơ học kết cấu và vi điện tử [1]. Nhiều ứng dụng mới về MEMS sẽ xuất hiện, vượt ra khỏi những hiểu biết trong hiện tại. Một trong các nghiên cứu đó là vi cơ cấu chấp hành - một phần tử quan trọng. Các ứng dụng tiềm tàng của thiết bị này thể hiện trong một số lĩnh vực như vi hệ thống, vi robot và công nghệ y sinh [2, 3]. Một số phương pháp thiết kế vi chấp hành được sử dụng phổ biến trong công nghệ MEMS, như tĩnh điện [4-6], áp điện [7, 8], điện từ [9, 10] và nhiệt điện [11, 12]. Các cơ chấp hành kiểu tĩnh điện thường có đáp ứng nhanh, nhưng có một số nhược điểm là điện áp sử dụng lớn, kích thước lớn trong khi lực chuyển vị thấp. Các vật liệu áp điện có khả năng cho lực chuyển vị cao tại điện áp tương đối thấp. Tuy nhiên, cơ cấu chấp hành áp điện thường phức tạp, không phù hợp với quy trình chế tạo mạch tích hợp, nên khó cho các ứng dụng xâm lấn tối thiểu. Các cơ cấu chấp hành kiểu điện từ cũng tương tự, nghĩa là hiệu quả chuyển vị cao nhưng cơ cấu phức tạp, khó chế tạo và ít phù hợp với vi hệ thống. Do các ưu điểm về kích thước, giá thành và độ tin cậy, các cơ cấu chấp hành nhiệt điện ngày càng được ưa thích hơn. Vi chấp hành nhiệt điện silicon [13] có thể phát sinh biến dạng và chuyển vị lớn với

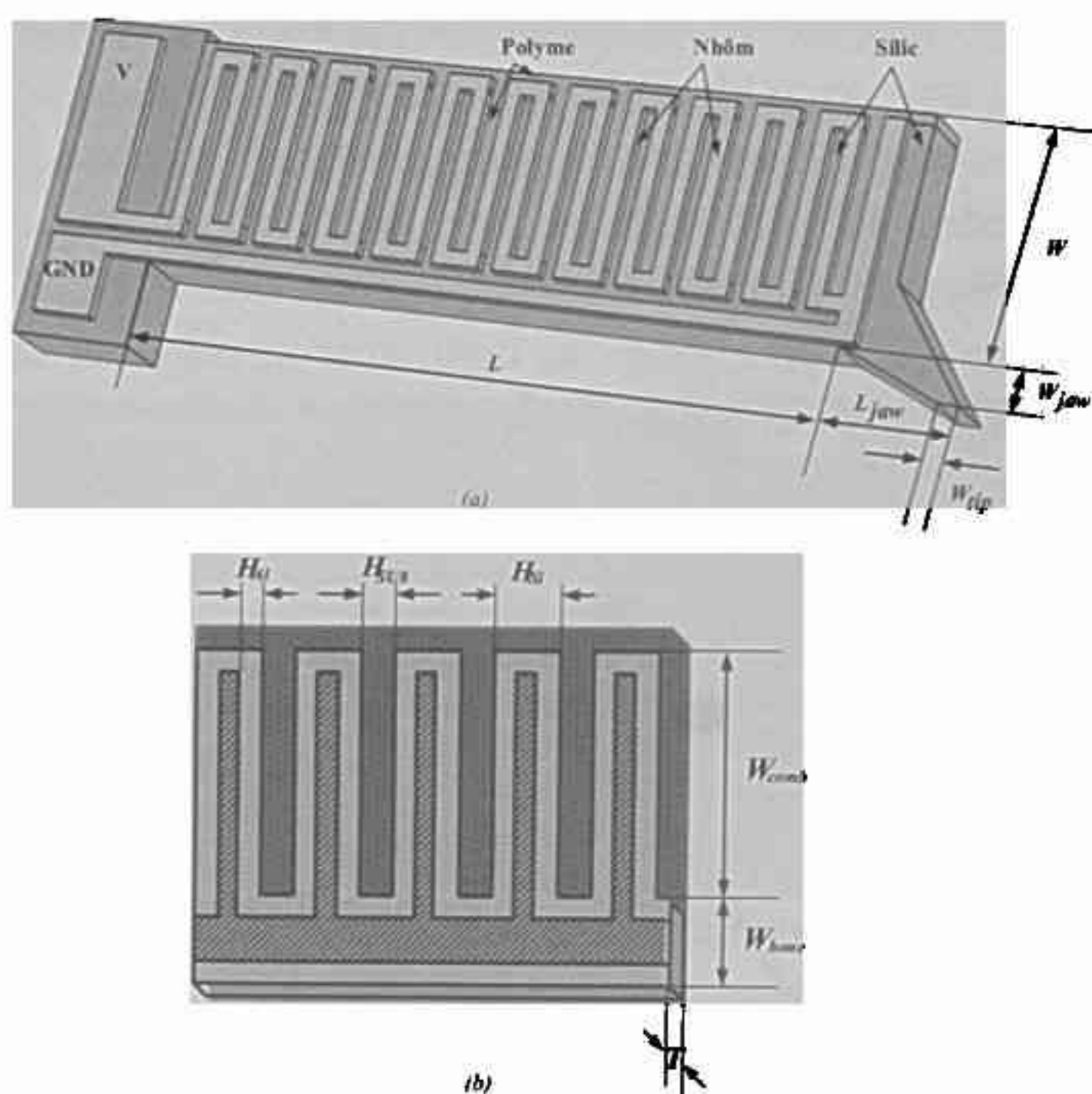
\*Tác giả liên hệ: Tel: 0936686156; Email: trinhcd@gmail.com

điện áp tác dụng thấp và quy trình chế tạo tương thích với công nghệ CMOS. Tuy nhiên, nhược điểm chính của cơ cấu chấp hành này là nhiệt độ hoạt động trên cấu trúc có thể rất cao.

Cơ cấu chấp hành nhiệt điện polymer [14] đã được quan tâm đến trong công nghệ MEMS bởi nhiệt độ hoạt động thấp hơn. Hơn nữa, nó có khả năng hoạt động trong chất lỏng và khả năng tương thích sinh học. Hầu hết các vi chấp hành nhiệt điện polymer sử dụng cấu trúc hai vật liệu. Lớp gia nhiệt bằng kim loại được lắng đọng trên mặt lớp polymer có hệ số giãn nở nhiệt cao. Cấu trúc này bị uốn cong khi nóng. Để tăng độ cứng và hiệu quả truyền nhiệt vào polymer, một thiết kế mới về vi chấp hành tạo nên bởi các ngăn silicon-polymer xếp chồng lên nhau đã được đưa ra [15]. Thiết kế bao gồm 3 vật liệu: kim loại dẫn điện, silicon có độ dẫn nhiệt cao và polymer với một hệ số giãn nở nhiệt lớn. Khi hoạt động, nhiệt được truyền hiệu quả từ lớp kim loại gia nhiệt tới polymer nhờ sự dẫn nhiệt cao theo chiều dày của khung silicon, và khung silicon lại có giao diện tiếp xúc lớn với polymer xung quanh. Hơn nữa, các lớp polymer bị giam giữ giữa các ngăn silicon. Sự giãn nở nhiệt của polymer khi bị giam giữ lớn hơn 3 lần so với không bị giam giữ [16].

Bài báo trình bày phương pháp phân tích cấu trúc và mô phỏng hoạt động của một thiết kế vi chấp hành nhiệt điện silicon-polymer. COMSOL Multiphysics - một công cụ mô hình hóa phần tử hữu hạn đã được sử dụng để mô phỏng vi chấp hành. Các kết quả phân tích và mô phỏng được so sánh là khá phù hợp với thực nghiệm. Bởi vậy, các phương pháp trên cũng được sử dụng để xem xét một cải tiến mới. Cải tiến mới về cấu trúc cơ học bằng cách thay đổi tỷ số chiều rộng (tỷ số về chiều rộng giữa đầu tự do và đầu cố định của thanh dầm chấp hành) sẽ được trình bày trong bài báo này. Với cùng kết quả chuyển vị ở đầu gắp, thiết kế mới sử dụng điện áp kích thích nhỏ hơn và nhiệt độ hoạt động thấp hơn so với thiết kế thường. Cuối cùng, bài báo đưa ra một cấu trúc vi kẹp tối ưu. Kết quả cho thấy, với cùng một đáp ứng dịch chuyển  $40 \mu\text{m}$ , cấu trúc tối ưu chỉ sử dụng điện áp xấp xỉ bằng một nửa và nhiệt độ hoạt động trung bình là  $85^\circ\text{C}$  so với  $150^\circ\text{C}$  trên cấu trúc thường. Như vậy, cấu trúc tối ưu không chỉ làm tăng dịch chuyển, mà còn góp phần giảm tiêu thụ năng lượng và kích thước vi chấp hành.

## Nguyên lý hoạt động và thiết kế vi chấp hành nhiệt điện silicon-polymer

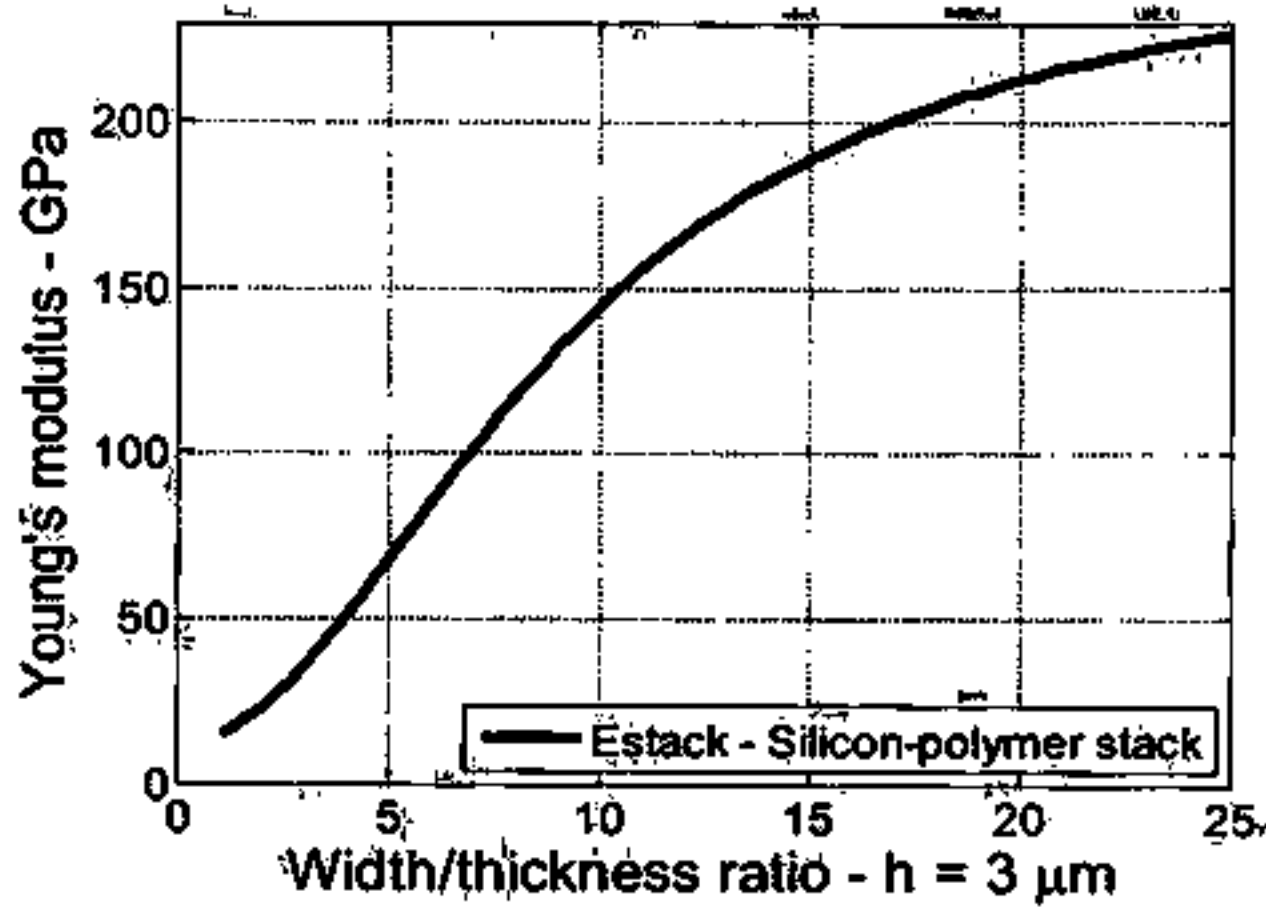


Hình 1: a) Thiết kế cơ cấu vi chấp hành nhiệt điện; b) Phác thảo cấu trúc khung silicon và các ngăn silicon-polymer xếp chồng lên nhau

Hình 1a biểu diễn thiết kế của một vi chấp hành nhiệt điện silicon-polymer. Hình 1b phác thảo cấu trúc khung xếp chồng các ngăn silicon-polymer. Cơ cấu chấp hành này gồm 3 thành phần chủ đạo. Phần thứ nhất là khung silicon: giống như một khung xương sống, khung silicon giúp làm tăng độ cứng và độ dẫn nhiệt bên trong cấu trúc. Phần thứ hai là polymer: các lớp polymer SU8 được điền vào các khoảng trống giữa các ngăn silicon. Các lớp này giúp tăng cường hiệu quả biến dạng do polymer có độ dẫn nở nhiệt cao. Hai thành phần silicon và polymer được chế tạo tương tự như hai chiếc lược đan xen vào nhau tạo nên dạng cấu trúc các ngăn silicon-polymer xếp chồng lên nhau. Thành phần thứ ba giống như một nguồn nhiệt, là một lớp nhôm mỏng. Lớp nhôm được gắn trên mặt của khung silicon, tạo thành một dây điện trở. Lớp nhôm này được kết nối với một nguồn điện và hoạt động dựa trên hiệu ứng tỏa nhiệt Jun-Lenxơ.

Khi lớp nhôm được kích thích bởi một nguồn điện V, năng lượng điện được chuyển hóa thành năng lượng nhiệt bởi điện trở của dây nhôm. Nguồn nhiệt phát sinh được truyền vào khung silicon. Do độ dẫn nhiệt cao và bề mặt tiếp xúc rộng với polymer của cấu trúc silicon-polymer, năng lượng nhiệt được truyền hiệu quả vào các lớp polymer, làm polymer giãn nở mạnh. Do sự giãn nở nhiệt khác nhau giữa silicon và polymer, cộng với việc cố định thanh dầm chấp hành tại một đầu, làm

cho thanh dầm chấp hành bị uốn cong ở đầu còn lại. Hơn nữa, do tác dụng giam giữ các lớp polymer giữa các lớp cứng silicon [17] làm cho độ uốn của dầm tăng gấp ba lần so với khi không có giam giữ. Theo đó, hiệu quả giam giữ đạt được ổn định khi tỷ số w/h lớn hơn hoặc bằng 10. Với w, h lần lượt là độ dài và rộng của lớp polymer. Hình 2 cho thấy, mô đun đàn hồi Young của cấu trúc xếp chồng các ngăn silicon-polymer tăng theo hàm mũ hai với tỷ số w/h [18].



Hình 2: mô đun Young hiệu dụng của cấu trúc silicon-polymer với tỷ số w/h [19].

Mỗi cấu trúc xếp chồng silicon-polymer bao gồm một gân silicon với 41 răng lược và các lớp polymer SU8 ở giữa. Độ rộng gân silicon là 10 μm và mỗi răng lược silicon có độ rộng 6 μm, dài 75 μm, dày 30 μm. Mỗi lớp polymer rộng 3 μm. Tỷ số dài/rộng và cao/rộng của mỗi lớp polymer lần lượt là 25 và 10. Các giá trị này đã thỏa mãn hiệu quả giam giữ như đã nêu ở trên. Lớp dây nhôm có độ rộng 2 μm và dày 600 nm. Các kích thước này được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1: thông số kích thước của vi chấp hành [15].

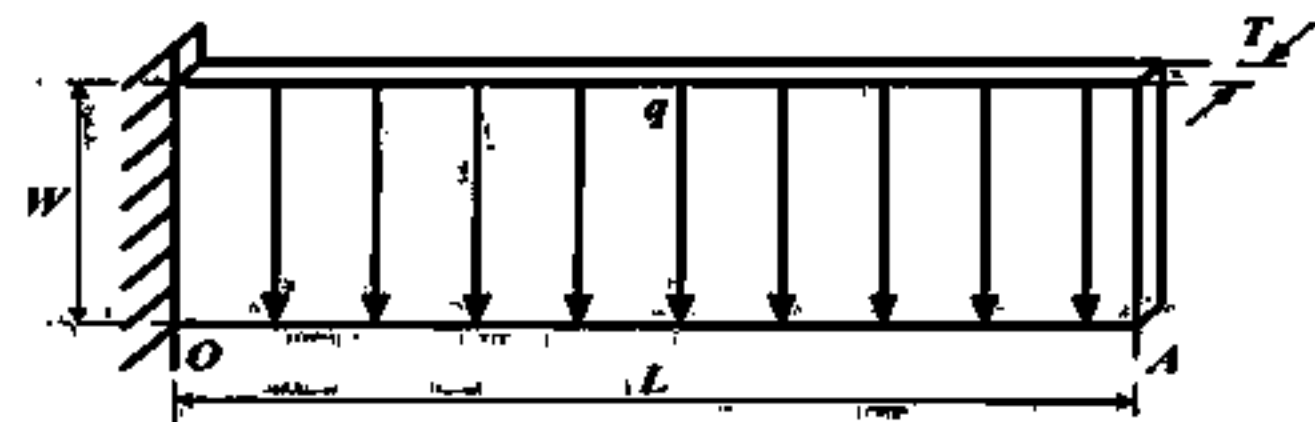
Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Chiều dài vi chấp hành	L	390	μm
Độ dày vi chấp hành	T	30	μm
Độ dày lớp nhôm	T <sub>Al</sub>	600	nm
Độ rộng ngón lược silicon	H <sub>Si</sub>	6	μm
Độ rộng lớp polymer SU8	H <sub>SU8</sub>	3	μm
Độ rộng dây gia nhiệt nhôm	H <sub>Al</sub>	2	μm
Độ dài ngón lược	L <sub>comb</sub>	75	μm
Độ rộng xương silicon	W <sub>bone</sub>	10	μm
Độ hở giữa vi chấp hành và thanh dầm	W <sub>gap</sub>	22	μm
Độ rộng thanh dầm	W <sub>can</sub>	12	μm
Độ dài đầu gấp	L <sub>jaw</sub>	100	μm
Độ rộng đầu gấp	W <sub>jaw</sub>	28	μm
Độ rộng đầu gấp	W <sub>tip</sub>	20	μm
Khoảng cách ban đầu giữa hai mô vi kẹp	d <sub>ax</sub>	50	μm

## Mô hình hóa và mô phỏng vi chấp hành

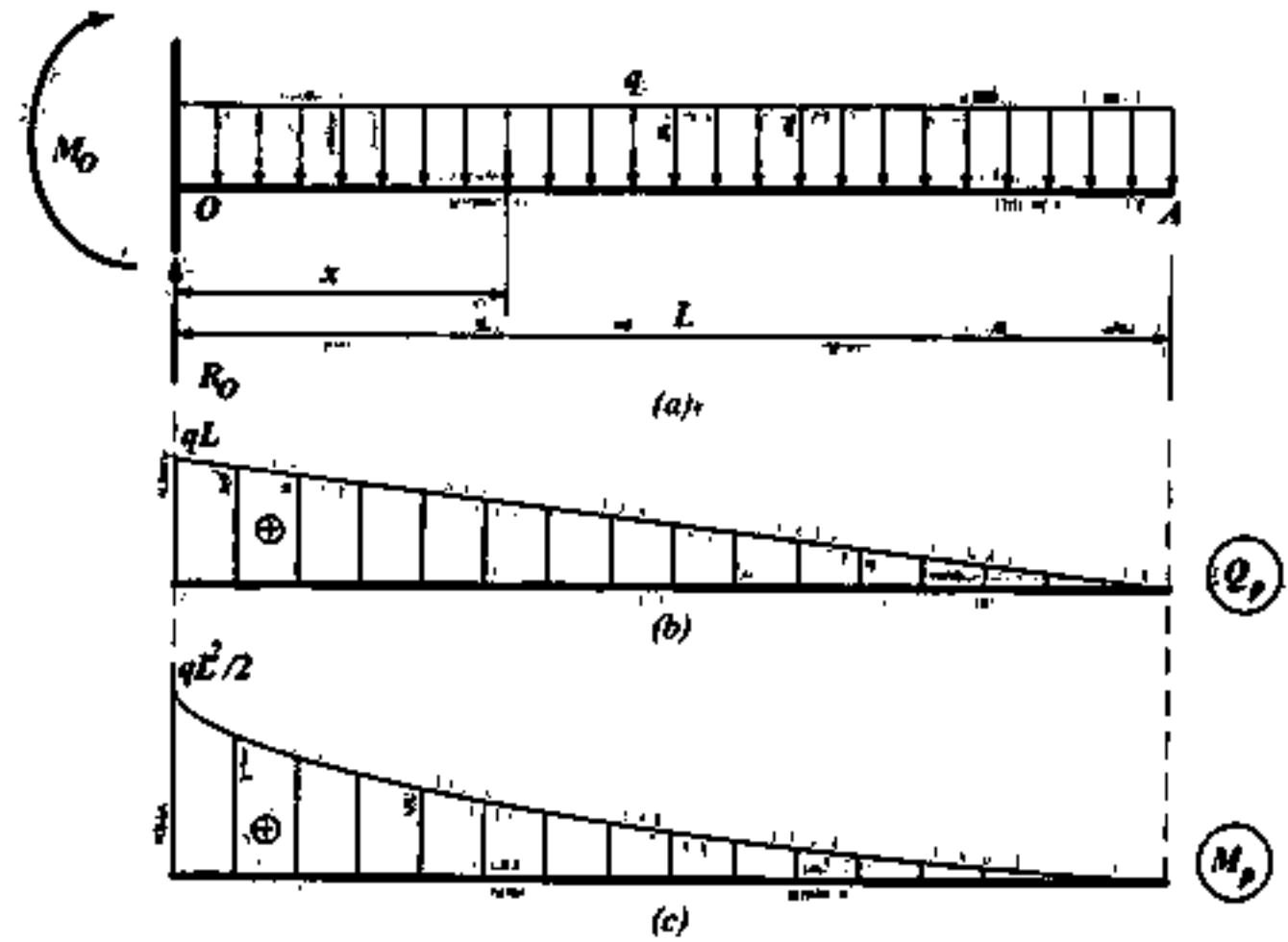
### Tính toán chuyển vị sử dụng phương pháp Maxwell-Mohr

Một dầm công sôn được sử dụng để mô hình hóa cho thanh chấp hành nhiệt điện (như trên hình 3). Dầm cố định tại một đầu O và đầu tự do A. Các thông số E, G lần lượt là mô đun Young và mô đun trượt của vật liệu. Mặt cắt ngang của dầm có hình dạng chữ nhật và kích thước không thay đổi dọc theo chiều dài của thanh dầm. Do đó, diện tích và momen quán tính chính trung tâm mặt cắt ngang của dầm được xác định lần lượt là

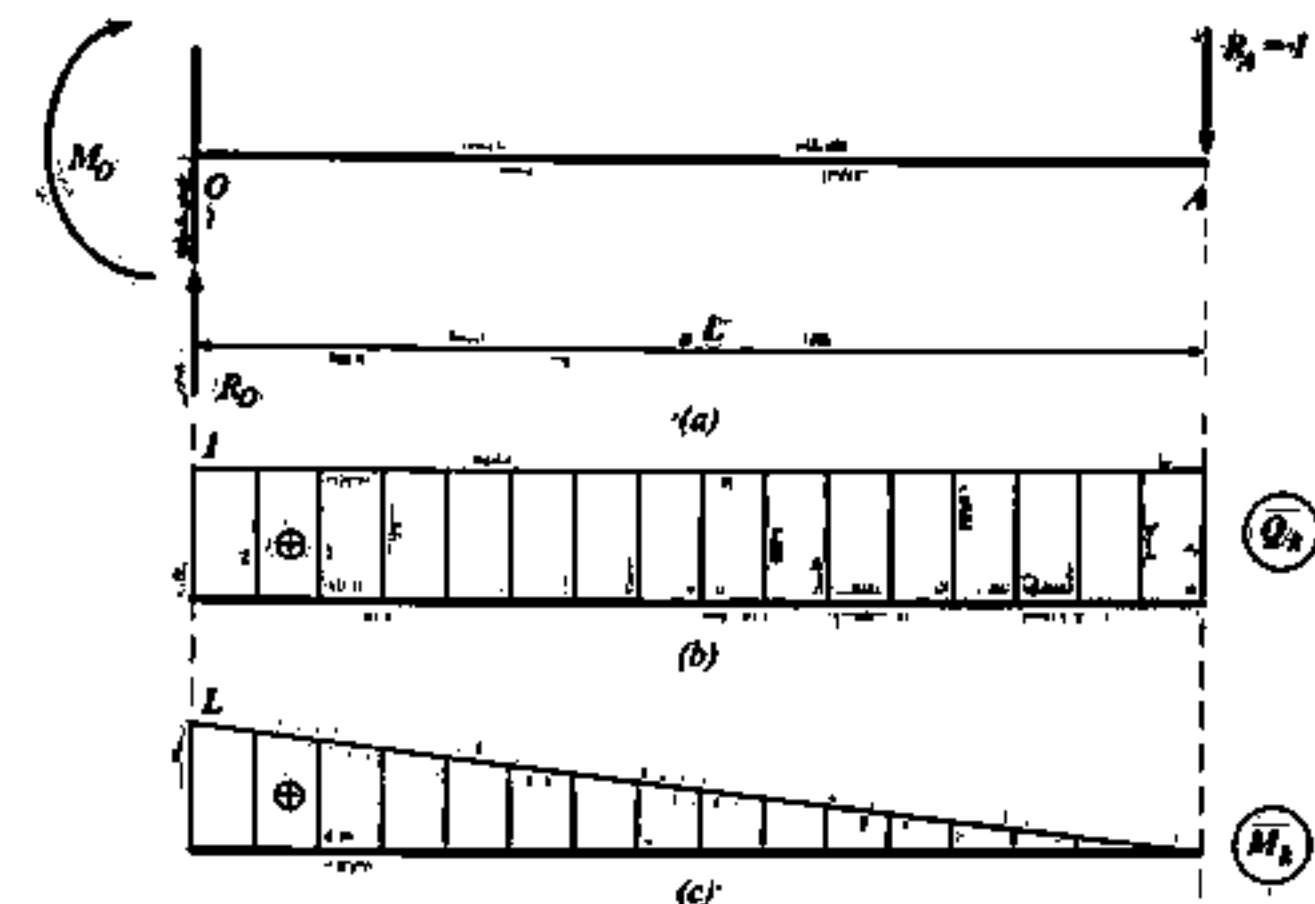
$$A_0 = TW; \text{ và } I_0 = \frac{TW^3}{12}$$



Hình 3: mô hình thanh dầm vi chấp hành



Hình 4: biểu diễn thanh dầm chịu tải trọng cơ bản: (a) Biểu đồ phân bố lực và momen, (b) Biểu đồ lực cắt, (c) Biểu đồ momen uốn



Hình 5: biểu diễn thanh dầm chịu tải trọng tập trung: (a) Biểu đồ phân bố lực và momen, (b) Biểu đồ lực cắt, (c) Biểu đồ momen uốn

Ta giả sử lực phát sinh bởi nguồn nhiệt từ dây nhôm làm thanh dầm biến dạng, tương đương với một lực phân bố đều  $q$  dọc theo chiều dài dầm. Phương pháp Maxwell-Mohr được sử dụng để tính chuyển vị đứng tại đầu tự do A. Các biểu đồ phân tích ở trạng thái cơ bản và trạng thái chịu tải trọng tập trung tại đầu A, lần lượt được thể hiện trên hình 4 và hình 5.

Giả sử rằng, mô đun Young ( $E$ ) và mô đun trượt ( $G$ ) của thanh dầm là các hằng số. Áp dụng phương pháp Maxwell-Mohr, chuyển vị đứng tại đầu A được xác định bao gồm chuyển vị uốn và trượt là:  $y_A = y_1 + y_2$ .

Trong đó:

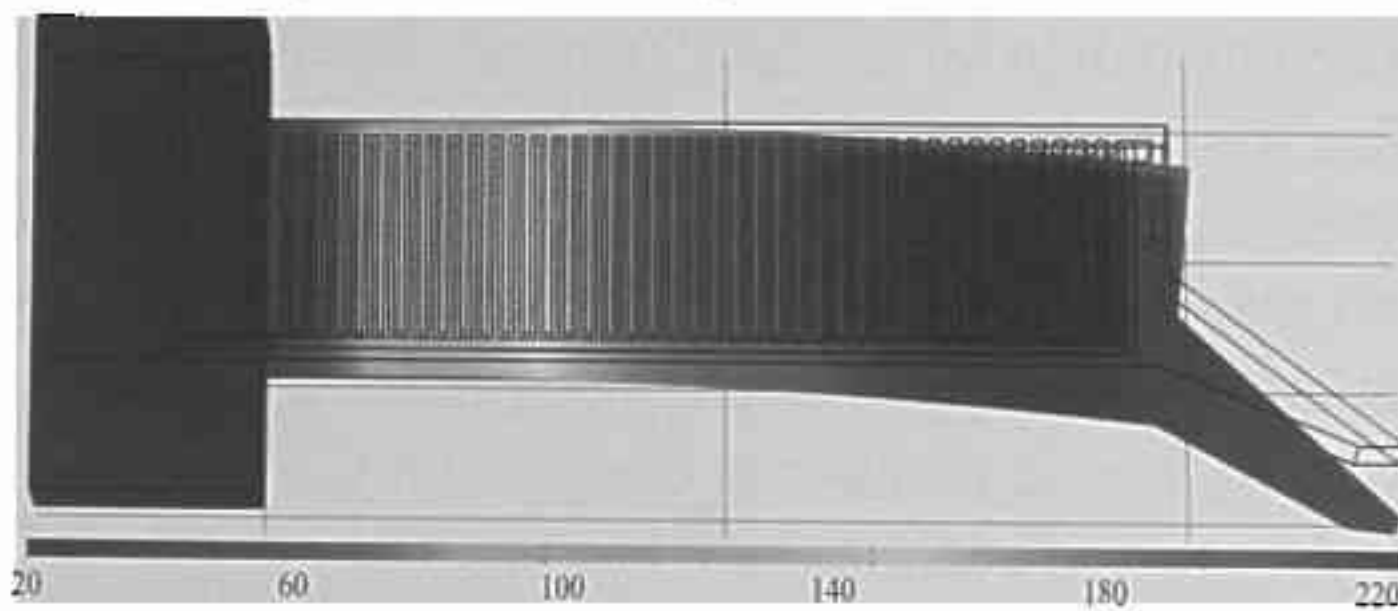
$$y_1 = \int \frac{M_p \overline{M}_k}{EI_0} dx = \frac{qL^4}{8EI_0} \quad (1)$$

$$y_2 = \int \mu \frac{Q_p \overline{Q}_k}{GA_0} dx = \frac{\mu qL^2}{2GA_0}$$

Với  $\mu$  là hệ số kích thước, phụ thuộc vào hình dạng của mặt cắt ngang.

Từ biểu thức trên nhận thấy, chuyển vị tại A sẽ phụ thuộc các thông số kích thước, phụ thuộc vào vật liệu chế tạo và phụ thuộc cả tải trọng phân bố (ở đây chính là điện áp kích thích  $V$ ).

### Mô phỏng sử dụng công cụ COMSOL

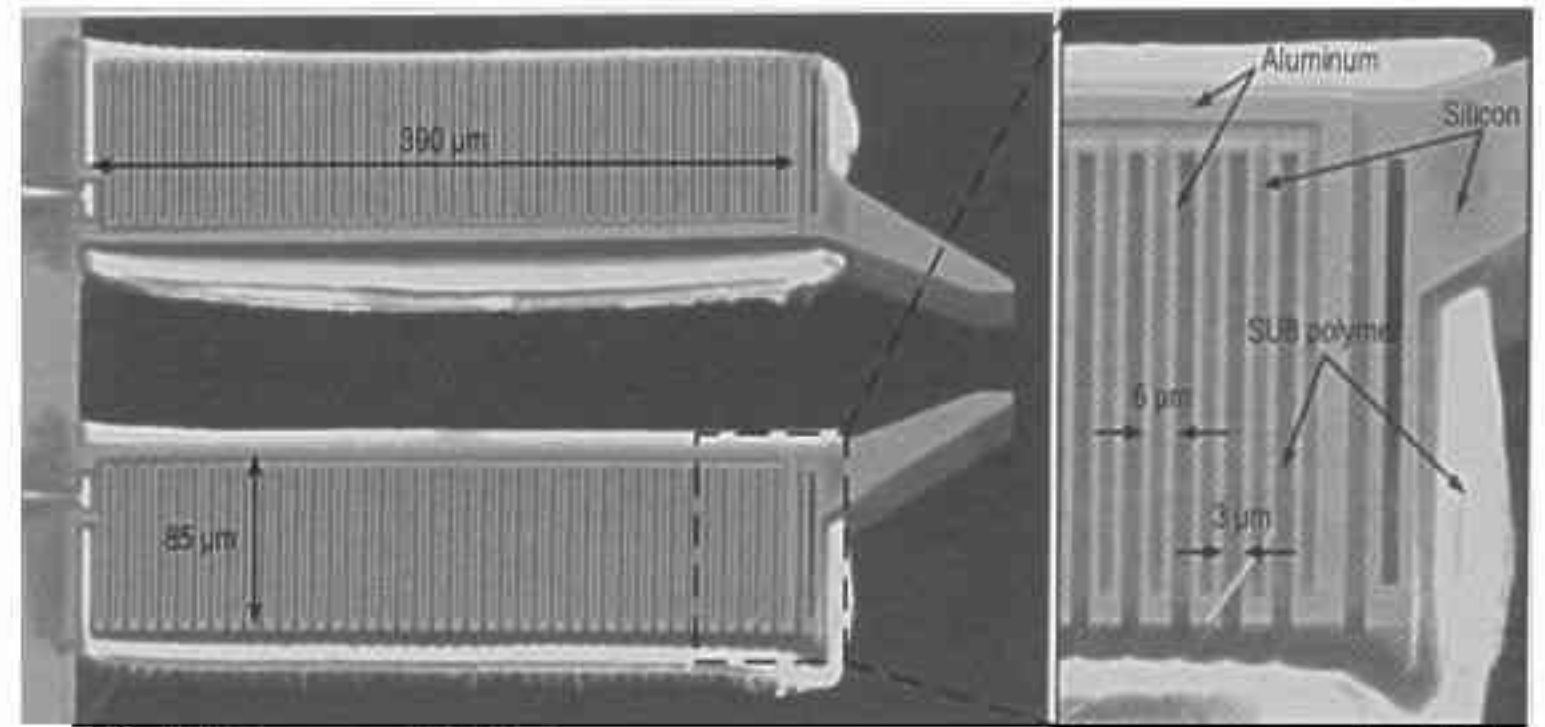


Hình 6: hình ảnh kết quả mô phỏng nhiệt độ và chuyển vị của thanh chấp hành

COMSOL Multiphysics, một công cụ tính toán số dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để mô phỏng hoạt động của vi chấp hành này. Mô hình cấu trúc ba chiều đã được thiết kế để theo dõi chuyển vị và nhiệt độ phân bố trên thanh chấp hành. Hình 6 là một hình ảnh kết quả mô phỏng đã đạt được. Các thông số kích thước của thanh vi chấp hành được chọn như trong bảng 1.

Khi chạy mô phỏng, một điện áp một chiều được kích thích cho hai đầu dây nhôm trong dải từ 0 đến 4 V, theo từng nấc là 0,25 V. Chuyển vị tối đa tại đầu gấp của vi chấp hành lên tới 50  $\mu\text{m}$  và nhiệt độ lớn nhất là 220°C tại điện áp kích thích là 4 V.

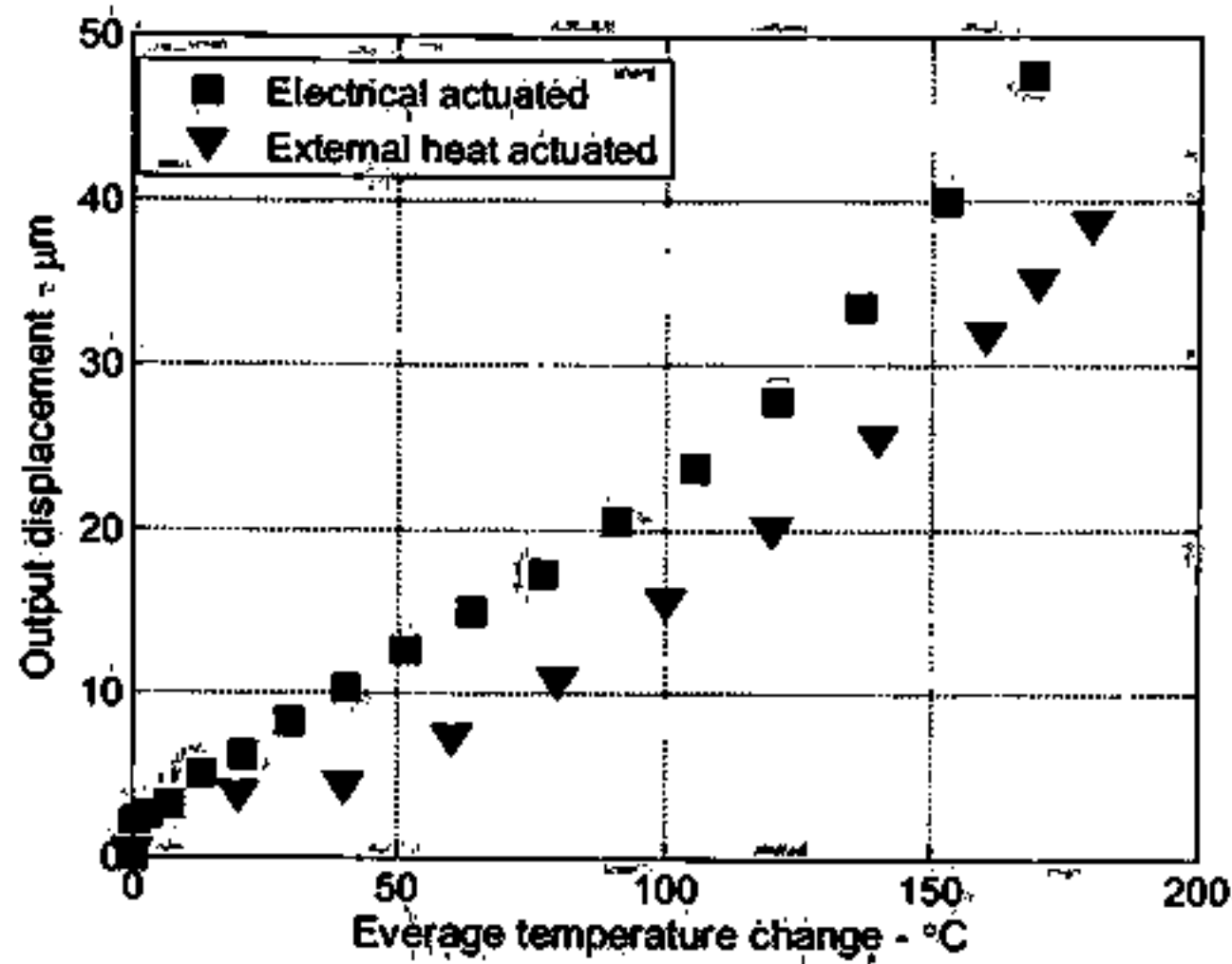
### Kết quả thực nghiệm và thảo luận



Hình 7: hình ảnh chế tạo thực nghiệm vi kẹp nhiệt điện silicon-polymer [20]

Một vi kẹp được thiết kế dựa trên vi chấp hành nhiệt điện silicon-polymer được thể hiện trên hình 7. Vi kẹp được chế tạo ở chế độ thường mở. Thiết kế gồm hai thanh chấp hành giống hệt nhau và đặt đối xứng nhau. Khi kích thích điện áp lên mỗi thanh chấp hành, các thanh này sẽ bị uốn cong, dẫn đến các mỏ kẹp đóng lại. Giả sử rằng, ta kích thích điện áp như nhau trên mỗi thanh chấp hành, thì độ gấp hay dịch chuyển của vi kẹp được tính bằng hai lần chuyển vị trên đầu gấp của mỗi thanh chấp hành.

Trong thực nghiệm, hai phương pháp đã được sử dụng để làm thay đổi nhiệt độ trên vi chấp hành, đó là kích thích trực tiếp bằng nguồn nhiệt bên ngoài hoặc kích thích một điện áp đặt vào hai đầu dây nhôm. Sau đó, xác định chuyển vị của đầu gấp và nhiệt độ trung bình trên vi chấp hành dưới kính hiển vi quang học. Bằng phương pháp sử dụng nguồn nhiệt bên ngoài, từng nấc nhiệt độ 20°C được tác động trực tiếp lên vi chấp hành, trong dải từ 20°C đến 200°C. Độ gấp tối đa đo được là 39  $\mu\text{m}$  với nhiệt độ trung bình khi đó là 180°C. Phương pháp này cho thấy, tiêu hao năng lượng nhiệt nhiều làm cho độ dịch chuyển thấp. Phương pháp kích thích bằng điện áp được sử dụng với dải điện áp từ 0 đến 4 V. Kết quả đo được cho thấy, dịch chuyển tối đa lên tới 48  $\mu\text{m}$ , trong khi nhiệt độ trung bình lớn nhất trên vi chấp hành là 176°C. So sánh giữa hai phương pháp được thể hiện trên hình 8.



Hình 8: dịch chuyển của mô kẹp với nhiệt độ trung bình trên vi chấp hành silicon-polymer bằng các phương pháp thực nghiệm [15]

Bằng phương pháp cơ học truyền thống, chuyển vị đứng tại A tính được là:

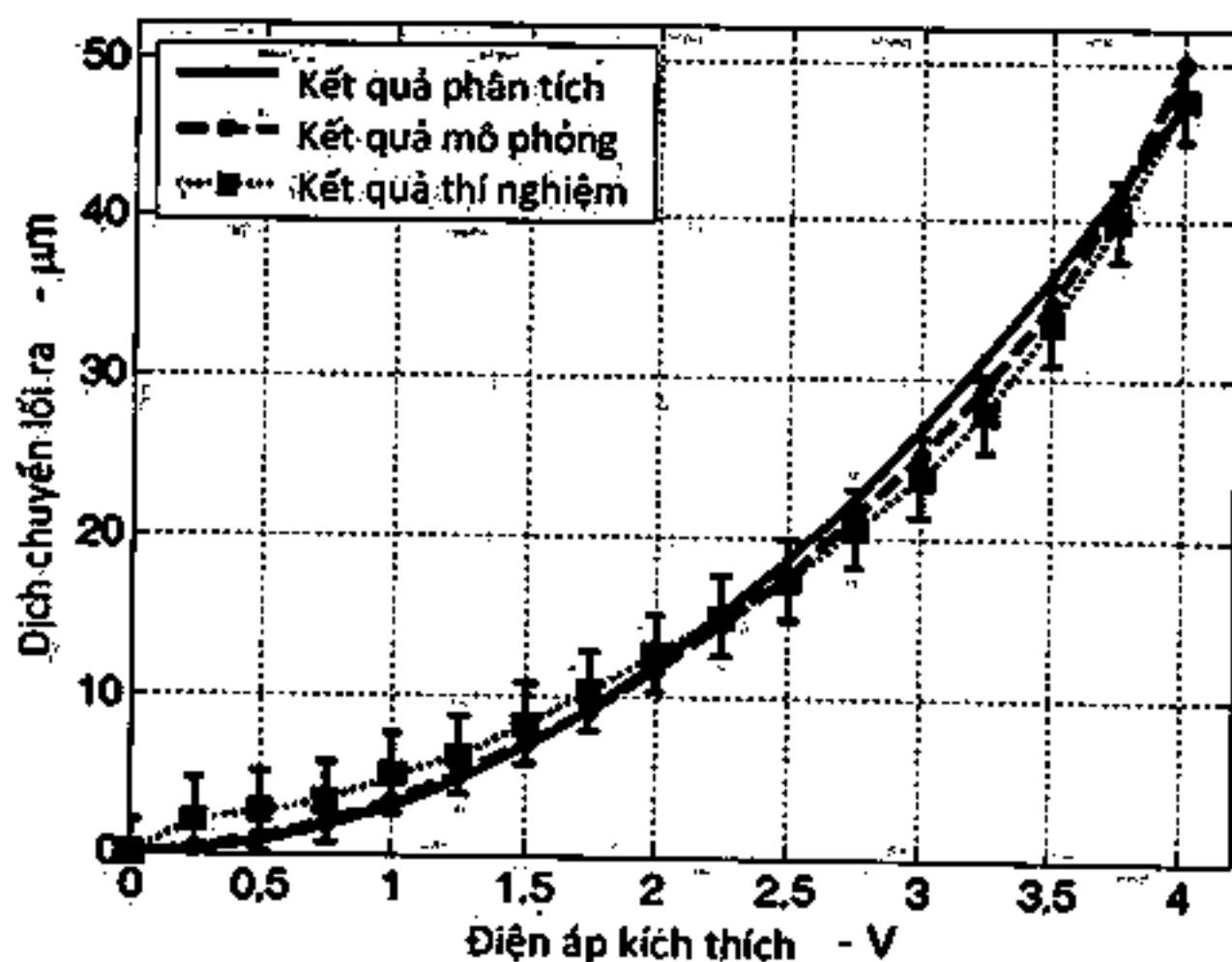
$$\Delta = \frac{qL^4}{8EI_0} + \frac{qL^2}{2GA_0} \quad (2)$$

Đối với mặt cắt ngang là hình chữ nhật, hệ số hình dạng được chọn là:  $\eta = 1,2$

Quan hệ giữa mô đun trượt và mô đun Young được xác định:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

Với  $\nu$  là hệ số Poisson (với đa số vật liệu thì hệ số này xấp xỉ bằng 0,25). Từ hình 2, mô đun Young được chọn là  $E = 225 \text{ GPa}$ , do đó mô đun trượt  $G = 50 \text{ GPa}$ .

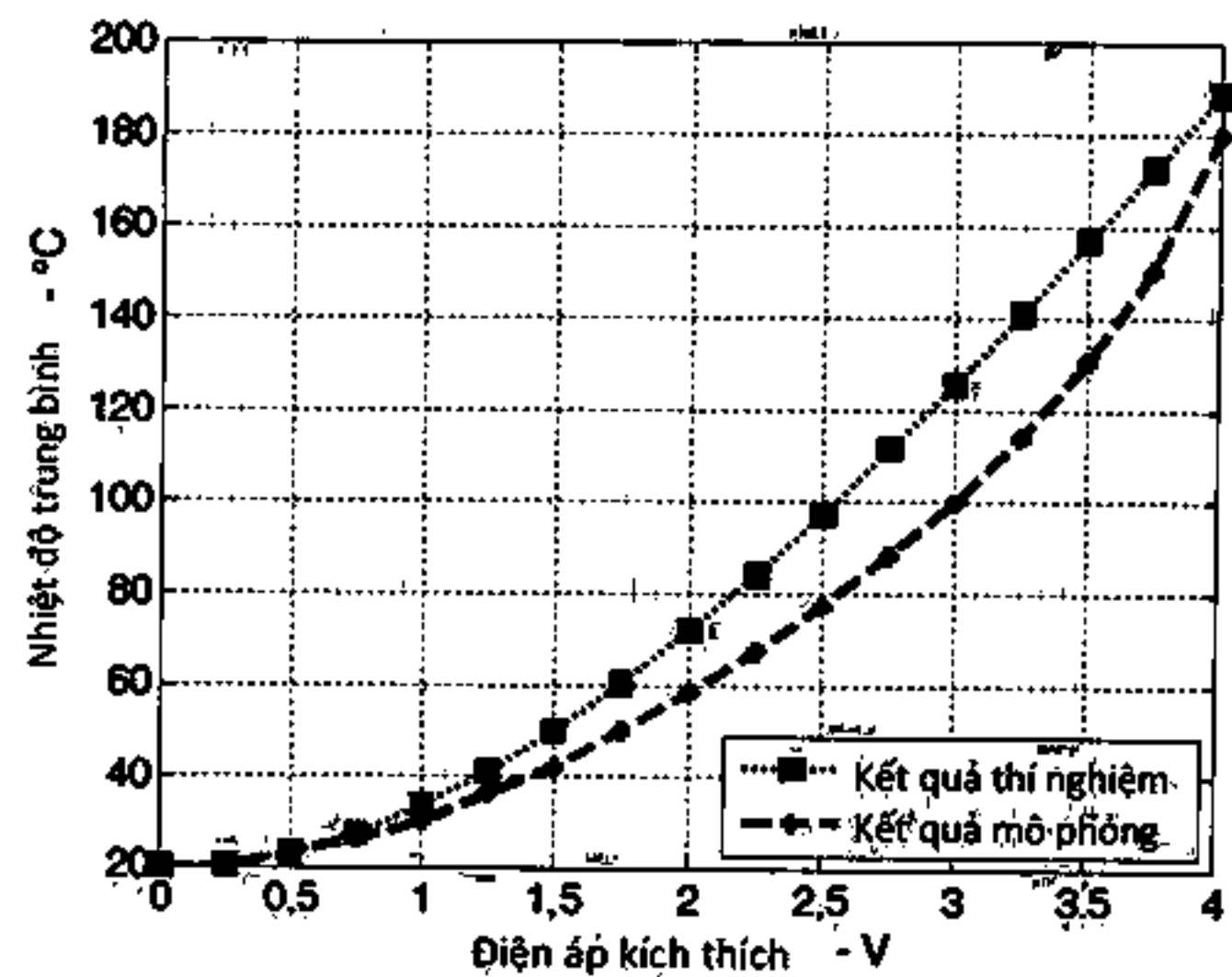


Hình 9: dịch chuyển của vi kẹp theo điện áp kích thích trên mỗi thanh chấp hành

Chiều dài dầm tương đương được chọn như trong bảng 1 với cường độ lực phân bố  $q$  được chọn tỷ lệ với một hàm bậc hai của điện áp tác dụng, bởi công suất tỏa nhiệt trên kim loại tuân theo định luật Jun-Lenxơ

( $Q = V^2 / R$ ). Độ dịch chuyển của vi kẹp với điện áp tác

dụng trên mỗi thanh vi chấp hành điện nhiệt silicon-polymer được thể hiện trên hình 9. Dịch chuyển ở đây được tính bằng tổng chuyển vị của hai đầu gấp khi cả hai thanh chấp hành cùng hoạt động. Dịch chuyển lớn nhất lên tới  $50 \mu\text{m}$  khi đặt điện áp  $4 \text{ V}$  trên bộ chấp hành. Vì vậy, vi kẹp được dự kiến gấp được các đối tượng có đường kính nhỏ hơn  $50 \mu\text{m}$ .



Hình 10: nhiệt độ trung bình vi kẹp theo điện áp kích thích trên mỗi thanh chấp hành

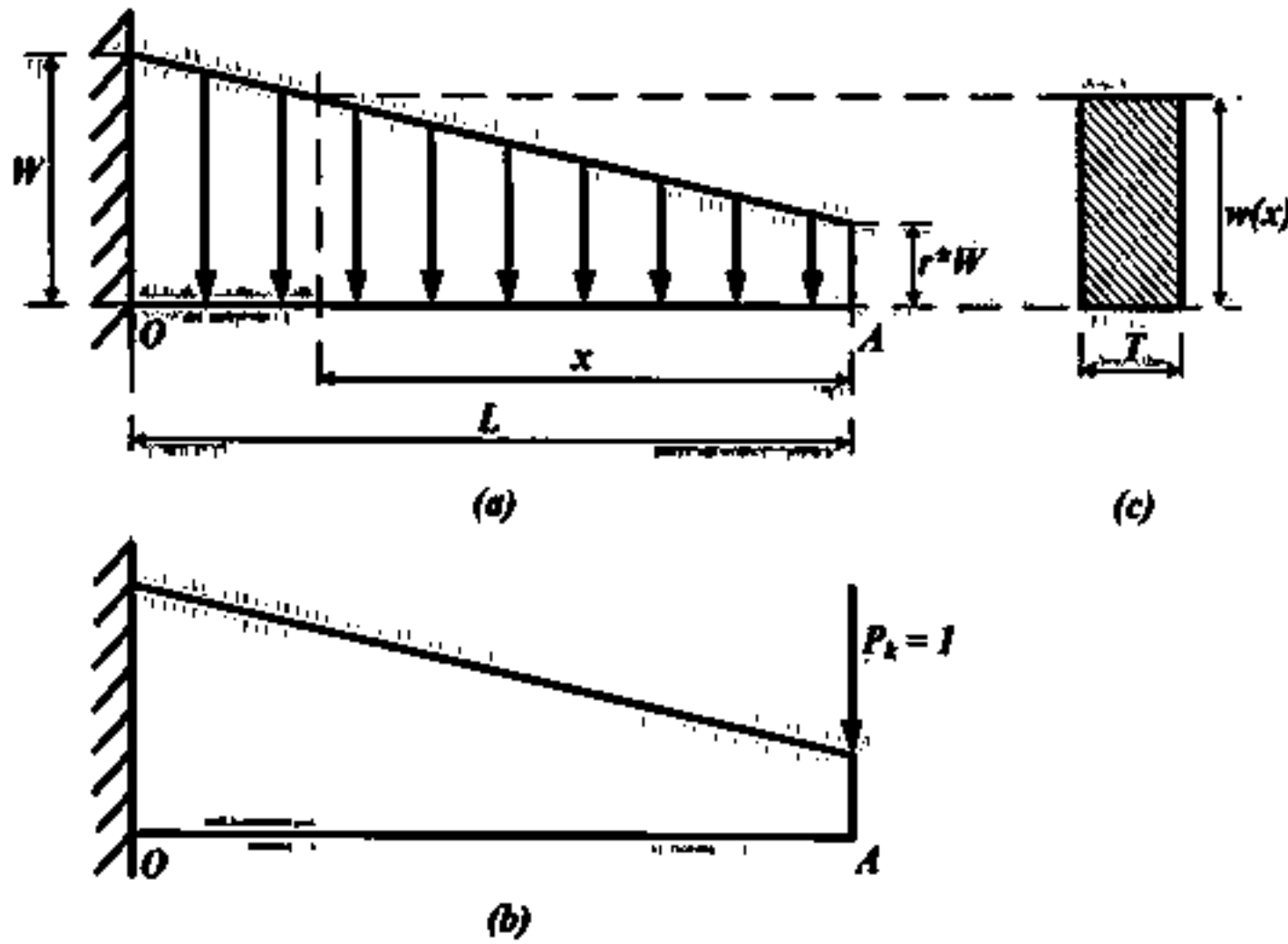
Hình 10 biểu diễn nhiệt độ hoạt động trung bình trên vi kẹp theo điện áp tác dụng trên mỗi thanh chấp hành. Như trên hình, nhiệt độ trung bình tối đa là khoảng  $190^\circ\text{C}$  khi kích thích điện áp  $4 \text{ V}$ . So sánh các kết quả tính toán bằng lý thuyết cơ học, kết quả mô phỏng và kết quả đo của chế tạo thực nghiệm được biểu diễn ở các hình trên là khá tương đồng nhau. Các đồ thị đều có dạng xấp xỉ của một hàm bậc hai. Điều đó cho thấy, phương pháp phân tích và mô hình hóa mô phỏng là khá chính xác và có thể sử dụng tiếp trên các mô hình thiết kế trong phần tiếp theo.

### Cải tiến cấu trúc cơ học vi chấp hành

#### Phân tích cơ học

Theo như thiết kế ban đầu, chiều rộng vi chấp hành là không đổi và mặt cắt ngang của thanh dầm chấp hành là hình chữ nhật. Như vậy, chiều cao mặt cắt ngang là không đổi trên toàn bộ vị trí dọc theo thanh

dầm. Xét thanh dầm có chiều rộng thay đổi tuyến tính dọc theo chiều dài (xem hình 11a). Giả thiết cơ hệ chịu tác dụng của một lực phân bố trọng mặt phẳng đứng tương đương một lực phân bố đều với cường độ không đổi ( $q$ ) trên toàn bộ chiều dài và coi môđun đàn hồi Young ( $E$ ), môđun trượt ( $G$ ) của thanh dầm là các hằng số. Sử dụng các lý thuyết cơ học cổ điển để tính chuyển vị tại đầu A theo phương thẳng đứng. Hình 11b biểu diễn trạng thái thanh dầm chịu tải trọng tập trung theo phương thẳng đứng tại vị trí tính chuyển vị A.



Hình 11: thanh dầm với độ rộng thay đổi dọc theo chiều dài:  
(a) Cơ hệ chịu tải trọng cơ bản, (b) Cơ hệ chịu tải trọng tập trung tại đầu tự do A,  
(c) Tiết diện mặt cắt ngang thanh dầm tại vị trí x

Xét thanh dầm có đầu cố định tại O, đầu tự do tại A và tiết diện là hình chữ nhật, với chiều dày  $T$  không đổi và chiều rộng thay đổi tuyến tính từ O tới A. Ta biết rằng, diện tích và momen quán tính chính trung tâm mặt cắt ngang tại ngàm O lần lượt là  $A_0, I_0$ .

Nếu chọn gốc tọa độ tại đầu tự do A và trục  $x$  hướng từ phải sang trái thì chiều cao mặt cắt ngang tại vị trí  $x$ :

$$w_{(x)} = W \left[ (1-r) \frac{x}{L} + r \right] \quad (4)$$

Trong đó,  $r$  là tỷ số chiều rộng (tỷ số chiều rộng thanh dầm giữa hai đầu A và O).

Khi đó, diện tích và momen quán tính chính trung tâm mặt cắt ngang tại vị trí  $x$  tương ứng là:

$$A_{(x)} = Tw_{(x)} = A_0 \left[ (1-r) \frac{x}{L} + r \right] \quad (5)$$

$$I_{(x)} = \frac{Tw_{(x)}^3}{12} = I_0 \left[ (1-r) \frac{x}{L} + r \right]^3$$

Cường độ lực tại vị trí  $x$ :

$$\frac{2q}{(1+r)} \left[ (1-r) \frac{x}{L} + r \right] \quad (6)$$

Biểu thức mômen uốn và lực cắt tại trạng thái chịu tải trọng cơ bản:

$$M_p = -q \frac{(1-r)x^3 + 3Lrx^2}{3L(1+r)} \quad (7)$$

$$Q_p = q \frac{(1-r)x^2 + 2Lrx}{L(1+r)}$$

Biểu thức mômen uốn và lực cắt tại trạng thái chịu tải trọng tập trung:

$$\overline{M}_k = -x \quad (8)$$

$$\overline{Q}_k = 1$$

Áp dụng công thức Maxwell-Mohr, tính chuyển vị đứng tại A lần lượt theo biến dạng uốn và biến dạng trượt, ta được:

$$y_1 = \sum \int \frac{M_p \overline{M}_k}{EI_{(x)}} dx = \frac{qL^2}{EI_0} \int_0^L \frac{(1-r)x^4 + 3Lrx^3}{3(1+r)[(1-r)x + Lr]^3} dx \quad (9)$$

$$y_2 = \sum \int \mu \frac{Q_p \overline{Q}_k}{GA_{(x)}} dx = \frac{\mu q}{GA_0} \int_0^L \frac{(1-r)x^2 + 2Lrx}{(1+r)[(1-r)x + Lr]^3} dx$$

Vậy chuyển vị đứng tổng cộng tại A là:

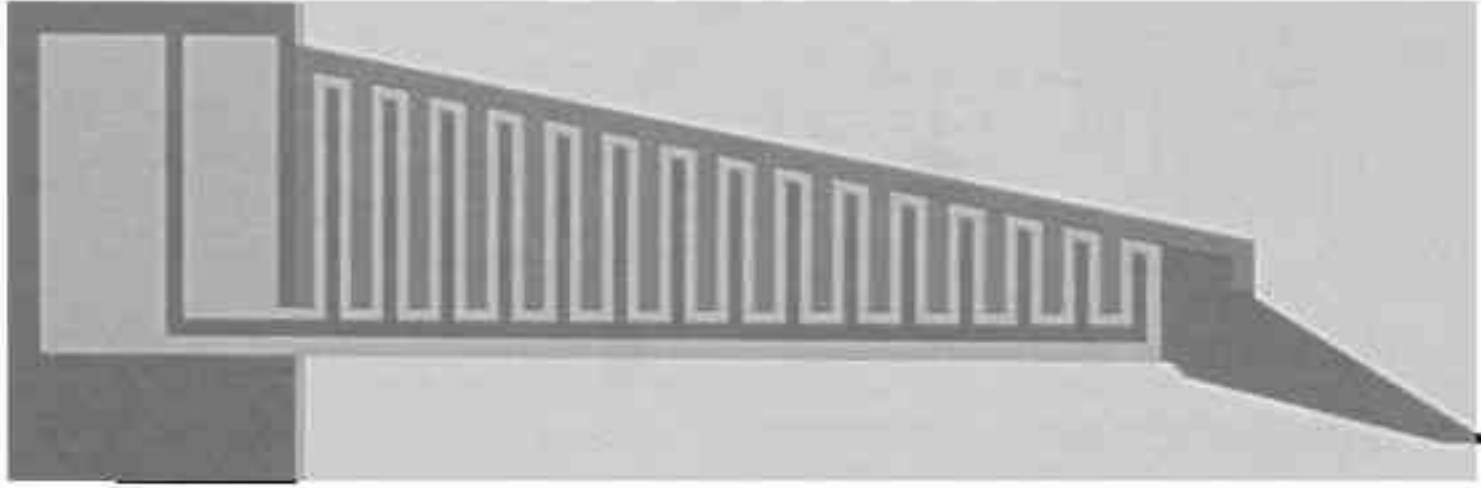
$$\Delta = y_1 + y_2 = \frac{qL^2}{EI_0} \int_0^L \frac{(1-r)x^4 + 3Lrx^3}{3(1+r)[(1-r)x + Lr]^3} dx + \frac{\mu q}{GA_0} \int_0^L \frac{(1-r)x^2 + 2Lrx}{(1+r)[(1-r)x + Lr]^3} dx \quad (10)$$

Chọn chuyển vị tại A khi  $r = 1$  làm chuẩn. Nghĩa là, độ rộng thanh chấp hành không đổi, chuyển vị khi đó như cho trong biểu thức (2).

### Mô phỏng

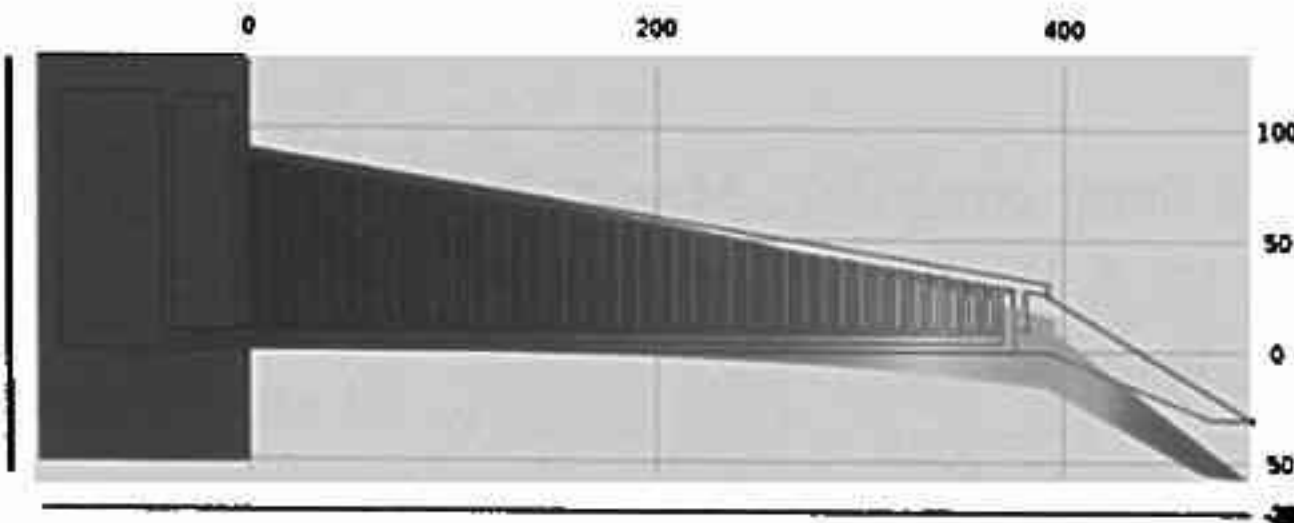
Như chúng ta đã biết, với cấu trúc vi chấp hành đã chế tạo, kết quả mô phỏng có sự phù hợp tốt với kết quả chế tạo thực nghiệm. Vì vậy trong phần này, mô phỏng hoạt động của cấu trúc cải tiến bằng phần mềm COMSOL Multiphysics tiếp tục được sử dụng. Với yêu cầu là các thông số vật lý của vật liệu và môi trường xung quanh đã thiết lập trong quá trình chạy

các mô phỏng cấu trúc thường được giữ nguyên.



Hình 12: mô hình vi chấp hành có độ rộng thay đổi dọc theo chiều dài

Hình 12 thể hiện một cấu trúc vi chấp hành có chiều rộng thay đổi dọc theo chiều dài thanh chấp hành. Các thông số kích thước về chiều dài và độ dày của vi chấp hành, các kích thước của đầu gấp, độ rộng, dày của dây nhôm, polymer, silicon vẫn được lấy theo bảng 1. Một hình ảnh kết quả mô phỏng chuyển vị và nhiệt độ trên cấu trúc cải tiến của thanh chấp hành thể hiện trên hình 13.



Hình 13: kết quả mô phỏng trên một cấu trúc cải tiến của vi chấp hành

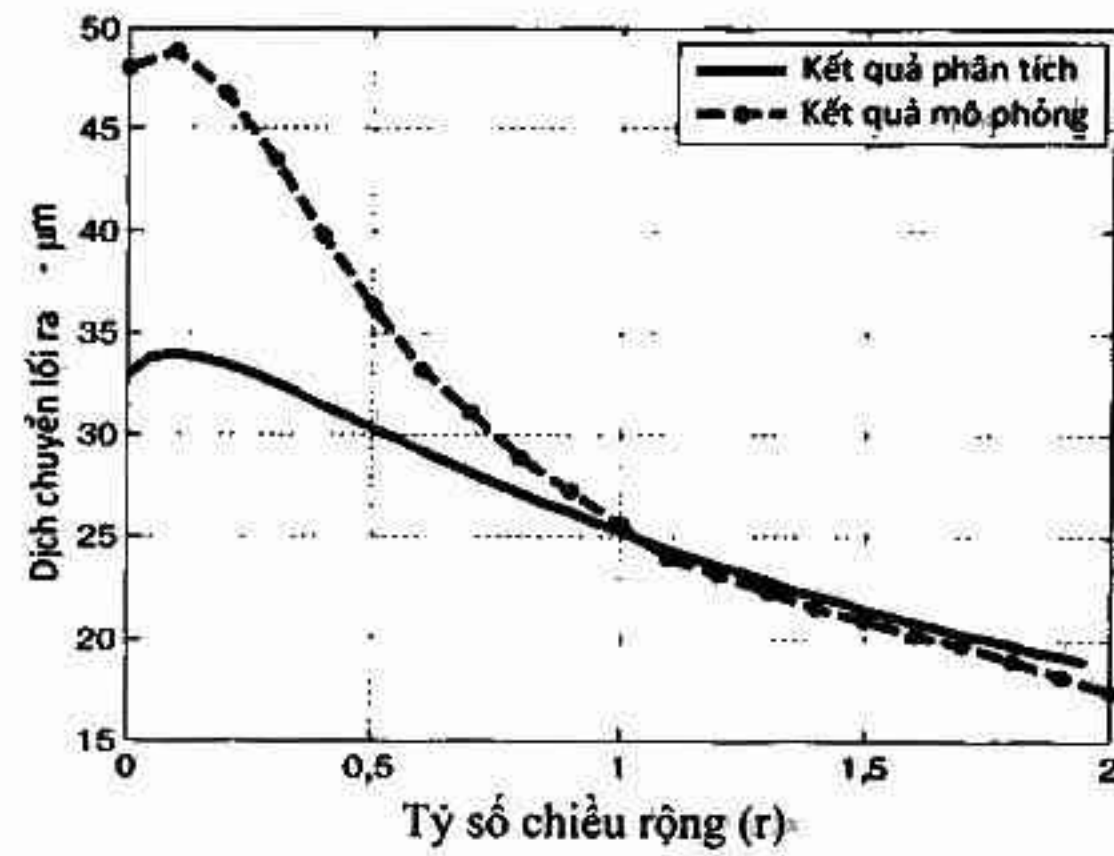
Chạy một số mô phỏng về cấu trúc đưa ra ứng với mỗi thay đổi về chiều rộng thanh chấp hành, với tỷ số chiều rộng  $r$  thay đổi theo từng nấc 0,1 từ 0 đến 2, cùng với thay đổi giá trị của  $r$  là điều chỉnh giá trị điện áp tác dụng, sao cho nhiệt độ trung bình trên thanh chấp hành giữ xấp xỉ  $100^{\circ}\text{C}$ .

Áp dụng kết quả phân tích lý thuyết, tương ứng với điện áp tác dụng 3 V và nhiệt độ trung bình trên vi chấp hành là  $100^{\circ}\text{C}$ , ta chọn  $q = 1,25 \times 10^3 \text{ N/m}^2$  khi  $r = 1$ . Khi

đó, quan hệ giữa độ dịch chuyển của vi chấp hành với tỷ số  $r$  được thể hiện trên hình 14.

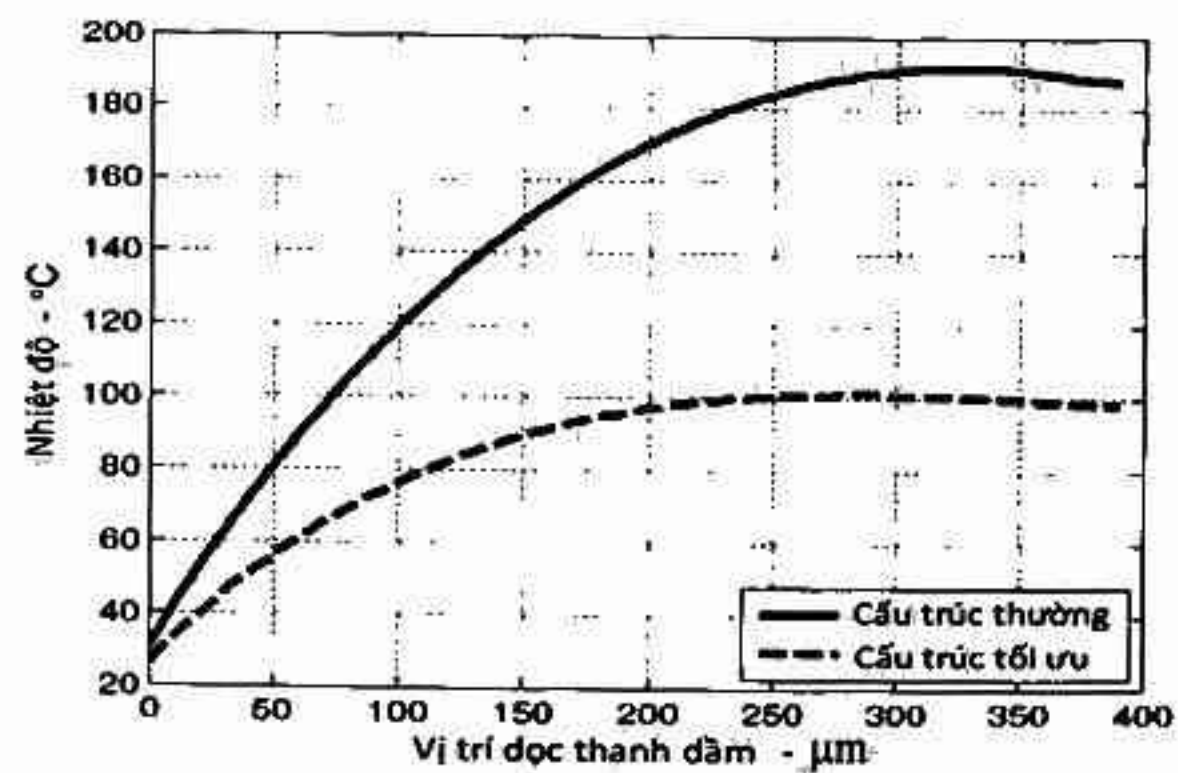
Như vậy, đường cong kết quả dựa trên mô hình lý thuyết và mô hình mô phỏng là có dạng tương tự nhau. Có sự khác biệt giữa hai kết quả (khi  $r < 1$ ) được cho bởi một số nguyên nhân. Thứ nhất, trong mô hình tính toán lý thuyết, chúng ta bỏ qua ảnh hưởng bởi một vài thông số kích thước và vật liệu. Thứ hai, các thiết kế khi  $r < 1$ , hiệu quả giam giữ polymer giữa hai tấm cứng không còn tác dụng trên một phần đầu tự do của kẹp,

dẫn đến tính toán môđun đàn hồi Young và hệ số giãn nở nhiệt không còn chính xác. Đặc biệt, một số tính chất nhiệt của vi kẹp sẽ phụ thuộc vào silicon nhiều hơn so với polymer. Bởi vì hệ số dẫn nhiệt của silicon lớn, nên độ uốn của dầm sẽ tăng cao khi  $r < 1$ . Tuy nhiên, ta không xét đến trường hợp đồng thời tỷ số  $r < 1$  và các tỷ số kích thước khác vẫn thỏa mãn hiệu quả giam giữ polymer, vì như vậy kích thước của vi kẹp sẽ rất lớn, không phù hợp với bài toán MEMS.



Hình 14: quan hệ giữa dịch chuyển của vi kẹp với tỷ số chiều rộng ( $r$ )

Nói chung, cả mô hình lý thuyết và mô hình mô phỏng đều cho kết quả tốt nhất khi  $r = 0,1$ . Nếu như ở cấu trúc thông thường trước đây ( $r = 1$ ), để vi kẹp dịch chuyển  $40 \mu\text{m}$ , thì mỗi thanh chấp hành cần có một điện áp tác dụng là trên  $3,75 \text{ V}$ . Khi đó, nhiệt độ cao nhất trên thanh có thể lên tới gần  $200^{\circ}\text{C}$  và nhiệt độ trung bình trên thanh khoảng  $150^{\circ}\text{C}$ . Cũng với dịch chuyển  $40 \mu\text{m}$ , đối với cấu trúc mới khi  $r = 0,1$  thì mỗi thanh chấp hành chỉ cần một điện áp tác dụng là  $2 \text{ V}$ , nhiệt độ hoạt động tối đa còn khoảng  $100^{\circ}\text{C}$  và nhiệt độ hoạt động trung bình khoảng  $85^{\circ}\text{C}$ . Điều đó có nghĩa, công suất và nhiệt độ đều giảm đi xấp xỉ một nửa. Nhận xét trên được rút ra khi so sánh phân bố nhiệt độ giữa hai thiết kế cấu trúc thường và cấu trúc tối ưu trên hình 15.



Hình 15: phân bố nhiệt độ trên đường trung bình dọc thanh chấp hành của các vi kẹp tương ứng với các tỷ số  $r = 1$  và  $r = 0,1$  khi đều cho kết quả dịch chuyển là  $40 \mu\text{m}$

Cải tiến mới về cấu trúc cơ học của vi chấp hành là chiều rộng thay đổi tuyến tính dọc theo chiều dài của thanh chấp hành. Các kết quả phân tích cơ học mô hình lý thuyết và mô phỏng mô hình thiết kế đã được đưa ra. Nói chung, khi tỷ số chiều rộng  $r < 1$  thì chuyển vị tại đầu gấp là cao hơn so với cấu trúc thường khi  $r = 1$ . Giá trị của  $r$  xấp xỉ bằng 0,1 được đề xuất lựa chọn là tối ưu. Như vậy, cấu trúc tối ưu không chỉ tăng chuyển vị tại đầu gấp, mà còn giảm điện áp tác dụng và giảm kích thước vi chấp hành.

## Kết luận

Bài báo đề cập đến vi chấp hành nhiệt điện silicon-polymer và các phương pháp khảo sát dựa trên lý thuyết cơ học cổ điển, công cụ mô hình hóa phần tử hữu hạn COMSOL Multiphysics. Phân tích các kết quả so với một số chế tạo thực nghiệm cho thấy các phương pháp sử dụng là thích hợp. Do đó, các phương pháp này tiếp tục được sử dụng xem xét cải tiến mới về cấu trúc cơ học.

Trong cấu trúc mới này, chiều rộng thanh dần dần thay đổi tuyến tính theo chiều dài thanh. Ở đây, tỷ số chiều rộng  $r$  được quan tâm, là tỷ số chiều rộng tại đầu tự do và đầu cố định thanh dần. Các kết quả có được là rất tích cực. Tóm lại, khi giảm dần chiều rộng thanh xếp chồng các ngăn silicon-polymer về phía đầu gấp (tức là  $r < 1$ ) sẽ cho hiệu quả cao hơn về độ chuyển vị và cấu trúc khi  $r = 0,1$  được chỉ ra là tốt nhất. Điện áp tác dụng và nhiệt độ hoạt động đều giảm xấp xỉ 50% khi sử dụng cấu trúc tối ưu, được so sánh với cấu trúc thường  $r = 1$  khi cho cùng một chuyển vị là 40  $\mu\text{m}$ . Cấu trúc tối ưu không chỉ tăng dịch chuyển của vi kẹp, mà còn giảm điện áp tác dụng, đồng nghĩa với giảm năng lượng tiêu thụ và giảm kích thước chế tạo, đồng nghĩa với tiêu tốn vật liệu cũng giảm.

Vi chấp hành nhiệt điện silicon-polymer tiếp tục được hứa hẹn là một đề tài nghiên cứu hấp dẫn. Các thông số của vi chấp hành cần tiếp tục được tối ưu, nhằm tăng lực dịch chuyển, giảm nhiệt độ hoạt động và nâng cao độ chính xác, tính ổn định của nó. Một số định hướng nghiên cứu như cải tiến cấu trúc cơ học, phân bố truyền nhiệt, cách ly nhiệt với môi trường, tích hợp điều khiển phản hồi... cần được nghiên cứu đầy đủ trong hệ thống vi chấp hành và đáp ứng được yêu cầu cao nhất như trong ứng dụng thao tác với tế bào sống.

## Tài liệu tham khảo

- [1] T James, M.S Mannoorm, D.V Ivanov (2008), "BioMEMS-Advancing the Frontiers of Medicine", *Sensors. J*, 8, pp.6077-6107.
- [2] J Cecil, D Vasquez, D Powell (2005), "A review of gripping and manipulation techniques for micro-assembly applications", *Int. J. Prod. Res.*, 43, pp.819-828.
- [3] F Beyeler, A Neild, S Oberti, D.J Bell, Y Sun, J Dual, B.J Nelson (2007), "Monolithically fabricated microactuator with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultrasonic field", *J. Microelectromech. Syst.*, 16, pp.7-15.
- [4] Rob Legtenberg, A.W Groeneveld, M Elwenspoek (1996), "Comb-drive actuators for large displacements", *J. Micromech. Microeng.*, 6, pp.320-329.
- [5] Y Sun, D Piyabongkarn, A Sezen, B.J Nelson, R Rajamani (2002), "A high-aspect-ratio two-axis electrostatic microactuator with extended travel range", *Sensors and Actuators A: Phys.*, 102, pp.49-60.
- [6] Chihchung Chen, Chengkuo Lee (2004), "Design and modeling for comb drive actuator with enlarged static displacement", *Sensors and Actuators A: Phys.*, 115, pp.530-539.
- [7] R Salim, H Wurmus, A Harnisch, D Hulsenberg (1997), "Microactuators created in microstructure glass", *Microsystem Technologies*, 4, pp.32-34.
- [8] R.B Evans, J.S Griesbach, W.C Messner (1999), "Piezoelectric microactuator for dual stage control", *J. IEEE Transactions on Magnetics*, 35, pp.977-982.
- [9] D.J Sadler, T.M Liakopoulos, C.H Ahn (2000), "A universal electromagnetic microactuator using magnetic interconnection concepts", *Microelectromech. Syst.*, 9, pp.460-468.
- [10] D.H Kim, M.G Lee, B Kim, Y Sun (2005), "A superelastic alloy microgripper with embedded electromagnetic actuators and piezoelectric force sensors: A numerical and experimental study", *Smart Mater. Struct.*, 14, pp.1265-1272.
- [11] D Yan, A Khajepour, R Mansour (2004), "Modeling of two-hot-arm horizontal thermal actuator", *J. Micromech. Microeng.*, 13, pp.312-322.
- [12] N Chronis, L.P Lee (2005), "Electrothermally activated SU-8 microactuator for single cell manipulation in solution", *J. Microelectromech. Syst.*, 14, pp.857-863.
- [13] C.J Kim, A.P Pisanò, R.S Muller (1992), "Silicon-processed overhanging microgripper", *J. Microelectromech. Syst.*, 1, pp.31-36.
- [14] J.W.L Zhou, H.Y Chan, T.K.H To, K.W.C Lai, W.J Li (2004), "Polymer MEMS actuators for underwater micromanipulation", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 9, pp.334-342.
- [15] T Chu Duc, G.K Lau, J.F Creemer, P.M Sarro (2008), "Electrothermal microactuator with large jaws displacement and integrated force sensors", *J. Microelectromech. Syst.*, 17, pp.1546-1555.
- [16] T Chu Duc, G.K Lau, P.M Sarro (2007), "Polymer constraint effect for electrothermal bimorph microactuators", *Appl. Phys. Lett.*, 91, pp.101902-101903.
- [17] A.N Gent, E.A Meinecke (1970), "Compression, bending and shear of bonded rubber blocks", *Polym. Eng. Sci.*, 10, pp.48-53.
- [18] G.K Lau, J.F.L Goosen, F van Keulen, T Chu Duc, P.M Sarro (2007), "Powerful polymeric thermal microactuator with embedded silicon microstructure", *Appl. Phys. Lett.*, 90, pp.214103-214113.
- [19] P Phan Huu, V Nguyen Ngoc, N Nguyen Minh, H Vu Ngoc, T Chu Duc (2012), "Simulation and optimization of a silicon-polymer bimorph microgripper", *Vietnam J. Mech.*, 34, pp.247-259.
- [20] F Krecinic, T Chu Duc, G.K Lau, P.M Sarro (2007), "Simulation and measurement of a comb-structure silicon-polymer thermally actuated microgripper", *18th MicroMechanics Europe Workshop*, pp.215-218.