



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Evaluating the power generation capability of devices utilizing piezoelectric materials and the resonance problem



Luan Cong Doan*, Giap Van Doan, Thang Hong Thi Le

Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:
Received 01st Nov. 2023
Revised 21st Jan. 2024
Accepted 29th Jan. 2024

Keywords:
Cantilever beam,
Energy harvesting,
Piezoelectric materials,
Piezoelectric,
Resonance.

ABSTRACT

This paper presents a sophisticated device leveraging piezoelectric materials to seamlessly convert mechanical energy into electricity. This innovation is especially pertinent in meeting the escalating power requirements of smart devices in the dynamic of Industry 4.0. Piezoelectric materials capitalize on the piezoelectric effect, manifesting electricity generation as an external force that induces polarization within the crystal lattice, leading to the accumulation of oppositely charged elements. These specialized materials are affixed to a cantilever beam, fostering consistent oscillations that facilitate a continuous charge flow and, consequently, the generation of a reliable electric current. The oscillations of the cantilever beam embody a fusion of diverse mode shapes, each characterized by distinctive natural frequencies. The resonance phenomenon comes into play when external forces synchronize with these frequencies, thereby inducing maximum stress on the material block. Simultaneously, the voltage produced in the piezoelectric material aligns proportionally with the internal stress, resulting in an augmented power output as the amplitude of external forces increases. The efficacy of the device in power generation is contingent upon two pivotal factors: the resonance frequency of external forces, determined by resonance conditions, and the maximum amplitude, regulated by durability considerations. Although the electrical output may not be voluminous, the device's unique advantages arising from the inherent properties of the materials and the piezoelectric effect underscore its substantial potential in addressing the intricacies of practical energy challenges.

Copyright © 2024 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

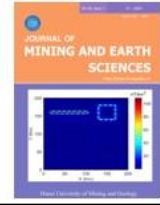
E - mail: doancongluan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(1).04



Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



Đánh giá khả năng phát điện của thiết bị sử dụng vật liệu áp điện và bài toán cộng hưởng

Đoàn Công Luận*, Đoàn Văn Giáp, Lê Thị Hồng Thăng

Đại học Mỏ - Địa chất Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 01/11/2023

Sửa xong 21/01/2024

Chấp nhận đăng 29/01/2024

Từ khóa:

Cộng hưởng dao động,

Dầm công-xôn,

Hiệu ứng áp điện,

Gốm áp điện,

Thu hoạch năng lượng.

TÓM TẮT

Nghiên cứu trong bài báo này mô tả một thiết bị phát điện sử dụng vật liệu áp điện để biến đổi năng lượng cơ học thành điện năng nhằm đáp ứng nhu cầu cung cấp năng lượng điện cho các thiết bị thông minh đang ngày càng phổ biến trong thời đại công nghiệp 4.0. Vật liệu áp điện sử dụng hiệu ứng áp điện để phát điện, khi có ngoại lực tác động sẽ tạo cơ chế phân cực trong mạng tinh thể, từ đó tạo ra các phần tử tích điện trái dấu trong khối vật chất. Khối vật liệu áp điện sẽ được gắn trên kết cấu cơ khí dạng dầm công-xôn để kích thích dao động, tạo hiệu ứng kéo nén liên tục trên khối vật liệu, từ đó tạo ra được một dòng chuyển động liên tục của các điện tích tạo ra được dòng điện. Dao động của dầm công-xôn là tổ hợp của các dạng dao động (mode shapes) với các tần số dao động riêng khác nhau. Khi ngoại lực tác động có cùng tần số với các tần số riêng này sẽ tạo được hiệu ứng cộng hưởng, tạo ra được ứng suất lớn nhất trên khối vật liệu. Đồng thời, điện áp tạo ra trên khối vật liệu tỷ lệ thuận với ứng suất bên trong khối, do đó biên độ của ngoại lực càng lớn thì công suất phát điện càng cao. Từ đó, khả năng phát điện tối đa của thiết bị sẽ phụ thuộc vào hai yếu tố là tần số dao động của ngoại lực xác định theo điều kiện cộng hưởng và biên độ tối đa xác định theo điều kiện bền. Tuy công suất của nguồn điện được tạo ra từ thiết bị không lớn, nhưng những ưu điểm đặc biệt của vật liệu và hiệu ứng áp điện chứng tỏ tiềm năng rất lớn của thiết bị trong giải quyết các vấn đề năng lượng thực tế.

© 2024 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: doancongluan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2024.65(1).04

1. Mở đầu

Cách mạng công nghiệp 4.0, với mục tiêu số hóa, tự động hóa và vạn vật kết nối, đòi hỏi việc sử dụng số lượng lớn các máy và thiết bị thông minh, có khả năng linh hoạt giám sát, vận hành và kết nối các khâu, các bước trong các quy trình sản xuất cũng như trong các lĩnh vực kinh tế xã hội khác (Schwab, 2017). Thiết bị thông minh về cơ bản là các thiết bị cơ điện tử được sản xuất dựa trên trí tuệ nhân tạo có khả năng kết nối với các thiết bị tương tự thông qua mạng Wifi, 4G,... để tạo nên một mạng lưới thiết bị giám sát, điều khiển. Xét trên phạm vi năng lượng, tất cả các thiết bị thông minh này đều thuộc nhóm tiêu thụ năng lượng, cần năng lượng điện để vận hành. Do vậy bài toán cung cấp điện cho các máy và thiết bị thông minh ngày càng trở nên cấp thiết, đặc biệt trong bối cảnh số lượng và chủng loại của thiết bị cơ điện tử tiên tiến được phát minh, phát triển và ứng dụng ngày càng nhiều.

Hiện nay các thiết bị thông minh cỡ nhỏ như camera, cảm biến, công tắc thông minh,... được cấp điện thông qua một số phương pháp như sử dụng điện lưới, sử dụng pin điện hóa hoặc pin năng lượng mặt trời,... Tuy kết cấu và thiết bị đơn giản và có độ phổ biến cao nhưng các phương pháp nêu trên đều có những nhược điểm rất khó khắc phục như: sử dụng điện lưới cần mạng lưới cung cấp điện, thiết bị cần lắp đặt tại nơi gần nguồn điện, và thường yêu cầu sử dụng kèm thêm các bộ chuyển đổi điện áp từ nguồn 220V AC về mức điện áp vận hành của thiết bị (5V DC hoặc 12V DC); nguồn điện trong pin điện hóa là hữu hạn, do đó cần phải thay mới hoặc nạp lại pin sau một khoảng thời gian vận hành thiết bị; hơn nữa pin điện hóa thường được chế tạo từ các vật liệu ít thân thiện, nguy hại với môi trường, do vậy phát thải pin điện hóa có nguy cơ gây ô nhiễm môi trường rất cao, việc tái chế và xử lý cũng rất tốn kém và phức tạp (Abraham, 2015). Pin năng lượng mặt trời hiện đang là giải pháp chính để cấp điện cho các thiết bị thông minh hoạt động độc lập, thường được lắp đặt tại các vị trí tách biệt, khó có thể sử dụng điện lưới để cấp năng lượng. Tuy vậy, khả năng vận hành của pin năng lượng mặt trời phụ thuộc vào số giờ nắng trong ngày, tuổi thọ pin cố định và thành phần cấu tạo cũng bao gồm nhiều chất có nguy cơ gây ô nhiễm môi trường (Kabir và nnk., 2018).

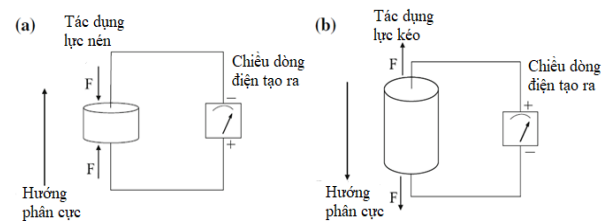
Việc nghiên cứu áp dụng hiệu ứng áp điện và vật liệu áp điện vào quá trình sản xuất điện năng đã được thực hiện ở một số nơi trên thế giới, và chứng tỏ được khả năng tạo ra một nguồn năng lượng mới, sạch hơn và ổn định hơn, ít gây ô nhiễm môi trường (Ali và nnk., 2019; Ericka và nnk., 2005). Tuy công suất phát điện không lớn nhưng khả năng của thiết bị là hứa hẹn trong việc thay thế sử dụng nguồn điện từ các pin hóa học cỡ nhỏ hay pin năng lượng mặt trời ở một số vị trí vận hành thích hợp.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

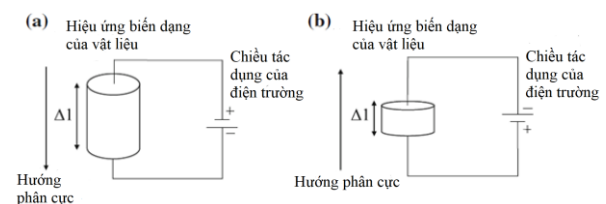
2.1. Vật liệu áp điện và hiệu ứng áp điện

Vật liệu áp điện (gồm áp điện) được phát hiện lần đầu vào thế kỷ XVIII, khi một số nhà khoa học phát hiện ra một số loại tinh thể và một số vật liệu dạng gốm sẽ tạo ra điện khi có sự thay đổi về nhiệt độ, đặc biệt là khi kéo căng hoặc nén, ép vật liệu với áp lực lớn (Hình 1). Hiệu ứng này gọi là hiệu ứng áp điện (piezoelectric) và các loại vật liệu có đặc tính này được gọi là vật liệu áp điện (piezoelectric materials) (Dineva và nnk., 2014).

Trong quá trình nghiên cứu về vật liệu áp điện, hai nhà bác học Jacques Curie và Pierre Currie đã xác nhận sự tồn tại của hiệu ứng áp điện nghịch, khi đặt tinh thể vật liệu áp điện vào trong một trường điện áp thì tinh thể sẽ giãn dài ra hoặc co lại theo chiều phân cực của điện trường và tỉ lệ thuận với độ lớn của trường điện áp (Hình 2).



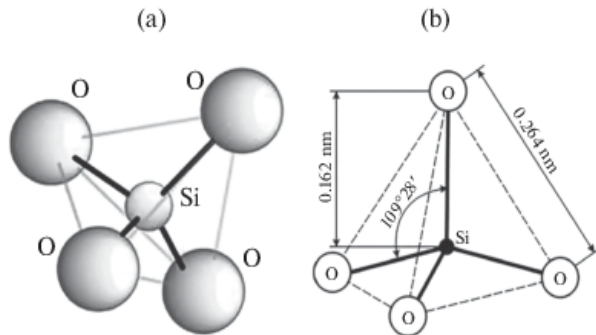
Hình 1. Hiệu ứng áp điện thuận (Dineva và nnk., 2014). (a) Khi nén, ép; (b) Khi kéo căng.



Hình 2. Hiệu ứng áp điện nghịch (Dineva và nnk., 2014). (a) Vật liệu giãn dài; (b) Vật liệu bị co ngắn.

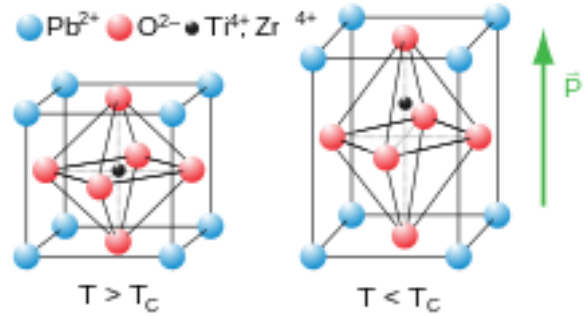
Hiện nay nghiên cứu, ứng dụng hiệu ứng áp điện và vật liệu áp điện được coi là một trong những cơ sở của ngành công nghiệp cơ điện tử hiện đại với một số sản phẩm nổi bật như chế tạo các thiết bị cảm biến, thiết bị siêu âm, mô tơ và cơ cấu chấp hành siêu nhỏ, thiết bị điều khiển tần số và xử lý tín hiệu, và tạo ra các thiết bị phát điện từ các chuyển động cơ học sử dụng vật liệu áp điện.

Vật liệu áp điện có thể được chia thành hai nhóm là vật liệu tự nhiên và vật liệu nhân tạo. Vật liệu tự nhiên bao gồm các vật liệu dạng tinh thể như thạch anh (SiO_2), các loại muối như Rochelle, topaz, các khoáng chất trong nhóm tourmaline và một số chất hữu cơ như lụa, gỗ, tóc và cao su,... Những vật liệu này có tính chất áp điện do cấu trúc phân tử đặc biệt, hình thành sự phân cực điện khi có sự tác động của ngoại lực. Hình 3 thể hiện cấu trúc tinh thể của một phân tử thạch anh (SiO_4) có dạng khối tứ diện, được tạo bởi các nguyên tử oxy xung quanh một nguyên tử Silic. Các nguyên tử oxy có cùng khoảng cách tới nguyên tử Silic và khoảng cách giữa các nguyên tử oxy cũng bằng nhau.



Hình 3. Cấu trúc của một phân tử thạch anh (Greenberg và nnk., 2021). (a) Mô phỏng cấu trúc phân tử; (b) Khoảng cách và góc giữa các nguyên tử.

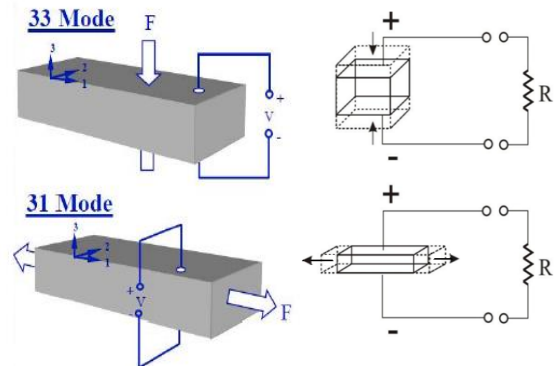
Vật liệu áp điện nhân tạo bao gồm các tinh thể tương tự thạch anh, polyme và vật liệu tổng hợp, được tạo ra bằng cách trộn và nung nóng hỗn hợp bột mịn của các oxit kim loại thành phần, sau đó bổ sung thêm chất kết dính hữu cơ trước khi được thiêu kết theo các quy trình đặc biệt với các dải nhiệt và thời gian khác nhau để tạo ra được cấu trúc tinh thể cho vật liệu. Cấu trúc một phân tử Lead Zirconium Titanate ($\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$) được mô tả trong Hình 4 thể hiện rõ sự ảnh hưởng của nhiệt độ kết tinh tới cấu trúc mạng tinh thể. Với nhiệt độ kết tinh cao, cấu trúc phân tử đạt được có dạng



Hình 4. Cấu trúc tinh thể gốm áp điện nhân tạo Lead Zirconate Titanate ($\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$) (Wikipedia).

hình hộp vuông, các nguyên tử nằm cân xứng nhau trong mạng; khi nhiệt độ kết tinh thấp, cấu trúc phân tử có dạng hình hộp chữ nhật, khoảng cách giữa các nguyên tử không đều nhau, nguyên tử Ti bị phân bố lệch tâm,... tạo ra sự lưỡng cực về điện tích trong phân tử.

Dưới tác dụng của ngoại lực, khoảng cách giữa các nguyên tử trong phân tử và mạng tinh thể bị thay đổi, dẫn đến sự phân cực mạnh mẽ trong phân tử và mạng tinh thể, tạo ra các phần tử tích điện trái dấu. Sự tương tác và di chuyển của các điện tích trong mạng tinh thể sẽ tạo ra dòng điện, lúc này kết nối phần tử gốm áp điện với mạch điện sẽ tạo ra một nguồn điện năng, có thể tận dụng để cung cấp năng lượng cho các thiết bị tiêu thụ điện năng trong mạch. Sơ đồ ở Hình 5 mô tả nguyên lý vận hành và chiều của dòng điện tạo ra tương ứng với chiều của lực tác dụng lên tấm vật liệu áp điện với các chế độ ứng suất khác nhau (Hình 5a) và cách đấu nối phần tử phát điện vào trong mạch điện để thu năng lượng (Hình 5b).



Hình 5. Nguyên lý phát điện từ gốm áp điện (Gallo và nnk., 2012). (a) Nguyên lý tác dụng ngoại lực (b) Sơ đồ mắc nối phần tử phát điện với mạch điện.

Để tạo sự dịch chuyển trong kết cấu phân tử, mạng tinh thể, ngoại lực được chọn thường là sử dụng lực nén, chế độ ứng suất 33 Mode, hoặc lực kéo, chế độ ứng suất 31 Mode. Một số nghiên cứu đã chỉ ra đối với tính chất của vật liệu gốm áp điện, việc áp dụng lực kéo để tạo ứng suất 31 tạo ra được hiệu suất phát điện (84,5%) lớn hơn so với việc sử dụng lực nén theo ứng suất 33 (đạt khoảng 81%) với cùng một độ lớn của ngoại lực tác động (Roundy và nnk., 2003).

Độ lớn của điện tích (Q_3) sinh ra dưới tác dụng của lực nén F_3 được xác định theo công thức (1).

$$Q_3 = d_{33}F_3 \quad (1)$$

Độ lớn của điện tích (Q_1) sinh ra dưới tác dụng của lực kéo F_1 được xác định theo công thức (2).

$$Q_1 = d_{31}F_1 \quad (2)$$

Trong đó: d_{33} và d_{31} - hệ số phát điện áp điện, $C/N \times 10^{-12}$.

Điện áp sinh ra ở hai đầu của mạch hở dưới tác dụng của ngoại lực nén (V_3) và kéo (V_1) được xác định theo công thức dưới:

$$V_3 = g_{33}tT_3 \quad (3)$$

$$V_1 = g_{31}tT_1 \quad (4)$$

Trong đó: g_{33} và g_{31} - hệ số điện áp áp điện, phụ thuộc vào loại vật liệu, $Vm/N \times 10^{-3}$; t - chiều dày của tấm vật liệu áp điện, m; T_3, T_1 - tương ứng là ứng suất nén và kéo xuất hiện trong tấm vật liệu áp điện, N/m^2 .

Hệ số phát điện d và hệ số điện áp áp điện g của vật liệu liên hệ với nhau thông qua hằng số điện môi ϵ :

$$d = \epsilon g \quad (5)$$

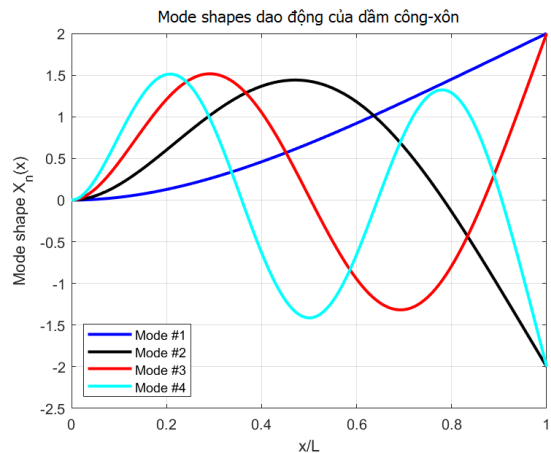
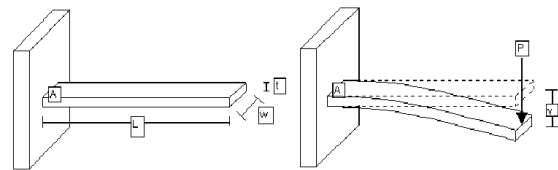
2.2. Dao động dầm công-xôn

Như đã trình bày ở trên, hiệu suất phát điện sử dụng hiệu ứng ứng suất kéo đạt cao hơn so với sử dụng hiệu ứng của ứng suất nén; đồng thời để có thể tạo ra được một dòng điện, có sự chuyển động liên tục của các điện tích thì việc kéo hay nén phải là quá trình động chứ không phải là quá trình kéo tĩnh, hay nén tĩnh. Do đó, để có thể trở thành một nguồn phát điện thì tấm vật liệu áp điện phải được kích thích dao động. Do bản thân gốm áp điện không phải là một vật liệu có tính đàn hồi cao, nên thường các tấm gốm sẽ được kết dính với các phân tử đàn hồi dạng màng, thanh hoặc tấm để tối

ưu hóa quá trình dao động (Ericka và nnk., 2005). Phần tử đàn hồi được chọn sử dụng trong nghiên cứu này là dạng dầm công-xôn mỏng dao động (Beléndez và nnk., 2002). Mô hình kết cấu và dao động của dầm công-xôn dẹt được mô tả ở Hình 6.

Dầm công-xôn dẹt có dạng tấm phẳng, một đầu được ngàm chặt, một đầu dao động tự do. Tùy theo kích thước dài, rộng và chiều dày cụ thể mà dầm sẽ có các tần số và dạng hình dao động tự do tương ứng với số mode. Một dầm dao động có thể có rất nhiều các mode khác nhau, tuy nhiên khi xét đến giá trị của tần số và biên độ dao động, thường chỉ xét tới khoảng 4 mode dao động đầu tiên do khi các mode càng lớn thì tần số dao động cũng lớn tương ứng, dẫn tới ảnh hưởng của dao động theo các mode này tới giá trị của ứng suất và hiệu suất phát điện thường rất nhỏ (Repetto và nnk., 2012).

Dầm công-xôn có kết cấu đối xứng, khi dao động theo phương thẳng đứng, hai mặt trên và dưới của dầm sẽ chịu các ứng suất trái ngược nhau, khi mặt trên bị kéo thì phía dưới chịu nén và ngược lại. Với mode dao động đơn giản, mode #1 trên Hình 6, được mô tả bởi đường màu xanh đậm, tương ứng với hình dạng hiện tại của dầm thì phần phía trên sẽ chịu nén và phần phía dưới sẽ chịu kéo. Với các mode dao động bậc cao, tùy theo hình dạng mà trên cùng một mặt có thể có đồng thời vị trí chịu kéo và vị trí chịu nén, mode 3 - đường màu đỏ.



Hình 6. Kết cấu và mô hình dao động của dầm công-xôn tự do.

Phương trình dao động của dầm công-xôn có dạng (Banakh & Kempner, 2010):

$$y(x) = A_1 \cosh(\beta_n x) + A_2 \sinh(\beta_n x) + A_3 \cos(\beta_n x) + A_4 \sin(\beta_n x) \quad (6)$$

Trong đó: A_1, A_2, A_3, A_4 - các hệ số phụ thuộc vào điều kiện biên; β_n - hệ số xác định từ tần số dao động riêng của dầm ω_n :

$$\omega_n = \frac{(2n - 1)\pi}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

$$\beta_n = \sqrt[4]{\frac{\mu \omega_n}{\rho A}} \quad (8)$$

Trong đó: μ - khối lượng dầm, kg; L - chiều dài của dầm, m; A - diện tích mặt cắt ngang dầm, m²; I - mômen chống uốn, m⁴; ρ và E - là khối lượng riêng và mô đun đàn hồi của vật liệu chế tạo dầm.

Theo các công thức (1÷4), điện năng tạo ra được của khối vật liệu sẽ tỉ lệ thuận với độ lớn của lực kéo - nén tác động lên vật liệu, tương ứng với biên độ dao động của khối vật liệu. Trong bài toán về dao động, kết cấu, hiện tượng cộng hưởng là vấn đề nên tránh, bởi biên độ của dao động sẽ tăng lên mức cực đại khi mà tần số của ngoại lực tác động trùng với tần số dao động riêng của kết cấu: $\omega_l = \omega_n$ (Landa & McClintock, 2000). Ngược lại với bài toán kết cấu, trong bài toán phát điện, hiện tượng cộng hưởng có thể xem xét như là một biện pháp để tối đa hóa biến dạng của khối vật liệu, từ đó tận thu được năng lượng lớn nhất từ kết cấu dao động.

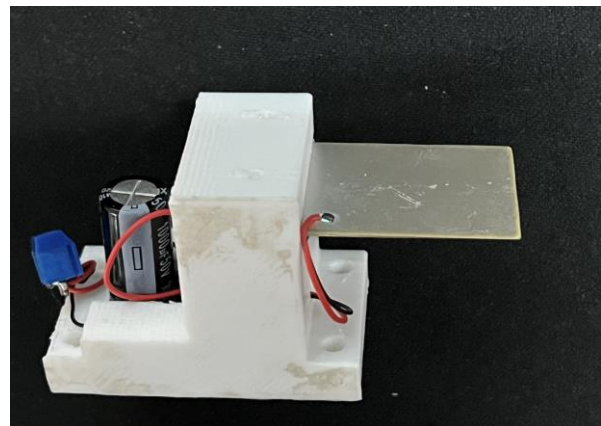
3. Đánh giá khả năng phát điện của dầm áp điện

Bộ thiết bị được sử dụng để kiểm tra đánh giá khả năng phát điện của gốm áp điện có dạng dầm mỏng như trên Hình 7. Dầm áp điện có cấu tạo gồm 2 tấm PZT5H (Piezoelectric Lead Zirconate (Zirconium) Titanate) được dán lên 2 mặt của phần tử đàn hồi chế tạo từ hợp kim với thành phần chính là đồng thau. Đặc tính kỹ thuật của vật liệu PZT5H được liệt kê trong Bảng 1 (Sheeraz và nnk., 2019). Các tấm PZT5H và tấm đồng có cùng chiều rộng (30 mm) và cùng chiều dày (0,2 mm). Dầm được ngàm chặt một đầu, một đầu tự do, với chiều dài của dầm tự do là 40 mm. Hai dây dẫn được hàn với 2 tấm PZT để sẵn sàng kết nối với mạch điện tiêu thụ ở bên ngoài.

Bảng 1. Đặc tính kỹ thuật của vật liệu PZT5H.

TT	Đặc tính kỹ thuật	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị
1	Hằng số điện môi	ϵ		2948
2	Khối lượng riêng	ρ	kg/m ³	7800
3	Hệ số phát điện áp điện	d31	C/N×10 ⁻¹²	-320
		d33	C/N×10 ⁻¹²	650
4	Hệ số điện áp áp điện	g31	V.m/N×10 ⁻³	-9.5
		g33	V.m/N×10 ⁻³	19
5	Hệ số Poisson	ν		0,31
6	Mô đun đàn hồi	E	N/m ²	5×10 ¹⁰

Bằng phương pháp lý thuyết dựa trên các công thức đã trình bày ở trên, ta có thể xác định được các tần số dao động riêng của dầm áp điện trong Hình 7 tương ứng với các mode dao động, kết quả được thể hiện trong Bảng 2.



Hình 7. Mô hình thí nghiệm dầm áp điện.

Bảng 2. Tần số dao động riêng của dầm 3 lớp PZT5H.

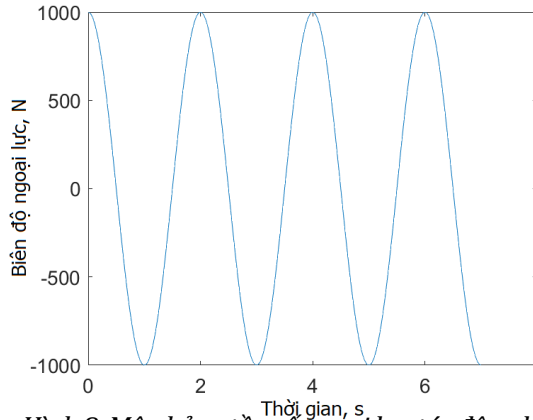
Mode	Tần số tính toán (Hz)	Tần số (xác định theo mô phỏng) (Hz)
1	100,76	100,74
2	631,42	630,64
3	1768,00	1762,8
4	3464,58	3445,7

Để tính toán khả năng phát điện của dầm trong mô hình thí nghiệm, dầm sẽ được kích thích dao động với các nguồn dao động cơ học với các biên độ và tần số khác nhau để xác định mức độ biến dạng và các ứng suất hữu ích T_i, \dots Phương trình của ngoại lực tác động có dạng:

$$F = A \cos \omega_t t \quad (9)$$

Trong đó: A - biên độ của ngoại lực tác động và ω là tần số tác động của ngoại lực lên phần mềm áp điện.

Hình 8 mô phỏng biểu đồ lực theo thời gian của ngoại lực tác dụng đặt lên phía đầu của dầm áp điện. Ngoại lực biến đổi tuần hoàn, lặp lại theo chu kỳ hàm số cosin.



Hình 8. Mô phỏng tần số ngoại lực tác động lên dầm áp điện.

Phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method) với phần mềm Abaqus sẽ được sử dụng để giải phương trình dao động và xác định ứng suất lớn nhất trong khối vật liệu áp điện (Khennane, 2013) từ đó xác định điện áp lớn nhất có thể tạo ra theo lý thuyết từ thiết bị theo công thức (4).

Trong thí nghiệm đầu tiên, biên độ của ngoại lực được giữ cố định ở mức 1000 N và tần số của dao động sẽ được thay đổi tăng dần từ π rad/s lên đến các giá trị của tần số dao động riêng của dầm đã xác định trong Bảng 2.

Phương trình ngoại lực:

$$F_{1000} = 1000 \cdot \cos \omega t \quad (10)$$

Kết quả của ứng suất tối đa xuất hiện trong dầm tương ứng với các tần số khác nhau của ngoại lực được thể hiện trong Bảng 3. Ta thấy rõ ràng ứng suất T xuất hiện trong dầm đạt giá trị tối đa khi tần số dao động của ngoại lực tác động trùng với tần số dao động riêng của dầm ở mode 1, giá trị của T giảm dần ở tần số cộng hưởng của các mode cao hơn. Khi tần số tác động của ngoại lực khác với tần số dao động riêng, giá trị của ứng suất T giảm mạnh. Điều này minh chứng ảnh hưởng của các dao động tần số cao lên chuyển vị và dao động của dầm sẽ giảm dần, trùng với lý thuyết về dạng hình dao động (mode shapes). Tương ứng

với các giá trị ứng suất xác định được, ta có thể tính được mức điện áp tối đa có thể xuất hiện trên bề mặt của dầm áp điện nhờ công thức (4) (Bảng 3), tuy nhiên giá trị này chỉ là các giá trị tức thời, không phải là giá trị trung bình. Mức điện áp đạt được lớn nhất khi dầm kích thích dao động với tần số trùng với tần số của dao động riêng bậc 1 (mode shape bậc 1).

Bảng 3. Ứng suất và điện áp tức thời tối đa trong phần tử áp điện với tần số dao động thay đổi.

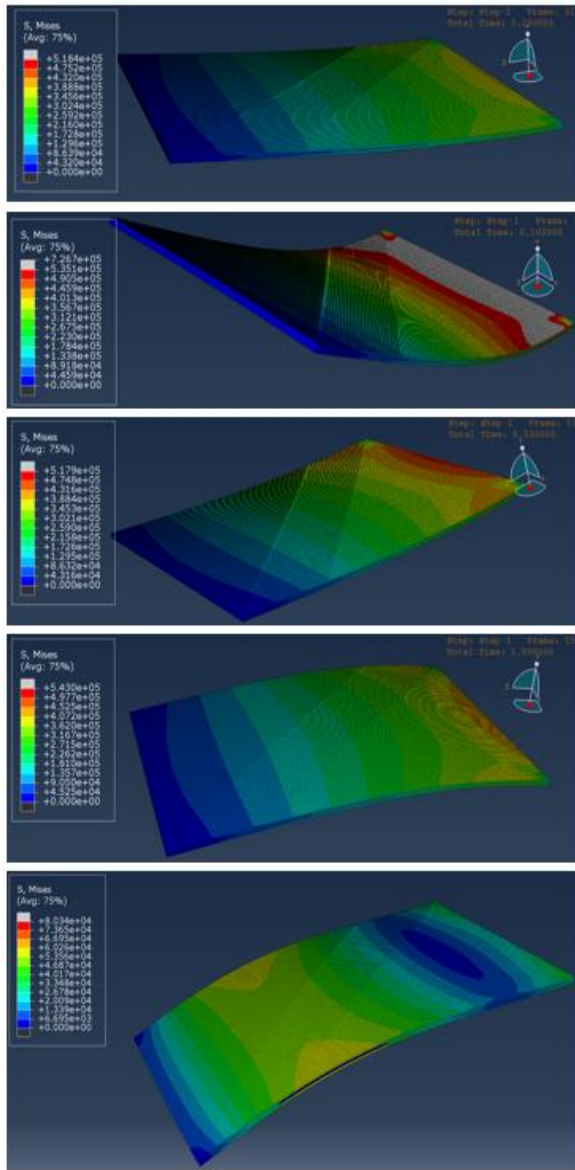
TT	Tần số của ngoại lực tác động ω_t (Hz)	Ứng suất lớn nhất trong vật liệu T (Pa)	Điện áp tức thời tối đa V (V)
1	3,1415	$5,184 \times 10^5$	1,97
2	50,37	$5,574 \times 10^5$	2,1181
3	100,74	$7,267 \times 10^5$	2,76145
4	325,00	$7,96 \times 10^4$	0,3025
5	631,42	$5,661 \times 10^5$	2,1512
6	1150,00	$5,179 \times 10^5$	1,968
7	1768,00	$5,430 \times 10^5$	2,0634
8	3464,58	$8,034 \times 10^4$	0,3053

Hình 9 mô tả hình dạng dao động tức thời của dầm và giá trị ứng suất tối đa xuất hiện trong dầm ở một số tần số tác động khác nhau của ngoại lực, xác định bằng mô phỏng FEM trên phần mềm Abaqus. Ứng suất đạt giá trị lớn nhất tại vị trí dầm bị ngàm giữ. Do dầm dao động theo các dạng hình khác nhau (mode shapes) mà vị trí có ứng suất tập trung cao nhất trên dầm sẽ di chuyển dần dần từ điểm ngàm tới đầu tự do của dầm, tất nhiên với giá trị lớn nhất tức thời giảm dần theo thời gian. Kết quả mô phỏng cũng chỉ ra ở tần số tác động của ngoại lực trùng với tần số dao động riêng của mode shape 1, giá trị ứng suất trong dầm đạt cực đại, tương ứng với khả năng phát điện tức thời đạt giá trị lớn nhất.

Để đánh giá ảnh hưởng của yếu tố độ lớn (biên độ) lực tác động tới ứng suất tối đa, thực hiện thí nghiệm với điều kiện lực tác dụng có biên độ thay đổi ở cùng một tần số trùng với tần số dao động riêng ở mode 1 là 100,74 Hz. Phương trình lực tác động lúc này có dạng:

$$F_{\omega} = A \cos(100,74t) \quad (11)$$

Kết quả mô phỏng của ứng suất và điện áp lý thuyết tối đa xuất hiện trong dầm được thể hiện trong Bảng 4. Ứng suất lớn nhất xuất hiện trong khối vật liệu, với cùng một tần số tác động của ngoại lực thì tăng tuyến tính với biên độ (độ lớn) của ngoại lực.

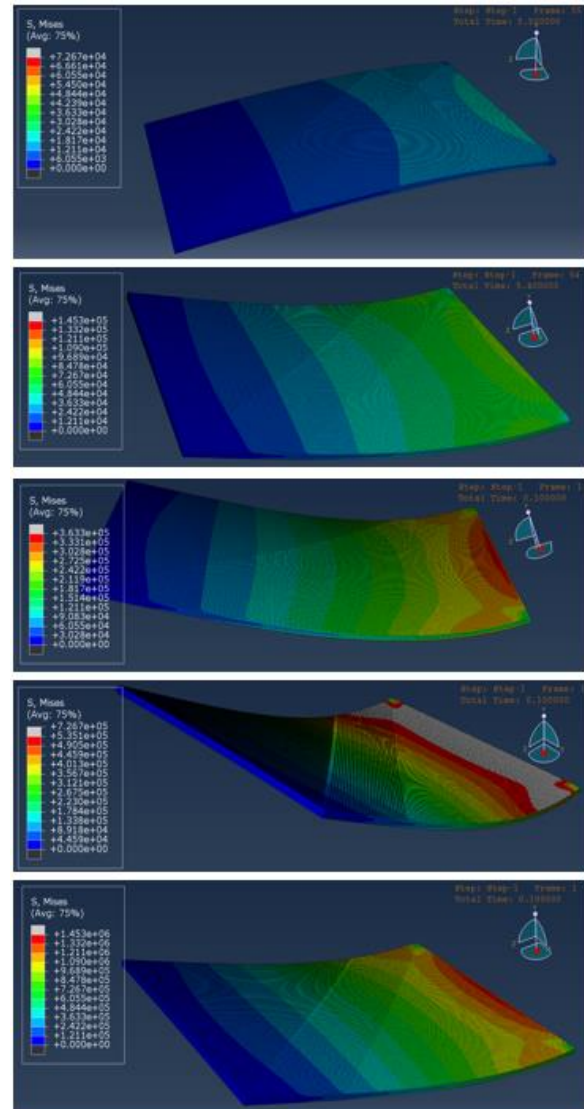


Hình 9. Kết quả mô phỏng ứng suất tương ứng với các tần số dao động khác nhau của ngoại lực.

Bảng 4. Ứng suất và điện áp lý thuyết tối đa trong phần tử áp điện với biên độ lực thay đổi.

TT	Biên độ của lực tác động (N)	Ứng suất lớn nhất trong vật liệu T (Pa)	Điện áp tức thời tối đa V (V)
1	50	$3,633 \times 10^4$	0,138
2	100	$7,267 \times 10^4$	0,276
3	200	$1,453 \times 10^5$	0,552
4	500	$3,633 \times 10^5$	1,381
5	1000	$7,267 \times 10^5$	2,7615
6	2000	$1,453 \times 10^6$	5,52
7	5000	$36,33 \times 10^5$	13,81
8	10000	$72,67 \times 10^5$	27,615

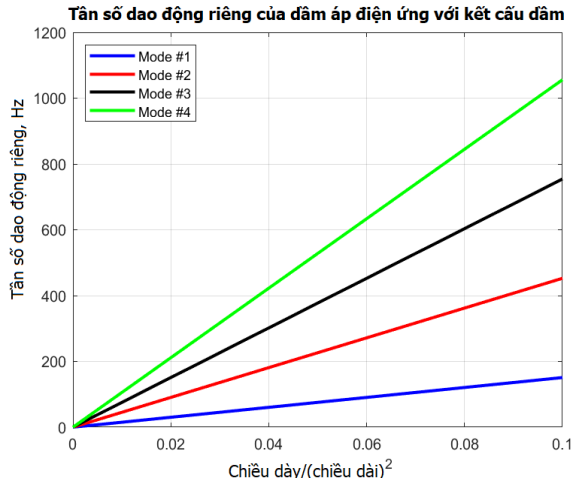
Hình 10 mô tả dạng hình dao động và ứng suất tối đa xuất hiện trong dầm khi thay đổi biên độ của ngoại lực tác động trong mô phỏng FEM. Hình dạng của dầm ở các phần không giống nhau do ảnh được lưu lại ở các bước thời gian (time step) khác nhau trong quá trình mô phỏng, ví dụ hình ảnh mô tả ứng suất của ngoại lực 100 N được lưu ở 5,5 s; mô tả ứng suất của ngoại lực 200 N được lưu ở 5,4 s. Vì tần số của ngoại lực tác dụng là như nhau ($\omega_t = \omega_{n1} = 100,74 \text{ Hz}$) nên hình dạng dao động (mode shape) là giống nhau cho tất cả các trường hợp biên độ ngoại lực khác nhau. Kết quả mô phỏng tính toán trùng với kết quả tính toán lý thuyết được thể hiện trong Bảng 4, biên độ của ngoại lực càng lớn thì ứng suất xuất hiện trong khối vật liệu càng lớn.



Hình 10. Ứng suất trong dầm với các biên độ ngoại lực khác nhau ở cùng tần số tác động ω_{n1} .

Kết quả mô phỏng và tính toán cho thấy ứng suất và điện áp lý thuyết tối đa xuất hiện trong dầm tỷ lệ thuận với độ lớn của biên độ của ngoại lực ở cùng một tần số tác động giống nhau. Từ đó ta có thể kết luận, để tăng được công suất phát điện của thiết bị sử dụng vật liệu áp điện cần biên độ của ngoại lực tác động lên cao nhất có thể. Tuy nhiên, giá trị này thường sẽ bị giới hạn dựa trên điều kiện bền của cấu trúc dầm công-xôn.

Ngoài ra, từ công thức (7), với kết cấu, chiều dày và vật liệu đã chọn trước, ta có thể xây dựng được mối liên hệ giữa tần số dao động riêng ω_n là hàm số bậc nhất của tỉ số chiều dày trên bình phương của chiều dài dầm (w/L^2). Hình 11 thể hiện mối liên hệ giữa tần số dao động riêng (tần số dao động tự nhiên) của dầm 3 lớp PZT ứng với các hình dạng dao động (mode shapes) khác nhau. Theo kết luận đã rút ra ở trên, ứng suất trong dầm đạt lớn nhất khi tần số của nguồn ngoại lực tác động trùng với tần số dao động ở mode 1 của dầm. Như vậy khi biết được tần số của ngoại lực ω_t , ta hoàn toàn có thể điều chỉnh cấu trúc của dầm bằng cách hoặc thay đổi chiều dày, hoặc thay đổi chiều dài để đạt giá trị tần số dao động riêng ω_{n1} bằng với tần số dao động của ngoại lực ω_t .



Hình 11. Tần số dao động riêng và kích thước hình học của dầm.

4. Kết luận

Vật liệu áp điện là vật liệu có kết cấu mạng tinh thể đặc biệt, trong đó khi vật liệu chịu tác động của ngoại lực, khoảng cách của các nguyên tử trong tinh thể sẽ thay đổi, dẫn đến hiện tượng phân cực về điện. Sự tương tác giữa các phần tử

mang điện tích âm và dương trong khối vật liệu sẽ tạo ra được một dòng điện, có thể gắn hai cực của khối vật liệu với mạch bên ngoài để biến khối vật liệu trở thành một nguồn phát điện. Chiều của dòng điện được quyết định phụ thuộc vào chiều của lực tác động. Độ lớn của nguồn điện tạo ra phụ thuộc vào các ứng suất kéo và nén xuất hiện ở bên trong khối vật liệu áp điện.

Để tạo được dòng điện liên tục từ thiết bị, khối gốm áp điện sẽ được gắn lên kết cấu cơ khí dạng dầm công-xôn để kích thích dao động. Khi phiến dầm dao động lên xuống sẽ tạo hiệu ứng kéo và nén ở hai mặt trên và dưới, từ đó tạo ra ứng suất kéo và nén liên tục trên tấm gốm.

Dao động của dầm công-xôn là sự kết hợp phức tạp của các hình thái dao động (mode shapes) khác nhau. Để tối ưu hóa được hiệu quả tạo ứng suất, thì tần số ngoại lực tác động sẽ được chọn trùng với tần số dao động riêng của hình thái thứ nhất (mode shape 1). Trong trường hợp thiết kế thiết bị phát điện để làm việc với nguồn dao động cơ học có sẵn, kích thước chiều dày và chiều dài của dầm sẽ được tinh chỉnh để đạt được tần số dao động riêng bậc 1 trùng với tần số dao động của nguồn ngoại lực.

Tuy vậy các giá trị ứng suất xuất hiện trên kết cấu là tức thời và dao động theo dao động của dầm dẫn tới kết quả nguồn điện thu được cũng sẽ có biên độ (điện áp) thay đổi liên tục theo mô hình gần giống với dòng điện xoay chiều AC. Do đó, để có thể thực sự sử dụng nguồn điện tạo ra được từ dao động của dầm gốm áp điện, phía đầu ra (mạch hở) của thiết bị sẽ cần phải sử dụng thêm các mạch điện chuyên dùng để chỉnh lưu, ổn áp, và lưu trữ nguồn điện thu được này, từ đó mới có thể sử dụng để cấp điện cho các thiết bị sử dụng điện. Vì đặc tính của nguồn điện tạo ra không ổn định như nguồn điện xoay chiều thông thường nên các bài toán chỉnh lưu, ổn áp sẽ tương đối phức tạp nên trong nội dung của nghiên cứu này nhóm nghiên cứu chưa thể bao quát được. Đây sẽ là hướng nghiên cứu phát triển tiếp theo để tối ưu hơn nữa sản phẩm hướng tới mục tiêu tạo ra sản phẩm hoàn thiện có khả năng thương mại hóa.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được hoàn thành dưới sự tài trợ của Trường Đại học Mỏ - Địa chất trong đề tài nghiên cứu khoa học cấp cơ sở, mã số T23-04.

Đóng góp của các tác giả

Đoàn Công Luận - phương pháp nghiên cứu, tính toán, mô phỏng, viết bài, chỉnh sửa; Đoàn Văn Giáp - viết bài, chỉnh sửa; Lê Thị Hồng Thắng - mô phỏng, viết bài.

Tài liệu tham khảo

- Abraham, K. M. (2015). Prospects and limits of energy storage in batteries. *The journal of physical chemistry letters*, 6(5), 830-844.
- Ali, F., Raza, W., Li, X., Gul, H., & Kim, K. H. (2019). Piezoelectric energy harvesters for biomedical applications. *Nano Energy*, 57, 879-902. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.012>
- Banakh, L., & Kempner, M. (2010). *Vibrations of mechanical systems with regular structure*. Springer Science & Business Media.
- Beléndez, T., Neipp, C., & Beléndez, A. (2002). Large and small deflections of a cantilever beam. *European journal of physics*, 23(3), 371.
- Dineva, P., Gross, D., Müller, R., Rangelov, T., Dineva, P., Gross, D., . . . Rangelov, T. (2014). Piezoelectric Cracked Finite Solids Under Time-Harmonic Loading. *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials: Solution of Time-Harmonic Problems via BIEM*, 105-116.
- Ericka, M., Vasic, D., Costa, F., Poulin, G., & Tliba, S. (2005). Energy harvesting from vibration using a piezoelectric membrane. *In Journal de Physique IV (Proceedings)*, 128, 187-193. EDP sciences.
- Gallo, C. A., Tofoli, F., Rade, D., & Steffen, J. V. (2012). Piezoelectric actuators applied to neutralize mechanical vibrations. *Journal of Vibration and Control*, 18(11), 1650-1660. <https://doi.org/10.1177/1077546311422549>
- Greenberg, B. A., Ivanov, M. A., Pilyugin, V. P., Pushkin, M. S., Tolmachev, T. P., & Patselov, A. M. (2021). Silicon Oxygen Quartz Tetrahedra and Consolidation Processes during High-Pressure Torsion. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021(4), 449-453. <https://doi.org/10.1134/S003602952104011X>.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., Kim, K.-H. J. R., & Reviews, S. E. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900.
- Khennane, A. (2013). Introduction to finite element analysis using MATLAB® and Abaqus. CRC Press.
- Landa, P. S., & McClintock, P. V. (2000). Vibrational resonance. *Journal of Physics A: Mathematical and general*, 33(45), L433.
- Repetto, C. E., Roatta, A., & Welti, R. J. (2012). Forced vibrations of a cantilever beam. *European Journal of Physics*, 33(5), 1187. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/5/1187>.
- Roundy, S., Wright, P. K., & Rabaey, J. (2003). A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer communications*, 26(11), 1131-1144.
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Currency. https://books.google.com.vn/books?id=ST_FDAAAQBAJ.
- Sheeraz, M. A., Butt, Z., Khan, A. M., Mehmood, S., Ali, A., Azeem, M., ... & Imtiaz, T. (2019). Design and optimization of piezoelectric transducer (PZT-5H stack). *Journal of Electronic Materials*, 48, 6487-6502.
- Wikipedia. Lead_zirconate_titanate. https://en.wikipedia.org/wiki/Lead_zirconate_titanate.