



**Nghiên cứu tính toán, thiết kế và chế tạo máy cắt tia nước  
công suất nhỏ cho vật liệu mềm**

**Bùi Vũ Hùng, Bùi Văn Hưng\***

**Đỗ Trung Hiếu, Đỗ Đức Long, Dương Công Trung**

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao Thông Vận Tải

\*Email: hungtkm@utc.edu.vn

**Tóm tắt**

*Bài báo trình bày phương pháp tính toán, thiết kế và chế tạo mô hình máy cắt tia nước công suất nhỏ, hướng tới ứng dụng trong gia công các vật liệu mềm như mút xốp, cao su non và da nhân tạo. Trên cơ sở phân tích nguyên lý hình thành tia nước áp suất cao và đặc tính cơ học của vật liệu mềm, nghiên cứu đã xác định được dải thông số công nghệ tối ưu, bao gồm áp suất và lưu lượng tối thiểu cần thiết để đảm bảo khả năng cắt hiệu quả. Từ các thông số này, một mô hình máy cắt quy mô nhỏ đã được thiết kế với các thành phần chính gồm: bơm áp suất cao mini, đầu cắt đường kính nhỏ nhằm tập trung năng lượng dòng tia, và cơ cấu dẫn hướng có độ chính xác cao để đảm bảo quỹ đạo cắt ổn định. Kết quả mô phỏng CFD kết hợp với thực nghiệm cho thấy hệ thống có khả năng tạo ra tia nước đủ năng lượng để cắt xuyên vật liệu mềm với bề mặt cắt sạch, ít biến dạng và độ ổn định cao. Mô hình không chỉ đáp ứng yêu cầu nghiên cứu, đào tạo mà còn có tiềm năng ứng dụng trong sản xuất quy mô nhỏ và các hệ thống gia công linh hoạt chi phí thấp.*

**Từ khóa:** máy cắt tia nước, cắt vật liệu mềm, gia công CNC, nước áp suất cao, thiết kế máy.

**Abstract**

*This study presents the calculation, design, and development of a low-power waterjet cutting system intended for processing soft materials such as foam, soft rubber, and synthetic leather. Based on an analysis of high-pressure waterjet formation and the mechanical characteristics of soft materials, the research determines the minimum required pressure and flow rate necessary to achieve effective cutting performance. A compact prototype system is subsequently designed and fabricated, consisting of a mini high-pressure pump, a small-diameter nozzle for jet concentration, and a precision guiding mechanism to ensure stable cutting trajectories. Computational fluid dynamics (CFD) simulations, combined with experimental validation, are conducted to evaluate the performance of the system. The results demonstrate that the proposed model is capable of generating a stable and sufficiently energetic waterjet to produce clean and consistent cutting surfaces with minimal deformation. The system shows strong potential for application in educational environments, laboratory-scale research, and small-scale manufacturing due to its cost-effectiveness and operational simplicity.*

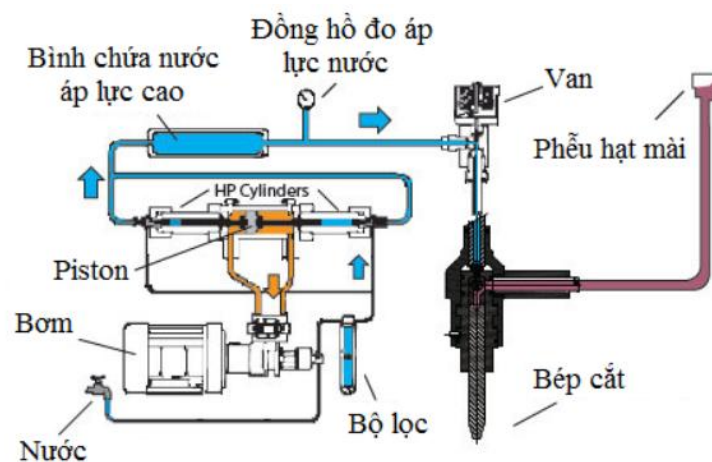
**Keywords:** waterjet cutting machine, cutting soft materials, CNC machining, high-pressure water, machine design.

<https://doi.org/10.65153/h528xt37>

## 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Công nghệ gia công bằng tia nước (Water Jet Machining – WJM) hiện được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực gia công cắt kim loại tấm nhờ khả năng xử lý linh hoạt đa dạng vật liệu. Công nghệ này cho phép cắt hiệu quả từ kim loại và hợp kim (như thép không gỉ, thép carbon, đồng, nhôm...) đến các vật liệu phi kim như nhựa, gỗ, gốm, đá, kính và vật liệu composite, bằng cách sử dụng tia nước áp suất siêu cao hoặc hỗn hợp nước – hạt mài, áp suất cực đại của tia nước gia tốc tập trung lên một vùng diện tích rất nhỏ, với chiều rộng rãnh cắt khoảng 1 mm và đường kính lỗ nhỏ nhất có thể cắt đạt khoảng 1.5 mm [1, 2].

Quá trình gia công bằng tia nước được thực hiện bằng cách ép một lưu lượng nước lớn đi qua một ống có tiết diện rất nhỏ, làm cho vận tốc của dòng nước tăng lên nhanh chóng theo nguyên lý bảo toàn lưu lượng. Khi dòng nước đã được tăng tốc rời khỏi đầu phun với vận tốc điển hình từ 200 đến 500 m/s, nó tạo ra một lực cắt lớn tác động lên bề mặt vật liệu gia công [2]. Một ưu điểm quan trọng của WJM là quá trình cắt không sinh nhiệt đáng kể, do đó không làm thay đổi cấu trúc vi mô hay tính chất cơ học của vật liệu, đặc biệt phù hợp đối với các vật liệu nhạy với vùng ảnh hưởng nhiệt [1,3]. Dưới tác dụng của áp suất cao thường trong khoảng  $4 \times 10^8$  đến  $6 \times 10^8$  Pa các vi nứt được hình thành tại bề mặt vật liệu và tiếp tục phát triển dưới tác động kết hợp của áp suất thủy lực và động năng của các phân tử nước. Dòng nước đồng thời cuốn trôi vật liệu bị bóc tách ra khỏi vùng gia công, góp phần mở rộng và kéo dài vết nứt cho đến khi vật liệu bị cắt rời hoàn toàn [2, 3].



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý máy cắt tia nước [5]



Nhờ những đặc tính này, công nghệ cắt tia nước được ứng dụng trong nhiều ngành công nghiệp như cơ khí chế tạo, xây dựng và hàng không vũ trụ để thực hiện các công đoạn cắt biên dạng, tạo hình, tách phôi và khoan lỗ. Hệ thống cắt tia nước có thể gia công kim loại với chiều dày lớn (lên tới khoảng 150 mm tùy thuộc vào điều kiện công nghệ), đồng thời tạo ra vết cắt có độ chính xác và chất lượng bề mặt cao, vượt trội so với các phương pháp cắt plasma hoặc cắt khí oxy–gas [4].

Có nhiều nghiên cứu quốc tế nổi bật chủ yếu tập trung vào hệ thống cắt tia nước áp suất cao và ứng dụng trong gia công vật liệu kim loại hoặc vật liệu cứng ở quy mô công nghiệp [1, 2]. Các nghiên cứu này ít đề cập đến việc phát triển các hệ thống công suất nhỏ, chi phí thấp hoặc tối ưu hóa cho vật liệu mềm. Tại Việt Nam, công nghệ gia công bằng tia nước đã được ứng dụng chủ yếu trong các ngành cơ khí chế tạo, vật liệu xây dựng và gia công đá – kính thông qua các hệ thống máy cắt CNC nhập khẩu từ châu Âu và Trung Quốc. Tuy nhiên, có thể nhận thấy rằng phần lớn các nghiên cứu đều tập trung vào vật liệu kim loại và hợp kim, đồng thời sử dụng thiết bị cắt tia nước công suất lớn vốn được thiết kế cho mục đích công nghiệp. Việc làm chủ thiết bị trong nước còn hạn chế, nên các nghiên cứu chuyên sâu về tối ưu thông số công nghệ, mô phỏng và dự đoán đặc trưng vết cắt bằng tia nước chỉ mới được triển khai trong khoảng hơn một thập kỷ gần đây. Một số nhóm nghiên cứu đã tiến hành khảo sát ảnh hưởng của áp suất, tốc độ cắt, lưu lượng và kích thước hạt mài đến chiều sâu cắt, độ nhám bề mặt và hình dạng rãnh khi gia công bằng tia nước có hạt mài, chủ yếu trên vật liệu hợp kim nhôm và thép [6]. Các công trình này góp phần bước đầu xây dựng mô hình thực nghiệm và đánh giá khả năng ứng dụng công nghệ cắt tia nước trong điều kiện thiết bị sẵn có tại Việt Nam.

Các công trình liên quan đến máy cắt tia nước công suất nhỏ, thiết bị giá rẻ hoặc ứng dụng cho vật liệu mềm gần như chưa được triển khai rộng rãi. Điều này dẫn tới khoảng trống nghiên cứu trong lĩnh vực thiết kế – phát triển mô hình máy cắt tia nước phục vụ đào tạo, nghiên cứu ứng dụng và sản xuất quy mô nhỏ, đặc biệt đối với các vật liệu mềm như mút xốp, cao su non hay da nhân tạo. Vì vậy, hướng nghiên cứu về tính toán, thiết kế và chế tạo máy cắt tia nước công suất nhỏ cho vật liệu mềm vẫn còn nhiều tiềm năng và có ý nghĩa thực tiễn đối với môi trường đào tạo kỹ thuật và nhu cầu sản xuất trong nước.

## 2. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN – THIẾT KẾ

### 2.1. Xác định yêu cầu kỹ thuật

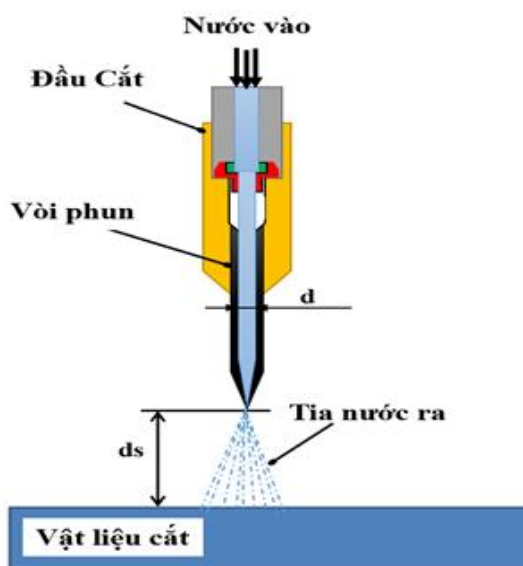
Trong tính toán và thiết kế mô hình máy cắt tia nước, việc đầu tiên là xác định các thông số đầu vào làm cơ sở cho mô hình tính toán và lựa chọn chế độ làm việc. Các thông số gồm đặc tính cơ lý của vật liệu Fomex, đặc trưng của chất lỏng cắt (nước) và yêu cầu về bề rộng, độ sâu vết cắt của sản phẩm. Đây là cơ sở để xác định áp suất, lưu lượng và các thông số chính của hệ thống cắt tia nước công suất nhỏ. Bảng 1 trình bày các thông số được sử dụng làm cơ sở cho tính toán thiết kế.

*Bảng 1. Các thông số thiết kế*

STT	Tên	Thông số xác định	Kí hiệu	Giá trị
1	Loại vật liệu: Fomex	Ứng suất bền	$\sigma_{\text{bền}}$	15 MPa
2	Chất lưu để cắt vật liệu: Nước	Tỉ khối của nước	$\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>
3	Yêu cầu sản phẩm	Bề rộng vết cắt	a	0.3 mm
		Độ sâu vết cắt	h	2 mm

### 2.2. Tính toán thông số làm việc

#### a. Xác định áp suất cắt cần thiết ( $p_{ct}$ )



*Hình 2. Đầu cắt tia nước hạt mài*



Trong trường hợp chất lỏng lý tưởng, kích thước lỗ đường kính đầu phun có thể lấy gần đúng  $d = 0.3 \text{ mm}$  [7]. Khoảng cách từ đầu phun đến bề mặt gia công là  $d_s$  được xác định từ công thức:

$$d_s = X_{cMax} = 135 \times d = 135 \times 0.27 = 36.45 \text{ mm.}$$

Điều kiện để máy cắt tia nước có thể cắt được vật liệu là: Công suất của dòng tia nước trộn hạt mài cần phải đủ lớn để thắng sức kháng cắt của vật liệu. Nếu gọi  $\sigma_{cut}$  là ứng suất cần thiết để bào mòn và cắt vật liệu thì điều kiện cắt là:

$$P_{cut} \geq \sigma_{cut} \cdot A \cdot v_{feed} \quad (1)$$

Trong đó:  $P_{cut}$ : Công suất cắt do dòng nước cung cấp (W)

$\sigma_{cut}$ : Ứng suất kháng cắt của vật liệu (Pa)

A: Diện tích mặt cắt trên vật liệu ( $\text{m}^2$ )

$v_{feed}$ : Tốc độ di chuyển của đầu cắt (m/s)

Công suất cắt của dòng nước biểu diễn qua tổng động năng của nước theo công thức sau:

$$P_{cut} = \frac{E_{water}}{t} \quad (2)$$

Trong đó:  $E_{water}$  là động năng của dòng nước và t là thời gian cắt (s)

Áp dụng phương trình Bernoulli ta xác định được vận tốc của dòng nước được xác định theo công thức sau (3):

$$v_{water} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{ct}}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{ct}}{1000}} = \sqrt{\frac{p_{ct}}{500}} \quad (3)$$

Trong đó: p: áp suất ( Pa )

Động năng của dòng nước thuần khiết được xác định theo công thức (4):

$$E_{water} = \frac{1}{2} \cdot m_{water} \cdot v_{water}^2 \quad (4)$$

Thay các giá trị vào phương trình (4), ta có:

$$E_{water} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot t \cdot v_{water}^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot t \cdot v_{water}^3 = \frac{1}{2} \cdot 1000 \times 5.7 \times 10^{-8} \cdot \left( \sqrt{\frac{p}{500}} \right)^3 \cdot t$$

$$E_{water} = 2.55 \times 10^{-9} \times p^{\frac{3}{2}} \cdot xt \quad (5)$$

Diện tích mặt cắt trên vật liệu cần cắt được xác định theo công thức sau:

<https://doi.org/10.65153/h528xt37>



$$A = w \cdot T = 0.3 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-3} = 6 \times 10^{-7} (m^2) \quad (6)$$

Trong đó:  $w$ : bề rộng vết cắt (mm),  $T$ : độ dày vật liệu cần cắt (mm).

Điều kiện cắt được vật liệu là:

$$P_{cut} \geq \sigma_{cut} \cdot A \cdot v_{feed} \quad (7)$$

Chọn tốc độ di chuyển của đầu cắt là  $v_{feed} = 2.5 (m/s)$ . Từ các phương trình (3), (4), (5), (6), (7) xác định được áp suất cần thiết để cắt được vật liệu Fomex có giá trị  $\sigma_{bền} = 15 \text{ MPa}$  là:

$$p_{ct} \geq 4270003 (Pa)$$

Lựa chọn áp suất cần thiết:  $p_{ct} = 4.5 (MPa)$ .

Trong đó:  $p_{ct}$ : áp suất cần thiết để cắt được vật liệu ( Mpa )

### **b. Tính toán công suất máy bơm**

Lưu lượng nước chảy qua đầu cắt trong một đơn vị thời gian được xác định như sau:

$$Q = A \cdot v \quad (8)$$

Trong đó:  $A$  là diện tích tiết diện lỗ phun tia nước ( $d = 0.3 \text{ mm}$ );  $v$  là tốc độ của tia nước (m/s).

Tốc độ của nước được xác định như sau:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{ct}}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \times 4.5 \times 10^6}{1000}} = 94.86 (m/s)$$

Lưu lượng nước được xác định:

$$Q = A \cdot v = 7.07 \times 10^{-8} \times 94.86 = 6.7 \times 10^{-6} (m^3/s)$$

Với áp suất cần thiết  $p_{ct} = 4.5 \times 10^6 (Pa)$ , công suất của bơm được tính theo công thức (9):

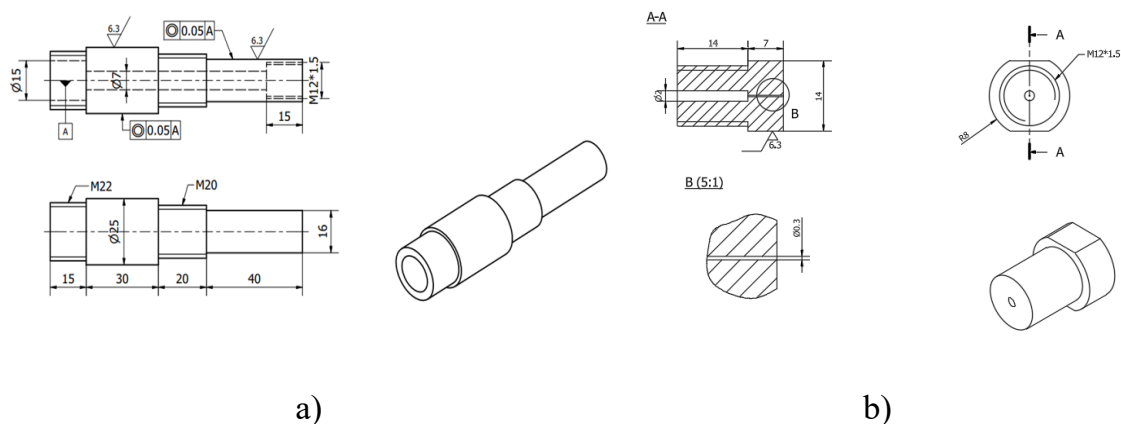
$$P = \frac{p_{ct} \cdot Q}{\eta} = \frac{4.5 \times 10^6 \times 6.7 \times 10^{-6}}{0.9} = 33.55 (W) \quad (9)$$

### **2.3. Thiết kế và chế tạo mô hình máy**

Trong hệ thống máy cắt tia nước, đầu phun là chi tiết làm việc trực tiếp với dòng nước áp suất cao, quyết định đến hình dạng, tốc độ và năng lượng của tia cắt, do đó ảnh hưởng lớn tới chất lượng bề mặt và độ chính xác đường cắt. Vì vậy, việc thiết kế đầu phun cần được xem xét cẩn thận về kích thước lỗ phun, chiều dài dẫn hướng, kiểu ren lắp ghép, vật liệu chế tạo và khả năng thay thế, bảo dưỡng. Trên cơ sở yêu cầu kỹ thuật của mô hình máy và điều kiện gia công thực tế, phần

<https://doi.org/10.65153/h528xt37>

này tiến hành xây dựng phương án thiết kế đầu phun, lựa chọn các thông số kết cấu chủ yếu và thể hiện trên bản vẽ chi tiết phục vụ chế tạo (**Hình 3a**).



**Hình 3.** Bản vẽ của cụm đầu phun: a) Thân đầu phun  
b) Đầu phun

Kết quả chế tạo của cụm đầu phun được thể hiện trong **Hình 4**.



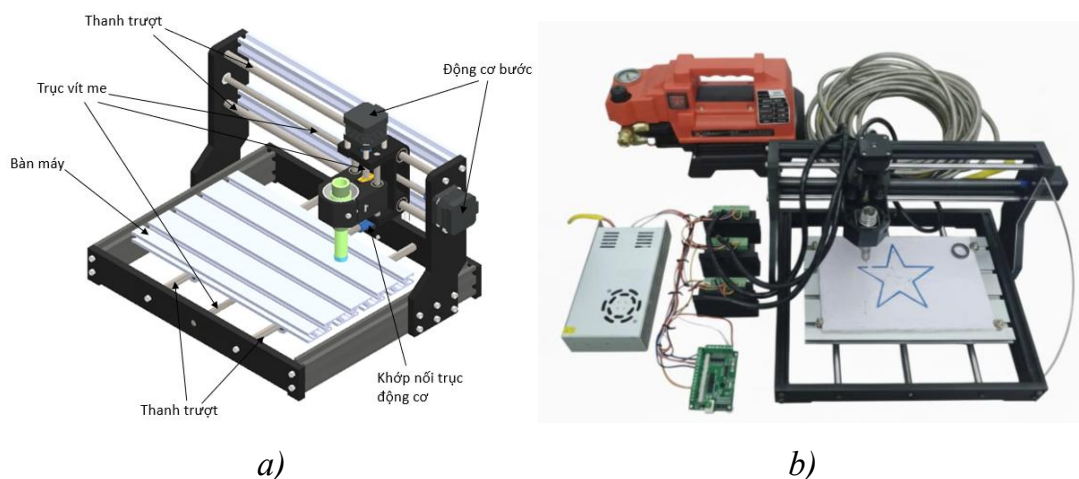
**Hình 4.** Chi tiết đầu phun sau khi gia công

#### 2.4. Thiết kế mô hình máy cắt tia nước công suất nhỏ

Để hiện thực hóa mô hình máy cắt tia nước công suất nhỏ đã đề xuất, trước hết cần lựa chọn phương án thiết kế và chế tạo hợp lý cho kết cấu cơ khí và hệ thống truyền động của máy. Phương án này phải đảm bảo các yêu cầu cơ bản về độ cứng vững, độ chính xác chuyển động và hành trình làm việc phù hợp với kích thước chi tiết gia công, đồng thời đảm bảo tính đơn giản trong gia công – lắp ráp và chi phí chế tạo thấp, phù hợp với điều kiện trang thiết bị hiện có tại cơ sở đào tạo. Các nguyên tắc này được tham khảo từ các tài liệu về công nghệ chế tạo máy và thiết kế hệ thống CNC [8-10]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu tiến hành phân tích và lựa chọn phương án thiết kế tối ưu cho mô hình máy cắt tia nước, đồng thời xem xét các yếu tố liên quan đến dòng chảy và đặc tính của tia nước dựa trên cơ sở lý thuyết cơ học lưu chất [11]. Kết quả thiết kế mô hình máy cắt tia nước

<https://doi.org/10.65153/h528xt37>

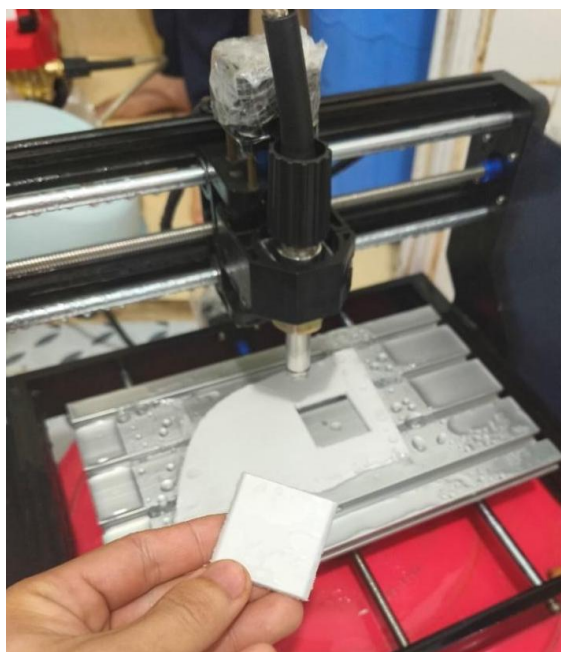
công suất nhỏ sử dụng phần mềm Autodesk Inventor được thể hiện trong **Hình 5a**. Kết quả chế tạo máy cắt tia nước công suất nhỏ được thể hiện trong **Hình 5b**



**Hình 5.** Mô hình 3D máy cắt tia nước: a) Mô hình 3D thiết kế trên phần mềm CAD; b) Mô hình máy sau khi chế tạo

### 3. THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

Để thực nghiệm đánh giá khả năng công nghệ của máy cắt tia nước công suất nhỏ, nhóm nghiên cứu sử dụng vật liệu Fomex có chiều dày 2 mm với tiết diện cắt là hình vuông có kích thước 20mm x 20 mm. Kết quả thực nghiệm được thể hiện như trong **Hình 6**.



**Hình 6.** Sản phẩm sau khi cắt



Sau khi tiến hành cắt thử nghiệm trên vật liệu Fomex, có thể nhận thấy máy hoạt động ổn định, đường chạy dao bám đúng quỹ đạo đã lập trình. Sản phẩm sau cắt cho biên dạng khá chính xác, các cạnh vuông góc rõ ràng, không xuất hiện hiện tượng cháy xém, biến dạng nhiệt hay cong vênh tằm – đây là ưu điểm nổi bật so với các phương pháp cắt sinh nhiệt. Bề mặt vết cắt tương đối phẳng, độ sứt mẻ mép nhỏ, lớp bột bên trong tấm Fomex không bị bóc tách nhiều. Kích thước chi tiết đo được sai lệch không lớn so với kích thước thiết kế, nằm trong phạm vi chấp nhận được đối với mô hình máy công suất nhỏ. Tuy nhiên, tại một số vị trí góc chuyển hướng và đoạn bắt đầu/kết thúc đường cắt vẫn còn dấu hiệu rung nhẹ, bề mặt chưa thật “sắc”, cho thấy cần tiếp tục tối ưu các thông số như áp suất nước, tốc độ tiến dao và khoảng cách từ đầu phun tới bề mặt vật liệu để nâng cao hơn nữa chất lượng vết cắt.

#### 4. KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Nghiên cứu đã thực hiện việc tính toán, thiết kế, chế tạo và thử nghiệm mô hình máy cắt tia nước công suất nhỏ nhằm gia công các vật liệu mềm. Kết quả cho thấy mô hình máy CNC sử dụng cơ cấu truyền động vít me – động cơ bước theo ba trục X, Y, Z có khả năng làm việc ổn định, đáp ứng được yêu cầu cơ bản về độ chính xác hình học và chất lượng đường cắt. Thử nghiệm trên vật liệu Fomex cho thấy máy có thể tạo ra biên dạng cắt bám sát quỹ đạo lập trình, mép cắt tương đối phẳng, bề mặt vật liệu không xuất hiện ảnh hưởng nhiệt hay hư hại đáng kể, qua đó khẳng định tính khả thi của phương pháp cắt tia nước đối với nhóm vật liệu mềm.

Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra rằng các thông số công nghệ như áp suất nước, tốc độ tiến dao và khoảng cách từ đầu phun đến bề mặt vật liệu có ảnh hưởng rõ rệt đến chất lượng bề mặt cắt và độ chính xác kích thước. Điều này cho thấy việc lựa chọn và tối ưu hóa chế độ cắt là yếu tố quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả gia công và mở rộng khả năng ứng dụng của hệ thống.

Trong thời gian tới, nghiên cứu có thể được tiếp tục theo hướng hoàn thiện hệ thống điều khiển và kết cấu cơ khí của máy, đặc biệt là tăng độ cứng vững của khung và bàn máy, cải tiến cơ cấu dẫn hướng và truyền động nhằm hạn chế hiện tượng trượt bước, rung động và sai số vị trí trong quá trình gia công. Đồng thời, cần mở rộng thử nghiệm trên nhiều loại vật liệu mềm khác như cao su, da, vải và xốp, cũng như xây dựng mô hình tối ưu hóa thông số công nghệ để xác lập chế độ cắt phù hợp cho từng loại vật liệu. Đây sẽ là cơ sở quan trọng để nâng cao tính ứng dụng thực tiễn của mô hình trong đào tạo, nghiên cứu và sản xuất quy mô nhỏ.



### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hashish, M. (1989). *Machining with Abrasive Waterjets*. Journal of Engineering Materials and Technology.
- [2]. Momber , A. W., & Kovacevic, R. (1998). *Principles of Abrasive Waterjet Machining*. Springer.
- [3]. Kulekci, M. (2009). *Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications*. International Journal of Machine Tools & Manufacture.
- [4]. Maurel, B., et al. (2014). *High-pressure waterjet cutting of metals*. Journal of Manufacturing Processes.
- [5]. Website : <https://smartsheetmetal.com.vn/tin-tuc/tim-hieu-ve-nguyen-ly-hoat-dong-cua-may-cat-kim-loai-bang-nuoc.html>
- [6]. Bùi Văn hưng, Ngô Anh Vũ & Khương Quang Sơn (2022). *Xây dựng mô hình thực nghiệm dự đoán chiều sâu phay bằng tia nước chứa hạt mài trên hợp kim nhôm*. Tạp chí KHCN, ĐH Công nghiệp Hà Nội, website: <https://doi.org/10.57001/huinh5804.90>.
- [7]. David A. Summer (2003). *Waterjetting Technology*, E&FN Spon, An Imprint of Chapman& Hall.
- [8]. Trần Văn Địch (2004). *Giáo trình Công nghệ CNC*, NXB khoa học và kỹ thuật Hà nội.
- [9]. Nguyễn Đắc Lộc (2007). *Sổ tay công nghệ chế tạo máy tập 1*, NXB Khoa học kỹ thuật.
- [10]. Nguyễn Đắc Lộc (2005). *Sổ tay công nghệ chế tạo máy tập 2*, NXB Khoa học kỹ thuật.
- [11]. Phạm Văn Vĩnh (1994). *Cơ học lưu chất ứng dụng*, Trường ĐH Giao thông vận tải Hà Nội.