

THIẾT KẾ MODULE ĐẨY ỐNG CHO MÁY UỐN

DESIGN OF A TUBE PUSHING MODULE FOR A BENDING MACHINE

Trần Công Hiếu, Nguyễn Hải Hoàn, Đỗ Văn Hiến, Nguyễn Quang Sáng*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21144063@student.hcmute.edu.vn;

hoannh@hcmute.edu.vn;

hiendv@hcmute.edu.vn;

*sangnq@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Máy uốn ống là thiết bị chuyên dụng, được sử dụng để tạo hình các loại ống kim loại hoặc nhựa theo góc độ yêu cầu, đáp ứng nhu cầu của nhiều ngành công nghiệp như cơ khí, xây dựng và sản xuất. Thiết bị này hoạt động dựa trên lực cơ học, thủy lực hoặc điện, đảm bảo uốn ống mà không gây biến dạng hoặc hư hỏng vật liệu. Máy uốn ống đa dạng về loại hình, từ máy thủ công đơn giản đến các hệ thống tự động hóa tiên tiến, mang lại hiệu suất cao và độ chính xác vượt trội. Nhờ khả năng tạo ra các góc uốn chính xác, máy uốn ống đóng vai trò thiết yếu trong các quy trình sản xuất, lắp đặt và gia công. Việc ứng dụng công nghệ hiện đại vào máy uốn ống không chỉ nâng cao chất lượng sản phẩm mà còn tối ưu hóa thời gian và chi phí sản xuất. Với sự phát triển không ngừng của kỹ thuật, máy uốn ống tiếp tục được cải tiến để đáp ứng các yêu cầu ngày càng khắt khe của ngành công nghiệp, góp phần quan trọng vào sự tiến bộ của các lĩnh vực liên quan.

Từ khóa: Uốn ống; Biến dạng dẻo; Chi tiết dạng ống; Thiết kế cơ cấu đẩy ống; Thiết kế 3D.

ABSTRACT

A pipe bending machine is an essential tool in manufacturing and construction, used to bend pipes and tubes with precision. These machines help shape materials without causing damage, ensuring smooth curves and accurate angles. There are various types, including manual, hydraulic, and CNC-controlled models, each suited for different applications. Industries such as automotive, aerospace, and plumbing rely on pipe bending machines for efficiency and consistency. Advanced technology has improved automation, reducing labor costs and increasing production speed. With their versatility and reliability, pipe bending machines play a crucial role in modern engineering and infrastructure development.

Keywords: Pipe bending machine design; 3D CAD; 3D pipe bending machine model; Pipe pushing module in pipe bending machine; Mechanical design. 

1. TỔNG QUAN

Trong lĩnh vực kỹ thuật cơ khí, thiết kế module đẩy ống là một nhiệm vụ quan trọng, góp phần tối ưu hóa hiệu suất của các hệ thống máy uốn ống được sử dụng rộng rãi trong sản xuất công nghiệp, xây dựng và các ngành kỹ thuật khác [1]. Module đẩy ống đóng vai trò thiết yếu trong việc đảm bảo quá trình dịch chuyển ống diễn ra chính xác, ổn định và hiệu quả, từ đó nâng cao chất lượng sản phẩm, giảm thời gian gia công và tối ưu hóa quy trình sản xuất [2]. Với sự phát triển không ngừng của công nghệ, các yêu cầu về độ chính xác, độ bền và khả năng thích nghi của module đẩy ống ngày càng được nâng cao, đòi hỏi các nhà thiết kế phải tích hợp các giải pháp kỹ thuật tiên tiến vào quá trình phát triển [3]. Bài viết này trình bày một cái nhìn tổng quan về các khía cạnh lý thuyết, thực tiễn và công nghệ liên quan đến thiết kế module đẩy ống, đồng thời thảo luận chi tiết về các yếu tố quan trọng như lực đẩy, vật liệu, độ tin cậy và chi phí sản xuất.

Module đẩy ống không chỉ là một thành phần cơ khí đơn thuần mà còn là một hệ thống tích hợp, đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về cơ học, vật liệu học và công nghệ điều khiển. Các ứng dụng thực tiễn của module này rất đa dạng, từ sản xuất ống dẫn dầu khí, hệ thống cấp nước, đến các cấu kiện xây dựng phức tạp [4]. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các giải pháp thiết kế tối ưu cho module đẩy ống không chỉ mang lại lợi ích kinh tế mà còn đóng góp vào sự tiến bộ của ngành kỹ thuật cơ khí nói chung [5].

(*) Vai trò của module đẩy ống trong máy uốn

Module đẩy ống là một cơ cấu cơ khí được thiết kế để tạo ra lực đẩy cần thiết, giúp dịch chuyển ống qua các công đoạn uốn, định

hình hoặc xử lý khác trong máy uốn [6]. Trong các hệ thống máy uốn, module này chịu trách nhiệm đảm bảo vị trí của ống được định vị chính xác và lực đẩy được duy trì ổn định, nhằm tránh các lỗi kỹ thuật như biến dạng vật liệu, lệch tâm hoặc nứt gãy [7]. Theo nghiên cứu, hiệu suất của module đẩy ống ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng thành phẩm, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao như sản xuất ống dẫn dầu khí hoặc các cấu kiện xây dựng [8].

Cơ cấu đẩy ống thường bao gồm các thành phần chính như động cơ truyền động, hệ thống dẫn hướng, bộ truyền lực và các cảm biến điều khiển [9]. Các thành phần này cần được thiết kế đồng bộ để đảm bảo khả năng vận hành liên tục trong điều kiện tải trọng cao và môi trường khắc nghiệt, chẳng hạn như nhiệt độ cao, độ ẩm hoặc sự hiện diện của hóa chất ăn mòn [10]. Hơn nữa, module đẩy ống phải đáp ứng các yêu cầu về tốc độ, lực đẩy và khả năng điều chỉnh linh hoạt để phù hợp với nhiều loại ống có kích thước, hình dạng và vật liệu khác nhau, từ kim loại như thép, nhôm đến nhựa công nghiệp [11].

(*) Các yếu tố thiết kế quan trọng

(+) Lực đẩy và tính toán cơ học

Việc xác định lực đẩy là một trong những bước quan trọng nhất trong thiết kế module đẩy ống. Lực đẩy cần được tính toán sao cho đủ lớn để vượt qua lực cản ma sát và các lực kháng khác trong quá trình dịch chuyển ống, nhưng không được vượt quá ngưỡng gây hư hỏng vật liệu hoặc làm mất ổn định hệ thống [12]. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc sử dụng các mô hình cơ học và phần mềm mô phỏng như ANSYS hoặc Solidworks có thể hỗ trợ tối ưu hóa việc tính toán lực đẩy, từ đó giảm

thiếu rủi ro trong quá trình vận hành [13].

Phân tích động lực học của cơ cấu đẩy ống cũng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo hiệu suất. Các yếu tố như gia tốc, quán tính và rung động cần được xem xét kỹ lưỡng để đảm bảo module hoạt động ổn định và không gây ra hiện tượng mài mòn quá mức [14]. Việc tích hợp các bộ giảm chấn hoặc các cơ cấu giảm rung vào thiết kế có thể cải thiện đáng kể hiệu suất và kéo dài tuổi thọ của module, đặc biệt trong các ứng dụng công nghiệp liên tục [14].

(+) Lựa chọn vật liệu

Vật liệu sử dụng cho module đẩy ống cần đáp ứng các yêu cầu nghiêm ngặt về độ bền, độ cứng và khả năng chống ăn mòn, đặc biệt khi module hoạt động trong các môi trường khắc nghiệt như nhà máy hóa chất, môi trường biển hoặc ngoài trời [13]. Thép hợp kim, nhôm và các vật liệu composite tiên tiến thường được ưu tiên nhờ đặc tính cơ học vượt trội, khả năng chịu tải cao và trọng lượng nhẹ, giúp giảm tải trọng lên hệ thống truyền động [14]. Tuy nhiên, chi phí của các vật liệu này cũng là một yếu tố cần cân nhắc, đặc biệt trong các ứng dụng sản xuất hàng loạt, nơi tối ưu hóa chi phí là ưu tiên hàng đầu [13].

Việc lựa chọn vật liệu không chỉ dựa trên đặc tính cơ học mà còn cần xem xét khả năng gia công, khả năng tái chế và tác động môi trường. Các nghiên cứu gần đây đã nhấn mạnh tầm quan trọng của việc sử dụng vật liệu bền vững trong thiết kế cơ khí để đáp ứng các tiêu chuẩn môi trường ngày càng khắt khe [14].

(+) Độ tin cậy và tuổi thọ

Độ tin cậy của module đẩy ống là yếu tố quyết định khả năng vận hành liên tục của

toàn bộ hệ thống máy uốn. Các phương pháp bảo trì dự đoán, kết hợp với việc tích hợp cảm biến giám sát trạng thái, có thể phát hiện sớm các dấu hiệu hỏng hóc, từ đó kéo dài tuổi thọ của module và giảm thiểu nguy cơ ngừng máy đột xuất [13]. Ngoài ra, việc thiết kế các cơ cấu có khả năng chịu tải dư cũng giúp tăng cường độ bền, đặc biệt trong các điều kiện vận hành không lý tưởng như dao động nhiệt độ hoặc tải trọng thay đổi liên tục [14].

(+) Tối ưu hóa chi phí

Trong bối cảnh cạnh tranh công nghiệp, tối ưu hóa chi phí thiết kế và sản xuất module đẩy ống là một yêu cầu tất yếu. Các phương pháp như thiết kế mô-đun hóa, sử dụng linh kiện tiêu chuẩn và áp dụng công nghệ sản xuất tiên tiến như in 3D có thể giảm đáng kể chi phí mà vẫn đảm bảo chất lượng [13]. Việc sử dụng các kỹ thuật tối ưu hóa đa mục tiêu, cân bằng giữa hiệu suất, độ bền và chi phí, cũng được xem là một hướng tiếp cận hiệu quả trong thiết kế module đẩy ống [14].

(*) Các tiến bộ công nghệ gần đây

Sự phát triển của công nghệ đã mang lại nhiều cải tiến đáng kể trong thiết kế module đẩy ống. Một trong những xu hướng nổi bật là việc tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy vào quá trình thiết kế và vận hành [11]. Các thuật toán AI có thể phân tích dữ liệu vận hành, dự đoán các lỗi tiềm ẩn và đề xuất các giải pháp tối ưu, từ đó nâng cao hiệu suất và giảm thời gian ngừng máy [11].

Hệ thống điều khiển tự động và robot hóa cũng đang thay đổi cách thức hoạt động của module đẩy ống. Các hệ thống này cho phép điều chỉnh lực đẩy và tốc độ theo thời gian thực, đảm bảo độ chính xác cao và khả năng

năng thích nghi với các yêu cầu sản xuất thay đổi [12]. Ngoài ra, việc sử dụng các vật liệu thông minh, chẳng hạn như hợp kim nhớ hình, đã mở ra tiềm năng cải thiện khả năng thích nghi của module trong các điều kiện vận hành phức tạp, chẳng hạn như thay đổi nhiệt độ hoặc áp suất [13].

(*) Thách thức và định hướng nghiên cứu

Mặc dù đạt được nhiều tiến bộ, thiết kế module đẩy ống vẫn đối mặt với các thách thức lớn. Một trong những vấn đề quan trọng là làm thế nào để cân bằng giữa hiệu suất cao và chi phí thấp, đặc biệt trong các ứng dụng sản xuất quy mô lớn [14]. Việc đảm bảo khả năng tương thích của module với các loại ống có kích thước, vật liệu và hình dạng khác nhau cũng đòi hỏi các giải pháp thiết kế linh hoạt hơn [13].

Trong tương lai, các nghiên cứu cần tập trung vào phát triển các module đẩy ống thông minh, có khả năng tự điều chỉnh dựa trên dữ liệu thời gian thực thu thập từ cảm biến và hệ thống điều khiển [12]. Đồng thời, việc khám phá các vật liệu mới, chẳng hạn như vật liệu nano hoặc composite cải tiến, cùng với các công nghệ sản xuất tiên tiến như in 3D kim loại, sẽ tiếp tục là động lực thúc đẩy sự đổi mới trong lĩnh vực này [11]. Các giải pháp thiết kế bền vững, giảm thiểu tác động môi trường, cũng cần được ưu tiên để đáp ứng các yêu cầu toàn cầu về phát triển bền vững [14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Máy uốn ống hoạt động dựa trên nguyên lý biến dạng dẻo của vật liệu, giúp ống đạt được hình dạng mong muốn mà không làm mất đi độ bền. Khi uốn, ống trải qua quá trình biến dạng đàn hồi và dẻo, tùy vào lực tác động và đặc

tính vật liệu. Bán kính uốn, phương pháp uốn và tính chất vật liệu đều ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm. Có nhiều phương pháp uốn như uốn quay trục, uốn ép khuôn, hay uốn cảm ứng nhiệt, mỗi phương pháp có ưu điểm riêng. Việc kiểm soát ma sát và lực tác động đảm bảo quá trình uốn diễn ra chính xác, hạn chế nứt gãy, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật trong sản xuất và xây dựng.

2.1. Quá trình thiết kế module đẩy ống trong máy uốn ống bằng CAD 3D

Phần mềm 3D được ứng dụng rộng rãi trong thiết kế module đẩy ống của máy uốn ống, giúp tối ưu hóa cấu trúc và cơ chế hoạt động. Nhờ mô phỏng chính xác, kỹ sư có thể kiểm tra lực tác động, tối ưu đường dẫn chuyển động và dự đoán biến dạng vật liệu, đảm bảo hiệu suất cao và giảm chi phí sản xuất.

Trước khi bắt tay vào thiết kế, cần xác định các yêu cầu quan trọng như:

- + Đường kính ống: Phụ thuộc vào lực uốn và kích thước bộ truyền động;
- + Kiểu ống: Tròn, vuông;
- + Vật liệu: Nhôm, thép, đồng, Inox.

2.2. Nguyên lý hoạt động

Tùy theo yêu cầu của sản phẩm cần đạt được có thể áp dụng các nguyên lý truyền động sau đây vào thiết kế module đẩy ống trong máy uốn ống:

- Truyền động thủy lực – Sử dụng xi lanh thủy lực để tạo lực đẩy mạnh và ổn định, phù hợp với các ứng dụng yêu cầu lực lớn và điều khiển chính xác.

- Truyền động khí nén – Được dùng khi cần tốc độ cao và lực trung bình, thường áp dụng trong các hệ thống tự động hóa với chi phí vận hành thấp.

- Truyền động điện – Dùng động cơ điện kết hợp cơ cấu vít me hoặc bánh răng để kiểm soát chuyển động chính xác, giúp cải thiện hiệu suất và khả năng lặp trình tự động.

- Truyền động cơ khí – Sử dụng cam, lò xo hoặc hệ bánh răng giúp đảm bảo tính đơn giản, giảm chi phí nhưng có thể hạn chế về khả năng điều chỉnh lực.

- Truyền động servo – Kết hợp cảm biến và bộ điều khiển servo để duy trì vị trí và tốc độ ổn định, nâng cao độ chính xác trong quá trình uốn.

2.3. Xây dựng mô hình 3D

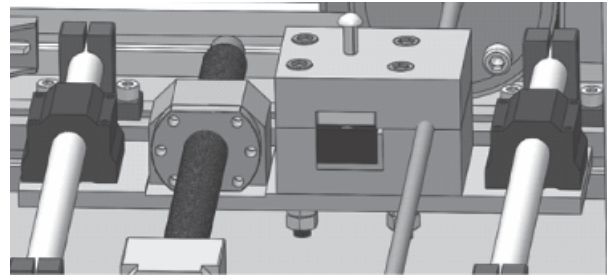
Mô hình 3D được dựng và thử nghiệm số với các thông số đầu vào tiêu chuẩn cho các loại ống nhôm và thép không gỉ, Inox. Kết quả cho thấy:

- Module tạo ra lực đủ lớn để di chuyển ống mà không gây biến dạng hoặc lệch hướng.

- Có khả năng thay đổi tốc độ đẩy để phù hợp với từng loại vật liệu và yêu cầu gia công.

- Module kiểm soát vị trí đẩy chính xác để đảm bảo ống được đưa vào đúng vị trí uốn.

- Các bộ phận của module được chế tạo từ vật liệu chịu lực tốt để đảm bảo tuổi thọ dài và độ bền cao.



Hình 1. Module đẩy ống bằng vít me

2.4. Kiểm tra và mô phỏng hoạt động

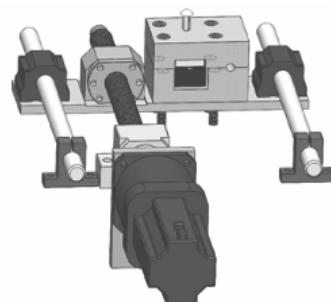
Sử dụng mô hình 3D để thực hiện mô phỏng thông qua các công cụ như Ansys:

- Phân bố lực và ứng suất – Kiểm tra lực tác động lên module, giúp xác định vùng chịu tải cao và tránh hiện tượng biến dạng quá mức.

- Độ bền vật liệu – Phân tích mô phỏng theo tiêu chuẩn độ bền, đánh giá khả năng chịu lực của các thành phần như khung đỡ, xi lanh và bộ truyền động.

- Chuyển động và động lực học – Mô phỏng sự dịch chuyển của module đẩy, kiểm tra tốc độ, độ chính xác và khả năng hoạt động ổn định trong điều kiện vận hành thực tế.

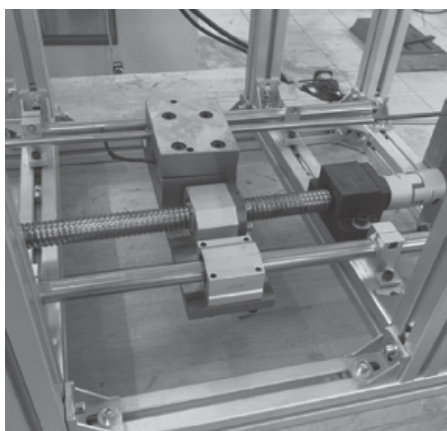
- Kiểm tra nhiệt độ và ma sát – Đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ và ma sát trong quá trình uốn, đảm bảo tuổi thọ của các bộ phận cơ khí.



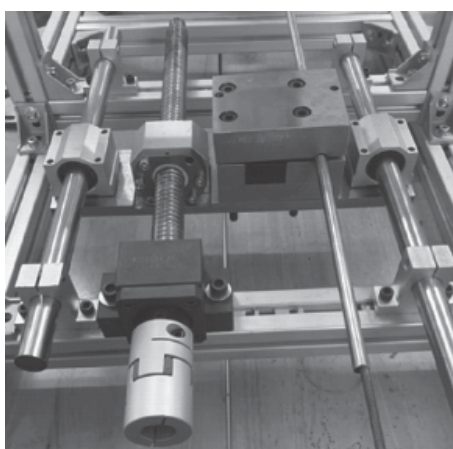
Hình 2. Hệ thống dẫn động cho module đẩy ống

3. THỰC NGHIỆM VÀ KIỂM TRA THIẾT KẾ

Việc ứng dụng phần mềm thiết kế 3D vào quá trình phát triển module đẩy ống cho máy uốn ống mang lại nhiều lợi ích vượt trội, giúp kỹ sư tối ưu hóa thiết kế và nâng cao hiệu quả sản xuất. Các phần mềm như Solidworks, ANSYS hay CATIA cung cấp khả năng mô phỏng trực quan, cho phép phân tích cấu trúc, đánh giá lực tác động và tinh chỉnh thiết kế trước khi chế tạo. Điều này giúp giảm đáng kể chi phí liên quan đến thử nghiệm thực tế, đồng thời rút ngắn thời gian phát triển sản phẩm, đáp ứng các yêu cầu khắt khe của ngành kỹ thuật cơ khí.



Hình 3. Lắp ráp bộ phận giữ ống



Hình 4. Lắp khớp nối cho vít me

Một ưu điểm nổi bật của phần mềm 3D là khả năng mô phỏng động lực học, hỗ trợ kỹ sư kiểm tra và điều chỉnh cơ chế truyền động của module đẩy ống. Các phân tích về gia tốc, quán tính và rung động đảm bảo module hoạt động ổn định, tránh các lỗi như lệch tâm hoặc biến dạng ống trong quá trình uốn. Hơn nữa, phần mềm 3D giúp phát hiện sớm các sai sót thiết kế, chẳng hạn như điểm yếu cấu trúc hoặc sự không tương thích giữa các bộ phận. Nhờ đó, độ bền và tuổi thọ của thiết bị được cải thiện đáng kể, đảm bảo sản phẩm cuối cùng đạt chất lượng tối ưu và vận hành tin cậy trong các ứng dụng thực tế, từ sản xuất ống dẫn dầu khí đến cấu kiện xây dựng.



Hình 5. Module đẩy ống được lắp lên thân máy

Quá trình lắp ráp module đẩy ống cũng được hỗ trợ mạnh mẽ bởi thiết kế 3D. Mô hình 3D và bản vẽ chi tiết cung cấp hướng dẫn chính xác cho việc lắp ráp các bộ phận quan trọng. Cụ thể, lắp ráp vít me (Hình 3) yêu cầu độ chính xác cao để đảm bảo truyền động mượt mà, tránh mài mòn hoặc kẹt cơ cấu. Bộ phận giữ ống (Hình 4) được thiết kế để cố định ống chắc chắn, ngăn ngừa dịch chuyển không mong muốn trong quá trình uốn, từ đó tăng độ chính

xác của sản phẩm. Khớp nối cho vít me (Hình 5) đóng vai trò kết nối các thành phần truyền động, đòi hỏi sự ăn khớp hoàn hảo để duy trì hiệu suất ổn định. Cuối cùng, việc lắp đặt module đẩy ống lên thân máy (Hình 6) dựa trên mô phỏng 3D, đảm bảo sự tương thích và ổn định của toàn bộ hệ thống máy uốn.

Nhờ phần mềm 3D, kỹ sư không chỉ cải thiện hiệu quả thiết kế mà còn giảm thiểu rủi ro trong sản xuất. Kết quả là module đẩy ống đạt được sự cân bằng giữa hiệu suất, độ bền và chi phí, đáp ứng các tiêu chuẩn công nghiệp hiện đại. Công nghệ này tiếp tục đóng vai trò quan trọng trong việc đổi mới và nâng cao chất lượng các hệ thống máy uốn ống.

4. CÁC LƯU Ý KỸ THUẬT KHI THIẾT KẾ MODULE ĐẨY ỐNG TRONG MÁY UỐN ỐNG

- Cơ cấu truyền động – Lựa chọn phương pháp truyền động phù hợp (thủy lực, khí nén, điện, servo) để đảm bảo lực đẩy ổn định và chính xác.

- Kết cấu chịu lực – Thiết kế khung và bộ phận chịu lực sao cho đáp ứng được tải trọng và tránh biến dạng trong quá trình vận hành.

- Tối ưu hóa vật liệu – Chọn vật liệu có độ bền cao, khả năng chịu mài mòn tốt, đảm bảo tuổi thọ của module.

- Độ chính xác gia công – Đảm bảo sai số gia công nhỏ để module hoạt động trơn tru, tránh rung lắc hoặc sai lệch vị trí.

- Tích hợp cảm biến và điều khiển – Ứng dụng hệ thống cảm biến để theo dõi vị trí và tốc độ, giúp điều chỉnh động lực học chính xác.

- Phân tích động học và ứng suất – Sử dụng phần mềm mô phỏng như Ansys để kiểm tra độ bền, vùng ứng suất cao và tối ưu hóa thiết kế.

- Kiểm soát ma sát và hao mòn – Đánh giá hệ số ma sát, bôi trơn các bộ phận chuyển động để giảm lực cản và tránh hao mòn nhanh.

5. KẾT LUẬN

Việc thiết kế module đẩy ống cho máy uốn ống là một bước quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả sản xuất và đảm bảo độ chính xác trong quá trình gia công. Module này không chỉ cần đáp ứng yêu cầu về lực đẩy mạnh, tốc độ điều chỉnh linh hoạt và độ chính xác cao mà còn phải có kết cấu bền vững để đảm bảo hoạt động ổn định lâu dài. Bên cạnh đó, việc tích hợp hệ thống điều khiển tự động và cảm biến thông minh giúp tối ưu hóa hiệu suất vận hành, giảm thiểu sai số và nâng cao tính linh hoạt khi xử lý nhiều loại ống khác nhau.

Nhìn chung, một module đẩy ống được thiết kế tốt sẽ góp phần quan trọng vào quá trình uốn ống, đảm bảo chất lượng sản phẩm, giảm thời gian sản xuất và tối ưu hóa nguồn lực. Việc tiếp tục nghiên cứu và cải tiến module này theo hướng tự động hóa và nâng cao độ chính xác sẽ mang lại lợi ích lớn cho các ngành công nghiệp liên quan.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Văn Minh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Trần Công Hiếu, Nguyễn Hải Hoàn, Đỗ Văn Hiến, Nguyễn Quang Sáng.



Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025 – 350.❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**

Ngày phản biện: **16/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Ahmadi, S., Eivani, A. R., & Akbarzadeh, A. (2009), “*Experimental and analytical studies on the prediction of forming limit diagrams*”. Computational Materials Science, 44(5), 1252-1257.
- [2]. Armstrong, D. E., Dunn, A. J. J., & Dunn, T. J. J. (1954), “*Cold tube bending*” (U.S. Patent No. 2907102).
- [3]. Barlat, F. (1987), “*Crystallographic texture, anisotropic yield surfaces and forming limits of sheet metals*”. Materials Science and Engineering, 91, 55-72.
- [4]. Chen, H., Wang, H., El-Aty, A. A., Qin, Y., Li, J., Zhang, Y., Li, T., & Guo, X. (2021), “*Impact of bending dies with different friction forms on forming force and quality of pipes manufactured by free bending technology*”. Chinese Journal of Aeronautics, 34, 253-264.
- [5]. Cheng, C., Chen, H., Guo, J., Guo, X., & Shi, Y. (2021), “*Investigation on the influence of mandrel on the forming quality of thin-walled pipe during free bending process*”. Journal of Manufacturing Processes, 72, 215-226.
- [6]. Cheng, X., Guo, X., Tao, J., Xu, Y., El-Aty, A. A., & Liu, H. (2019), “*Investigation of the effect of relative thickness (t/d) on the formability of the AA6061 pipes during free bending process*”. International Journal of Mechanical Sciences, 160, 103-113.
- [7]. El-Aty, A. A., Guo, X., Lee, M.-G., Tao, J., Hou, Y., Hu, S., Li, T., Wu, C., & Yang, Q. (2023), “*A review on flexibility of free bending forming technology for manufacturing thin-walled complex-shaped metallic pipes*”. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 6(2), 165-188.
- [8]. El Megharbel, A., El Nasser, G. A., & El Domiaty, A. (2008), “*Bending of pipe and section made of strain-hardening materials*”. Journal of Materials Processing Technology, 203, 372-380.
- [9]. Guo, X., Xiong, H., Li, H., Xu, Y., Ma, Z., El-Aty, A. A., Ma, Y., & Jin, K. (2018), “*Forming characteristics of pipe free-bending with small bending radii based on a new spherical connection*”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 133, 72-84.
- [10]. Guo, X., Xiong, H., Xu, Y., El-Aty, A. A., Ma, Y., Zhao, Y., & Zhang, S. (2018), “*U-R relationship prediction method for aluminum alloy circular pipe free-bending process based on sensitivity analysis of material parameters*”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99, 1967-1977.
- [11]. Jiang, J., Guo, X., Shen, Y., Xu, Y., Wang, Z., Li, H., & Tao, J. (2023), “*Effect of bending radius on deformation behavior of H62 brass tubes in a less constrained free bending process*”. International Journal of Material Forming, 16(50).
- [12]. Li, Y., Li, A., Yue, Z., Qiu, L., Badreddine, H., Gao, J., & Wang, Y. (2020), “*Springback prediction of AL6061 pipe in free bending process based on finite element and analytic methods*”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 109, 1789-1799.
- [13]. Michalczyk, J., Gontarz, A., Wiewiórowska, S., & Winiarski, G. (2023), “*Mandrel-free bending of tubes with small radii: A theoretical and experimental study*”. Advances in Science and Technology Research Journal, 17(4), 189-205.
- [14]. Murata, M., Kuboki, T., Takahashi, K., et al. (2008), “*Effect of hardening exponent on tube bending*”. Journal of Materials Processing Technology, 201, 189-192.