

ỨNG DỤNG PHẦN MỀM CATIA MÔ PHỎNG VÀ KIỂM BỀN PISTON ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG

CATIA SOFTWARE APPLICATION TO SIMULATE AND TEST PISTON DURABILITY OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Dương Hải Nam*, Vũ Thị Phụng

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế – Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: dhnam@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày việc ứng dụng phần mềm CATIA V5-R21 trong thiết kế 3D, mô phỏng và kiểm nghiệm bền cho piston động cơ đốt trong. Phương pháp nghiên cứu bao gồm: (i) xây dựng mô hình 3D piston dựa trên thông số kỹ thuật động cơ thực tế; (ii) sử dụng các mô-đun Part Design, Assembly Design để thiết kế và lắp ghép; (iii) áp dụng Generative Structural Analysis để tính toán và phân tích phân bố ứng suất, biến dạng của piston dưới các điều kiện tải thực tế. Kết quả mô phỏng thể hiện các vị trí tập trung ứng suất và biến dạng lớn nhất, từ đó đánh giá độ bền và đề xuất các cải tiến thiết kế phù hợp. Nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng CATIA giúp nâng cao độ chính xác thiết kế, giảm thời gian thử nghiệm, góp phần tối ưu hóa quy trình phát triển sản phẩm cơ khí và nâng cao chất lượng đào tạo kỹ sư ngành cơ khí.

Từ khóa: CATIA V5; Piston; Động cơ đốt trong; Mô phỏng; Kiểm nghiệm bền.

ABSTRACT

The paper presents the application of CATIA V5-R21 software in 3D design, simulation and durability testing for internal combustion engine pistons. The research method includes: (i) building a 3D piston model based on actual engine specifications; (ii) using Part Design and Assembly Design modules for design and assembly; (iii) applying Generative Structural Analysis to calculate and analyze the stress and deformation distribution of the piston under actual load conditions. The simulation results show the locations of the largest stress and deformation concentrations, thereby evaluating the durability and proposing appropriate design improvements. The study shows that the application of CATIA helps to improve design accuracy, reduce testing time, contribute to optimizing the mechanical product development process and improving the quality of mechanical engineering training.

Keywords: CATIA V5; Piston; Internal combustion engine; Simulation; Durability testing. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh khoa học – công nghệ phát triển mạnh mẽ, đặc biệt là lĩnh vực thiết kế cơ khí và công nghệ thông tin, việc ứng dụng các công cụ CAD/CAE hiện đại để thiết kế và kiểm nghiệm chi tiết máy trở nên ngày càng cấp thiết. Đối với động cơ đốt trong, piston là một chi tiết chịu tải trọng cơ – nhiệt rất lớn, đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo hiệu suất, độ bền và tuổi thọ của động cơ [1, 4, 5]. Vì vậy, việc tính toán, mô phỏng và kiểm nghiệm bền piston trước khi chế tạo là yêu cầu bắt buộc nhằm tối ưu hóa thiết kế, giảm chi phí và thời gian thử nghiệm thực tế [1, 2].

Trên thế giới, các phần mềm thiết kế và mô phỏng 3D như CATIA, SolidWorks, ANSYS đã được áp dụng rộng rãi trong công nghiệp chế tạo. CATIA V5-R21, với khả năng thiết kế 3D, mô phỏng động học và phân tích bền chi tiết, được đánh giá là công cụ mạnh mẽ trong lĩnh vực cơ khí – động lực [2, 3]. Tuy nhiên, tại Việt Nam, việc sử dụng CATIA trong đào tạo và nghiên cứu vẫn chưa phổ biến, sinh viên và kỹ sư trẻ còn hạn chế trong việc khai thác hết các tính năng của phần mềm [3].

Xuất phát từ thực tiễn đó, bài báo này tập trung vào “Ứng dụng phần mềm CATIA mô phỏng và kiểm bền piston động cơ đốt trong”. Nghiên cứu sử dụng thông số thực tế của động cơ xăng 1NZ-FE, tiến hành thiết kế 3D, phân tích bền bằng mô-đun Generative Structural Analysis của CATIA, từ đó đánh giá sự phân bố ứng suất và biến dạng của piston. Kết quả nghiên cứu không chỉ giúp nâng cao độ chính xác và tính khoa học trong thiết kế mà còn có giá trị ứng dụng trong đào tạo sinh viên ngành cơ khí và sản xuất thực tế.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đặc điểm làm việc của piston và sự cần thiết phải kiểm bền

Piston là chi tiết chuyển động tịnh tiến trong xi lanh, làm việc trực tiếp trong điều kiện áp suất và nhiệt độ cao. Cùng với nắp máy và xilanh, piston tạo thành buồng cháy, thực hiện chức năng nén hòa khí và tiếp nhận lực khí cháy truyền đến trục khuỷu thông qua thanh truyền [1].

Trong quá trình làm việc, piston chịu các dạng tải trọng chính: Áp suất khí cháy tác dụng lên đỉnh piston; tải trọng quán tính do chuyển động tịnh tiến qua lại ở tốc độ cao; tải nhiệt từ quá trình cháy, dẫn đến giãn nở không đồng đều trên thân piston.

Để đảm bảo tuổi thọ và hiệu suất, thiết kế piston cần tối ưu các thông số: chiều dày đỉnh, chiều cao, đường kính chốt, kết cấu rãnh xéc-măng,... Các công thức tính toán kích thước piston thường dựa trên các tiêu chuẩn về động cơ đốt trong [1, 4, 5].

Kiểm nghiệm bền là bước quan trọng trong thiết kế cơ khí nhằm đảm bảo chi tiết không bị phá hỏng dưới tác dụng của tải trọng làm việc. Một trong những tiêu chí phổ biến để đánh giá bền là ứng suất, giúp xác định vị trí tập trung ứng suất nguy hiểm nhất [1].

Với sự phát triển của công nghệ tính toán, phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element Analysis – FEA) được sử dụng rộng rãi để dự đoán ứng suất, biến dạng, và chuyển vị của chi tiết trong điều kiện tải thực tế mà không cần chế tạo mẫu thử [2].

2.2. Giới thiệu về phần mềm CATIA

CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) là phần mềm CAD/CAE/CAM do hãng Dassault Systèmes phát triển, hỗ trợ toàn diện cho việc thiết kế sản phẩm 3D, mô phỏng và lập trình gia công CNC [2, 3]. Trong lĩnh vực thiết kế cơ khí, phiên bản CATIA V5-R21 cung cấp nhiều công cụ mạnh mẽ, nổi bật là các module Part Design dùng để xây dựng mô hình 3D của chi tiết piston, Assembly Design phục vụ lắp ráp cụm cơ cấu khuỷu – thanh truyền – piston, và Generative Structural Analysis hỗ trợ mô phỏng, kiểm nghiệm bền bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm xác định ứng suất, biến dạng và độ bền chi tiết. Việc ứng dụng CATIA trong quá trình thiết kế và phân tích bền mang lại nhiều lợi ích, giúp rút ngắn thời gian phát triển và thử nghiệm sản phẩm, giảm chi phí chế tạo mẫu, đồng thời nâng cao độ chính xác cũng như khả năng tối ưu hóa thiết kế.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, mô hình piston được xây dựng và kiểm nghiệm bền thông qua chuỗi bước thiết kế – mô phỏng – phân tích trên phần mềm CATIA V5-R21. Trước hết, các thông số hình học và tải trọng của piston được thu thập từ động cơ xăng 1NZ-FE, bao gồm đường kính xi lanh, chiều cao piston, đường kính chốt, vị trí rãnh xéc-măng và các dữ liệu liên quan đến áp suất buồng cháy [1]. Dựa trên các thông số này, mô hình 3D piston được tạo lập trong CATIA thông qua module Part Design bằng cách dựng biên dạng 2D (Sketch), sau đó sử dụng các lệnh Pad, Pocket, Shaft để tạo khối và gia công các chi tiết như rãnh xéc-măng và lỗ chốt piston. Tiếp theo, module Assembly Design được sử dụng để lắp ráp cụm cơ cấu khuỷu – thanh truyền – piston nhằm kiểm tra

tính đồng bộ hình học và chuẩn bị cho quá trình phân tích [2, 3].

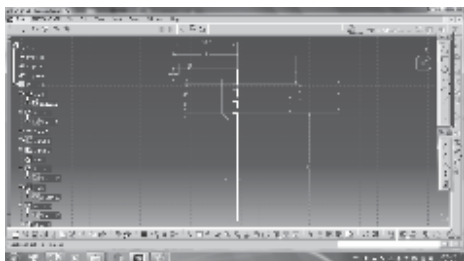
Sau khi hoàn thiện mô hình, bước kiểm nghiệm bền được thực hiện trong module Generative Structural Analysis. Quá trình này bao gồm: (i) lựa chọn vật liệu hợp kim nhôm cho piston từ thư viện của CATIA; (ii) định nghĩa điều kiện biên bằng cách cố định các bề mặt tiếp xúc phù hợp và áp dụng lực phân bố trên đỉnh piston theo giá trị áp suất cực đại trong chu trình công tác; (iii) chia lưới phần tử hữu hạn với kích thước mắt lưới tối ưu để đảm bảo độ chính xác và thời gian tính toán hợp lý; và (iv) chạy mô phỏng để thu được kết quả phân bố ứng suất, biến dạng và chuyển vị của piston. Các kết quả này được đánh giá dựa trên tiêu chí ứng suất và so sánh với giới hạn bền của vật liệu để xác định độ an toàn thiết kế [1, 2]. Phương pháp trên giúp mô phỏng chính xác điều kiện làm việc của piston mà không cần chế tạo mẫu thử, qua đó giảm thời gian và chi phí phát triển sản phẩm, đồng thời nâng cao khả năng ứng dụng CATIA trong đào tạo và nghiên cứu cơ khí.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

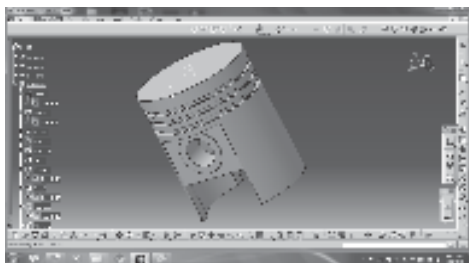
3.1. Kết quả thiết kế mô hình 3D piston

Từ các thông số piston động cơ xăng 1NZ-FE được tính toán và so sánh với chi tiết thực [6], mô hình 3D piston được thiết kế hoàn chỉnh trong CATIA V5-R21 (bảng 1). Quá trình xây dựng mô hình sử dụng các lệnh Sketch để vẽ biên dạng, Pad và Shaft để tạo khối, Pocket để gia công rãnh xéc-măng và lỗ chốt piston. Kích thước các phần liên quan như chốt piston, phanh hãm chốt cũng được thiết kế đảm bảo sự tương thích hình học và đồng bộ kích thước. Kết quả mô hình đạt yêu cầu hình học, phục vụ tốt cho phân tích bền và mô phỏng động học [2, 3] (hình 1 và hình 2).





Hình 1. Vẽ sketch profile



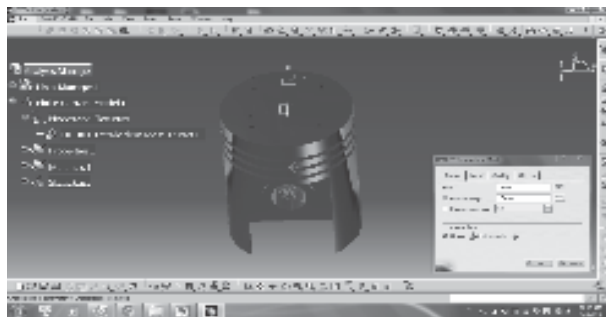
Hình 2. Piston hoàn thiện

Bảng 1. Thông số piston động cơ 1NZ-FE

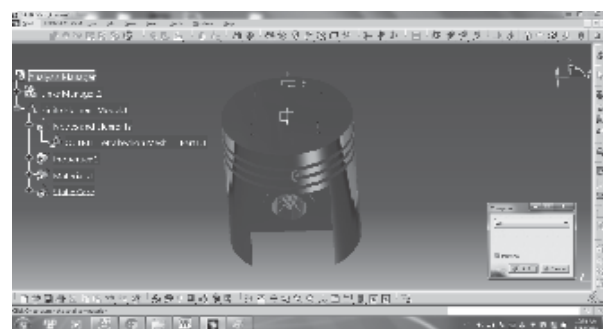
Thông số	Thông số	Đơn vị
Chiều dày đỉnh piston	$\delta = 6$	mm
Khoảng cách c từ đỉnh đến xéc măng khí thứ nhất	$c = 9$	mm
Chiều dày s của phần đầu	$s = 6$	mm
Chiều cao H của piston	$H = 90$	mm
Vị trí của chốt piston	$h = 45$	mm
Đường kính chốt piston, d_{cp}	$d_{cp} = 20$	mm
Đường kính bệ chốt, d_b	$d_b = 30$	mm
Đường kính lỗ trên chốt piston, d_0	$d_0 = 14$	mm
Chiều dày thân, S_1	$t = 5$	mm
Số xéc măng khí	2	
Chiều dày hướng kính t của xéc măng khí	$t = 3$	mm
Chiều cao a của xéc măng khí	$a = 3$	mm
Số xéc măng dầu	1	
Chiều dài bờ rãnh xéc măng	$a_1 = 4$	mm
Chiều dài thân piston	$l_{th} = 64$	mm

3.2. Chia lưới phần tử hữu hạn (FEA)

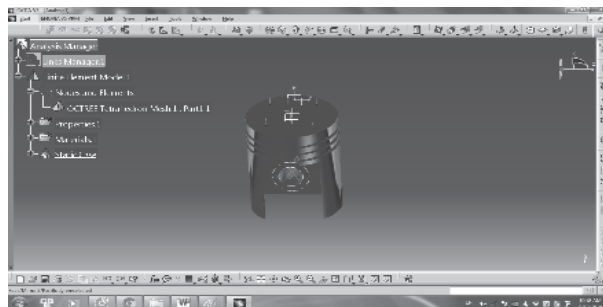
Sau khi hoàn thiện mô hình, quá trình chia lưới phần tử hữu hạn được thực hiện trong Generative Structural Analysis. Lưới được chia bằng phần tử Tetrahedron với kích thước mắt lưới khoảng 1 mm nhằm đảm bảo độ chính xác và thời gian tính toán hợp lý. Kết quả cho thấy lưới phân bố đều trên toàn bộ chi tiết, các vùng có hình dạng phức tạp như rãnh xéc-măng và lỗ chốt vẫn đảm bảo độ mịn cần thiết để thu được kết quả mô phỏng chính xác [2] (hình 3, 4, 5).



Hình 3. Chia lưới



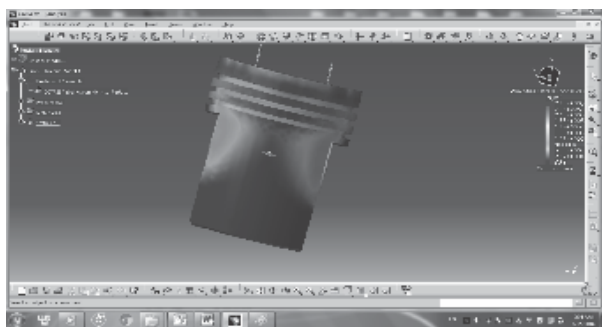
Hình 4. Chạy chia lưới



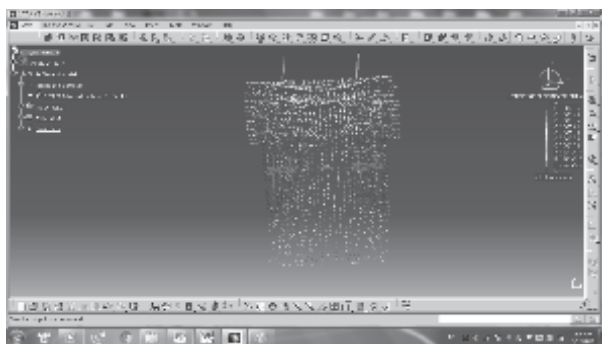
Hình 5. Hiển thị chia lưới

3.3. Kết quả phân tích ứng suất và biến dạng

Khi áp dụng tải trọng áp suất khí cháy cực đại và điều kiện biên cố định theo đúng chế độ làm việc [6], phần mềm CATIA cung cấp kết quả phân bố ứng suất Von Mises và biến dạng dịch chuyển trên piston. Kết quả cho thấy vùng tập trung ứng suất lớn nhất nằm tại các vị trí lỗ chốt piston và rãnh xéc-măng – đây là các vùng chịu tổ hợp tải trọng cơ và nhiệt cao, phù hợp với lý thuyết thiết kế piston [1]. Biến dạng dịch chuyển lớn nhất xuất hiện ở phần đỉnh piston dưới tác dụng áp suất buồng cháy. Tuy nhiên, giá trị ứng suất cực đại vẫn nằm trong giới hạn bền của hợp kim nhôm được lựa chọn, đảm bảo an toàn thiết kế (hình 6 và hình 7).



Hình 6. Hiển thị ứng suất trên piston



Hình 7. Hiển thị chuyển vị trên piston

Kết quả nghiên cứu chứng minh rằng mô hình thiết kế đáp ứng yêu cầu độ bền, các giá trị ứng suất và biến dạng đều trong giới hạn an toàn. Việc ứng dụng CATIA giúp trực quan hóa quá trình làm việc, xác định các vị trí nguy

hiểm để cải tiến thiết kế nếu cần. Điều này có ý nghĩa lớn trong việc giảm thiểu thời gian thử nghiệm, tiết kiệm chi phí chế tạo mẫu, đồng thời nâng cao hiệu quả đào tạo và nghiên cứu trong lĩnh vực cơ khí [2, 3].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế, mô phỏng và kiểm bền piston động cơ xăng 1NZ-FE bằng CATIA V5-R21. Mô hình 3D được xây dựng chính xác, kết quả phân tích FEA cho thấy ứng suất tập trung tại lỗ chốt và rãnh xéc-măng nhưng vẫn trong giới hạn bền của vật liệu, đảm bảo an toàn làm việc.

Kết quả chứng minh CATIA là công cụ hiệu quả trong thiết kế và kiểm nghiệm chi tiết động cơ, giúp giảm chi phí, thời gian thử nghiệm và tăng độ trực quan. Trong tương lai, nên mở rộng nghiên cứu tối ưu hình dạng piston và áp dụng cho các chi tiết chịu tải khác để nâng cao hiệu quả thiết kế. ❖

Ngày nhận bài: 05/9/2025

Ngày phản biện: 12/9/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Tất Tiến (2004), “Thiết kế và tính toán động cơ đốt trong”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [2]. Nguyễn Hữu Phước (2006), “Hướng dẫn sử dụng CATIA V5”. NXB. Giao thông Vận tải.
- [3]. HarmonySoft (2009), “Giáo trình CATIA V5”. Phòng Công nghệ Ứng dụng.
- [4]. Lê Xuân Phương (2006), “Nguyên lý động cơ đốt trong”. NXB. Giao thông Vận tải, Hà Nội.
- [5]. Nguyễn Tấn Dũng (2010), “Sức bền vật liệu – Ứng dụng trong thiết kế cơ khí”. NXB. Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.
- [6]. Quách Hoàng Anh (2021), “Nghiên cứu thiết kế, kiểm nghiệm và mô phỏng piston trên ứng dụng phần mềm Catia”. Khóa luận tốt nghiệp.