

ỨNG DỤNG PHẦN MỀM ALTAIR HYPERWORKS VÀ SIMCENTER TRONG VIỆC KIỂM NGHIỆM PISTON ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG

THE APPLICATION ALTAIR HYPERWORKS AND SIMCENTER IN TESTING PISTON OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Phạm Quốc Khánh¹, Bùi Đăng Long¹, Nguyễn Thùy Linh¹,
Bùi Văn Nguyên², Tăng Văn Tiến³, Nguyễn Trung Kiên^{4,*}

TÓM TẮT

Đánh giá, kiểm nghiệm, sử dụng phần mềm áp dụng vào ngành kỹ thuật ô tô là một trong những vấn đề cấp thiết. Bài báo mô tả việc áp dụng hai phần mềm mô phỏng cấp cao là Altair Hyperworks và Simcenter. Nhóm tác giả đã ứng dụng để kiểm nghiệm đặc tính của một vài loại piston đang được sử dụng trong động cơ đốt trong, vẽ phác thảo 3D các loại piston bằng các phần mềm (Inventor, Solidwork), đồng thời tìm kiếm các nguyên, nhiên, vật liệu phù hợp. Sau đó nhóm sử dụng phần mô hình đã hoàn thiện, thực hiện theo các bước, nhập vào phần mềm Altair Hyperwork và Simcenter, giải thuật toán và đưa ra kết quả.

Từ khóa: Piston, kiểm nghiệm, ứng dụng, Altair Hyperworks, Simcenter.

ABSTRACT

Evaluation, testing and use of software applied to the automotive engineering industry is one of the urgent issues. The article describes the application of two high-level simulation software, Altair Hyperworks and Simcenter. The authors have applied to test the characteristics of a few types of pistons being used in internal combustion engines, drawn 3D sketches of pistons using software (Inventor, Solidwork), and searched for raw materials. However, the material is suitable. Then the team uses the completed model, follows the steps, enters Altair Hyperwork and Simcenter software, solves the algorithm and gives the results.

Keywords: Piston, testing, apply, Altair Hyperworks, Simcenter.

¹Lớp Kỹ thuật Ô tô 5 - K 13, Khoa Công nghệ Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Lớp Kỹ thuật Ô tô 3 - 14, Khoa Công nghệ Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Lớp Kỹ thuật Ô tô 3 - K15, Khoa Công nghệ Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

⁴Khoa Công nghệ Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: 2018605800@st.hau.edu.vn

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, nền khoa học kỹ thuật thế giới đã phát triển mạnh mẽ với nhiều thành công rực rỡ trong tất cả các lĩnh vực của đời sống xã hội, đặc biệt trong lĩnh vực công nghệ ô tô. Phát triển song song, đồng hành cùng ngành công nghiệp ô tô có rất nhiều lĩnh vực, ngành nghề khác nhau. Có thể kể đến tiêu biểu như là: ngành

thiết kế, bán hàng, tiếp thị, quản lý chất lượng sản xuất... Trong lĩnh vực thiết kế hiện nay rất phát triển ở mảng CAD - Computer Aided-Design, CAM - Computer Aided-Manufacturing... Cùng sự phát triển của CAD, CAM thì CAE - Computer Aided-Engineering cũng đang là lĩnh vực được nhiều người quan tâm và theo đuổi. Nhu cầu về nhân lực và thị trường đang được mở rộng.

Nghiên cứu kiểm nghiệm piston luôn là vấn đề được quan tâm trước khi đi vào sản xuất. Nhiều nghiên cứu trên thế giới về piston đã được thực hiện, tiêu biểu có thể kể đến cuốn sách "Pistons and engine testing" [1], "Influence of piston shape and injector geometry on combustion and emission characteristics of syngas in direct-injection spark-ignition engine" của Matilde Fiore [2] hoặc nghiên cứu "Component test for simulation of piston ring - Cylinder liner friction at realistic speeds" của Markus Soderfjall [3] đã nghiên cứu về ảnh hưởng của hình dạng piston và hình học kim phun đến đặc tính đốt cháy và khí thải của động cơ đánh lửa phun nhiên liệu trực tiếp bằng nhiên liệu syngas (50% thể tích hydro, 50% thể tích carbon monoxide) thông qua mô phỏng CFD đã được dùng để phân tích tác động đến hình dạng piston và thông số kỹ thuật thông số kỹ thuật phun lên lượng khí thải và hiệu suất của động cơ DISI được cung cấp nhiên liệu bằng khí tổng hợp. Tuy nhiên, các chuyên gia chưa tận dụng triệt để việc ứng dụng các phần mềm vào nghiên cứu.

Để kiểm nghiệm piston, rất nhiều nghiên cứu đã ứng dụng các phần mềm như: AVL Boost, Ansys Workbench... Điều này đã hỗ trợ đắc lực trong việc tính toán kiểm tra các điều kiện bền của piston. Tuy nhiên, việc sử dụng phần mềm Altair Hyperworks và Simcenter vào để kiểm nghiệm piston của động cơ đốt trong thì vẫn chưa được khai thác.

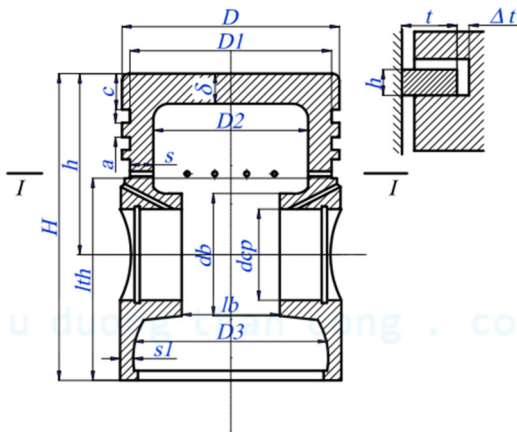
Trong nước hiện nay ta cũng đã có những nghiên cứu kiểm nghiệm về piston, thử nghiệm thực tế để xác định tính chất, đặc điểm của piston. Tuy nhiên, việc thử nghiệm thực tế với quy mô lớn gây tốn kém cả về vật chất lẫn tiền bạc. Kết quả nếu không được lưu trữ cẩn thận sẽ bị thất lạc, không đầy đủ.

Việc thử nghiệm thực tế thì cũng đã có sự ứng dụng một số phần mềm để kiểm nghiệm tính chất của piston. Tuy nhiên, các nghiên cứu và phần mềm sử dụng chưa nhiều, kết quả chưa thật sự đáp ứng được yêu cầu của việc kiểm nghiệm.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Qua quá trình tìm hiểu nhóm tác giả đã lựa chọn piston đỉnh lõm với thông số kỹ thuật như hình 1.



Hình 1. Sơ đồ thông số dùng để tính toán piston

Các thông số và cách tính toán các thông số của một piston như bảng 1.

Bảng 1. Cách tính toán các thông số của piston

Thông số	Động cơ tĩnh tại và tàu thủy		Động cơ ô tô và máy kéo		Động cơ cao tốc	
	Cỡ lớn	Cỡ nhỏ	Diesel	Xăng	Diesel	Xăng
Chiều dày đỉnh ð						
Không làm mát đỉnh	(0,08-0,2)D		(0,1-0,2)D	(0,03-0,09)D	(0,1-0,2)D	(0,04-0,07)D
Có làm mát đỉnh	(0,04-0,08)D		(0,05-0,1)D			
Khoảng cách h từ đỉnh đến xéc măng thứ nhất	(1-3)ð	(0,6-2)ð	(1-2)ð	(0,5-1,5)ð	0,8-1,5)ð	(0,6-1,2)ð
Chiều dày s phân đầu	(0,05-0,08)D		(0,05-0,1)D		(0,06-0,12)D	
Chiều cao H của piston	(1,5-2)D	(1-1,7)D	(1-1,6)D	(1-1,4)D	(0,6-1)D	(0,5-0,8)D
Vị trí chốt piston	(0,8-1,2)D	(0,65-0,9)D	(0,5-1,2)D		(0,35-0,45)D	
Đường kính chốt d _{ch}	(0,35-0,5)D		(0,3-0,45)D	(0,22-0,3)D	(0,3-0,5)D	(0,25-0,35)D
Đường kính bệ chốt d _b	(1,4-1,7)d _{ch}		(1,3-1,6)d _{ch}		(1,3-1,6)d _{ch}	
Đường kính trong chốt d _t	(0,4-0,7)d _{ch}		(0,6-0,8)d _{ch}		(0,6-0,8)d _{ch}	
Chiều dày phân thân s ₁	(0,3-0,5)s		2-5 mm		(0,02-0,03)D	
Số xéc măng khí	5-7	4-6	3-4	2-4	3-4	2-3
Chiều dày hướng kính t	(1/25-1/35)D		(1/22-1/26)D		(1/25-1/32)D	
Chiều cao a	(0,5-1)t		2,2-4mm		(0,3-0,6)t	
Số xéc măng dầu	1-4		1-3		1-3	
Chiều dày bờ rãnh a ₁	(1-1,3)a		≥a		≥a	

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Hiện nay, trong lĩnh vực kiểm bền các loại chi tiết, khung dầm thường sử dụng bằng hai phương pháp: phương pháp nghiên cứu lý thuyết và phương pháp nghiên cứu thực nghiệm.

Nghiên cứu lý thuyết dựa trên những phương pháp mô phỏng bằng các phần mềm mô phỏng cấp cao, nhóm tác giả quyết định sử dụng hai phần mềm là Altair Hyperworks và Simcenter để áp dụng vào việc này. Đây tuy không phải là một bài toán quá phức tạp, nhưng cần sự chính xác cao,

sự tập trung khi tạo, thiết lập các thông số đầu vào. Vì vậy, các nhà nghiên cứu sẽ tập trung vào tối ưu hóa mô hình và bằng phương pháp giải gần đúng của phần mềm để đưa ra kết quả của bài toán.

Khó khăn trong việc giải bài toán khí động học bằng phương pháp số không nằm ở các vấn đề lý thuyết mà chủ yếu là do khối lượng tính toán. Để giải bài toán với yêu cầu độ chính xác cao cần có mô hình chính xác, chia lưới với bước nhỏ, số lượng phần tử lớn nên đòi hỏi khối lượng các phép tính và thời gian tính toán rất lớn.

Phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng rất nhiều trong việc tính toán đối với các bài toán Cơ học để xác định trường ứng suất và biến dạng của vật thể. Cơ sở của phương pháp này là làm rời rạc hóa miền xác định của bài toán, bằng cách chia nó thành nhiều phần tử. Các phần tử được liên kết với nhau tại các điểm nút chung. Tất cả các phần tử có chú ý đến điều kiện liên tục của sự biến dạng và chuyển vị tại các nút liên kết giữa các phần tử.

3. ỨNG DỤNG PHẦN MỀM ALTAIR HYPERWORKS VÀ SIMCENTER TRONG VIỆC KIỂM NGHIỆM PISTON ĐỘNG CƠ ĐỐT TRONG

Để xử lý bài toán kiểm bền, nhóm tác giả áp dụng bài toán tuyến tính tĩnh. Tuyến tính biểu thị hành vi đàn hồi tuyến tính của vật liệu. Tức là, phần tuyến tính của ứng suất Đường cong một đường thẳng tuân theo Định luật Hooke: $\sigma = \epsilon E$ có thể được hiểu là phương trình của một đường thẳng ($y = mx$) đi qua gốc tọa độ. "E", Mô đun đàn hồi, là độ dốc của đường cong và là một hằng số. Trong cuộc sống thực, sau khi vượt qua điểm chảy, vật liệu đi theo một đường cong không tuyến tính, nhưng người giải lại đi theo cùng một đường thẳng. Các thành phần bị vỡ thành hai mảnh riêng biệt sau khi vượt qua ứng suất cuối cùng, mặc dù phân tích tĩnh tuyến tính không bao giờ cho thấy sự thất bại trong kiểu này. Nó cho thấy một bộ phận không bị đứt gãy duy nhất với ứng suất cao tại vị trí hồng học. Các biến dạng rất lớn, không thực tế cũng có thể được nhìn thấy. Một nhà phân tích phải kết luận liệu thành phần có an toàn hay không hoặc nó có bị lỗi hay không bằng cách so sánh giá trị ứng suất lớn nhất với năng suất hoặc ứng suất cuối cùng. Do đó, nhà phân tích cần quyết định, nếu trong các điều kiện tải đã cho, có thể thực hiện Phân tích tĩnh tuyến tính.

- Có hai điều kiện để phân tích tĩnh:

+ Lực là tĩnh có nghĩa là không có sự thay đổi theo thời gian (trọng lượng cố định).

+ Điều kiện cân bằng - $\sum \text{Lực} = 0, \sum \text{Moment} = 0$.

Lựa chọn thời điểm xét bài toán tuyến tính tĩnh là tại áp suất cuối kỳ nén của động cơ xăng là từ 7 - 12 Kg/cm².

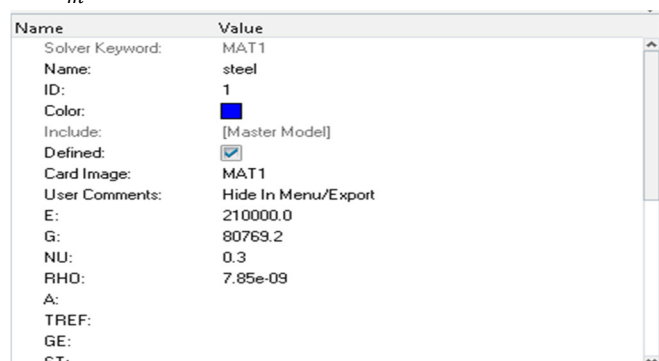
Việc thiết lập sẽ chia làm hai hướng: thiết lập mô phỏng bằng phần mềm Altair Hyperworks và bằng phần mềm Simcenter.

• Thiết lập và mô phỏng bằng phần mềm Altair Hyperworks

- Bước 1: Xử lý hình ảnh và chia lưới
- Bước 2: Thiết lập vật liệu

Tạo 1 card Materials đổi tên sau đó thiết lập các thông số của thép (đưa khối lượng vào vì bài toán dao động sẽ chịu ảnh hưởng bởi khối lượng của vật thể. Mà muốn có khối lượng thì cần có khối lượng riêng - dựa vào công thức

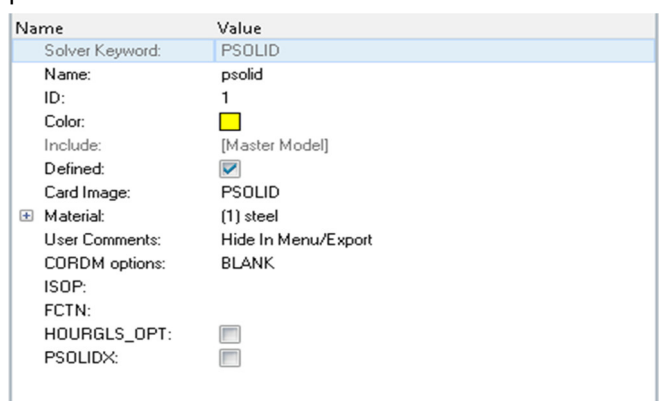
$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{m})$$



Hình 2. Tạo vật liệu cho vật thể

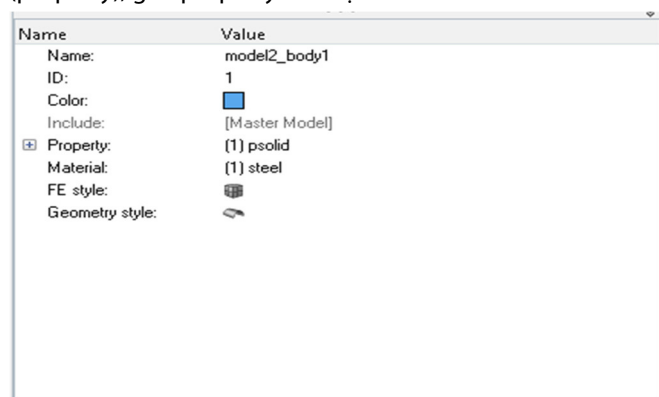
- Bước 3: Thiết lập Property và gắn vật liệu + gắn Property cho vật thể

Tạo 1 card Property, chọn card image: Psolid (do vật thể đang xét dạng khối), sau đó gắn vật liệu thép đã tạo vào phần Material.



Hình 3. Thiết lập Property và gắn vật liệu

Sau khi hoàn tất quá trình tạo đặc tính vật liệu (property), gắn property cho vật thể cần xét.

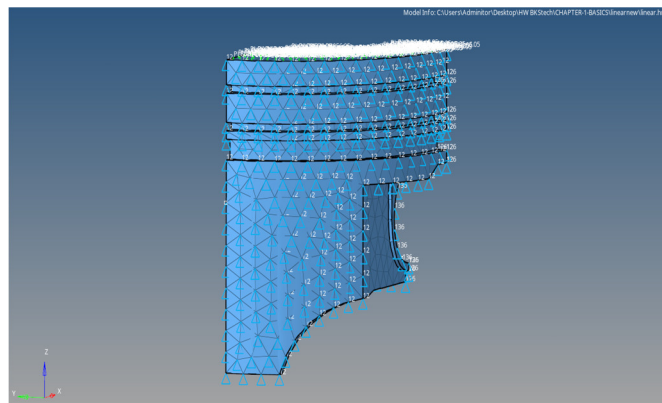


Hình 4. Thiết lập gắn property cho hệ

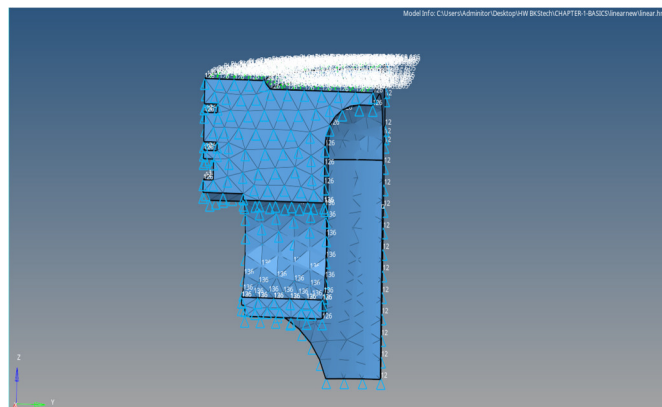
- Bước 4: Thiết lập điều kiện biên

Tạo điều kiện biên (Load Collector) ở mặt ngoài của piston, mặt cắt và trụ trong chốt piston.

Tổng cộng có tất cả 6 bậc tự do. Đối với mặt ngoài khóa 2 bậc tự do bao gồm dof 1,2. Trụ trong chốt piston sẽ khóa 3 dof 1,3,6, mặt cắt khóa 3 dof 1,2,6.



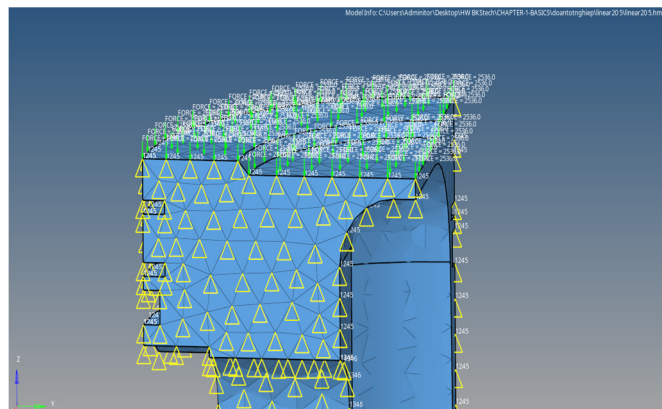
Hình 5. Thiết lập điều kiện biên mặt ngoài



Hình 6. Thiết lập điều kiện biên mặt cắt và trụ trong

- Bước 5: Thiết lập lực áp suất

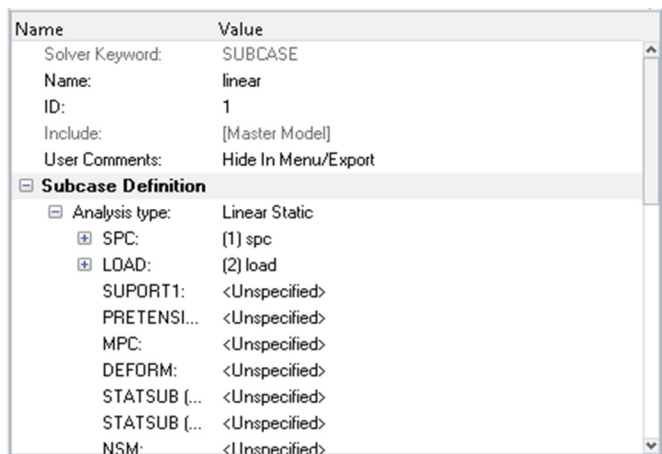
Tạo 1 áp suất tác dụng lên đỉnh piston có giá trị bằng 6,05MPa.



Hình 7. Thiết lập Pressure

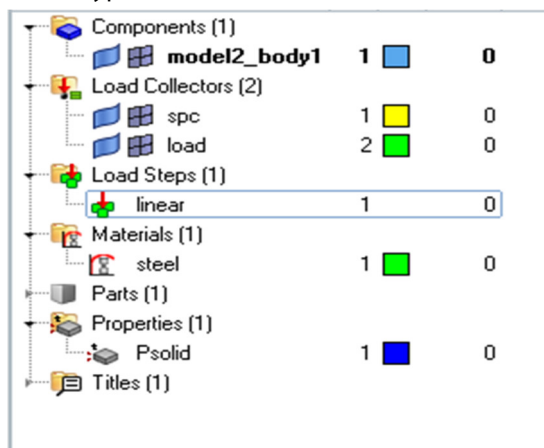
- Bước 6: Tạo Load Step

Chốt lại bài toán bằng việc nhập vật liệu, đặc tính. Cần lưu ý đổi loại phân tích về Linear Static.



Hình 8. Tạo Load Step type Linear Static

- Bước 7: Chạy và giải bài toán tuyến tính bằng phần mềm Altair Hyperworks.



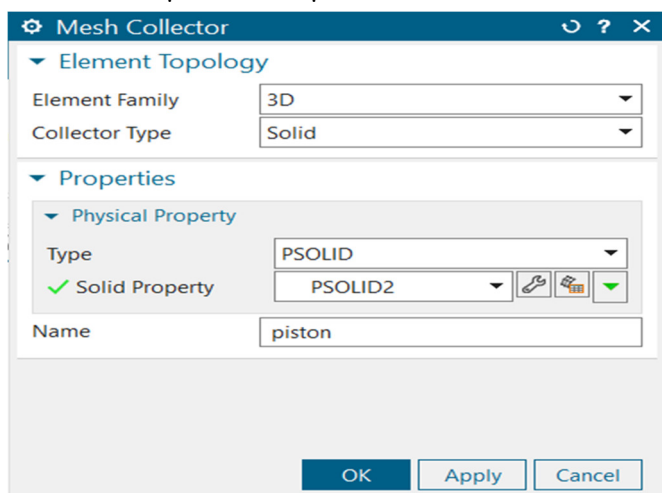
Hình 9. Hoàn thiện bài toán Linear Static

Hoàn thiện bài toán Linear Static

- Thiết lập và mô phỏng bằng phần mềm Simcenter

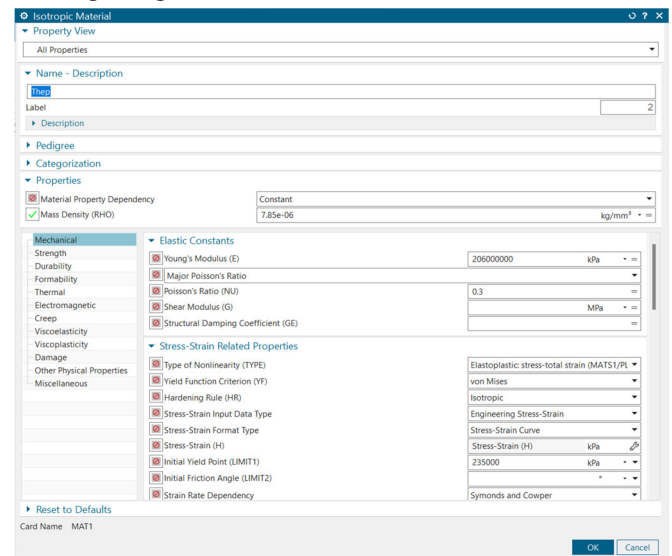
Thiết lập bài toán và mô phỏng bằng phần mềm Simcenter 3D.

- Bước 1: Tạo nhóm thuộc tính lưới Mesh Collector.



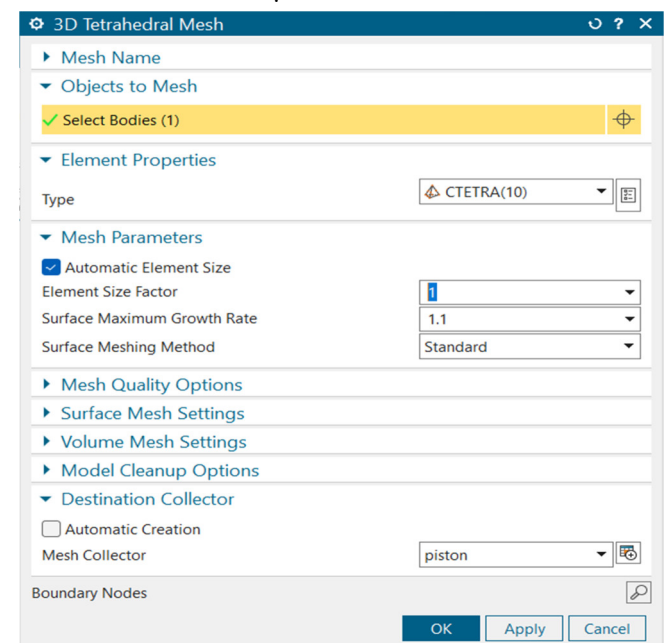
Hình 10. Tạo Mesh Collector

Trong đó bao gồm các thuộc tính vật lý của vật liệu được sử dụng trong bài toán.



Hình 11. Tạo các thông số vật liệu

- Bước 2: Chia lưới vật thể.



Hình 12. Tạo các thông số lưới

Loại lưới - 3D Tetrahedral Mesh (lưới tứ diện)

Thuộc tính phân tử lưới: CTETRA (10) (mỗi phần tử lưới tứ diện bao gồm 10 nút tính toán)

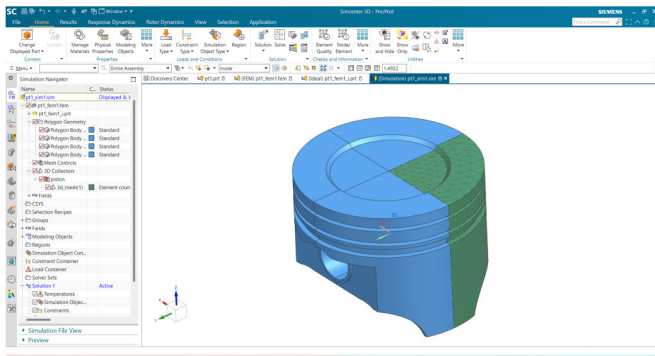
Kích thước phần tử lưới: 1

- Bước 3: Thiết lập các điều kiện biên bao gồm các ràng buộc và tải trọng

- Ràng buộc

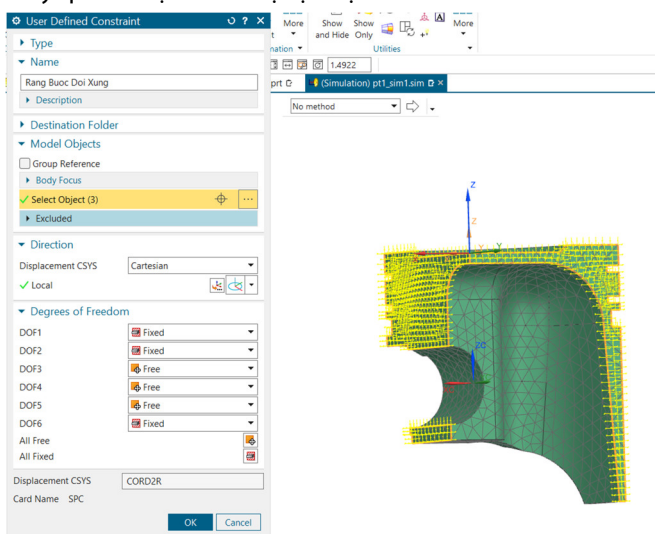
- Ràng buộc đối xứng:

Do đối tượng tính toán là $\frac{1}{4}$ của piston có quan hệ đối xứng với các phần còn lại do đó trong quá trình tính toán cần tạo ràng buộc để duy trì tính đối xứng của vật thể.



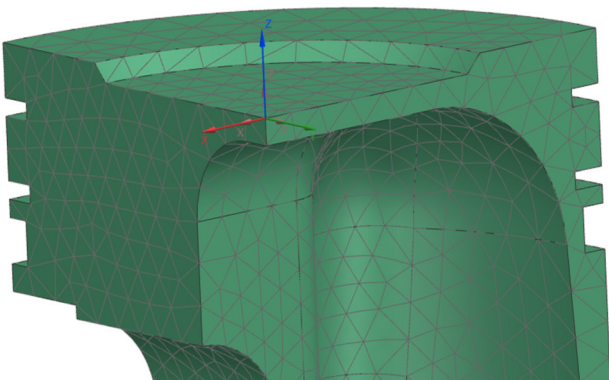
Hình 13. Tính đối xứng của vật thể

Để ràng buộc đối xứng ta cần ngăn không cho các mặt cắt của đối tượng có xu hướng tịnh tiến theo hướng X, Y và xoay quanh trục Z của hệ tọa độ.



Hình 14. Ràng buộc đối xứng

Trong đó hệ tọa độ được sử dụng là hệ tọa độ Đề - các (Cartesian) có tâm đặt tại tâm của đỉnh piston.



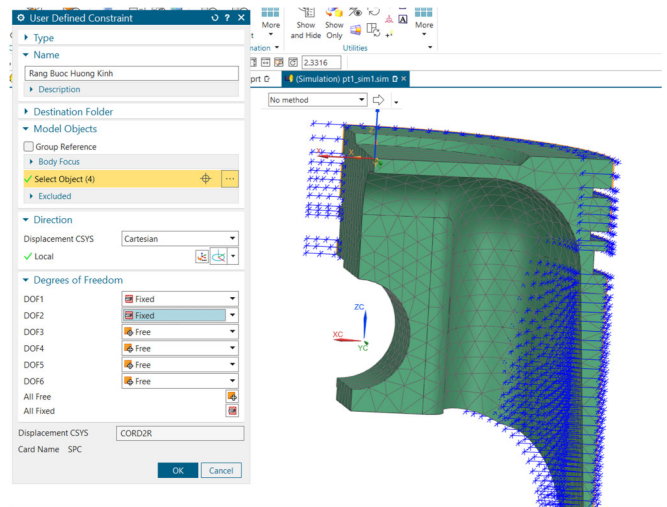
Hình 15. Vị trí đặt hệ tọa độ

- Ràng buộc hướng kính:

Do trong quá trình hoạt động trong xy lanh đường kính của piston sẽ bị giới hạn bởi xy lanh bao bọc bên ngoài. Mặc dù trong thực tế piston có sự giãn nở bởi nhiệt độ cao của buồng đốt tuy nhiên xét bởi trạng thái lí tưởng ta coi đường kính của piston là một hằng số.

Hệ tọa độ sử dụng: hệ tọa độ Đề-các (Cartesian) có gốc tọa độ đặt tại tâm của đỉnh piston.

Để tạo ràng buộc hướng kính ta ngăn không cho các mặt biên của đối tượng có xu hướng tịnh tiến phương X, Y.



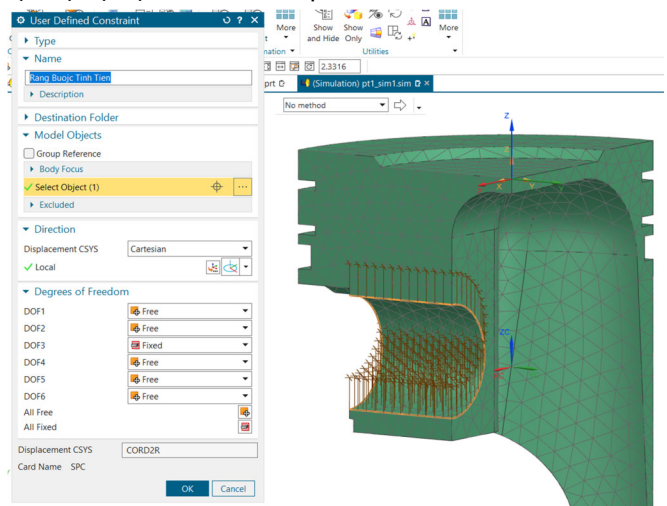
Hình 16. Ràng buộc hướng kính

- Ràng buộc chuyển động:

Ở kì nổ của động cơ khi chịu áp lực tác động của hòa khí cháy tạo ra nhằm đẩy piston đi từ điểm chết trên xuống điểm chết dưới. Tuy nhiên trong trạng thái thời cụm trục khuỷ thanh truyền cũng sinh ra một lực ngăn cho piston di chuyển xuống giúp piston duy trì ở trạng thái tĩnh. Lực này được tác dụng thông qua chốt piston tại vị trí lỗ chốt.

Xét ở trạng thái tĩnh này ta cần tạo ràng buộc ngăn không cho piston di chuyển tịnh tiến theo hướng Z tại lỗ chốt piston.

Hệ tọa độ sử dụng: hệ tọa độ Đề-các (Cartesian) có gốc tọa độ đặt tại tâm của đỉnh piston.

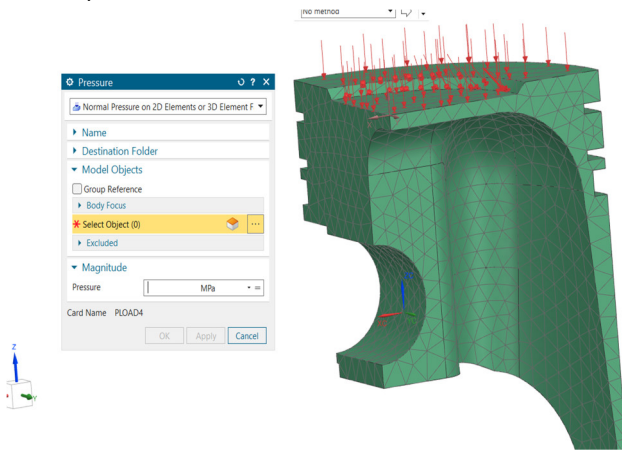


Hình 17. Ràng buộc chuyển động

• Tải trọng:

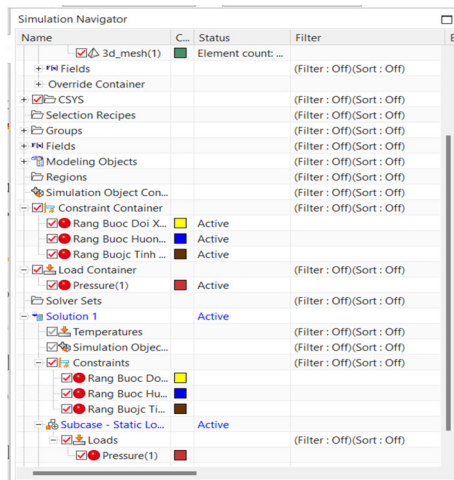
- Ở kì nổ phần đỉnh piston sẽ chịu áp lực do hòa khí cháy tạo ra.

- Ta sử dụng loại tải trọng: Pressure
- Điểm đặt: Mặt đỉnh piston
- Độ lớn: 6,05MPa



Hình 18. Tải trọng tác dụng lên đối tượng

- Bước 4: Tiến hành giải bài toán bằng phần mềm

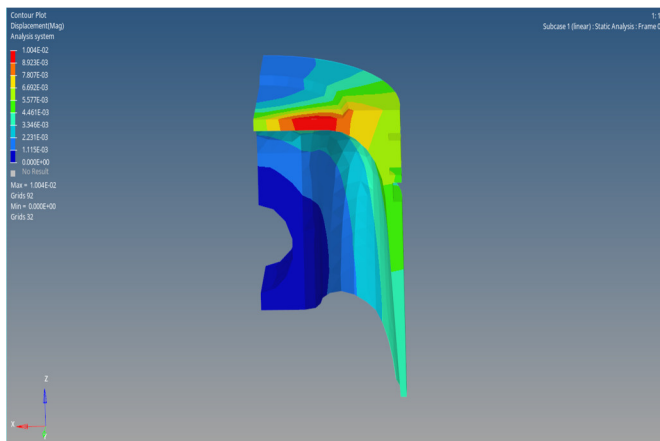


Hình 19. Các yếu tố cần có để phần mềm giải bài toán

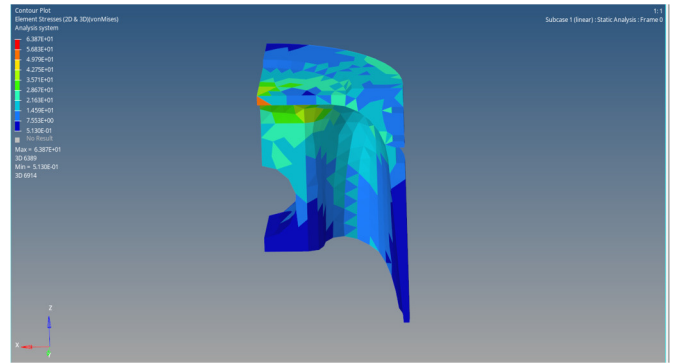
4. KẾT QUẢ

- Kết quả mô phỏng bằng phần mềm Altair Hyperworks

Kết quả xuất ra hình ảnh 3D và video thể hiện chuyển động.



Hình 20. Kết quả chuyển vị của bài toán Linear bằng phần mềm Hyperworks



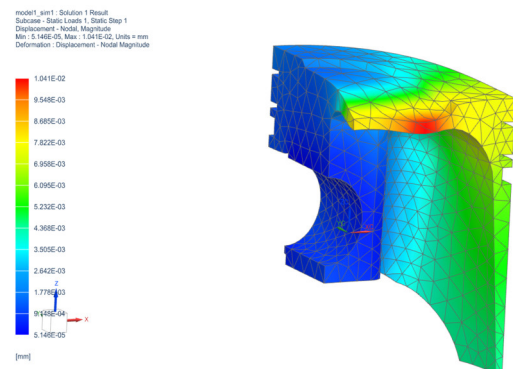
Hình 21. Kết quả ứng suất của bài toán Linear bằng phần mềm Hyperworks

- Đánh giá kết quả sau khi xuất ra:

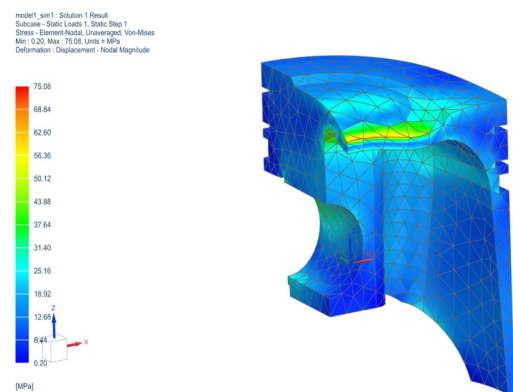
Chuyển vị của bài toán Linear Static hợp lý so với những gì mà bài toán tuyến tính cơ bản mang lại. Chuyển vị lớn nhất rơi vào $1,004E-02$ tập trung chủ yếu ở phần mặt trong của đỉnh piston. Vùng dao động, chuyển dịch tăng dần từ vị trí đó tiến ra ngoài. Gần trùng khớp với đáng chuyển dịch khi piston chịu áp lực. Bài toán đang xét tại áp suất nổ cực đại. Phần chuyển vị nên được mở rộng và trải đều hơn. Nhưng do việc thiết lập bài toán được coi là lý tưởng nên vẫn có sự thiếu sót. Đối với ứng suất. Ứng suất chảy của thép rơi vào khoảng từ 280 - 350MPa, bài toán hiện tại chưa hoàn toàn đáp ứng đủ điều kiện về mặt ứng suất của vật liệu (ứng suất cao nhất vào khoảng $6,387E+01$).

- Kết quả mô phỏng bằng phần mềm Simcenter

- Kết quả xuất ra hình ảnh 3D và video thể hiện chuyển động.



Hình 22. Kết quả chuyển vị của bài toán Linear bằng phần mềm Simcenter



Hình 23. Kết quả ứng suất của bài toán Linear bằng phần mềm Simcenter

- Đánh giá kết quả sau khi xuất ra:

Chuyển vị của bài toán Linear Static hợp lý bằng phần mềm Simcenter cũng rất hợp lý so với những gì bài toán tuyến tính tĩnh cần. Chuyển vị lớn nhất rơi vào $1,041E-02$ tập trung chủ yếu ở phần mặt trong, chính tâm của đỉnh piston. Vùng dao động, chuyển dịch tăng dần từ vị trí đó tiến ra ngoài. Gần trùng khớp với đáng chuyển dịch khi piston chịu áp lực. Cũng giống kết quả xuất ra phần mềm Hyperworsk. Phần chuyển vị nền được mở rộng và trải đều hơn. Nhưng do việc thiết lập bài toán được coi là lý tưởng nên vẫn có sự thiếu sót. Về mặt ứng suất, ứng suất chảy của thép rơi vào khoảng từ 280 - 350MPa, bài toán hiện tại chưa hoàn toàn đáp ứng đủ điều kiện về mặt ứng suất của vật liệu (ứng suất cao nhất vào khoảng 75,08).

Kết quả về mặt chuyển vị thể hiện không có vấn đề gì đối với bài toán tuyến tính tĩnh được thiết lập đầy đủ như các hình ảnh ở trên. Tuy nhiên, ứng suất xuất ra lại nhỏ hơn rất nhiều so với ứng suất của vật liệu. Sự sai sót cũng như vượt quá ứng suất vật liệu cũng một phần do bài toán tuyến tính chưa đáp ứng đủ những điều kiện về mặt tính toán để kết xuất ra giá trị ứng suất phù hợp, nằm trong khoảng cho phép

Sai số chênh lệch xảy ra ở cả hai kết quả ứng suất và chuyển vị. Tuy nhiên về đáng dao động, sự phân bố chuyển vị, biến dạng của khi kết xuất là tương đương. Chênh lệch cụ thể của kết quả chuyển vị rơi vào khoảng xấp xỉ $0,03E-02$. Kết quả với sai số của hai phần mềm có thể chấp nhận được và có thể coi là trùng khớp nhau về mặt tính toán.

Về mặt ứng suất, cả hai đều chưa đáp ứng được giới hạn ứng suất của vật liệu. Tuy nhiên sự chênh lệch ở kết quả ứng suất lại lớn hơn nhiều so với chuyển vị. Để nói cụ thể, cần biết ứng suất của thép rơi vào khoảng 280 - 320MPa, nhưng thực tế bài toán tuyến tính khi được giải và kết xuất kết quả ở cả hai phần mềm đều cho ra giá trị ứng suất nhỏ hơn nhiều khoảng ứng suất xác định của vật liệu.

Giải thích cho vấn đề này, ta có thể nhận xét chung:

- Về mặt kỹ thuật, hai phần mềm có sự khác nhau về mặt thiết lập, bộ giải.
- Dung lượng máy tính cũng ảnh hưởng đến quá trình tính toán. Máy có dung lượng lớn có thể cho ra kết quả hội tụ chính xác hơn.
- Bài toán tuyến tính tĩnh cũng chưa thật sự đáp ứng đủ các điều kiện để giải quyết được bài toán liên quan đến thông số kỹ thuật ứng suất.

Sự khác biệt giữa hai bộ giải khi thiết lập và hội tụ luôn tồn tại, đối với đặc thù từng bài toán, các bộ giải của NX và Altair Hyperworks sẽ có thể có chung các áp dụng về mặt công thức, nhưng sự tính toán và hội tụ kết quả và khác nhau. Đồ thị hai phần mềm xuất ra cũng có sự khác biệt (hiện tại ở đây không xuất và để cập đến kết quả của đồ thị).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. GmbH, 2012. *Pistons and engine testing*. Springer.
- [2]. A. E. G. V. MatildeFiore, 2018. *Influence of piston shape and injector geometry on combustion and emission characteristics of syngas in direct-injection spark-ignition engine*, in Energy Procedia, pp. 392-399.
- [3]. A. A. R. L. Markus Söderfjäll, 2016. *Component test for simulation of piston ring – Cylinder liner friction at realistic speeds*. in Tribology International, pp. 57-63.