

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA KẾT CẤU BÁNH NÉN TỚI ĐỘ BỀN VÀ CÔNG SUẤT BỘ TĂNG ÁP ĐỘNG CƠ

A STUDY ON THE EFFECT OF COMPRESSOR WHEEL STRUCTURE ON THE DURABILITY AND POWER OF ENGINE TURBOCHARGER

Phạm Hoàng Anh¹, Lê Hồng Kỳ^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huivh5804.2025.287>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu độ bền và công suất động cơ Toyota 3C khi thay đổi cấu trúc và số cánh của bánh nén trong bộ tăng áp động cơ. Mô hình 3D của các bánh nén khác nhau được tạo bằng phương pháp kỹ thuật ngược, mô phỏng được thực hiện trong môi trường ANSYS với các tốc độ quay trục tua bine lần lượt là 10.000rpm, 15.000rpm and 20.000rpm. Để đánh giá công suất động cơ, các bánh nén với số cánh khác nhau được gia công trên máy phay CNC 5 trục. Các thí nghiệm trên bộ thử nghiệm được thực hiện để đối chiếu với bánh nén mẫu của bộ tăng áp CT9. Kết quả nghiên cứu cho thấy các bánh nén làm bằng hợp kim nhôm, với cấu trúc, số cánh là được chọn làm việc với tốc độ trong khoảng 10.000rpm đến 20.000rpm đảm bảo độ bền. Bộ tăng áp CT9 có bánh nén với 4 cánh đơn khi làm việc với tốc độ trên 2000rpm cho công suất động cơ luôn cao hơn các trường hợp còn lại.

Từ khóa: Cấu trúc cánh, bánh nén, công suất động cơ, bộ tăng áp, ứng suất von-Mises.

ABSTRACT

This article presents the results of studying the durability and capacity of the Toyota 3C engine when changing the structure and number of blades of the compressor wheel in the engine turbocharger. 3D models of different compressor wheels were created using reverse engineering method, simulations were performed in ANSYS environment with turbine shaft rotation speed of 10,000rpm; 15,000rpm and 20,000rpm, respectively. To evaluate engine power, compressor wheels with different blade numbers were machined on a 5-axis CNC milling machine. Test stand experiments were performed for comparison with a sample compressor wheel of the CT9 turbocharger. Research results show that the compressor wheel is made of aluminum alloy, with the structure and number of blades selected to work at speeds from 10,000rpm to 20,000rpm to ensure durability. The CT9 turbocharger has a compressor wheel with 4 single blades when working at speeds above 2000rpm, helping the engine power always be higher than in other cases.

Keywords: Blade structure, compressor wheel, engine power, turbocharger, von-Mises stress.

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

*Email: kylh@vlute.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/3/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/6/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU

Bộ tăng áp động cơ là thiết bị được vận hành bởi chính khí thải của động cơ làm tăng hiệu suất động cơ bằng cách nén không khí vào các buồng đốt, làm cho quá trình cháy triệt để hơn, không những tiết kiệm nhiên liệu mà còn làm giảm khí thải gây ô nhiễm môi trường. Khi sử dụng bộ tăng áp thì lượng khí thải ở nhiệt độ cao tiếp tục

giãn nở sinh công, trước khi thải ra ngoài và dùng công ấy để dẫn động máy nén tăng áp sẽ có thể nâng cao công suất có ích của động cơ [1-3].

Bánh nén (compressor wheel) là một trong những thành phần chính của bộ tăng áp động cơ, chúng có cấu tạo rất đặc biệt với các bề mặt cong tự do. Thiết kế, chế tạo turbocharger là bí mật công nghệ của các hãng sản

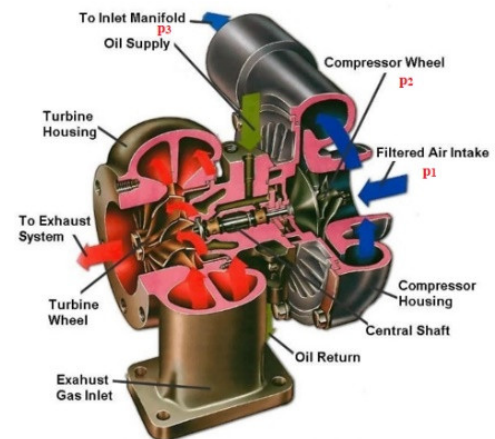
xuất chuyên về động cơ ô tô, động cơ máy bay, đây cũng là bí mật quốc gia của các nước công nghiệp phát triển. Do hiệu quả to lớn mà turbocharger mang lại cho các loại động cơ khác nhau nên hiện nay nghiên cứu về những nội dung liên quan tới turbocharger vẫn là các đề tài được nhiều nhà khoa học ở các nước đang phát triển rất quan tâm [1-3]. Với mục đích của dự án là chế tạo cánh quạt cho bộ tăng áp có thiết kế linh hoạt và tiêu tốn ít thời gian Mallikarjuna và U Chandrashekar đã tích hợp kỹ thuật thiết kế ngược (reverse engineering, RE) và tạo mẫu nhanh (rapid prototyping, RP) được gọi là kỹ thuật Stereolithography apparatus (SLA) [4]. Kỹ thuật SLA mang lại sự linh hoạt trong thiết kế với chi phí giảm và nó có thể được sử dụng để trực quan hóa, thử nghiệm cơ học. Trong nghiên cứu của mình Aye Aye Thet đã phân tích ứng suất lên cánh tuabin của bộ tăng áp sử dụng trong động cơ diesel ô tô 118 kW với ba loại vật liệu khác nhau và số cánh từ 11 đến 7 để chọn vật liệu và số cánh phù hợp. Mô hình được tạo bằng phần mềm Solid Works và phân tích trên ANSYS 16.0 [5].

Phần mềm SolidWorks, Inventor,... đã được nhiều nhóm nghiên cứu sử dụng trong thiết kế và mô phỏng, ANSYS sử dụng để phân tích cấu trúc ứng suất Von-Mises, chuyển vị và biến dạng tổng của bánh nén của bộ tăng áp động cơ [6-9]. Vật liệu chế tạo bánh nén cũng đã có nhiều nghiên cứu nhưng phần lớn vẫn chọn sử dụng hợp kim nhôm [2-4, 6-9]. Về gia công, hiện nay có ba phương pháp chủ yếu để gia công bánh nén cũng như bánh turbine. Đó là phương pháp đúc, phay trên máy CNC và in 3D kim loại. Trong đó, đúc là phương pháp chế tạo kinh điển và phổ biến nhất [16]. Lê Hồng Kỳ và các cộng sự đã công bố một số kết quả nghiên cứu sử dụng phương pháp kỹ thuật đảo ngược để tạo tập tin máy điểm của bản thiết kế theo mẫu cũng như lập trình gia công được thực hiện trên phần mềm Mastercam và gia công trên máy phay CNC 5 trục của hãng Haas [4, 10, 11]. Tuy nhiên, các công bố trong nước cũng như nhóm nghiên cứu của tác giả Lê Hồng Kỳ chỉ mới dừng ở phần thiết kế và gia công bánh nén, chưa có thử nghiệm cùng bộ tăng áp trên bệ thử với điều kiện làm hoạt động tương đồng thực tế của động cơ. Trong phạm vi nghiên cứu này, nhóm tác giả bước đầu chỉ xem xét ảnh hưởng của kết cấu bánh nén (các cánh đơn) tới độ bền và công suất bộ tăng áp động cơ.

2. MÁY NÉN CỦA BỘ TĂNG ÁP ĐỘNG CƠ

Trong nghiên cứu sử dụng bộ tăng áp CT9 của động cơ Toyota 3C dung tích 2,2L, mô men xoắn lớn nhất/ tốc độ quay: 188-216/1800-2600 (N.m/vòng/phút), công suất

65-67/40000 (k.W/vòng/phút) (hình 1). Bộ tăng áp bao gồm hai phần chính là turbine (turbine housing) và máy nén (compressor housing). Cấu tạo bên trong bộ tăng áp bao gồm: bánh turbine (turbine wheel), các ổ bi đỡ, trục, bánh nén (compressor wheel), các đường đầu vào khí thải (exhaust gas inlet), đầu vào động cơ (to inlet manifold), hệ thống xả (to exhaust system), các đường cung cấp dầu (oil supply), đường dầu về (oil return)... Bánh turbine và bánh nén nằm ở khoang riêng được kết nối với nhau thông qua trục trung tâm (central shaft) [1-3].



a)



b)



c)

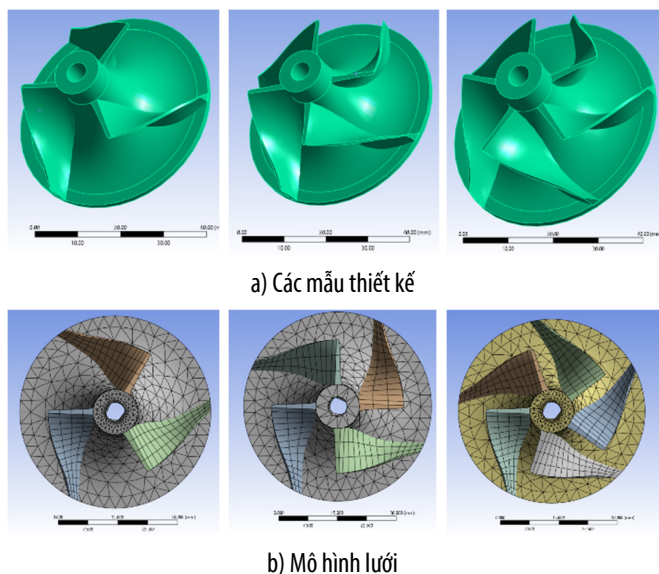
Hình 1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của turbocharger [1-3]

2.1. Thiết kế bánh nén

Nghiên cứu chỉ sử dụng cánh chính (Main Blades) với các trường hợp 3 cánh, 4 cánh, và 5 cánh thay vì 4 cặp cánh như mẫu của turbocharger CT như hình 1. Trong đó, các cánh đều có hình dạng và thông số bề mặt như cánh chính của bánh nén mẫu. Kỹ thuật ngược đã được sử dụng để thiết kế các bánh nén như hình 2a, [11, 12]. Với kỹ thuật ngược, từ bánh nén mẫu (hình 1c), sử dụng thiết bị ATOS III TRIPLÉ Scanner với công nghệ ánh sáng xanh để thu thập dữ liệu đám mây điểm của bánh nén mẫu, qua xử lý bằng phần mềm thu được các bản thiết kế 3D của bánh nén với số cánh đơn khác nhau lần lượt là 3, 4 và 5 cánh (hình 2b).

Trong nghiên cứu này, các đặc điểm cấu trúc của mẫu bánh nén sử dụng vật liệu hợp kim nhôm được phân tích

bằng phần mềm ANSYS 2024. Các điều kiện biên được áp dụng trên bánh nén có giá đỡ cố định ở đầu bánh nén và bề mặt trục, các lực tiếp tuyến và hướng tâm tác dụng lên bề mặt các cánh và tốc độ quay tác dụng lên bề mặt trục. Sau khi chia lưới mô hình bằng mô-đun lưới cơ học có phần tử kích thước trung bình (hình 2b).



Hình 2. Kết cấu các bánh nén thiết kế

Mô phỏng với tốc độ quay trục tuabin (cũng là trục bánh nén) lần lượt là 10.000rpm, 15.000rpm và 20.000rpm (vòng/phút).

2.2. Chế tạo bánh nén



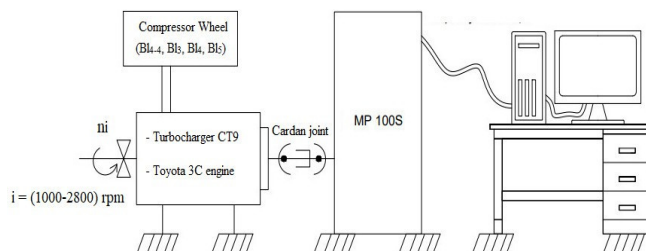
Hình 3. Các bánh nén được gia công từ máy CNC

Nghiên cứu này sử dụng hợp kim nhôm A6061 để chế tạo bánh nén. Vật liệu có đặc điểm: chống ăn mòn tốt, nhiệt độ nóng chảy và độ cứng thấp, độ bền kéo 291MPa, giới hạn chảy quy ước 241MPa, độ cứng của 97HB. Đúc là phương pháp chế tạo bánh turbine cũng như bánh nén

phổ biến nhất hiện nay [16], nhưng với số lượng chi tiết cần gia công không nhiều, nghiên cứu sử dụng máy phay CNC 5 trục của hãng Haas để gia công, sản phẩm nhận được như trên hình 3 [10, 13, 14].

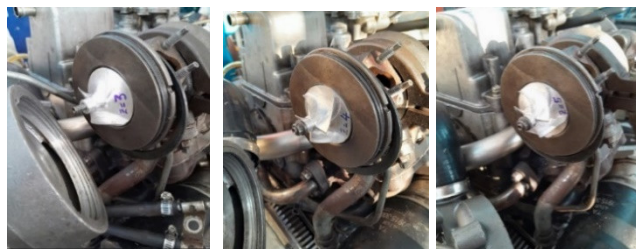
3. THÍ NGHIỆM

Trong nghiên cứu sử dụng thiết bị kiểm tra công suất động cơ MP 100S kiểu điện tử theo số vòng quay động cơ của hãng Weinlich, Liên bang Đức [15] (hình 4). Thiết bị MP 100S có công dụng: đo số vòng quay động cơ, đo mômen xoắn của động cơ, xác định công suất của động cơ, đo suất tiêu hao nhiên liệu của động cơ, vẽ đồ thị công suất, momen và suất tiêu hao nhiên liệu của động cơ, đo xung tín hiệu của các cảm biến... Đây là thiết bị có độ chính xác cao, dải đo tần số lớn, tần số đo nhỏ, điều chỉnh được các thông số khi sử dụng.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý và lắp đặt thiết bị thí nghiệm

Thực hiện 3 lần thí nghiệm ứng với từng bánh nén mẫu (B14-4), bánh nén 3 cánh đơn (B13), bánh nén 4 cánh đơn (B14), và bánh nén 5 cánh đơn (B15). Giá trị công suất trung bình của trục động cơ lần lượt nhận được tương ứng là P4-4 (kW), P3 (kW), P4 (kW) và P5 (kW). Kết quả thí nghiệm được lưu trữ trên máy tính qua phần mềm DiaW 1.3.

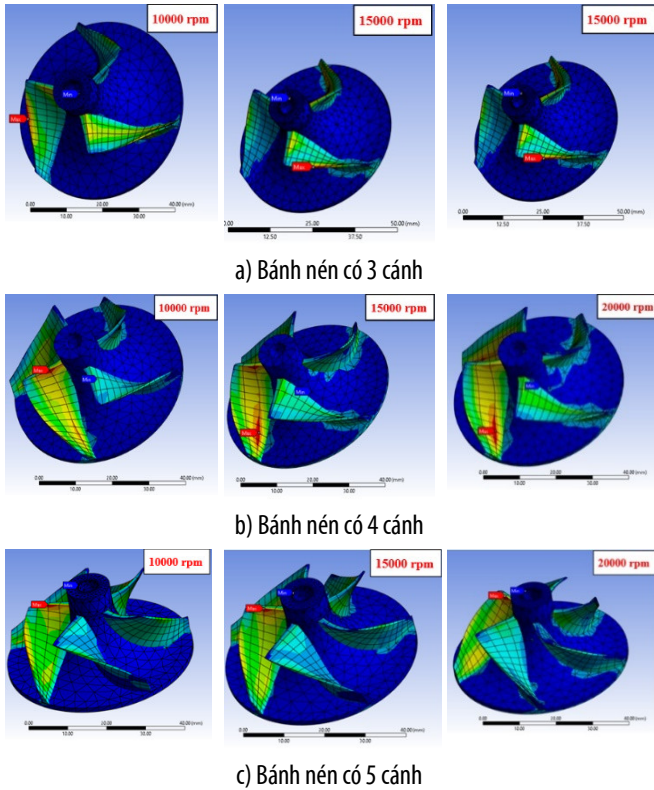


Hình 5. Lắp các bánh nén trong bộ tăng áp

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Kết quả mô phỏng

4.1.1. Kết quả mô phỏng ứng suất von-Mises



Hình 6. Mô phỏng ứng suất von-Mises các bánh nén có số cánh và tốc độ quay khác nhau

Hình 6a thể hiện kết quả mô phỏng ứng suất von-Mises của bánh nén có 3 cánh với tốc độ quay khác nhau. Trong trường hợp tốc độ quay là 10000rpm, ứng suất Von-mise tối đa là 3,3662MPa và nằm ở phía sau lưỡi máy nén. Trong trường hợp tốc độ quay là 15000rpm, ứng suất Von-mise tối đa là 4,0057MPa và nằm ở phía sau máy nén. Trong trường hợp tốc độ quay là 20000rpm, ứng suất Von-mise tối đa là 5,0209MPa và nằm trên thân bánh xe máy nén.

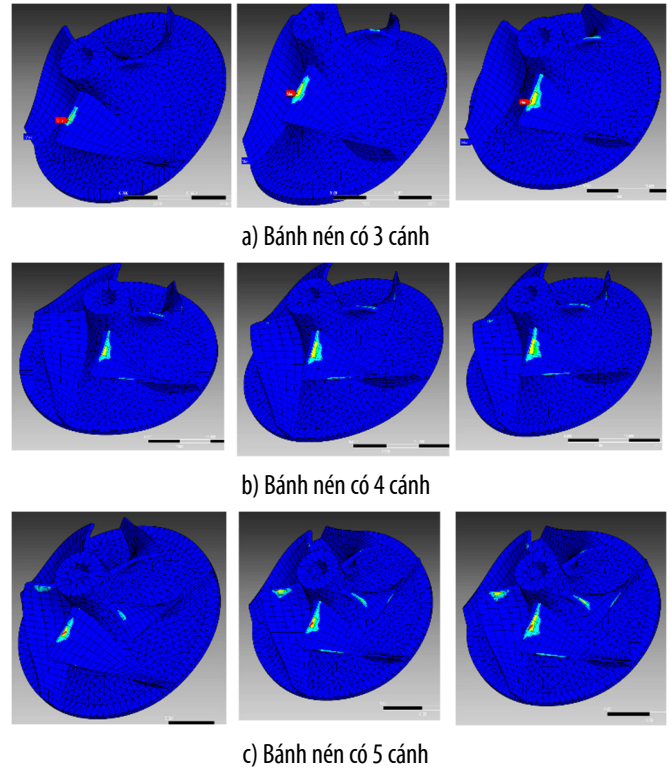
Với bánh nén có 4 cánh (hình 6b), trường hợp tốc độ quay là 10000rpm, ứng suất Von-mise tối đa là 3,3706MPa và nằm ở phía trên phía sau của lưỡi máy nén; trường hợp tốc độ quay là 15000rpm, ứng suất Von-mise tối đa là 5,0937MPa và nằm trên thân cánh máy nén; trường hợp tốc độ quay là 20000rpm, ứng suất Von-mise tối đa là 8,0962MPa và nằm ở phía sau bánh nén.

Với bánh nén có 5 cánh (hình 6c), khi tốc độ quay là 10000rpm ứng suất Von-mise tối đa là 2,3767MPa và nằm ở phía trên phía sau của lưỡi bánh nén; khi tốc độ quay là 15000rpm ứng suất tối đa là 3,2049MPa và nằm ở phía trên phía sau của lưỡi máy nén. Trong trường hợp tốc độ

quay là 20000rpm, ứng suất Von-mise tối đa là 4,2036MPa và nằm ở phía sau bánh nén.

4.1.2. Kết quả mô phỏng độ bền mỏi

Mô phỏng độ bền mỏi dựa trên thuyết ứng suất trung bình Goodman. Do chưa có cơ sở thực tế áp lực tác động lên bề mặt các cánh của bánh nén nên quá trình mô phỏng giả sử các hệ lực trong một tuổi thọ tải phân bố đều. Tuổi thọ trung bình càng thấp thì càng dễ sinh ra vết nứt mỏi tại vị trí mô phỏng.



Hình 7. Tuổi thọ trung bình của các bánh nén có số cánh và tốc độ quay khác nhau

Với kết quả mô phỏng độ bền mỏi, bánh nén thiết kế làm việc với tốc độ $n = 10000\text{rpm}$ có tuổi thọ cao nhất, bánh nén có tốc độ quay càng lớn độ bền mỏi càng giảm, số chu kỳ để hình thành nên vết nứt mỏi càng ngắn.

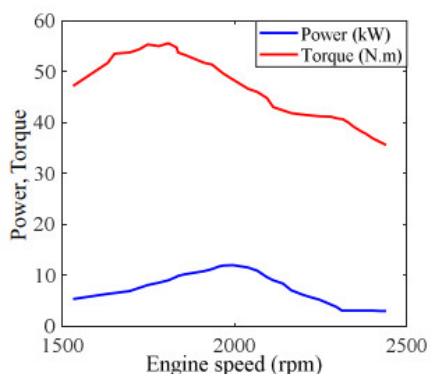
4.2. Kết quả thí nghiệm

Bảng 1. Kết quả đo công suất động cơ

n (rpm)	P4-4 (kW)	T4-4 (N.m)	P3 (kW)	T3 (N.m)	P4 (kW)	T4 (N.m)	P5 (kW)	T5 (N.m)
1600	6	39	8	45	6,8	40,5	6,2	37
1700	7	41	9	51	7,2	40,5	7,9	43
1800	9	47	10	51	8,8	47	8,4	45
1900	12	59	10	52	8,7	44	10	50
2000	12	57	9	40	10,6	50,5	9,7	46,5
2100	9	42	8	36	9,8	41,5	6,7	31

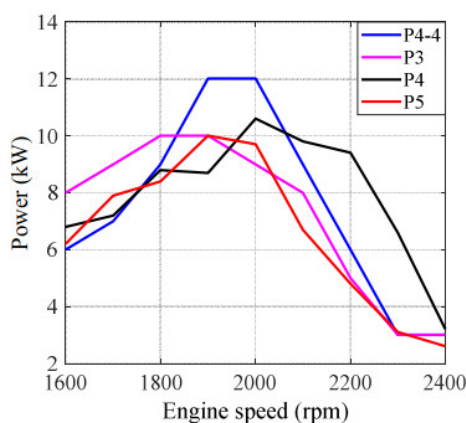
2200	6	24	5	20	9,4	21,5	4,8	21
2300	3	12	3	13	6,6	27,5	3,1	13,5
2400	3	11	3	12	3,2	13	2,6	10,5

Với trường hợp bánh nén mẫu, đồ thị mômen T và công suất P theo số vòng quay n như hình 8. Trong thực tế, bộ tăng áp động cơ thực sự làm việc hiệu quả khi số vòng quay trong phạm vi từ 1600rpm đến 2500rpm. Tổng hợp kết quả các thí nghiệm với số giá trị số vòng quay trong phạm vi trên như trong bảng 1.



Hình 8. Quan hệ giữa công suất P, mômen T và số vòng quay động cơ với của bộ tăng áp động cơ CT9

Đồ thị hình 9 thể hiện quan hệ giữa công suất và số vòng quay động cơ tương ứng với các bánh nén của bộ tăng áp động cơ có số cánh khác nhau.



Hình 9. Quan hệ giữa công suất và số vòng quay động cơ với các bánh nén khác nhau của bộ tăng áp động cơ CT9

Giá trị trung bình của công suất trục động cơ ứng với từng bánh nén của bộ tăng áp trên bảng 1 và hình 9 cho thấy:

- Sau khi khi mở hoàn toàn bướm ga để động cơ tăng tốc, tại thời điểm phanh (tốc độ 2400rpm) thì công suất động cơ trong các lần đo là tương đương nhau.

- Khi điều khiển phanh ngược chiều kim đồng hồ để giảm số vòng quay động cơ thì công suất động cơ có xu

hướng tăng nhanh, đạt công suất cực đại khi tốc độ trong khoảng 1900 - 2000rpm.

- Khi tiếp tục điều khiển phanh để tốc độ động cơ giảm xuống đến 1000rpm thì công suất động cơ có xu hướng giảm.

- Bộ tăng áp có bánh nén với 4 cánh đơn (BI4) khi làm việc với tốc độ trên 2000rpm cho công suất động cơ luôn cao hơn các trường hợp còn lại.

Nhìn chung, công suất động cơ khi bánh nén của bộ tăng áp chỉ là những cánh đơn thấp hơn so với trường hợp sử dụng bánh nén mẫu (4 cặp cánh). Ngoại lệ, trừ trường hợp bộ tăng áp có bánh nén BI4 làm việc với tốc độ trên 2060rpm và BI3 làm việc với tốc độ dưới 1840 rpm lại có công suất động cơ cao hơn so với trường hợp sử dụng bánh nén mẫu.

5. KẾT LUẬN

Kết quả mô phỏng Von-mise cho thấy, với bánh nén có 3 cánh và 5 cánh đơn thì ứng suất tương đương tối đa ứng với các tốc độ quay khác nhau đều dưới 5,0210MPa. Trường hợp bánh nén có 4 cánh, khi tốc độ quay là 15000rpm thì ứng suất tối đa là 5,0937MPa nằm trên thân cánh bánh nén, khi tốc độ quay là 20000rpm, ứng suất tối đa lên tới 8,0962MPa nằm phía sau bánh nén. Với mô phỏng độ bền mỏi, bánh nén thiết kế làm việc với tốc $n = 10000\text{rpm}$ có tuổi thọ cao nhất.

Thực nghiệm cho thấy, công suất động cơ khi bánh nén của bộ tăng áp là những cánh đơn thấp hơn so với trường hợp sử dụng bánh nén mẫu. Ngoại lệ, với bộ tăng áp có bánh nén 4 cánh làm việc với tốc độ trên 2060rpm và có bánh nén 3 cánh làm việc với tốc độ dưới 1840rpm có công suất động không theo xu hướng chung. Bộ tăng áp có bánh nén với 4 cánh đơn (BI4) khi làm việc với tốc độ trên 2000rpm cho công suất động cơ luôn cao hơn các trường hợp còn lại.

Đánh giá về ảnh hưởng của lực khí động và nhiệt độ đến bánh nén khi bộ tăng áp làm việc sẽ được tính toán, mô phỏng và thực nghiệm trong các nghiên cứu tiếp theo. Để có thể ứng dụng thực tế, các nghiên cứu tiếp theo cũng cần đề cập đến chi phí sản xuất, khả năng gia công hàng loạt cũng như ảnh hưởng của vật liệu đến độ bền lâu dài của bánh nén.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Kristaq Hazizi, *Aerodynamic Optimisation of Turbocharger Compressor Diffuser Geometry for Real-World Drive Cycles*. Doctoral Thesis, Anglia Ruskin University, 2022.

- [2]. Shailendra Kumar Bohidar, Prakash Kumar Sen, Ravi Bharadwaj, "Study of Turbo Charging," *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 3, 1, 2015.
- [3]. Sachin Thorat, *Centrifugal Compressor - Diagram, Parts, Working, Efficiency, Advantages*. Hydraulic and Pneumatic System, Learn Mechanical Engineering, 2024. <https://learnmech.com/centrifugal-compressor-diagram-parts-working-advantages>.
- [4]. Mallikarjuna, U chandrashekar, "Innovative Modeling and Rapid Prototyping of Turbocharger Impeller," *International Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT), 2, 9, 2013.
- [5]. Aye Aye Thet, "Analysis of Turbine Blade for Automobile Turbocharger by Changing Material and Number of Blades," *Iconic Research And Engineering Journals*, 2 6, 2018.
- [6]. Ni Ni Hlaing, Htay Htay Win, "Structural Analysis of Compressor Blades for Turbocharger by Using the Different Materials," *Advances in Scientific Research and Engineering*, 5, 12, 2019.
- [7]. N. Sathishkumar, P. Premkumar, A. Ruskin Bruce, P.L. Sudharsan, "Design and Analysis of an Impeller of a Turbocharger," *International Journal of Research and Review*, 7, 4, 2020.
- [8]. Ni Ni Hlaing, Htay Htay Win, Myint Thein, "Structural Analysis of Compressor Blades for Turbocharger by Using the Different Materials," *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 5, 12, 2019. doi: 10.31695/IJASRE.2019.33643.
- [9]. D.Ramesh Kumar, "Design and Analysis of Turbocharger Impeller in Diesel Engine," *International Journal of Advance Mechanical and Mechanics Engineering*, 1, 1, 2017
- [10]. Le Hong Ky, "A Study on the Influence of Plasma Nitriding Technology Parameters on the Working Surface Deformation of Hypoid Gears," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12, 6, 9760-9765, 2022. <https://doi.org/10.48084/etasr.5365>.
- [11]. Le Hong Ky, Tran Vinh Hung, "The Effects of Technological Parameters on the Accuracy and Surface Roughness of Turbine Blades When Machining on CNC Milling Machines," in *Proceedings of the International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation, and Sustainable Development 2021* (AMAS2021), Springer, 276–284, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99666-6_42.
- [12]. C. N. Van, A. L. Hoang, C. D. Long, D. N. Hoang, "Surface Roughness in Metal Material Extrusion 3D Printing: The Influence of Printing Orientation and the Development of a Predictive Model," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13, 5, 11672–11676, 2023. <https://doi.org/10.48084/etasr.6162>
- [13]. Nguyen Hoang Hiep, Le Hong Ky, Pham Hoang Anh, Le Hong Ky Duyen, "An Evaluation of Some Specifications of Turbine Blades Made by 3D Printing Technology and Processed on CNC Milling Machines," in *International Conference on Engineering Research and Applications* (ICERA 2022), 177-187, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22200-9_19.
- [14]. Nguyen Thai Van, Le Hong Ky, "The Influence of Plasma Nitriding Technology Parameters on the Hardness of 18XIT Steel Parts, Engineering," *Technology & Applied Science Research*, 14, 2, 13643-13647, 2024. <https://doi.org/10.48084/etasr.7089>.
- [15]. Weinlich Steuerungen, *MP 100 S engine test bed with MP computer operating instructions*. Weinlich GmbH & Co. KG, Industriestr. 6, D - 68799 Reilingen, Germany.
- [16]. Takayuki Sotome, Shoichi Sakoda, "Development of Manufacturing Technology for Precision Compressor Wheel Castings for Turbochargers," *Furukawa Review*, 32, 2007. https://www.furukawa.co.jp/review/fr032/fr32_08.pdf.

AUTHORS INFORMATION

Pham Hoang Anh, Le Hong Ky

Vinh Long University of Technology Education, Vietnam