

Pembuatan Kontur Permukaan Piston Diameter 50 mm, Tinggi 15 mm AA 2618 Kapasitas 2 Buah/Jam

Ata Syifa' Nugraha¹, Syamsul Hadi^{1*}, Miftah Hijriawan², Feri Hidayatullah², Syafria Wildan Hadi²

¹Departemen of Mechanical Engineering, Politeknik Negeri Malang, 65144 Malang, Indonesia

²Aircraft Maintenance Engineering Technology, Faculty of Vocational Studies, Universitas Sunan Gresik, 61153 Gresik, Indonesia

ABSTRACT – Lack of turbulence in mixing between air and fuel in the combustion chamber cylinder of a 100 cm³ 4 stroke Otto engine is a problem faced. The purpose of making is to obtain a piston surface contour that produces optimal turbulence in mixing between air and fuel in the combustion chamber cylinder. The manufacturing method includes: piston surface contour design, experiments with several contour shapes on the impact of turbulence (trial and error) and data analysis, selection of piston material from AA2618 with a diameter of 50 mm and a height of 15 mm, comparison of power results from the results of various contour shapes from previous research, making a wavy contour from the inlet valve direction to the exhaust valve facing the hill height of 0.2 mm and a valley depth of 0.2 mm using CNC milling machining with a distance between hills of 3.5 mm, combustion trials in the cylinder with a comparison of power results between with and without a piston surface contour. The manufacturing results are in the form of a piston made of AA2618 material with a wavy contour surface measuring 0.2 m high and 0.2 mm valley from the inlet valve to the exhaust valve with a production cost of Rp. 100.000/unit, a production process duration of 30 minutes/unit which implies that the power of a 100 cm³ motor can increase by around 12%.

ARTICLE HISTORY

Diterima: 6 Mei 2026

Revisi: 20 Mei 2026

Disetujui: 22 Mei 2026

Diterbitkan: 22 Mei 2026

KEYWORDS

Piston

AA 2618

Turbulence

Production proses

1.0 INTRODUCTION

Turbulensi di dalam ruang bakar merupakan faktor yang cukup penting untuk memengaruhi kualitas proses pembakaran pada motor bensin 4 langkah tipe Otto. Turbulensi yang baik mampu meningkatkan proses pencampuran antara bahan bakar dan udara sehingga menghasilkan perambatan api yang lebih cepat, pembakaran yang lebih sempurna, serta peningkatan performa mesin [1], [2]. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas turbulensi memiliki hubungan langsung terhadap efisiensi pembakaran dan performa mesin. Pada mesin berkapasitas kecil seperti motor 100 cm³, efisiensi pembakaran sangat berpengaruh terhadap daya dan konsumsi bahan bakar. Namun demikian, kurang optimalnya turbulensi di dalam ruang bakar masih menjadi permasalahan yang sering terjadi sehingga menyebabkan pembakaran tidak sempurna, perkembangan nyala api yang kurang stabil, dan penurunan efisiensi mesin [3], [4]. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa diperlukan upaya untuk meningkatkan turbulensi agar proses pembakaran di dalam silinder dapat berlangsung lebih optimal.

Salah satu faktor yang memengaruhi karakteristik turbulensi di dalam ruang bakar adalah bentuk permukaan crown piston. Kontur permukaan piston dapat mengarahkan pola aliran udara selama proses kompresi dan memengaruhi distribusi campuran bahan bakar dan udara sebelum terjadi proses pembakaran [5], [6]. Berdasarkan penelitian tersebut, dapat dipahami bahwa desain permukaan piston tidak hanya berfungsi sebagai komponen mekanis, tetapi juga berperan dalam mengendalikan karakteristik aliran di dalam ruang bakar. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa modifikasi bentuk crown piston mampu meningkatkan intensitas turbulensi, mempercepat flame propagation, serta meningkatkan efisiensi pembakaran [3], [7]. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa perubahan geometri piston dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap kualitas proses pembakaran. Selain itu, penggunaan kontur bergelombang pada permukaan piston berpotensi menghasilkan campuran bahan bakar dan udara yang lebih homogen sehingga dapat

meningkatkan daya mesin [5]. Oleh karena itu, desain kontur permukaan piston menjadi salah satu aspek penting dalam mendukung performa pembakaran pada motor Otto.

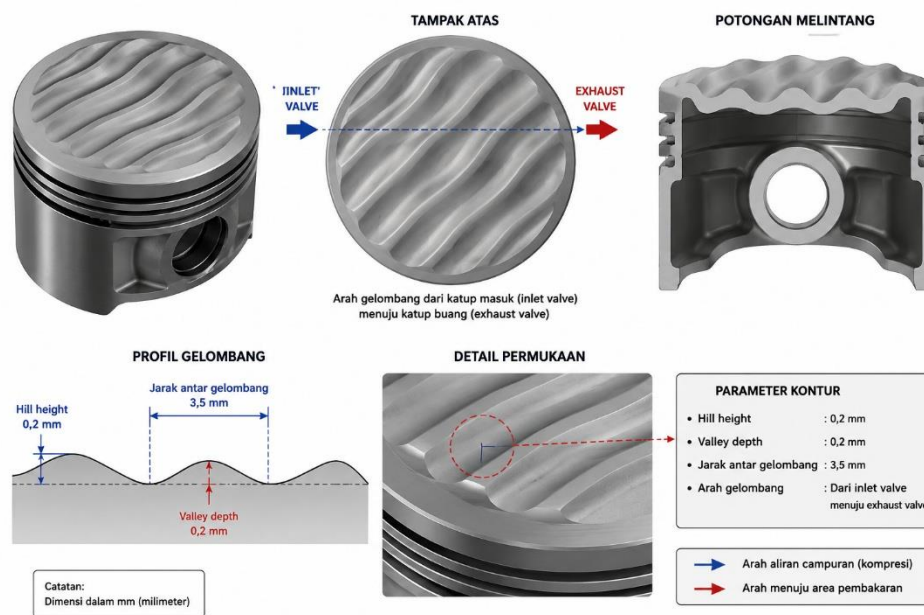
Meskipun berbagai desain crown piston telah banyak dikembangkan, penelitian mengenai pembuatan kontur permukaan bergelombang pada piston motor Otto 100 cm³ menggunakan material Aluminium Alloy 2618 (AA2618) masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada simulasi pembakaran dan analisis performa mesin dibandingkan dengan proses manufaktur kontur piston itu sendiri [8], [9]. Hal ini menunjukkan bahwa kajian mengenai proses pembuatan kontur piston secara aktual masih belum banyak dibahas, khususnya pada proses manufaktur menggunakan CNC milling. Selain itu, penerapan proses CNC milling dalam pembuatan kontur permukaan piston dengan parameter gelombang tertentu juga belum banyak dijelaskan secara detail. Dengan demikian, masih terdapat peluang penelitian yang menghubungkan antara desain kontur piston, proses manufaktur, dan pengaruhnya terhadap performa pembakaran mesin.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat kontur permukaan piston berbahan Aluminium Alloy 2618 (AA2618) dengan diameter 50 mm dan tinggi 15 mm menggunakan proses CNC milling. Kontur permukaan piston dirancang berbentuk gelombang yang diarahkan dari katup masuk menuju katup buang untuk meningkatkan turbulensi di dalam ruang bakar. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kontur permukaan piston terhadap karakteristik pembakaran dan peningkatan daya pada motor Otto 4 langkah 100 cm³.

2.0 METHODS

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif yang bertujuan untuk membuat dan menganalisis kontur permukaan piston terhadap peningkatan turbulensi pembakaran pada motor Otto 4 langkah 100 cm³. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan meliputi perancangan kontur piston, proses manufaktur menggunakan CNC milling, pengujian pembakaran, serta analisis peningkatan daya mesin.

2.1 Desain Kontur Permukaan Piston



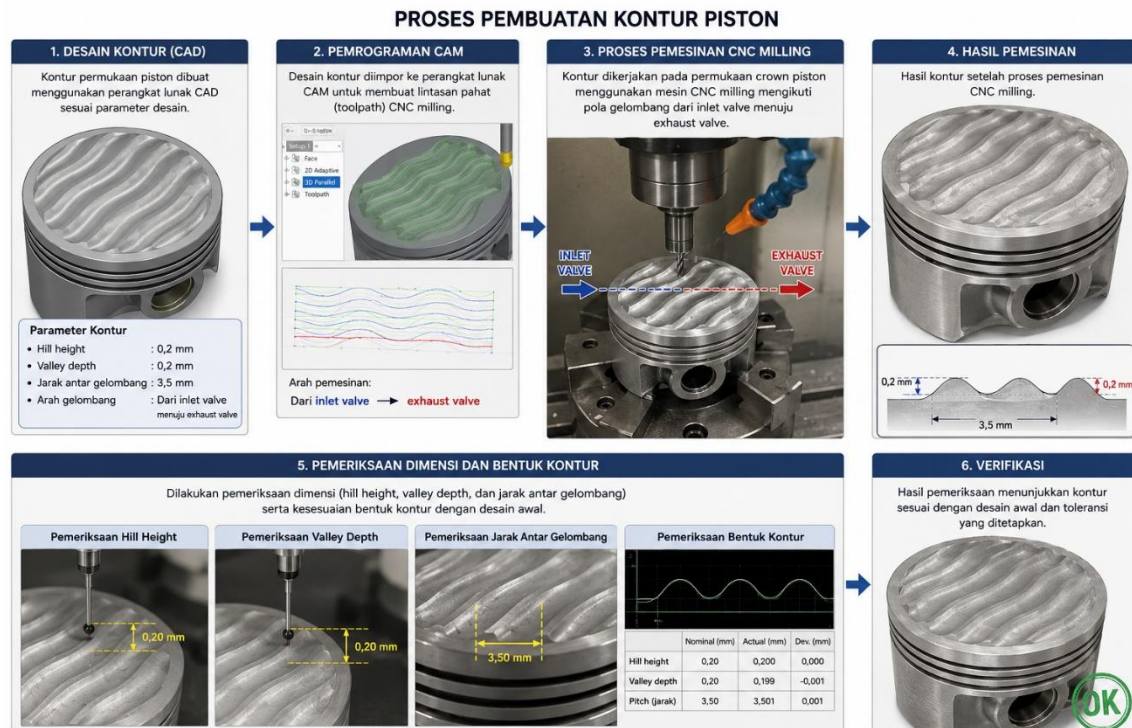
Gambar 1. Desain Kontur Permukaan Piston.

Tahap awal penelitian dilakukan dengan merancang beberapa bentuk kontur permukaan piston yang bertujuan untuk meningkatkan turbulensi pencampuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar. Perancangan kontur dilakukan berdasarkan studi literatur mengenai pengaruh geometri crown piston terhadap karakteristik aliran dan proses pembakaran [10], [11]. Berdasarkan hasil kajian tersebut, dipilih desain kontur bergelombang karena dinilai mampu menghasilkan pola aliran turbulen yang lebih baik dibandingkan permukaan piston standar. Kontur piston dirancang berbentuk gelombang yang diarahkan dari katup masuk (inlet valve) menuju katup buang (exhaust valve). Arah gelombang tersebut dipilih untuk membantu mengarahkan aliran campuran bahan bakar dan udara selama proses kompresi menuju area pembakaran. Desain akhir kontur memiliki tinggi gelombang (hill height) sebesar 0,2 mm, kedalaman lembah (valley depth) sebesar 0,2 mm, dan jarak antar gelombang sebesar 3,5 mm.

2.2 Material dan Dimensi Piston

Material piston yang digunakan dalam penelitian ini adalah Aluminium Alloy 2618 (AA2618). Material ini dipilih karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, ketahanan temperatur tinggi, serta banyak digunakan pada komponen piston performa tinggi [12], [13]. Berdasarkan penelitian sebelumnya, AA2618 juga memiliki karakteristik machinability yang baik sehingga sesuai untuk proses pembentukan kontur menggunakan CNC milling. Piston yang digunakan memiliki diameter 50 mm dan tinggi 15 mm. Dimensi tersebut disesuaikan dengan spesifikasi motor Otto 4 langkah 100 cm³ yang digunakan pada penelitian. Penggunaan dimensi yang sesuai bertujuan agar hasil pengujian pembakaran dapat merepresentasikan kondisi kerja aktual mesin.

2.3 Proses Pembuatan Kontur Piston



Gambar 2. Proses Pembuatan Kontur Permukaan Piston

Pembuatan kontur permukaan piston dilakukan menggunakan mesin CNC milling. Penggunaan CNC milling dipilih karena mampu menghasilkan bentuk kontur yang presisi dan memiliki tingkat pengulangan yang baik pada proses manufaktur [14], [15]. Sebelum proses pemesinan dilakukan, desain kontur piston terlebih dahulu dibuat menggunakan perangkat lunak CAD/CAM sebagai dasar pemrograman lintasan pahat. Proses pemesinan dilakukan dengan mengikuti pola gelombang yang telah dirancang pada permukaan crown piston. Kontur dikerjakan dari arah inlet valve menuju exhaust valve sesuai dengan desain penelitian. Setelah proses pemesinan selesai, dilakukan pemeriksaan dimensi dan bentuk kontur untuk memastikan kesesuaian hasil manufaktur dengan desain awal.

2.4 Pengujian Pembakaran dan Daya Mesin

Pengujian dilakukan pada motor Otto 4 langkah 100 cm³ dengan membandingkan piston standar dan piston yang telah dimodifikasi menggunakan kontur bergelombang. Pengujian bertujuan untuk mengetahui pengaruh kontur permukaan piston terhadap turbulensi pembakaran dan peningkatan daya mesin.

Proses pengujian dilakukan dengan menjalankan mesin pada kondisi operasional tertentu, kemudian dilakukan pengamatan terhadap performa mesin yang dihasilkan. Data hasil pengujian berupa peningkatan daya mesin dibandingkan antara penggunaan piston standar dan piston berkontur. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dilakukan analisis terhadap pengaruh kontur piston terhadap kualitas pembakaran di dalam silinder.

2.5 Prosedur Analisis Data

Prosedur analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif berdasarkan hasil proses manufaktur dan pengujian performa mesin. Data hasil pengujian dibandingkan antara piston standar dan piston berkontur untuk mengetahui peningkatan daya yang dihasilkan. Selain itu, hasil penelitian juga dianalisis berdasarkan keterkaitan antara bentuk kontur

permukaan piston dengan peningkatan turbulensi pembakaran di dalam ruang bakar. Hasil analisis digunakan untuk mengevaluasi efektivitas desain kontur piston dalam meningkatkan performa motor Otto 4 langkah 100 cm³.

3.0 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Hasil Pembuatan Kontur Permukaan Piston

Pembuatan kontur permukaan piston berhasil dilakukan menggunakan material Aluminium Alloy 2618 (AA2618) dengan diameter piston 50 mm dan tinggi 15 mm. Proses manufaktur dilakukan menggunakan mesin CNC milling sesuai desain kontur yang telah dirancang sebelumnya. Kontur permukaan piston dibuat berbentuk gelombang yang diarahkan dari katup masuk (inlet valve) menuju katup buang (exhaust valve). Bentuk gelombang yang dihasilkan memiliki tinggi gelombang sebesar 0,2 mm, kedalaman lembah sebesar 0,2 mm, dan jarak antar gelombang sebesar 3,5 mm.

Hasil proses pemesinan menunjukkan bahwa CNC milling mampu menghasilkan kontur permukaan yang sesuai dengan desain yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa proses CNC milling memiliki tingkat presisi yang baik dalam pembuatan geometri kontur piston yang kompleks [16]. Selain itu, penggunaan material AA2618 juga memberikan kemudahan pada proses pemesinan karena material tersebut memiliki karakteristik machinability yang baik serta ketahanan temperatur tinggi [13]. Dengan demikian, kombinasi material AA2618 dan proses CNC milling dinilai sesuai untuk pembuatan piston performa tinggi.

Berdasarkan hasil proses manufaktur, waktu yang dibutuhkan dalam pembuatan satu piston berkontur adalah sekitar 30 menit per unit. Waktu produksi tersebut meliputi proses setup, pemrograman, pemesinan, dan finishing permukaan piston. Hasil ini menunjukkan bahwa pembuatan kontur permukaan piston menggunakan CNC milling masih memungkinkan untuk diterapkan pada skala manufaktur kecil maupun pengembangan piston modifikasi.

3.2 Pengaruh Kontur Piston terhadap Turbulensi Pembakaran

Kontur bergelombang pada permukaan piston memberikan pengaruh terhadap pola aliran campuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar. Pada saat proses kompresi berlangsung, bentuk gelombang pada crown piston membantu mengarahkan aliran campuran menuju area pembakaran sehingga menghasilkan turbulensi yang lebih tinggi dibandingkan piston standar [17], [6]. Peningkatan turbulensi tersebut menyebabkan campuran bahan bakar dan udara menjadi lebih homogen sebelum proses pembakaran terjadi [18], [19].

Hasil penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa modifikasi geometri crown piston mampu meningkatkan karakteristik aliran turbulen di dalam silinder [3], [20]. Turbulensi yang lebih baik dapat mempercepat proses flame propagation sehingga pembakaran berlangsung lebih cepat dan lebih merata. Selain itu, peningkatan homogenitas campuran udara dan bahan bakar juga berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran yang dihasilkan mesin.

Kontur permukaan piston yang diarahkan dari inlet valve menuju exhaust valve juga membantu mengarahkan pola aliran selama proses kompresi. Arah aliran tersebut menghasilkan pergerakan campuran bahan bakar dan udara yang lebih terkontrol sehingga proses pembakaran menjadi lebih stabil. Dengan demikian, desain kontur bergelombang pada penelitian ini menunjukkan potensi dalam meningkatkan kualitas pembakaran pada motor Otto 4 langkah 100 cm³.

3.3 Pengaruh Kontur Piston terhadap Daya Mesin

Pengujian performa mesin dilakukan dengan membandingkan penggunaan piston standar dan piston berkontur pada motor Otto 4 langkah 100 cm³. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan piston dengan kontur bergelombang mampu meningkatkan daya mesin sekitar 12% dibandingkan piston standar.

Peningkatan daya tersebut dipengaruhi oleh meningkatnya kualitas pencampuran udara dan bahan bakar akibat turbulensi yang lebih baik di dalam ruang bakar [21], [22]. Campuran yang lebih homogen menghasilkan proses pembakaran yang lebih sempurna sehingga tekanan hasil pembakaran yang bekerja pada piston menjadi lebih optimal. Kondisi tersebut menyebabkan energi hasil pembakaran dapat dikonversi menjadi daya mekanik secara lebih efektif [23], [24].

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa modifikasi kontur permukaan piston tidak hanya berpengaruh pada aspek geometris komponen, tetapi juga memberikan dampak terhadap performa mesin secara keseluruhan. Hasil ini mendukung penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa desain crown piston memiliki hubungan langsung terhadap efisiensi pembakaran dan peningkatan performa mesin [6], [11].

3.4 Pembahasan

Dari hasil penelitian diketahui bahwa desain kontur bergelombang pada permukaan piston mampu memberikan pengaruh positif terhadap turbulensi pembakaran dan peningkatan daya mesin. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk

permukaan piston memiliki peran penting dalam mengontrol karakteristik aliran campuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar.

Selain faktor desain kontur, pemilihan material AA2618 juga menjadi salah satu faktor pendukung keberhasilan penelitian. Material AA2618 memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan temperatur yang baik sehingga sesuai digunakan pada piston dengan karakteristik pembakaran yang lebih tinggi [13]. Di sisi lain, penggunaan CNC milling memungkinkan proses pembuatan kontur dilakukan dengan tingkat presisi yang baik sehingga bentuk gelombang yang dihasilkan sesuai dengan desain yang diinginkan.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan peningkatan daya mesin sebesar 12%, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian hanya dilakukan pada satu variasi desain kontur piston. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya masih diperlukan untuk mengembangkan variasi bentuk gelombang, tinggi kontur, maupun arah aliran yang berbeda agar diperoleh desain piston yang lebih optimal dalam meningkatkan performa pembakaran motor Otto.

4.0 CONCLUSIONS

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, pembuatan kontur permukaan piston berbahan Aluminium Alloy 2618 (AA2618) dengan diameter 50 mm dan tinggi 15 mm berhasil dilakukan menggunakan proses CNC milling. Kontur permukaan piston dirancang berbentuk gelombang yang diarahkan dari inlet valve menuju exhaust valve dengan tinggi gelombang sebesar 0,2 mm, kedalaman lembah sebesar 0,2 mm, dan jarak antar gelombang sebesar 3,5 mm. Proses manufaktur menghasilkan bentuk kontur yang sesuai dengan desain dengan waktu produksi sekitar 30 menit per unit.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontur bergelombang pada permukaan piston mampu meningkatkan turbulensi pencampuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar motor Otto 4 langkah 100 cm³. Peningkatan turbulensi tersebut menghasilkan proses pembakaran yang lebih baik dan campuran udara–bahan bakar yang lebih homogen dibandingkan piston standar. Penggunaan piston berkontur juga memberikan peningkatan daya mesin sekitar 12% dibandingkan penggunaan piston tanpa kontur permukaan.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa desain kontur permukaan piston memiliki pengaruh terhadap karakteristik pembakaran dan performa mesin. Kombinasi penggunaan material AA2618 dan proses CNC milling juga menunjukkan potensi yang baik dalam pengembangan piston performa tinggi untuk aplikasi motor Otto berkapasitas kecil. Penelitian lanjutan masih diperlukan untuk mengembangkan variasi desain kontur piston agar diperoleh bentuk yang lebih optimal dalam meningkatkan efisiensi pembakaran dan daya mesin.

5.0 REFERENCES

- [1] J. L. Diaz C., C. Ocampo-Martinez, N. Panten, T. Weber, and E. Abele, "Optimal operation of combined heat and power systems: An optimization-based control strategy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, p. 111957, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111957.
- [2] J. P. Gómez Montoya and A. A. Amell Arrieta, "Effect of the turbulence intensity on knocking tendency in a SI engine with high compression ratio using biogas and blends with natural gas, propane and hydrogen," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 33, pp. 18532–18544, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.146.
- [3] J. Kim, J. Shin, D. Kim, Y. Son, and S. Park, "Effects of piston crown designs on in-cylinder flow and mixture formation in gasoline direct injection engine under the lean burn condition," *Int. J. Engine Res.*, vol. 24, no. 8, pp. 3655–3673, Aug. 2023, doi: 10.1177/14680874231166982.
- [4] H. E. Gulcan and M. Ciniviz, "Experimental study on the effect of piston bowl geometry on the combustion performance and pollutant emissions of methane-diesel common rail dual-fuel engine," *Fuel*, vol. 345, p. 128175, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128175.
- [5] V. C. Pham, J. K. Kim, W. J. Lee, S. J. Choe, V. V. Le, and J. H. Choi, "Effects of Piston Bowl Geometry on Combustion and Emissions of a Four-Stroke Heavy-Duty Diesel Marine Engine," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 24, 2022, doi: 10.3390/app122413012.
- [6] J. Rafique, M. R. Raza, K. S. Syed, S. Zainab, and H. Farooq, "Multi-physics investigation of diesel engine piston crown geometry for enhanced performance and emission reduction," *Results Eng.*, vol. 28, p. 108227, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.108227.
- [7] X. Dai and Z. Zheng, "Effects of Piston Shape on the Performance of a Gasoline Direct Injection Engine," *ACS Omega*, vol. 6, no. 50, pp. 34635–34649, Dec. 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c05037.
- [8] Y. Lin and X. Xu, "Prediction of temperature distribution on piston crown surface of dual-fuel engines via a hybrid neural network," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 218, p. 119269, Jan. 2023, doi:

10.1016/j.applthermaleng.2022.119269.

- [9] S. Nagareddy and K. Govindasamy, "Influence of piston crown shape with different positions of spark plug and fuel injector, %EGR, and fuel system control on emissions from modified GDI engines compared with a base diesel engine," *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, vol. 46, no. 2, pp. 355–364, Jun. 2022, doi: 10.1139/tcsme-2021-0163.
- [10] R. García-Morales *et al.*, "Fatty acid methyl esters from waste beef tallow using supercritical methanol transesterification," *Fuel*, vol. 313, p. 122706, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122706.
- [11] P. Sandeep Varma and M. Mittal, "Investigations with bowl-in-piston (CI type) and flat-piston (SI type) geometries to study the engine characteristics of a CI engine retrofitted for SI operation with CNG fuel," *Energy Convers. Manag.*, vol. 301, p. 118083, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118083.
- [12] M. Bartošák, I. Šulák, J. Horváth, M. Jambor, and L. Pilsová, "Isothermal low-cycle fatigue and fatigue–creep behaviour of 2618 aluminium alloy," *Int. J. Fatigue*, vol. 179, p. 108027, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2023.108027.
- [13] S. Ma *et al.*, "Laser powder bed fusion of an ultrafine microstructural in-situ TiB₂/Al composite with excellent mechanical properties and thermal stability at elevated temperatures," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 891, p. 145969, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.msea.2023.145969.
- [14] A. S. Kumar, A. Agarwal, V. G. Jansari, K. A. Desai, C. Chattopadhyay, and L. Mears, "Realizing on-machine tool wear monitoring through integration of vision-based system with CNC milling machine," *J. Manuf. Syst.*, vol. 78, pp. 283–293, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.jmsy.2024.12.004.
- [15] N. T. Anh and T. T. Tung, "Methodical approach to fixture design in the milling of thin-walled mechanical components," *Results Eng.*, vol. 27, p. 106518, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106518.
- [16] Y. Zhou *et al.*, "A review of 5-axis milling techniques for centrifugal impellers: Tool-path generation and deformation control," *J. Manuf. Process.*, vol. 131, pp. 160–186, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2024.08.049.
- [17] H. E. Doğan, A. Demirci, O. A. Kutlar, H. Arslan, and Ö. Cihan, "Prediction of the mean turbulence intensity with a thermodynamic model for CNG and gasoline fuels," *Fuel*, vol. 348, p. 128532, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2023.128532.
- [18] J. Li, Y. Wang, K. Xing, X. Guo, K. Chen, and H. Huang, "The influence mechanism of pre-combustion chamber orifice structure on natural gas engines: Combustion, emissions, and thermofluid analysis," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 236, p. 121654, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121654.
- [19] F. D.F. Chuahy and D. Splitter, "Piston geometry and stroke optimization for high efficiency propane spark ignition engines," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 244, p. 122708, May 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122708.
- [20] Y. Kang, X. Li, H. Shen, Y. Chen, D. Liu, and J. Chang, "Effects of combustion chamber diameter on the performance and fuel–air mixing of a double swirl combustion system in a diesel engine," *Fuel*, vol. 324, p. 124392, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124392.
- [21] W. Li *et al.*, "Investigations on combustion system optimization of a heavy-duty natural gas engine," *Fuel*, vol. 331, p. 125621, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125621.
- [22] L. Zhou, W. Zhao, K. H. Luo, M. Jia, H. Wei, and M. Xie, "Spray–turbulence–chemistry interactions under engine-like conditions," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 86, p. 100939, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.peccs.2021.100939.
- [23] T. Kim, J. Moon, and J. Jeon, "Characterization of in-cylinder spatiotemporal flame and solid particle emissions for ethanol-gasoline blended in gasoline direct injection engines," *Energy*, vol. 283, p. 128492, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128492.
- [24] R. Novella, J. Gomez-Soriano, I. Barbery, and G. Alcarria-Laserna, "Computational analysis of the in-cylinder mixture formation in a direct injection hydrogen spark-ignition engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 154, p. 150059, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.150059.