

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

¹Program Studi Optimasi Desain Mekanik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, 65141 Malang, Indonesia

²Program Studi Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Pesawat Udara, Fakultas Vokasi, Universitas Sunan Gresik, 61153 Gresik, Indonesia

ABSTRAK – Kurangnya turbulensi dalam pencampuran antara udara dan bahan bakar di ruang bakar silinder mesin Otto 4 langkah 100 cm³ sebagai permasalahan yang dihadapi. Tujuan pembuatan untuk mendapatkan kontur permukaan piston diameter 50 mm, tinggi 15 mm dari bahan AA 2618. Metode pembuatan meliputi: desain kontur permukaan piston; percobaan dengan beberapa bentuk kontur pada dampak turbulensi (coba-coba) dan analisis data; pemilihan bahan piston dari AA2618 dengan diameter 50 mm dan tinggi 15 mm; perbandingan hasil daya dari hasil berbagai bentuk kontur dari penelitian sebelumnya; pembuatan kontur bergelombang dari arah katup masuk ke arah katup buang dengan tinggi bukit 0,2 mm dan kedalaman lembah 0,2 mm menggunakan mesin CNC *milling* berjarak antar bukit 3,5 mm; percobaan pembakaran di dalam silinder dengan perbandingan hasil daya antara dengan dan tanpa kontur permukaan piston; pemeriksaan mutu-dimensi permukaan kontur piston. Hasil pembuatan berupa kontur permukaan piston diameter 50 mm, tinggi 15 mm dari bahan AA 2618 dengan permukaan kontur bergelombang berukuran tinggi bukit 0,2 mm dan kedalaman lembah 0,2 mm dari arah katup masuk ke katup buang dengan total biaya pembuatan Rp 100.000/unit, dan durasi produksi 30 menit/unit yang berkonsekuensi bahwa daya motor 100 cm³ dapat meningkat sekitar 12%.

HISTORI ARTIKEL

Diterima: 6 Mei 2026

Revisi: 16 Juni 2026

Disetujui: 24 Juni 2026

Diterbitkan: 30 September 2026

KATA KUNCI

Kontur permukaan piston

AA 2618

Turbulensi

Mesin Otto 4 langkah

Piston diameter 50 mm

CNC milling

1.0 PENDAHULUAN

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

Satu faktor yang memengaruhi karakteristik turbulensi di dalam ruang bakar adalah bentuk permukaan *crown* piston. Kontur permukaan piston dapat mengarahkan pola aliran udara selama kompresi dan memengaruhi distribusi campuran bahan bakar dan udara sebelum terjadi 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 perambatan api, dan meningkatkan efisiensi pembakaran [3], [7]. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa perubahan geometri piston dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap mutu pembakaran. Selain hal tersebut, penggunaan kontur bergelombang pada permukaan piston berpotensi menghasilkan campuran bahan bakar dan udara yang lebih homogen, sehingga dapat meningkatkan daya mesin [5]. Oleh karenanya, desain kontur permukaan piston menjadi satu aspek penting dalam mendukung kinerja 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 bahan Aluminium Alloy 2618 (AA2618) masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih fokus pada simulasi pembakaran dan analisis kinerja mesin daripada

manufaktur kontur piston [8], [9] yang menunjukkan bahwa kajian mengenai pembuatan kontur piston secara aktual masih belum banyak dibahas, khususnya pada manufaktur menggunakan CNC *milling*. Selain hal tersebut, penerapan CNC *milling* dalam pembuatan kontur permukaan piston dengan parameter gelombang tertentu juga belum detail. Dengan demikian, masih terdapat peluang penelitian yang menghubungkan antara desain kontur piston, manufaktur, dan pengaruhnya terhadap kinerja pembakaran mesin.

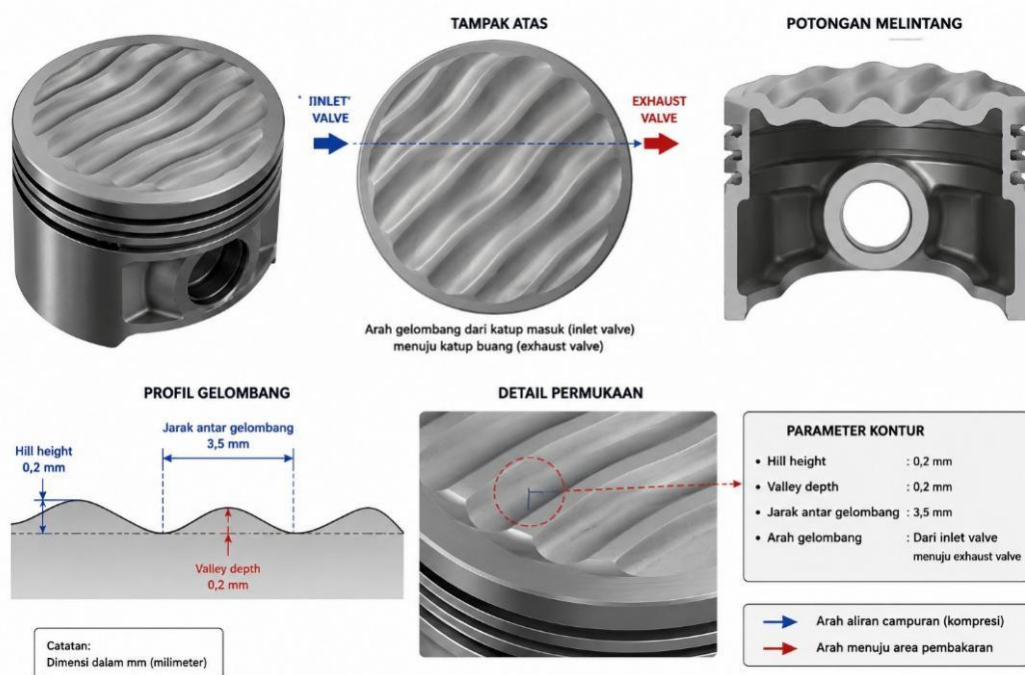
Penelitian tersebut bertujuan untuk memperoleh kontur permukaan piston berbahan AA2618 dengan diameter 50 mm dan tinggi 15 mm menggunakan CNC *milling*. Kontur permukaan piston didesain berbentuk gelombang yang diarahkan dari katup masuk menuju katup buang untuk meningkatkan turbulensi di dalam ruang bakar yang bertujuan untuk memperoleh pengaruh kontur permukaan piston terhadap karakteristik pembakaran dan peningkatan daya pada motor Otto 4 langkah 100 cm³.

2.0 METODE

Metode pembuatan kontur permukaan piston terhadap peningkatan turbulensi pembakaran pada motor Otto 4 langkah 100 cm³ dilakukan melalui beberapa tahapan diantaranya desain kontur piston, manufaktur menggunakan CNC *milling*, pengujian pembakaran, dan analisis peningkatan daya mesin.

2.1 Desain Kontur Permukaan Piston

Desain kontur permukaan piston sebagaimana Gambar 1.



Gambar 1. Desain Kontur Permukaan Piston

Tahap awal penelitian dilakukan dengan desain beberapa bentuk kontur permukaan piston yang bertujuan untuk meningkatkan turbulensi pencampuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar. Desain kontur dilakukan berdasarkan pengaruh geometri *crow*n piston terhadap karakteristik aliran dan pembakaran [10], [11] yang dipilih desain kontur bergelombang karena dinilai mampu menghasilkan pola aliran turbulen yang lebih baik daripada permukaan piston standar. Kontur piston didesain 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 kompresi menuju area pembakaran. Desain akhir kontur memiliki tinggi gelombang (*hill height*) senilai 0,2 mm, kedalaman lembah (*valley depth*) senilai 0,2 mm, dan jarak antar gelombang senilai 3,5 mm.

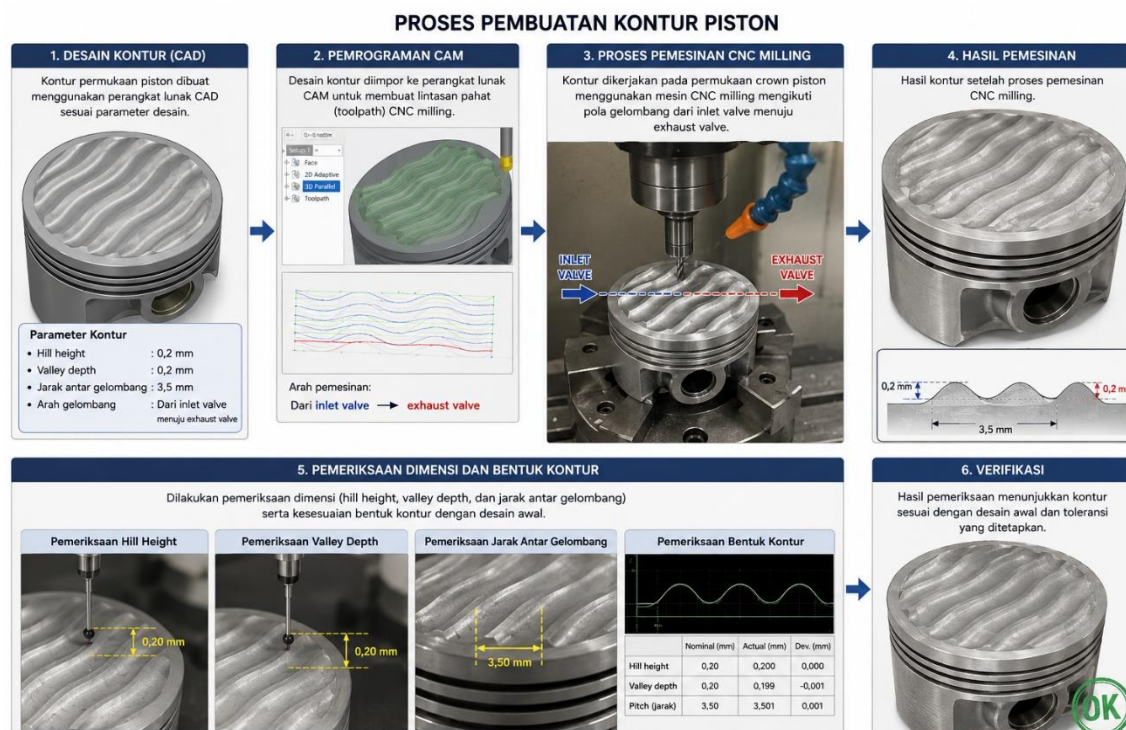
2.2 Bahan dan Dimensi Piston

Bahan piston yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah Aluminium Alloy 2618 (AA2618). Bahan tersebut dipilih karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, ketahanan temperatur tinggi, dan banyak digunakan pada komponen piston kinerja tinggi [12], [13]. Berdasarkan penelitian sebelumnya, AA2618 juga memiliki karakteristik *machinability*

yang baik, sehingga sesuai untuk 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 Pembuatan Kontur Piston

Pembuatan kontur permukaan piston sebagaimana Gambar 2.



Gambar 2. 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 manufaktur [14], [15]. Sebelum pemesinan dilakukan, desain kontur piston terlebih dahulu dibuat menggunakan perangkat lunak CAD/CAM sebagai dasar pemrograman lintasan pahat. Pemesinan dilakukan dengan mengikuti pola gelombang yang telah didesain pada permukaan *crown* piston. Kontur dikerjakan dari arah inlet valve menuju *exhaust valve* sesuai dengan desain penelitian. Setelah 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.

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

2.5 Prosedur Analisis Data

Prosedur analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif berdasarkan hasil manufaktur dan pengujian kinerja mesin. Data hasil pengujian daripada antara piston standar dan piston berkontur untuk mengetahui peningkatan daya yang dihasilkan. Selain hal tersebut, 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 kinerja motor Otto 4 langkah 100 cm³.

3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pembuatan Kontur Permukaan Piston

Pembuatan kontur permukaan piston berhasil dilakukan menggunakan bahan Aluminium Alloy 2618 (AA2618) dengan diameter piston 50 mm dan tinggi 15 mm. Manufaktur dilakukan menggunakan mesin CNC *milling* sesuai desain kontur yang telah didesain 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 senilai 0,2 mm, kedalaman lembah senilai 0,2 mm, dan jarak antar gelombang senilai 3,5 mm.

Hasil pemesinan menunjukkan bahwa CNC *milling* mampu menghasilkan kontur permukaan yang sesuai dengan desain. Hal tersebut menunjukkan bahwa CNC *milling* memiliki tingkat presisi yang baik dalam pembuatan geometri kontur piston yang kompleks [16]. Selain hal tersebut, penggunaan AA2618 juga memberikan kemudahan pada pemesinan karena memiliki karakteristik *machinability* yang baik dan ketahanan temperatur tinggi [13], sehingga kombinasi bahan AA2618 dan CNC *milling* dinilai sesuai untuk pembuatan piston kinerja tinggi.

Berdasarkan hasil pembuatan, waktu yang dibutuhkan dalam pembuatan satu piston berkontur adalah 30 menit/unit. Waktu produksi tersebut meliputi setup, pemrograman, pemesinan, dan *finishing* permukaan piston. Hasil tersebut 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 kompresi berlangsung, bentuk gelombang pada *crow*n piston membantu mengarahkan aliran campuran menuju area pembakaran, sehingga menghasilkan turbulensi yang lebih tinggi daripada piston standar [17], [6]. Peningkatan turbulensi tersebut menyebabkan campuran bahan bakar dan udara menjadi lebih homogen sebelum pembakaran terjadi [18], [19]. Kontur bergelombang relevan, karena merupakan upaya langsung untuk mengarahkan aliran campuran udara-bahan bakar, meningkatkan olakan di ruang bakar, dan mendukung peningkatan mutu pembakaran yang sejalan dengan hasil penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa modifikasi geometri *crow*n piston mampu meningkatkan karakteristik aliran turbulen di dalam silinder [3], [20]. Turbulensi yang lebih baik dapat mempercepat perambatan api, sehingga pembakaran berlangsung lebih cepat dan lebih merata dan meningkatkan homogenitas campuran udara dan bahan bakar yang berpengaruh terhadap efisiensi pembakarannya.

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

3.3 Pengaruh Kontur Piston terhadap Daya Mesin

Pengujian kinerja 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% daripada piston standar.

Peningkatan daya tersebut dipengaruhi oleh meningkatnya mutu pencampuran udara dan bahan bakar akibat turbulensi yang lebih baik di dalam ruang bakar [21], [22]. Campuran yang lebih homogen menghasilkan 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]. Dengan demikian, pembuatan kontur bergelombang pada permukaan piston berperan dalam memperbaiki mutu pencampuran udara-bahan bakar, sehingga pembakaran lebih efektif dan daya mesin dapat meningkat.

Modifikasi kontur permukaan piston tidak hanya berpengaruh pada aspek geometris komponen, tetapi juga memberikan dampak terhadap kinerja mesin yang mendukung penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa desain *crow*n piston memiliki hubungan langsung terhadap efisiensi pembakaran dan peningkatan kinerja mesin [6], [11]. Modifikasi kontur permukaan piston relevan dengan pembuatan kontur permukaan piston yang tidak hanya fokus pada aspek manufaktur komponen, tetapi juga diarahkan untuk mendukung efisiensi pembakaran dan peningkatan kinerja mesin.

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 yang 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 bahan AA2618 juga menjadi satu faktor pendukung keberhasilan penelitian yang 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 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 senilai 12%, penelitian tersebut masih memiliki keterbatasan karena pengujian hanya dilakukan pada satu variasi desain kontur piston. Oleh karenanya, 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 kinerja pembakaran motor Otto.

4.0 KESIMPULAN

Pembuatan kontur permukaan piston berbahan Aluminium Alloy 2618 (AA2618) dengan diameter 50 mm dan tinggi 15 mm berhasil dilakukan menggunakan CNC *milling* dengan kontur permukaan piston berbentuk gelombang yang diarahkan dari *inlet valve* menuju *exhaust valve* dengan tinggi gelombang senilai 0,2 mm, kedalaman lembah senilai 0,2 mm, dan jarak antar gelombang senilai 3,5 mm yang mana pembuatan bentuk kontur sesuai dengan desain dengan waktu produksi sekitar 30 menit/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 yang menghasilkan pembakaran lebih baik dan campuran udara-bahan bakar lebih homogen daripada piston standar, sehingga dapat meningkatkan daya mesin 12% daripada penggunaan piston tanpa kontur permukaan.

Desain kontur permukaan piston memiliki pengaruh terhadap karakteristik pembakaran dan kinerja mesin yang mana kombinasi penggunaan bahan AA2618 dan CNC *milling* menunjukkan potensi yang baik dalam pengembangan piston kinerja tinggi untuk aplikasi motor Otto berkapasitas kecil.

Saran tindak lanjut atas simpulan adalah perlu penelitian lanjutan untuk pengembangan variasi desain kontur piston agar diperoleh bentuk yang lebih baik dalam meningkatkan efisiensi pembakaran dan daya mesin.

5.0 DAFTAR PUSTAKA

- [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, A. Zúñiga-Moreno, F. J. Verónico-Sánchez, J. Domenzain-González, H. I. Pérez-López, C. Bouchot, and O. Elizalde-Solis, "Fatty acid methyl esters from waste beef tallow using supercritical methanol transesterification," *Fuel*, vol. 313, Art. no. 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, M. Wang, Y. Wu, Y. Li, J. Liu, H. Wang, and Z. Chen, “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, Art. no. 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, Y. Jiang, C. Lu, J. Huang, J. Pei, T. Xing, S. Zhao, K. Zhu, H. Yan, Z. Xu, and S. Ding, “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, J. Ma, H. Liu, H. Wang, H. Zhang, T. Qi, D. Wu, and J. Pan, “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.