

STRATEGI OPERASIONAL PEMBAKARAN RENDAH TEMPERATUR BERBASIS HIDROGEN, BIOFUEL, ADITIF NANO, DAN KONTROL CERDAS UNTUK PENURUNAN EMISI MESIN PEMBAKARAN DALAM

Budi Purwanto Antameng

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nahdlatul Ulama Gorontalo

Email: budipurwantoantameng@unugo.ac.id¹⁾

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

Transisi energi menempatkan mesin pembakaran dalam pada posisi paradoksal: masih dominan pada transportasi berat, kelautan, pembangkit bergerak, dan aplikasi industri, tetapi sekaligus menjadi sumber NO_x, partikulat, hidrokarbon, CO, dan gas rumah kaca. Artikel ini meninjau literatur Scopus 2022-2026 yang tersedia pada basis ekstraksi penulis untuk mensintesis perkembangan pembakaran rendah temperatur, bahan bakar rendah karbon, strategi injeksi, EGR, turbocharging, after-treatment, aditif nano, serta kecerdasan buatan untuk prediksi dan optimasi emisi. Metode yang digunakan adalah tinjauan naratif-sistematik dengan pengelompokan literatur ke dalam mode pembakaran lanjut, formulasi bahan bakar, kendali udara-injeksi, pengendalian residu polutan, dan model sensing-prediction-control. Hasil sintesis menunjukkan bahwa HCCI, PCCI/PPCI, GCI, RCCI, CAI, dan dual-mode dual-fuel dapat memperluas peluang efisiensi tinggi dan penurunan soot/PM, namun masih dibatasi oleh kendali fase pembakaran, rentang operasi sempit, pressure rise, knocking, serta trade-off CO/HC/NO_x. Hidrogen, biohidrogen, amonia, biofuel oksigenat, HVO, emulsi air-diesel, H₂O₂, dan CeO₂ menjanjikan penurunan emisi, tetapi memerlukan optimasi rasio campuran, timing injeksi, EGR, dan desain ruang bakar. Tinjauan ini menyimpulkan bahwa arah riset paling kuat adalah kerangka fuel-combustion-control-after-treatment-intelligence untuk membangun mesin rendah emisi yang adaptif, terukur, dan siap mendukung target net-zero.

Kata kunci: Pembakaran Rendah Temperatur; Mesin Pembakaran Dalam; Hidrogen; Biofuel; RCCI

ABSTRACT

The energy transition places internal combustion engines in a paradoxical position: they remain dominant in heavy-duty transport, marine propulsion, mobile power generation, and industrial applications, yet they are major sources of NO_x, particulate matter, hydrocarbons, CO, and greenhouse gases. This article reviews Scopus-indexed literature from 2022 to 2026 available in the author's extraction dataset to synthesize recent progress in low-temperature combustion, low-carbon fuels, injection strategies, EGR, turbocharging, after-treatment, nano-additives, and artificial intelligence for emission prediction and optimization. A narrative-systematic approach was applied by clustering the literature into advanced combustion modes, fuel formulation, air-injection control, residual pollutant mitigation, and sensing-prediction-control models. The synthesis shows that HCCI, PCCI/PPCI, GCI, RCCI, CAI, and dual-mode dual-fuel concepts expand opportunities for high efficiency and soot/PM reduction, but they remain constrained by combustion phasing control, narrow operating range, pressure rise, knocking, and CO/HC/NO_x trade-offs. Hydrogen, biohydrogen, ammonia, oxygenated biofuels, HVO, water-diesel emulsions, H₂O₂, and CeO₂ offer strong emission-reduction potential, but their benefits depend on blend ratio, injection timing, EGR, and combustion chamber design. This review concludes that the most promising research direction is an integrated fuel-combustion-control-after-treatment-intelligence framework for adaptive and measurable low-emission engines aligned with net-zero targets.

Keywords: Low-Temperature Combustion; Internal Combustion Engine; Hydrogen; Biofuel; RCCI

PENDAHULUAN

Mesin pembakaran dalam belum dapat dilepaskan secara tiba-tiba dari sistem energi modern karena masih menjadi penggerak utama kendaraan berat, mesin kelautan, sistem pembangkit bergerak, alat industri, dan banyak aplikasi yang menuntut densitas energi tinggi. Namun, tekanan regulasi emisi dan target dekarbonisasi telah mengubah orientasi riset dari sekadar peningkatan daya menjadi optimasi simultan antara efisiensi termal, konsumsi bahan bakar, stabilitas operasi, dan penurunan polutan. Literatur mutakhir menunjukkan bahwa agenda riset tidak lagi bertumpu pada satu solusi tunggal, melainkan pada integrasi pembakaran rendah temperatur, bahan bakar alternatif, injeksi presisi,

manajemen udara, after-treatment, dan pemodelan cerdas (1),(6).

Pembakaran rendah temperatur atau low temperature combustion (LTC) menjadi pusat transformasi karena berpotensi memutus trade-off klasik NO_x-partikulat pada mesin diesel. Mode HCCI, PCCI/PPCI, GCI, PPC, RCCI, CAI, dan dual-mode dual-fuel didesain untuk memperbaiki pencampuran udara-bahan bakar, menurunkan zona temperatur lokal, dan mengendalikan reaktivitas campuran sebelum pembakaran utama terjadi (3),(10). Kelebihannya adalah potensi penurunan soot dan NO_x, sedangkan kelemahannya meliputi peningkatan CO/HC, pressure rise terlalu cepat, noise pembakaran, misfire, rentang operasi sempit, dan kebutuhan aktuator kontrol yang kompleks.

doi: <https://doi.org/10.62299/jeme.v3i2.37> p-issn/e-issn: 3030-9867/3046-5850

Journal of Energy and Mechanical Engineering, Universitas Nahdlatul Ulama Gorontalo

Kesenjangan utama dari literatur yang ditelaah adalah masih terpisahnya kajian formulasi bahan bakar, mode pembakaran, strategi injeksi, after-treatment, dan kecerdasan buatan. Padahal, emisi mesin adalah hasil interaksi nonlinier antara reaktivitas bahan bakar, stratifikasi campuran, EGR, temperatur masuk, geometri ruang bakar, fase pembakaran, dan performa katalis. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan menyusun sintesis integratif berbasis literatur Scopus 2022-2026 yang menghubungkan bahan bakar rendah karbon, LTC, kontrol udara-injeksi, after-treatment, dan model prediktif sebagai dasar pengembangan mesin pembakaran dalam rendah emisi.

METODE TINJAUAN

Artikel ini menggunakan pendekatan tinjauan naratif-sistematik berbasis ekstraksi literatur. Seluruh sumber dipilih dari dataset yang memuat publikasi Scopus 2022-2026 mengenai mesin pembakaran dalam, pembakaran rendah temperatur, hidrogen, biohidrogen, amonia, biofuel, injeksi common-rail, emisi gas buang, after-treatment, pemodelan numerik, serta kecerdasan buatan. Karena tujuan artikel adalah menjaga integritas sitasi dari basis ekstraksi, tidak ada referensi tambahan dari web yang digunakan.

Sintesis dilakukan melalui lima klaster: mode pembakaran lanjut; bahan bakar dan aditif; kendali injeksi, EGR, turbocharging, dan geometri ruang bakar; after-treatment dan residual pollutants; serta sensor, model data-fisika, deep learning, dan transfer learning. Artikel eksperimental diberi bobot tinggi ketika melaporkan variabel performa dan emisi secara eksplisit seperti BTE, BSFC, NO_x, CO, HC, PM, soot, smoke opacity, MPRR, heat release rate, dan pressure trace.

Tabel 1. Ringkasan mode pembakaran rendah temperatur dan implikasi teknisnya

Mode/konsep	Mekanisme dan keunggulan	Keterbatasan dan implikasi riset	Ref.
LTC/HCCI/CAI	Auto-ignition homogen/terkontrol; efisiensi tinggi dan NO _x /PM rendah.	Phasing sulit, rentang sempit, noise/knock; cocok untuk hybrid dan load levelling.	1, 15, 23, 34
PCCI/PPCI/PPC	Premixing parsial; NO _x dan soot turun pada kondisi optimum.	CO/HC dan MPRR naik; perlu EGR, split injection, dan chamber design.	3, 10, 24, 29, 32, 38
GCI	Gasoline compression ignition; ITE tinggi dan stratifikasi lebih fleksibel.	Idle rendah dan MPRR menantang; butuh DMI dan EGR adaptif.	11, 18, 34
RCCI/DMDF	Dua bahan bakar reaktivitas berbeda; ultra-low NO _x /soot dan fuel flexibility.	Kontrol rasio energi, EGR, boost, dan transient response kompleks.	8, 26, 28, 36, 39, 42

Tabel 1 memperlihatkan bahwa setiap mode LTC memiliki keunggulan emisi yang berbeda, tetapi tidak ada satu mode yang sepenuhnya bebas kompromi. HCCI dan CAI unggul pada homogenitas campuran dan penurunan NO_x/PM, namun paling sensitif terhadap kendali phasing. PCCI/PPCI lebih realistis untuk mesin diesel eksisting karena masih dapat dikendalikan melalui

Studi numerik digunakan untuk memahami mekanisme yang sulit diamati langsung, sedangkan artikel review dipakai sebagai payung teoritis untuk menilai arah perkembangan teknologi (15),(23),(40).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mode Pembakaran Rendah Temperatur

HCCI, PCCI, PPCI, PPC, GCI, RCCI, dan CAI memiliki akar konseptual yang sama, yaitu mengurangi heterogenitas temperatur dan menghindari zona kaya bahan bakar yang menjadi sumber soot, sambil menekan puncak temperatur yang memicu NO_x. HCCI menawarkan pencampuran paling homogen, tetapi paling sulit dikendalikan karena waktu penyalaan bergantung pada kondisi termokimia campuran. PCCI/PPCI memberi fleksibilitas lebih besar melalui injeksi bertahap dan sebagian premixing, tetapi CO dan HC meningkat ketika temperatur lokal terlalu rendah atau campuran terlalu encer (3),(10).

Studi PCCI memperlihatkan bahwa EGR, early intake valve closing, injection advance, split injection, dan fuel vaporization dapat menurunkan NO_x, tetapi juga mendorong pembakaran tidak lengkap. EIVC dapat menggeser center of combustion mendekati TDC dan menurunkan NO_x sampai sekitar 30%, terutama ketika dikombinasikan dengan EGR; namun CO meningkat karena rasio udara-bahan bakar menurun (3). Pada wilayah LTC, injeksi terlalu maju dan tekanan injeksi terlalu tinggi dapat memperpanjang pembakaran, menurunkan kinerja, dan menaikkan CO/THC walaupun NO_x dan PM turun (10). Ringkasan mode pembakaran rendah temperatur ditunjukkan pada Tabel 1.

split injection dan EGR, tetapi peningkatan CO/HC perlu diantisipasi. Sementara itu, RCCI dan DMDF menawarkan fleksibilitas bahan bakar dan potensi ultra-low NO_x/soot, namun mensyaratkan koordinasi lebih rumit antara reaktivitas bahan bakar, boost pressure, EGR, dan respons transien. Dengan demikian, pembahasan tabel ini menegaskan bahwa perkembangan

LTC harus diarahkan pada optimasi multi-objektif, bukan hanya pada penurunan satu jenis emisi.

RCCI berkembang sebagai mode yang sangat fleksibel karena memanfaatkan dua bahan bakar dengan reaktivitas berbeda: bahan bakar rendah reaktivitas seperti alkohol, gasoline, atau hidrogen, serta bahan bakar tinggi reaktivitas seperti diesel atau biodiesel. Keunggulannya adalah kemampuan membentuk gradien reaktivitas spasial sehingga fase pembakaran dapat dikontrol lebih halus dibanding HCCI. Namun, RCCI menuntut koordinasi rasio energi, EGR, compression ratio, piston geometry, dan timing injeksi (8),(28),(39).

Bahan Bakar Rendah Karbon, Aditif, dan Kontrol Cerdas

Hidrogen memperoleh perhatian kuat karena tidak memiliki ikatan karbon dan memiliki nilai kalor massa tinggi. Hydrogen injection dilaporkan dapat menurunkan NO_x hingga sekitar 30%, PM hampir 25%, serta meningkatkan efisiensi termal 5-10% dalam konteks strategi pengurangan emisi diesel (6). Integrasi hidroge dengan LTC menjanjikan pengurangan NO_x dan soot, tetapi kendala knocking, NO_x lokal, penyimpanan, keselamatan, dan komersialisasi tetap kritis (21),(23). Biohidrogen pada PCCI dapat meningkatkan BTE dan heat release rate, namun BSFC dapat meningkat karena perbedaan kandungan energi; konfigurasi DH30 lebih baik pada emisi, sedangkan DH10 lebih baik pada performa (14).

Amonia muncul sebagai pembawa hidrogen cair yang berpotensi menjadi energy carrier bebas karbon. Green ammonia dinilai penting untuk penyimpanan energi bersih, tetapi masih memiliki kelemahan produksi dan aplikasi (35). Pada ammonia/diesel dual-fuel, optimasi

nozzle angle dan split diesel injection diperlukan untuk menurunkan unburned NH₃, N₂O, dan GHG, dengan trade-off terhadap indicated thermal efficiency (42). Dengan demikian, dekarbonisasi mesin melalui hidrogen atau amonia tidak dapat disederhanakan sebagai substitusi bahan bakar, tetapi harus disertai LTC, EGR, split injection, sensing pembakaran, dan after-treatment khusus.

Biofuel berbasis biomassa dan limbah menjadi jalur transisi realistis karena dapat dicampur dengan diesel tanpa mengubah total platform mesin. Hexyl hexanoate dalam ULSD pada strategi multimode PCCI/CDC dapat menurunkan PM/PN dan mengubah komposisi hidrokarbon walaupun total HC tidak selalu berubah (4). IBE pada pilot diesel dalam diesel-methanol dual-fuel menurunkan soot secara besar, tetapi campuran 30% IBE mulai mengorbankan performa dan meningkatkan CO, HC, serta NO_x (26). GPPHVO dari limbah grapefruit peel dapat mempertahankan performa diesel dan menurunkan CO dengan pengaruh kuat dari nozzle opening pressure (19).

Emulsi air-diesel, H₂O₂, dan CeO₂ bekerja dengan mengubah mikroproses pembakaran. Emulsi water-diesel dengan CeO₂ dapat menurunkan smoke opacity, NO_x, CO, dan HC pada beban maksimum (5). H₂O₂ dalam B20 meningkatkan micro-explosion, pencampuran, dan pembentukan radikal OH sehingga CO, HC, dan NO_x turun; CeO₂ menambah manfaat, tetapi dampaknya lebih kecil dibanding H₂O₂ (22). Secara mekanistik, CeO₂ dapat menurunkan barrier dekomposisi H₂O₂ dan mempercepat oksidasi n-heptane melalui pelepasan OH radikal (17). Ringkasan bahan bakar, aditif, dan teknologi digital pendukung disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ringkasan bahan bakar, aditif, dan teknologi digital pendukung mesin rendah emisi

Teknologi	Mekanisme dan manfaat	Risiko/trade-off dan kebutuhan optimasi	Ref.
Hidrogen/biohidrogen	Pembawa energi bebas karbon; BTE/HRR dapat meningkat dan emisi tertentu turun.	NO _x , knock, backfire, safety, dan storage; perlu LTC, EGR, split injection, sensor phasing.	6, 7, 8, 14, 21, 23
Amonia/green ammonia	Hydrogen carrier cair; potensi dekarbonisasi tinggi.	uNH ₃ , N ₂ O, flame speed rendah; perlu diesel pilot dan after-treatment khusus.	35, 42
Biofuel oksigenat/HVO	Oksigen internal dan aromatik rendah; soot, BC, PM/PN turun.	CO/HC/NO _x dapat naik pada blend tinggi; perlu optimasi blend, injeksi, dan feedstock.	4, 19, 26, 37, 40
Emulsi/H ₂ O ₂ /CeO ₂	Micro-explosion dan radikal OH; CO, HC, NO _x , dan smoke turun.	Stabilitas, deposit, durability; perlu surfactant, ultrasonikasi, dan uji jangka panjang.	5, 17, 22
AI/sensing/control	Prediksi fase pembakaran dan injeksi real-time; mendukung kontrol adaptif.	Overfitting dan transfer antar-mesin; perlu data-physics fusion dan transfer learning.	7, 13, 20, 27, 30, 44

Tabel 2 menunjukkan bahwa strategi bahan bakar dan aditif tidak dapat dipisahkan dari kontrol pembakaran dan digitalisasi mesin. Hidrogen dan biohidrogen berpotensi menurunkan emisi karbon pada titik pakai, tetapi memerlukan kontrol NO_x, knock, backfire, dan

keselamatan. Amonia memperluas opsi penyimpanan energi bebas karbon, tetapi menimbulkan tantangan uNH₃ dan N₂O yang membutuhkan after-treatment khusus. Biofuel oksigenat dan HVO lebih kompatibel dengan mesin eksisting, namun rasio campuran tinggi

dapat memunculkan trade-off CO/HC/NO_x. Emulsi, H₂O₂, dan CeO₂ bekerja pada level mikroproses melalui micro-explosion, radikal OH, dan katalisis oksidasi, sedangkan AI/sensing/control berfungsi sebagai lapisan pengendali agar manfaat bahan bakar dan aditif dapat dicapai secara stabil pada kondisi operasi nyata.

Kendali injeksi menentukan atomisasi, penetrasi semprot, stratifikasi, ignition delay, heat release rate, MPRR, dan lokasi pembentukan soot. Flexible fuel injection dengan tekanan awal ultratinggi memperkuat turbulent kinetic energy, memperbaiki spray mixing, menaikkan heat release rate, serta menurunkan soot dan NO_x secara bersamaan pada konfigurasi tertentu (43). Double main-injection pada GCI dapat mengatur fuel stratification, menurunkan pressure rise rate, dan meningkatkan indicated thermal efficiency di beban tinggi (11). EGR tetap menjadi aktuatur utama untuk menurunkan NO_x, tetapi EGR berlebihan dapat memperburuk CO/HC, soot, dan kestabilan pembakaran (3),(38).

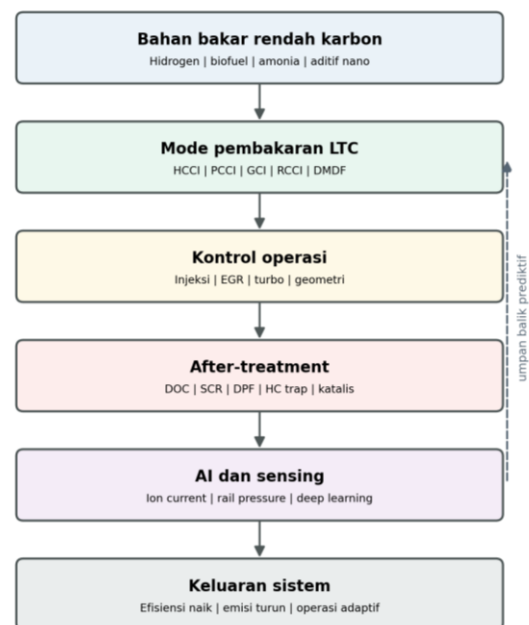
Turbocharging dan air management menjadi tantangan khusus bagi dual-mode dual-fuel dan RCCI pada kendaraan medium/heavy-duty. Sistem DMDF membutuhkan EGR tinggi sekaligus boost pressure memadai pada low engine speed, kondisi yang sulit dicapai dengan turbocharger konvensional (28). Validasi eksperimental menunjukkan bahwa turbocharger baru memperbaiki respons transien dan air intake management, tetapi pemenuhan standar emisi dinamis tetap menantang (36). Karena itu, teknologi pembakaran rendah emisi tidak cukup diuji pada steady-state, tetapi harus dievaluasi dalam siklus transien dan integrasi after-treatment. Meskipun strategi in-cylinder semakin maju, after-treatment tetap diperlukan karena LTC sering memindahkan masalah dari NO_x/soot ke CO/HC, sedangkan cold-start menghasilkan emisi hidrokarbon tinggi sebelum katalis mencapai light-off temperature. Diesel oxidation catalyst, selective catalytic reduction, lean NO_x trap, diesel particulate filter, dan regenerasi katalis menjadi komponen penting untuk mendekati near-zero emission (15). Emisi HC cold-start membutuhkan sinergi pre-treatment dan after-treatment, mulai dari intake control, parameter timing, fuel control, adsorbent, molecular sieve, adsorptive catalyst, HC trap, hingga thermal management (9).

Literatur terbaru memperlihatkan pergeseran dari eksperimen parameter menuju sistem sensing-prediction-control. Model data-physics fusion berbasis ion current signals pada pembakaran CH₄/H₂/air partially premixed mencapai koefisien determinasi rata-rata di atas 0,963 untuk prediksi combustion phase (7). Estimasi injection rate dan injection volume berbasis rail pressure dengan Kalman filter menghasilkan error sekitar 4-4,5% pada berbagai kondisi (30). Deep transfer learning untuk multiple injection rate pada common rail marine engine mencapai R² sekitar 0,9851 dengan waktu

prediksi sekitar 34 ms (44). Nilai utama AI bukan menggantikan pemahaman fisik, tetapi menjembatani kompleksitas nonlinier antara bahan bakar, injeksi, EGR, temperatur, tekanan, fase pembakaran, dan emisi.

Berdasarkan seluruh sintesis, arah riset masa depan perlu bergeser dari optimum tunggal menuju multi-objective Pareto front yang mempertimbangkan efisiensi, konsumsi bahan bakar, NO_x, PM/PN, soot, CO, HC, NH₃/N₂O bila relevan, durability, biaya, keselamatan, dan kesiapan industri. Platform eksperimen masa depan sebaiknya menggabungkan sensor tekanan, ion current, rail pressure, gas sensing, CEMS miniatur, data ECU, serta model digital twin untuk menghasilkan kontrol adaptif. Dengan kerangka fuel-combustion-control-after-treatment-intelligence, mesin pembakaran dapat berevolusi dari perangkat mekanis konvensional menjadi sistem energi siber-fisik rendah emisi (7),(13),(44).

Kerangka integratif tersebut diringkas pada Gambar 1 agar hubungan antara bahan bakar, pembakaran, kontrol, after-treatment, dan kecerdasan buatan lebih mudah dipahami sebagai satu sistem.



Gambar 1. Flow diagram sistem

Gambar 1 memperlihatkan bahwa penurunan emisi mesin tidak bergantung pada satu teknologi. Bahan bakar rendah karbon memengaruhi reaktivitas; mode LTC mengatur temperatur; kontrol injeksi dan EGR menstabilkan pembakaran; after-treatment menangani polutan sisa; sedangkan AI menutup siklus melalui prediksi dan optimasi real-time untuk mencapai efisiensi tinggi, emisi rendah, dan kesiapan operasi adaptif.

KESIMPULAN DAN SARAN

Tinjauan ini menunjukkan bahwa literatur 2022-2026 bergerak menuju paradigma baru mesin pembakaran dalam: integrasi pembakaran rendah temperatur, bahan bakar rendah karbon, pengendalian udara-injeksi presisi, after-treatment adaptif, dan pemodelan cerdas. LTC melalui HCCI, PCCI/PPCI, GCI, RCCI, CAI, dan DMDF terbukti mampu menurunkan NO_x, soot, dan PM pada banyak kondisi, tetapi masih menghadapi keterbatasan CO/HC, noise, pressure rise, knocking, dan rentang operasi (1),(3),(10).

Hidrogen, biohidrogen, amonia, biofuel, HVO, bahan bakar limbah, emulsi, H₂O₂, dan CeO₂ menawarkan jalur dekarbonisasi dan penurunan polutan, tetapi tidak ada yang bebas trade-off. Artikel ini merekomendasikan riset lanjutan yang menggabungkan validasi transien, evaluasi multi-polutan, ko-desain in-cylinder strategy dan after-treatment, serta data-physics fusion untuk kontrol adaptif. Untuk publikasi JEME, naskah ini telah disusun agar fokus, tidak memisahkan bagian tinjauan pustaka secara eksplisit, dan menampilkan kontribusi kebaruan pada bagian pendahuluan dan pembahasan.

DAFTAR PUSTAKA

- Allmagi, R., Ilves, R., & Olt, J. (2024). Comprehensive review of innovation in piston engine and low temperature combustion technologies. <https://doi.org/10.3846/transport.2024.21333>
- Cengiz, C., & Ozen Unverdi, S. (2023). Effect of early intake valve closing, exhaust gas recirculation and split injection on combustion and emissions characteristics of a HDDI diesel engine operating in PCCI combustion mode. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129079>
- Park, Y., Moses-DeBusk, M., Sluder, S. S., & Huff, S. P. (2023). Impact of biofuel blending on hydrocarbon speciation and particulate matter from a medium-duty multimode combustion strategy. <https://doi.org/10.3390/en16155735>
- Kesharvani, S., Chhabra, M., Dwivedi, G., Verma, T. N., & Pugazhendhi, A. (2023). Execution and emission characteristics of automotive compression ignition engine powered by cerium oxide nanoparticles doped water diesel emulsion fuel. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128670>
- Khanna, S., Dewangan, A. K., Yadav, A. K., & Ahmad, A. (2025). A progressive review on strategies to reduce exhaust emissions from diesel engine: Current trends and future options. <https://doi.org/10.1002/ep.70012>
- Li, Y., Zhang, X., Zhang, L., & Chen, H. (2025). A data-physics fusion approach for combustion phase prediction using ion current signals in CH₄/H₂/air partially premixed combustion. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.151204>
- Rao, G. A. P., Reddy, K. J., & Reddy, R. M. (2025). Review on effective abatement of pollutant emissions of an RCCI engine with hydrogen addition as LRF and other fuels as HRF. <https://doi.org/10.1080/01430750.2024.2446516>
- Zhang, Z., Zhong, W., Tan, D., Cui, S., Pan, M., Zhao, Z., Zhang, J., & Hu, J. (2024). Hydrocarbon adsorption mechanism of modern automobile engines and methods of reducing hydrocarbon emissions during cold start process: A review. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120188>
- Gezer, O., Ozener, O., & Ozkan, M. (2024). Experimental investigation of low temperature combustion in a diesel engine depending on injection advance and injection pressure. <https://doi.org/10.2298/TSCI240105155G>
- Wu, H., Zhang, Y., Mi, S., Zhao, W., He, Z., Qian, Y., & Lu, X. (2023). A methodology for regulating fuel stratification and improving fuel economy of GCI mode via double main-injection strategy. <https://doi.org/10.1007/s11708-022-0859-z>
- (13) Liu, T., Hwang, Y. J., Zhang, L., Hong, J., Hwang, T., & Jun, S. C. (2025). Hybrid series of carbon-vacancy electrodes for multi chemical vapors diagnosis using a residual multi-task model. <https://doi.org/10.1002/advs.202500412>
- (14) Zhao, B., Song, X., Wang, H., Kandasamy, S., Chinnathambi, A., Awad Alahmadi, T., Sathiyam, G., Thuy Lan Chi, N., & Shanmuganathan, R. (2023). Effects of biohydrogen on premixed charge compression ignition engine operating at various inlet air temperatures. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125907>
- (15) Da Costa, S., Bukkarapu, K. R., Fernandes, R., Krishnasamy, A., & Morajkar, P. P. (2024). Advancements in in-cylinder and after-treatment strategies for mitigating pollutants from diesel engines: A critical review. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c00705>
- (17) Sun, H., Zhang, W., & Wang, Y. (2024). Mechanism insights into low-temperature oxidation of n-heptane on CeO₂ surface: A DFT study. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131453>
- (18) Krishnamoorthi, M., & Agarwal, A. K. (2023). Numerical simulation and emissions performance of a gasoline compression ignition engine at high idle and low-load conditions. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45705-0_96
- (19) Lakshmaiya, N., Devarajan, Y., & Raja, T. (2025). Assessment and impact of grapefruit peel powder hydro processed vegetable oil blends in diesel engines under different fuel nozzle opening pressure on performance and emissions. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102445>
- (20) Roy, A., Pramanik, S., Mitra, K., & Chakraborty, M. (2025). An optimal data analytics model for accurate projection of CI

- engine performance and emission reduction in hybrid fuel mode. <https://doi.org/10.1007/s10668-025-06130-6>
18. (21) Sun, Z., Hong, J., Zhang, T., Sun, B., Yang, B., Lu, L., Li, L., & Wu, K. (2023). Hydrogen engine operation strategies: Recent progress, industrialization challenges, and perspectives. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.256>
 19. (22) Mohan, S., & Dinesha, P. (2022). Performance and emissions of biodiesel engine with hydrogen peroxide emulsification and cerium oxide nanoparticle additives. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123872>
 20. (23) Rameez, P. V., & Mohamed Ibrahim, M. (2024). A comprehensive review on the utilization of hydrogen in low temperature combustion strategies: Combustion, performance and emission attributes. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101511>
 21. (24) Elbanna, A. M., Xiaobei, C., Can, Y., Elkelawy, M., & Bastawissi, H. A.-E. (2023). A comparative study for the effect of different premixed charge ratios with conventional diesel engines on performance, emissions, and vibrations. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23049-x>
 22. (26) Li, G., Wang, J., Li, K., Yang, K., Han, W., & Li, S. (2024). Effects of isopropanol-butanol-ethanol on diesel-methanol dual-fuel engine characteristics. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121790>
 23. (27) Roy, A., Pramanik, S., & Mitra, K. (2025). An optimal neural network model for projecting CI engine operational efficiency and emission in hydrogen blend using Simulink. <https://doi.org/10.1007/s42979-025-04474-4>
 24. (28) Garcia, A., Monsalve-Serrano, J., Marco-Gimeno, J., & Fogue-Robles, A. (2025). Numerical selection of the optimal turbocharger system for a multi-cylinder dual-fuel engine. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.134096>
 25. (29) Jena, A., Sonawane, U., & Agarwal, A. K. (2023). Partially premixed combustion of diesel-di-ethyl ether blends in light-duty commercial engine. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128197>
 26. (30) Liu, B., Fei, H., Wang, L., Fan, L., & Yang, X. (2024). Real-time estimation of fuel injection rate and injection volume in high-pressure common rail systems. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131386>
 27. (32) Bhurat, S., Pandey, S., Chintala, V., Jaiswal, M., & Kurein, C. (2022). Effect of novel fuel vaporiser technology on engine characteristics of PCCI engine with toroidal combustion chamber. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123197>
 28. (34) Bajwa, A. U., Leach, F. C. P., & Davy, M. H. (2023). Prospects of controlled auto-ignition based thermal propulsion units for modern gasoline vehicles. <https://doi.org/10.3390/en16093887>
 29. (35) Mohanasundaram, S., Varadharajan, V., Selvaraju, M., Manikandan, S., Ramasamy, S., Jayakumar, M., Prabhu Sundramurthy, V., Baskar, G., & Pugazhendhi, A. (2024). Green ammonia as clean-energy carrier toward zero carbon emission. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131118>
 30. (36) Garcia, A., Monsalve-Serrano, J., Marco-Gimeno, J., & Iniguez, E. (2025). Experimental evaluation of the optimal turbocharger system for a multi-cylinder dual-fuel engine towards transient conditions. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135151>
 31. (37) Kumar Das, A., Mohan, I., Yao, Z., Parida, B., Kumar Das, M., & Kumar, S. (2024). Thermodynamic investigation and 4Es analysis of a VCR diesel engine using emulsified diesel with catalytic co-pyrolysis fuel derived from waste LDPE and Pongamia pinnata seeds. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.09.088>
 32. (38) Manikandan, S., Vickram, S., & Devarajan, Y. (2025). Cutting-edge technologies: Biofuel innovations in marine propulsion systems to lower black carbon emissions. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104095>
 33. (39) Srivatsa, C. V., Alam, S. S., Spickler, B., & Depcik, C. (2024). Effect of exhaust gas recirculation on combustion characteristics of ultra-low-sulfur diesel in conventional and PPCI regimes. <https://doi.org/10.3390/en17163950>
 34. (40) Korkmaz, S., Yaman, H., & Yesilyurt, M. K. (2026). Developments in the RCCI engines powered by several alternative fuel types: An overview. <https://doi.org/10.1177/09544089241236059>
 35. (42) Wang, Z., Yang, C., Zhang, F., & Cheng, X. (2024). Effects of diesel injector nozzle angle and split diesel injection strategy on combustion and emission characteristics of an ammonia/diesel dual-fuel engine. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132686>
 36. (43) Mei, Q., Naruemon, I., Liu, L., Wu, Y., & Ma, X. (2023). Numerical investigation on combustion and emission characteristics of diesel engine with flexible fuel injection. <https://doi.org/10.3390/machines11010120>
 37. (44) Lu, X., Zhao, J., Markov, V., & Grekhov, L. (2025). Deep transfer learning-based model for real-time prediction of multiple injection rate in common rail system for marine engine. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137206>