

Pengaruh variasi rasio kompresi terhadap performa dan emisi mesin bensin 110 cc

Resa Hardianto¹ Syaiful Arif²

^{1,2}Universitas Pamulang, Fakultas Teknik Mesin, Kampus Kota Serang
Jl. Lintas Serang - Jakarta Kampung Malandang Kel. Kelodran Kec. Walantaka, Kota Serang - Banten 42183
Email: resahardianto34@gmail.com

Received: 21 February 2025, Reviewed: 25 March 2025, Published: 30 April 2026
<https://doi.org/10.71452/jtmi211202687>

Abstrak. Modifikasi geometri ruang bakar untuk merekayasa rasio kompresi merupakan pendekatan teknis dalam upaya optimalisasi efisiensi termal pada motor bakar pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine*). Penelitian ini menyajikan analisis mengenai pengaruh variasi rasio kompresi terhadap karakteristik performa (torsi dan daya) serta emisi gas buang pada mesin bensin satu silinder berkapasitas 110 cc dengan sistem pengabutan karburator. Pendekatan eksperimental kuantitatif dilakukan dengan menguji tiga konfigurasi rasio kompresi: 8,9:1 (penurunan rasio/dekompresi), 9,3:1 (spesifikasi standar pabrikan), dan 9,7:1 (peningkatan rasio kompresi). Evaluasi performa mekanis diukur menggunakan instrumen *chassis dynamometer*, sementara konsentrasi polutan gas buang dianalisis menggunakan *five-gas analyzer* dengan mengacu pada metode keseimbangan atom karbon (*Carbon Balance Method*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan rasio kompresi 9,7:1 menghasilkan luaran performa tertinggi, mencatatkan daya puncak sebesar 2,618 kW pada putaran mesin 6500 RPM (peningkatan sebesar 1,87% dari standar) dan torsi maksimum sebesar 8,22 Nm pada putaran 5750 RPM (peningkatan sebesar 7,12%). Sebaliknya, penurunan kompresi ke rasio 8,9:1 berdampak pada penurunan daya puncak menjadi 2,202 kW. Meskipun peningkatan rasio kompresi terbukti mampu menaikkan efisiensi volumetrik dan memicu peningkatan performa mekanis, modifikasi tersebut menghasilkan efek termodinamika sekunder berupa anomali pembakaran. Peningkatan tekanan mempersempit area sisa (*clearance volume*), yang memicu peningkatan efek *wall quenching* dan menjebak molekul bahan bakar pada *crevice volume*. Kondisi ini, diiringi dengan sifat bahan bakar uji, menyebabkan peningkatan emisi Hidrokarbon (HC) hingga mencapai 300 ppm. Analisis ini menyimpulkan bahwa peningkatan performa mekanis melalui modifikasi rasio kompresi pada mesin berkapasitas kecil mensyaratkan penyesuaian stoikiometri dan spesifikasi bahan bakar yang presisi guna menekan pembentukan emisi polutan.

Kata Kunci: Rasio Kompresi, Performa Mesin, Emisi Hidrokarbon, Motor Bakar.

Abstract. Modification of combustion chamber geometry to engineer compression ratio is a technical approach in an effort to optimize thermal efficiency in internal combustion engines. This study presents an analysis of the effect of compression ratio variations on performance characteristics (torque and power) and exhaust emissions in a 110 cc single-cylinder gasoline engine with a carburetor fogging system. A quantitative experimental approach was carried out by testing three compression ratio configurations: 8.9:1 (decreased ratio/decompression), 9.3:1 (standard manufacturer's specifications), and 9.7:1 (increased compression ratio). Mechanical performance evaluation was measured using a chassis dynamometer instrument, while exhaust gas pollutant concentrations were analyzed using a five-gas analyzer with reference to the Carbon Balance Method. The test results showed that the application of a compression ratio of 9.7:1 produced the highest performance output, recording a peak power of 2.618 kW at 6500 RPM (an increase of 1.87% from the standard) and a maximum torque of 8.22 Nm at 5750 RPM (an increase of 7.12%). Conversely, reducing the compression ratio to a ratio of 8.9:1 resulted in a decrease in peak power to 2.202 kW. Although increasing the compression ratio was proven to increase volumetric efficiency and trigger an increase in mechanical performance, the modification produced a secondary thermodynamic effect in the form of combustion anomalies. The increase in pressure narrowed the remaining area (clearance volume), which triggered an increase in the wall quenching effect and trapped fuel molecules in the crevice volume. This condition, accompanied by the properties of the test fuel, caused an increase in Hydrocarbon (HC) emissions to reach 300 ppm. This analysis concluded that improving mechanical performance through compression ratio modification in small capacity engines requires precise adjustments to stoichiometry and fuel specifications to suppress the formation of pollutant emissions.

Kata Kunci: Rasio Kompresi, Performa Mesin, Emisi Hidrokarbon, Motor Bakar.

PENDAHULUAN

Motor bakar dapat disebut juga dengan istilah *internal combustion engine*, itu merupakan sebuah mesin yang dapat suatu energi yaitu dari energi thermal jadi energi mekanik, energi didapatkan dari terjadinya pembakaran. Di Indonesia sepeda motor merupakan sebuah alat transportasi yang banyak digunakan.

Pada umumnya, pengguna sepeda motor menginginkan agar dapat meningkatkan performa mesin dan juga hemat bahan bakar. Apabila sebuah perusahaan produksi kendaraan tidak dapat merancang suatu kendaraan dengan

cemat, maka keinginan masyarakat tidak bisa terpenuhi. Ada suatu cara agar dapat meningkatkan performa mesin yaitu dengan cara meningkatkan kompresi, karena pada sebuah kendaraan daya yang diperoleh itu tergantung dari besar kecilnya kompresi. Perbandingan kompresi itu diperoleh dari besar volume silinder dan volume ruang bakar [1].

Apabila jumlah perbandingan kompresi tinggi, ini dapat diperoleh tekanan yang besar pada saat bercampurnya bahan bakar dengan udara. Untuk dapat meningkatkan kompresi bisa diperoleh dengan cara memadatkan volume ruang bakar dengan cara merubah

kepala silinder disekrap. Hal ini mengakibatkan jumlah volume pada ruang bakar menjadi lebih kecil, menyebabkan tekanan kompresi dan juga temperatur menjadi tinggi, sehingga dapat diperoleh daya yang besar. Dengan langkah ini simpel tetapi ada resikonya, yaitu apabila proses sekrap terlalu banyak dapat berdampak pada piston akan berbenturan dengan katup dan bisa nyebekkan katup bengkok sehingga dapat terjadi detonasi yang lebih besar.

Agar menghasilkan sebuah kendaraan dengan performa yang bagus dapat diperoleh dengan sebuah cara memodifikasi sebuah komponen pada mesin [2]. Modifikasi dapat dilakukan dengan cara mengubah suatu komponen pada mesin agar dapat diperoleh perbandingan kompresi yang tinggi dan juga hemat bahan bakar oktan tinggi, supaya tidak menyebabkan detonasi. Agar dapat memperoleh perbandingan kompresi yang tinggi bisa memilih bahan bakar dengan oktan yang tepat. Apabila perbandingan kompresi itu semakin tinggi, maka perlu diimbangi bahan bakar dengan oktan yang tinggi/baik [3].

Stroke Up merupakan perubahan langkah pada poros engkol menjauh supaya langkah piston. Sedangkan *Bore Up* itu sendiri merupakan pemodifikasian ukuran piston supaya lebih besar dan juga mengubah ukuran blok silinder. *Bore Up* sendiri dapat berpengaruh signifikan pada peningkatan kapasitas mesin, sehingga meningkatkan perbandingan kompresi yang tinggi [4]. Dengan metode keseimbangan karbon dapat menentukan tingkat emisi hasil dari konsumsi bahan bakar [5]. Pada eksperimen mesin 4 langkah, dengan menggunakan NG pada mesin ini didapatkan performa mesin menurun, tetapi emisi gas buang dapat meningkat [6]. Oleh sebab itu perlu mengatur waktu pengapian supaya maju agar dapat meningkatkan proses pembakaran bahan bakar [7].

Pada suhu kelembaban yang ada didalam ruang bakar sangat berpengaruh terhadap kinerja mesin, beserta emisi [8]. Disaat proses pembakaran pertama penyemprotan injektor dengan air dimulai kemudian terjadinya penguapan air tersebut [9]. Didalam mesin penginjeksian sangat berpengaruh didalam proses pembakaran, apabila terjadi penyumbatan didalam sauran injeksi akan berakibat penurunan performa mesin [10], sehingga mengakibatkan penambahan jumlah bahan bakar yang disemprotkan injektor, dan membuat daya performa mesin terjaga [11]. Pada perbandingan kompresi yang lebih tinggi ini akan meningkatkan *CO* sesuai dengan peningkatan semprotan injektor [12]. Emisi *NOx* (nitrous oksida) juga akan berkurang [13], disebabkan oleh semprotan injektor lebih besar, selain itu juga dapat mengurangi *CH₂O* sehingga terbentuknya *H₂O₂*, dan semprotan injektor ini dapat mengurangi *NOx* [14]. Ada suatu metode yaitu dengan cara menggunakan perangkat lunak *AVL*, metode ini dinamakan *Latin Hypercube*, dan dapat menentukan beberapa posisi titik pada 3 dimensi [15].

Dalam penelitiannya tentang konsep modifikasi untuk meningkatkan daya mesin sepeda motor karakter daya yang dihasilkan mesin Dimana dalam kondisi baru, daya dan torsi standar yang dapat dihasilkan oleh mesin adalah 8,2 HP/8000 rpm dan 8,65 Nm/6500 rpm. Hasil pengujian awal mesin sebelum modifikasi, sebelum dimodifikasi dari

putaran 2425 rpm semakin meningkat seiring dengan kenaikan putaran mesin, dari 4,6 HP sampai dengan puncaknya yaitu pada 5,8 HP pada 6063 rpm. Kemudian daya menurun sampai dengan 4.7 HP pada 7500 rpm dan meningkat kembali sampai dengan 5.7 HP pada putaran 8000 rpm. Setelah itu daya yang dihasilkan mesin semakin menurun seiring dengan kenaikan rpm mesin. Karakter torsi yang dihasilkan mesin sebelum dilakukan modifikasi adalah torsi semakin meningkat dari putaran 2425 rpm dengan 7.29 Nm sampai putaran 4596 rpm dengan torsi 8.07 Nm. Kemudian torsi semakin menurun seiring dengan kenaikan putaran mesin. Untuk lebih jelasnya karakteristik daya maksimum yang dapat dihasilkan sebesar 5,8 HP /6063 rpm sedangkan torsi maksimumnya adalah 8.07 Nm/4596 rpm [6].

Penelitiannya tentang analisis perbandingan kompresi untuk meningkatkan efisiensi pada mesin 4 langkah bahan bakar etanol e-100 memberikan hasil : bahwa semakin tinggi perbandingan kompresi maka konsumsi bahan bakar yang dihasilkan juga menurun sehingga untuk meningkatkan efisiensi pada mesin 4 langkah bahan bakar etanol e-100 maka perbandingan kompresi harus ditingkatkan [7]. Banyak penelitian yang meneliti tentang suatu ekonomi hidrogen bukan yang terbaik, dan bisa dialihkan dengan bahan bakar alternatif yang lebih baik [9-10].

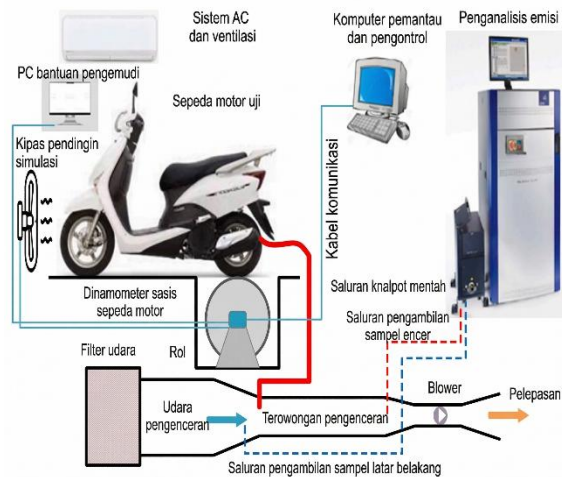
Pada penelitian yang akan dilakukan bertujuan agar dapat meningkatkan performa mesin dengan cara meningkatkan torsi, daya, dan emisi gas buang dapat diuji dengan mesin *dynamotes*, dan *gas analyzer*. Dan data yang diperoleh diharapkan lebih optimal dari pada mesin standar..

MATERIAL DAN METODE

Materi penelitian terdiri dari satu unit sepeda Instalasi infrastruktur pengujian mengekstraksi parameter fisis sebuah spesimen representatif roda dua komersial dengan mesin bensin merk Yamaha Jupiter Z varian kapasitas 110 cc (kode nomenklatur perakitan mekanis 2P2) tipe pengabutan injeksi analog melalui karburator, dengan postur fundamental pabrikan sebagai berikut: susunan desain mesin penggerak tunggal empat langkah, formasi kem penggerak atas tunggal *SOHC* (*Single Overhead Camshaft*); konfigurasi silinder blok independen memuat volumetrik perpindahan kotor *swept displacement* 109,1 cc murni; keseimbangan simetris lebar dimensi piston silinder (*bore*) dikalikan kedalaman ayunan torak (*stroke*) spesifik 51,0 mm 54,0 mm. Mesin diseting dengan standar pengapian yang membatasi daya ledak pamungkas memuncak pada beban rem 9,0 Daya Kuda (PS) saat mesin meraung di putaran jarum 8000 RPM, diimbangi kapabilitas torsi absolut yang berkumpul kuat meraih daya puntir mekanis 9,2 kg $\cdot$ m dikondisikan pada titik peredaran kecepatan putar konstan 5000 RPM. Basis angka kompresi pabrikan diisolasi pada angka rasio matematis 9,3:1 yang ditopang oleh susunan satu paket terpadu blok peredam kepala silinder tambahan dan material spesifikasi perapat pelat aluminium lunak paking.

Prosedur pengumpulan parameter berfokus kepada kalkulasi daya akselerasi riil (*Brake Horsepower*) serta

ketahanan beban sentrifugal pada poros transmisi roda yang dieksekusi secara ketat memakai *chassis dynatest* sirkuit independen. Rancangan visual observasi tersebut dapat dipetakan secara terstruktur melalui diagram skema pengukuran empiris yang diperlihatkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Skema Pengujian Sistem

Aktivitas penelitian termodinamika menasar *dataset* aktual yang memuat rangkaian deret hitung besaran energi tarik linier serta partikulat gas knalpot dari implementasi tiga variabel fase pemampatan gas yang divalidasi presisinya. Pelaksanaan pengujian *stage* awal dipatenkan pada nilai silinder standar 9,3:1, dilanjutkan modifikasi rekayasa ekstrem kepala *head* terpotong rapat untuk mencetak kompresi ultra keras 9,7:1, disusul sebaliknya modifikasi perenggangan ruangan hampa di mana ketebalan gasket ganda dilekatkan hingga kompresi gembos melemah merosot di ukuran terendah 8,9:1. Setiap parameter modifikasi dieksekusi siklusnya dalam tiga kali replikasi berulang agar indeks *error* margin pembacaan *roll dynamometer* berkurang hingga batas angka toleransi paling mikroskopis, yang konfigurasi keseluruhannya tercermin terang pada rujukan arsitektur tata letak kabel *probe* sensor di Gambar 1.

Di ujung garis penganalisis, kalkulasi efisiensi persentase bensin teoritis diterjemahkan dengan meminjam pendekatan termokimia yang lebih familiar, yang dijuluki kerangka teoritis formula keseimbangan neraca atom karbon polutan (Carbon Balance Framework Method). Konsep kerangka ini meyakini postulat termodinamika kimia bahwa konsentrasi utuh padatan senyawa polutan yang berhasil terdeteksi (HC , formasi karbon ikatan lemah CO , dan ikatan stabil karbon dioksida CO_2) secara logis merepresentasikan proporsi absolut bensin cair yang sukses terbakar tuntas di fase langkah usaha. Formulasinya kemudian ditegaskan melalui penjabaran perhitungan variabel komposit gas buang yang dikonversi ke dalam parameter laju massa bensin (*mass fuel flow*) yang diformulasikan ke dalam rumusan Persamaan 2 sebagai penentu indeks pembuangan:

Aksentuasi Persamaan 2 di atas menjamin bahwa korelasi angka pencatatan instrumen mesin buang *exhaust*

probe dari lima panel meter indikator mampu mensimulasikan total pasokan konsumsi aliran cairan mesin secara definitif, menyediakan parameter yang kokoh untuk menetapkan batas atas dari rekayasa eksperimen mesin bakar fosil [12,17].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ekstraksi perolehan komputasi *chassis dynamometer* berbasis simulasi momentum beban rotasi bersama sinkronisasi pendeteksi emisi lima saluran diolah untuk merekonstruksi ulang kurva kinetika termal blok propulsi bensin konvensional. Matriks kalkulasi menyandingkan tiga komparasi independen, yakni basis setup mesin kompresi orisinal (9,3:1) bersaing melawan performa platform eksperimental extreme setup 9,7:1 maupun blok dimensi rendah dekompresi low-end 8,9:1, yang mana keseluruhan transkripsi pengukuran parameter output tersebut akan dijabarkan melalui pembahasan berjenjang dalam matriks tabel yang dirinci ke dalam setiap spektrum spesifik RPM di bawah ini.

Hasil Analisis Dinamika Torsi Mekanis

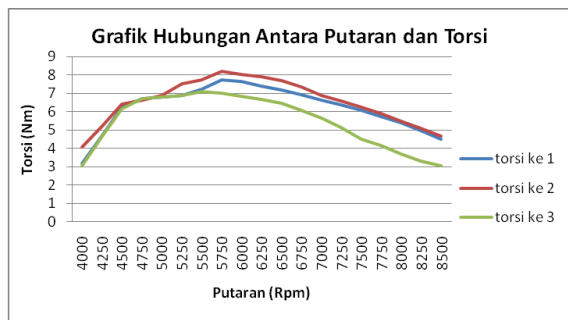
Gaya rotasi yang berhasil dipindahkan secara horizontal dari ledakan ruang silinder menuju dinding blok mesin, atau biasa didefinisikan secara akademis sebagai besaran nilai momen torsi sentrifugal spesifik, diamati distribusinya pada rentang jarak revolusi bertahap poros engkol yang dimulai dari rotasi langsam 4000 RPM sampai teriakan limit mesin berkecepatan absolut konstan 8500 RPM. Fluktuasi kurva tren pencapaian dorong rata-rata untuk setiap komparasi rasio pemampatan dicatatkan secara detail komprehensif pada matriks Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Evaluasi Torsi Mesin Spesifik pada Variasi Kompresi

Putaran (Rpm)	Torsi Rata-rata (Nm)		
	C = 9,3:1	C = 9,7:1	C = 8,9:1
4000	3.18	4.09	3.07
4250	4.54	5.10	4.69
4500	5.84	6.27	6.16
4750	5.90	6.23	6.72
5000	6.00	6.46	5.95
5250	6.78	6.21	6.89
5500	6.76	6.90	7.09
5750	7.72	8.22	7.01
6000	7.62	8.07	6.84
6250	7.38	7.92	6.68
6500	7.17	7.69	6.47
6750	6.92	7.38	6.07
7000	6.63	6.92	5.66
7250	6.37	6.61	5.16
7500	6.07	6.27	3.95
7750	5.73	5.91	4.19
8000	5.38	5.49	3.71
8250	4.96	5.13	3.33
8500	4.48	4.68	3.07
Jumlah	114.43	121.55	102.71
Torsi Tertinggi	7.72	8.22	7.09
Torsi Rata-rata	6,687	7,402	5,806
Kenaikan / Penurunan		7,12%	-18,84%

Manifestasi transkripsi matriks Tabel 1 lalu diproyeksikan ke dalam instrumen pembacaan analitik

berwujud diagram kartesius lintasan gelombang. Proyeksi geometri grafis dari interdependensi yang mengkorelasikan kecepatan akselerasi motor berhadapan eksponensial terhadap tenaga pelontar torsi mesin divisualisasikan dengan presisi pada tampilan profil kurva yang dapat diamati melalui parameter garis pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Pemetaan Lintasan Profil Tiga Variasi Torsi Dinamis

Pembedahan komparatif pada matriks Tabel 1 dan formasi gelombang di Gambar 2 memvalidasi narasi rasional tentang kapabilitas elastisitas termodinamika blok mesin bakar konvensional. Eksekusi pengujian putaran beban tahap 1 yang digawangi konfigurasi *setelan* pabrikan murni (perbandingan rasio ruang hampa kompresi 9,3:1) mengkonsentrasikan letusan ledakannya pada pilar torsi maksimum meraba nilai 7,72 Newton-meter yang digapai konstan di interval kelajuan menengah ke atas zona 5750 RPM. Memasuki arena modifikasi *Stage 2* yang mereplikasi penciutan ruang bakar *head cylinder* untuk mendesak kompresi ke ujung limitasi termal 9,7:1, kurva tenaga menyemburkan impuls akselerasi instan mendikte momentum roda belakang membengkak mencapai limit energi puntir statis absolut 8.22 Nm di lokasi sinkronisasi poros engkol yang identik (tepat di titik RPM 5750). Transformasi ini secara matematis melegitimasi kalkulasi teoretis bahwa pemadatan tekanan tinggi sukses melonjakkan tenaga efisiensi volumetrik BMEP mesin menjadi +7,12% lebih dahsyat dari basis referensinya.

Sebaliknya, pada implementasi pelonggaran volumetrik modifikasi *Stage 3* yang mengevaporasi tekanan hingga anjlok di titik kompresi renggang 8,9:1, mesin kehabisan tenaga termal untuk menekan lengkung torak secara padat, mengakibatkan defisit gravitasi gaya sebesar -18,84%. Momentum puntir tertinggi yang bisa diselamatkan pun cuma meraih posisi terburuk 7,09 Nm yang bahkan sudah terbuang energinya lebih dini saat memasuki fase rotasi jarum RPM 5500. Hukum entropi tekanan membuktikan bahwa mereduksi selisih *clearance volume* ruang kubah membangkitkan pencampuran homogen bensin ke fase gas yang jauh lebih bergejolak. Tekanan berakumulasi ekstrem menciptakan ledakan suhu terpusat di titik peledakan sempurna TDC (Top Dead Center), menjadikan efisiensi pengisian volumetrik lebih masif ditransfer menjadi putaran transmisi rantai motor tanpa jeda. Kurva Gambar 2 juga tak luput melukiskan fenomena stagnasi efisiensi mekanis di area batas *redline* (di atas putaran sentrifugal 7000 RPM) akibat

terhambatnya sirkulasi jalur pasokan hisap rongga (*port velocity stagnation*) di mana aliran bensin membelah laju angin, namun tak sanggup lagi mendesak klep secara utuh. Keberadaan rasio raksasa tak mampu lagi menyembunyikan defisit asupan napas mesin sehingga grafik momen puntir di ketiga setelan kompak melandai tajam ke bawah saat menabrak limit kecepatan RPM akhir.

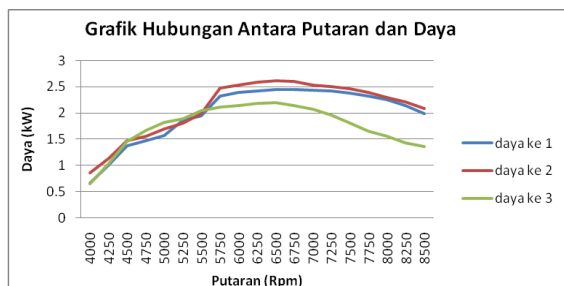
Hasil Analisis Ekspansi Tenaga Daya Mesin Puncak (Power Output)

Kemampuan puncak reaktor mesin bensin mempertahankan frekuensi dorongan pelontar secara kontinu merepresentasikan akumulasi rasio daya (*Power*) kinetis per detik yang dilepaskan ke permukaan aspal jalan. Observasi variabel daya diukur di setiap titik spesifik RPM dengan presisi absolut yang mana distribusinya dikalkulasi memakai acuan matriks turunan pada instrumen beban dinamometer, dengan penyusunan perbandingan daya yang dijabarkan dalam rasio besaran kilowatt (kW) pada penampang lengkap Tabel 2 di bawah.

Tabel 2. Evaluasi Ekskalasi Daya Akselerasi Pengereman Termal

Putaran (Rpm)	Daya Rata-rata (kW)		
	C = 9,3:1	C = 9,7:1	C = 8,9:1
4000	0.667	0.856	0.644
4250	1.009	1.135	1.043
4500	1.375	1.476	1.452
4750	1.467	1.550	1.671
5000	1.570	1.692	1.556
5250	1.863	1.706	1.894
5500	1.946	1.987	2.042
5750	2.324	2.474	2.111
6000	2.393	2.535	2.149
6250	2.416	2.592	2.187
6500	2.440	2.618	2.202
6750	2.446	2.606	2.146
7000	2.431	2.537	2.074
7250	2.419	2.507	1.957
7500	2.383	2.462	1.550
7750	2.326	2.399	1.700
8000	2.252	2.301	1.556
8250	2.144	2.216	1.437
8500	1.992	2.081	1.365
Jumlah	37.86	39.73	32.73
Daya Tertinggi	2,446	2,618	2,202
Daya Rata-rata	1,992	2,091	1,722
Kenaikan/Penurunan		1,87%	-7%

Dinamika laju daya yang terekam pada instrumen pengukuran kemudian diproyeksikan pada perangkat *plotter* digital, membentangkan peta distribusi kecepatan gaya yang menghubungkan kurva lintasan rasio perputaran mesin silinder tunggal tersebut dengan ekskalasi energi. Konstruksi visual dari hubungan linier performa tenaga kuda mesin yang dirujuk dari tabel analisis ditunjukkan detailnya pada rupa fluktuasi garis Gambar 3.



Gambar 3: Diagram Integrasi Tiga Profil Kurva Analisis Energi Daya

Eksplorasi pembacaan naratif berpatokan Tabel 2 yang diverifikasi korelasinya oleh diagram kurva Gambar 3 memastikan secara absolut bahwa mesin pembakaran dalam bereaksi luar biasa positif saat dikondisikan ke lingkungan batas toleransi kritis pemampatan rasio 9,7:1. Reaktor silinder mengerahkan segenap tenaga latennya menyentuh capaian tertinggi bernilai puncak ekuivalen energi spesifik 2,618 kW sesaat kala torak membelah batas putaran RPM tinggi 6500 putaran per menit. Kinerja luar biasa modifikasi ini sanggup melumatkan torehan blok mesin bawan murni kompresi 9,3:1, yang mana pada pengujiannya hanya sempat mencapai tenaga puncak statis bertenaga moderat 2,446 kW dan itu pun dicapai secara terlambat kala putaran beringsut ke frekuensi 6750 RPM. Lonjakan kemampuan kinerja absolut modifikasi padat ini mengamankan klaim pertumbuhan persentase surplus tenaga akselerasi margin positif 1,87%, dibantu dari pasokan jumlah material volume campuran awan partikel udara diinjeksi bensin lebat yang kini didikte untuk terbakar sangat bergejolak menghasilkan sisa pembakaran paling ideal mengeskalisasi pelepasan suhu ruang hampa (*heat release optimalization*).

Paradigma hukum dinamika energi yang berseberangan dengan telak dikonfirmasi manakala rekayasa mesin dibongkar digantikan dimensi ukuran kelonggaran ruang ekstra (modifikasi ruang turun 8,9:1). Penurunan tingkat tekanan paksa mendinginkan ledakan gas termal sehingga defisit pengereman akselerasi hancur berantakan mereduksi performa turun tebing -7% dari kapasitas orisinal, memaksa rekor pencapaian energi daya melemah dan membentuk batas atas di kecepatan nilai kritis 2,202 kW. Logika rekayasa mekanis menjelaskan pelemahan fatal tenaga motor ini dengan gamblang; rongga volume lempeng kepala modifikasi yang terlalu lenggang merusak kepadatan awan molekul pembakaran dan menyebabkan rambatan bunga percikan gagal membakar tuntas hingga ke bilik tepian ruang sehingga laju dorong piston mengendur jauh, menjadikan mesin layu tenaga di medan tempur aspal nyata. Peningkatan eksponensial nilai rasio berbanding absolut sejajar mencetak luapan Daya putaran silinder ganda besar. Perlu diamati bahwa tingkat kelandaian kenaikan persentase daya (+1,87%) terlihat kerdil jika dibandingkan dengan lonjakan fantastis torsi kinetis sebesar (+7,12%) yang disinggung di bab komparasi sebelumnya; sebuah pembuktian forensik fenomena orde lanjut (*second-order mechanics theory*) di mana rotasi super kilat (>6500 RPM) memanen friksi mekanis hambatan (*mechanical friction loads*) di atas leher pin

piston ganda dan gesekan komponen pelatuk klep. Daya ekstra besar dari kompresi 9,7:1 termakan sendiri oleh gaya pemompaan beban inersia dan beban pompa silinder per detik (*pumping losses restrictions*) sebelum ia benar-benar sukses beralih fungsi menjadi kecepatan rotasi aktual gigi final.

Hasil Diagnosis Termokimia Emisi Senyawa Polutan Pembuangan Gas

Manifestasi pembakaran yang mereduksi sisa atom gas berbahaya adalah keutamaan dari optimalisasi sistem internal. Observasi kualitas kandungan ikatan senyawa radikal hidrokarbon, molekul stabil maupun tak jenuh monoksida oksida buangan yang mendesak menembus saluran selongsong pendorong divalidasi oleh instrumen pencium lima pilar kalibrasi optikal. Perekaman data parameter partikulat emisi gas buang polutan per kecepatan stasioner rotasi poros (*RPM*) dijabarkan rekapitulasi data kimianya di rentang selang frekuensi 500 putaran beruntun ke dalam pemaparan matriks di kerangka transkripsi Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Rekapitulasi Pembacaan Deteksi Polutan Emisi Gas Knapot Bensin

Putaran (Rpm)	Var	Kadar Emisi Gas Buang		
		C = 9,3 : 1	C = 9,7 : 1	C = 8,9 : 1
4000	CO (%)	4,69	3,79	4,56
	CO2 (%)	9,2	7,9	8,6
	HC(ppm)	205	300	190
	O2 (%)	3,22	5,04	3,77
	λ	0,921	0,992	0,953
	CO (%)	0,36	0,44	0,25
4500	CO2 (%)	0,65	0,84	0,59
	HC (ppm)	135	136	130
	O2 (%)	19,54	19,13	19,81
	λ	0,925	0,984	0,951
	CO (%)	0,36	0,44	0,25
	CO2 (%)	0,65	0,84	0,59
5000	HC (ppm)	135	136	130
	O2 (%)	19,54	19,13	19,81
	λ	0,925	0,984	0,951
	CO (%)	0,23	0,25	0,21
	CO2 (%)	1,24	1,34	1,20
	HC (ppm)	30	30	26
5500	O2 (%)	19,48	18,80	19,50
	λ	0,930	0,970	0,944
	CO (%)	0,29	0,36	0,25
	CO2 (%)	1,26	1,47	1,19
	HC (ppm)	32	29	28
	O2 (%)	19,49	18,71	19,65
6000	λ	0,937	0,976	0,943
	CO (%)	0,28	0,50	0,21
	CO2 (%)	1,38	1,63	1,26
	HC (ppm)	25	38	22
	O2 (%)	19,09	18,34	19,20
	λ	0,941	0,978	0,937
7000	CO (%)	0,56	0,57	0,48
	CO2 (%)	1,55	1,58	1,72

Putaran (Rpm)	Var	Kadar Emisi Gas Buang		
		C = 9,3 : 1	C = 9,7 : 1	C = 8,9 : 1
7500	HC (ppm)	32	36	31
	O ₂ (%)	18,49	18,44	18,31
	λ	0,946	0,972	0,935
	CO (%)	0,90	0,93	0,81
	CO ₂ (%)	1,50	1,58	1,47
	HC (ppm)	41	43	38
	O ₂ (%)	18,16	18,00	18,38
	λ	0,951	0,976	0,931
	CO (%)	0,86	0,95	0,79
	CO ₂ (%)	1,58	1,61	1,53
8000	HC (ppm)	44	47	40
	O ₂ (%)	18,19	18,16	18,29
	λ	0,952	0,975	0,930
	CO (%)	0,90	0,94	0,84
	CO ₂ (%)	1,57	1,60	1,51
8500	HC (ppm)	43	45	38
	O ₂ (%)	18,21	18,19	18,23
	λ	0,951	0,969	0,928

Evaluasi emisi gas buang kendaraan bermotor umumnya mengacu pada standar global yang menetapkan ambang batas Karbon Monoksida (CO) pada kisaran 3–5%, Karbon Dioksida (CO₂) minimal 12%, Hidrokarbon (HC) antara 300–5000 *part per million* (ppm), dan batas maksimal Oksigen (O₂) sebesar 2%. Pengujian empiris pada mesin dengan spesifikasi rasio kompresi standar pabrikan (9,3:1) mencatatkan konsentrasi emisi CO sebesar 4,69%, CO₂ di angka 9,2%, HC sebesar 205 ppm, dan O₂ pada level 3,22%. Berdasarkan perolehan data tersebut, dapat divalidasi bahwa spesifikasi mesin bawaan pabrik telah memenuhi baku mutu dan lolos uji regulasi emisi untuk kendaraan roda dua modern.

Analisis termodinamika menunjukkan dinamika profil emisi yang signifikan pada berbagai variasi rasio kompresi. Pada aplikasi kompresi tinggi (9,7:1), terjadi penurunan konsentrasi Karbon Monoksida (CO) menjadi 3,79%, yang diikuti oleh pelemahan kadar Karbon Dioksida (CO₂) ke level 7,9%. Sebaliknya, terjadi anomali pada emisi Hidrokarbon (HC) yang melonjak drastis hingga menyentuh angka 300 ppm, bersamaan dengan peningkatan kadar Oksigen (O₂) menjadi 5,04%. Kendati demikian, konfigurasi kompresi tinggi ini secara administratif tetap memenuhi baku mutu emisi gas buang kendaraan jalan raya.

Selanjutnya, pada pengujian rasio kompresi rendah (8,9:1), persentase CO kembali meningkat ke angka 4,56% dan CO₂ tercatat pada level 8,6%. Menariknya, pada rasio kompresi ini, buangan HC berhasil ditekan ke titik terendah yakni 190 ppm, dengan konsentrasi sisa O₂ berada di angka 3,77%. Secara keseluruhan, profil gas buang pada rasio kompresi terendah ini juga dinyatakan aman dan sepenuhnya mematuhi regulasi uji emisi kendaraan bermotor sirkuit perkotaan.

Secara teoretis, tingginya kadar emisi Karbon Monoksida (CO) merupakan indikator utama terjadinya proses pembakaran yang tidak sempurna di dalam ruang

bakar. Fenomena ini terjadi ketika campuran pengabutan bahan bakar yang masuk melalui katup isap tidak memiliki kesempatan untuk berikatan secara optimal dengan oksigen. Akibatnya, proses oksidasi terhenti secara parsial dan gagal melepaskan seluruh energi entalpi, yang pada pengujian ini mencatatkan margin persentase polusi konstan di angka 47,89%. Faktor dominan yang memicu anomali pembakaran parsial ini bersumber dari konfigurasi geometri pada saluran isap (*intake port*). Modifikasi desain pada dinding saluran tersebut mendisrupsi stabilitas aliran fluida, sehingga menciptakan ketidakseimbangan rasio campuran udara dan bahan bakar. Kondisi ini secara drastis menurunkan nilai kalor termal pada campuran, sehingga percikan api dari busi tidak mampu memicu ledakan pembakaran yang ideal.

Di sisi lain, pembentukan emisi Hidrokarbon (HC)—yang merepresentasikan sisa uap bahan bakar yang tidak ikut bereaksi—merupakan akibat langsung dari kegagalan proses perambatan api (*flame propagation*) di dalam ruang silinder. Secara termodinamika, kegagalan ini dipicu oleh mekanisme penyerapan panas (*heat absorption*) yang mendinginkan suhu lokal ruang bakar, sehingga memperlambat laju propagasi api (*flame speed retardation*). Faktor fundamental lain penyumbang HC adalah fenomena terjebakannya campuran bahan bakar di area sempit, khususnya pada celah (*crevice volume*) di sekitar ring piston. Molekul bahan bakar mentah ini terserap ke dalam lapisan film pelumas (oli) pada dinding silinder, mengalami siklus kondensasi-desorpsi, dan akhirnya terlepas kembali ke saluran buang sebagai polutan HC tanpa mengalami proses pembakaran.

Secara termokimia, pembentukan emisi Nitrogen Oksida (NO_x) di ruang bakar sangat bergantung pada dua variabel utama: temperatur ekstrem dan ketersediaan oksigen. Senyawa gas beracun ini tidak terbentuk pada suhu normal, melainkan terpicu saat suhu ledakan pembakaran melampaui ambang batas kritis (*ultra-high temperature threshold*). Temperatur ekstrem ini memutus ikatan molekul udara dan memaksa nitrogen bereaksi dengan oksigen. Proses ini semakin dipercepat oleh keberadaan suplai udara berlebih yang bersirkulasi secara turbulen (*high rotation mixing*) di dalam kubah ruang silinder. Lonjakan pembentukan NO_x ini merupakan fenomena lazim yang terjadi pada mesin bensin akibat modifikasi peningkatan rasio kompresi yang terlampaui padat.

Berdasarkan validasi data dari instrumen *gas analyzer*, seluruh konfigurasi modifikasi rasio kompresi yang diuji—meliputi rasio standar (9,3:1), rasio kompresi tinggi (9,7:1), hingga rasio kompresi rendah (8,9:1)—dinyatakan memenuhi standar kelayakan lingkungan. Secara komprehensif, profil gas buang yang dihasilkan dari ketiga variasi pemampatan silinder tersebut terbukti masih berada di bawah ambang batas maksimal baku mutu emisi gas buang kendaraan bermotor yang ditetapkan oleh regulasi.

Secara termodinamika, tingginya persentase emisi Karbon Monoksida (CO) merupakan indikator langsung dari ketidaksempurnaan proses pembakaran yang mengakibatkan kerugian energi termal (*heat loss*). Sebaliknya, tingginya kadar Karbon Dioksida (CO₂)

merepresentasikan tingkat kesuksesan pembakaran yang optimal. Nilai CO₂ yang maksimal menunjukkan bahwa reaksi oksidasi bahan bakar berlangsung tuntas tepat di Titik Mati Atas (TMA), sehingga konversi energi kalor menjadi kerja mekanis (ekspansi termal) berjalan sangat efisien.

Sementara itu, tingginya kadar emisi Hidrokarbon (HC) memiliki korelasi linier dengan ketidakseimbangan rasio campuran udara dan bahan bakar (*Air-to-Fuel Ratio* / AFR). Peningkatan HC umumnya dipicu oleh pengaturan sistem bahan bakar (karburator) yang terlalu kaya (*rich mixture*), di mana suplai bensin berlebih membanjiri ruang silinder. Selain faktor campuran bahan bakar, lonjakan HC juga disebabkan oleh lambatnya proses perambatan api (*flame propagation*) dan fenomena pemadaman api prematur (*wall quenching*) pada dinding silinder, yang menyisakan bahan bakar mentah tanpa terbakar tuntas.

Peningkatan rasio kompresi yang ekstrem berimplikasi langsung pada lonjakan emisi Hidrokarbon (HC) yang signifikan, menjauh dari standar emisi mesin konvensional pabrikan. Secara fisis, anomali ini dipicu oleh reduksi drastis pada volume sisa (*clearance volume*) atau penyempitan area celah (*squish band*) di kubah ruang bakar. Ketika piston mencapai Titik Mati Atas (TMA), penyempitan celah mikroskopis ini menghasilkan desakan tekanan kinetik dan sentrifugal yang sangat masif pada campuran bahan bakar, tidak sebanding dengan kapasitas total volume silinder (*swept volume*). Dinamika tekanan berlebih dan hambatan osilasi termal di area sempit tersebut menggagalkan proses pembakaran secara menyeluruh. Sebagai konklusinya, konsentrasi partikulat bahan bakar mentah (HC) tertinggi secara mutlak terekam pada mesin dengan modifikasi rasio kompresi tertinggi, yakni 9,7:1.

KESIMPULAN

Berbasis pada konstruksi analisis termodinamika berbantuan instrumen observasi *chassis dynamometer* dan data ekuivalen keseimbangan karbon *gas analyzer* terhadap intervensi rekayasa batas tekanan rasio kompresi di mesin bensin silinder tunggal 110 cc, dapat disimpulkan hasil spesifik berikut:

1. Modifikasi optimalisasi densitas kompresi menuju rasio 9,7:1 terbukti meningkatkan kinerja efisiensi

Daftar Pustaka

- [1] Y. R. Dian Wahyu, "Sebuah Solusi Pada Engine Berkompresi Rendah Agar Sesuai dengan BBM Non-Subsidi," *Rotasi*, vol. 23, no. 2, pp. 1–9, 2021, doi: <https://doi.org/10.14710/rotasi.23.2.1-9>.
- [2] T. Suthisripok, N. Phusakol, and N. Sawetkittirut, "Bi-fuel System - Gasoline/LPG in A Used 4-Stroke Motorcycle - Fuel Injection Type," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 241, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/241/1/012021.
- [3] R. Eki and M. B. R. Wijaya, "Pengaruh Stroke Up Terhadap Performa Mesin Dan Emisi Pada Yamaha Jupiter Z Dengan Menggunakan Variasi Bahan Bakar," *Automot. Sci. Educ. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 25–30, 2020, [Online]. Available: <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/asej>
- [4] F. Majedi and I. Puspitasari, "Optimasi Daya dan Torsi pada Motor 4 Tak dengan Modifikasi Crankshaft dan Porting pada Cylinder Head," *JTT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 5, no. 1, p. 82, 2017, doi: 10.32487/jtt.v5i1.216.
- [5] V. Nguyen, K. Nguyen, and N. C. Van, "Energy Conversion and Management: X Real-time driving cycle measurements of fuel consumption and pollutant emissions of a bi-fuel LPG-gasoline motorcycle," *Energy Convers.*

luaran. Konfigurasi ini menghasilkan luaran torsi puncak mekanis maksimum sebesar 8,22 Nm (mengalami eskalasi rasio spesifik sebesar 7,12% dari standar), serta mendistribusikan dorongan energi daya maksimum yang mencapai 2,618 kW pada perputaran 6500 RPM (mencatatkan nilai kenaikan positif 1,87% berbanding blok mesin rasio orisinal pabrikan 9,3:1).

2. Penurunan parameter volume kompresi dengan modifikasi derajat ruang pemampatan melebar (ke tingkat 8,9:1) berimplikasi secara langsung pada penurunan luaran torsi kinetis sebesar 18,84% dan reduksi kapasitas pengereman termal mesin menjadi ekuivalen daya tertinggi sebesar 2,202 kW.
3. Rekayasa penyempitan area sisa dengan rasio kompresi tinggi (9,7:1) secara empiris memicu pembentukan emisi Hidrokarbon (HC) yang signifikan hingga 300 ppm (melebihi batas kondisi referensi 205 ppm). Hal ini diinduksi oleh peningkatan tekanan gas yang memaksakan partikel bahan bakar menuju celah batas mati (*crevice volume*) ring silinder.
4. Lonjakan sisa emisi partikulat beracun diiringi fenomena *wall quenching* di mana perpindahan panas ke dinding silinder mendinginkan gelombang nyala termal dan mereduksi propagasi suhu pembakaran secara prematur, khususnya ketika disandingkan dengan bahan bakar bernilai oktan konvensional yang tidak tahan atas turbulensi suhu kompresi tinggi, yang berdampak pada penguraian Karbon Dioksida kembali secara endotermik (disosiasi) menjadi komponen tak jenuh termal yang mengotori gas buangan gas knalpot.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasinya kepada Universitas Pamulang atas dukungan dan fasilitas yang telah memungkinkan penelitian ini berjalan lancar. Beliau juga berterima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dana, bimbingan, dan dukungan teknis, sehingga penelitian dan penulisan artikel ini dapat diselesaikan dengan sukses.

- Manag. X*, vol. 12, p. 100135, 2021, doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100135.
- [6] T. V. Nguyen, K. D. Nguyen, N. X. Ho, and V. D. Nguyen, "Engine performance and combustion characteristics of a direct injection compression ignition engine fueled waste cooking oil synthetic diesel," *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 560–570, 2020, doi: 10.1007/s40789-020-00328-x.
- [7] I. Pielecha, W. Cieřlik, W. Bueschke, and M. Skowron, "Thermodynamic indexes of real driving conditions of gasoline and LPG fuelled engine," *Arch. Transp.*, vol. 40, no. 4, pp. 51–64, 2016, doi: 10.5604/08669546.1225467.
- [8] J. R. Serrano, J. Martín, P. Piqueras, R. Tabet, and J. Gómez, "Effect of natural and forced charge air humidity on the performance and emissions of a compression-ignition engine operating at high warm altitude," *Energy*, vol. 266, no. May 2022, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126409.
- [9] S. Zhu *et al.*, "A review of water injection applied on the internal combustion engine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 184, pp. 139–158, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.042.
- [10] X. Tauzia, A. Maiboom, and S. R. Shah, "Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine," *Energy*, vol. 35, no. 9, pp. 3628–3639, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.05.007.
- [11] M. Kettner, S. Dechent, M. Hofmann, and E. Huber, "Investigating the influence of water injection on the emissions of a diesel engine," vol. 10, no. 1, pp. 1863–1881, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.15282/jmes.10.1.2016.11.0179>.
- [12] K. A. Subramanian, "comparison of water-diesel emulsion and timed injection of NO, water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of and smoke emissions, New Delhi," 2011, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.010>.
- [13] N. X. Khoa and O. Lim, "A Review of the External and Internal Residual Exhaust Gas in the Internal Combustion Engine," *Energies*, vol. 15, no. 3, 2022, doi: 10.3390/en15031208.
- [14] X. Dai, A. Li, and Z. Zheng, "Research on the Effect of Water Injection Pressure on Knocking Combustion of a Direct Injection Gasoline Engine," *ACS Omega*, vol. 7, no. 32, pp. 28101–28117, 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c02220.
- [15] F. Salek, M. Babaie, S. V. Hosseini, and O. A. Bég, "Multi-objective optimization of the engine performance and emissions for a hydrogen/gasoline dual-fuel engine equipped with the port water injection system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 17, pp. 10535–10547, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.139.
- [16] N. Adhi, Y. Pambayun, and W. Suyanto, "Konsep Modifikasi Untuk Meningkatkan Daya Mesin Sepeda Motor Modification Concept to Improve The Power of Motorcycle Engine," *J. Pendidik. Vokasi Otomotif*, vol. 1, no. November, pp. 38–53, 2018, doi: <https://doi.org/10.21831/jpvo.v1i1.21782>.
- [17] A. Lesmawanto, S. Meddy, M. Jufri, and ..., "Analisis Perbandingan Kompresi Untuk Meningkatkan Efisiensi Pada Mesin 4 Langkah Bahan Bakar Etanol E-100," *Pros. SENTRA ...*, pp. 100–103, 2019, doi: <https://doi.org/10.22219/sentra.v0i4.2307>.
- [18] L. Barreto, A. Makihira, and K. Riahi, "The hydrogen economy in the 21st century: A sustainable development scenario," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 267–284, 2003, doi: 10.1016/S0360-3199(02)00074-5.
- [19] B. D. Yacobucci and A. E. Curtright, "A Hydrogen Economy and Fuel Cells: An Overview," *CRS Rep. Congr.*, p. 12, 2004, doi: 10.1016/j.techsoc.2003.09.024.
- [20] R. F. C. Measurement, U. Raw, and E. Flow, "Real-time Fuel Consumption Measurement Using Raw Exhaust Flow Meter and Zirconia AFR Sensor," *Trans. Soc. Automot. Eng. Japan*, vol. 45, no. 1, pp. 155–160, 2014, doi: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1058>.
- [21] R. A. B. Semin, "A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines Semin , Rosli Abu Bakar Automotive Excellent Center , Faculty of Mechanical Engineering ,," *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 302–311, 2008, doi: 10.3844/ajeassp.2008.302.311.
- [22] United Nations, "Regulation No. 40 - Uniform provisions concerning the approval of motorcycles equipped with a positive-ignition engine with regard to the emission of gaseous pollutants by the engine," *Regulation*, no. September, 1979, [Online]. Available: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/%0Awp29/wp29regs/r040e.pdf>
- [23] M. I. Jahirul, H. H. Masjuki, R. Saidur, M. A. Kalam, M. H. Jayed, and M. A. Wazed, "Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasoline in a retrofitted car engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 14–15, pp. 2219–2226, 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.05.037.
- [24] M. Usman, M. W. Saleem, S. Saqib, J. Umer, A. Naveed, and Z. U. Hassan, "SI engine performance, lubricant oil

deterioration, and emission: A comparison of liquid and gaseous fuel,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 6, 2020, doi: 10.1177/1687814020930451.

- [25] A. Alahmer, “Performance and emission assessments for different acetone gasoline blends powered spark ignition engine,” *Int. J. Veh. Struct. Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 127–132, 2018, doi: 10.4273/ijvss.10.2.10.