



2580-2798 (e)
2588-6225 (p)

Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis
(Bengkalis State Polytechnic Technology Innovation Journal)

journal homepage: <https://jurnal.polbeng.ac.id/index.php/IP/index>

KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH TEKANAN INJEKTOR TERHADAP PERFORMA MESIN DIESEL BERPISTON LSCS UNTUK APLIKASI PERMESINAN KAPAL

Benedicta Dian Alfanda¹⁾, Budhi Santoso²⁾, Syafiuddin³⁾, Edi Haryono⁴⁾, Abdul Gafur⁵⁾, Lely Pramesti⁶⁾, Dimas Endro Widjanarko⁷⁾

^{1,3,4,5,6,7)} Program Studi Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia 60111

²⁾ Jurusan Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis

Jl. Bathin Alam, Desa Sungai Alam, Kecamatan Bengkalis, Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau, Indonesia 28712

Corresponding Author: benedictadian@ppns.ac.id

Article Info

Abstract

Keywords:

Injector *pressure*; LSCS piston;
Diesel *engine*; BSFC; BMEP.

Article history:

Received: 03/06/2026
Last revised: 08/06/2026
Accepted: 13/06/2026
Available online: 14/06/2026
Published: 14/06/2026

DOI: <https://doi.org/10.35314/59hr8b75>

Abstrak

Mesin diesel banyak digunakan pada aplikasi permesinan kapal karena memiliki konstruksi kuat dan mampu bekerja pada beban bervariasi. Namun, efisiensi pembakaran masih menjadi permasalahan penting karena berpengaruh terhadap daya, torsi, dan konsumsi bahan bakar. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi tekanan injektor terhadap unjuk kerja mesin diesel satu silinder berpiston LSCS. Pengujian dilakukan secara eksperimen menggunakan mesin diesel *Jiangdong* ZH1115N dengan variasi tekanan injektor 170 bar, 180 bar, dan 190 bar. Mesin diuji pada putaran 1000–1400 rpm dengan beban listrik 2000–4000 W. Parameter yang dianalisis meliputi daya, torsi, *brake specific fuel consumption* (BSFC), dan *brake mean effective pressure* (BMEP). Hasil pengujian menunjukkan bahwa tekanan injektor 190 bar memberikan performa terbaik dengan daya maksimum 2,72 kW, torsi maksimum 18,65 Nm, BSFC terendah 371,06 g/kWh, dan BMEP maksimum 1,95 bar. Dibandingkan tekanan 180 bar, tekanan 190 bar meningkatkan daya 1,87%, torsi 1,96%, menurunkan BSFC 7,32%, dan meningkatkan BMEP 2,09%. Dengan demikian, tekanan injektor 190 bar dapat direkomendasikan sebagai tekanan kerja terbaik pada mesin diesel berpiston LSCS dalam rentang pengujian ini.

Abstract

Diesel engines are widely used in marine machinery applications due to their robust construction and ability to operate under varying loads. However, *Combustion* efficiency remains an important issue because it affects power, torque, and fuel consumption. This study aims to analyze the effect of injector pressure variation on the performance of a single-cylinder diesel engine equipped with an LSCS piston. The experiment was conducted using a *Jiangdong* ZH1115N diesel engine with injector pressure variations of 170 bar, 180 bar, and 190 bar. The engine was tested at 1000–1400 rpm under electrical loads of 2000–4000 W. The analyzed parameters included power, torque, *brake specific fuel consumption* (BSFC), and *brake mean effective pressure* (BMEP). The results show that the 190bar injector pressure produced the best performance, with a maximum power of 2.72 kW, maximum torque of 18.65 Nm, lowest BSFC of 371.06 g/kWh, and maximum BMEP of 1.95 bar. Compared with 180 bar, the 190bar pressure increased power by 1.87%, increased torque by 1.96%, reduced BSFC by 7.32%, and increased BMEP by 2.09%. Therefore, the 190bar injector pressure can be recommended as the best operating pressure for the LSCS piston diesel engine within the tested range.

1. PENDAHULUAN

Mesin diesel masih menjadi salah satu sistem penggerak dan pembangkit daya yang banyak digunakan pada bidang permesinan kapal, terutama karena memiliki karakteristik torsi yang baik, konstruksi yang kuat, serta mampu bekerja pada kondisi beban yang bervariasi. Pada aplikasi permesinan kapal, mesin diesel tidak hanya dituntut menghasilkan daya yang stabil, tetapi juga harus mampu menggunakan bahan bakar secara efisien[1]. Efisiensi konsumsi bahan bakar menjadi penting karena berpengaruh langsung terhadap biaya operasional, keandalan sistem, dan keberlanjutan penggunaan mesin dalam jangka panjang. Model numerik dan optimasi multi-variabel (waktu injeksi, bukaan/penutupan katup, kecepatan *turbocharger*, tekanan intake) dapat menurunkan BSFC dan emisi CO₂/NO_x sekaligus di seluruh rentang beban tanpa uji eksperimen berulang[2]. Penyetelan sensitivitas governor yang memperhitungkan ketidakstabilan torsi siklik dan gangguan gelombang dapat menjaga kestabilan kecepatan, menurunkan peningkatan konsumsi akibat penurunan daya dan kenaikan beban termal silinder[3].

Salah satu faktor yang memengaruhi performa mesin diesel adalah kualitas proses pembakaran di dalam ruang bakar[4]. Proses pembakaran yang baik sangat dipengaruhi oleh pencampuran udara dan bahan bakar, karakteristik semprotan bahan bakar, serta bentuk ruang bakar pada piston. Pada mesin diesel dengan sistem injeksi langsung, bahan bakar disemprotkan ke dalam ruang bakar pada akhir langkah kompresi[5]. Apabila pengabutan bahan bakar kurang baik, maka pencampuran bahan bakar dan udara menjadi tidak merata. Kondisi ini dapat menyebabkan pembakaran kurang sempurna, penurunan daya, penurunan torsi, dan peningkatan konsumsi bahan bakar spesifik.

Modifikasi bentuk ruang bakar pada piston menjadi salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk memperbaiki karakteristik pembakaran mesin diesel[6]. Salah satu bentuk modifikasi tersebut adalah piston *Lateral Swirl Combustion System* atau LSCS. Piston LSCS dirancang untuk menghasilkan gerakan pusaran lateral di dalam ruang bakar sehingga dapat membantu meningkatkan interaksi antara bahan bakar yang disemprotkan dengan udara terkompresi. Dengan adanya aliran pusaran tersebut, proses pencampuran bahan bakar dan udara diharapkan menjadi lebih baik, sehingga pembakaran dapat berlangsung lebih efektif.

Selain bentuk ruang bakar, tekanan injektor juga memiliki peran penting dalam menentukan kualitas pengabutan bahan bakar. Tekanan injektor yang terlalu rendah dapat menghasilkan butiran bahan bakar yang relatif besar sehingga proses penguapan dan pencampuran bahan bakar dengan udara menjadi kurang optimal. Sebaliknya, peningkatan tekanan injektor dapat memperbaiki atomisasi bahan bakar, mempercepat proses pencampuran, dan meningkatkan efektivitas pembakaran. Namun, pengaturan tekanan injektor tetap perlu diuji secara eksperimental karena setiap mesin memiliki karakteristik operasi dan batas kerja yang berbeda.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas pengaruh modifikasi piston dan tekanan injeksi terhadap performa mesin diesel. Penelitian terkait modifikasi piston crown menunjukkan bahwa perubahan geometri ruang bakar dapat memengaruhi performa pembakaran mesin diesel. Studi lain mengenai variasi tekanan injeksi juga menunjukkan bahwa tekanan penginjeksian bahan bakar dapat memengaruhi daya, torsi, konsumsi bahan bakar, dan parameter performa lainnya. Selain itu, penelitian mengenai ruang bakar berbasis sistem pusaran seperti *Multi Swirl Combustion System* menunjukkan bahwa pola aliran di dalam ruang bakar dapat berkontribusi terhadap peningkatan unjuk kerja mesin. Namun, kajian yang secara khusus menguji pengaruh variasi tekanan injektor pada mesin diesel satu silinder dengan piston LSCS masih perlu diperkuat, terutama melalui pengujian langsung pada variasi putaran dan beban yang berbeda.

Gap penelitian dalam studi ini terletak pada masih terbatasnya kajian eksperimental yang secara khusus menghubungkan variasi tekanan injektor dengan performa mesin diesel satu silinder berpiston

LSCS pada kondisi operasi yang berbeda. Penelitian sebelumnya umumnya membahas modifikasi geometri piston, variasi tekanan injeksi, atau performa mesin diesel secara terpisah. Namun, belum banyak penelitian yang mengevaluasi kombinasi tekanan injektor dan piston LSCS berdasarkan beberapa indikator performa utama secara bersamaan, yaitu daya, torsi, BSFC, dan BMEP, terutama untuk konteks aplikasi permesinan kapal. Selain itu, tekanan injektor terbaik pada mesin diesel berpiston LSCS masih perlu ditentukan melalui pengujian langsung karena setiap mesin memiliki karakteristik pembakaran, sistem injeksi, dan kondisi beban yang berbeda.

Kebaruan penelitian ini terletak pada kajian eksperimental pengaruh variasi tekanan injektor 170 bar, 180 bar, dan 190 bar terhadap performa mesin diesel *Jiangdong* ZH1115N yang menggunakan piston LSCS. Penelitian ini tidak hanya menilai satu parameter performa, tetapi membandingkan beberapa parameter utama secara terpadu, yaitu daya maksimum, torsi maksimum, BSFC terendah, dan BMEP maksimum. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi berupa penentuan tekanan injektor yang paling sesuai untuk meningkatkan keseimbangan antara keluaran daya, kemampuan torsi, efisiensi konsumsi bahan bakar, dan tekanan efektif rata-rata pada mesin diesel berpiston LSCS untuk aplikasi permesinan kapal.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi tekanan injektor terhadap performa mesin diesel empat langkah satu silinder yang menggunakan piston LSCS. Pengujian dilakukan pada mesin diesel *Jiangdong* ZH1115N dengan variasi tekanan injektor 170 bar, 180 bar, dan 190 bar. Variasi putaran mesin yang digunakan adalah 1000, 1200, 1300, dan 1400 rpm, sedangkan variasi beban listrik yang digunakan adalah 2000, 3000, dan 4000 W. Parameter performa yang dianalisis meliputi daya, torsi, brake specific fuel consumption atau BSFC, dan brake mean *effective pressure* atau BMEP. Data tersebut sesuai dengan rancangan pengujian pada bahan tugas akhir yang digunakan sebagai dasar penyusunan artikel ini.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi tekanan injektor terhadap karakteristik performa mesin diesel berpiston LSCS serta menentukan tekanan injektor yang memberikan hasil terbaik berdasarkan parameter daya, torsi, BSFC, dan BMEP. Penurunan kecepatan kapal menurunkan kebutuhan daya pangkat tiga terhadap kecepatan dan menurunkan konsumsi dan CO₂; namun pada beban <40–50% MCR, BSFC naik dan efisiensi turun, muncul masalah fouling dan kebutuhan *blower* bantu terus-menerus[7]. Turbocharging hibrida elektrik dapat mengurangi konsumsi di beban rendah dengan bantuan kompresor; optimasi penuh di seluruh beban tetap diperlukan[8]. Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan informasi teknis mengenai pengaturan tekanan injektor yang lebih sesuai pada mesin diesel berpiston LSCS, khususnya untuk mendukung peningkatan unjuk kerja dan efisiensi bahan bakar pada aplikasi permesinan kapal[9]. Mode kombinator (kecepatan + *pitch* dikontrol bersama) dapat menurunkan SFOC hingga 5,4% di 25% beban dan menaikkan torsi poros hingga 47%, menunjukkan pencocokan mesin baling-baling yang lebih baik, meski BSNO_x naik di beban rendah[10].

2. METODE

2.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen langsung pada mesin diesel satu silinder. Pendekatan ini dipilih karena penelitian bertujuan mengetahui perubahan unjuk kerja mesin akibat pengaturan tekanan injektor pada kondisi operasi tertentu. Data penelitian diperoleh dari hasil pengujian laboratorium, bukan dari simulasi, sehingga respon mesin dapat diamati secara langsung melalui perubahan tegangan, arus, putaran mesin, dan konsumsi bahan bakar.

Penelitian difokuskan pada perbandingan performa mesin diesel berpiston LSCS pada beberapa variasi tekanan injektor. Parameter yang dianalisis meliputi daya, torsi, konsumsi bahan bakar

spesifik atau BSFC, dan tekanan efektif rata-rata atau BMEP. Parameter tersebut digunakan untuk menentukan kecenderungan performa mesin pada setiap tekanan injektor.

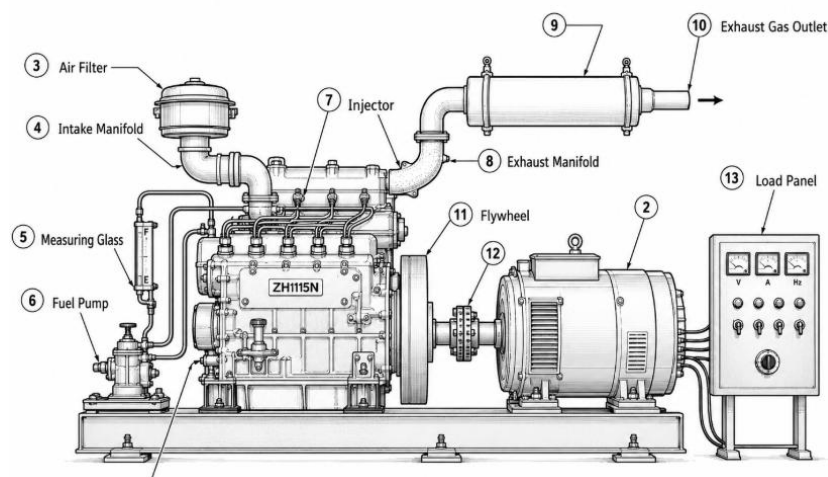
2.2 Unit Mesin dan Sistem Pembebanan

Objek penelitian adalah mesin diesel *Jiangdong ZH1115N*. Mesin ini merupakan mesin diesel satu silinder, horizontal, empat langkah, dan menggunakan sistem injeksi langsung. Mesin dikopel dengan generator tiga fasa sebagai sistem pembebanan. Generator digunakan untuk mengubah keluaran mekanik mesin menjadi keluaran listrik sehingga performa mesin dapat diamati melalui tegangan dan arus yang dihasilkan.

Sistem pembebanan menggunakan generator Mindong STC-5 yang dihubungkan dengan panel beban listrik. Beban diberikan secara bertahap pada 2000 W, 3000 W, dan 4000 W. Penggunaan beban listrik dipilih karena mudah dikontrol pada pengujian laboratorium dan dapat menggambarkan kerja mesin diesel kecil sebagai penggerak generator.

Tabel 1. Spesifikasi utama unit pengujian

Komponen	Spesifikasi
Model mesin	<i>Jiangdong ZH1115N</i>
Jenis mesin	Diesel satu silinder, horizontal, empat langkah
Sistem pembakaran	Injeksi langsung
Diameter silinder	115 mm
Langkah piston	115 mm
Rasio kompresi	17.01
Daya nominal	14,7 kW pada 2200 rpm
Tekanan injektor standar	$18,13 \pm 0,49$ MPa
Model generator	Mindong STC-5 tiga fasa
Kapasitas generator	6,3 kVA
Daya generator	5 kW
Tegangan generator	380/660 V
Faktor daya	0,8
Putaran generator	1500 rpm
Frekuensi	50 Hz



Gambar 1. Skema sistem pengujian mesin diesel berpiston LSCS.

2.3 Bahan Bakar dan Piston Uji

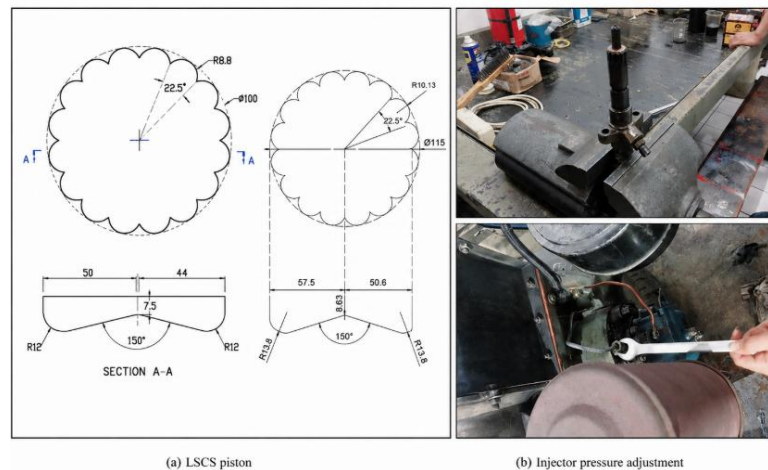
Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah solar. Pada setiap titik pengujian, volume bahan bakar yang digunakan untuk pengukuran konsumsi adalah 25 ml. Waktu yang diperlukan mesin untuk menghabiskan volume bahan bakar tersebut dicatat sebagai dasar untuk menentukan konsumsi bahan bakar spesifik[11].

Piston yang digunakan adalah piston yang telah dimodifikasi menjadi tipe LSCS[12]. Modifikasi dilakukan pada bagian mahkota piston untuk membentuk ruang bakar dengan pola aliran pusaran lateral. Piston LSCS digunakan sebagai konfigurasi tetap pada seluruh pengujian. Dengan demikian, perubahan performa mesin dianalisis berdasarkan perubahan tekanan injektor, bukan berdasarkan perubahan bentuk piston[13]. Dengan piston LSCS dijaga tetap dan hanya tekanan injektor yang diubah, perubahan BSFC dan performa dapat dikaitkan langsung ke kondisi injeksi, sejalan dengan pendekatan di studi yang mengkombinasikan geometri ruang bakar tetap + variasi parameter injeksi[14].

2.4 Pengaturan Tekanan Injektor

Tekanan injektor diatur pada tiga variasi, yaitu 170 bar, 180 bar, dan 190 bar. Pengaturan tekanan dilakukan menggunakan nozzle tester. Sebelum dipasang pada mesin, injektor diperiksa terlebih dahulu untuk memastikan tekanan bukaan sesuai dengan target pengujian dan semprotan bahan bakar tidak mengalami kebocoran[15].

Variasi tekanan injektor digunakan untuk mengetahui pengaruh perubahan tekanan semprotan bahan bakar terhadap unjuk kerja mesin. Setiap tekanan injektor diuji pada putaran dan beban yang sama agar hasil pengujian dapat dibandingkan secara lebih objektif[16].



Gambar 2. Komponen utama penelitian: (a) piston LSCS dan (b) penyetelan tekanan injektor

2.5 Rancangan Variasi Pengujian

Pengujian dilakukan dengan mengombinasikan tiga faktor utama, yaitu tekanan injektor, putaran mesin, dan beban listrik. Tekanan injektor menjadi perlakuan utama, sedangkan putaran mesin dan beban listrik menjadi kondisi operasi pengujian.

Tabel 2. Rancangan variasi pengujian

Faktor pengujian	Variasi
Tekanan injektor	170 bar, 180 bar, 190 bar
Putaran mesin	1000 rpm, 1200 rpm, 1300 rpm, 1400 rpm
Beban listrik	2000 W, 3000 W, 4000 W
Volume bahan bakar	25 ml
Jenis bahan bakar	Solar
Konfigurasi piston	LSCS
Data pengukuran	Tegangan, arus, putaran mesin, waktu konsumsi bahan bakar
Data hasil olahan	Daya, torsi, BSFC, BMEP

2.6 Alur Pengujian

Pengujian diawali dengan pemeriksaan kondisi mesin, sistem bahan bakar, sistem pendingin, generator, panel beban, dan alat ukur. Pemeriksaan dilakukan untuk memastikan bahwa sistem uji dapat bekerja stabil selama proses pengambilan data.

Setelah sistem uji siap, injektor disetel pada tekanan 170 bar dan dipasang pada mesin. Mesin kemudian dioperasikan pada putaran 1000 rpm, 1200 rpm, 1300 rpm, dan 1400 rpm. Pada setiap putaran, beban listrik diberikan sebesar 2000 W, 3000 W, dan 4000 W. Data tegangan, arus, putaran mesin, dan waktu konsumsi 25 ml bahan bakar dicatat pada setiap kondisi pengujian.

Setelah seluruh pengujian pada tekanan 170 bar selesai, langkah yang sama dilakukan pada tekanan 180 bar dan 190 bar. Seluruh data hasil pengujian kemudian dikumpulkan dan diolah untuk memperoleh nilai daya, torsi, BSFC, dan BMEP.

2.7 Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif-komparatif. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai daya, torsi, BSFC, dan BMEP pada setiap variasi tekanan injektor. Nilai daya dan torsi digunakan untuk melihat kemampuan mesin menghasilkan keluaran kerja. Nilai BSFC digunakan untuk melihat efisiensi penggunaan bahan bakar, sedangkan BMEP digunakan untuk melihat kemampuan mesin menghasilkan tekanan efektif selama proses kerja[17]. Banyak penelitian BSFC menggunakan pendekatan pengukuran massa/volume bahan bakar yang dikonsumsi per waktu pada titik operasi tertentu lalu dihitung menjadi g/kWh atau sejenisnya[18].

Tekanan injektor terbaik ditentukan berdasarkan kombinasi beberapa indikator, yaitu daya yang lebih tinggi, torsi yang lebih besar, BSFC yang lebih rendah, dan BMEP yang lebih tinggi. Kombinasi optimal sering kali bukan tekanan maksimum, tetapi tekanan menengah-tinggi yang masih menjaga NOx pada batas yang dapat diterima[19]. Dengan cara ini, penentuan tekanan injektor terbaik tidak hanya didasarkan pada satu parameter, tetapi mempertimbangkan performa mesin secara keseluruhan. Beberapa studi menemukan kombinasi tekanan tertentu yang meminimalkan BSFC (misalnya 220 bar untuk *engine* tertentu, atau 400 bar pada diesel-hidrogen)[20].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tekanan injektor terhadap unjuk kerja mesin diesel berpiston LSCS. Tekanan injektor yang digunakan adalah 170 bar, 180 bar, dan 190 bar. Setiap variasi tekanan diuji pada putaran mesin 1000 rpm, 1200 rpm, 1300 rpm, dan 1400 rpm dengan beban listrik 2000 W, 3000 W, dan 4000 W. Parameter yang dianalisis meliputi daya, torsi, BSFC, dan BMEP. Berdasarkan hasil pengujian pada tugas akhir, tekanan injektor 190 bar menghasilkan performa terbaik dengan daya 2,72 kW, torsi 18,65 Nm, BSFC 371,06 g/kWh, dan BMEP 1,95 bar.

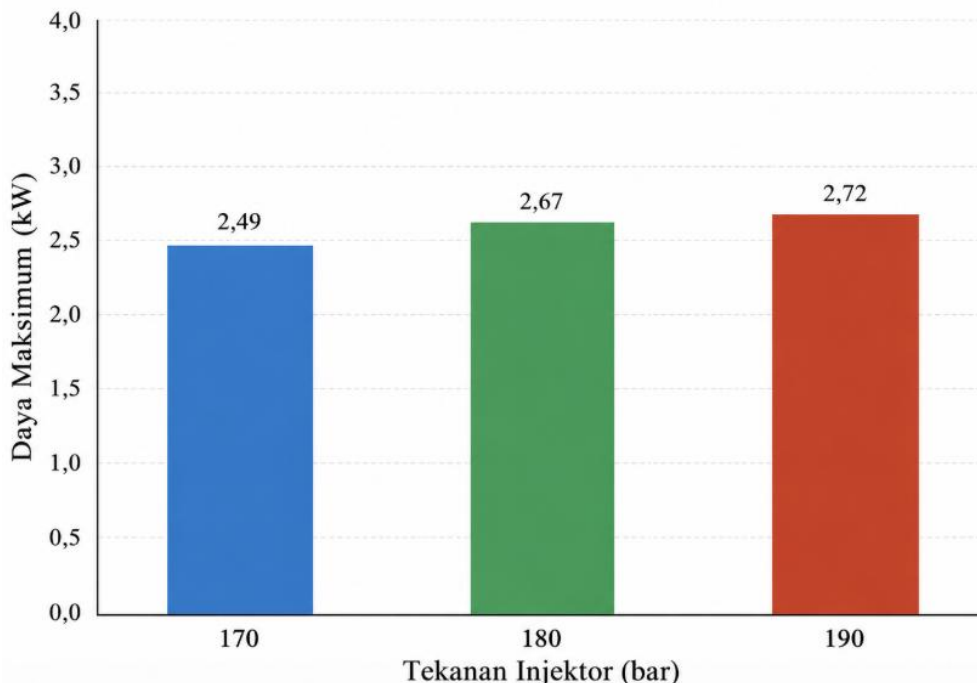
3.1 Pengaruh Tekanan Injektor terhadap Daya Mesin

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi tekanan injektor memengaruhi daya yang dihasilkan mesin diesel berpiston LSCS. Secara umum, peningkatan tekanan injektor dari 170 bar hingga 190 bar memberikan kecenderungan peningkatan daya. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan tekanan injektor berpengaruh terhadap kualitas pengabutan bahan bakar dan proses pembakaran di dalam ruang bakar.

Pada tekanan injektor 170 bar, daya yang dihasilkan masih lebih rendah dibandingkan dengan tekanan 180 bar dan 190 bar. Kondisi ini dapat disebabkan oleh tekanan penyemprotan bahan bakar yang belum cukup optimal untuk membentuk pengabutan yang lebih halus. Apabila bahan bakar tidak terdistribusi secara merata di dalam ruang bakar, proses pencampuran bahan bakar dan udara menjadi kurang baik sehingga energi pembakaran yang dihasilkan belum maksimal.

Pada tekanan injektor 180 bar, daya mesin mengalami peningkatan dibandingkan dengan tekanan 170 bar. Peningkatan ini menunjukkan bahwa tekanan penyemprotan yang lebih tinggi mampu memperbaiki proses pembakaran. Namun, hasil terbaik diperoleh pada tekanan injektor 190 bar. Pada kondisi ini, mesin menghasilkan daya maksimum sebesar 2,72 kW. Nilai tersebut lebih tinggi 1,87% dibandingkan tekanan injektor 180 bar. Hasil ini menunjukkan bahwa tekanan injektor 190 bar memberikan kondisi penyemprotan bahan bakar yang lebih sesuai untuk mesin diesel berpiston LSCS.

Peningkatan daya pada tekanan 190 bar dapat dikaitkan dengan perbaikan atomisasi bahan bakar. Semakin baik pengabutan bahan bakar, semakin besar peluang bahan bakar untuk bercampur dengan udara secara merata. Pada piston LSCS, bentuk ruang bakar yang menghasilkan pusaran lateral dapat membantu proses pencampuran tersebut. Kombinasi antara tekanan injektor yang lebih sesuai dan bentuk ruang bakar LSCS menyebabkan proses pembakaran menjadi lebih efektif sehingga daya yang dihasilkan meningkat.



Gambar 3. Perbandingan daya maksimum pada setiap tekanan injektor

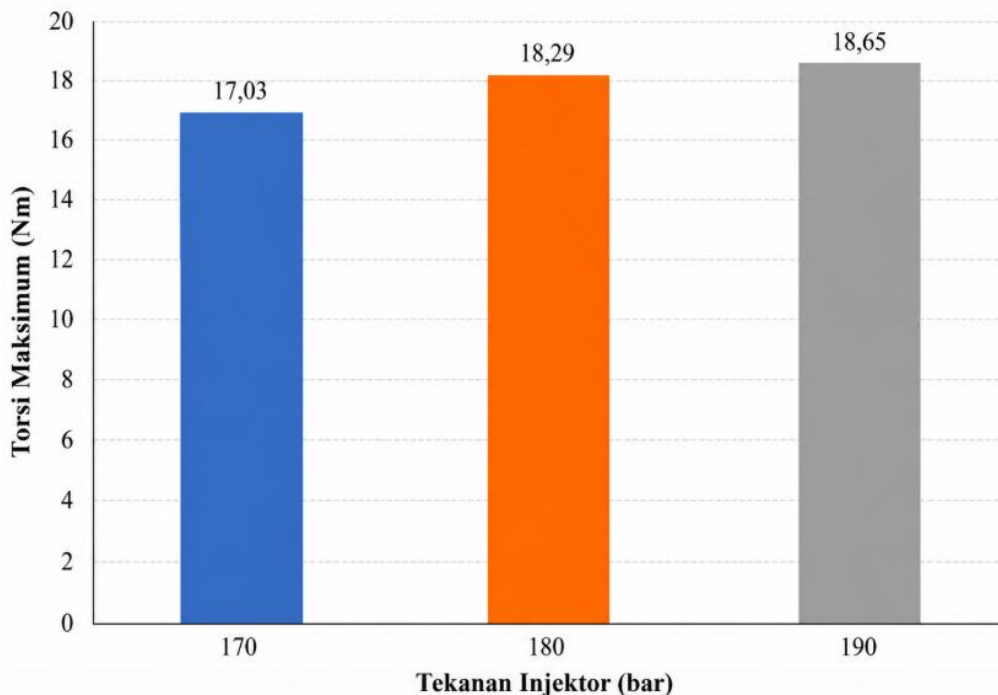
3.2 Pengaruh Tekanan Injektor terhadap Torsi Mesin

Torsi merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan mesin menghasilkan gaya putar. Dalam penelitian ini, nilai torsi menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan peningkatan tekanan injektor. Hasil ini sejalan dengan peningkatan daya mesin, karena torsi memiliki hubungan langsung dengan daya dan putaran mesin.

Pada tekanan injektor 170 bar, nilai torsi yang dihasilkan relatif lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa proses pembakaran belum mampu menghasilkan dorongan yang optimal terhadap piston. Ketika tekanan injektor dinaikkan menjadi 180 bar, torsi meningkat karena proses pengabutan bahan bakar menjadi lebih baik. Peningkatan tekanan injektor membantu bahan bakar masuk ke ruang bakar dalam bentuk semprotan yang lebih halus sehingga pembakaran dapat berlangsung lebih efektif.

Torsi tertinggi diperoleh pada tekanan injektor 190 bar, yaitu sebesar 18,65 Nm. Nilai ini meningkat 1,96% dibandingkan tekanan injektor 180 bar. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa tekanan injektor 190 bar mampu menghasilkan pembakaran yang lebih kuat sehingga gaya putar pada poros mesin juga meningkat.

Pada mesin diesel berpiston LSCS, bentuk ruang bakar berperan dalam membantu distribusi campuran bahan bakar dan udara. Ketika tekanan injektor dinaikkan hingga 190 bar, bahan bakar yang disemprotkan lebih mudah menyebar dan berinteraksi dengan udara di dalam ruang bakar. Kondisi ini menyebabkan pembakaran lebih merata dan tekanan hasil pembakaran dapat bekerja lebih efektif pada piston. Akibatnya, torsi mesin menjadi lebih tinggi.



Gambar 4. Perbandingan torsi maksimum pada setiap tekanan injektor

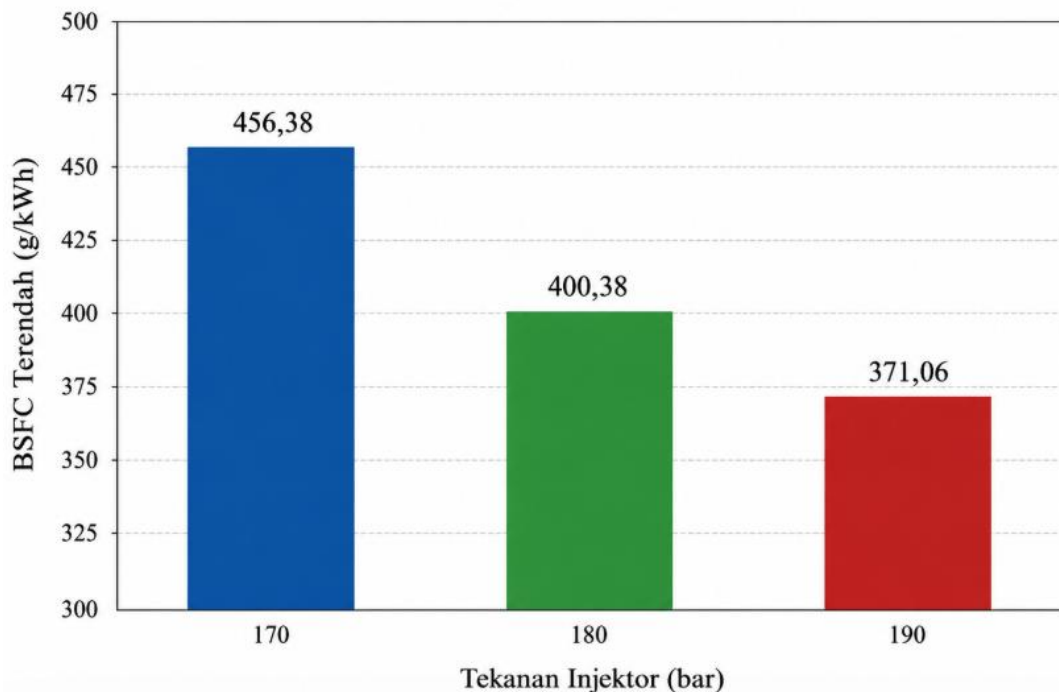
3.3 Pengaruh Tekanan Injektor terhadap BSFC

BSFC digunakan untuk mengetahui seberapa besar konsumsi bahan bakar yang diperlukan mesin untuk menghasilkan daya tertentu. Semakin rendah nilai BSFC, semakin baik efisiensi penggunaan bahan bakar pada mesin. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan injektor memberikan pengaruh terhadap penurunan nilai BSFC.

Pada tekanan injektor 170 bar, nilai BSFC cenderung lebih tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa bahan bakar yang digunakan belum sepenuhnya dikonversi menjadi daya keluaran secara efektif. Tekanan injektor yang lebih rendah dapat menyebabkan ukuran butiran bahan bakar lebih besar sehingga proses penguapan dan pencampuran dengan udara menjadi kurang optimal.

Pada tekanan injektor 180 bar, nilai BSFC mulai menurun. Hal ini menunjukkan adanya perbaikan efisiensi pembakaran. Penurunan BSFC menjadi lebih jelas pada tekanan injektor 190 bar. Pada kondisi ini, nilai BSFC terendah yang diperoleh adalah 371,06 g/kWh. Nilai tersebut mengalami penurunan sebesar 7,32% dibandingkan tekanan injektor 180 bar. Penurunan ini menunjukkan bahwa mesin membutuhkan bahan bakar yang lebih sedikit untuk menghasilkan daya keluaran yang sama atau lebih tinggi.

Hasil ini menunjukkan bahwa tekanan injektor 190 bar memberikan pengaruh positif terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar. Pada tekanan tersebut, bahan bakar lebih mudah terkabutkan dan tercampur dengan udara di ruang bakar. Piston LSCS juga membantu menciptakan gerakan aliran di dalam ruang bakar sehingga pencampuran bahan bakar dan udara menjadi lebih baik. Dengan pembakaran yang lebih efektif, konsumsi bahan bakar spesifik menjadi lebih rendah.



Gambar 5. Perbandingan BSFC terendah pada setiap tekanan injektor

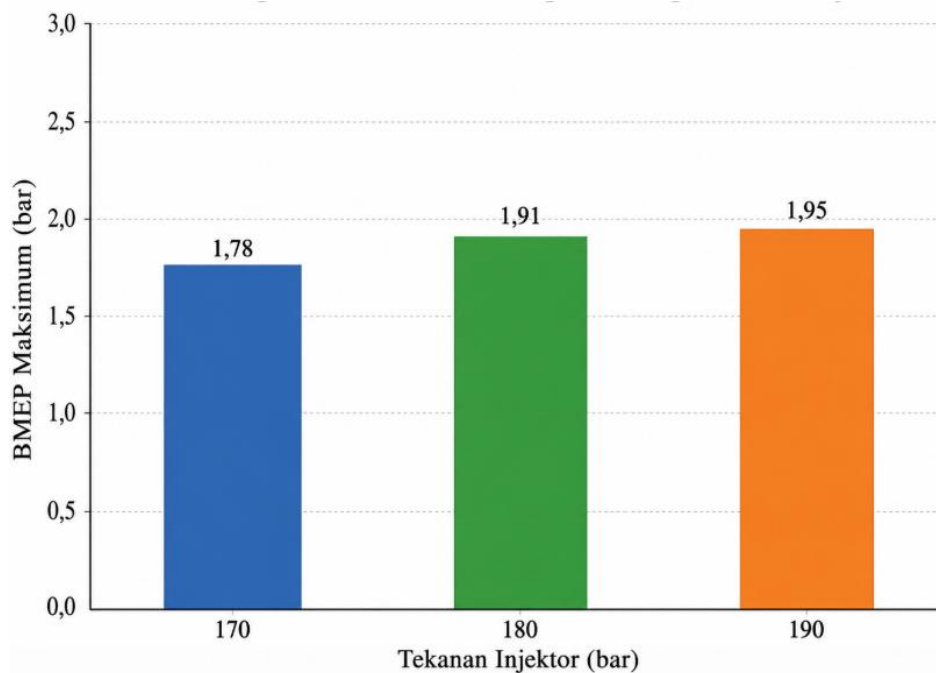
3.4 Pengaruh Tekanan Injektor terhadap BMEP

BMEP digunakan untuk menggambarkan tekanan efektif rata-rata yang bekerja selama proses pembakaran. Parameter ini penting karena menunjukkan kemampuan mesin menghasilkan kerja dari proses pembakaran di dalam silinder. Semakin tinggi nilai BMEP, semakin baik kemampuan mesin dalam mengubah energi pembakaran menjadi kerja mekanik.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan injektor juga meningkatkan nilai BMEP. Pada tekanan 170 bar, nilai BMEP masih lebih rendah dibandingkan variasi tekanan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan hasil pembakaran yang bekerja pada piston belum optimal. Ketika tekanan injektor dinaikkan menjadi 180 bar, nilai BMEP meningkat karena kualitas pengabutan dan pembakaran menjadi lebih baik.

Nilai BMEP tertinggi diperoleh pada tekanan injektor 190 bar, yaitu sebesar 1,95 bar. Nilai ini meningkat 2,09% dibandingkan tekanan injektor 180 bar. Peningkatan BMEP menunjukkan bahwa tekanan pembakaran yang dihasilkan pada ruang bakar lebih efektif dalam mendorong piston. Dengan demikian, tekanan injektor 190 bar memberikan kontribusi terhadap peningkatan kemampuan kerja mesin.

Peningkatan BMEP pada tekanan 190 bar berhubungan dengan proses pembakaran yang lebih baik. Tekanan injektor yang lebih tinggi membantu bahan bakar terkabut lebih halus, sedangkan piston LSCS membantu penyebaran campuran bahan bakar dan udara. Kombinasi tersebut menyebabkan pembakaran berlangsung lebih efektif dan tekanan hasil pembakaran dapat dimanfaatkan lebih baik oleh piston.



Gambar 6. Perbandingan BMEP maksimum pada setiap tekanan injektor

3.5 Perbandingan Unjuk Kerja pada Setiap Tekanan Injektor

Perbandingan hasil pengujian menunjukkan bahwa tekanan injektor 190 bar memberikan hasil terbaik dibandingkan 170 bar dan 180 bar. Tekanan 170 bar menghasilkan performa paling rendah karena pengabutan bahan bakar belum optimal. Tekanan 180 bar menunjukkan peningkatan performa, tetapi belum menghasilkan nilai terbaik pada seluruh parameter. Tekanan 190 bar menjadi kondisi paling baik karena menghasilkan daya dan torsi tertinggi, BSFC terendah, serta BMEP tertinggi.

Ringkasan performa terbaik pada setiap tekanan injektor disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan performa terbaik mesin pada variasi tekanan injektor

Tekanan injektor	Daya maksimum	Torsi maksimum	BSFC terendah	BMEP maksimum	Keterangan
170 bar	2,49 kW	17,03 Nm	456,38 g/kWh	1,78 bar	Performa lebih rendah
180 bar	2,67 kW	18,29 Nm	400,38 g/kWh	1,91 bar	Performa meningkat
190 bar	2,72 kW	18,65 Nm	371,06 g/kWh	1,95 bar	Performa terbaik

Berdasarkan Tabel 3, tekanan injektor 190 bar memberikan keseimbangan terbaik antara keluaran daya, torsi, efisiensi bahan bakar, dan tekanan efektif rata-rata. Dengan demikian, tekanan injektor 190 bar dapat dikatakan sebagai tekanan kerja terbaik pada mesin diesel berpiston LSCS dalam rentang pengujian ini.

3.6 Pembahasan Tekanan Injektor Terbaik

Tekanan injektor terbaik tidak hanya ditentukan berdasarkan daya tertinggi, tetapi juga harus memperhatikan torsi, BSFC, dan BMEP. Apabila hanya melihat daya, tekanan injektor 190 bar memang memberikan nilai tertinggi. Namun, hasil yang sama juga terlihat pada parameter torsi dan BMEP. Selain itu, tekanan 190 bar menghasilkan nilai BSFC paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan performa pada tekanan 190 bar tidak disertai dengan peningkatan konsumsi bahan bakar spesifik, tetapi justru menghasilkan efisiensi yang lebih baik.

Dibandingkan tekanan 180 bar, tekanan 190 bar mampu meningkatkan daya sebesar 1,87%, meningkatkan torsi sebesar 1,96%, menurunkan BSFC sebesar 7,32%, dan meningkatkan BMEP sebesar 2,09%. Perbandingan ini menunjukkan bahwa kenaikan tekanan injektor dari 180 bar ke 190 bar masih memberikan dampak positif terhadap unjuk kerja mesin. Ringkasan peningkatan performa tekanan 190 bar terhadap 180 bar ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Peningkatan performa tekanan injektor 190 bar terhadap 180 bar

Parameter	Nilai pada tekanan 190 bar	Perubahan terhadap 180 bar
Daya	2,72 kW	Naik 1,87%
Torsi	18,65 Nm	Naik 1,96%
BSFC	371,06 g/kWh	Turun 7,32%
BMEP	1,95 bar	Naik 2,09%

Secara teknis, hasil ini menunjukkan bahwa tekanan injektor 190 bar lebih sesuai dengan karakteristik ruang bakar piston LSCS pada mesin yang diuji. Pada tekanan ini, bahan bakar lebih mudah tercabut dan bercampur dengan udara. Pola aliran yang terbentuk pada piston LSCS membantu memperbaiki distribusi campuran di dalam ruang bakar. Akibatnya, pembakaran menjadi lebih efektif, daya dan torsi meningkat, konsumsi bahan bakar spesifik menurun, dan tekanan efektif rata-rata meningkat.

Meskipun demikian, hasil penelitian ini berlaku pada kondisi pengujian yang digunakan, yaitu mesin diesel satu silinder *Jiangdong ZH1115N*, piston LSCS, bahan bakar solar, variasi tekanan 170–190 bar, putaran 1000–1400 rpm, dan beban listrik 2000–4000 W. Oleh karena itu, penerapan pada mesin lain perlu memperhatikan spesifikasi mesin, sistem injeksi, bentuk ruang bakar, serta kondisi operasi yang digunakan.

3.7 Implikasi Hasil Pengujian

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengaturan tekanan injektor dapat menjadi salah satu cara untuk meningkatkan unjuk kerja mesin diesel berpiston LSCS. Tekanan injektor yang sesuai dapat memperbaiki proses pengabutan bahan bakar, meningkatkan pembakaran, dan menurunkan konsumsi bahan bakar spesifik. Untuk aplikasi permesinan kapal, hasil ini penting karena mesin diesel sering bekerja pada kondisi beban yang berubah-ubah dan membutuhkan konsumsi bahan bakar yang lebih efisien.

Penggunaan tekanan injektor 190 bar pada konfigurasi mesin yang diuji memberikan hasil paling baik. Namun, pengaturan tekanan injektor tetap harus mempertimbangkan kondisi teknis mesin, kemampuan pompa bahan bakar, kondisi injektor, dan ketahanan komponen. Tekanan yang terlalu tinggi pada sistem yang tidak sesuai dapat meningkatkan beban kerja komponen injeksi. Oleh karena itu, hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar awal untuk pengujian lanjutan pada durasi operasi yang lebih panjang atau pada kondisi kerja yang lebih mendekati aplikasi lapangan.

3.8 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan tekanan injektor memberikan pengaruh terhadap unjuk kerja mesin diesel berpiston LSCS. Berdasarkan data yang diperoleh, tekanan injektor 190 bar menghasilkan performa paling baik dibandingkan tekanan 170 bar dan 180 bar. Hal ini terlihat dari nilai daya maksimum, torsi maksimum, BSFC terendah, dan BMEP maksimum yang semuanya menunjukkan kecenderungan membaik pada tekanan injektor 190 bar.

Pada parameter daya, peningkatan tekanan injektor menghasilkan kenaikan daya maksimum. Daya maksimum pada tekanan 170 bar sebesar 2,49 kW, meningkat menjadi 2,67 kW pada tekanan 180 bar, dan mencapai 2,72 kW pada tekanan 190 bar. Kenaikan ini menunjukkan bahwa tekanan injektor yang lebih tinggi mampu memperbaiki proses penyemprotan bahan bakar ke dalam ruang bakar. Dengan tekanan semprotan yang lebih baik, bahan bakar lebih mudah terkabut dan bercampur dengan udara, sehingga energi hasil pembakaran dapat diubah menjadi daya keluaran secara lebih efektif. Perbandingan daya maksimum pada setiap tekanan injektor ditunjukkan pada Gambar 3.

Pada parameter torsi, hasil pengujian juga menunjukkan kecenderungan yang sama. Torsi maksimum pada tekanan injektor 170 bar sebesar 17,03 Nm, kemudian meningkat menjadi 18,29 Nm pada tekanan 180 bar, dan mencapai 18,65 Nm pada tekanan 190 bar. Peningkatan torsi menunjukkan bahwa tekanan injektor 190 bar mampu menghasilkan pembakaran yang lebih kuat sehingga gaya dorong pada piston menjadi lebih besar. Kondisi ini penting karena torsi berkaitan dengan kemampuan mesin dalam menerima beban kerja. Perbandingan torsi maksimum pada setiap tekanan injektor ditunjukkan pada Gambar 4.

Selain meningkatkan daya dan torsi, tekanan injektor 190 bar juga menghasilkan nilai BSFC paling rendah. Nilai BSFC pada tekanan 170 bar sebesar 456,38 g/kWh, turun menjadi 400,38 g/kWh pada tekanan 180 bar, dan menjadi 371,06 g/kWh pada tekanan 190 bar. Penurunan BSFC menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan daya menjadi lebih rendah. Dengan kata lain, mesin bekerja lebih efisien pada tekanan injektor 190 bar. Grafik perbandingan BSFC terendah ditunjukkan pada Gambar 5, dengan catatan bahwa nilai BSFC yang lebih rendah menunjukkan efisiensi bahan bakar yang lebih baik.

Nilai BMEP juga mengalami peningkatan seiring kenaikan tekanan injektor. Pada tekanan 170 bar, BMEP maksimum sebesar 1,78 bar. Nilai tersebut meningkat menjadi 1,91 bar pada tekanan 180 bar dan mencapai 1,95 bar pada tekanan 190 bar. Peningkatan BMEP menunjukkan bahwa tekanan efektif rata-rata yang bekerja selama proses pembakaran semakin baik. Hal ini berarti energi pembakaran di dalam silinder dapat dimanfaatkan lebih efektif untuk menghasilkan kerja. Perbandingan BMEP maksimum pada setiap tekanan injektor ditunjukkan pada Gambar 6.

Secara teknis, peningkatan performa pada tekanan injektor 190 bar dapat dijelaskan melalui perbaikan kualitas pengabutan bahan bakar. Tekanan injektor yang lebih tinggi cenderung menghasilkan butiran bahan bakar yang lebih halus. Butiran bahan bakar yang lebih halus lebih mudah menguap dan bercampur dengan udara di dalam ruang bakar. Pada mesin yang menggunakan piston LSCS, proses pencampuran tersebut dibantu oleh bentuk ruang bakar yang menghasilkan pola aliran pusaran lateral. Kombinasi antara tekanan injektor 190 bar dan geometri piston LSCS membuat proses pembakaran berlangsung lebih efektif.

Jika dibandingkan dengan tekanan injektor 180 bar, tekanan 190 bar memberikan peningkatan daya sebesar 1,87%, peningkatan torsi sebesar 1,96%, penurunan BSFC sebesar 7,32%, dan peningkatan BMEP sebesar 2,09%. Data ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan dari 180 bar ke 190 bar masih memberikan pengaruh positif terhadap performa mesin. Ringkasan peningkatan performa tekanan injektor 190 bar terhadap 180 bar dapat disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Peningkatan performa tekanan injektor 190 bar terhadap 180 bar

Parameter	Nilai pada 190 bar	Perubahan terhadap 180 bar
Daya maksimum	2,72 kW	Naik 1,87%
Torsi maksimum	18,65 Nm	Naik 1,96%
BSFC terendah	371,06 g/kWh	Turun 7,32%
BMEP maksimum	1,95 bar	Naik 2,09%

Berdasarkan seluruh parameter yang dianalisis, tekanan injektor 190 bar dapat dinyatakan sebagai tekanan terbaik pada rentang pengujian ini. Tekanan tersebut tidak hanya menghasilkan daya dan torsi yang lebih tinggi, tetapi juga menghasilkan konsumsi bahan bakar spesifik yang lebih rendah serta BMEP yang lebih besar. Dengan demikian, tekanan injektor 190 bar memberikan keseimbangan yang lebih baik antara keluaran mesin dan efisiensi bahan bakar.

Temuan ini menunjukkan bahwa pengaturan tekanan injektor dapat menjadi salah satu langkah teknis untuk meningkatkan unjuk kerja mesin diesel berpiston LSCS. Untuk aplikasi permesinan kapal, hasil ini penting karena mesin diesel sering bekerja pada kondisi beban yang berubah-ubah dan membutuhkan performa yang stabil. Mesin dengan daya dan torsi yang lebih baik akan lebih mampu menerima perubahan beban, sedangkan nilai BSFC yang lebih rendah dapat mendukung penghematan bahan bakar.

Meskipun demikian, hasil penelitian ini berlaku pada kondisi pengujian yang digunakan, yaitu mesin diesel *Jiangdong* ZH1115N, piston LSCS, bahan bakar solar, tekanan injektor 170–190 bar, putaran 1000–1400 rpm, dan beban listrik 2000–4000 W. Oleh karena itu, penerapan hasil pada mesin diesel lain perlu mempertimbangkan spesifikasi mesin, sistem injeksi, bentuk ruang bakar, serta kondisi operasi yang digunakan. Pengujian lanjutan juga diperlukan untuk mengetahui pengaruh tekanan injektor terhadap emisi gas buang, ketahanan komponen, dan performa mesin pada durasi operasi yang lebih panjang.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, variasi tekanan injektor berpengaruh terhadap unjuk kerja mesin diesel satu silinder berpiston LSCS. Peningkatan tekanan injektor dari 170 bar ke 190 bar menunjukkan kecenderungan peningkatan daya, torsi, dan BMEP, serta penurunan nilai BSFC. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan injektor yang lebih sesuai dapat memperbaiki proses pengabutan bahan bakar dan mendukung pembakaran yang lebih efektif pada ruang bakar piston LSCS.

Tekanan injektor 190 bar memberikan hasil terbaik pada rentang pengujian yang dilakukan. Pada tekanan tersebut, mesin menghasilkan daya maksimum sebesar 2,72 kW, torsi maksimum sebesar 18,65 Nm, BSFC terendah sebesar 371,06 g/kWh, dan BMEP maksimum sebesar 1,95 bar. Dibandingkan tekanan injektor 180 bar, tekanan 190 bar meningkatkan daya sebesar 1,87%, meningkatkan torsi sebesar 1,96%, menurunkan BSFC sebesar 7,32%, dan meningkatkan BMEP sebesar 2,09%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan tekanan injektor dapat menjadi salah satu langkah teknis untuk meningkatkan performa mesin diesel berpiston LSCS. Pada kondisi pengujian

ini, tekanan injektor 190 bar dapat direkomendasikan sebagai tekanan kerja terbaik karena mampu memberikan keseimbangan antara peningkatan keluaran mesin dan efisiensi konsumsi bahan bakar. Temuan ini dapat menjadi dasar pengembangan lebih lanjut pada mesin diesel kecil untuk aplikasi permesinan kapal, khususnya pada sistem penggerak atau pembangkit daya bantu.

Untuk penelitian berikutnya, disarankan dilakukan pengujian dengan durasi operasi yang lebih panjang, variasi bahan bakar yang berbeda, serta pengukuran emisi gas buang. Pengujian lanjutan juga dapat dilakukan dengan membandingkan piston LSCS dan piston standar agar pengaruh modifikasi bentuk ruang bakar terhadap performa mesin dapat diketahui secara lebih mendalam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, khususnya Laboratorium Motor Bakar, yang telah menyediakan fasilitas dan peralatan pengujian dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada teknisi laboratorium dan semua pihak yang telah membantu proses persiapan alat, pengujian mesin diesel, penyetelan tekanan injektor, serta pengambilan data penelitian. Dukungan tersebut sangat membantu dalam penyelesaian penelitian mengenai pengaruh variasi tekanan injektor terhadap performa mesin diesel berpiston LSCS ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. D. Hountalas, M. Founti, and T. C. Zannis, "Experimental Investigation to Assess the Performance Characteristics of a Marine Two-Stroke Dual Fuel *Engine* under Diesel and Natural Gas Mode," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 8, p. 3551, Apr. 2023, doi: 10.3390/en16083551.
- [2] X. Chen, L. Liu, J. Du, D. Liu, L. Huang, and X. Li, "Intelligent Optimization Based on a Virtual Marine Diesel *Engine* Using GA-ICSO Hybrid Algorithm," *Machines*, vol. 10, no. 4, p. 227, Mar. 2022, doi: 10.3390/machines10040227.
- [3] M. Budurov, S. Gorb, and A. Popovskii, "Optimization of electronic speed governors sensitivity for marine diesel *engine* s," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 8 (134), pp. 26–35, Apr. 2025, doi: 10.15587/1729-4061.2025.322851.
- [4] X. Zhou, T. Li, N. Wang, X. Wang, R. Chen, and S. Li, "Pilot diesel-ignited ammonia dual fuel low-speed marine *engine* s: A comparative analysis of ammonia premixed and high-pressure spray *Combustion* modes with CFD simulation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 173, p. 113108, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2022.113108.
- [5] P. Karvounis, G. Theotokatos, C. Patil, L. Xiang, and Y. Ding, "Parametric investigation of diesel–methanol dual fuel marine *engine* s with port and direct injection," *Fuel*, vol. 381, p. 133441, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.fuel.2024.133441.
- [6] K.-S. Jo, K.-J. Kong, and S.-H. Han, "Optimizing Fuel Efficiency and Emissions of Marine Diesel *Engine* s When Using Biodiesel Mixtures Under Diverse Load/Temperature Conditions: Predictive Model and Comprehensive Life Cycle Analysis," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 6, p. 1192, Jun. 2025, doi: 10.3390/jmse13061192.

- [7] V. Pelić, O. Bukovac, R. Radonja, and N. Degiuli, “The Impact of Slow Steaming on Fuel Consumption and CO₂ Emissions of a Container Ship,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 3, p. 675, Mar. 2023, doi: 10.3390/jmse11030675.
- [8] A. A. Salazar, G. Salameh, P. Chesse, N. Bulot, and Y. Thevenoux, “Impact of Optimization Variables on Fuel Consumption in Large Four-Stroke Diesel Marine *Engines* with Electrically Divided *Turbochargers*,” *Machines*, vol. 12, no. 12, p. 926, Dec. 2024, doi: 10.3390/machines12120926.
- [9] Giovanni Benvenuto and Ugo Campora, “Influence of the marine *engine* load diagram characteristics on the ship propulsion *System* performance,” *International Journal of Frontiers in Engineering and Technology Research*, vol. 3, no. 2, pp. 059–067, Dec. 2022, doi: 10.53294/ijfetr.2022.3.2.0059.
- [10] J. Moon, “Comparative Analysis of Performance and Emissions of a Two-Stroke Marine Diesel *Engine* According to CPP Modes,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 4, p. 331, Feb. 2026, doi: 10.3390/jmse14040331.
- [11] H. Z. Woldetensy, D. S. Zeleke, and G. S. Tibba, “Study of the impact on emissions and *engine* performance of diesel fuel additives made from cotton and castor blended seed oils,” *Heliyon*, vol. 11, no. 1, p. e41659, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41659.
- [12] V. Rojas-Reinoso, S. Duque-Escobar, C. Guapulema-Guapulema, and J. A. Soriano, “Study of the Variation of Fuel *Pressure* to Improve Spraying and the Range of the Injection Jet,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 14, p. 5472, Jul. 2023, doi: 10.3390/en16145472.
- [13] Nhad K. Frhan Al-Abboodi, “The Combined Effect of the Piston Bowl Geometry and Injection Fuel *Pressure* on the Compression Ignition *Engine* Characteristics,” *CFD Letters*, vol. 14, no. 8, pp. 43–62, Aug. 2022, doi: 10.37934/cfdl.14.8.4362.
- [14] Nhad K. Frhan Al-Abboodi, “The Combined Effect of the Piston Bowl Geometry and Injection Fuel *Pressure* on the Compression Ignition *Engine* Characteristics,” *CFD Letters*, vol. 14, no. 8, pp. 43–62, Aug. 2022, doi: 10.37934/cfdl.14.8.4362.
- [15] J. Zareei *et al.*, “Optimizing diesel *engine* performance and emissions with diesel-hydrogen mixtures: Impact of injector configuration, angle, and *pressure*,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 23, p. 100678, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100678.
- [16] Muhamad Amiruddin and Hamid Nasrullah, “The Effect of Injector Nozzle Opening *Pressure* and Cetane Number on Fuel Consumption in Single-Cylinder Diesel *Engines* at Various *Engine* Speeds,” *Jurnal E-Komtek (Elektro-Komputer-Teknik)*, vol. 9, no. 1, pp. 286–301, Jun. 2025, doi: 10.37339/e-komtek.v9i1.2500.
- [17] A. Aziz and Z. Fahmi, “Recondition injector nozzle and its *pressure* effect on performance parameters of diesel *engine* Komatsu types SAA12V140E-1,” *SINERGI*, vol. 26, no. 2, pp. 165–172, May 2022, doi: 10.22441/sinergi.2022.2.005.
- [18] W. Yang, F. Li, F. Ma, and J. Xu, “Numerical analysis of mixing and *Combustion* characteristics of a lateral *Swirl Combustion System* in OP2S diesel *engines*,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 238, no. 1, pp. 147–158, Jan. 2024, doi: 10.1177/09544070221121874.
- [19] J. Ramachander, S. K. Gugulothu, G. R. Sastry, and M. S. Surya, “Statistical and experimental investigation of the influence of fuel injection strategies on CRDI *engine* assisted CNG dual

fuel diesel engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 42, pp. 22149–22164, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.04.010.

- [20] D. Liu, X. Li, H. Shang, L. Xie, Y. Chen, and J. Chang, “Combustion performance and fuel injection timing adaptability of a lateral Swirl Combustion System for direct injection diesel engines,” *Fuel*, vol. 296, p. 120663, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120663.