

# KAJI EKSPERIMENTAL MOTOR BAKAR BENJIN 2 LANGKAH DENGAN SISTEM PENYEMPROTAN LANGSUNG BAHAN BAKAR MEKANIS PADA RUANG BAKAR

Iman Kartolaksone Reksowardojo<sup>(1)</sup>  
Aan Setyawan<sup>(2)</sup>, Budi Sudarwanto<sup>(2)</sup>, dan Ibrahim Syaharuddin<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha 10 Bandung, 40132  
E-mail : iman@lmbps.ms.itb.ac.id

<sup>(2)</sup>Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Nasional Bandung  
Jl. Penghulu KH. Hasan Mustapa no. 23 Bandung, 40124

## Ringkasan

Pada studi ini, sistem penyemprotan langsung bahan bakar mekanis digunakan pada motor bensin langkah dengan kapasitas silinder 70 cc. Sistem penyemprotan yang digunakan adalah sistem pompa tekanan tinggi dan penyemprot dari motor diesel berdaya 5 hp yang digerakkan secara mekanis oleh sebuah kam. Modifikasi yang dilakukan adalah saluran isap tanpa pencekikan, penambahan lubang pada kepala silinder untuk penyemprot dan sistem poros kam. Poros kam dihubungkan dengan poros engkol. Prestasi motor tersebut diuji dan hasil pengujian dibandingkan dengan prestasi motor yang menggunakan sistem karburator pada kondisi pengujian yang sama. Prestasi motor dengan sistem penyemprotan langsung lebih baik bila dibandingkan dengan prestasi motor yang menggunakan sistem karburator untuk daerah operasi putaran motor 1600–1750 rpm. Daya motor mengalami kenaikan rata-rata 143%, pemakaian bahan bakar spesifik turun rata-rata 35%, efisiensi termal meningkat rata-rata 59%, pemasukan udara naik rata-rata 244%, efisiensi pembilasan meningkat 110% dan perbandingan campuran udara bahan bakar juga naik rata-rata 116%. Perbaikan prestasi ini disebabkan oleh kenaikan perbandingan udara dan bahan bakar yang berakibat pembakaran berlangsung pada kondisi miskin dan proses langkah isap yang dilakukan tanpa proses pencekikan. Namun untuk kondisi operasi yang lain, motor dengan sistem penyemprotan langsung mekanis tidak dapat beroperasi dengan baik karena sistem tersebut tidak dapat memenuhi kebutuhan pengaturan motor sistem penyemprotan langsung yang berbeda untuk kondisi operasi yang lain.

## Abstract

In this study, a mechanical fuel direct injection system is used in a two-stroke 70 cc gasoline engine. The injection system is using a high pressure pump (injection pump) and an injector (Nozzle) from a 5 hp diesel engine that mechanically is operated by a cam. The modifications on the two stroke gasoline engine are unthrottle intake system, additional hole in the cylinder head for the injector and a camshaft system. The camshaft is connected to the crankshaft. The performance of the engine is tested and the result is compared with the performance of the carburetor system engine in the same testing condition. The performance of the direct injection system engine is better than the carburetor system engine in 1600-1750 rpm range. The power of the engine increases in about 143%, the specific fuel consumption decreases in about 35%, the thermal efficiency increases in about 59%, the air intake increases in about 244%, the scavenging efficiency increases in about 110% and the air-fuel ratio increases in about 116%. The improvement of the performance is caused by the increase of the air-fuel ratio also causing a lean combustion and an unthrottle intake process. But in other operation condition the mechanical fuel direct injection system cannot operate with good performance because the system cannot full fill the need of a complex system control.

**Keyword:** two strokes gasoline engine, carburetor system, direct injection system.

## 1. LATAR BELAKANG

Motor bensin 2 langkah memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan motor bensin 4 langkah, diantaranya yaitu dapat menghasilkan daya yang lebih besar dengan kapasitas silinder dan tekanan efektif rata-rata yang sama,

biaya pengoperasiannya rendah dan interval masa perawatannya lebih lama<sup>[1, 3, 4]</sup>. Namun, motor bensin 2 langkah juga memiliki kelemahan-kelemahan yaitu emisi gas buang yang tinggi dan pemakaian bahan bakar yang tinggi<sup>[2, 3, 4]</sup>.

Dari beberapa penelitian yang dilakukan oleh peneliti-peneliti yang lain telah dilakukan perbaikan terhadap kelemahan-kelemahan di atas, yaitu dengan menerapkan sistem penyemprotan langsung bahan bakar kendali elektronik ke ruang bakar atau biasa disebut *Gasoline Direct Injection (GDI)* untuk motor bakar bensin 4 langkah [5, 8, 9] dan motor bakar bensin 2 langkah [2]. Hasilnya adalah emisi gas buang lebih rendah dan pemakaian bahan bakar yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem konvensional [2, 5, 8, 9].

Berdasarkan hal-hal tersebut di atas, penulis melakukan eksperimen untuk menerapkan sistem penyemprotan langsung pada motor bensin 2 langkah satu silinder dengan sistem pembilasan ruang engkol. Eksperimen ini dilakukan dengan memodifikasi motor 2 langkah yang ada dengan menggunakan sistem penyemprotan langsung yang digerakkan dan diatur secara mekanis dengan menggunakan sebuah poros kam.

## 2. EKSPERIMEN DAN PROSEDUR

Data spesifikasi motor bensin 2 langkah yang digunakan dalam penerapan sistem penyemprotan langsung ini diberikan pada Tabel (1).

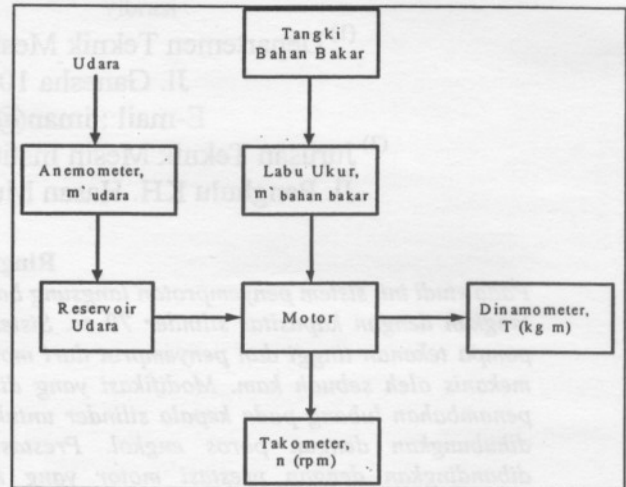
Tabel 1. Spesifikasi Motor

Tipe	Suzuki FR 70 Motor Bensin 2 langkah Satu silinder
Diameter x langkah	46 mm x 42 mm
Volume silinder	69,8 cc
Perbandingan kompresi	5 : 1
Daya maksimum	4,6 PS/ 4200 rpm
Torsi maksimum	78,4 kg cm
Tipe katup	Katup buluh
Tipe pembilasan	Pembilasan ruang engkol
Sistem pendinginan	Udara
Sistem penyalan	Magnet

Pengujian motor sistem penyemprotan langsung dilakukan dengan jumlah bahan bakar tetap pada putaran motor yang berbeda-beda dengan cara mengubah beban. Sebelumnya, telah dilakukan pengujian serupa pada motor yang menggunakan sistem bahan bakar karburator dengan metoda yang sama. Pengujian tersebut dilakukan pada putaran 1600–1750 rpm. Data yang digunakan untuk menentukan parameter prestasi motor merupakan data pengujian yang telah dirata-ratakan.

Kecepatan putar motor diukur menggunakan takometer, besarnya beban diukur menggunakan dinamometer, besarnya laju massa udara diukur menggunakan anemometer dan laju massa bahan bakar diukur menggunakan labu ukur pada volume tertentu. Sensor kecepatan putar dipasang pada magnet motor. Dinamometer dan motor dihubungkan dengan rantai (perbandingan gigi 6,75:1). Anemometer dipasang pada

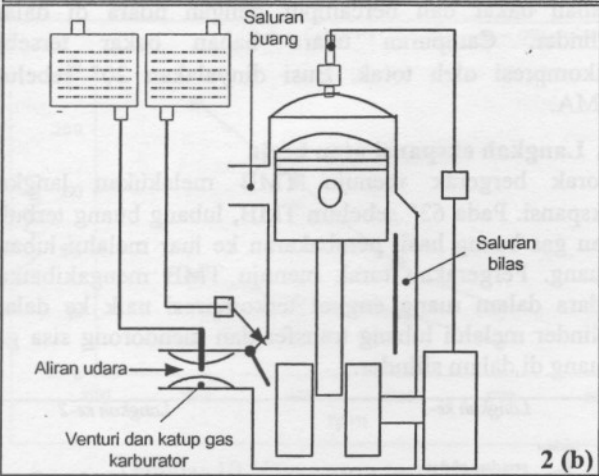
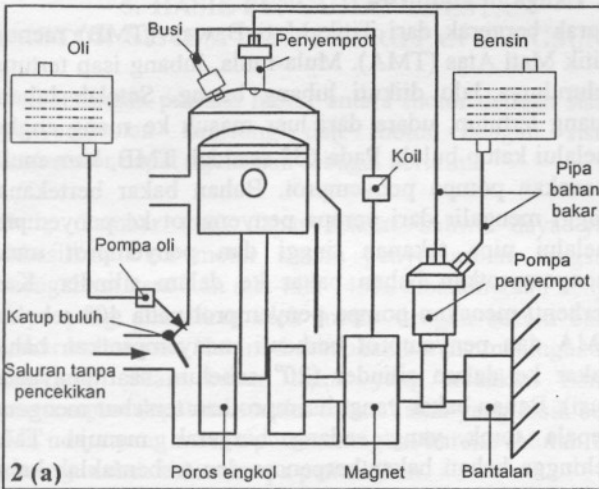
saluran masuk reservoir udara. Saluran keluar reservoir udara dihubungkan dengan karburator untuk sistem karburator dan dengan saluran isap motor (tanpa pencekikan) untuk sistem penyemprotan langsung. Labu ukur dipasang antara tangki bahan bakar dengan karburator untuk sistem karburator dan dengan pompa penyemprot untuk sistem penyemprotan langsung. Skema peralatan pengujian diperlihatkan Gambar (1).



Gambar 1. Skema peralatan pengujian.

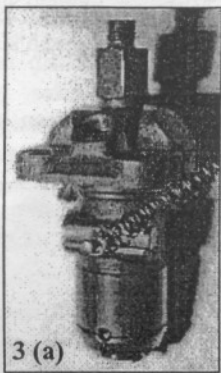
## 3. SISTEM PENYEMPROTAN LANGSUNG

Pada Gambar (2a) diperlihatkan skema dari motor dengan sistem penyemprotan langsung sedangkan pada Gambar (2b) adalah skema dari motor dengan sistem karburator. Dapat dilihat pada saluran isap tidak terdapat katup untuk mengatur banyaknya udara yang masuk ke ruang engkol karena saluran isap dirancang tanpa pencekikan (*unthrottle*). Hal ini dilakukan untuk mengurangi kerugian pemompaan (*pumping losses*). Jumlah udara yang masuk ke dalam silinder besarnya tergantung pada putaran. Sedangkan pengaturan kondisi campuran udara bahan bakar yang sesuai dengan kondisi kerja motor dilakukan oleh pompa penyemprot dengan cara mengatur jumlah bahan bakar yang akan dipompakan ke penyemprot. Pengaturan jumlah bahan bakar ini dilakukan secara mekanis oleh operator. Pompa penyemprot digerakkan oleh sebuah poros kam yang dihubungkan langsung ke poros engkol sehingga putaran poros kam sama dengan putaran poros engkol. Penyemprot diletakkan pada kepala silinder dengan posisi tegak lurus terhadap permukaan torak sehingga diharapkan bahan bakar dapat didistribusikan ke seluruh ruang bakar. Untuk itu, kepala silinder harus dimodifikasi untuk menempatkan penyemprot pada lubang busi dan membuat sebuah lubang baru untuk busi yang diletakkan pada posisi 60° terhadap penyemprot.



Gambar 2. (a) Skema sistem penyemprotan langsung, (b) Skema sistem karburator.

Perangkat penyemprotan yang digunakan adalah pompa penyemprot tipe bosch dan penyemprot jenis pasak yang diambil dari motor diesel stasioner 5 hp, seperti terlihat pada Gambar (3) berikut.



Gambar 3. (a) Pompa penyemprot, (b) Penyemprot.

Kedua komponen milik motor diesel tersebut memenuhi syarat untuk digunakan dalam sistem penyemprotan langsung bahan bakar mekanis ini.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh pompa penyemprot dan penyemprot<sup>[7]</sup> adalah:

- Dapat diatur dan dioperasikan secara mekanis.
- Pompa penyemprot harus mempunyai tekanan yang tinggi karena pompa harus mampu menyemprotkan

bahan bakar pada saat langkah kompresi. Oleh karena itu, tekanan yang dihasilkan pompa harus lebih besar dari tekanan kompresi di ruang bakar.

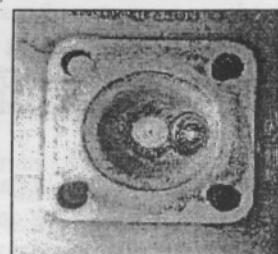
- Tahan terhadap temperatur tinggi. Penyemprot dipasang di kepala silinder, sehingga penyemprot berhubungan langsung dengan ruang bakar. Oleh karena itu, penyemprot harus mampu bekerja pada temperatur ruang bakar.
- Tahan terhadap tekanan tinggi. Pada saat langkah kerja, tekanan yang terjadi pada ruang bakar sangat tinggi sehingga penyemprot harus tahan terhadap tekanan tinggi.
- Bentuk semprotan bahan bakar yang dihasilkan harus memiliki penetrasi yang tinggi. Bentuk semprotan dapat dilihat pada Gambar (4). Dengan penetrasi yang tinggi, bahan bakar yang disemprotkan akan mengenai permukaan torak. Akibat panas pada permukaan torak, bahan bakar akan menguap sehingga mudah bercampur dengan udara atau dengan kata lain akan mempercepat proses pencampuran bahan bakar dan udara di dalam silinder.



Gambar 4. Bentuk semprotan penyemprot.

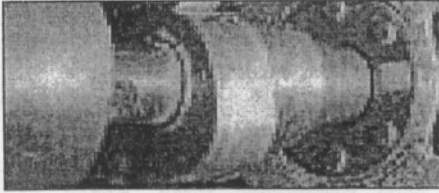
### 3. PROSES MODIFIKASI PADA MOTOR

Dalam penerapan sistem penyemprotan langsung ini, perubahan-perubahan yang dilakukan pada motor diusahakan seminimal mungkin agar sebagian besar komponen motor tetap dapat digunakan. Yang mengalami perubahan adalah lubang pada kepala silinder, dimana pada kepala silinder tersebut ditempatkan penyemprot dan busi. Penyemprot ditempatkan di lubang yang pada awalnya merupakan lubang busi. Lubang tersebut berada di tengah-tengah kepala silinder dan posisinya tegak lurus terhadap permukaan torak. Posisi ini dimaksudkan untuk mendapatkan penyebaran bahan bakar yang merata pada ruang bakar. Sedangkan untuk busi, dibuat lubang baru dengan posisi miring yang membentuk sudut sekitar 60° terhadap penyemprot. Busi ditempatkan dekat dengan lubang buang karena sisi lubang buang memiliki temperatur yang lebih tinggi daripada temperatur pada sisi lubang masuk untuk menghindari terjadinya peristiwa ketukan. Dan dengan temperatur yang lebih tinggi maka campuran udara bahan bakar akan lebih mudah dinyalakan oleh busi. Kepala silinder yang telah dimodifikasi dapat dilihat pada Gambar (5) berikut ini.



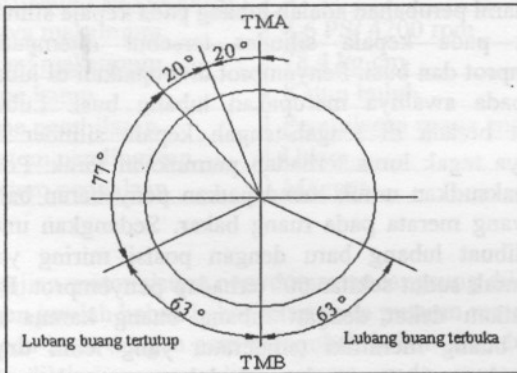
Gambar 5. Kepala silinder yang telah dimodifikasi.

Modifikasi lainnya yang dilakukan pada motor ialah pemasangan poros kam pada dudukan magnet, yang merupakan satu kesatuan dengan poros engkol. Poros kam berfungsi untuk menggerakkan pompa penyemprot dan mengatur waktu penyemprotan bahan bakar. Poros kam merupakan dua bagian yang terpisah yaitu poros dan kam. Poros dibuat dengan proses bubut, freis vertikal dan sekrap, sedangkan kam diambil dari motor diesel stasioner 5 hp. Gambar (6) berikut ini memperlihatkan poros kam yang sudah dihubungkan dengan poros engkol dan pada ujung poros ditumpu oleh sebuah bantalan bola.



Gambar 6. Poros kam.

Waktu penyemprotan bahan bakar yang dibutuhkan oleh motor dapat dilihat pada Gambar (7). Motor tersebut mempunyai durasi lubang buang  $126^\circ$ , yaitu lubang buang mulai terbuka  $63^\circ$  sebelum Titik Mati Bawah (TMB) dan tertutup  $63^\circ$  setelah TMB. Waktu penyalaan busi  $20^\circ$  sebelum Titik Mati Atas (TMA). Bahan bakar mulai disemprotkan ke dalam ruang bakar setelah lubang buang tertutup ( $63^\circ$  setelah TMB). Sehingga bahan bakar tidak ada yang ikut terbuang pada proses pembilasan. Untuk mencegah busi tersiram oleh bahan bakar pada waktu penyalaan, maka penyemprotan bahan bakar berakhir  $20^\circ$  sebelum saat penyalaan busi ( $40^\circ$  sebelum TMA). Pompa penyemprot mulai digerakkan oleh kam pada  $63^\circ$  setelah TMB dan kam berhenti menekan pompa penyemprot  $40^\circ$  sebelum TMA.



Gambar 7. Diagram durasi kam.

#### 4. PRINSIP KERJA MOTOR SISTEM PENYEMPROTAN LANGSUNG

Prinsip kerja motor sistem penyemprotan langsung pada dasarnya sama dengan motor bensin 2 langkah konvensional. Perbedaannya ialah yang masuk melalui saluran isap hanya berupa udara dan minyak pelumas saja sedangkan bahan bakar disemprotkan langsung ke dalam silinder.

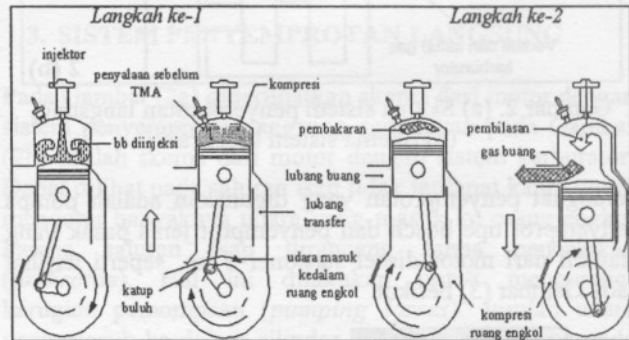
Gambar (8) memperlihatkan prinsip kerja motor bensin 2 langkah sistem penyemprotan langsung dengan konstruksi pembilasan ruang engkol. Prinsip kerjanya ialah sebagai berikut :

#### 1. Langkah kompresi

Torak bergerak dari Titik Mati Bawah (TMB) menuju Titik Mati Atas (TMA). Mula-mula, lubang isap tertutup seluruhnya lalu diikuti lubang buang. Setelah lubang buang tertutup, udara dari luar masuk ke ruang engkol melalui katup buluh. Pada  $63^\circ$  sesudah TMB, kam mulai menekan pompa penyemprot. Bahan bakar bertekanan tinggi mengalir dari pompa penyemprot ke penyemprot melalui pipa tekanan tinggi dan penyemprot mulai menyemprotkan bahan bakar ke dalam silinder. Kam berhenti menekan pompa penyemprot pada  $40^\circ$  sebelum TMA dan penyemprot berhenti menyemprotkan bahan bakar ke dalam silinder ( $20^\circ$  sebelum saat penyalaan busi). Bahan bakar yang disemprotkan tersebut mengenai kepala torak yang sedang bergerak menuju TMA sehingga bahan bakar berpecah dan terbentuklah kabut bahan bakar dan bercampur dengan udara di dalam silinder. Campuran udara bahan bakar tersebut dikompresi oleh torak. Busi dinyalakan  $20^\circ$  sebelum TMA.

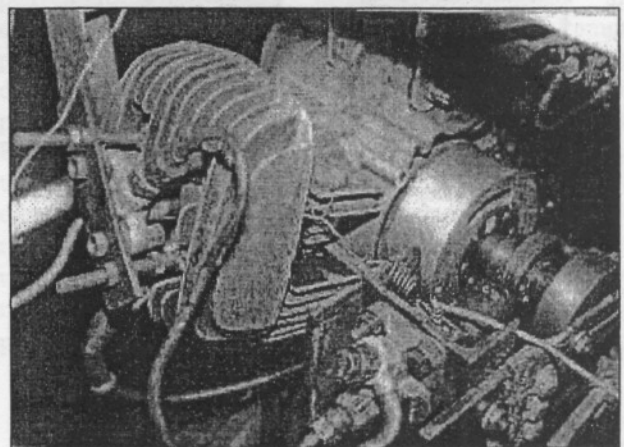
#### 2. Langkah ekspansi atau kerja

Torak bergerak menuju TMB melakukan langkah ekspansi. Pada  $63^\circ$  sebelum TMB, lubang buang terbuka dan gas buang hasil pembakaran ke luar melalui lubang buang. Pergerakan torak menuju TMB mengakibatkan udara dalam ruang engkol terkompresi naik ke dalam silinder melalui lubang transfer dan mendorong sisa gas buang di dalam silinder.



Gambar 8. Prinsip kerja motor bensin 2 langkah sistem penyemprotan langsung.

Pada Gambar (9) diperlihatkan motor dengan sistem bahan bakar penyemprotan langsung.

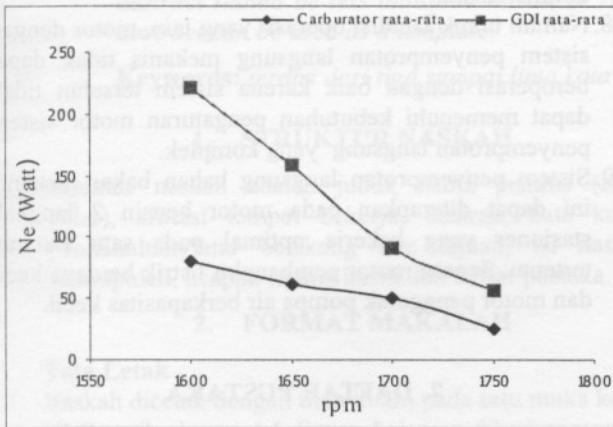


Gambar 9. Motor dengan sistem bahan bakar penyemprotan langsung.

## 5. HASIL PENGUJIAN PRESTASI MOTOR SISTEM PENYEMPROTAN LANGSUNG

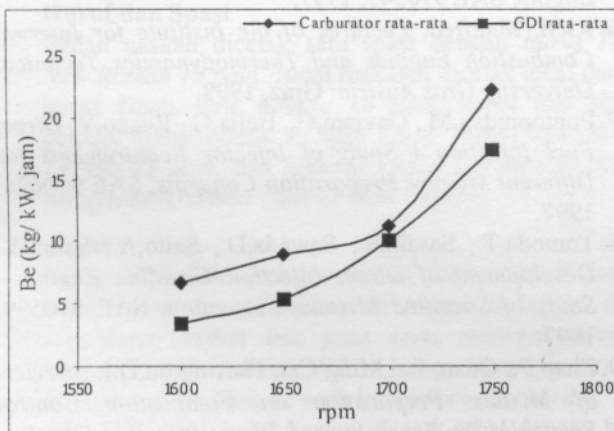
Perbandingan prestasi motor antara motor dengan sistem penyemprotan langsung dan motor dengan sistem karburator dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pada Gambar (10) dapat dilihat bahwa daya yang dihasilkan oleh motor sistem penyemprotan langsung mengalami kenaikan rata-rata 143% dibandingkan dengan daya yang dihasilkan oleh motor dengan sistem bahan bakar karburator. Hal ini disebabkan karena meningkatnya campuran udara bahan bakar yang terbakar. Pompa penyemprot dapat mensuplai bahan bakar yang lebih besar dan udara yang masuk pun meningkat karena saluran isap menggunakan sistem tanpa pencekikan.



Gambar 10. Daya vs putaran motor.

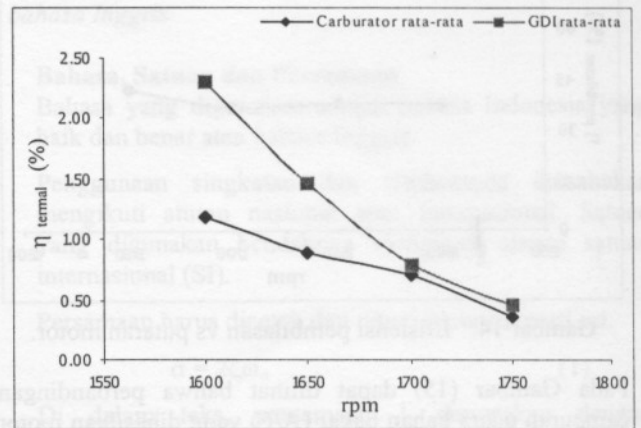
Walaupun suplai bahan bakar mengalami peningkatan, pemakaian bahan bakar spesifik ( $Be$ ) motor sistem penyemprotan langsung mengalami penurunan rata-rata 35% dibandingkan dengan  $Be$  yang dihasilkan motor dengan sistem karburator seperti terlihat pada Gambar (11). Hal ini disebabkan karena daya yang dihasilkan motor dengan sistem penyemprotan langsung lebih besar dari daya yang dihasilkan motor dengan sistem karburator. Dapat dikatakan bahwa dengan pemakaian bahan bakar yang sama, motor sistem penyemprotan langsung menghasilkan daya yang lebih besar dari motor dengan sistem karburator.



Gambar 11. Pemakaian bahan bakar spesifik vs putaran motor.

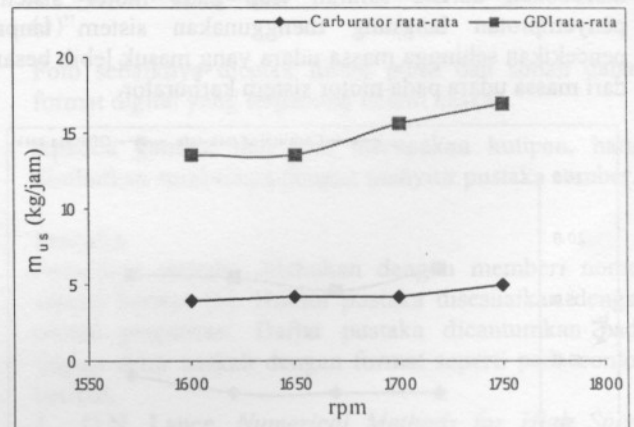
Pada Gambar (12), dapat dilihat bahwa efisiensi termal yang dihasilkan motor dengan sistem penyemprotan langsung mengalami peningkatan rata-rata 59% bila dibandingkan dengan efisiensi termal yang dihasilkan motor dengan sistem bahan bakar karburator. Hal ini disebabkan, pertama, karena motor sistem penyemprotan langsung menggunakan saluran isap tanpa pencekikan sehingga kerugian pemompaannya lebih rendah dari kerugian pemompaan pada motor dengan sistem karburator, kedua, karena proses pembakaran berlangsung pada kondisi campuran lebih miskin (lihat perbandingan udara dan bahan bakar), hal ini secara termodinamik meningkatkan efisiensi termal motor.

Penurunan  $Be$  dan kenaikan efisiensi termal motor tidak memberikan harga perbandingan yang sama karena perhitungan parameter prestasi motor menggunakan data pengujian rata-rata.



Gambar 12. Efisiensi termal vs putaran motor.

Karena saluran isap pada motor sistem penyemprotan langsung menggunakan sistem tanpa pencekikan, maka laju massa udara yang masuk mengalami peningkatan rata-rata 244% bila dibandingkan dengan massa udara pada motor dengan sistem karburator. Hal ini dapat dilihat pada Gambar (13).



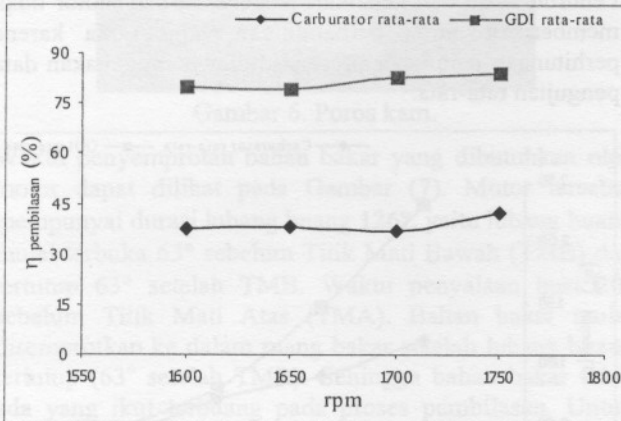
Gambar 13. Laju masa udara vs putaran motor.

Efisiensi pembilasan ( $\eta_p$ ) pada motor sistem penyemprotan langsung juga mengalami peningkatan yang cukup besar yaitu rata-rata 110% bila dibandingkan dengan efisiensi pembilasan motor dengan sistem bahan bakar karburator, seperti terlihat pada Gambar (14). Hal

ini disebabkan karena massa udara yang masuk lebih besar sehingga proses pembilasannya menjadi lebih baik. Efisiensi pembilasan merupakan parameter yang menunjukkan ukuran kemampuan udara atau campuran udara bahan bakar segar untuk menggantikan gas pembakaran di dalam silinder pada saat pembilasan selesai. Harga efisiensi pembilasan dapat ditentukan menggunakan persamaan<sup>[3]</sup>

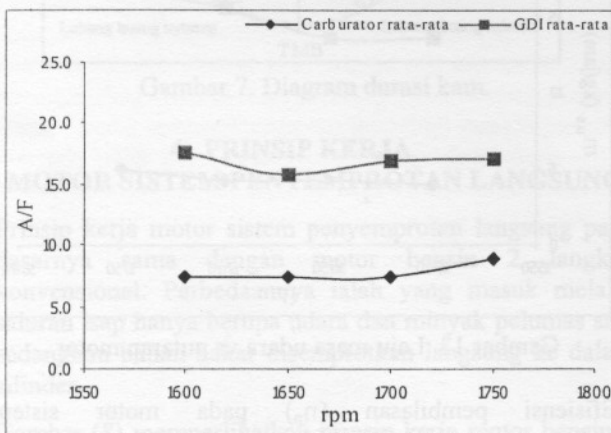
$$\eta_p = 1 - e^{-R_p} \quad (1)$$

$R_p$  (perbandingan pembilasan) merupakan ukuran jumlah kelebihan udara yang diperlukan untuk melaksanakan pembilasan.



Gambar 14. Efisiensi pembilasan vs putaran motor.

Pada Gambar (15) dapat dilihat bahwa perbandingan campuran udara bahan bakar (A/F) yang dihasilkan motor sistem penyemprotan langsung berada di atas angka 14,6 yang menunjukkan campuran stoikiometrik. Dengan demikian, campuran tersebut bersifat miskin. Perbandingan campuran udara bahan bakar yang dihasilkan motor sistem penyemprotan langsung mengalami peningkatan rata-rata 116% bila dibandingkan dengan perbandingan campuran udara bahan bakar yang dihasilkan motor dengan sistem karburator. Hal ini disebabkan karena saluran isap pada motor sistem penyemprotan langsung menggunakan sistem tanpa pecekikan sehingga massa udara yang masuk lebih besar dari massa udara pada motor sistem karburator.



Gambar 15. Perbandingan udara dan bahan bakar vs putaran motor.

## 6. KESIMPULAN

Dari kaji ekperimental ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Motor dengan sistem penyemprotan langsung mekanis dapat beroperasi dengan baik untuk daerah operasi putaran 1600–1750 rpm dengan prestasi yang lebih baik bila dibandingkan dengan prestasi motor dengan sistem karburator.
2. Daya motor mengalami kenaikan rata-rata 143%.
3. Pemakaian bahan spesifik turun rata-rata 35%.
4. Efisiensi termal meningkat rata-rata 59%.
5. Pemasukan udara naik rata-rata 244%.
6. Efisiensi pembilasan meningkat 110%.
7. Perbandingan udara dan bahan bakar juga naik rata-rata 116%, ini berarti pembakaran berlangsung pada kondisi miskin.
8. Namun untuk kondisi operasi yang lain, motor dengan sistem penyemprotan langsung mekanis tidak dapat beroperasi dengan baik karena sistem tersebut tidak dapat memenuhi kebutuhan pengaturan motor sistem penyemprotan langsung yang kompleks.
9. Sistem penyemprotan langsung bahan bakar mekanis ini dapat diterapkan pada motor bensin 2 langkah stasioner yang bekerja optimal pada satu putaran tertentu. Seperti motor pembangkit listrik berdaya kecil dan motor penggerak pompa air berkapasitas kecil.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

1. Hatakeyama, S., Sekiya, Y., Murayama, T., Nakai, S., Sako, T., Tsunemoto, H., "A Study on In-Cylinder Injection of Low Pressure Natural Gas for Performance Improvement of Small Sized Two-Stroke SI Engines", SAE 2001-01-1959, 2001.
2. Shawcross, A., Wiryoatmojo, S., *Indonesia's Motorcycle, Spearheads Production of Clean, Efficient and Low Cost*, Orbital Paper 971210, 1997.
3. Arismunandar, Wiranto, *Penggerak Mula Motor Bakar Torak*, edisi kelima, Bandung: Penerbit ITB, 2002.
4. Heywood, John. B., *Internal Combustion Engines Fundamentals*. Singapore: McGraw-Hill Co, 1988.
5. Iwamoto, Y., Noma, K., Nakayama, O., Yamauchi, T., Ando, H., *Development of Gasoline Direct Injection Engine*, SAE 970541, 1997.
6. Klell, Manfred, *Lectures of the Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics Technical University Graz Austria*: Graz, 1998.
7. Pontoppidan, M., Gaviani, G., Bella, G., Rocco, V., *Direct Fuel Injection-A Study of Injector Requirements for Different Mixture Preparation Concepts*, SAE 970627, 1997.
8. Tomoda, T., Sasaki, S., Sawada, D., Saito, A., Sami, H., *Development of Direct Injection Gasoline Engine Study of Stratified Mixture Formation*, SAE 970531, 1997.
9. Zhao, Fu Quan, Lai, Ming Cia, Harrington, D.L., *Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark Ignited Direct Injection Gasoline Engines*, SAE 970627, 1997.