



OPTIMASI PRESTASI MESIN BENSIN 1500 CC DENGAN BAHAN BAKAR LPG MELALUI PENYETELAN CONVERTER KITS DAN PENYESUAIAN SAAT PENGAPIAN

Muji Setiyo¹⁾, Prawoto²⁾

Program Studi Mesin Otomotif Universitas Muhammadiyah Magelang¹⁾

Jl. Mayjend Bambang Soegeng Km.05 Mertoyudan Magelang, Phone/ Fax: 0293-326945

Program Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila²⁾

Jl. Borobudur No.07 Menteng Jakarta Pusat, Phone :021-31926047

E-mail : setiyo.muji@gmail.com¹⁾, drprawoto@gmail.com²⁾

ABSTRAK

Permasalahan pada pemasangan converter kits LPG adalah belum adanya informasi tentang stelan converter/vaporizer agar diperoleh prestasi mesin yang optimum. Penelitian ini bertujuan untuk mencari optimasi prestasi mesin LPG melalui penyetelan baut penyetel pegas lever dan katup aliran gas pada converter kits serta penyesuaian saat pengapian. Objek pada penelitian ini adalah mesin Toyota 5A-FE dengan converter kits Tesla A-100. Luaran yang diharapkan adalah suatu rekomendasi penyetelan mesin LPG pada kondisi torsi optimum dan emisi (CO dan HC) optimum. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen matrik taguchi. Baut stelan pegas lever divariasikan pada 5,5; 5,75; dan 6 putaran. Katup aliran gas divariasikan pada bukaan 40%; 50%; dan 60%. Saat pengapian divariasikan pada 10; 12,5; dan 15^oBTDC. Dari tiga variabel dan tiga level tersebut kemudian dicari kombinasi untuk menghasilkan emisi (CO, HC) dan torsi yang optimum. Torsi optimum (131,2 N.m) diperoleh pada stelan pegas lever 5,75 putaran, bukaan katup aliran 40%, dan saat pengapian 15^oBTDC. Emisi CO terendah (0,13%) diperoleh pada stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran 40%, dan saat pengapian 10^oBTDC. Emisi HC terendah (124 ppm) diperoleh pada stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran 40%, dan saat pengapian 15^oBTDC. Dengan optimasi ini, penggunaan bahan bakar LPG mampu menaikkan torsi mesin 10%, mereduksi CO 80,6% dan HC 37,2% dari mesin bensin.

Kata kunci : pegas lever, katup aliran, saat pengapian.

1. Pendahuluan

Perkembangan konversi BBM ke BBG (CNG) di Indonesia hingga saat ini belum terlihat secara nyata. Infrastruktur utama seperti stasiun pengisian bahan bakar gas yang belum mendukung merupakan kendala dalam pengembangan ini. Mobil berbahan bakar gas dapat berkembang jika tersedia stasiun pengisian BBG yang tersebar di seluruh wilayah. Untuk itu, LPG menjadi alternatif pengganti BBM.

Kandungan energi LPG sebesar 46.23 MJ/kg dan 26 MJ/l, sedangkan kandungan energi bensin sebesar 44.4 MJ/kg dan 34,8 MJ/l. Dibandingkan dengan bensin, LPG memiliki kandungan energi per satuan massa relatif tinggi, tetapi kandungan energi per satuan volumenya rendah. Volume LPG lebih besar dari bensin sekitar 15% sampai dengan 20%. [1]

LPG memiliki nilai oktan 112. Nilai oktan 112 memungkinkan untuk diterapkan pada mesin dengan perbandingan kompresi yang lebih tinggi sehingga memberikan efisiensi thermal yang lebih tinggi. Biaya operasional mesin LPG lebih rendah dan memiliki karakteristik ramah lingkungan [2]. LPG menjadi alternatif energi yang populer sebagai pengganti bensin.

LPG memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan bensin. Konsumsi bahan bakar LPG per satuan volume lebih rendah daripada bensin. Distribusi gas pada tiap tiap silinder lebih merata sehingga percepatan mesin lebih baik dan putaran stasioner lebih halus. Ruang bakar lebih bersih sehingga umur mesin meningkat. Kandungan karbon LPG lebih rendah daripada bensin atau diesel sehingga menghasilkan CO₂ yang lebih rendah.

Dari beberapa keunggulan diatas, LPG memiliki beberapa kelemahan. Mesin berbahan bakar LPG menghasilkan daya yang lebih rendah dari mesin bensin. Penurunan daya yang terjadi sekitar 5% -10% [3]. Sistem pengapian harus lebih besar sehingga penyalaan mesin menjadi lebih berat. Perlu penyesuaian saat pengapian dan kualitas sistem pengapian. Sistem bahan bakar harus dibuat lebih kuat daripada sistem bensin [4].

Penelitian mengenai LPG sebagai bahan bakar kendaraan sudah banyak ditemukan. Penggunaan LPG kaitannya dengan performa mesin dilakukan oleh Rohmat [5] dan M.A. Ceviz [6]. Penelitian yang berkaitan dengan emisi gas buang dilakukan oleh Mockus [7], Mandloi [8], Tasik [9], dan Shankar [10]. Sementara penelitian yang berkaitan dengan penyesuaian komponen mesin mesin dilakukan oleh Dziubiński [11] dan Lejda [123].

Objek yang digunakan dalam penelitian ini adalah Toyota Soluna 5A-FE berkapasitas mesin 1500 cc. Sebuah converter kits konvensional merk Tesla dipasang pada mesin tersebut dengan system bi-fuel. System bi-fuel memungkinkan kendaraan dapat dioperasikan dengan bensin atau dengan LPG secara bergantian.

Pada saat observasi lapangan dengan pengamatan secara kualitatif, ada tiga variabel yang berpengaruh signifikan terhadap performa mesin dan emisi gas buang. Ketiga variabel tersebut adalah kekencangan pegas lever, bukaan katup aliran gas, dan saat pengapian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari tiap tiap variabel terhadap torsi dan emisi kemudian melakukan optimasi untuk mendapat kondisi operasi mesin yang paling optimum.

Converter Kits

Converter kits adalah seperangkat alat yang terdiri dari tabung, pipa, vaporizer, fuel metering, fuel change, solenoid valve, dan mixer. Vaporizer dan mixer adalah peralatan utama pada mesin dengan bahan bakar LPG. Vaporizer terdiri dari dua bagian utama. Bagian pertama dinamakan regulator tekanan, berfungsi untuk menurunkan tekanan LPG dari tabung menjadi tekanan output. Penurunan tekanan pada regulator mengakibatkan perubahan fasa LPG dari cair ke gas. Untuk membantu proses penguapan, air pendingin mesin dialirkan disekeliling regulator. Bagian kedua, dinamakan dengan regulator aliran. Regulator aliran berupa katup yang dikendalikan oleh kevakuman throttle body. Katup regulator digerakkan oleh lever. Lever berupa pengungkit dengan titik tumpu ditengah. Satu ujung dikaitkan dengan diafragma dan ujung yang lain ditahan oleh pegas lever.

Jumlah gas yang mengalir dari regulator tekanan ke ruang diafragma dipengaruhi oleh kekuatan pegas lever dan kevakuman ruang diafragma. Pegas lever dapat diatur dengan memutar baut penyatel yang terdapat pada bagian luar converter kits. kevakuman ruang diafragma tergantung dari kecepatan aliran udara pada throttle body.

Vaporizer juga dilengkapi dengan katup solenoid dan katup aliran gas pada saluran output. Solenoid berfungsi untuk membuka dan menutup saluran gas didalam vaporizer. Solenoid dikendalikan oleh tegangan listrik dari sistem kelistrikan kendaraan. Katup aliran gas berfungsi untuk mengatur kapasitas aliran pada sisi output vaporizer. Katup aliran gas dapat diatur untuk mengurangi atau menambah luasan saluran output. Bentuk fisik vaporizer LPG yang dipakai dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Vaporizer LPG

Untuk memasukkan LPG ke saluran manifold, digunakan sebuah mixer yang dipasang pada sisi depan throttle body. Mixer memiliki beberapa lubang memanjang yang mengelilingi lingkaran dalam. LPG dalam fasa gas mengalir dari vaporizer ke mixer melalui katup aliran gas (katup akselerasi).

2. Metodologi

2.1. Lingkup penelitian

Tabel 1. berikut menyajikan batasan dan lingkup penelitian.

Tabel 1. Lingkup Penelitian

| Kode | Variabel bebas / faktor | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
|------|--|---------|---------|---------|
| A | Stelan pegas lever, (<i>putaran</i>) | 5,5 | 5,75 | 6 |
| B | Bukaan katup aliran gas, (%) | 40 | 50 | 60 |
| C | Saat pengapian, ($^{\circ}$ BTDC) | 10 | 12,5 | 15 |

Metode penelitian yang dipilih adalah metode eksperimen. Kombinasi tiga variabel bebas/ faktor dan tiga level penelitian seperti pada tabel 1, dibutuhkan pengambilan data (trial) yang banyak. Jika menggunakan metode full faktorial, dibutuhkan 27 kali percobaan. Untuk mereduksi jumlah trial, kemudian dipilih metode taguchi [13].

2.2. Menentukan Jumlah Derajat Kebebasan dan matrik orthogonal.

Pemilihan matrik orthogonal didasarkan pada jumlah total derajat kebebasan (*degree of freedom*). Perhitungan derajat bebas untuk percobaan tiga factor-tiga level adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Perhitungan total derajat kebebasan

| Faktor | Level | Derajat bebas | Jumlah |
|----------------------------|-------|---------------|--------|
| A | 3 | (3-1) | 2 |
| B | 3 | (3-1) | 2 |
| C | 3 | (3-1) | 2 |
| Total derajat bebas (DOF) | | | 6 |

Total derajat bebas menunjukkan jumlah baris minimal dalam percobaan. Matrik yang memiliki lebih dari enam baris dengan masing masing faktor memiliki tiga level adalah matrik " $L-9(3^4)$ array". Konfigurasi faktor-level yang berdasar pada tabel 2, dengan menyertakan parameter yang diukur adalah sebagai berikut.

Tabel 3. Konfigurasi faktor-level dan parameter ukur

| Trial num | A (<i>put</i>) | B (%) | C ($^{\circ}$ BTDC) | T (<i>N.m</i>) | CO (%) | HC (<i>ppm</i>) |
|-----------|---------------------|----------|-------------------------|---------------------|-----------|----------------------|
| 1 | 5,5 | 40 | 10 | | | |
| 2 | 5,5 | 50 | 12,5 | | | |
| 3 | 5,5 | 60 | 15 | | | |
| 4 | 5,75 | 40 | 15 | | | |
| 5 | 5,75 | 50 | 10 | | | |
| 6 | 5,75 | 60 | 12,5 | | | |
| 7 | 6 | 40 | 12,5 | | | |
| 8 | 6 | 50 | 15 | | | |
| 9 | 6 | 60 | 10 | | | |

2.3. Media dan Alat Penelitian

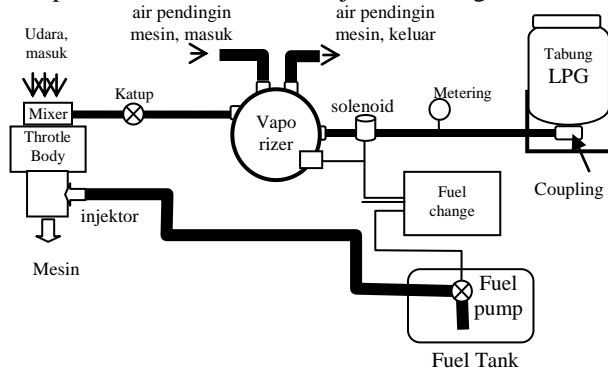
Media dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini tersaji dalam tabel 4 berikut :

Tabel 4. Media dan alat penelitian

| Nama bahan | Merk | Spesifikasi |
|---------------------|----------|-------------|
| Mobil | Toyota | Seri 5A-FE |
| Converter kits | Tesla | A-100 |
| Chasis dinamometer | HOFFMAN | 260 kW |
| Engine gas analyzer | Q-Rotech | QRO-401 |
| Hidraulic house | Eastman | 225 bar |

2.4. Instalasi LPG

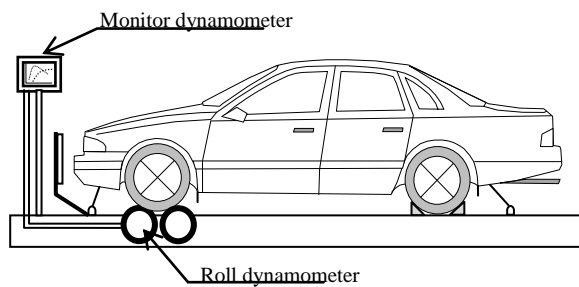
Tabung LPG diletakkan pada bagasi bagian belakang mobil. Vaporizer diletakkan di ruang mesin. LPG dari tabung dialirkan ke vaporizer melalui hydraulic house dengan sebuah pressure gauge dipasang di dashboard sebagai indikator tekanan LPG. LPG fasa gas dimasukkan ke mesin melalui sebuah mixer yang dipasang pada throttle body. Skema aliran gas dari tabung sampai ke intake manifold disajikan dalam gambar 2.



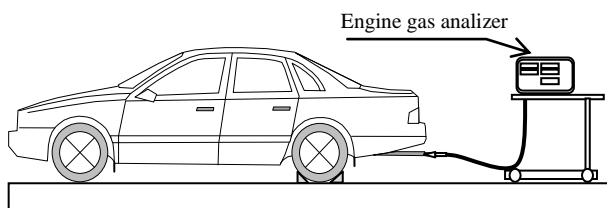
Gambar 2. Skema aliran LPG dan bensin

2.5. Skema Pengujian

Pengujian torsi mesin dilakukan dengan chassis dynamometer yang diukur pada roda roda penggerak. Emisi gas buang diukur dengan engine gas analyzer. Tata cara uji emisi sesuai dengan lampiran Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup nomor 05 tahun 2006 tentang cara uji kendaraan bermotor kategori M, N, dan O berpengerak penyalaan cetus api pada kondisi idle (SNI 19-7118.1-2005). uji emisi Skema pengujian torsi dan emisi gas buang disajikan pada gambar 3 dan gambar 4 secara berurutan.



Gambar 3. Skema pengujian torsi



Gambar 4. Skema pengujian emisi gas buang

2.6. Pengolahan Data dan optimasi

Dari data hasil pengujian, dilakukan perhitungan respons rata-rata dari tiap level-faktor. Selanjutnya, dilakukan identifikasi level-faktor yang dominan.

Optimasi dilakukan dengan cara mengkombinasikan level-faktor yang dominan. Tahap berikutnya adalah melakukan uji konfirmasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Data pengujian

Data hasil pengujian torsi mesin, dan emisi ditunjukkan dalam tabel 5 dan tabel 6 secara berurutan.

Tabel 5. Data pengujian torsi mesin

| Trial | Faktor A | Faktor B | Faktor C | Hasil pengujian | |
|-------|----------|----------|----------|-----------------|-----------|
| | | | | Torsi (N.m) | Put (Rpm) |
| 1 | 5,5 | 40 | 10 | 219 | 2543 |
| 2 | 5,5 | 50 | 12,5 | 221 | 2724 |
| 3 | 5,5 | 60 | 15 | 216 | 4199 |
| 4 | 5,75 | 40 | 15 | 231 | 2573 |
| 5 | 5,75 | 50 | 10 | 215 | 4287 |
| 6 | 5,75 | 60 | 12,5 | 212 | 4192 |
| 7 | 6 | 40 | 12,5 | 221 | 2740 |
| 8 | 6 | 50 | 15 | 222 | 4284 |
| 9 | 6 | 60 | 10 | 207 | 4149 |

Tabel 6. Data pengujian emisi

| Trial | Faktor A | Faktor B | Faktor C | Hasil uji emisi | |
|-------|----------|----------|----------|-----------------|-----------|
| | | | | Rerata CO | Rerata HC |
| 1 | 5,5 | 40 | 10 | 0,132 | 161,4 |
| 2 | 5,5 | 50 | 12,5 | 2,296 | 120,4 |
| 3 | 5,5 | 60 | 15 | 2,872 | 192,0 |
| 4 | 5,75 | 40 | 15 | 2,314 | 155,2 |
| 5 | 5,75 | 50 | 10 | 3,284 | 182,8 |
| 6 | 5,75 | 60 | 12,5 | 5,52 | 294,6 |
| 7 | 6 | 40 | 12,5 | 3,488 | 260,0 |
| 8 | 6 | 50 | 15 | 4,956 | 309,2 |
| 9 | 6 | 60 | 10 | 6,478 | 459,0 |

Keterangan tabel 5 dan tabel 6:

Faktor A : Stelan baut pegasi lever [putaran]

Faktor B : Buka katup aliran gas [%]

Faktor C : Saat pengapian [°BTDC]

3.2. Perhitungan respons rerata

Tabel 7. Respon / pengaruh rerata faktor level

| No | Notasi | T | CO | HC |
|----|------------|--------|------|--------|
| | | (N.m) | (%) | (ppm) |
| 1 | \bar{Y} | 218,22 | 3,48 | 237,18 |
| 2 | $\bar{A1}$ | 218,67 | 1,77 | 157,93 |
| 3 | $\bar{A2}$ | 219,33 | 3,71 | 210,87 |
| 4 | $\bar{A3}$ | 216,67 | 4,97 | 342,73 |
| 5 | $\bar{B1}$ | 223,67 | 1,98 | 192,2 |
| 6 | $\bar{B2}$ | 219,33 | 3,51 | 204,13 |
| 7 | $\bar{B3}$ | 211,67 | 4,96 | 315,2 |
| 8 | $\bar{C1}$ | 213,67 | 3,3 | 267,73 |
| 9 | $\bar{C2}$ | 218 | 3,77 | 225 |
| 10 | $\bar{C3}$ | 223 | 3,38 | 218,8 |



Keterangan :

- \bar{Y} : Rerata hasil pengujian (Y)
- $\bar{A1}$: Pengaruh rerata stelan pegas lever 5,5 putaran
- $\bar{A2}$: Pengaruh rerata stelan pegas lever 5,75 putaran
- $\bar{A3}$: Pengaruh rerata stelan pegas lever 6 putaran
- $\bar{B1}$: Pengaruh rerata bukaan katup aliran 40 %
- $\bar{B2}$: Pengaruh rerata bukaan katup aliran 50 %
- $\bar{B3}$: Pengaruh rerata bukaan katup aliran 60 %
- $\bar{C1}$: Pengaruh rerata saat pengapian 10 °BTDC
- $\bar{C2}$: Pengaruh rerata saat pengapian 12,5 °BTDC
- $\bar{C3}$: Pengaruh rerata saat pengapian 15 °BTDC

3.3. Analisis variansi (ANOVA)

Analisis variansi digunakan untuk mengetahui tingkat signifikansi tiap tiap faktor terhadap hasil pengujian. Penghitungan ANOVA menggunakan perangkat bantu statistik minitab. Konsep penghitungan ANOVA adalah membandingkan nilai Fhitung terhadap Ftabel. Jika Fhitung lebih besar dari Ftabel, dinyatakan ada hubungan yang signifikan antara perlakuan faktor terhadap hasil pengujian. Sebaliknya jika Fhitung lebih kecil dari Ftabel, menunjukkan adanya hubungan yang tidak signifikan.

Tabel 8 ANOVA Pengujian Torsi

| General Linear Model | | | | | |
|-------------------------|--------|-----|--------|----|--|
| Faktor | Levels | | Values | | |
| STELAN PEGAS LEVER (A) | 3 | 5.5 | 5.75 | 6 | |
| BUKAAN KATUP ALIRAN (B) | 3 | 40 | 50 | 60 | |
| SAAT PENGAPIAN (C) | 3 | 10 | 12.5 | 15 | |

| Analysis of Variance for TORSI | | | | | |
|--------------------------------|----|--------|--------|--------|-------|
| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F |
| (A) | 2 | 11.56 | 11.56 | 5.78 | 1.21 |
| (B) | 2 | 221.56 | 221.56 | 110.78 | 23.19 |
| (C) | 2 | 130.89 | 130.89 | 65.44 | 13.70 |
| Error | 2 | 9.6 | 9.56 | 4.78 | |
| Total | 8 | 373.56 | | | |

Dari hasil penghitungan Anova diatas , diperoleh bahwa bukaan katup aliran gas (Faktor B) dan saat pengapian (Faktor C) menunjukkan nilai Fhitung >> Ftabel, sedangkan untuk stelan pegas lever (Faktor A) menunjukkan nilai Fhitung < Ftabel. Nilai Ftabel untuk tingkat kepercayaan 95 % F(0,05,2,8) adalah 4,46. Ini mengindikasikan bahwa faktor B dan Faktor C berpengaruh signifikan, sedangkan faktor A tidak berpengaruh signifikan terhadap output torsi.

Tabel 9. ANOVA pada pengujian CO

| General Linear Model | | | | | |
|-------------------------|--------|-----|--------|----|--|
| Faktor | Levels | | Values | | |
| STELAN PEGAS LEVER (A) | 3 | 5.5 | 5.75 | 6 | |
| BUKAAN KATUP ALIRAN (B) | 3 | 40 | 50 | 60 | |
| SAAT PENGAPIAN (C) | 3 | 10 | 12.5 | 15 | |

| Analysis of Variance for EMISI (CO) | | | | | |
|-------------------------------------|----|--------|--------|--------|-------|
| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F |
| (A) | 2 | 15.66 | 15.66 | 7.83 | 43.42 |
| (B) | 2 | 13.31 | 13.31 | 6.66 | 36.92 |
| (C) | 2 | 0.38 | 0.38 | 0.19 | 1.05 |
| Error | 2 | 0.36 | 0.36 | 0.18 | |
| Total | 8 | 29.71 | | | |

Dari hasil penghitungan Anova diatas , diperoleh bahwa stelan pegas lever (Faktor A) dan bukaan katup aliran (Faktor B) menunjukkan nilai Fhitung >> Ftabel, sedangkan untuk saat pengapian (Faktor C) menunjukkan nilai Fhitung < Ftabel. Nilai Ftabel untuk tingkat kepercayaan 95 % F(0,05,2,8) adalah 4,46. Ini mengindikasikan bahwa stelan pegas lever dan bukaan katup aliran gas berpengaruh signifikan, sedangkan saat pengapian tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi HC pada mesin LPG.

Tabel 10. ANOVA pada pengujian HC

| General Linear Model | | | | | |
|------------------------|--------|-----|--------|----|--|
| Faktor | Levels | | Values | | |
| STELAN PEGAS LEVER (A) | 3 | 5.5 | 5.75 | 6 | |
| BUKAAN KATUP GAS (B) | 3 | 40 | 50 | 60 | |
| SAAT PENGAPIAN (C) | 3 | 10 | 12.5 | 15 | |

| Analysis of Variance for HASIL CO | | | | | |
|-----------------------------------|----|--------|--------|--------|-------|
| Source | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F |
| (A) | 2 | 54575 | 54575 | 27287 | 17.91 |
| (B) | 2 | 27752 | 27752 | 13876 | 9.11 |
| (C) | 2 | 4181 | 4181 | 2091 | 1.37 |
| Error | 2 | 3047 | 3047 | 1524 | |
| Total | 8 | 89308 | | | |

Dari hasil penghitungan Anova diatas, diperoleh bahwa faktor stelan pegas lever (Faktor A) dan bukaan katup aliran (Faktor B) menunjukkan nilai Fhitung >> Ftabel, sedangkan untuk faktor saat pengapian (Faktor C) menunjukkan nilai Fhitung < Ftabel. Nilai Ftabel untuk tingkat kepercayaan 95 % F(0,05,2,8) adalah 4,46. Ini mengindikasikan bahwa stelan pegas lever dan bukaan katup aliran gas berpengaruh signifikan, sedangkan saat pengapian tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi HC pada mesin LPG.

3.4. Menentukan Persen kontribusi

Perhitungan persen kontribusi (*percent influence*) digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari faktor A (stelan pegas lever), faktor B (bukaan katup aliran), dan faktor C (saat pengapian) terhadap hasil pengujian secara keseluruhan. Jika jumlah total dari ketiga faktor bernilai 100 %, maka dinyatakan bahwa hasil pengujian seluruhnya dipengaruhi oleh faktor faktor tersebut. Jika total dari ketiga faktor kurang dari 100 %, maka ada faktor lain yang ikut berkontribusi terhadap hasil pengujian. Faktor lain ini dinamakan *error*.

Tabel 11. *Percent influence* pengujian torsi

| Variabel Source | DF | SS | SS' | % Kontribusi |
|--------------------|----|--------|--------|--------------|
| Stelan pegas lever | 2 | 11,56 | 2,0 | 0,54 |
| Bukaan katup gas | 2 | 221,56 | 212,0 | 56,75 |
| Saat pengapian | 2 | 130,89 | 121,33 | 32,48 |

Dari tabel 11 dapat diketahui bahwa faktor A (stelan pegas lever) berpengaruh sangat kecil terhadap torsi, yaitu sebesar 0,54% (tidak berpengaruh signifikan). Faktor B (bukaan katup aliran) berpengaruh 56,75 % dan faktor C (saat pengapian) berpengaruh 32,48 % terhadap torsi yang dihasilkan.



Tabel 12. *Percent influence* pengujian CO

| Variabel Source | DF | SS | SS' | % Kontribusi |
|--------------------|----|--------|--------|--------------|
| Stelan pegas lever | 2 | 15,656 | 15,295 | 51,49 |
| Bukaan katup gas | 2 | 13,313 | 12,952 | 43,6 |
| Saat pengapian | 2 | 0,3778 | 0,0172 | 0,06 |

Dari tabel 12 dapat diketahui bahwa faktor A (stelan pegas lever) berpengaruh 51,49 % dan faktor B (bukaan katup aliran) berpengaruh 43,60 % terhadap produk emisi CO, sedangkan faktor C (saat pengapian) hanya berpengaruh 0,06 % (tidak berpengaruh signifikan).

Tabel 13. *Percent influence* pengujian HC

| Variabel source | DF | SS | SS' | % Kontribusi |
|--------------------|----|-------|-------|--------------|
| Stelan pegas lever | 2 | 54342 | 51242 | 57,38 |
| Bukaan katup gas | 2 | 27607 | 24507 | 27,44 |
| Saat pengapian | 2 | 4259 | 1159 | 1,3 |

Dari tabel 13 dapat diketahui bahwa faktor A (stelan pegas lever) berpengaruh 57,38 % dan faktor B (bukaan katup aliran) berpengaruh 27,44 % terhadap produk emisi HC, sedangkan faktor C (saat pengapian) berpengaruh 1,3 % (tidak signifikan).

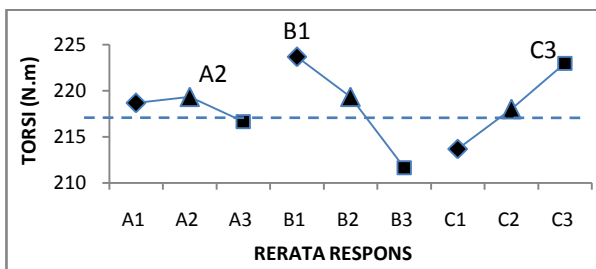
3.5. Identifikasi level faktor optimum

Identifikasi level faktor optimum diperlukan untuk mengetahui level faktor yang memberikan pengaruh terbesar terhadap hasil pengujian. Kombinasi dari level faktor dominan ini diharapkan memberikan parameter yang optimum.

Tabel 14. Identifikasi level faktor optimum pada pengujian torsi

| Faktor Level | Stelan pegas lever (<i>put</i>) (A) | Bukaan katup aliran gas (%) (B) | Saat pengapian ($^{\circ}$ BTDC) (C) |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 218,67 | 223,67 | 213,67 |
| 2 | 219,33 | 219,33 | 218,00 |
| 3 | 216,67 | 211,67 | 223,00 |
| Selisih | 0,67 | 12,00 | 9,33 |
| Rangking | 3 | 1 | 2 |

Dari tabel 14, dapat diketahui bahwa kombinasi level faktor untuk mendapatkan torsi tertinggi diperoleh pada B1; C3; dan A2; yaitu pada bukaan katup aliran gas 40 %, saat pengapian 15 $^{\circ}$ BTDC, dan pada stelan pegas lever 5,75 putaran. Gambar 4.1 menunjukkan respons rerata tiap faktor terhadap torsi.

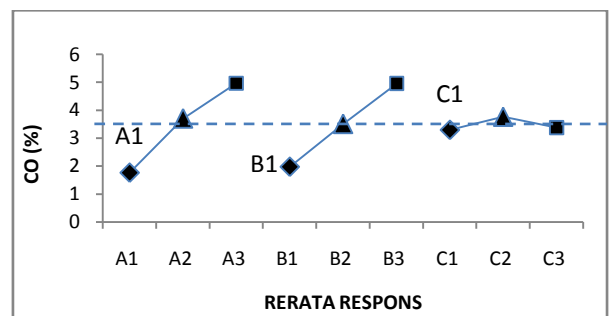


Gambar 5. Rerata respon terhadap torsi

Tabel 15. Identifikasi level faktor optimum pada pengujian CO

| Faktor Level | Stelan pegas lever (<i>put</i>) (A) | Bukaan katup aliran gas (%) (B) | Saat pengapian ($^{\circ}$ BTDC) (C) |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 1,77 | 1,98 | 3,30 |
| 2 | 3,71 | 3,51 | 3,77 |
| 3 | 4,97 | 4,96 | 3,38 |
| Selisih | -3,21 | -2,98 | -0,47 |
| Rangking | 1 | 2 | 3 |

Dari tabel 15, dapat diketahui bahwa kombinasi level faktor untuk mendapatkan emisi CO terendah diperoleh pada A1; B1; C1; yaitu pada stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran gas 40 %, dan saat pengapian 10 $^{\circ}$ BTDC. Gambar 6 menunjukkan respons level faktor terhadap emisi CO.

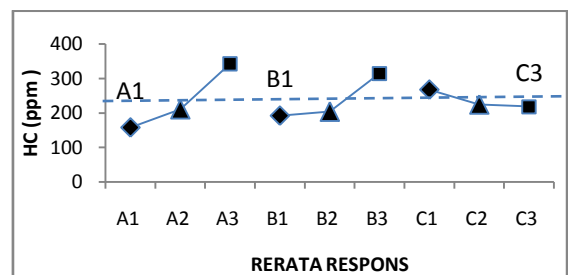


Gambar 6. Rerata respon terhadap emisi CO

Tabel 16. Identifikasi level faktor optimum pada pengujian HC

| Faktor Level | Stelan pegas lever (<i>put</i>) (A) | Bukaan katup aliran gas (%) (B) | Saat pengapian ($^{\circ}$ BTDC) (C) |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 157,93 | 192,20 | 267,73 |
| 2 | 210,87 | 204,13 | 225,00 |
| 3 | 342,73 | 315,20 | 218,80 |
| Selisih | -184,80 | -123,00 | -48,93 |
| Rangking | 1 | 2 | 3 |

Dari tabel 16, dapat diketahui bahwa kombinasi level faktor untuk mendapatkan emisi HC terendah diperoleh pada A1; B1; C3; yaitu pada stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran gas 40 %, dan saat pengapian 15 $^{\circ}$ BTDC. Gambar 7 menunjukkan respons rerata tiap faktor terhadap emisi HC.



Gambar 7 Rerata respon terhadap emisi HC

3.6. Prediksi hasil dan Confident Interval (C.I)

Setelah diketahui level faktor yang berpengaruh dominan, kemudian dilakukan perhitungan perkiraan atau prediksi hasil, jika level faktor yang berpengaruh dominan tersebut dikombinasikan. Kontrol kualitas untuk optimasi torsi adalah “yang terbesar yang terbaik”, sedangkan untuk optimasi CO dan HC adalah “yang terkecil yang terbaik”.

Dari perhitungan prediksi hasil, kemudian dilakukan uji konfirmasi untuk membuktikan kebenaran dari hasil perkiraan yang dilakukan. Sebelum dilakukan percobaan konfirmasi, dilakukan perhitungan tingkat interval kepercayaan / *confident interval* (CI). Jika hasil percobaan konfirmasi berada pada daerah penerimaan *confident interval*, maka optimasi dinyatakan berhasil atau tepat. Pada penelitian ini, tingkat *confident interval* untuk semua parameter ukur (torsi, CO, dan HC) ditetapkan sebesar 95 %. Formula CI untuk tingkat kepercayaan 95% adalah sebagai berikut:

$$CI = \left[\frac{F_{(0,05,1,n-2)} \times V_e}{N_e} \right]^{0,5}$$

Keterangan :

- CI = Confident interval
- $F_{(1,n2)}$ = Nilai F_{tabel}
- V_e = Jumlah variansi error
- N_e = Jumlah pengamatan efektif

3.7. Prediksi torsi optimum

a. Perhitungan prediksi torsi optimum

Dari tabel 14, torsi terbesar diperoleh dari kombinasi antara B1, C3, dan A2. Hasil perhitungan prediksi torsi optimum adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Y_{opt} &= \bar{Y} + (\bar{B1} - \bar{Y}) + (\bar{C3} - \bar{Y}) + (\bar{A2} - \bar{Y}) \\ &= 218,2 + (223,67 - 218,2) + (223 - 218) \\ &\quad + (219,3 - 218,2) \quad [N.m] \\ &= 229,6 \text{ N.m} \text{ dengan nilai } CI = \pm 2,29 \end{aligned}$$

b. Perhitungan prediksi CO optimum

Dari tabel 15, CO terkecil diperoleh dari kombinasi antara, A1, B1, dan C1. Kondisi optimal untuk CO ternyata sama dengan konfigurasi percobaan pertama, yaitu dengan kombinasi stelan baut pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup gas 40 %, dan saat pengapian 10^oBTDC. Hasil perhitungan prediksi emisi CO optimum adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Y_{opt} &= \bar{Y} + (\bar{A1} - \bar{Y}) + (\bar{B1} - \bar{Y}) + (\bar{C1} - \bar{Y}) \\ &= 3,48 + (1,77 - 3,48) + (1,98 - 3,48) + \\ &\quad (3,30 - 3,48) \quad [\%] \\ &= 0,08 \% \text{ dengan nilai } CI \pm 0,34 \end{aligned}$$

c. Perhitungan prediksi HC optimum

Dari tabel 16, HC terkecil diperoleh dari kombinasi antara B1, A1, dan C3. Hasil perhitungan prediksi emisi HC optimum adalah sebagai berikut.

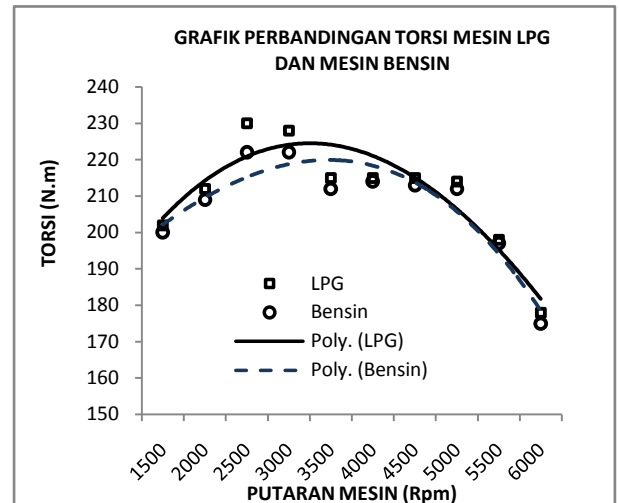
$$\begin{aligned} Y_{opt} &= \bar{Y} + (\bar{A1} - \bar{Y}) + (\bar{B1} - \bar{Y}) + (\bar{C3} - \bar{Y}) \\ &= 237,18 + (157,93 - 237,18) + (192,20 - 237,18) \\ &\quad + (218,80 - 237,18) \quad [ppm] \\ &= 94,58 \text{ ppm} \text{ dengan } CI = \pm 31,43 \end{aligned}$$

3.8. Hasil percobaan konfirmasi

Dari analisis tentang prediksi hasil yang optimum, kemudian dilakukan uji konfirmasi untuk membuktikan bahwa hasil optimasi berada pada daerah penerimaan confident interval (CI). Faktor dan level yang digunakan dalam uji konfirmasi adalah factor level pada perhitungan prediksi hasil.

a. Percobaan konfirmasi torsi

Kombinasi terbaik untuk mendapatkan Torsi optimum adalah pada bukaan katup aliran gas 40 % (B1), dan saat pengapian 15^oBTDC (C3), dan stelan pegas lever 5,75 putaran (A1) secara berurutan. Tabel 4.14 berikut adalah hasil percobaan konfirmasi dengan menggunakan kombinasi faktor level optimum.



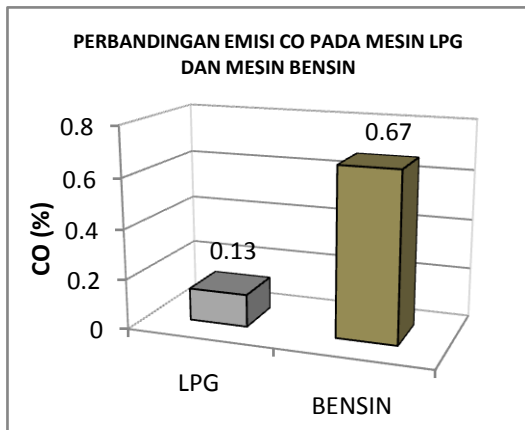
Gambar 8. Perbandingan torsi mesin LPG dan bensin

Torsi maksimum yang dihasilkan pada pengujian konfirmasi bernilai 231,3 N.m, sementara dengan bahan bakar bensin dihasilkan torsi maksimum sebesar 210 N.m. Ini berarti pemakaian LPG dengan bukaan katup aliran gas 40 %, saat pengapian 15^oBTDC, dan penyetulan pegas lever pada 5,75 putaran dapat meningkatkan torsi sebesar 10 %. Dengan melihat interval kepercayaan antara 27,35 N.m sampai 31,85 N.m, menunjukkan bahwa uji konfirmasi torsi sebesar 231,3 N.m berada pada interval penerimaan.

b. Percobaan konfirmasi CO

Kombinasi terbaik untuk mendapatkan CO optimum adalah stelan pegas lever 5,5 putaran (A1), bukaan katup aliran gas 40 % (B1), dan saat pengapian 10^oBTDC (C1). Gambar 4.5. berikut menunjukkan hasil pengujian emisi CO skala optimasi terhadap emisi CO dengan bahan bakar bensin pada nilai lambda (λ) $1 \pm 0,004$. Emisi CO pada uji konfirmasi bernilai 0,13 %, sedangkan dengan bahan bakar bensin dihasilkan CO rata-rata 0,67 %. Ini

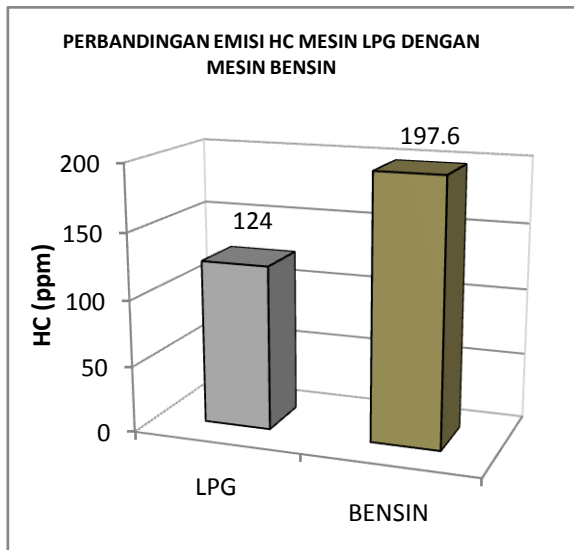
menunjukkan bahwa pemakaian LPG dengan penyetelan baut pegas lever pada 5 putaran, bukaan katup aliran 40 %, dan saat pengapian 10 0BTDC dapat mereduksi emisi CO hingga 80,6 %. Dengan melihat interval kepercayaan antara -0,223 %, sampai 0,403 %, berarti uji konfirmasi CO sebesar 0,13 % berada pada interval penerimaan.



Gambar 9. Perbandingan emisi CO mesin LPG dan mesin bensin

c. Percobaan konfirmasi HC

Kombinasi terbaik untuk mendapatkan HC optimum adalah stelan pegas lever 5,5 putaran (A1), bukaan katup aliran gas 40 % (B1), dan saat pengapian 15 0BTDC (C1). Gambar 4.6. berikut menunjukkan hasil pengujian emisi HC skala optimasi terhadap emisi HC dengan bahan bakar bensin pada nilai lambda (λ) $1 \pm 0,004$.



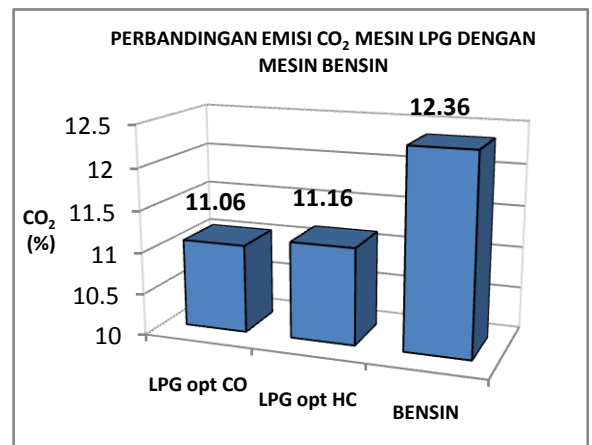
Gambar 10. Perbandingan emisi HC mesin LPG dan mesin bensin.

Emisi HC pada uji konfirmasi bernilai 124 ppm, sedangkan dengan bahan bakar bensin dihasilkan HC rata rata 197,6 ppm. Ini berarti pemakaian LPG dengan penyetelan baut pegas lever pada 5 putaran, bukaan katup aliran 40 %, dan saat pengapian 15 0BTDC dapat mereduksi emisi HC sebesar 37,2 %. Dengan melihat

interval kepercayaan antara 39,5 ppm, sampai 184,6 ppm, berarti uji konfirmasi HC sebesar 124 ppm berada pada interval penerimaan.

d. Perbandingan emisi CO₂

Gambar 10 memberikan informasi bahwa penggunaan LPG dapat mereduksi emisi CO₂ dari 12,36 % menjadi 11,16% pada skenario optimasi HC dan 11,06 % pada skenario optimasi CO. Dalam bentuk grafik, perbandingan emisi CO₂ mesin LPG dengan perlakuan optimasi CO dan optimasi HC terhadap emisi CO₂ mesin bensin standar adalah sebagai berikut.



Gambar 107. Perbandingan emisi CO₂

4. Kesimpulan

1. Pengaruh stelan pegas lever, bukaan katup aliran gas, dan saat pengapian pada mesin LPG :
 - a. Stelan pegas lever berpengaruh signifikan terhadap emisi CO dan HC, tetapi tidak berpengaruh signifikan terhadap output torsi mesin.
 - b. Bukaan katup aliran gas berpengaruh signifikan terhadap torsi mesin, emisi CO, dan HC
 - c. Penyetelan saat pengapian berpengaruh signifikan terhadap torsi mesin, tetapi tidak berpengaruh signifikan terhadap emisi CO dan HC.
2. Kondisi operasi optimum mesin LPG:
 - a. Torsi optimum (231,3 N.m) diperoleh pada kombinasi bukaan katup aliran gas 40 %, saat pengapian 15 0BTDC, dan pada stelan pegas lever 5,75 putaran.
 - b. Emisi CO optimum (0,13 %) diperoleh pada kombinasi stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran 40 %, dan saat pengapian 10 0BTDC.
 - c. Emisi HC optimum (124 ppm) diperoleh pada kombinasi stelan pegas lever 5,5 putaran, bukaan katup aliran 40 %, dan saat pengapian 15 0BTDC.
3. Dengan optimasi ini, penggunaan bahan bakar LPG mampu menaikkan torsi mesin 10%, mereduksi CO 80,6 % dan HC 37,2 % dari mesin bensin.



Daftar Pustaka

- [1]. ETSAP, 2010, *Automotive LPG and Natural Gas Engines*, Technology Brief T03 – April 2010 - www.etsap.org
- [2]. R.R. Saraf, S.S.Thipse and P.K.Saxena, 2009, *Comparative Emission Analysis of Gasoline/LPG Automotive Bifuel Engine*, International Journal of Civil and Environmental Engineering 1:4 2009.
- [3],[6]. M.A. Ceviz, F. Yuksel, 2005, *Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine*, Renewable Energy 31 (2006) 1950–1960
- [4]. ETSAP, 2009, *Liquid Petroleum Gas and Natural Gas Internal Combustion Engines*, Technology Brief T03 – June 2009 - www.etsap.org
- [5]. Tri Agung Rohmat dan Harwin Saptoadi, 2003, *Pengaruh Waktu Penyalaan Terhadap Kinerja Spark-Ignition Engine Berbahan Bakar LPG*, Media Teknik No.3 Tahun XXV edisi Agustus 2003 ISSN 0216-3012.
- [7]. Saulius Mockus et.al, 2006, *Analysis Of Exhaust Gas Composition Of Internal Combustion Engines Using Liquefied Petroleum Gas*, Journal Of Environmental Engineering And Landscape Management 2006, Vol XIV, No 1, 16–22
- [8]. R K Mandloi and A Rehman, 2010, *Long Term Continuous Use Of Auto- LPG Causes Thermal Pitting In Automotive S.I. Engine Parts*, International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2(10), 2010, 5907-5911
- [9]. Tasik T et.al, 2011, *Gasoline and LPG Exhaust Emissions Comparison*, Advances in Production Engineering and Management, 6(2011)2,87-94, ISSN 1854-6250
- [10]. Shankar K. S and Mohanan P, 2011, *MPFI Gasoline Engine Combustion, Performance And Emission Characteristics With LPG Injection*, International Journal Of Energy And Environment Volume 2, Issue 4, 2011 pp.761-770
- [11]. Mieczysław Dziubiński et.al, 2007, *Testing Of An Ignition System In A Car Run On Various Fuels*, TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. - OL PAN, 2007, 7, 97–104
- [12]. Kazimierz Lejda, Artur Jaworski, 2008, *Influence of liquid LPG injection pressure on the injection control*, TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, 2008, 8, 141–148
- [13]. Ranjit K. Roy, 2001, *Design Of Experiments Using The Taguchi Approach*, John Wiley and Sons Inc, Canada.