

**PENGARUH VARIASI DIAMETER LUBANG *SWIRLING GRID* PADA *INTAKE*
MANIFOLD TERHADAP UNJUK KERJA DAN EMISI GAS CO
MOTOR OTTO EMPAT LANGKAH**

SKRIPSI

Konsentrasi Konversi Energi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

RIFQY ZAIM MUHTADI

NIM. 0210620111

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN MESIN

MALANG

2007



**PENGARUH VARIASI DIAMETER LUBANG *SWIRLING GRID* PADA *INTAKE*
MANIFOLD TERHADAP UNJUK KERJA DAN EMISI GAS CO
MOTOR OTTO EMPAT LANGKAH**

SKRIPSI

KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun oleh:

RIFQY ZAIM MUHTADI
NIM. 0210620111

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Saifuddin Baedowie
NIP. 130 350 753

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIP. 132 159 708



PENGARUH VARIASI DIAMETER LUBANG *SWIRLING GRID* PADA *INTAKE MANIFOLD* TERHADAP UNJUK KERJA DAN EMISI GAS CO MOTOR OTTO EMPAT LANGKAH

Disusun Oleh:

RIFQY ZAIM MUHTADI
NIM. 0210620111

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal 08 Februari 2007

DOSEN PENGUJI

Penguji Skripsi 1

Ir. Made Gunadiarta, MT.
NIP . 130 604 495

Penguji Skripsi 2

Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.
NIP . 131 756 003

Penguji Komprehensif

Ir. H. A. Hadi Djaelani
NIP . 130 518 942

Mengetahui:
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Bambang Indrayadi, MT
NIP . 131 653 469



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan nikmat, rahmat dan karunia yang telah diberikan, juga sholawat serta salam penulis tujukan kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Diameter Lubang *Swirling Grid* pada *Intake Manifold* terhadap Unjuk Kerja dan Emisi Gas CO Motor Otto Empat Langkah”**.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung tersusunnya skripsi ini hingga dapat terselesaikan dengan baik:

1. Bapak Ir. Bambang Indrayadi, MT. selaku Ketua Jurusan Mesin.
2. Bapak Ir. Djoko Sutikno, M.Eng. selaku Sekretaris Jurusan Mesin.
3. Bapak Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc. sebagai Ketua Kelompok Pengajar Konversi Energi Jurusan Mesin.
4. Bapak Ir. Saifuddin Baedowie, selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan bimbingan, waktu dan pengetahuan pada penulis dalam menyusun skripsi ini.
5. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, masukan, diskusi dan pengetahuan pada penulis dalam menyusun skripsi ini.
6. Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin.
7. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin serta Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
8. Teman-teman IMPALA UNIBRAW yang telah memberikan persaudaraan seutuhnya.

Penulis menyadari bahwa ilmu yang dimiliki masih terlalu jauh dari kesempurnaan, skripsi ini tentunya jauh dari sempurna pula. Penulis akan menerima segala saran dan kritik yang membangun dengan lapang dan senang hati demi perbaikan di masa yang akan datang. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi kita semua. Aamiin.

Malang, Januari 2007

Penyusun

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | ii |
| DAFTAR TABEL | v |
| DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK | vi |
| DAFTAR LAMPIRAN | vii |
| RINGKASAN | viii |
| BAB I PENDAHULUAN | |
| 1.1 Latar belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan masalah | 2 |
| 1.3 Batasan masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan penelitian | 2 |
| 1.5 Manfaat penelitian | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | |
| 2.1 Penelitian sebelumnya | 4 |
| 2.2 Motor bakar torak | 4 |
| 2.3 Motor Otto | 5 |
| 2.3.1 Siklus ideal motor Otto empat langkah | 5 |
| 2.3.2 Siklus aktual motor Otto empat langkah | 8 |
| 2.3.3 Saluran isap (<i>intake manifold</i>) | 9 |
| 2.4 Pembakaran | 10 |
| 2.4.1 Pembakaran pada motor Otto empat langkah | 11 |
| 2.5 Emisi gas CO | 12 |
| 2.6 Modifikasi dengan <i>swirling grid</i> | 13 |
| 2.7 Unjuk kerja motor Otto | 15 |
| 2.7.1 Torsi (T) | 15 |
| 2.7.2 Daya efektif (Ne) | 16 |
| 2.7.3 Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (SFCe) | 16 |
| 2.7.4 Daya bahan baker | 17 |
| 2.7.5 Daya indikasi | 17 |
| 2.7.6 Efisiensi termal efektif (η_{te}) | 19 |
| 2.7.7 Analisis emisi gas CO | 19 |
| 2.8 Hipotesis | 19 |

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

| | |
|---------------------------------------|----|
| 3.1 Metode penelitian | 20 |
| 3.2 Variabel penelitian..... | 20 |
| 3.3 Alat-alat yang digunakan..... | 21 |
| 3.3.1 Benda uji..... | 21 |
| 3.3.2 Peralatan bantu..... | 22 |
| 3.4 Instalasi Pengujian..... | 23 |
| 3.5 Tempat penelitian..... | 24 |
| 3.6 Pelaksanaan penelitian..... | 24 |
| 3.6.1 Penyusunan alat penelitian..... | 24 |
| 3.6.2 Prosedur penelitian..... | 24 |
| 3.7 Analisis statistika..... | 25 |
| 3.8 Diagram alir penelitian..... | 30 |

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

| | |
|--|----|
| 4.1 Analisis data..... | 31 |
| 4.1.1 Data hasil pengujian..... | 31 |
| 4.1.2 Perhitungan data..... | 33 |
| 4.1.3 Analisis varian..... | 36 |
| 4.1.3.1 Analisis varian untuk torsi yang dihasilkan..... | 37 |
| 4.1.3.2 Analisis varian untuk konsumsi bahan bakar spesifik efektif yang dihasilkan..... | 38 |
| 4.1.3.3 Analisis varian untuk daya efektif yang dihasilkan..... | 39 |
| 4.1.3.4 Analisis varian untuk efisiensi termal efektif yang dihasilkan..... | 39 |
| 4.1.3.5 Analisis varian untuk emisi gas CO yang dihasilkan..... | 40 |
| 4.2 Pembahasan..... | 41 |
| 4.2.1 Hubungan antara putaran dengan torsi..... | 41 |
| 4.2.2 Hubungan antara putaran dengan daya efektif..... | 43 |
| 4.2.3 Hubungan antara putaran dengan konsumsi bahan bakar spesifik efektif (SFCE)..... | 45 |
| 4.2.4 Hubungan antara putaran dengan emisi gas CO..... | 47 |
| 4.2.5 Hubungan antara putaran dengan efisiensi termal efektif..... | 48 |

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

| | |
|---------------------|----|
| 5.1 Kesimpulan..... | 50 |
| 5.2 Saran..... | 50 |

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

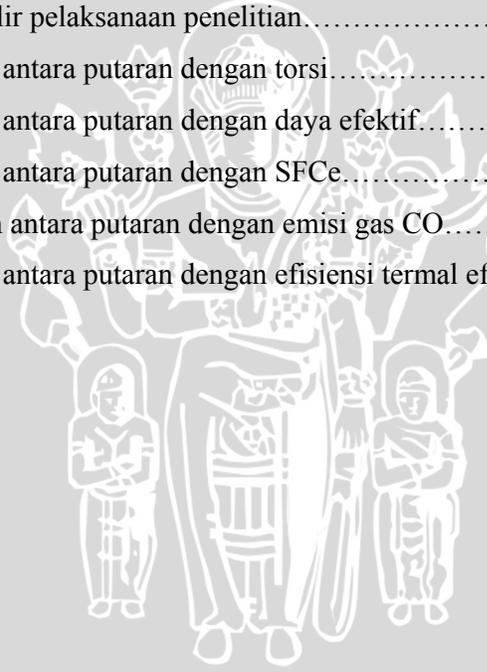


DAFTAR TABEL

| No | Judul | Halaman |
|-----------|--|---------|
| Tabel 3.1 | Rancangan pengamatan model dua arah dengan pengulangan | 27 |
| Tabel 3.2 | Rancangan analisis varian | 29 |
| Tabel 4.1 | Data hasil pengujian terhadap motor Otto empat langkah standar | 31 |
| Tabel 4.2 | Data hasil pengujian terhadap motor Otto empat langkah dengan pemasangan <i>swirling grid</i> dengan diameter lubang 5 mm..... | 32 |
| Tabel 4.3 | Data hasil pengujian terhadap motor Otto empat langkah dengan pemasangan <i>swirling grid</i> dengan diameter lubang 6 mm..... | 32 |
| Tabel 4.4 | Data hasil pengujian terhadap motor Otto empat langkah dengan pemasangan <i>swirling grid</i> dengan diameter lubang 7 mm..... | 33 |
| Tabel 4.5 | Analisis varian dua arah untuk torsi..... | 37 |
| Tabel 4.6 | Analisis varian dua arah untuk SFCE | 38 |
| Tabel 4.7 | Analisis varian dua arah untuk daya efektif..... | 39 |
| Tabel 4.8 | Analisis varian dua arah untuk efisiensi termal efektif..... | 40 |
| Tabel 4.9 | Analisis varian dua arah untuk emisi gas CO..... | 40 |

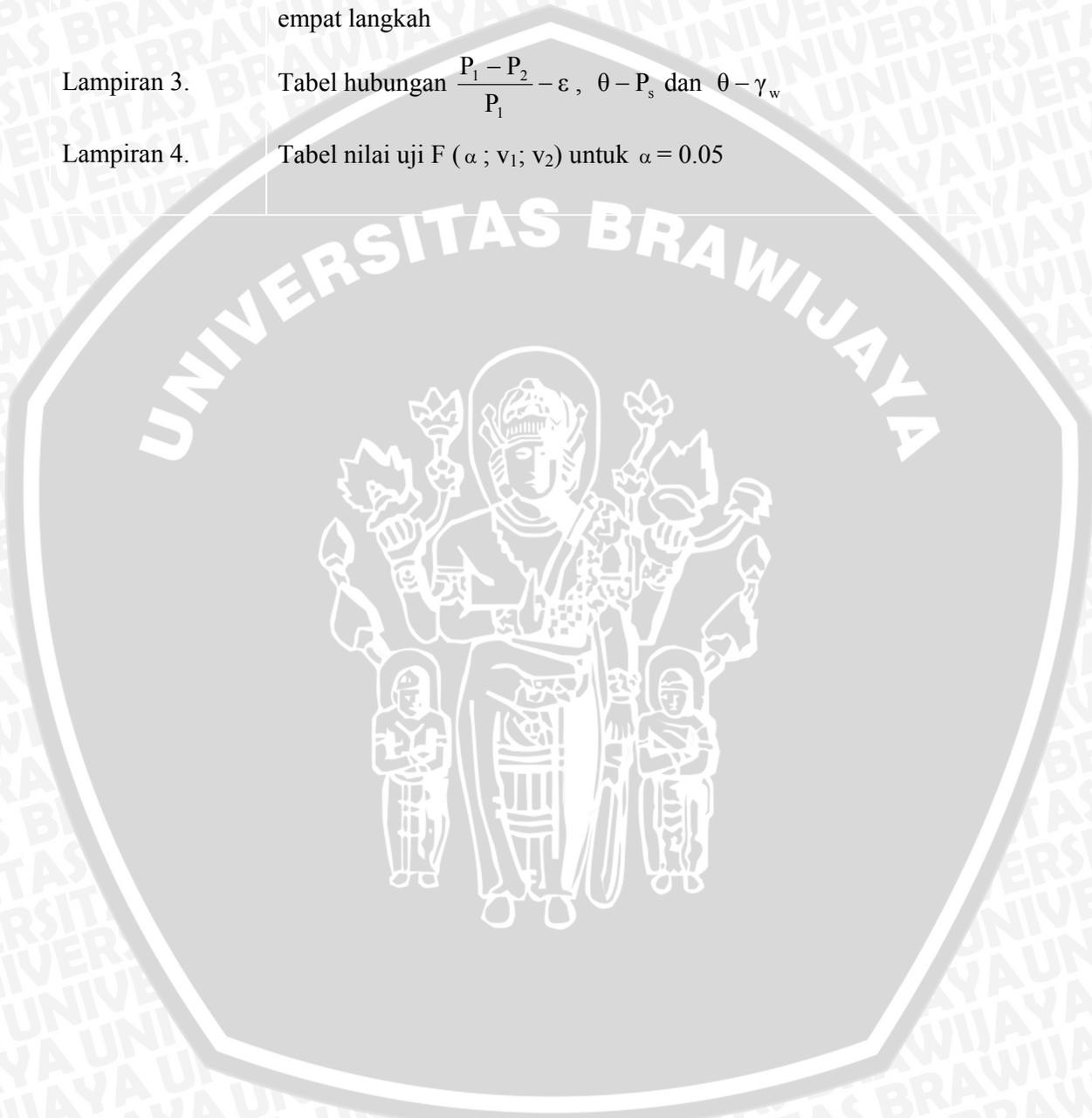
DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK

| No. | Judul | Halaman |
|------------|---|---------|
| Gambar 2.1 | Skema langkah kerja motor bakar empat langkah | 6 |
| Gambar 2.2 | Diagram hubungan antara tekanan-volume spesifik dan temperatur-entropi | 7 |
| Gambar 2.3 | Siklus aktual motor Otto empat langkah | 9 |
| Gambar 2.4 | Grafik hubungan perbandingan udara dengan jumlah CO, H ₂ , dan O ₂ dalam gas buang..... | 13 |
| Gambar 2.5 | Turbulensi di belakang <i>grid</i> | 14 |
| Gambar 3.1 | <i>Swirling grid</i> | 21 |
| Gambar 3.2 | Susunan peralatan uji..... | 23 |
| Gambar 3.3 | Diagram alir pelaksanaan penelitian..... | 30 |
| Gambar 4.1 | Hubungan antara putaran dengan torsi..... | 41 |
| Gambar 4.2 | Hubungan antara putaran dengan daya efektif..... | 43 |
| Gambar 4.3 | Hubungan antara putaran dengan SFCE..... | 45 |
| Gambar 4.4 | Hubungan antara putaran dengan emisi gas CO..... | 47 |
| Gambar 4.5 | Hubungan antara putaran dengan efisiensi termal efektif.. | 48 |



DAFTAR LAMPIRAN

| No | Judul |
|-------------|---|
| Lampiran 1. | Hasil pengolahn data pada pengujian motor Otto empat langkah |
| Lampiran 2. | Nilai rata-rata hasil pengolahan data pada pengujian motor Otto empat langkah |
| Lampiran 3. | Tabel hubungan $\frac{P_1 - P_2}{P_1} - \varepsilon$, $\theta - P_s$ dan $\theta - \gamma_w$ |
| Lampiran 4. | Tabel nilai uji F (α ; v_1 ; v_2) untuk $\alpha = 0.05$ |



RINGKASAN

Rifqy Zaim Muhtadi, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2007, **Pengaruh Variasi Diameter Lubang *Swirling Grid* pada *Intake Manifold* terhadap Unjuk Kerja dan Emisi Gas CO Motor Otto Empat Langkah**. Dosen Pembimbing: Ir. Saifuddin Baedowie dan Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.

Motor Bakar adalah mesin konversi energi yang banyak digunakan oleh masyarakat sebagai alat transportasi. Penggunaan yang lebih luas tersebut memerlukan kebutuhan bahan bakar dalam jumlah yang tidak sedikit. Terlebih lagi persediaan bahan bakar di alam semakin menipis dan dengan semakin mahalnya harga bahan bakar itu sendiri. Salah satu upaya untuk menanggulangi hal tersebut adalah dengan peningkatan kinerja dari sebuah mesin yang nantinya berpengaruh terhadap daya serta konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan. Di sisi lain, polusi udara di kota-kota besar Indonesia merupakan masalah yang sangat serius. Salah satu penyebab utama munculnya polutan-polutan tersebut adalah emisi gas buang dari kendaraan karena pembakaran yang tidak atau kurang sempurna. Salah satunya disebabkan karena kurang sempurnanya pencampuran bahan bakar bensin dengan udara yang mengakibatkan kinerja mesin menjadi rendah. Salah satu caranya adalah dengan membuat olakan atau turbulensi pada campuran antara bahan bakar dan udara pembakaran yang mengalir melalui saluran isap dengan pemasangan *swirling grid*.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh diameter lubang *swirling grid* terhadap unjuk kerja motor Otto empat langkah yang meliputi torsi, daya efektif, konsumsi bahan bakar spesifik efektif, emisi gas CO dan efisiensi termal efektif. Selain itu juga untuk mengetahui berapa diameter *swirling grid* yang optimal. Untuk mengetahui pengaruh tersebut, dipergunakan uji statistika melalui analisis varian dua arah (anava).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan *swirling grid* pada *intake manifold* motor Otto empat langkah dengan variasi diameter lubang pada *intake manifold* untuk *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm dapat meningkatkan unjuk kerja yang dihasilkan oleh motor Otto empat langkah, tetapi untuk *swirling grid* berdiameter 5 mm tidak dapat meningkatkan unjuk kerja karena hambatan aliran campuran udara dan bahan bakar bertambah besar. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh pula bahwa secara keseluruhan unjuk kerja motor Otto empat langkah paling optimal dihasilkan pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang pesat saat ini, membuat setiap insan manusia dituntut untuk selalu aktif dan terampil dalam aktivitasnya untuk melaksanakan berbagai hal. Salah satu yang menunjang hal tersebut adalah sarana transportasi. Dengan demikian, penggunaan kendaraan bermotor sebagai alat transportasi semakin mutlak diperlukan, dan ini berarti pula bahwa kebutuhan bahan bakar fosil sebagai sumber energinya semakin meningkat, sedangkan ketersediaan sumber energi tersebut kian hari kian menipis, sehingga diperlukan usaha untuk lebih menghemat bahan bakar.

Selain masalah krisis energi, di Indonesia juga menghadapi masalah pencemaran udara yang sudah sangat memprihatinkan. Salah satu gas pencemaran udara yang paling berbahaya adalah gas karbon monoksida (CO), selain gas nitrogen oksida (NO_x), hidro karbon (CH), dan sulfur oksida (SO_x). Gas CO merupakan gas yang lebih reaktif dengan hemoglobin (Hb) daripada O₂, apabila gas tersebut terhisap oleh sistem pernafasan manusia, maka CO akan segera berikatan dengan hemoglobin (Hb) darah menggantikan oksigen (O₂). Dampak dari pengikatan ini adalah darah dan tubuh penghisap akan kekurangan O₂ sebagai komponen utama proses metabolisme. Jika keadaan ini berlangsung terus, maka akan mengakibatkan kematian bagi penghisapnya.

Untuk mengantisipasi krisis energi, akibat habisnya sumber energi fosil tersebut, dan mengurangi terjadinya polusi udara dari suatu reaksi pembakaran, membuat orang berpikir untuk menemukan alat atau setidaknya melakukan modifikasi untuk mengatasi masalah tersebut.

Dari penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Effendi M.R. (2001) dengan judul Pengaruh Diameter *Grid* Pada *Intake Manifold* Terhadap Unjuk Kerja Motor Bensin Empat Langkah, menunjukkan terjadi peningkatan efisiensi termal efektif pada pemasangan *grid* berdiameter 7 mm, dan terjadi penurunan konsumsi bahan bakar pada pemasangan *grid* berdiameter 5 mm. Sedangkan penelitian lain yang dilakukan oleh Yulianto B.D. (2002) dengan judul Pengaruh Variasi Kemiringan Lubang *Grid* Terhadap Kinerja Motor Bensin 4 – Langkah, menunjukkan bahwa kinerja yang paling optimal dihasilkan oleh *grid* dengan kemiringan 20°.

Sebagai pengembangan dari penelitian sebelumnya, salah satu modifikasi lain yang bisa dilakukan yaitu dengan pemasangan *swirling grid* pada *intake manifold* yang

terletak antara karburator dan ruang bakar dengan tujuan memperbaiki proses pembakaran pada motor Otto empat langkah. Dengan adanya penelitian tentang pengaruh diameter lubang *swirling grid* ini diharapkan timbulnya olakan pada aliran campuran bahan bakar dan udara yang lebih baik, akibat terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*) ketika campuran tersebut melewati *grid*, sehingga kondisi campuran akan lebih homogen, dan pembakaran yang terjadi di harapkan lebih sempurna, sehingga akan meningkatkan efisiensi thermal mesin, penghematan penggunaan bahan bakar, dan mengurangi pencemaran udara.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

Bagaimana pengaruh diameter lubang *swirling grid* terhadap unjuk kerja dan emisi gas karbon monoksida (CO) pada motor Otto empat langkah?

1.3 Batasan Masalah

Untuk lebih memfokuskan pada arah pembahasan yang ditentukan, maka diberikan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Mesin yang digunakan untuk penelitian adalah motor Otto empat langkah Datsun 1567cc, empat silinder.
2. Mesin pengujian yang digunakan dalam keadaan tidak berjalan (diam).
3. Bahan bakar yang digunakan adalah bensin premium yang dijual di SPBU.
4. Parameter yang digunakan untuk mengetahui kinerja adalah Torsi (T), Daya Efektif (Ne), Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (SFCe), dan Efisiensi Thermal Efektif (η_e).
5. Reaksi kimia dan pembakaran yang berlangsung tidak diamati.
6. Tidak membahas material dari *swirling grid* yang digunakan
7. Properties aliran sebelum dan sesudah melewati *swirling grid* tidak diamati.
8. Satuan yang digunakan untuk daya adalah satuan Jerman, yakni PS (Pferdestärke). 1 PS = 0,73549875 kW = 0,98632016 HP

1.4 Tujuan Penelitian

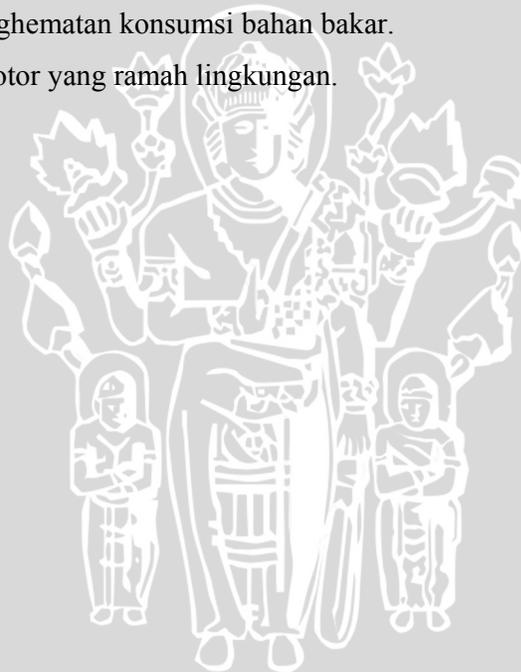
Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh diameter lubang *swirling grid* terhadap Torsi, Daya Efektif, Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif, Efisiensi Thermal Efektif, dan emisi gas karbon monoksida (CO) pada motor Otto empat langkah.
2. Untuk mengetahui besarnya diameter lubang *swirling grid* yang dapat menghasilkan unjuk kerja yang optimal dan emisi gas CO yang rendah pada motor Otto empat langkah.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini nantinya diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan cara alternatif untuk meningkatkan unjuk kerja motor Otto empat langkah, dan penghematan konsumsi bahan bakar.
2. Menghasilkan motor yang ramah lingkungan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian-Penelitian Yang Lain

Study experimental sebelumnya yang telah dilakukan Ahmad J. (2001) diketahui bahwa pemasangan *grid* pada suatu aliran fluida akan mengakibatkan terganggunya aliran fluida tersebut, sehingga aliran fluida menjadi turbulen. Pada penelitian ini mencoba untuk mengaplikasikan hasil penelitian tersebut untuk aliran fluida bahan bakar dan udara pada saluran *intake manifold* motor Otto empat langkah

Effendi M.R. (2002) telah melakukan hal tersebut, penelitiannya lebih difokuskan pada eksperimen untuk menentukan diameter lubang *grid* optimal. Dari penelitian tersebut dia menyimpulkan bahwa efisiensi termal efektif terbesar dihasilkan dengan pemasangan *grid* berdiameter 7 mm, dan terjadi penurunan konsumsi bahan bakar pada pemasangan *grid* berdiameter 5 mm.

Yulianto B.D. (2003) mengulangi penelitian yang telah dilakukan oleh Effendi M.R., namun fokus penelitiannya adalah pada variasi kemiringan lubang *grid*. Dari penelitian tersebut dia menyimpulkan bahwa kinerja yang paling optimal dihasilkan oleh *grid* dengan kemiringan 20°.

2.2 Motor Bakar Torak

Motor bakar torak termasuk salah satu jenis penggerak mula yang mengubah energi kimia bahan bakar kedalam bentuk energi panas atau potensial gas hasil pembakaran untuk melakukan kerja mekanik. Proses ini berlangsung dalam ruangan yang dibatasi dinding silinder, kepala silinder, dan puncak torak, sehingga motor bakar ini termasuk dalam mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*). Gas yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut berfungsi sebagai fluida kerja yang digunakan untuk menggerakkan torak yang oleh batang penghubung dihubungkan dengan poros engkol. Gerak translasi dari torak mengakibatkan terjadinya gerak rotasi atau putaran pada poros engkol dan begitu juga sebaliknya gerak rotasi dari poros engkol mengakibatkan gerak translasi pada torak.

Berdasarkan jenis penyalanya motor bakar di bagi 2 macam, yaitu motor bakar bensin (*Otto*) dan motor diesel. Pada motor bensin penyalan bahan bakar dengan bantuan loncatan bunga api listrik diantara dua elektroda busi, sehingga motor bensin (*Otto*) disebut juga SIE (*Spark Ignition Engines*), sedangkan pada motor diesel proses

penyalaan bahan bakar terjadi dengan sendirinya karena adanya tekanan dan temperatur yang tinggi dalam silinder, sehingga biasanya disebut CIE (*Compression Ignition Engines*).

Selain berdasarkan jenis penyalannya, motor bakar torak dapat juga dibedakan berdasarkan jumlah langkahnya tiap siklus, yakni motor bakar dua langkah dan motor bakar empat langkah. Motor bakar dua langkah adalah motor bakar yang memerlukan dua kali langkah piston dalam satu kali siklus kerjanya. Sedangkan motor bakar empat langkah adalah motor bakar yang dalam satu kali siklus kerjanya memerlukan empat kali langkah piston. Satu kali langkah piston adalah gerak piston dari titik mati atas (TMA) ke titik mati bawah (TMB) atau sebaliknya.

2.3 Motor Otto

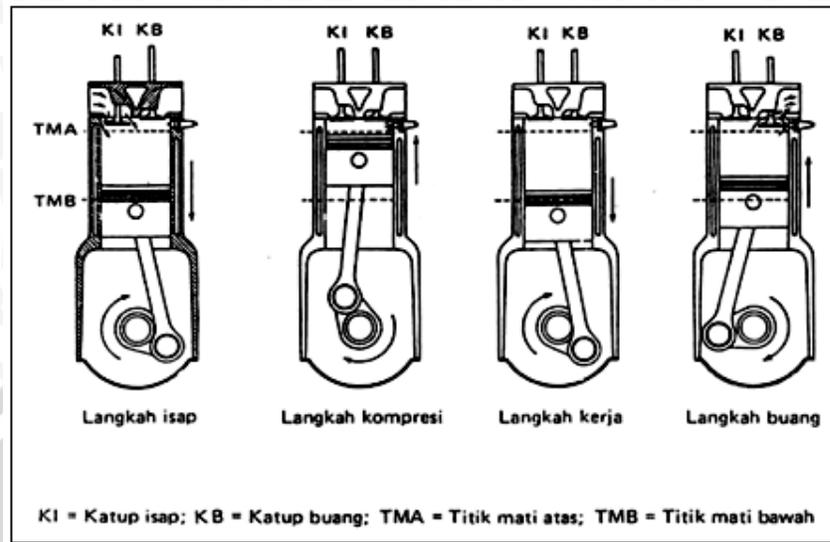
Motor Otto atau lebih dikenal dengan motor bensin dilengkapi dengan busi dan karburator. Busi digunakan untuk menyalakan campuran bahan bakar dan udara. Karburator ialah tempat percampuran bahan bakar dengan udara, dimana bahan bakar tersebut disemprotkan melalui *pilot* dan *main jet* akibat perbedaan tekanan pada lubang venturi yang dialiri oleh udara. Campuran tersebut kemudian masuk ke dalam ruang bakar melalui *intake manifold* dan dibakar oleh percikan bunga api listrik dari busi menjelang langkah akhir kompresi, sehingga menghasilkan gas pembakaran sebagai fluida kerja yang digunakan untuk melakukan kerja.

2.3.1 Siklus Ideal Motor Otto Empat Langkah

Proses termodinamika dan kimia yang terjadi di dalam motor bakar torak sangat kompleks untuk dianalisis menurut teori. Untuk memudahkan analisis perlu membayangkan bahwa proses tersebut sebagai suatu keadaan yang ideal, akan tetapi dengan sendirinya akan semakin jauh menyimpang dari keadaan yang sebenarnya. Pada mesin yang ideal proses pembakaran yang dapat menghasilkan gas bertekanan dan bertemperatur tinggi tersebut dimisalkan sebagai proses pemasukan panas ke dalam fluida kerja di dalam silinder.

Pada motor Otto empat langkah torak bergerak dari Titik Mati Atas (TMA) ke Titik Mati Bawah (TMB), dimana setiap kali bergerak dari TMA ke TMB ataupun dari TMB ke TMA dihitung satu kali langkah. Oleh karena itu pada motor bakar empat langkah pada setiap siklusnya terdiri dari empat kali gerakan torak atau dua kali putaran

poros engkol. Untuk memperjelas prinsip kerja motor Otto empat langkah tersebut, dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.1. Skema langkah kerja motor bakar empat langkah.
Sumber : Arismunandar, 2002 : 8

Proses pembakaran didalam mesin Otto terjadi secara periodik sebagai berikut:

- Langkah isap (*Suction Stroke*)**
Torak bergerak dari posisi TMA (Titik Mati Atas) ke TMB (Titik Mati Bawah), dengan katup KI (Katup Isap) terbuka dan KB (Katup Buang) tertutup. Karena gerakan torak tersebut maka campuran udara dan bahan bakar akan terisap masuk ke dalam ruang bakar.
- Langkah kompresi (*Compression Stroke*)**
Torak bergerak dari posisi TMB ke TMA, dengan KI dan KB tertutup, sehingga terjadi proses kompresi yang mengakibatkan tekanan dan temperatur di dalam silinder naik.
- Langkah ekspansi (*Expansion Stroke*)**
Sebelum posisi torak mencapai TMA pada langkah kompresi, busi dinyalakan, sehingga terjadi proses pembakaran. Akibatnya tekanan dan temperatur di ruang bakar naik lebih tinggi, sehingga torak mampu melakukan langkah kerja atau langkah ekspansi. Langkah kerja dimulai dari posisi torak pada TMA dan berakhir pada posisi TMB saat KB mulai terbuka pada awal langkah buang. Langkah ekspansi pada proses ini sering disebut dengan *power stroke* atau langkah kerja.

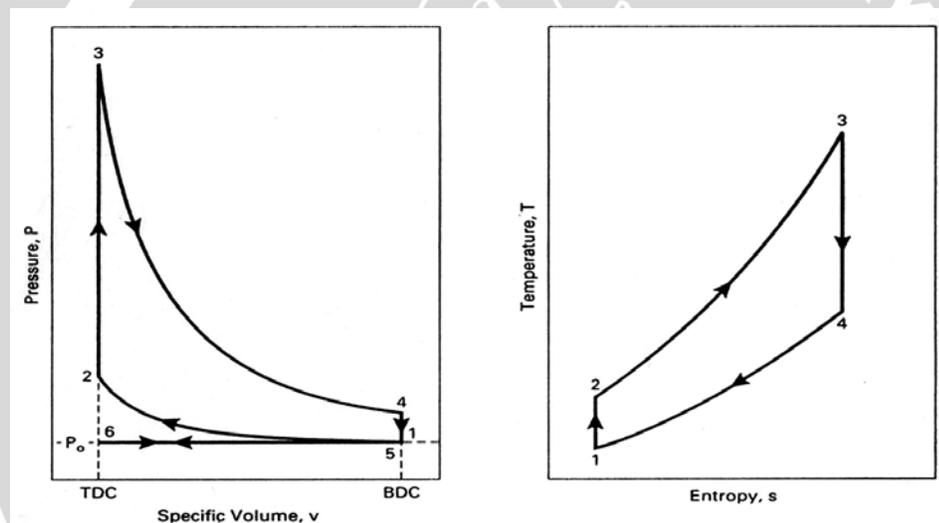
d. Langkah buang

Torak bergerak dari TMB ke TMA. KI tertutup dan KB terbuka, sehingga gas hasil pembakaran terbuang ke atmosfer.

Dalam menganalisis proses yang terjadi di dalam motor Otto empat langkah akan ditunjukkan melalui skema siklus motor Otto empat langkah secara ideal. Siklus udara menggunakan beberapa keadaan yang sama dengan siklus sebenarnya, misalnya mengenai:

1. Urutan proses
2. Perbandingan kompresi
3. Pemilihan temperatur dan tekanan pada suatu keadaan
4. Penambahan kalor yang sama per satuan berat udara.

Siklus motor Otto empat langkah merupakan siklus udara volume- konstan yang ditunjukkan dalam diagram P-V dan diagram T-S berikut:



Gambar 2.2. Diagram hubungan antara Tekanan (P)–Volume spesifik (v) dan Temperatur (T) – Entropi (s)
Sumber : Pulkrabek, 2004 : 90

Langkah kerja siklus Otto terdiri dari :

- Proses 0 – 1 : Langkah isap / pengisian secara isobarik
- Proses 1 – 2 : Langkah kompresi / tekan secara isentropik
- Proses 2 – 3 : Proses pemanasan dan pembakaran secara isokhorik
- Proses 3 – 4 : Langkah kerja / ekspansi secara isentropik
- Proses 4 – 1 : Proses pendinginan / pengeluaran kalor secara isokhorik

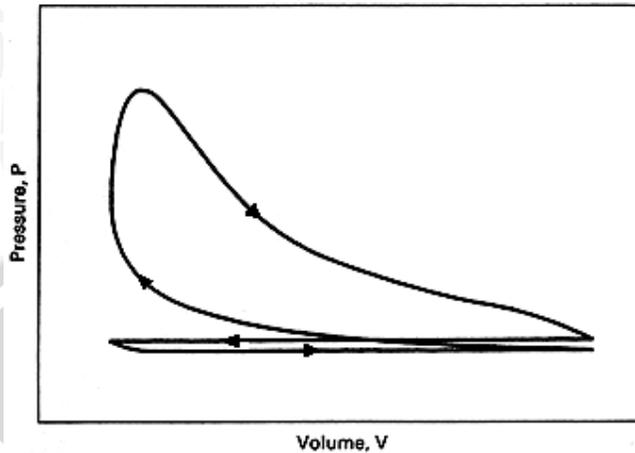
2.3.2 Siklus Aktual Motor Otto Empat Langkah

Proses langkah kerja motor Otto empat langkah dalam kenyataannya tidak dapat bekerja dalam kondisi ideal. Menurut Arismunandar, W (2002:29), penyimpangan dari siklus ideal itu terjadi karena dalam keadaan sebenarnya terjadi kerugian yang antara lain disebabkan oleh beberapa hal sebagai berikut:

1. Kebocoran fluida kerja karena penyekatan oleh cincin torak dan katup tidak sempurna.
2. Katup tidak dibuka dan ditutup tepat di TMA dan TMB karena pertimbangan dinamika mekanisme katup dan kelembaman fluida kerja.
3. Fluida kerja bukanlah udara yang dapat dianggap sebagai gas ideal dengan kalor spesifik yang konstan selama proses siklus berlangsung.
4. Pada motor bakar torak yang sebenarnya, pada waktu torak berada di TMA tidak terdapat proses pemasukan kalor seperti pada siklus udara. Kenaikan tekanan dan temperatur fluida kerja disebabkan oleh proses pembakaran bahan bakar dan udara di dalam silinder.
5. Proses pembakaran memerlukan waktu, tidak berlangsung sekaligus. Akibatnya proses pembakaran berlangsung pada volume ruang bakar yang berubah-ubah karena gerakan torak. Dengan demikian proses pembakaran harus sudah dimulai beberapa saat sebelum torak mencapai TMA dan berakhir beberapa saat setelah torak meninggalkan TMA menuju TMB. Jadi proses pembakaran tidak dapat berlangsung pada volume konstan atau pada tekanan konstan.
6. Terdapat kerugian kalor yang disebabkan oleh perpindahan kalor dari fluida kerja ke fluida pendingin, terutama pada langkah kompresi, ekspansi dan pada waktu gas buang meninggalkan silinder. Perpindahan kalor tersebut terjadi karena terdapat perbedaan temperatur antara fluida kerja dengan fluida pendingin. Fluida pendingin diperlukan untuk mendinginkan bagian mesin yang menjadi panas, untuk mencegah kerusakan.
7. Terdapat kerugian energi kalor yang dibawa oleh gas buang dari dalam silinder ke atmosfer sekitar. Energi tersebut tidak dapat dimanfaatkan untuk melakukan kerja mekanik.
8. Terjadi kerugian energi karena gesekan antara fluida kerja dengan dinding salurannya.

Dalam siklus udara standar, langkah buang dan langkah isap tidak diperlukan karena fluida kerja udara tetap berada di dalam silinder. Apabila tekanan gas dan

volume silinder secara bersamaan pada setiap posisi torak dapat diukur maka dapat digambarkan siklus aktual motor Otto, yang bentuknya seperti ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.3 Siklus aktual motor Otto empat langkah
Sumber : Pulkrabek, 2004 : 48

Berdasarkan semua hal tersebut maka bentuk diagram $P - V$ dari siklus yang sebenarnya tidak sama dengan bentuk diagram siklus ideal. Pada siklus yang sebenarnya tidak pernah terjadi suatu proses dengan volume konstan atau tekanan konstan. Karena semua penyimpangan diatas menimbulkan kerugian energi, maka sebaiknya diusahakan agar siklus yang sebenarnya dapat mendekati siklus yang ideal.

2.3.3 Saluran Isap (*Intake Manifold*)

Saluran isap atau *intake manifold* adalah suatu saluran yang berfungsi untuk mengalirkan campuran bahan bakar dan udara yang tepat dari karburator ke dalam silinder pada saat mesin bekerja. Sistem isap terdiri atas beberapa bagian utama, yaitu karburator, *throttle*, *intake manifold*, katup isap, dan ruang bakar.

Besarnya diameter dan panjang *intake manifold* ini haruslah seimbang, yaitu tidak terlalu panjang dan juga tidak terlalu pendek, sehingga diharapkan dapat terjadi percampuran antara bahan bakar dengan udara dengan baik. Selain itu diameternya tidak boleh terlalu kecil atau besar, sehingga tidak akan terjadi gesekan aliran yang besar dan tidak akan menurunkan efisiensi volumetriknya.

Campuran antara bahan bakar dan udara di dalam *intake manifold* dapat terjadi dalam tiga kondisi, yaitu:

1. Bahan bakar (dalam bentuk kabut/*droplet*) dengan udara akan bercampur dengan baik sehingga bahan bakar dan udara tersebut akan mengalir bersama-sama ke dalam silinder. Hal ini merupakan kondisi ideal yang diharapkan dapat terjadi.
2. Terdapat sebagian kecil bahan bakar yang masih dalam bentuk tetes cairan sehingga tidak bisa bercampur dengan udara secara sempurna.
3. Terjadinya lapisan tipis bahan bakar (*film*) pada dinding *intake manifold*. Hal ini terjadi karena bahan bakar yang masih dalam bentuk titik cairan akibat pengaruh gaya gravitasi dan adanya perbedaan berat jenis yang akan mengumpul menjadi suatu lapisan tipis pada dinding *intake manifold*.

Dua kondisi terakhir di atas menyebabkan terjadinya perbedaan perbandingan campuran jumlah udara dengan bahan bakar yang akan dialirkan ke silinder akibat campuran udara dan bahan bakar yang kurang homogen. Hal ini akan berpengaruh terhadap kinerja mesin dan bahkan akan memperpendek umur mesin. Hal tersebut dapat dikurangi atau bahkan dapat diatasi dengan cara membuat modifikasi agar campuran bahan bakar dan udara menjadi homogen, misalnya dengan menggunakan sistem injeksi bahan bakar sehingga diharapkan dapat mengkabutkan bahan bakar dengan baik. Selain itu dapat juga dengan mengusahakan agar aliran yang melewati *intake manifold* berpusar sehingga didapatkan campuran yang homogen.

2.4 Pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi kimia antara bahan bakar dan oksigen sebagai oksidator yang menyebabkan timbulnya kenaikan temperatur.

Elemen utama bahan bakar adalah karbon, hidrogen, dan sulfur. Pembakaran dikatakan sempurna jika semua kandungan karbon (C) dalam bahan bakar terbakar habis membentuk karbondioksida (CO_2), semua hidrogen (H) terbakar membentuk air (H_2O), dan semua sulfur (S) terbakar membentuk sulfurdioksida (SO_2). Jika kondisi tersebut tidak terpenuhi, berarti pembakaran tidak sempurna.

Ditinjau secara aerodinamika ada dua jenis pembakaran, yaitu:

1. Pembakaran premixed

Pembakaran premixed adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara (oksigen) dicampur terlebih dahulu secara mekanik (misalnya dengan karburator), kemudian baru dibakar. Contohnya adalah pembakaran pada motor bensin.

2. Pembakaran difusi

Pembakaran difusi adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara pengoksidasi tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur secara alami melalui proses difusi, kemudian baru dibakar. Contohnya adalah pembakaran pada motor diesel, pembakaran lilin..

Pada proses pembakaran, ada empat syarat yang harus dipenuhi agar terjadi pembakaran yang sempurna, yaitu :

1. Bahan bakar menguap secara cepat dan sempurna
2. Digunakan cukup udara pembakaran
3. Adanya campuran udara dan bahan bakar yang homogen
4. Tercapainya temperatur udara yang cukup tinggi

Jika syarat-syarat di atas tidak terpenuhi, maka akan terjadi pembakaran yang tidak sempurna. Pembakaran yang tidak sempurna akan menghasilkan oksida yang menimbulkan polusi udara dan menurunkan efisiensi serta secara ekonomis akan sangat merugikan.

Dari syarat ketiga (adanya campuran udara dan bahan bakar yang homogen) di atas untuk menghasilkan suatu proses pembakaran yang sempurna diperlukan homogenitas campuran bahan bakar dan udara. Terjadinya campuran antara bahan bakar dan udara pembakaran yang homogen disebabkan apabila garis alir fluida udara pembakaran dan bahan bakar saling berpotongan, sehingga partikel-parikel udara dan bahan bakar akan bergerak secara acak dan lebih bebas untuk saling berikatan. Dengan adanya campuran homogen ini, maka akan diperoleh suatu pembakaran yang merata, kecepatan pembakaran yang tinggi serta tekanan pembakaran yang lebih tinggi.

2.4.1 Pembakaran pada Motor Otto Empat Langkah

Untuk menghasilkan untuk kerja mesin yang optimal, proses pembakaran memegang peranan yang sangat penting, dan proses pembakaran yang terjadi diusahakan mendekati sempurna. Dengan pembakaran yang sempurna berarti bahan bakar akan habis terbakar, sehingga energi panas yang dihasilkan akan tinggi pula dan emisi gas CO akan menurun. Hal ini juga berarti bahwa dengan konsumsi bahan bakar yang sama, tenaga yang dihasilkan oleh mesin akan lebih besar dan polusi udara yang terjadi akan lebih rendah dibandingkan jika pembakaran tidak sempurna.

Pembakaran pada mesin Otto merupakan jenis pembakaran premixed, hal ini karena antara bahan bakar dan udara dicampur terlebih dahulu di dalam karburator,

sehingga bahan bakar akan mengabut (droplet) dan mengalir ke ruang bakar melalui *intake manifold*.

Pembakaran dalam ruang bakar ini terjadi dengan sangat cepat, tetapi ada jeda waktu sesaat awal penyalaan api oleh busi sampai campuran bahan bakar dan udara terbakar habis. Setelah busi menyala, nyala api akan merambat ke segala arah dengan kecepatan yang sangat tinggi (20 – 50 m/s) dan menyalakan campuran yang dilaluinya sehingga tekanan dalam ruang bakar meningkat sesuai campuran yang terbakar (Arismunandar,2002:82). Selain penyalaan api Zhang dan Hill (1996) menemukan bahwa gerakan memusar pada campuran bahan bakar dan udara yang akan dibakar juga akan meningkatkan kecepatan pembakaran. Dengan adanya kecepatan pembakaran yang tinggi akan dapat mengurangi detonasi pada mesin.

Kecepatan rambat gelombang pembakaran ini sangat menentukan besarnya tekanan yang ditimbulkan pada torak. Jika penyalaan terlalu awal, maka gas sisa yang belum terbakar maupun campuran baru antara bahan bakar dan udara akan terbakar, sehingga meningkatkan temperatur dan tekanan di ruang bakar, sementara proses kompresi masih berlangsung dimana piston masih bergerak ke TMA. Akibatnya gerakan piston akan terhambat oleh gas tersebut sehingga mengurangi tenaga mesin. Jika penyalaan terlambat, tekanan akan turun karena saat terbakar, piston sudah bergerak menuju TMB. Peningkatan tekanan dan temperatur gas hasil pembakaran akan menurun. Gas hasil pembakaran yang masih mempunyai tekanan tinggi akan keluar melalui katub buang, sehingga pemanfaatan energinya akan berkurang.

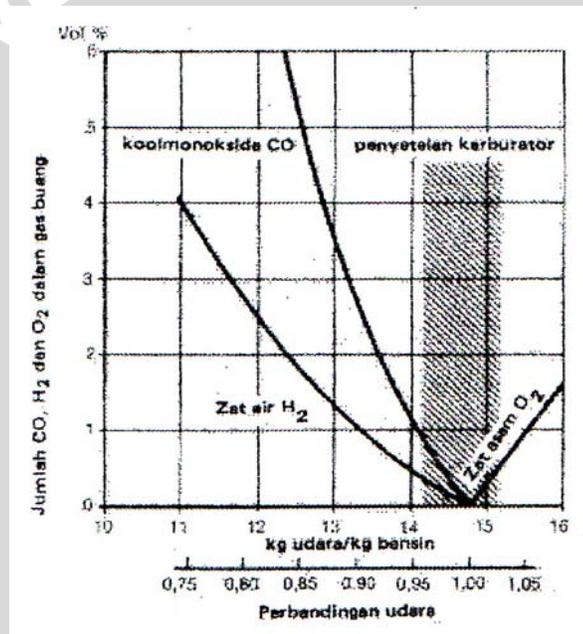
2.5 *Emisi gas CO*

Hasil pembakaran bahan bakar di dalam motor bakar pada umumnya adalah CO₂, CO, H₂O (uap), SO_x dan NO_x. Pada pembakaran yang sempurna maka pada gas buang akan dihasilkan CO₂ dan uap air (H₂O). Jika bahan bakar mengandung unsur belerang dan zat lemas udara, maka hasil pembakarannya adalah SO_x dan NO_x yang merupakan unsur polutan yang dapat mencemari udara bebas.

Karbon monoksida (CO) merupakan salah satu unsur emisi gas buang yang sangat berbahaya bagi kesehatan manusia karena tidak berwarna, tidak berbau dan beracun yang dapat menimbulkan rasa sakit pada mata, saluran pernafasan dan paru-paru. Apabila masuk dalam darah melalui pernafasan, CO akan bereaksi dengan hemoglobin dalam darah membentuk COHb (karboksihemoglobin), CO berikatan

sangat kuat dengan Hb sehingga menghalangi fungsi vital Hb untuk membawa oksigen bagi tubuh.

Menurut BPM. Arends dan H. Berenschot (1994:73), bahwa banyaknya CO dari gas buang itu tergantung dari perbandingan bahan bakar dan udara, hanya pada pembakaran yang sempurna dari bahan bakarnya maka nilai CO-nya dapat nihil. Hal ini dapat dicapai pada perbandingan secara teoritis 14,8 : 1. Perbandingan sebesar ini selama motor berjalan jarang dapat dipertahankan, karena kualitas campuran selalu berubah dengan frekuensi putar dan pembebanan motor. Motor Otto pada jalan stasioner mempunyai gas buang karbondioksida yang tinggi, karena perbandingan campurannya kira-kira 13 : 1. Berikut disajikan grafik hubungan perbandingan udara dengan jumlah CO, H₂, dan O₂ dalam gas buang.



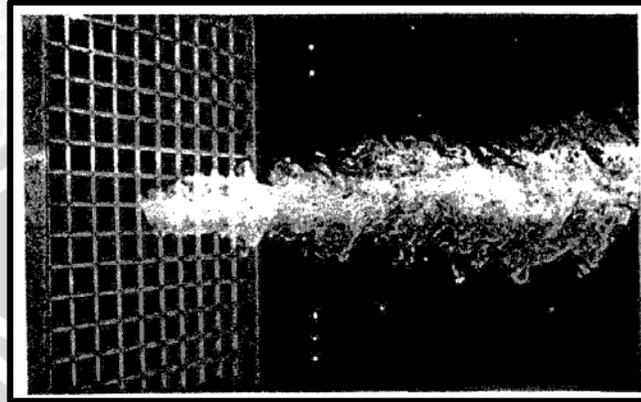
Gambar 2.4 Grafik Hubungan Perbandingan Udara dengan jumlah CO, H₂, dan O₂ dalam gas buang.

Sumber: BPM. Arends dan H. Berenschot, Motor Bensin, 1994 : 73

2.6 Modifikasi dengan *Swirling Grid*

Grid pada dasarnya merupakan penghalang atau pengganggu aliran fluida dalam hal ini campuran bahan bakar dan udara dari karburator yang akan mengalir melalui *intake manifold* sehingga terjadi turbulensi akibat adanya perbedaan tekanan dan perbedaan kecepatan sebelum dan sesudah *grid*. Suatu aliran fluida yang melewati penghalang berupa *grid* kecepatannya akan berkurang secara tiba-tiba, sehingga

menyebabkan kondisi kecepatan nol (*zero velocity*) dan akan menimbulkan pusaran (*vorticity*) pada bagian belakang *grid*. Sehingga dengan adanya aliran berpusar akan menghasilkan efek turbulensi (Lesieur, 1987). Zhang dan Hill menyatakan bahwa kecepatan pembakaran yang terjadi akan lebih tinggi jika fluida yang dibakar berpusar dan menimbulkan turbulensi.



Gambar 2.5 Turbulensi di belakang *grid*
Sumber : Lesieur, 1987: 4

Tennese Lumley menyebutkan bahwa aliran turbulen *isotropic* dicapai di belakang *grid*, dimana olakan tercipta pada tangkai bangun secara bersamaan seperti dalam gambar 2.5. Kemudian Mohammed Larue, Tresno dan Monoz menentukan awal dari daerah homogen dan *isotropic* pada kondisi yang berbeda, dimana mereka menguraikan bahwa awal terbentuknya daerah *isotropic* dan homogen/seragam adalah sejalan dengan besar bilangan Reynolds (Lesieur, 1987).

Dalam aplikasinya pada motor bensin, bahan bakar dan udara sebelum masuk ruang bakar terlebih dahulu dicampur di dalam karburator. Proses ini terjadi karena adanya *drop pressure* pada pipa venturi di karburator sehingga bahan bakar dapat disemprotkan melalui *jet* membentuk *droplets* dengan berbagai ukuran dan bercampur dengan udara pembakaran. Proses terurainya bahan bakar ini disebut atomisasi. Derajat atomisasi yang terjadi di karburator tergantung pada beberapa hal. Diantaranya adalah kecepatan relatif aliran udara dan bahan bakar, karakteristik bahan bakar, densitas bahan bakar serta tegangan permukaan.

Campuran bahan bakar dan udara setelah melalui karburator homogenitasnya masih dapat ditingkatkan dengan cara membuat *droplets* yang telah terbentuk terpecah dan terurai menjadi lebih kecil serta dengan membuat aliran campuran bahan bakar dan udara menjadi berolak. Secara mekanik hal ini dapat dilakukan dengan memasang

swirling grid pada *intake manifold*. *Swirling grid* merupakan pelat datar dengan ketebalan tertentu yang dilubangi dengan ukuran, bentuk lubang dan kemiringan tertentu yang simetris terhadap sumbu horisontal pelat *grid*. Lubang tersebut berfungsi melewatkan campuran bahan bakar dan udara.

Pada saat campuran bahan bakar dan udara melewati lubang-lubang *swirling grid*, maka kecepatannya akan meningkat karena adanya pengecilan penampang aliran serta terjadi penurunan tekanan (*pressure drop*). Hal ini diharapkan akan dapat meningkatkan proses atomisasi karena tegangan permukaan akan menurun sehingga *droplets* yang terbentuk akan terpecah menjadi lebih kecil dan bercampur kembali. Ketika aliran keluar dari *swirling grid* maka kecepatannya akan menurun. Pada saat inilah aliran diarahkan dengan lubang *swirling grid* yang berputar agar alirannya mengalami olakan atau turbulensi. Dengan adanya olakan atau turbulensi ini maka homogenitas campuran bahan bakar dan udara akan meningkat.

2.7 Unjuk Kerja Motor Otto

Pengujian dari suatu motor bakar adalah untuk mengetahui kinerja dari motor bakar itu sendiri. Parameter- parameter yang akan dibahas untuk mengetahui kinerja mesin dalam penelitian motor Otto empat langkah ini meliputi :

1. Torsi (T)
2. Daya efektif (Ne)
3. Konsumsi bahan bakar spesifik (SFCe).
4. Efisiensi Termal Efektif (η_e)
5. Emisi gas CO

2.7.1 Torsi (T)

Torsi merupakan gaya putar yang dihasilkan oleh poros mesin. Besarnya torsi suatu mesin dapat diukur dengan menggunakan alat yang disebut *dynamometer*, yang akan menunjukkan besarnya gaya atau beban pengereman pada poros, sehingga harga torsi dapat dicari dari hubungan antara perkalian besarnya beban pengereman dengan panjang lengan yang menghubungkan timbangan dengan poros. Besarnya torsi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = F \cdot L \quad [\text{Kg.m}] \dots\dots\dots (\text{Arismunandar, 2002: 32})$$

dengan :

$$T = \text{torsi yang dihasilkan (Kg.m)}$$

F = besarnya beban pengereman (Kg)

L = panjang lengan dinamometer = 0,358 (m).

2.7.2 Daya Efektif (Ne)

Daya efektif merupakan daya yang dihasilkan oleh poros engkol untuk menggerakkan beban. Daya efektif ini dibangkitkan oleh daya indikasi, yaitu suatu daya yang dihasilkan oleh torak, dimana sebagian dari daya ini digunakan untuk mengatasi gesekan mekanis, misalnya gesekan antara torak dan dinding silinder, gesekan antara poros dan bantalan, untuk menggerakkan peralatan Bantu (pendingin, kipas radiator, dsb), dan lainnya.

Daya efektif didapatkan dengan mengalikan torsi (T) dengan kecepatan anguler poros (ω). Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$Ne = T \cdot \omega = \frac{T \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 75} = \frac{T \cdot n}{716.2} \text{ [PS]} \dots\dots\dots(\text{Petrovsky; 1979 : 59})$$

dengan:

Ne = daya efektif (PS)

T = torsi (kg.m)

ω = kecepatan anguler poros (rad . detik⁻¹)

n = putaran poros (rpm)

2.7.3 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Efektif (SFCe)

Konsumsi bahan bakar spesifik efektif adalah jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan daya efektif sebesar 1 PS selama 1 jam. Konsumsi bahan bakar diukur dengan menggunakan tabung ukur yang telah diketahui volumenya. Bahan bakar akan dialirkan melalui tabung ukur ini kemudian diamati waktu yang diperlukan untuk menghabiskan bahan bakar sebesar volume tersebut pada saat mesin bekerja. Konsumsi bahan bakar tersebut dikonversikan ke dalam satuan kg/jam, maka akan diperoleh rumusan :

$$Fc = \frac{b}{t} \cdot \gamma_f \cdot \frac{3600}{1000} \text{ [kg . jam}^{-1}\text{]} \dots\dots\dots(\text{Petrovsky; 1979 : 63})$$

dengan:

Fc = konsumsi bahan bakar (kg . jam⁻¹)

b = volume bahan bakar selama t detik (ml)

t = waktu untuk menghabiskan bahan bakar sebanyak b ml (dt)

γ_f = berat spesifik bahan bakar (kg . lt⁻¹)

Dari nilai konsumsi bahan bakar (Fc) didapat *Specific Fuel Consumption effective* (SFCe) dengan persamaan sebagai berikut:

$$SFCe = \frac{FC}{Ne} \text{ [kg . PS}^{-1} \text{ . jam}^{-1}] \dots\dots\dots (\text{Petrovsky; 1979 : 63})$$

dengan:

SFCe = konsumsi bahan bakar spesifik efektif (kg . PS⁻¹ . jam⁻¹)

Fc = konsumsi bahan bakar (kg . jam⁻¹)

Ne = daya efektif (PS)

Konsumsi bahan bakar spesifik efektif dapat dijadikan ukuran ekonomis dan tidaknya pemakaian bahan bakar. Konsumsi bahan bakar spesifik efektif yang rendah menunjukkan efisiensi termal efektif yang tinggi karena efisiensi termal efektif berbanding terbalik dengan nilai konsumsi bahan bakar spesifik efektif.

2.7.4 Daya Bahan Bakar (N_{bb})

Daya bahan bakar adalah daya yang tersimpan dalam bahan bakar. Daya bahan bakar merupakan energi potensial yang terdapat dalam bahan bakar yang dapat diubah menjadi energi panas melalui proses pembakaran di ruang bakar. Besarnya daya bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan :

$$N_{bb} = \frac{Fc \cdot LHV_{bb}}{632} \text{ [PS] } \dots\dots\dots (\text{Operation Manual : 16})$$

dengan :

Fc = konsumsi bahan bakar (kg . jam⁻¹)

LHV_{bb} = nilai kalor rendah bahan bakar (kkal . kg⁻¹)

2.7.5 Daya Indikatif (N_i)

Daya indikatif adalah daya gas hasil pembakaran yang menggerakkan torak. Bahan bakar yang terbakar akan berubah menjadi gas hasil pembakaran yang memiliki temperatur dan tekanan tinggi yang akan menggerakkan torak dari TMA ke TMB pada langkah ekspansi. Daya indikatif dapat diketahui besarnya dengan menggunakan persamaan :

$$N_i = N_{bb} - \frac{(N_{Lgb} + N_{Lap})}{632} \text{ [PS] } \dots\dots\dots (\text{Arismunandar, 1986: 29})$$

dengan :

N_{bb} = daya bahan bakar (PS)

$N_{L_{gb}}$ = daya yang hilang pada gas buang (kcal . jam⁻¹)

$N_{L_{ap}}$ = daya yang hilang pada air pendingin (kcal . jam⁻¹)

$$N_{L_{gb}} = G_g \cdot C_{pg} \cdot (T_{eg} - T_{ud}) \cdot 3600 \text{ [kcal . jam}^{-1}\text{]} \dots\dots\dots (\text{Operation Manual : 11})$$

$$G_g = G_s + \frac{F_c}{3600} \text{ [kg . detik}^{-1}\text{]} \dots\dots\dots (\text{Operation Manual : 11})$$

$$G_s = \frac{\alpha \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \gamma_a (p_1 - p_2)} \text{ [kg . detik}^{-1}\text{]} \dots\dots (\text{Operation Manual : 9})$$

dengan :

α = koefisien kemiringan *nozzle* = 0,822

ϵ = koefisien udara = $\frac{p_1 - p_2}{p_1}$

γ_a = berat jenis udara pada kondisi ruangan pada saat pengujian

$$= \gamma_N \frac{p_a - \phi \cdot p_s}{760} \cdot \frac{273}{273 + \theta} + \phi \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (\text{Operation Manual : 9})$$

dengan :

ϕ = Kelembapan relatif

p_s = Tekanan udara standart pada temperatur tertentu

γ_w = Berat jenis air pada temperatur tertentu

θ = Temperatur bola kering

d = diameter *nozzle* = 0,048 m

g = gravitasi = 9,81 m . det⁻²

G_g = kapasitas aliran gas buang (kg . detik⁻¹)

Teg= temperatur gas buang (°C)

Tud= temperatur udara hisap (°C)

$$N_{L_{ap}} = W_w \cdot C_{pw} \cdot (T_{w_o} - T_{w_i}) \cdot \gamma_w \text{ [kcal . jam}^{-1}\text{]} \dots\dots\dots (\text{Operation Manual : 13})$$

dengan:

W_w = massa alir air pendingin (lt . jam⁻¹)

C_{pw} = panas jenis air (1 kcal . kg⁻¹ . °C⁻¹)

T_{w_o} = temperatur air keluar mesin (°C)

T_{w_i} = temperatur air masuk mesin (°C)



2.7.6 Efisiensi Termal Efektif (η_e)

Efisiensi termal efektif merupakan perbandingan antara kalor yang dirubah menjadi daya efektif dengan kalor yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar. Efisiensi termal efektif merupakan suatu ukuran untuk mengetahui ekonomis atau tidaknya dalam pemakaian bahan bakar, karena nilai dari efisiensi termal efektif berbanding terbalik dengan nilai konsumsi bahan bakar spesifik. Jadi jika konsumsi bahan bakar spesifik efektif semakin turun, maka efisiensi termal efektif akan meningkat. Basarnya efisiensi termal efektif dihitung dengan rumus :

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_b} = \frac{632 \cdot N_e}{F_c \cdot LHV_{bb}} = \frac{632}{SFC_e \cdot LHV_{bb}} (\%) \dots\dots\dots(Petrovsky; 1979 : 62)$$

dengan:

- η_e = efisiensi termal efektif (%)
- Q_e = jumlah kalor yang digunakan untuk daya efektif (kkal . kg⁻¹)
- Q_b = jumlah kalor dari pembakaran bahan bakar dan udara (kkal . kg⁻¹)
- LHV_{bb} = nilai kalor rendah bahan bakar (kkal . kg⁻¹)

2.7.7 Analisis Emisi Gas CO

Sisa hasil pembakaran pada motor bakar adalah berupa gas CO₂, O₂, CO dan polutan-polutan lain. Namun sebagian besar kandungan gas buang tersebut adalah CO₂, CO, O₂ dan N₂. Emisi gas buang yang dianalisis pada penelitian ini adalah gas CO, karena gas CO merupakan salah satu indikator sempurna atau tidaknya pembakaran yang terjadi. Kadar emisi gas CO dapat diukur dengan menggunakan *gas analyzer*.

2.8. Hipotesis

Dari uraian yang ada dapat diambil suatu hipotesis yaitu pemasangan *swirling grid* pada *intake manifold* dengan variasi diameter lubang *swirling grid* akan menghasilkan campuran bahan bakar dan udara yang berbeda dan lebih homogen serta proses pembakaran yang terjadi akan lebih sempurna sehingga karakteristik kinerja dari mesin bensin akan meningkat, dan kadar emisi gas karbonmonoksida (CO) akan menurun. Besarnya diameter lubang *swirling grid* yang efektif akan diperoleh pada saat unjuk kerja yang dihasilkan optimal.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian experimental semu (*Quasi Experimental Research*), dimana mesin diuji dalam kondisi tidak berpindah tempat. Metode ini dilakukan dengan cara membandingkan unjuk kerja mesin yang meliputi torsi, daya efektif, daya indikasi, konsumsi bahan bakar spesifik, dan efisiensi thermal, serta emisi gas CO pada mesin Otto empat langkah tanpa menggunakan *swirling grid* dengan yang menggunakan *swirling grid* dengan variasi diameter lubang.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini ada dua macam yaitu :

1. Variabel bebas (*independent variable*)

yaitu variabel yang bebas ditentukan oleh peneliti sebelum melakukan penelitian.

Dalam penelitian ini, variabel bebas yang digunakan adalah:

- Putaran poros 1300, 1800, 2300, 2800 dan 3300 rpm.
- Diameter lubang *swirling grid* yaitu 5 mm, 6 mm, dan 7 mm

2. Variabel terikat (*dependent variable*)

yaitu variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan oleh peneliti, tetapi besarnya tergantung pada variabel bebasnya. Penelitian ini memiliki variabel terikat yang meliputi:

- Torsi (kg.m)
- Daya efektif (PS)
- Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (Kg / PS.Jam)
- Daya bahan bakar (PS)
- Daya indikasi (PS)
- Efisiensi termal efektif (%)
- Emisi gas CO (%)

3. Variabel kontrol (*control variable*)

yaitu variabel yang ditentukan oleh peneliti, dan nilainya dikondisikan konstan.

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Sudut lubang *swirling grid* yaitu 20⁰ dan ketebalan 10 mm.
- Buka *throttle* motor bensin yaitu 34%.

- Daya poros maksimum : 80 BHP / 5000 rpm
- Perbandingan kompresi : 9 : 1
- Pendingin : Air dengan *cooling tower*
- Negara pembuat : Jepang

3.3.2 Peralatan Bantu

Peralatan bantu yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Flow meter* (meter alir)

Berupa tabung pengukur berisi sejumlah bahan bakar dengan volume tertentu. Digunakan untuk mengukur konsumsi bahan bakar yang dipakai selama pengujian.

2. *Tachometer*

Digunakan untuk mengukur kecepatan putaran poros mesin. Satuan yang digunakan adalah rpm (*rotation per minute*).

3. *Dinamometer*

Digunakan untuk mengukur gaya pengereman pada poros *output*.

4. *Stop watch*

Digunakan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan motor Otto untuk menghabiskan bahan bakar dengan volume tertentu.

5. *Barometer*

Digunakan untuk mengukur tekanan udara ruangan selama penelitian berlangsung.

6. *Termometer*

Digunakan untuk mengukur temperatur ruangan selama penelitian.

7. *Hidrometer*

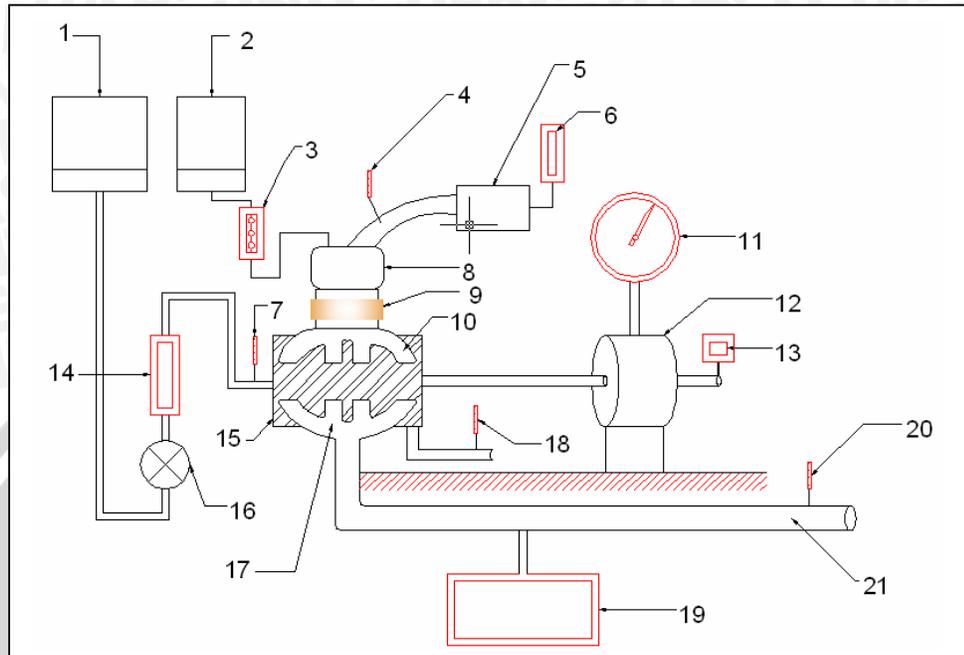
Digunakan untuk mengukur massa jenis bahan bakar yang digunakan untuk pengujian (bensin).

8. *Higrometer*

Digunakan untuk mengukur kelembapan relatif ruangan selama penelitian.

3.4 Instalasi Pengujian

Instalasi dan alat yang digunakan dalam pengujian adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1 Susunan peralatan uji

Keterangan gambar :

- | | |
|---|---|
| 1. Tangki air | 12. Prony brake |
| 2. Tangki bahan bakar | 13. Tachometer |
| 3. Fuel Consumption meter | 14. Water flow meter |
| 4. Indikator temperatur udara | 15. Engine |
| 5. Filter udara | 16. Katup pipa air pendingin |
| 6. Manometer | 17. Exhaust manifold |
| 7. Indikator temperatur air pendingin masuk | 18. Indikator temperatur air pendingin keluar |
| 8. Karburator | 19. Gas analyzer |
| 9. Swirling Grid | 20. Indikator temperatur gas |
| 10. Intake manifold | 21. Knalpot |
| 11. Dynamometer | |

3.5 Tempat Penelitian

Penelitian tentang motor Otto tanpa menggunakan *swirling grid* dengan yang menggunakan *swirling grid* dengan variasi diameter lubang. terhadap unjuk kerja motor Otto empat langkah ini dilakukan di laboratorium Motor Bakar Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

3.6 Pelaksanaan Penelitian

3.6.1 Penyusunan Alat Penelitian

Sebelum penelitian dilaksanakan dilakukan persiapan penyusunan alat- alat penelitian. Mempersiapkan instalasi utama (gambar 3.1) yang dirangkai menjadi satu kesatuan. Kemudian dilakukan persiapan peralatan pengujian serta penyetingan mesin dalam kondisi baik.

3.6.2 Prosedur Penelitian

Langkah- langkah yang dilakukan untuk setiap pengujian adalah sebagai berikut:

1. Proses pengambilan data dengan tahapan:

▪ Tahap pertama:

Pengambilan data dilakukan pada peralatan utama yang telah dilengkapi dengan peralatan bantu tanpa dipasang *swirling grid* pada *intake manifold*. Pengambilan data dimulai dari putaran 1300 rpm sampai dengan 3300 rpm dengan interval kenaikan sebesar 500 rpm dengan bukaan *throttle* 34 %. Untuk memperoleh data yang lebih teliti dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali untuk setiap putaran.

▪ Tahap kedua:

Analog dengan tahap pertama, akan tetapi dipasang *swirling grid* pada *intake manifold* ke ruang bakar mulai dari *swirling grid* dengan diameter lubang 5 mm, 6 mm, dan 7 mm.

2. Data yang dicatat meliputi:

- Besarnya putaran (rpm)
- Gaya pengereman (kg)
- Konsumsi bahan bakar (lt . jam⁻¹)
- Temperatur air pendingin masuk mesin (°C)
- Temperatur air pendingin keluar mesin (°C)
- Temperatur udara masuk karburator (°C)

- Temperatur gas buang ($^{\circ}\text{C}$)
- Perbedaan tekanan antara tekanan udara luar dengan tekanan udara masuk karburator (mmH_2O)
- Debit air pendingin masuk mesin ($\text{lt} \cdot \text{jam}^{-1}$)

3.7 Analisis Statistika

Untuk mengolah data yang telah diperoleh dipergunakan analisis varian dua arah. Dengan analisis varian dua arah akan diketahui ada tidaknya pengaruh dari variasi putaran poros motor Otto dan pengaruh variasi diameter lubang *swirling grid* yang dipasang pada *intake manifold* serta pengaruh interaksi keduanya terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO dan efisiensi termal efektif.

Putaran poros motor Otto mempunyai level A_1, A_2, \dots, A_r dan variasi diameter lubang *swirling grid* mempunyai level B_1, B_2, \dots, B_c . Jumlah pengamatan tiap sel adalah t kali dari rancangan dua kategori A dan B serta masing-masing kategori terdiri atas r dan c level. Bila pengaruh interaksi antar putaran poros motor Otto pada level ke i dan pengaruh diameter lubang pada level ke j dinyatakan dengan $(\alpha\beta)_{ij}$. Maka nilai setiap pengamatan ditulis dengan model matematika sebagai berikut:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

dengan:

Y_{ijk} : nilai setiap pengamatan

μ : nilai rata-rata dari seluruh pengamatan

α_i : pengaruh putaran poros ke i

β_j : pengaruh diameter lubang ke j

$(\alpha\beta)_{ij}$: pengaruh interaksi putaran poros motor Otto ke i dan diameter lubang *swirling grid* ke j

E_{ijk} : simpangan pengamatan

Yang akan kita uji dari pengamatan ini adalah:

1. α : pengaruh (efek) dari putaran poros
2. β : pengaruh (efek) dari diameter lubang
3. $\alpha\beta$: pengaruh interaksi dari putaran poros motor Otto dan diameter lubang

Adapun hipotesis yang dipergunakan adalah sebagai berikut:

I $H_0^1 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_i$ (tidak ada pengaruh variasi putaran poros terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO, dan efisiensi termal efektif).

H_1^1 : paling sedikit satu $\alpha_i \neq 0$ (ada pengaruh variasi putaran poros terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO, dan efisiensi termal efektif).

II $H_0^2 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_j$ (tidak ada pengaruh variasi diameter lubang *swirling grid* yang dipasang pada *intake manifold* ke ruang bakar terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO, dan efisiensi termal efektif).

H_1^2 : paling sedikit satu $\beta_j \neq 0$ (ada pengaruh variasi diameter lubang *swirling grid* yang dipasang pada *intake manifold* ke ruang bakar terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO, dan efisiensi termal efektif).

III $H_0^3 : (\alpha\beta)_{11} = (\alpha\beta)_{12} = \dots = (\alpha\beta)_{ij}$ (tidak ada pengaruh variasi putaran poros dan variasi diameter lubang *swirling grid* yang dipasang pada *intake manifold* ke ruang bakar terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO, dan efisiensi termal efektif).

H_1^3 : paling sedikit satu $(\alpha\beta) \neq 0$ (ada pengaruh variasi putaran poros dan variasi diameter lubang *swirling grid* yang dipasang pada *intake manifold* ke ruang bakar terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO, dan efisiensi termal efektif).

Tabel 3.1. Rancangan pengamatan model dua arah dengan pengulangan

| Faktor | | VARIASI DIAMETER | | | | | Σ Baris | Rata-rata |
|---------------------------------|----------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | B ₁ | ... | B _j | ... | B _c | | |
| P U T A R A N | A ₁ | X ₁₁₁ | | X _{1j1} | | X _{1c1} | T _{1..} | X̄ _{1..} |
| | | X ₁₁₂ | | X _{1j2} | | X _{1c2} | | |
| | | ... | | ... | | ... | | |
| | | X _{11t} | | X _{1jt} | | X _{1ct} | | |
| | | | T _{11.} | | T _{1j.} | | T _{1c.} | |
| | A _i | X _{i11} | | X _{ij1} | | X _{ic1} | T _{i..} | X̄ _{i..} |
| | | X _{i12} | | X _{ij2} | | X _{ic2} | | |
| | | ... | | ... | | ... | | |
| | | X _{i1t} | | X _{ijt} | | X _{ict} | | |
| | | | T _{i1.} | | T _{ij.} | | T _{ic.} | |
| | A _r | X _{r11} | | X _{rj1} | | X _{rc1} | T _{r..} | X̄ _{r..} |
| | | X _{r12} | | X _{rj2} | | X _{rc2} | | |
| ... | | | ... | | ... | | | |
| X _{r1t} | | | X _{rjt} | | X _{rc t} | | | |
| | | T _{r1.} | | T _{rj.} | | T _{rc.} | | |
| Σ kolom | | T _{.1.} | | T _{.j.} | | T _{.c.} | T _{...} | |
| Rata-rata | | X̄ _{.1.} | | X̄ _{.j.} | | X̄ _{.c.} | | X̄ _{...} |

Sumber : Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., 96, 2006

Didalam perhitungan menggunakan rumus sebagai berikut ini:

1. Jumlah kuadrat total (JKT)

$$JKT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk}^2 - \frac{(T_{...})^2}{rct}$$

2. Jumlah kuadrat putaran poros (JKA)

$$JKA = \frac{\sum_{i=1}^r T_{i..}^2}{ct} - \frac{(T_{...})^2}{rct}$$

3. Jumlah kuadrat variasi diameter (JKB)

$$JKB = \frac{\sum_{j=1}^c T_{.j.}^2}{rt} - \frac{(T_{...})^2}{rct}$$

4. Jumlah pengaruh interaksi perlakuan (JKP)

$$JKP = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c T_{ij.}^2}{t} - \frac{(T_{...})^2}{rct} \rightarrow JKAB = JKP - JKA - JKB$$

5. Jumlah kuadrat galat (JKG)

$$JKG = JKT - JKP = JKT - JKA - JKAB$$

Apabila masing-masing suku dibagi dengan derajat bebasnya, akan diperoleh nilai varian dari masing-masing suku tersebut. Nilai ini sering disebut dengan kuadrat tengah yang disingkat KT. Nilai varian tersebut adalah:

1. Kuadrat tengah putaran poros (KTA)

$$KTA = \frac{JKA}{(r-1)}$$

2. Kuadrat tengah variasi diameter (KTB)

$$KTB = \frac{JKB}{(c-1)}$$

3. Kuadrat tengah interaksi putaran poros dan variasi diameter (KTAB)

$$KTAB = \frac{JKAB}{(r-1)(c-1)}$$

4. Kuadrat tengah galat (KTG)

$$KTG = \frac{JKG}{rc(t-1)}$$

Untuk menguji ketiga hipotesis diatas kita mencari harga F_{hitung} masing-masing sumber keragaman (putaran poros, variasi diameter dan interaksi putaran poros dan variasi diameter) kemudian hasilnya dibandingkan dengan F_{tabel} pada derajat bebas yang sesuai dengan nilai α tertentu. Nilai F_{hitung} dari masing-masing sumber keragaman adalah sebagai berikut:

1. F_{hitung} dari putaran

$$F_1 = \frac{KTA}{KTG}$$

2. F_{hitung} dari variasi diameter lubang

$$F_2 = \frac{KTB}{KTG}$$

3. F_{hitung} dari interaksi putaran dan variasi diameter lubang

$$F_3 = \frac{KTAB}{KTG}$$

Tabel 3.2. Analisis varian

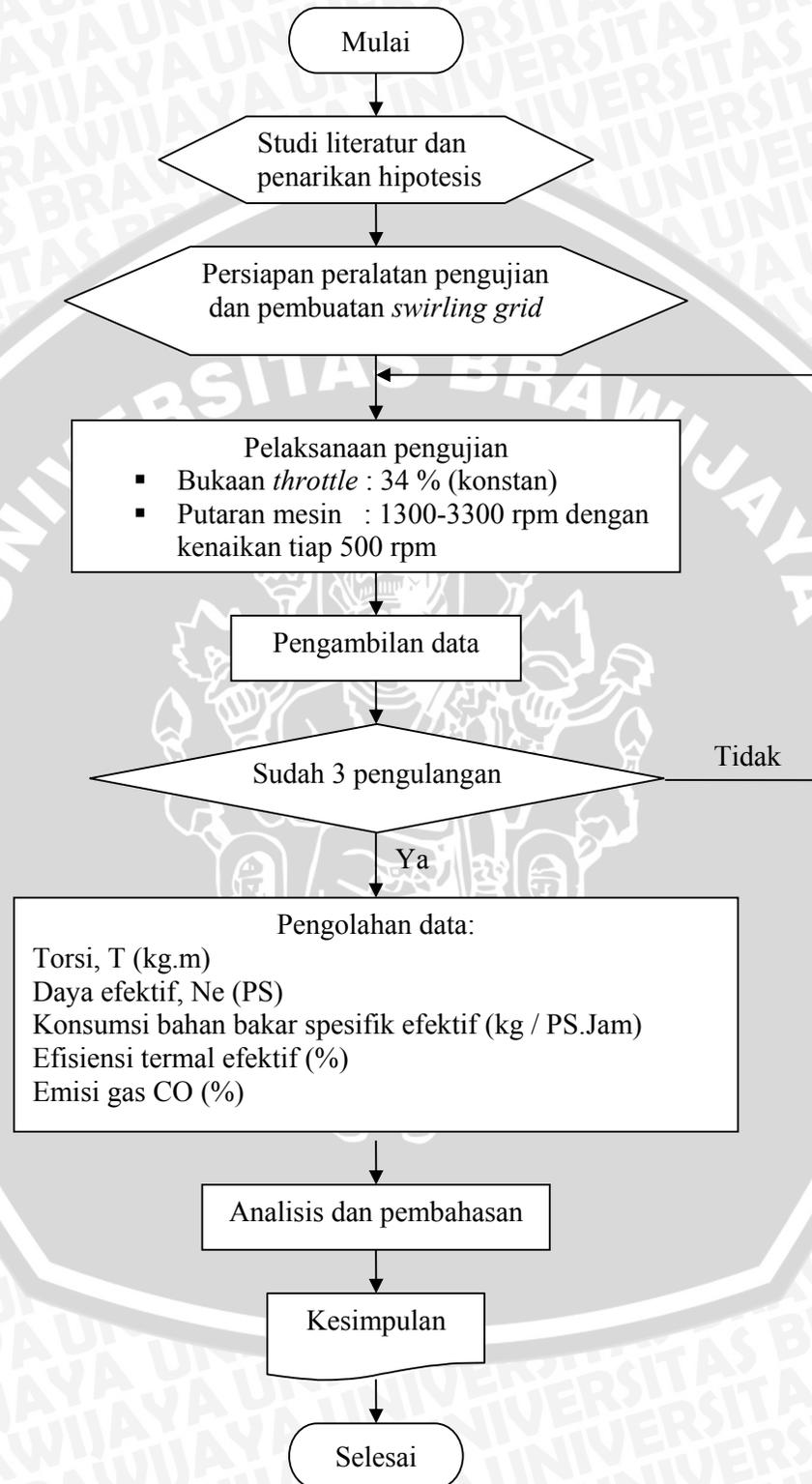
| Sumber Varian | JK | Db | KT | F _{hitung} | F _α |
|---------------|------|---|------|---------------------|----------------|
| Antar A | JKA | db ₁ =r - 1 | KTA | F ₁ | |
| Antar B | JKB | db ₂ =c - 1 | KTB | F ₂ | |
| Interaksi AB | JKAB | db ₃ =db ₁ .db ₂ | KTAB | F ₃ | |
| Galat | JKG | db ₄ =rc(t - 1) | KTG | | |
| Total | JKT | rct - 1 | | | |

Sumber : Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., 98, 2006

Kesimpulan yang diperoleh:

1. Bila $FA_{hitung} > FA_{tabel}$, maka H_0^1 ditolak dan H_1^1 diterima, ini menyatakan bahwa variasi putaran mesin berpengaruh terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO, dan efisiensi termal efektif.
2. Bila $FB_{hitung} > FB_{tabel}$, maka H_0^2 ditolak dan H_1^2 diterima, ini menyatakan bahwa variasi diameter lubang *swirling grid* yang dipasang pada *intake manifold* berpengaruh terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO, dan efisiensi termal efektif.
3. Bila $FAB_{hitung} > FAB_{tabel}$, maka H_0^3 ditolak dan H_1^3 diterima, ini menyatakan bahwa variasi putaran mesin dan variasi diameter lubang *swirling grid* yang dipasang pada *intake manifold* berpengaruh terhadap konsumsi bahan bakar spesifik efektif, torsi, daya efektif, emisi gas CO, dan efisiensi termal efektif.

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3 Diagram alir pelaksanaan penelitian

**BAB IV
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

4.1 Analisis Data

4.1.1 Data Hasil Pengujian

Data yang diperoleh selama pengujian adalah sebagai berikut :

1. Pengujian : Variasi putaran
2. Bukaannya *Throttle* : 34 %
3. Temperatur bola kering : 28 °C
4. Temperatur bola basah : 23 °C
5. Kelembaban relatif : 64 %
6. Tekanan udara : 716 mmHg
7. Volume bahan bakar (b) : 30 ml
8. LHV bahan bakar : 9596.4 kkal.kg⁻¹

Tabel 4.1 Data hasil pengujian terhadap motor Otto empat langkah standar.

| No | putaran (rpm) | F (kg) | t (s) | P ₁ -P ₂ (mmH ₂ O) | Ww (lt/jam) | Tw _i (°C) | Two (°C) | Tud (°C) | Teg (°C) | V _{co} (%) |
|----|------------------|-----------|----------|--|----------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|
| 1 | 1300 | 20.50 | 22.90 | 3.9 | 440 | 28 | 44 | 31 | 480 | 1.771 |
| | | 20.50 | 22.91 | 3.9 | 450 | 28 | 46 | 31 | 480 | 1.769 |
| | | 20.50 | 22.91 | 3.9 | 450 | 28 | 48 | 32 | 482 | 1.527 |
| 2 | 1800 | 18.25 | 19.94 | 5.5 | 480 | 28 | 50 | 32 | 520 | 0.654 |
| | | 18.25 | 20.01 | 5.5 | 480 | 28 | 50 | 32 | 525 | 0.678 |
| | | 18.25 | 20.10 | 5.5 | 480 | 28 | 50 | 32 | 530 | 0.723 |
| 3 | 2300 | 15.25 | 17.81 | 6.9 | 560 | 28 | 51 | 32 | 555 | 0.800 |
| | | 15.25 | 17.77 | 7.0 | 540 | 28 | 51 | 32 | 560 | 0.784 |
| | | 15.25 | 17.58 | 7.0 | 540 | 28 | 53 | 32 | 560 | 0.953 |
| 4 | 2800 | 12.00 | 16.17 | 8.0 | 520 | 28 | 54 | 32 | 590 | 0.934 |
| | | 12.00 | 16.27 | 7.9 | 560 | 28 | 55 | 32 | 585 | 0.919 |
| | | 12.00 | 16.25 | 8.0 | 560 | 28 | 55 | 32 | 585 | 0.908 |
| 5 | 3300 | 9.50 | 15.50 | 8.7 | 580 | 28.5 | 56 | 32 | 610 | 1.021 |
| | | 9.50 | 15.53 | 8.6 | 580 | 28.5 | 56 | 32 | 620 | 1.047 |
| | | 9.50 | 15.40 | 8.6 | 580 | 29 | 57 | 32 | 620 | 1.032 |

Tabel 4.2. Data hasil pengujian terhadap motor Otto empat langkah dengan pemasangan *swirling grid* dengan diameter lubang 5 mm

| No | putaran | F | t | P ₁ -P ₂ | Ww | Twi | Two | Tud | Teg | V _{CO} |
|----|---------|-------|-------|--------------------------------|----------|------|------|------|------|-----------------|
| | (rpm) | (kg) | (s) | (mmH ₂ O) | (lt/jam) | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) | (%) |
| 1 | 1300 | 20.50 | 22.67 | 3.7 | 450 | 26 | 45 | 31 | 480 | 1.644 |
| | | 20.50 | 23.82 | 3.8 | 420 | 26 | 45 | 31 | 490 | 1.881 |
| | | 20.50 | 23.23 | 3.8 | 440 | 26 | 47 | 31 | 490 | 1.780 |
| 2 | 1800 | 17.50 | 20.25 | 5.0 | 500 | 26 | 47 | 31 | 510 | 0.912 |
| | | 17.50 | 20.41 | 5.1 | 520 | 26 | 48 | 31 | 510 | 0.855 |
| | | 17.50 | 20.50 | 5.1 | 520 | 26 | 48 | 31 | 515 | 0.787 |
| 3 | 2300 | 14.25 | 18.14 | 6.2 | 540 | 26 | 50 | 31 | 543 | 0.910 |
| | | 14.25 | 18.18 | 6.2 | 540 | 26 | 50 | 31 | 550 | 0.886 |
| | | 14.25 | 18.15 | 6.2 | 540 | 26 | 50 | 31 | 550 | 1.007 |
| 4 | 2800 | 11.00 | 17.00 | 7.0 | 600 | 26 | 51 | 31 | 575 | 0.878 |
| | | 11.00 | 16.99 | 7.1 | 620 | 26 | 52 | 32 | 590 | 0.906 |
| | | 11.00 | 17.02 | 7.1 | 620 | 26 | 52 | 32 | 590 | 0.975 |
| 5 | 3300 | 8.75 | 16.28 | 7.8 | 640 | 26 | 54 | 32 | 610 | 1.139 |
| | | 8.75 | 16.32 | 7.8 | 640 | 26 | 54 | 32 | 615 | 1.152 |
| | | 8.75 | 16.23 | 7.8 | 640 | 26 | 54 | 32 | 610 | 1.090 |

Tabel 4.3. Data hasil pengujian terhadap motor Otto empat langkah dengan pemasangan *swirling grid* dengan diameter lubang 6 mm.

| No | putaran | F | t | P ₁ -P ₂ | Ww | Twi | Two | Tud | Teg | V _{CO} |
|----|---------|-------|-------|--------------------------------|----------|------|------|------|------|-----------------|
| | (rpm) | (kg) | (s) | (mmH ₂ O) | (lt/jam) | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) | (%) |
| 1 | 1300 | 21.25 | 22.19 | 4.0 | 400 | 26 | 44 | 31 | 490 | 1.587 |
| | | 21.25 | 22.46 | 4.0 | 420 | 26 | 46 | 31 | 492 | 1.628 |
| | | 21.25 | 23.05 | 4.0 | 440 | 26 | 47 | 31 | 498 | 1.612 |
| 2 | 1800 | 18.25 | 20.38 | 5.2 | 460 | 26 | 48 | 31 | 520 | 0.414 |
| | | 18.25 | 20.12 | 5.2 | 500 | 27 | 49 | 31 | 520 | 0.571 |
| | | 18.25 | 20.29 | 5.2 | 480 | 27 | 50 | 31 | 520 | 0.429 |
| 3 | 2300 | 16.00 | 17.61 | 7.0 | 520 | 27 | 50 | 31 | 560 | 0.343 |
| | | 16.00 | 17.75 | 7.0 | 520 | 27 | 51 | 31 | 560 | 0.382 |
| | | 16.00 | 17.78 | 7.0 | 540 | 27 | 51 | 31 | 565 | 0.352 |
| 4 | 2800 | 12.50 | 16.34 | 8.0 | 580 | 27 | 53 | 32 | 590 | 0.455 |
| | | 12.50 | 16.28 | 8.0 | 600 | 27 | 54 | 32 | 593 | 0.459 |
| | | 12.50 | 16.25 | 8.0 | 620 | 27 | 54 | 32 | 590 | 0.456 |
| 5 | 3300 | 10.00 | 15.62 | 9.0 | 640 | 27.5 | 56 | 32 | 615 | 0.565 |
| | | 10.00 | 15.35 | 9.0 | 660 | 27.5 | 56 | 32 | 620 | 0.566 |
| | | 10.00 | 15.38 | 9.0 | 680 | 28 | 56 | 32 | 615 | 0.580 |

Tabel 4.4. Data hasil pengujian terhadap motor Otto empat langkah dengan pemasangan *swirling grid* dengan diameter lubang 7 mm.

| No | putaran | F | t | P ₁ -P ₂ | Ww | Twi | Two | Tud | Teg | V _{CO} |
|----|---------|-------|-------|--------------------------------|----------|------|------|------|------|-----------------|
| | (rpm) | (kg) | (s) | (mmH ₂ O) | (lt/jam) | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) | (%) |
| 1 | 1300 | 21.25 | 22.07 | 4.0 | 420 | 29 | 47 | 32 | 470 | 1.920 |
| | | 21.25 | 22.27 | 3.9 | 420 | 29 | 48 | 32 | 480 | 1.908 |
| | | 21.25 | 22.83 | 3.9 | 420 | 29 | 49 | 32 | 482 | 1.870 |
| 2 | 1800 | 18.75 | 19.31 | 5.7 | 440 | 29 | 50 | 31.5 | 520 | 0.533 |
| | | 18.75 | 19.47 | 5.7 | 480 | 29 | 50 | 31.5 | 525 | 0.510 |
| | | 18.75 | 19.64 | 5.7 | 460 | 29 | 51 | 32 | 525 | 0.580 |
| 3 | 2300 | 15.75 | 17.45 | 7.0 | 480 | 29 | 53 | 32 | 560 | 0.509 |
| | | 15.75 | 17.59 | 7.0 | 500 | 29 | 54 | 32 | 560 | 0.471 |
| | | 15.75 | 17.71 | 7.0 | 500 | 29 | 54 | 32 | 565 | 0.646 |
| 4 | 2800 | 12.00 | 16.20 | 8.0 | 520 | 29 | 55 | 32 | 590 | 0.665 |
| | | 12.00 | 16.14 | 8.0 | 500 | 29 | 56 | 32 | 593 | 0.675 |
| | | 12.00 | 16.45 | 7.9 | 480 | 29 | 56 | 32 | 596 | 0.666 |
| 5 | 3300 | 9.75 | 15.53 | 8.5 | 500 | 29 | 57 | 32 | 620 | 0.795 |
| | | 9.75 | 15.55 | 8.5 | 520 | 29 | 58 | 32 | 620 | 0.771 |
| | | 9.75 | 15.55 | 8.5 | 520 | 29 | 58 | 32 | 620 | 0.774 |

4.1.2 Perhitungan Data

Dari hasil pengujian dapat dilakukan pengolahan data. Sebagai contoh perhitungan diambil data dari pengujian pemasangan *swirling grid* berdiameter 7 mm pada *intake manifold* terhadap torsi, daya efektif, daya bahan bakar, daya indikasi, konsumsi bahan bakar spesifik efektif, efisiensi termal efektif dan emisi gas CO pada motor Otto empat langkah. Adapun data yang diambil adalah sebagai berikut:

1. Putaran mesin (n) = 1300 rpm
2. Besar beban pengereman (F) = 21.25 kg
3. Panjang lengan *dynamometer* (L) = 0.358 m
4. Waktu konsumsi bahan bakar (t) = 22.07 detik
5. Debit air pendinginan (Ww) = 420 lt/jam
6. Temperatur air pendinginan masuk (Twi) = 29 °C
7. Temperatur air pendinginan keluar (Two) = 47 °C
8. Temperatur udara masuk (Tud) = 32 °C
9. Temperatur gas buang (Teg) = 470 °C
10. Berat spesifik bahan bakar (γ_f) = 0.722 kg.liter⁻¹
11. Nilai kalor rendah bahan bakar (LHV) = 9596.4 kkal.kg⁻¹

Dari hasil data pengujian motor bakar empat langkah pada table 4.1 didapatkan nilai dari:

1. Torsi (T)

$$\begin{aligned} T &= F.L \\ &= 21,25 \cdot 0,358 \\ &= 7,6075 \text{ kg.m} \end{aligned}$$

2. Daya efektif (N_e)

$$\begin{aligned} N_e &= \frac{T.n}{716,2} \\ &= \frac{7,6075 \cdot 1300}{716,2} \\ &= 13,809 \text{ PS} \end{aligned}$$

3. Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (SFC_e)

$$\begin{aligned} F_c &= \frac{b}{t} \cdot \gamma_f \cdot \frac{3600}{1000} \\ &= \frac{30}{22,07} \cdot 0,722 \cdot \frac{3600}{1000} \\ &= 3,533 \text{ kg} \cdot \text{jam}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SFC_e &= \frac{F_c}{N_e} \\ &= \frac{3,533}{13,809} \\ &= 0,25586 \text{ kg} \cdot \text{PS}^{-1} \cdot \text{jam}^{-1} \end{aligned}$$

4. Daya Bahan Bakar (N_{bb})

$$\begin{aligned} N_{bb} &= \frac{F_c \cdot LHV_{bb}}{632} \\ &= \frac{3,533 \cdot 9596,4}{632} \\ &= 53,6475 \text{ PS} \end{aligned}$$

5. Aliran udara melalui *nozzle* (G_s)

Untuk mengetahui massa alir udara yang masuk ke dalam karburator digunakan persamaan sebagai berikut (*Operation Manual* : 9):

$$G_s = \frac{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \gamma_a \cdot (P_1 - P_2)}$$

$$\gamma_a = \gamma_N \cdot \frac{P_1 - \varphi \cdot P_s}{760} \cdot \frac{273}{273 + TBK} + \varphi \cdot \gamma_w$$

dengan:

G_s = Masa alir udara lewat *nozzle* ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)

α = Koefisien aliran disekitar *nozzle* (0.822)

ε = Koefisien untuk fluida inkompresibel menjadi kompresibel,
dari tabel.

$$= \frac{P_1 - P_2}{P_1}$$

π = 3.14

d = Diameter *nozzle* (0.048 m)

g = $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

γ_a = Berat spesifik udara pada kondisi temperatur ruangan θ °C ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

$P_1 - P_2$ = Perbedaan tekanan disekitar *nozzle* (mmH_2O)

γ_N = Berat spesifik udara pada temperatur θ °C dan 1 atm ($1.293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

P_1 = Tekanan udara ruangan (mmHg)

γ_w = Berat spesifik uap air pada temperatur θ °C ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

P_s = Tekanan uap air pada temperatur θ °C (mmHg)

$$\begin{aligned} \gamma_a &= \gamma_N \cdot \frac{P_1 - \phi \cdot P_s}{760} \cdot \frac{273}{273 + \text{TBK}} + \phi \cdot \gamma_w \\ &= 1,293 \cdot \frac{716 - (0,64 \cdot 28,35)}{760} \cdot \frac{273}{273 + 28} + 0,64 \cdot 0,02725 \\ &= 1.0942692 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_s &= \frac{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \gamma_a \cdot (P_1 - P_2)} \\ &= \frac{0,822 \cdot 0,999873 \cdot 3,14 \cdot 0,048^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,0942692 \cdot (4,0)} \\ &= 0,013783 \text{ kg}\cdot\text{detik}^{-1} \end{aligned}$$

6. Kapasitas Aliran Gas Buang (Gg)

Untuk mengetahui massa alir gas buang digunakan persamaan sebagai berikut (*Operation Manual*: 12):

$$\begin{aligned} G_g &= G_s + \frac{F_c}{3600} \\ &= 0,013783 + \frac{3,533}{3600} \\ &= 0,014764 \text{ kg}\cdot\text{detik}^{-1} \end{aligned}$$

7. Daya Indikasi (N_i)

$$\begin{aligned} N_{Lgb} &= G_g \cdot C_{pg} \cdot (T_{eg} - T_{ud}) \cdot 3600 \\ &= 0,014764 \cdot 0,285 \cdot (470 - 32) \cdot 3600 \end{aligned}$$

$$= 6634,765 \text{ kkal} \cdot \text{jam}^{-1}$$

$$N_{Lap} = W_w \cdot C_{pw} \cdot (T_{w0} - T_{wi})$$

$$= 420 \cdot 1 \cdot (47 - 29)$$

$$= 7560 \text{ kkal} \cdot \text{jam}^{-1}$$

$$\begin{aligned} N_i &= N_{bb} - \frac{(N_{Lgb} + N_{Lap})}{632} \\ &= 53,6475 - \frac{6634,765 + 7560}{632} \end{aligned}$$

$$= 31,1875 \text{ PS}$$

8. Efisiensi termal efektif (η_{te})

$$\begin{aligned} \eta_e &= \frac{632}{\text{SFC}_e \cdot \text{LHV}_{bb}} \\ &= \frac{632}{0,25586 \cdot 9596,4} \cdot 100\% \\ &= 25,7396\% \end{aligned}$$

9. Perbandingan udara bahan bakar (AFR)

$$\begin{aligned} \text{AFR} &= \frac{G_s}{\text{FC}} \\ &= \frac{0,013783}{3,533/3600} \\ &= 14,044 \end{aligned}$$

Analog dengan data yang pertama, maka diperoleh nilai dari torsi, daya efektif, konsumsi bahan bakar spesifik efektif, daya bahan bakar, daya indikasi, efisiensi termal efektif dan emisi gas CO dari masing-masing data yang lain. Nilai-nilai tersebut dapat dilihat dalam lampiran 1.

4.1.3 Analisis varian

Data-data yang diperoleh dari hasil perhitungan dianalisis dengan menggunakan analisa varian dua arah. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui ada tidaknya perbedaan atau pengaruh putaran poros mesin, dan pemasangan *swirling grid* serta interaksi antara keduanya terhadap unjuk kerja motor Otto empat langkah.

Hipotesis yang digunakan dalam analisis statistik ini adalah:

- I $H_0^1 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_i$ (tidak ada pengaruh variasi putaran poros terhadap unjuk kerja motor Otto empat langkah)
 H_1^1 : paling sedikit satu $\alpha_i \neq 0$ (ada pengaruh variasi putaran poros terhadap unjuk kerja motor Otto empat langkah)
- II $H_0^2 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_j$ (tidak ada pengaruh variasi diameter lubang *swirling grid* pada *intake manifold* terhadap unjuk kerja motor Otto empat langkah)
 H_1^2 : paling sedikit satu $\beta_j \neq 0$ (ada pengaruh variasi diameter lubang *swirling grid* pada *intake manifold* terhadap unjuk kerja motor Otto empat langkah)
- III $H_0^3 : (\alpha\beta)_{11} = (\alpha\beta)_{12} = \dots = (\alpha\beta)_{ij}$ (tidak ada pengaruh variasi putaran poros dan variasi diameter lubang *swirling grid* pada *intake manifold* terhadap unjuk kerja motor Otto empat langkah)
 H_1^3 : paling sedikit satu $(\alpha\beta) \neq 0$ (ada pengaruh variasi putaran poros dan variasi diameter lubang *swirling grid* pada *intake manifold* terhadap unjuk kerja motor Otto empat langkah)

4.1.3.1 Analisis varian untuk torsi yang dihasilkan

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh putaran poros, variasi diameter *swirling grid* dan interaksi antara keduanya terhadap torsi yang dihasilkan motor Otto empat langkah empat silinder. Dari perhitungan statistik didapatkan analisis varian untuk torsi yang ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4.5. Analisis varian dua arah untuk torsi

| Sumber keragaman | db | JK | KT | Fhitung | Ftabel |
|-----------------------------------|----|-------------|------------|-------------|---------|
| Tingkat putaran (A) | 4 | 130.22984 | 32.5574609 | 1.22286E+32 | 2.60597 |
| Diameter <i>swirling grid</i> (B) | 3 | 1.71098 | 0.5703298 | 2.14216E+30 | 2.83874 |
| Interaksi faktor A dan B | 12 | 0.295578 | 0.02463152 | 9.2516E+28 | 2.00345 |
| Galat | 40 | 1.06496E-29 | 2.6624E-31 | | |
| Total | 59 | 132.2364111 | | | |

Dari tabel diperoleh kesimpulan:

- $F_{A \text{ hitung}} > F_{A \text{ tabel}}$ maka H_0^1 ditolak dan H_1^1 diterima, ini berarti bahwa putaran poros berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan motor Otto empat langkah.
- $F_{B \text{ hitung}} > F_{B \text{ tabel}}$ H_0^2 ditolak dan H_1^2 diterima, ini berarti bahwa variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan motor Otto empat langkah.

- c. $F_{AB \text{ hitung}} > F_{AB \text{ tabel}}$ maka H_0^3 ditolak dan H_1^3 diterima, ini berarti bahwa interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan motor Otto empat langkah.

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa putaran poros, variasi diameter *swirling grid*, dan interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* mempunyai pengaruh yang nyata terhadap torsi yang dihasilkan dengan tingkat keyakinan 95 %.

4.1.3.2 Analisis varian untuk konsumsi bahan bakar spesifik efektif yang dihasilkan

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh putaran poros, variasi diameter *swirling grid* dan interaksi antara keduanya terhadap SFCE yang dihasilkan motor Otto empat langkah empat silinder. Dari perhitungan statistik didapatkan analisis varian untuk SFCE yang ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4.6. Analisis varian dua arah untuk SFCE

| Sumber keragaman | db | JK | KT | Fhitung | Ftabel |
|-----------------------------------|----|-----------|-------------|------------|----------|
| Tingkat putaran (A) | 4 | 0.0514324 | 0.012858114 | 2134.76259 | 2.605972 |
| Diameter <i>swirling grid</i> (B) | 3 | 0.0022002 | 0.00073343 | 121.767346 | 2.838746 |
| Interaksi faktor A dan B | 12 | 0.0008635 | 7.19657E-05 | 11.9480684 | 2.003460 |
| Galat | 40 | 0.0002409 | 6.02321E-06 | | |
| Total | 59 | 0.0547372 | | | |

Dari tabel diperoleh kesimpulan:

- $F_A \text{ hitung} > F_A \text{ tabel}$ maka H_0^1 ditolak dan H_1^1 diterima, ini berarti bahwa putaran poros berpengaruh terhadap SFCE yang dihasilkan motor Otto empat langkah.
- $F_B \text{ hitung} > F_B \text{ tabel}$ H_0^2 ditolak dan H_1^2 diterima, ini berarti bahwa variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap SFCE yang dihasilkan motor Otto empat langkah.
- $F_{AB \text{ hitung}} > F_{AB \text{ tabel}}$ maka H_0^3 ditolak dan H_1^3 diterima, ini berarti bahwa interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap SFCE yang dihasilkan motor Otto empat langkah.

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa putaran poros, variasi diameter *swirling grid*, dan interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* mempunyai pengaruh yang nyata terhadap SFCE yang dihasilkan dengan tingkat keyakinan 95 %.

4.1.3.3 Analisis varian untuk daya efektif yang dihasilkan

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh putaran poros, variasi diameter *swirling grid* dan interaksi antara keduanya terhadap daya efektif yang dihasilkan motor Otto empat langkah empat silinder. Dari perhitungan statistik didapatkan analisis varian untuk daya efektif yang ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4.7. Analisis varian dua arah untuk daya efektif

| Sumber keragaman | db | JK | KT | Fhitung | Ftabel |
|-----------------------------------|----|------------|-------------|------------|----------|
| Tingkat putaran (A) | 4 | 109.482047 | 27.37051176 | 2.0063E+14 | 2.605972 |
| Diameter <i>swirling grid</i> (B) | 3 | 19.1033341 | 6.367778023 | 4.6676E+13 | 2.838746 |
| Interaksi faktor A dan B | 12 | 4.79085442 | 0.399237868 | 2.9264E+12 | 2.003461 |
| Galat | 40 | 5.457E-12 | 1.36424E-13 | | |
| Total | 59 | 133.376236 | | | |

Dari tabel diperoleh kesimpulan:

- $F_A \text{ hitung} > F_A \text{ tabel}$ maka H_0^1 ditolak dan H_1^1 diterima, ini berarti bahwa putaran poros berpengaruh terhadap daya efektif yang dihasilkan motor Otto empat langkah.
- $F_B \text{ hitung} > F_B \text{ tabel}$ H_0^2 ditolak dan H_1^2 diterima, ini berarti bahwa variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap daya efektif yang dihasilkan motor Otto empat langkah.
- $F_{AB} \text{ hitung} > F_{AB} \text{ tabel}$ maka H_0^3 ditolak dan H_1^3 diterima, ini berarti bahwa interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap daya efektif yang dihasilkan motor Otto empat langkah.

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa putaran poros, variasi diameter *swirling grid*, dan interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* mempunyai pengaruh yang nyata terhadap daya efektif yang dihasilkan dengan tingkat keyakinan sebesar 95 %.

4.1.3.4 Analisis varian untuk efisiensi termal efektif yang dihasilkan

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh putaran poros, variasi diameter *swirling grid* dan interaksi antara keduanya terhadap efisiensi termal efektif yang dihasilkan motor Otto empat langkah empat silinder. Dari perhitungan statistik didapatkan analisis varian untuk efisiensi termal efektif yang ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4.8. Analisis varian dua arah untuk efisiensi termal efektif

| Sumber keragaman | db | JK | KT | Fhitung | Ftabel |
|-----------------------------------|----|-----------|-----------|------------|----------|
| Tingkat putaran (A) | 4 | 385.55390 | 96.388476 | 1561.27733 | 2.605972 |
| Diameter <i>swirling grid</i> (B) | 3 | 16.402032 | 5.4673440 | 88.5587211 | 2.838746 |
| Interaksi faktor A dan B | 12 | 5.6954716 | 0.4746226 | 7.68782312 | 2.003461 |
| Galat | 40 | 2.4694774 | 0.0617369 | | |
| Total | 59 | 410.12088 | | | |

Dari tabel diperoleh kesimpulan:

- $F_A \text{ hitung} > F_A \text{ tabel}$ maka H_0^1 ditolak dan H_1^1 diterima, ini berarti bahwa putaran poros berpengaruh terhadap efisiensi termal efektif yang dihasilkan motor Otto empat langkah.
- $F_B \text{ hitung} > F_B \text{ tabel}$ H_0^2 ditolak dan H_1^2 diterima, ini berarti bahwa variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap efisiensi termal efektif yang dihasilkan motor Otto empat langkah.
- $F_{AB} \text{ hitung} > F_{AB} \text{ tabel}$ maka H_0^3 ditolak dan H_1^3 diterima, ini berarti bahwa interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap efisiensi termal efektif yang dihasilkan motor Otto empat langkah.

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa putaran poros, variasi diameter *swirling grid*, dan interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* mempunyai pengaruh yang nyata terhadap efisiensi termal efektif yang dihasilkan dengan tingkat keyakinan sebesar 95 %.

4.1.3.5 Analisis varian untuk emisi gas CO yang dihasilkan

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh putaran poros, variasi diameter *swirling grid* dan interaksi antara keduanya terhadap emisi gas CO yang dihasilkan motor Otto empat langkah empat silinder. Dari perhitungan statistik didapatkan analisis varian untuk emisi gas CO yang ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4.9. Analisis varian dua arah untuk emisi gas CO

| Sumber keragaman | db | JK | KT | Fhitung | Ftabel |
|-----------------------------------|----|-----------|-------------|-------------|----------|
| Tingkat putaran (A) | 4 | 10.198664 | 2.549666142 | 682.3127119 | 2.605972 |
| Diameter <i>swirling grid</i> (B) | 3 | 1.5752403 | 0.525080111 | 140.5159792 | 2.838746 |
| Interaksi faktor A dan B | 12 | 0.4804638 | 0.040038653 | 10.71468978 | 2.003461 |
| Galat | 40 | 0.149472 | 0.0037368 | | |
| Total | 59 | 12.403840 | | | |

Dari tabel diperoleh kesimpulan:

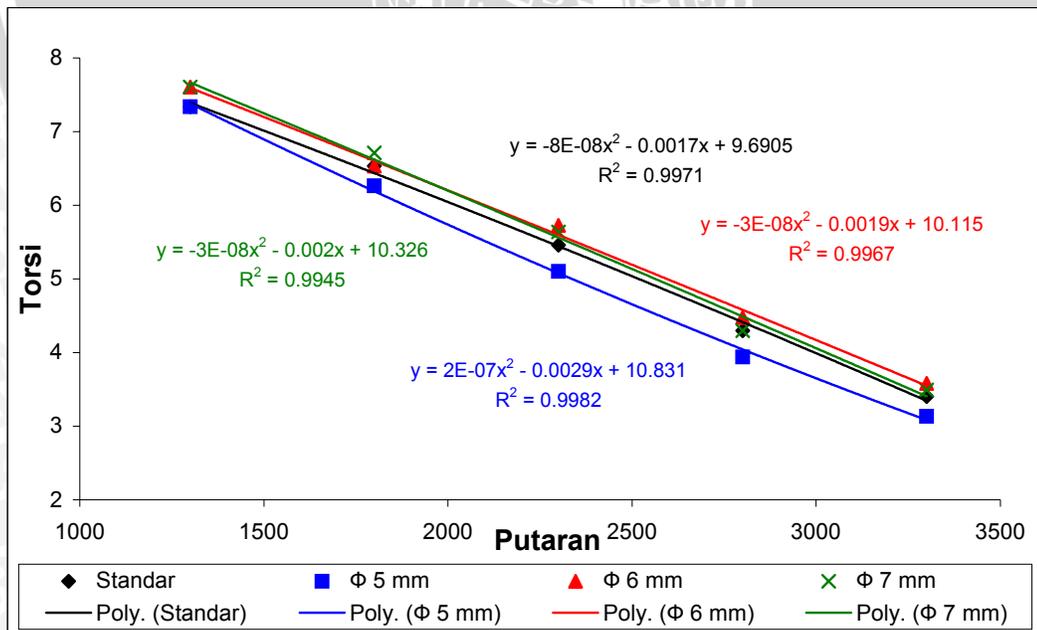
- $F_A \text{ hitung} > F_A \text{ tabel}$ maka H_0^1 ditolak dan H_1^1 diterima, ini berarti bahwa putaran poros berpengaruh terhadap emisi gas CO yang dihasilkan motor Otto empat langkah.
- $F_B \text{ hitung} > F_B \text{ tabel}$ H_0^2 ditolak dan H_1^2 diterima, ini berarti bahwa variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap emisi gas CO yang dihasilkan motor Otto empat langkah.
- $F_{AB} \text{ hitung} > F_{AB} \text{ tabel}$ maka H_0^3 ditolak dan H_1^3 diterima, ini berarti bahwa interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* berpengaruh terhadap emisi gas CO yang dihasilkan motor Otto empat langkah.

Dari kesimpulan diatas terlihat bahwa putaran poros, variasi diameter *swirling grid*, dan interaksi antara putaran poros dan variasi diameter *swirling grid* mempunyai pengaruh yang nyata terhadap emisi gas CO yang dihasilkan dengan tingkat keyakinan sebesar 95 %.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Hubungan antara Putaran dengan Torsi

Hubungan antara putaran motor Otto empat langkah dengan torsi, dengan variasi diameter *swirling grid* yang mempunyai variasi diameter lubang 5 mm, 6 mm, 7 mm maupun standar dapat dilihat dalam gambar 4.1 berikut:



Gambar 4.1. Hubungan antara putaran dengan torsi

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa dengan semakin tinggi putaran porosmotor Otto empat langkah maka torsi yang dihasilkan akan semakin menurun. Penyebab terjadinya hal ini adalah karena pada saat menaikkan putaran, beban pengereman yang dikenakan pada poros dikurangi sampai pada putaran yang dikehendaki. Dengan semakin kecilnya beban pengereman yang diterima oleh poros maka besarnya torsi yang terjadi juga akan semakin kecil. Hubungan antara beban pengereman dengan torsi ditulis sebagai berikut:

$$T = F \times L$$

dengan : T = Torsi (kg.m)

F = Beban pengereman (kg)

L = Panjang lengan dynamometer (m)

Dari persamaan di atas terlihat bahwa besarnya torsi berbanding lurus dengan besarnya beban pengereman yang dikenakan pada poros.

Sedangkan jika dihubungkan dengan grafik torsi standar (teoritis), penurunan tersebut menunjukkan *peak point* (titik puncak) dari grafik hubungan putaran dan torsi sudah dilewati, dengan kata lain torsi tertinggi terjadi pada saat putaran poros mesin berada dibawah 1300 rpm. Penyebab menurunnya torsi selain karena hal tersebut di atas juga dikarenakan dengan semakin tinggi putaran, gerakan bolak-balik piston tiap siklus akan semakin cepat, sehingga gesekan yang terjadi antara piston dengan silinder akan semakin besar. Gerakan torak yang semakin cepat ini diikuti pula oleh semakin singkatnya waktu yang dibutuhkan untuk membuka dan menutupnya katup isap. Hal ini berdampak pada semakin sedikitnya massa campuran udara dan bahan bakar yang masuk dan terbakar di dalam ruang bakar setiap satu kali siklus, yang mengakibatkan gaya dorong torak pada saat langkah kerja (ekspansi) juga berkurang, sehingga torsi yang dihasilkan semakin menurun.

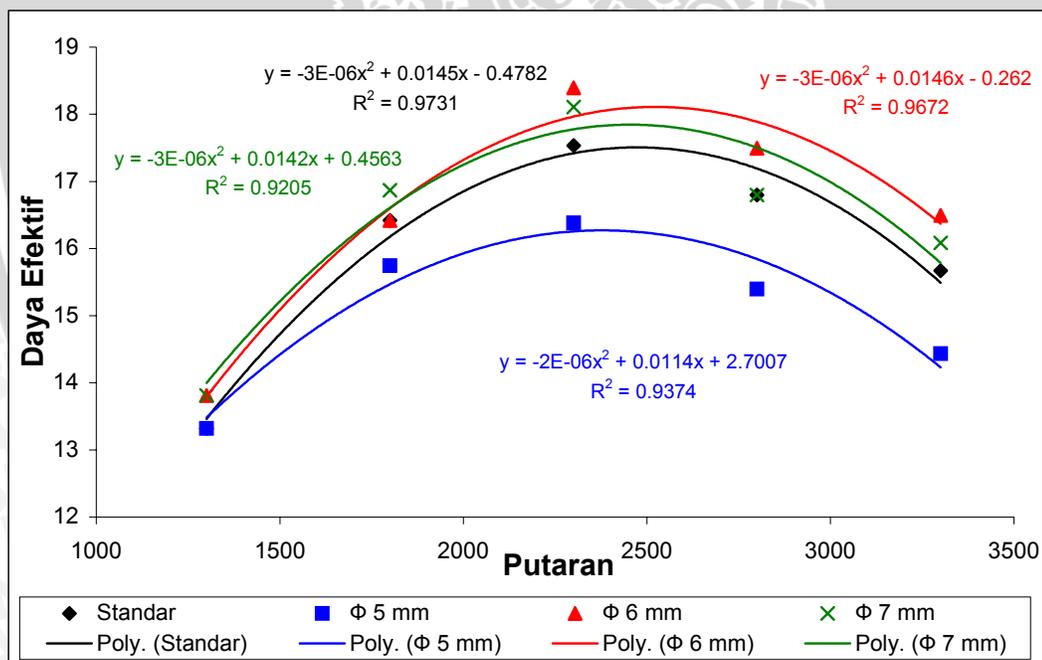
Pemasangan *swirling grid* pada *intake manifold* menghasilkan torsi yang lebih besar pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm, tetapi menghasilkan torsi yang lebih rendah dari torsi standar pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 5 mm. Hal ini karena pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm mengakibatkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*), sehingga aliran massa campuran udara dan bahan bakar yang masuk ke dalam *intake manifold* akan mengalami pusaran sehingga pencampurannya menjadi lebih homogen daripada tanpa pemasangan *swirling grid* (standar). Dengan semakin homogenya campuran tersebut maka bahan bakar yang terbakar akan semakin sempurna untuk terbakar sehingga torsi yang dihasilkan akan lebih besar dibandingkan dengan torsi standarnya. Pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 5 mm menghasilkan torsi yang lebih kecil dibandingkan dengan torsi standar karena diameter lubang 5 mm membuat aliran

campuran udara dan bahan bakar mendapatkan hambatan yang lebih besar sehingga intensitas pencampurannya tidak maksimal.

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan terlihat bahwa nilai torsi yang paling besar terjadi pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 7 mm (7,608 kg.m) mulai putaran 1300 rpm-2000 rpm. Setelah putaran tersebut, nilai torsi terbesar dihasilkan pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm. Nilai torsi tanpa pemasangan *swirling grid* berada dibawah grafik dengan pemasangan *swirling grid* berdiameter 7 mm, torsi terendah dihasilkan dari pemasangan *swirling grid* berdiameter 5 mm (3,133 kg.m). Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm menghasilkan torsi rata-rata terbesar dan merupakan diameter *swirling grid* yang paling efektif untuk memperoleh torsi yang besar.

4.2.2 Hubungan antara Putaran dengan Daya Efektif

Hubungan antara putaran motor Otto empat langkah dengan daya efektif, dengan pemasangan *swirling grid* yang mempunyai variasi diameter lubang 5 mm, 6 mm, dan 7 mm maupun standar dapat dilihat dalam gambar 4.2 berikut:



Gambar 4.2. Hubungan antara putaran dengan daya efektif

Dari grafik di atas terlihat bahwa semua grafik yang terbentuk cenderung sama berbentuk kurva parabolik membuka ke bawah. Secara umum seiring dengan naiknya putaran maka daya efektif (N_e) yang dihasilkan pada putaran awal mengalami kenaikan sampai pada putaran tertentu, tetapi setelah mencapai titik maksimal, grafik mengalami

penurunan seiring dengan naiknya putaran. Hal ini terjadi karena daya efektif (N_e) berbanding lurus dengan harga torsi (T) yang dihasilkan dan putaran poros mesin (n) sesuai persamaan berikut:

$$N_e = \frac{T \cdot n}{716,2}$$

dengan : N_e = Daya efektif (PS)

T = Torsi (kg.m)

n = putaran (rpm)

Adapun peningkatan daya efektif sampai putaran 2300 rpm terjadi karena putaran yang semakin meningkat dan kerugian gesekan yang terjadi juga meningkat, tetapi masih bisa diatasi oleh mesin, karena pada putaran rendah campuran udara dan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar masih mampu menghasilkan energi untuk mengimbangi kerugian mekanis akibat gesekan antara torak dengan dinding silinder. Tetapi setelah putaran 2300 rpm daya efektif yang dihasilkan akan semakin menurun. Hal ini terjadi karena kerugian akibat gesekan yang semakin besar dengan semakin meningkatnya putaran, atau dapat dikatakan bahwa putaran dibawah 2300 rpm penurunan torsi tidak sebanding dengan peningkatan putaran sehingga daya efektif semakin meningkat. Sedangkan pada putaran diatas 2300 rpm peningkatan putaran tidak sebanding dengan penurunan torsi sehingga daya efektif semakin menurun.

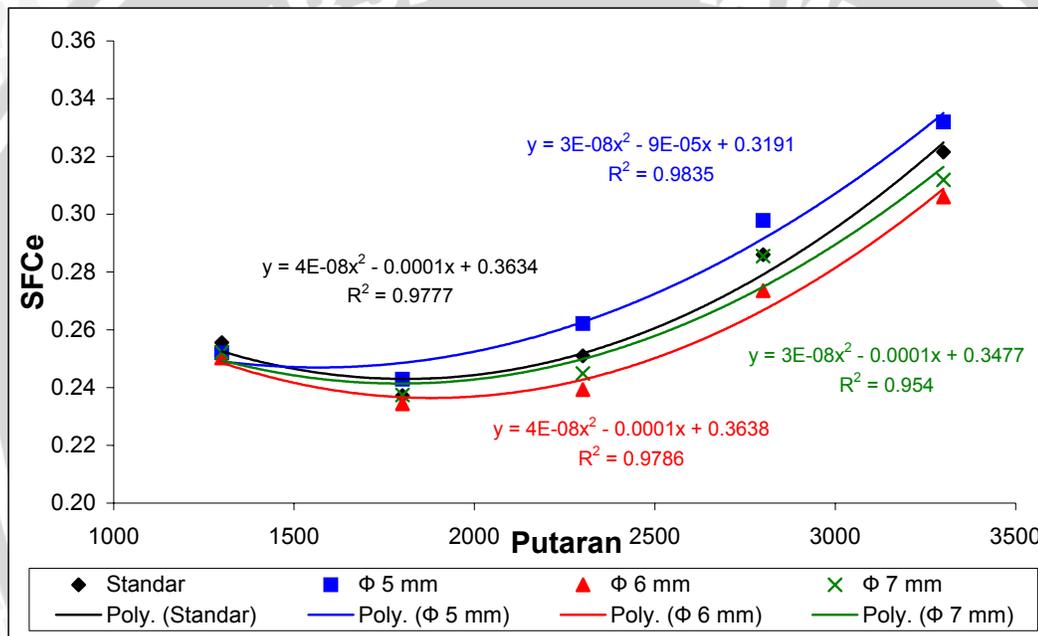
Dari grafik juga bisa dilihat bahwa pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm menghasilkan daya efektif (N_e) yang lebih besar dibandingkan daya efektif yang dihasilkan oleh motor Otto empat langkah tanpa pemasangan *swirling grid*. Tetapi pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 5 mm sebaliknya, daya efektif yang dihasilkan berada di bawah grafik tanpa pemasangan *swirling grid* (standar). Hal ini karena pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm mengakibatkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*), sehingga campuran udara dan bahan bakar mampu mengalami pencampuran kembali (pengacakan partikel) yang lebih sempurna dibandingkan dengan pemasangan *swirling grid* berdiameter 5 mm. Selain itu aliran massa campuran udara dan bahan bakar tidak mengalami hambatan atau hambatan aliran yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan aliran yang melewati *swirling grid* berdiameter 5 mm.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya efektif maksimal diperoleh pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 7 mm, tetapi hanya pada awal putaran yaitu sampai pada putaran 1700 rpm. Setelah itu daya efektif maksimal diperoleh pada

pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm sampai pada putaran tinggi. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa peningkatan daya efektif terbesar diperoleh pada pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm dengan nilai daya efektif maksimal 18,395 PS.

4.2.3 Hubungan antara Putaran dengan Konsumsi Bahan Bakar Spesifik efektif (SFCE)

Hubungan antara putaran motor Otto empat langkah dengan SFCE, dengan dengan pemasangan *swirling grid* yang mempunyai variasi diameter lubang 5 mm, 6 mm, dan 7 mm maupun standar dapat dilihat dalam gambar 4.3 berikut:



Gambar 4.3. Hubungan antara putaran dengan SFCE

Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (SFCE) merupakan banyaknya bahan bakar yang terpakai setiap jamnya untuk daya efektif yang dihasilkan sehingga konsumsi bahan bakar spesifik efektif dapat menunjukkan tingkat keekonomisan dalam pemakaian bahan bakar yaitu semakin rendah nilai konsumsi bahan bakar spesifik efektif maka mesin tersebut akan semakin ekonomis.

Dari grafik di atas terlihat bahwa kecenderungan semua grafik SFCE mengalami peningkatan. Hal ini terjadi karena dengan semakin tingginya putaran maka jumlah siklus yang terjadi semakin banyak dan konsumsi bahan bakar (FC) yang dibutuhkan semakin besar. Hubungan antara SFCE, FC, dan juga Ne ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$\text{SFCE} = \frac{\text{FC}}{\text{Ne}} \quad \text{dan} \quad \text{FC} = \frac{b}{t} \cdot \gamma_f \cdot \frac{3600}{1000}$$

dengan: SFCE = Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (kg/PS.jam)

FC = Konsumsi bahan bakar (kg/jam)

Ne = Daya efektif (PS)

b = Volume bahan bakar selama t detik (ml)

t = Waktu untuk menghabiskan bahan bakar sebanyak b ml (dt)

γ_f = Berat spesifik bahan bakar (kg/lt)

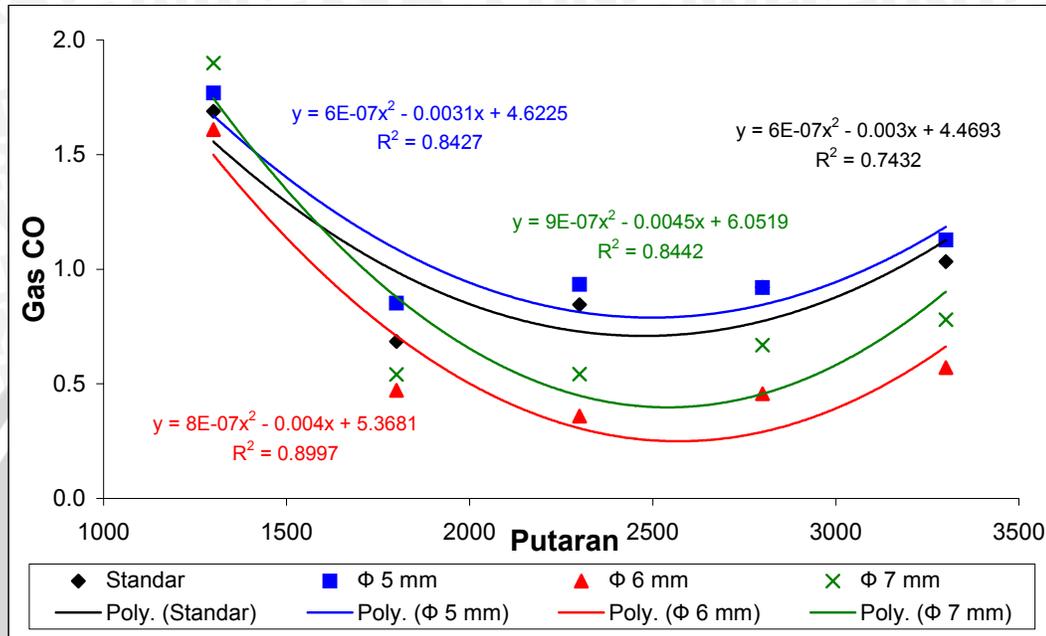
Sesuai dengan persamaan di atas terlihat bahwa SFCE berbanding lurus dengan FC dan berbanding terbalik dengan Ne. Atau dapat pula disimpulkan bahwa apabila FC mengalami peningkatan maka SFCE juga akan meningkat apabila daya efektif yang dihasilkan cenderung naik dengan interval kenaikan yang tidak terlalu besar atau bahkan jika Ne mengalami penurunan.

Pada grafik di atas terlihat bahwa pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm memiliki SFCE yang lebih kecil daripada kondisi tanpa pemasangan *swirling grid* (standar). Hal ini berarti bahwa *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm mampu membuat mesin bekerja lebih ekonomis dalam pemakaian bahan bakar karena dengan jumlah bahan bakar yang sama atau lebih sedikit mampu menghasilkan daya efektif yang lebih besar daripada kondisi tanpa pemasangan *swirling grid*. Di sisi lain, pemasangan *swirling grid* berdiameter 5 mm menghasilkan SFCE yang lebih besar dibandingkan kondisi tanpa pemasangan *swirling grid*. Penyebab terjadinya hal ini adalah karena campuran udara dan bahan bakar yang melewati *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm mampu menghasilkan campuran yang lebih homogen, akibat penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi ketika campuran tersebut melewati *grid*, dan hal ini tidak terjadi pada *swirling grid* berdiameter 5 mm, karena pada diameter lubang 5 mm aliran campuran udara dan bahan bakar mendapatkan hambatan yang lebih besar sehingga intensitas pencampurannya tidak maksimal.

Dari hasil pengujian diperoleh bahwa konsumsi bahan bakar spesifik efektif yang terkecil adalah pada *swirling grid* berdiameter 6 mm mulai putaran 1300-1800 rpm, yakni sebesar 0,233 (Kg.PS⁻¹.jam⁻¹). Pemasangan *swirling grid* berdiameter 5 mm menghasilkan SFCE yang lebih tinggi daripada kondisi standar. Dapat disimpulkan bahwa *swirling grid* berdiameter 6 mm menghasilkan SFCE terkecil dan berarti pula bahwa *swirling grid* berdiameter 6 mm mampu membuat mesin bekerja lebih ekonomis dalam hal pemakaian bahan bakar dan daya efektif yang dihasilkan.

4.2.4 Hubungan antara Putaran dengan Emisi Gas CO

Hubungan antara putaran motor Otto empat langkah dengan emisi gas CO, dengan pemasangan *swirling grid* yang mempunyai variasi diameter lubang 5 mm, 6 mm, dan 7 mm maupun standar dapat dilihat dalam gambar 4.4 berikut:



Gambar 4.4. Hubungan antara putaran dengan emisi gas CO

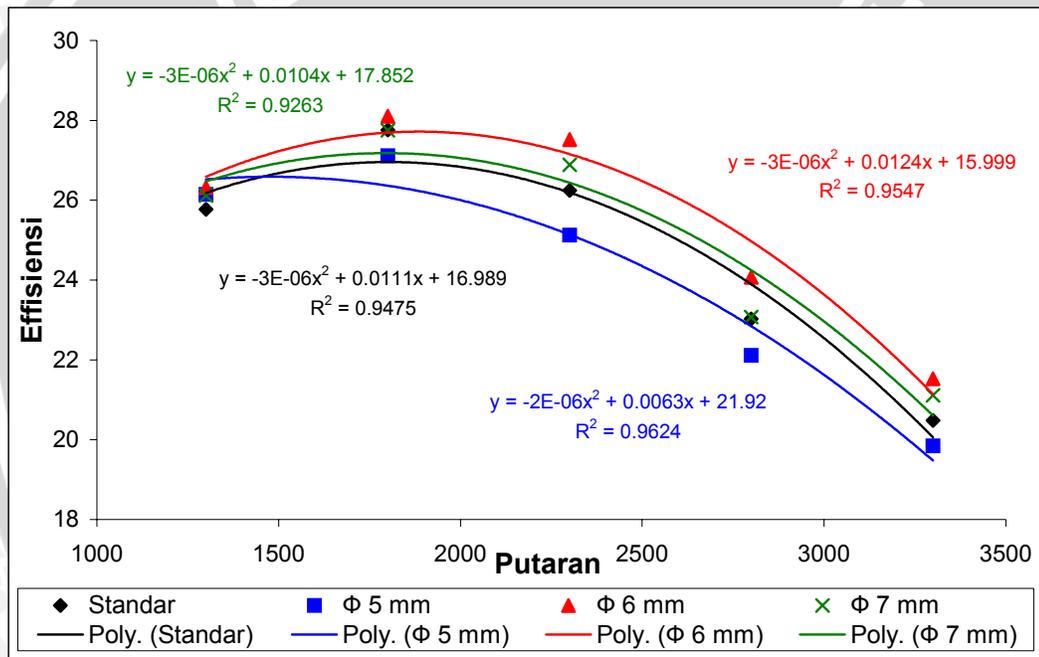
Pada gambar 4.4 di atas terlihat bahwa emisi gas CO yang dihasilkan baik pada pengujian tanpa pemasangan *swirling grid* (standar) maupun dengan pemasangan *swirling grid* menunjukkan nilai yang berfluktuasi seiring dengan meningkatnya putaran mesin. Hal ini terjadi karena gas CO merupakan produk pembakaran yang tidak sempurna. Apabila kadar CO semakin besar, maka hal ini mengindikasikan bahwa proses pembakaran yang terjadi semakin tidak sempurna. Faktor lain yang menyebabkan hal tersebut adalah adanya perbandingan udara dengan bahan bakar (AFR) yang berbeda-beda (lampiran 1). Nilai AFR yang lebih kecil dari AFR ideal (14,8:1) merupakan pembakaran yang kaya, sedangkan nilai AFR yang lebih besar dari AFR ideal merupakan pembakaran miskin (*excess air*). Pada pembakaran kaya, produk pembakaran akan cenderung menghasilkan gas CO lebih besar atau pada kondisi tertentu menghasilkan gas CO yang kecil tetapi tetap masih ada apabila ada sebagian bahan bakar yang tidak terbakar yang kemudian ikut terbuang bersama gas buang (HC). Sementara pada pembakaran yang miskin akan cenderung menghasilkan gas O₂ pada

produk pembakarannya, meskipun pada kondisi tertentu juga menghasilkan gas CO tetapi kadarnya cenderung lebih rendah.

Berdasarkan fluktuasi emisi gas CO di atas dapat disimpulkan bahwa *swirling grid* yang paling efektif dalam usaha mengurangi emisi gas CO adalah *swirling grid* berdiameter 6 mm, karena kadar gas CO yang dihasilkan selalu berada di bawah kondisi standar dan paling rendah.

4.2.5 Hubungan antara Putaran dengan Efisiensi Termal Efektif

Hubungan antara putaran motor Otto empat langkah dengan efisiensi termal efektif, dengan pemasangan *swirling grid* yang mempunyai variasi diameter lubang 5 mm, 6 mm, dan 7 mm maupun standar dapat dilihat dalam gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5. Hubungan antara putaran dengan efisiensi termal efektif

Pada gambar 4.5 terlihat bahwa dengan semakin tinggi putaran poros motor Otto empat langkah maka secara umum efisiensi termal efektif yang dihasilkan juga akan mengalami peningkatan kemudian turun lagi. Hal ini dikarenakan nilai efisiensi termal efektif berbanding terbalik dengan nilai konsumsi bahan bakar spesifik efektif (SFCe) dan nilai kalor rendah bahan bakar (LHV_{bb}), sebagaimana ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{te} = \frac{Q_e}{Q_b} = \frac{632 \cdot N_e}{F_c \cdot LHV_{bb}} = \frac{632}{SFC_e \cdot LHV_{bb}}$$

- dengan: η_{te} = Efisiensi thermal efektif (%)
SFCe = Konsumsi bahan bakar spesifik efektif (kg/PS.jam)
LHV_{bb} = Nilai kalor rendah bahan bakar (kkal/kg)
Fc = Konsumsi bahan bakar (kg/jam)
Ne = Daya efektif (PS)

Seperti telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya mengenai SFCe, bahwa semakin tinggi putaran mesin maka konsumsi bahan bakar spesifik efektif (SFCe) juga semakin meningkat, sehingga η_{te} yang diperoleh semakin menurun. Hal ini disebabkan karena dengan putaran yang semakin tinggi maka gerakan bolak-balik torak juga semakin cepat sehingga kerugian mekanis akibat gesekan torak dengan dinding silinder semakin besar. Selain itu waktu yang dibutuhkan untuk membuka dan menutup katup isap akan semakin singkat, yang berarti massa campuran udara dan bahan bakar yang masuk ke ruang bakar setiap satu siklusnya semakin sedikit. Hal ini akan menghasilkan jumlah energi kalor hasil pembakaran yang semakin menurun yang pada akhirnya menurunkan daya efektif yang dihasilkan sehingga efisiensi termalnya menurun.

Dari grafik tersebut terlihat bahwa dengan pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm menghasilkan η_{te} yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin tanpa pemasangan *swirling grid* (standar). Tetapi lain halnya dengan pemasangan *swirling grid* berdiameter 5 mm yang menghasilkan η_{te} lebih rendah daripada kondisi standar. Hal ini terjadi karena dengan pemasangan *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm mampu menghasilkan daya efektif (Ne) yang lebih besar daripada kondisi tanpa pemasangan *swirling grid*. Dengan meningkatnya Ne maka η_{te} yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini berarti pula bahwa *swirling grid* berdiameter 6 mm dan 7 mm mampu menghasilkan homogenitas campuran udara dan bahan bakar yang lebih baik, akibat penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi ketika campuran tersebut melewati *grid*, yang akhirnya menjadikan proses pembakaran lebih sempurna dan menghasilkan daya efektif (Ne) maupun η_{te} yang lebih tinggi.

Dari grafik terlihat bahwa pemasangan *swirling grid* yang berdiameter 6 mm memiliki η_{te} tertinggi, yang berarti pula bahwa *swirling grid* yang paling efektif untuk memperoleh efisiensi termal (η_{te}) yang tinggi pada motor Otto empat langkah.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari analisis data dan pembahasan pengaruh variasi diaeter lubang *swirling grid* pada *intake manifold* motor Otto empat langkah, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

Pemasangan *swirling grid* dengan variasi diameter lubang pada *intake manifold* motor Otto empat langkah dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap unjuk kerja motor Otto tersebut.

Pemasangan *swirling grid* dengan variasi diameter lubang pada *intake manifold* untuk *swirling grid* berdiamater 6 mm dan 7 mm dapat meningkatkan unjuk kerja yang dihasilkan oleh motor Otto empat langkah, tetapi untuk *swirling grid* berdiamater 5 mm tidak dapat meningkatkan unjuk kerja karena hambatan aliran campuran udara dan bahan bakar bertambah besar.

Berdasarkan hasil penelitian diperoleh bahwa secara keseluruhan unjuk kerja motor Otto empat langkah paling optimal dihasilkan pada pemasangan *swirling grid* berdiamater 6 mm dengan prosentase kenaikan torsi sebesar 3,602 %, daya efektif 3,602 % dan efisiensi termal efektif (η_{te}) sebesar 3,573 %, serta prosentase penurunan emisi gas CO sebesar 37,733 % dan prosentase penurunan SFCE sebesar 3,421 %.

5.2 Saran

Adapun saran yang penulis harapkan dari penelitian tentang pemasangan *swirling grid* dengan variasi diameter lubang pada *intake manifold* motor Otto empat langkah adalah sebagai berikut:

- 1 Dari penelitian ini bisa dilanjutkan untuk motor Otto empat langkah dengan variasi bukaan *throttle*.
- 2 Bisa dilanjutkan untuk letak pemasangan *swirling grid* yaitu pada awal dan akhir *intake manifold* dari motor Otto empat langkah.
- 3 Dapat dilakukan penelitian lanjutan tentang sejauh mana aliran turbulensi yang terjadi setelah melewati *swirling grid*.

Daftar Pustaka

- Arends & Berenschot; 1980: *Motor Bensin*; Erlangga, Jakarta.
- Arismunandar, W; 2002: *Penggerak Mula Motor Bakar Torak*; ITB, Bandung.
- Dehong, Zhang & Hill, Philip G; 1996: *Effect of Swirl on Combustion in Short Cylinder Chamber Combustion and flame*; vol 106; El Seiver Science, New York.
- Lesieur, Marcel; 1990: *Turbulence in Fluid*; Kluwer Academic Publisher, Netherland.
- Ogawa Seiki Co., LTD; 1987: *Operation Manual of Engine Research and Test Bed Model GWE-80/100-HS-AV*, Tokyo.
- Petrovsky, N; 1979: *Marine Internal Combustion Engine*; Mir Publisher, Moscow.
- Pulkrabrek, Willard W; 2004: *Engineering Fundamental of the internal combustion engine*; Prentice Hal International inc, New Jersey.
- Effendi, M. Rifqi; 2002: *Pengaruh Diameter Grid pada Intake Manifold terhadap Unjuk Kerja Motor Bensin Empat Langkah, Skripsi Tidak diterbitkan*; Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- Soenarta, Nakoela; 1995: *Motor Serbaguna*; Pradnya Paramita, Jakarta.
- Streeter, L. Victor & Wylie; 1985: *Mekanika Fluida*; Erlangga, Jakarta.
- Wahyudi, Slamet; 2006: *Statistik Teknik*; Universitas Brawijaya, Malang.
- Yunianto, Bambang Dwi; 2003: *Pengaruh Variasi Kemiringan Lubang Grid terhadap Kinerja Motor Bensin Empat Langkah, Skripsi Tidak diterbitkan*; Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Hasil pengolahan data pada pengujian motor Otto empat langkah.

Hasil pengolahan data tanpa pemasangan *swirling grid* (standar)

| No | Putaran | T | Ne | SFCe | Nbb | Ni | Effisiensi | CO | AFR |
|----|---------|--------|--------|-------------|--------|--------|------------|-------|-------|
| | (rpm) | (kg.m) | (PS) | (kg/PS.jam) | (PS) | (PS) | (%) | (%) | |
| 1 | 1300 | 7.339 | 13.321 | 0.256 | 51.703 | 29.954 | 25.765 | 1.771 | 14.39 |
| | | 7.339 | 13.321 | 0.255 | 51.681 | 28.255 | 25.776 | 1.769 | 14.39 |
| | | 7.339 | 13.321 | 0.255 | 51.681 | 26.807 | 25.776 | 1.527 | 14.39 |
| 2 | 1800 | 6.534 | 16.420 | 0.238 | 59.378 | 29.006 | 27.654 | 0.654 | 14.88 |
| | | 6.534 | 16.420 | 0.237 | 59.170 | 28.661 | 27.751 | 0.678 | 14.93 |
| | | 6.534 | 16.420 | 0.236 | 58.906 | 28.260 | 27.876 | 0.723 | 15.00 |
| 3 | 2300 | 5.460 | 17.533 | 0.250 | 66.480 | 29.699 | 26.373 | 0.800 | 14.88 |
| | | 5.460 | 17.533 | 0.250 | 66.629 | 30.306 | 26.314 | 0.784 | 14.96 |
| | | 5.460 | 17.533 | 0.253 | 67.349 | 29.306 | 26.032 | 0.953 | 14.80 |
| 4 | 2800 | 4.296 | 16.795 | 0.287 | 73.222 | 32.962 | 22.937 | 0.934 | 14.55 |
| | | 4.296 | 16.795 | 0.285 | 72.772 | 30.266 | 23.079 | 0.919 | 14.55 |
| | | 4.296 | 16.795 | 0.286 | 72.862 | 30.245 | 23.051 | 0.908 | 14.62 |
| 5 | 3300 | 3.401 | 15.671 | 0.321 | 76.387 | 30.768 | 20.515 | 1.021 | 14.54 |
| | | 3.401 | 15.671 | 0.320 | 76.240 | 30.383 | 20.554 | 1.047 | 14.49 |
| | | 3.401 | 15.671 | 0.323 | 76.883 | 30.556 | 20.382 | 1.032 | 14.37 |

Hasil pengolahan data dengan pemasangan *swirling grid* dengan diameter lubang 5 mm

| No | Putaran | T | Ne | SFCe | Nbb | Ni | Effisiensi | CO | AFR |
|----|---------|--------|--------|-------------|--------|--------|------------|-------|-------|
| | (rpm) | (kg.m) | (PS) | (kg/PS.jam) | (PS) | (PS) | (%) | (%) | |
| 1 | 1300 | 7.339 | 13.321 | 0.258 | 52.228 | 28.340 | 25.506 | 1.644 | 13.87 |
| | | 7.339 | 13.321 | 0.246 | 49.706 | 26.392 | 26.800 | 1.881 | 14.77 |
| | | 7.339 | 13.321 | 0.252 | 50.969 | 25.644 | 26.136 | 1.78 | 14.41 |
| 2 | 1800 | 6.265 | 15.746 | 0.245 | 58.469 | 29.041 | 26.930 | 0.912 | 14.41 |
| | | 6.265 | 15.746 | 0.243 | 58.011 | 26.983 | 27.143 | 0.855 | 14.66 |
| | | 6.265 | 15.746 | 0.242 | 57.756 | 26.597 | 27.262 | 0.787 | 14.73 |
| 3 | 2300 | 5.102 | 16.383 | 0.262 | 65.270 | 29.510 | 25.100 | 0.910 | 14.37 |
| | | 5.102 | 16.383 | 0.262 | 65.127 | 29.160 | 25.156 | 0.886 | 14.40 |
| | | 5.102 | 16.383 | 0.262 | 65.234 | 29.266 | 25.114 | 1.007 | 14.38 |
| 4 | 2800 | 3.938 | 15.396 | 0.298 | 69.647 | 28.687 | 22.105 | 0.878 | 14.31 |
| | | 3.938 | 15.396 | 0.298 | 69.688 | 26.395 | 22.092 | 0.906 | 14.40 |
| | | 3.938 | 15.396 | 0.298 | 69.565 | 26.274 | 22.131 | 0.975 | 14.43 |
| 5 | 3300 | 3.133 | 14.433 | 0.332 | 72.727 | 25.067 | 19.846 | 1.139 | 14.46 |
| | | 3.133 | 14.433 | 0.331 | 72.549 | 24.725 | 19.895 | 1.152 | 14.50 |
| | | 3.133 | 14.433 | 0.333 | 72.951 | 25.287 | 19.785 | 1.09 | 14.42 |

Hasil pengolahan data dengan pemasangan *swirling grid* dengan diameter lubang 6 mm

| No | Putaran | T | Ne | SFCe | Nbb | Ni | Effisiensi | CO | AFR |
|----|---------|--------|--------|-------------|--------|--------|------------|-------|-------|
| | (rpm) | (kg.m) | (PS) | (kg/PS.jam) | (PS) | (PS) | (%) | (%) | |
| 1 | 1300 | 7.608 | 13.809 | 0.254 | 53.357 | 30.968 | 25.880 | 1.587 | 14.12 |
| | | 7.608 | 13.809 | 0.251 | 52.716 | 28.388 | 26.194 | 1.628 | 14.29 |
| | | 7.608 | 13.809 | 0.245 | 51.367 | 25.585 | 26.883 | 1.612 | 14.67 |
| 2 | 1800 | 6.534 | 16.420 | 0.233 | 58.096 | 28.765 | 28.264 | 0.414 | 14.79 |
| | | 6.534 | 16.420 | 0.236 | 58.847 | 28.113 | 27.904 | 0.571 | 14.60 |
| | | 6.534 | 16.420 | 0.234 | 58.354 | 27.564 | 28.139 | 0.429 | 14.72 |
| 3 | 2300 | 5.728 | 18.395 | 0.241 | 67.235 | 31.598 | 27.359 | 0.343 | 14.82 |
| | | 5.728 | 18.395 | 0.239 | 66.704 | 30.253 | 27.577 | 0.382 | 14.94 |
| | | 5.728 | 18.395 | 0.238 | 66.592 | 29.225 | 27.623 | 0.352 | 14.97 |
| 4 | 2800 | 4.475 | 17.495 | 0.273 | 72.460 | 29.744 | 24.144 | 0.455 | 14.70 |
| | | 4.475 | 17.495 | 0.274 | 72.727 | 28.133 | 24.056 | 0.459 | 14.65 |
| | | 4.475 | 17.495 | 0.274 | 72.862 | 27.512 | 24.011 | 0.456 | 14.62 |
| 5 | 3300 | 3.580 | 16.495 | 0.303 | 75.800 | 26.063 | 21.762 | 0.565 | 14.91 |
| | | 3.580 | 16.495 | 0.308 | 77.134 | 26.293 | 21.385 | 0.566 | 14.65 |
| | | 3.580 | 16.495 | 0.307 | 76.983 | 25.960 | 21.427 | 0.58 | 14.68 |

Hasil pengolahan data dengan pemasangan *swirling grid* dengan diameter lubang 7 mm

| No | Putaran | T | Ne | SFCe | Nbb | Ni | Effisiensi | CO | AFR |
|----|---------|--------|--------|-------------|--------|--------|------------|-------|-------|
| | (rpm) | (kg.m) | (PS) | (kg/PS.jam) | (PS) | (PS) | (%) | (%) | |
| 1 | 1300 | 7.608 | 13.809 | 0.256 | 53.648 | 31.187 | 25.740 | 1.920 | 14.04 |
| | | 7.608 | 13.809 | 0.254 | 53.166 | 29.934 | 25.973 | 1.908 | 13.99 |
| | | 7.608 | 13.809 | 0.247 | 51.862 | 27.935 | 26.626 | 1.870 | 14.34 |
| 2 | 1800 | 6.713 | 16.870 | 0.239 | 61.315 | 32.759 | 27.514 | 0.533 | 14.67 |
| | | 6.713 | 16.870 | 0.237 | 60.812 | 30.790 | 27.742 | 0.510 | 14.79 |
| | | 6.713 | 16.870 | 0.235 | 60.285 | 30.223 | 27.984 | 0.580 | 14.92 |
| 3 | 2300 | 5.639 | 18.107 | 0.247 | 67.851 | 32.932 | 26.687 | 0.509 | 14.69 |
| | | 5.639 | 18.107 | 0.245 | 67.311 | 30.850 | 26.901 | 0.471 | 14.81 |
| | | 5.639 | 18.107 | 0.243 | 66.855 | 30.243 | 27.085 | 0.646 | 14.91 |
| 4 | 2800 | 4.296 | 16.795 | 0.287 | 73.087 | 32.828 | 22.980 | 0.665 | 14.58 |
| | | 4.296 | 16.795 | 0.288 | 73.358 | 33.026 | 22.895 | 0.675 | 14.52 |
| | | 4.296 | 16.795 | 0.282 | 71.976 | 32.531 | 23.335 | 0.666 | 14.71 |
| 5 | 3300 | 3.491 | 16.083 | 0.312 | 76.240 | 33.580 | 21.095 | 0.795 | 14.40 |
| | | 3.491 | 16.083 | 0.312 | 76.142 | 31.775 | 21.123 | 0.771 | 14.42 |
| | | 3.491 | 16.083 | 0.312 | 76.142 | 31.775 | 21.123 | 0.774 | 14.42 |

Lampiran 2

Nilai rata-rata hasil pengolahan data pada pengujian motor Otto empat langkah.

Nilai rata-rata hasil pengolahan data untuk torsi

| No | Putaran (rpm) | Standar | Swirling Grid Diameter 5 mm | Swirling Grid Diameter 6 mm | Swirling Grid Diameter 7 mm |
|----|---------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1300 | 7.339 | 7.339 | 7.608 | 7.608 |
| 2 | 1800 | 6.534 | 6.265 | 6.534 | 6.713 |
| 3 | 2300 | 5.460 | 5.102 | 5.728 | 5.639 |
| 4 | 2800 | 4.296 | 3.938 | 4.475 | 4.296 |
| 5 | 3300 | 3.401 | 3.133 | 3.580 | 3.491 |

Nilai rata-rata hasil pengolahan data untuk daya efektif

| No | Putaran (rpm) | Standar | Swirling Grid Diameter 5 mm | Swirling Grid Diameter 6 mm | Swirling Grid Diameter 7 mm |
|----|---------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1300 | 13.321 | 13.321 | 13.809 | 13.809 |
| 2 | 1800 | 16.420 | 15.746 | 16.420 | 16.870 |
| 3 | 2300 | 17.533 | 16.383 | 18.395 | 18.107 |
| 4 | 2800 | 16.795 | 15.396 | 17.495 | 16.795 |
| 5 | 3300 | 15.671 | 14.433 | 16.495 | 16.083 |

Nilai rata-rata hasil pengolahan data untuk SFCe

| No | Putaran (rpm) | Standar | Swirling Grid Diameter 5 mm | Swirling Grid Diameter 6 mm | Swirling Grid Diameter 7 mm |
|----|---------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1300 | 0.256 | 0.252 | 0.250 | 0.252 |
| 2 | 1800 | 0.237 | 0.243 | 0.234 | 0.237 |
| 3 | 2300 | 0.251 | 0.262 | 0.239 | 0.245 |
| 4 | 2800 | 0.286 | 0.298 | 0.274 | 0.285 |
| 5 | 3300 | 0.322 | 0.332 | 0.306 | 0.312 |

Nilai rata-rata hasil pengolahan data untuk efisiensi

| No | Putaran (rpm) | Standar | Swirling Grid Diameter 5 mm | Swirling Grid Diameter 6 mm | Swirling Grid Diameter 7 mm |
|----|---------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1300 | 25.772 | 26.147 | 26.319 | 26.113 |
| 2 | 1800 | 27.760 | 27.111 | 28.102 | 27.747 |
| 3 | 2300 | 26.240 | 25.123 | 27.520 | 26.891 |
| 4 | 2800 | 23.023 | 22.110 | 24.071 | 23.070 |
| 5 | 3300 | 20.484 | 19.842 | 21.525 | 21.113 |

Nilai rata-rata hasil pengolahan data untuk emisi gas CO

| No | Putaran (rpm) | Standar | Swirling Grid Diameter 5 mm | Swirling Grid Diameter 6 mm | Swirling Grid Diameter 7 mm |
|----|---------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1300 | 1.689 | 1.768 | 1.609 | 1.899 |
| 2 | 1800 | 0.685 | 0.851 | 0.471 | 0.541 |
| 3 | 2300 | 0.846 | 0.934 | 0.359 | 0.542 |
| 4 | 2800 | 0.920 | 0.920 | 0.457 | 0.669 |
| 5 | 3300 | 1.033 | 1.127 | 0.570 | 0.780 |

Lampiran 3

Tabel hubungan $\frac{P_1 - P_2}{P_1} - \varepsilon$, $\theta - P_s$ dan $\theta - \gamma_w$

- Hubungan antara $\frac{P_1 - P_2}{P_1}$ dan ε

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{P_1 - P_2}{P_1}$ | 0 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| ε | 1.000 | 0.969 | 0.906 | 0.873 | 0.840 | 0.850 | 0.769 | 0.732 | 0.693 | 0.653 |

Sumber: *Operation Manual: 10*

- Hubungan $\theta - P_s$, $\theta - \gamma_w$

| θ (°C) | P_s (mmHg) | γ_w (kg/m ³) | θ (°C) | P_s (mmHg) | γ_w (kg/m ³) |
|------------------|-----------------|------------------------------------|------------------|-----------------|------------------------------------|
| 0.0 | 4.581 | 0.00485 | 20.0 | 17.53 | 0.01730 |
| 1.0 | 4.925 | 0.00520 | 21.0 | 18.65 | 0.01834 |
| 2.0 | 5.292 | 0.00556 | 22.0 | 19.82 | 0.01943 |
| 3.0 | 5.682 | 0.00595 | 23.0 | 21.07 | 0.02058 |
| 4.0 | 6.098 | 0.00636 | 24.0 | 22.38 | 0.02179 |
| 5.0 | 6.540 | 0.00680 | 25.0 | 23.75 | 0.02306 |
| 6.0 | 7.010 | 0.00726 | 26.0 | 25.21 | 0.02438 |
| 7.0 | 7.511 | 0.00775 | 27.0 | 26.74 | 0.02578 |
| 8.0 | 8.042 | 0.00827 | 28.0 | 28.35 | 0.02725 |
| 9.0 | 8.606 | 0.00882 | 29.0 | 30.04 | 0.02878 |
| 10.0 | 9.205 | 0.00940 | 30.0 | 31.83 | 0.03039 |
| 11.0 | 9.840 | 0.01001 | 31.0 | 33.70 | 0.03207 |
| 12.0 | 10.514 | 0.01066 | 32.0 | 35.67 | 0.03384 |
| 13.0 | 11.23 | 0.01135 | 33.0 | 37.73 | 0.03569 |
| 14.0 | 11.98 | 0.01207 | 34.0 | 39.90 | 0.03762 |
| 15.0 | 12.78 | 0.01283 | 35.0 | 42.18 | 0.03964 |
| 16.0 | 13.61 | 0.01364 | 36.0 | 44.57 | 0.04175 |
| 17.0 | 14.53 | 0.01448 | 37.0 | 47.08 | 0.04396 |
| 18.0 | 15.47 | 0.01537 | 38.0 | 49.70 | 0.04627 |
| 19.0 | 16.47 | 0.01631 | 39.0 | 52.45 | 0.04869 |
| | | | 40.0 | 55.34 | 0.05120 |

Sumber: *Operation Manual: 22*

Lampiran 4

Tabel F (α ; v_1 ; v_2) untuk $\alpha = 0.05$

| $v_1 \backslash v_2$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 20 | 30 | 40 | 60 | 120 | - |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 161 | 200 | 216 | 225 | 230 | 234 | 237 | 239 | 241 | 242 | 244 | 246 | 248 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 |
| 2 | 18.5 | 19 | 19.2 | 19.2 | 19.3 | 19.3 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.5 | 19.5 | 19.5 | 19.5 | 19.5 |
| 3 | 10.2 | 9.55 | 9.28 | 9.12 | 9.01 | 8.94 | 8.89 | 8.85 | 8.81 | 8.79 | 8.74 | 8.7 | 8.66 | 8.62 | 8.59 | 8.57 | 8.55 | 8.53 |
| 4 | 7.71 | 6.94 | 6.59 | 6.39 | 6.26 | 6.16 | 6.09 | 6.04 | 6 | 5.96 | 5.91 | 5.86 | 5.8 | 5.75 | 5.72 | 5.69 | 5.66 | 5.63 |
| 5 | 6.61 | 5.79 | 5.41 | 5.19 | 5.05 | 4.95 | 4.88 | 4.82 | 4.77 | 4.74 | 4.68 | 4.62 | 4.56 | 4.5 | 4.46 | 4.43 | 4.4 | 4.36 |
| 6 | 5.99 | 5.14 | 4.76 | 4.53 | 4.39 | 4.28 | 4.21 | 4.15 | 4.1 | 4.06 | 4 | 3.94 | 3.87 | 3.81 | 3.77 | 3.74 | 3.7 | 3.67 |
| 7 | 5.59 | 4.74 | 4.35 | 4.12 | 3.97 | 3.87 | 3.79 | 3.73 | 3.68 | 3.64 | 3.57 | 3.51 | 3.44 | 3.38 | 3.34 | 3.3 | 3.27 | 3.23 |
| 8 | 5.32 | 4.46 | 4.07 | 3.84 | 3.69 | 3.58 | 3.5 | 3.44 | 3.39 | 3.35 | 3.28 | 3.22 | 3.15 | 3.08 | 3.04 | 3.01 | 2.97 | 2.93 |
| 9 | 5.12 | 4.26 | 3.86 | 3.63 | 3.48 | 3.37 | 3.29 | 3.23 | 3.18 | 3.14 | 3.07 | 3.01 | 2.94 | 2.86 | 2.83 | 2.79 | 2.75 | 2.71 |
| 10 | 4.96 | 4.1 | 3.71 | 3.48 | 3.33 | 3.22 | 3.14 | 3.07 | 3.02 | 2.98 | 2.91 | 2.84 | 2.77 | 2.7 | 2.66 | 2.62 | 2.58 | 2.54 |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 20 | 30 | 40 | 60 | 120 | - |
| 11 | 4.84 | 3.98 | 3.59 | 3.36 | 3.2 | 3.09 | 3.01 | 2.95 | 2.9 | 2.85 | 2.79 | 2.72 | 2.65 | 2.57 | 2.53 | 2.49 | 2.45 | 2.4 |
| 12 | 4.75 | 3.89 | 3.49 | 3.26 | 3.11 | 3 | 2.91 | 2.85 | 2.8 | 2.75 | 2.69 | 2.62 | 2.54 | 2.47 | 2.43 | 2.38 | 2.34 | 2.3 |
| 13 | 4.67 | 3.81 | 3.41 | 3.18 | 3.03 | 2.92 | 2.83 | 2.77 | 2.71 | 2.67 | 2.6 | 2.53 | 2.46 | 2.38 | 2.34 | 2.3 | 2.25 | 2.21 |
| 14 | 4.6 | 3.74 | 3.34 | 3.11 | 2.96 | 2.85 | 2.76 | 2.7 | 2.65 | 2.6 | 2.53 | 2.46 | 2.39 | 2.31 | 2.27 | 2.22 | 2.18 | 2.13 |
| 15 | 4.45 | 3.68 | 3.29 | 3.06 | 2.9 | 2.79 | 2.71 | 2.64 | 2.59 | 2.54 | 2.48 | 2.4 | 2.33 | 2.25 | 2.2 | 2.16 | 2.11 | 2.07 |
| 16 | 4.49 | 3.63 | 3.24 | 3.01 | 2.85 | 2.74 | 2.66 | 2.59 | 2.54 | 2.49 | 2.42 | 2.35 | 2.28 | 2.19 | 2.15 | 2.11 | 2.06 | 2.01 |
| 17 | 4.45 | 3.59 | 3.2 | 2.96 | 2.81 | 2.7 | 2.61 | 2.55 | 2.49 | 2.45 | 2.38 | 2.31 | 2.23 | 2.15 | 2.1 | 2.06 | 2.01 | 1.96 |
| 18 | 4.41 | 3.55 | 3.16 | 2.93 | 2.77 | 2.66 | 2.58 | 2.51 | 2.46 | 2.41 | 2.34 | 2.27 | 2.19 | 2.11 | 2.06 | 2.02 | 1.97 | 1.92 |
| 19 | 4.38 | 3.52 | 3.13 | 2.9 | 2.74 | 2.63 | 2.54 | 2.48 | 2.42 | 2.38 | 2.31 | 2.23 | 2.16 | 2.07 | 2.03 | 1.98 | 1.93 | 1.88 |
| 20 | 4.35 | 3.49 | 3.1 | 2.87 | 2.71 | 2.6 | 2.51 | 2.45 | 2.39 | 2.35 | 2.28 | 2.2 | 2.12 | 2.04 | 1.99 | 1.95 | 1.9 | 1.84 |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 20 | 30 | 40 | 60 | 120 | - |
| 25 | 4.24 | 3.39 | 2.99 | 2.76 | 2.6 | 2.49 | 2.4 | 2.34 | 2.28 | 2.24 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.92 | 1.87 | 1.82 | 1.77 | 1.71 |
| 30 | 4.17 | 3.32 | 2.92 | 2.69 | 2.53 | 2.42 | 2.33 | 2.27 | 2.21 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.93 | 1.84 | 1.79 | 1.74 | 1.68 | 1.62 |
| 40 | 4.08 | 3.23 | 2.84 | 2.61 | 2.45 | 2.34 | 2.25 | 2.18 | 2.12 | 2.08 | 2 | 1.92 | 1.84 | 1.74 | 1.69 | 1.64 | 1.58 | 1.51 |
| 60 | 4 | 3.15 | 2.76 | 2.53 | 2.37 | 2.25 | 2.17 | 2.1 | 2.04 | 1.99 | 1.92 | 1.84 | 1.75 | 1.65 | 1.59 | 1.53 | 1.47 | 1.39 |
| 120 | 3.92 | 3.07 | 2.68 | 2.45 | 2.29 | 2.18 | 2.09 | 2.02 | 1.96 | 1.91 | 1.83 | 1.75 | 1.66 | 1.55 | 1.5 | 1.43 | 1.35 | 1.25 |
| - | 3.84 | 3 | 2.6 | 2.37 | 2.21 | 2.1 | 2.01 | 1.94 | 1.88 | 1.83 | 1.75 | 1.67 | 1.57 | 1.46 | 1.39 | 1.32 | 1.22 | 1 |