

PEMODELAN DAN SIMULASI SALURAN MOTOR BAKAR TORAK DUA LANGKAH DENGAN ALIRAN GAS TAK TUNAK

T. A. Fauzi Soelaiman^{1, 2)}, Rachmat K. Bachrun²⁾,
dan Arthur M. Mangaranap³⁾,

¹⁾Lab Termodinamika PPAU-Ilmu Rekayasa, ITB

²⁾Jurusan Teknik Mesin, ITB

³⁾Alumni Jurusan Teknik Mesin, ITB

Ringkasan

Motor bakar torak dua langkah merupakan salah satu jenis mesin konversi energi yang banyak digunakan di masyarakat terutama di bidang transportasi. Proses yang terjadi pada silinder dan saluran motor bakar dapat didekati dengan persamaan matematika dengan asumsi-asumsi yang merupakan batasan suatu model untuk mendekati proses yang sebenarnya. Pada pemodelan dan simulasi motor bakar torak dua langkah ini, aliran pada saluran dimodelkan sebagai aliran gas tak tunak (unsteady gas flow). Aliran gas tak tunak sangat penting dalam motor bakar torak dua langkah karena mempengaruhi proses pemasukan dan pengeluaran fluida kerjanya. Hasil simulasi dengan aliran gas tak tunak dapat digunakan untuk analisis panjang saluran masuk dan keluar yang diinginkan pada sebuah motor bakar torak dua langkah. Sebagai contoh, program ini dijalankan untuk sebuah motor bakar torak dua langkah MK1.

Abstract

A two-stroke engine is one of the commonly used energy conversion systems for transportation. The process inside the cylinder and the transport passages can be simulated with mathematical models with certain assumptions. In modeling and simulating a two-stroke engine, the flows in the passages are modeled as unsteady gas flows. The unsteady gas flows are important in a two-stroke engine since they affect the intake and exhaust processes of the working fluid. The results of the simulation can be used for analyzing or tuning the intake and exhaust passages of a two-stroke engine. As an example, the program was applied for a two-stroke engine MK1.

Keywords: Unsteady gas flow, two stroke engine, modeling, and simulation.

1. PENDAHULUAN

Proses yang dialami fluida kerja pada sebuah motor bakar torak dapat diamati dengan menggunakan siklus ideal yang dapat menunjukkan keadaan fluida kerja selama satu siklus. Namun banyaknya asumsi yang digunakan menyebabkan fenomena yang diamati menjadi tidak akurat sehingga manfaatnya menjadi terbatas. Karena itu, diperlukan suatu model dengan asumsi yang minimal dengan menggunakan persamaan-persamaan matematika baik yang diturunkan dari fenomena-fenomena yang terjadi pada motor bakar torak, maupun yang didapat secara empiris.

Hasil simulasi dapat memberikan data prestasi sebuah motor bakar torak dua langkah seperti daya indikator dan tekanan efektif rata-rata untuk kecepatan putar tertentu. Selain itu, dapat pula diketahui variasi tekanan maupun temperatur dalam silinder, ruang engkol, saluran masuk, saluran keluar, dan saluran pembakaran, terhadap sudut engkol. Simulasi proses pembakaran pada silinder motor bakar dua langkah telah dibahas sebelumnya [1]. Pada bagian

ini akan dibahas simulasi pada saluran motor bakar dua langkah. Dengan mengetahui variasi tekanan pada saluran, akan dapat dianalisis pengaruhnya pada proses pengisian dan pengosongan silinder.

Proses penting yang terdapat pada motor bakar dua langkah pada umumnya ialah adanya proses pembilasan. Dengan simulasi motor bakar torak dua langkah ini akan diketahui sifat-sifat pembilasan seperti efisiensi pembilasan dan perbandingan pembilasan suatu motor bakar torak untuk kecepatan putar tertentu.

Dengan menggunakan persamaan-persamaan matematika, maka dapat disimulasikan proses yang terjadi. Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan komputer karena banyaknya persamaan yang harus diselesaikan untuk menyelesaikan satu siklus pembakaran maupun untuk melakukan iterasi.

Hasil simulasi dapat ditampilkan dalam bentuk grafik dan data masukan dapat diubah oleh pengguna sehingga dapat digunakan sebagai alat belajar.

Pemodelan dibatasi untuk motor bakar torak dua langkah dengan pengontrolan bukaan lubang yang menggunakan torak. Selain itu, saluran-saluran yang ada diasumsikan berupa pipa lurus dengan luas penampang konstan. Analisis yang dilakukan meliputi pengaruh dimensi saluran-saluran seperti saluran masuk dan saluran keluar terhadap prestasi motor maupun terhadap proses pembilasan dalam silinder.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Asumsi Dasar Pemodelan

Dalam melakukan pemodelan motor bakar torak dua langkah ini, digunakan beberapa asumsi sebagai pembatasan untuk mempercepat proses perhitungan yang dilakukan dalam proses simulasi. Adapun asumsi dasar yang diambil adalah:

1. Fluida kerja adalah gas ideal dengan sifat gas yang berubah menurut komposisi gas dan temperatur sesaat,
2. Fluida yang masuk ke ruang engkol adalah udara,
3. Rugi-rugi gesekan, perpindahan panas karena gesekan, dan perpindahan panas karena konveksi sepanjang saluran masuk, buang, maupun transfer diabaikan. Semua besaran yang dihasilkan merupakan besaran indikator,
4. Massa fluida kerja dalam silinder konstan selama lubang tertutup,
5. Korelasi-korelasi yang digunakan untuk menyatakan proses perpindahan panas baik dalam silinder maupun ruang engkol menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Annand [2, 3],
6. Semua proses aliran gas yang masuk, keluar, maupun di dalam silinder dan ruang engkol ditinjau sebagai aliran gas tak tunak (*unsteady gas flow*), dan
7. Tekanan pada silinder maupun ruang engkol dianggap seragam.

2.2 Aliran Gas Tak Tunak

Definisi aliran gas tak tunak ialah aliran dengan tekanan, temperatur, dan kecepatan gas dalam saluran yang dapat berubah-ubah terhadap waktu. Keadaan tersebut juga dikenal sebagai gelombang tekanan (*pressure wave*) pada saluran. Aliran gas tak tunak sangat penting pada motor bakar dua langkah karena pengaruhnya sangat besar terhadap proses pembilasan di dalam silinder yaitu pada proses pemasukan dan pengeluaran gas pada silinder maupun ruang engkol.

2.2.1 Teori aliran gas tak tunak

Dalam perambatan gelombang tekanan, kecepatan gelombang suara referensi di udara didefinisikan sebagai [3]:

$$a_0 = \sqrt{k.R.T_0} \quad (1)$$

dengan k merupakan perbandingan panas jenis gas, R adalah konstanta gas, dan T_0 adalah temperatur referensi. Kecepatan gelombang suara pada temperatur T dan tekanan p yang disebut kecepatan gelombang suara lokal didefinisikan seperti Persamaan (1) yaitu:

$$a = \sqrt{k.R.T} \quad (2)$$

Hubungan antara T dan T_0 dengan asumsi perubahan tingkat keadaan berlangsung secara isentropis dari kondisi p_0 dan T_0 ke p dan T dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3)$$

sehingga hubungan antara a dengan a_0 dapat diturunkan menjadi:

$$\frac{a}{a_0} = \frac{\sqrt{kRT}}{\sqrt{kRT_0}} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \quad (4)$$

Kecepatan gas lokal pada suatu gelombang tekanan oleh Earnshaw didefinisikan sebagai [3]:

$$c = \frac{2}{k-1} a_0 \left(\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - 1 \right) \quad (5)$$

Dari persamaan kecepatan gas di atas didefinisikan notasi untuk mempermudah penulisan selanjutnya yaitu:

$$P = \text{perbandingan tekanan} = \frac{p}{p_0} \quad (6)$$

$$X = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} = P^{\frac{k-1}{2k}} \quad (7)$$

Notasi X pada Persamaan (7) menyatakan perbandingan amplitudo tekanan.

Notasi lain yang digunakan untuk fungsi perbandingan panas jenis gas dinyatakan dengan [3]:

$$G_3 = \frac{4-2k}{k-1}$$

$$G_4 = \frac{3-k}{k-1}$$

$$G_5 = \frac{2}{k-1}$$

$$G_6 = \frac{k+1}{k-1}$$

$$G_7 = \frac{2k}{k-1}$$

$$G_{17} = \frac{k-1}{2k}$$

$$G_{35} = \frac{k}{k-1}$$

Subskrip fungsi di atas menunjukkan harga G apabila gas tersebut adalah udara dengan perbandingan panas jenis (k) sebesar 1,4.

Dengan adanya notasi tersebut maka hubungan antara temperatur lokal dan referensi, persamaan kecepatan gelombang suara, dan persamaan kecepatan gas pada Persamaan (4), (5), dan (6) dapat dituliskan menjadi:

$$T = T_0 \cdot X^{G_2} \quad (8)$$

$$a = a_0 \cdot X \quad (9)$$

$$c = G_5 a_0 (X - 1) \quad (10)$$

Kerapatan lokal pada suatu titik dengan tekanan p dan temperatur T dengan menggunakan asumsi isentropis yang sama dapat ditulis menjadi:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} = X^{G_5} \quad (11)$$

Kecepatan perambatan pada suatu titik dengan tekanan p dan temperatur T merupakan gelombang suara yang bergerak pada kecepatan suara lokal di atas gas yang bergerak pada tekanan p dan temperatur T . Karena itu, kecepatan perambatan merupakan penjumlahan kecepatan suara lokal dan kecepatan gas lokal.

$$\alpha = a + c$$

$$\alpha = a_0 \cdot X + G_5 a_0 (X - 1)$$

$$\alpha = a_0 [G_6 \cdot X - G_5] \quad (12)$$

2.2.2 Superposisi gelombang tekanan pada saluran

Dua gelombang tekanan yang merambat ke arah yang berlawanan dalam saluran akan bertemu dan terjadi superposisi antara keduanya.

Setelah terjadi superposisi maka dapat dihitung besaran-besaran superposisinya yaitu tekanan superposisi dan kecepatan gas superposisinya masing-masing sebagai [3]:

$$X_s = X_1 + X_2 - 1 \quad (13)$$

$$c_s = c_1 + c_2 = G_5 a_0 (X_1 - X_2) \quad (14)$$

Bilangan Mach akibat proses superposisi dapat dihitung dengan menghitung kecepatan suara superposisinya:

$$a_s = a_0 \cdot X_s \quad (15)$$

$$M_s = \frac{c_s}{a_s} = \frac{G_5 a_0 (X_1 - X_2)}{a_0 \cdot X_s} \quad (16)$$

Peristiwa superposisi dua gelombang tadi juga mengubah kecepatan perambatan masing-masing gelombang menjadi kecepatan perambatan superposisi arah ke kiri untuk p_2 dan ke kanan untuk p_1 :

$$\alpha_{s \text{ kanan}} = a_0 (G_6 X_1 - G_4 X_2 - 1) \quad (17)$$

$$\alpha_{s \text{ kiri}} = -a_0 (G_6 X_2 - G_4 X_1 - 1) \quad (18)$$

Dengan data di atas maka dapat dihitung laju aliran massa selama perambatan gelombang dengan arah aliran massa ditentukan oleh hasil perhitungan tersebut.

$$\dot{m} = \rho_s \cdot A \cdot c_s \quad (19)$$

$$= \rho_0 \cdot (X_1 + X_2 - 1)^{G_5} \cdot A \cdot c_s$$

Dalam pemodelan aliran gas tak tunak, tidak diijinkan terjadi kecepatan gas supersonik atau bilangan Mach superposisi (M_s) melebihi satu. Hal ini disebabkan karena gas tidak dapat bergerak lebih cepat daripada perubahan gelombang tekanan yang membuat mereka bergerak. Untuk mengatasi terjadinya hal ini dalam proses simulasi, maka diasumsikan terjadi kejutan lemah (*weak shock*) dan kecepatan gas diubah sehingga menjadi subsonik dengan menggunakan persamaan Rankine-Hugoniot [3]. Prinsip perhitungan untuk bilangan Mach lebih dari satu ialah dengan mengubah harga X_1 dan X_2 melalui pantulan internal sehingga terjadi kejutan pada gas menjadi aliran gas subsonik dengan harga bilangan Mach baru ($M_{s \text{ baru}}$).

$$M_{s \text{ baru}} = \frac{M_s^2 + G_5}{G_7 M_s^2 - 1} \quad (20)$$

Dari bilangan Mach yang baru didapat amplitudo perbandingan tekanan yang baru yaitu:

$$X_{1 \text{ baru}} = \frac{1 + \Gamma_3 + \Gamma_2 \cdot \Gamma_3}{2} \quad (21)$$

$$X_{2 \text{ baru}} = \frac{1 + \Gamma_3 - \Gamma_2 \cdot \Gamma_3}{2} \quad (22)$$

dengan:

$$\Gamma_1 = \frac{2k}{k+1} M_s^2 - \frac{k-1}{k+1}$$

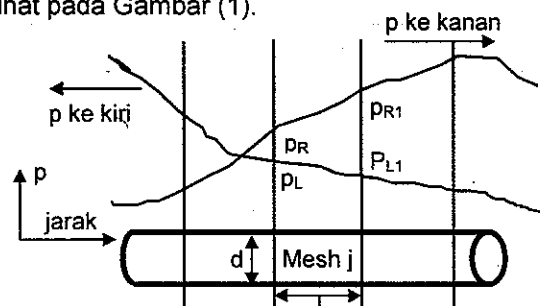
$$\Gamma_2 = \frac{k-1}{2} \sqrt{M_{s \text{ baru}}}$$

$$\Gamma_3 = X_s \cdot \Gamma_1^{G_{17}}$$

2.3 Pemodelan Aliran Gas

2.3.1 Pemodelan aliran gas tak tunak pada saluran

Pemodelan pada saluran-saluran yang ada yaitu saluran masuk, saluran transfer, dan saluran keluar dilakukan dengan menggunakan metode yang dikembangkan oleh Gordon Blair [3]. Metode yang digunakan ialah dengan membagi saluran menjadi mesh dengan panjang L . Gelombang tekanan yang merambat pada sebuah saluran terdiri dari gelombang tekanan yang merambat ke kanan dan ke kiri. Pada salah satu mesh, misalnya mesh j , memiliki harga tekanan masing-masing p_R , p_L di sisi kiri mesh j dan p_{R1} , dan p_{L1} di sisi kanan mesh yang dapat dilihat pada Gambar (1).



Gambar 1. Perambatan gelombang tekanan pada saluran [3].

Rentang waktu perhitungan dalam simulasi ini yaitu dt , ditentukan sedemikian rupa agar proses perhitungan selalu merupakan proses interpolasi dan bukan ekstrapolasi. Penentuan harga dt ini diperlukan untuk menjaga kestabilan proses simulasi. Karena itu, rentang waktu ditentukan sebagai waktu yang paling singkat yang dibutuhkan oleh sebuah gelombang tekanan untuk merambat sejauh L . Untuk itu, sebelum memulai perhitungan, seluruh mesh pada saluran yang disimulasikan diperiksa untuk mendapatkan harga rentang waktu yang terkecil yang dapat diterapkan untuk seluruh sistem.

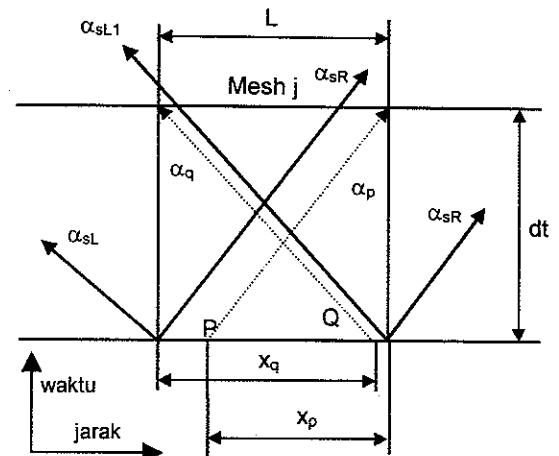
Setiap mesh pada saluran seperti pada mesh j memiliki empat harga tekanan yaitu dua harga tekanan di sisi kiri yaitu p_R dan p_L serta dua harga tekanan di sisi kanan yaitu p_{R1} dan p_{L1} . Kedua pasang harga tekanan itu mengalami proses interpolasi sehingga menghasilkan dua pasang harga kecepatan perambatan gelombang tekanan pada masing-masing ujung mesh dengan arah ke kiri dan ke kanan. Pada Gambar (2) dapat dilihat keempat kecepatan perambatan gelombang tekanan (α) pada mesh j yang digambarkan pada bidang waktu terhadap jarak. Dengan mencari harga α terbesar untuk seluruh mesh yang ada pada saluran yang disimulasikan, maka didapat harga dt yang terkecil yaitu antara:

$$dt = \frac{L}{\alpha_{sL}} \text{ atau } dt = \frac{L}{\alpha_{sL1}}, \quad (23)$$

$$\text{atau } dt = \frac{L}{\alpha_{sR}} \text{ atau } dt = \frac{L}{\alpha_{sR1}}$$

Pada mesh j terlihat gelombang tekanan ke kanan p_R merambat dengan kecepatan perambatan α_{sR} yang tidak cukup cepat untuk mencapai sisi kanan pada rentang waktu dt . Sedangkan α_p yang merupakan kecepatan perambatan superposisi dari perbandingan amplitudo tekanan X_p dan berawal dari titik P dapat mencapai ujung kanan tepat pada rentang waktu dt . Perbandingan gelombang tekanan ini mempunyai hubungan linier dengan posisinya dan gelombang tekanan yang bergerak ke kanan yaitu X_R dan X_{R1} . Sementara itu, gelombang tekanan p_{L1} yang merambat dengan kecepatan α_{sL1} juga tidak cukup cepat untuk mencapai sisi kiri pada rentang waktu dt . Karena itu, ditentukan gelombang tekanan X_q yang merambat ke kiri dengan kecepatan perambatan α_q yang berawal dari titik Q yang dapat mencapai sisi kiri tepat pada rentang waktu dt .

Perbandingan gelombang tekanan X_q seperti juga X_p mempunyai hubungan linear dengan posisinya dan gelombang tekanan yang bergerak ke kiri yaitu X_L dan X_{L1} . Hubungan yang linear ini menyebabkan perhitungan harus selalu dilakukan dengan interpolasi dengan titik P dan Q selalu terletak di dalam mesh yang bersangkutan dengan mengatur besarnya dt .



Gambar 2. Perambatan gelombang tekanan pada mesh j [3].

Dengan menggunakan notasi-notasi untuk mempermudah penulisan, maka harga perbandingan amplitudo tekanan X_p dan X_q ditentukan sebagai:

$$X_p = \frac{1 + D + F_L + F_L \cdot C}{G_4 \cdot (F_R \cdot F_L - 1)} \quad (24)$$

$$X_q = \frac{1 + C + F_R + F_R \cdot D}{G_4 \cdot (F_R \cdot F_L - 1)} \quad (25)$$

dengan notasi untuk mempermudah penulisan:

$$A = E(X_{R1} - X_R)$$

$$B = E(X_L - X_{L1})$$

$$C = \frac{X_{R1}}{A}$$

$$D = \frac{X_L}{B}$$

$$E = \frac{a_0 \cdot dt}{L}$$

$$F_R = \frac{G_6 + \frac{1}{A}}{G_4}$$

$$F_L = \frac{G_6 + \frac{1}{B}}{G_4}$$

Harga X_p dan X_q merupakan harga perbandingan amplitudo tekanan yang merupakan proses superposisi tekanan pada mesh j .

Selama proses simulasi ada kemungkinan terjadi harga X_R dan X_{R1} sama, harga X_L dan X_{L1} sama, ataupun terjadi harga X_R dan X_{R1} dan harga X_L dan X_{L1} sama. Untuk itu, solusi khusus untuk mendapat harga X_p dan X_q pada tiga kasus di atas adalah:

- Kasus $X_R = X_{R1}$

$$X_p = X_{R1} \quad (26)$$

$$X_q = \frac{1 + D + G_4 \cdot X_p}{G_6 + \frac{1}{B}} \quad (27)$$

- Kasus $X_L = X_{L1}$

$$X_q = X_{L1} \quad (28)$$

$$X_p = \frac{1 + C + G_4 \cdot X_q}{G_6 + \frac{1}{A}} \quad (29)$$

- Kasus $X_R = X_{R1}$ dan $X_L = X_{L1}$

$$X_q = X_{L1} \quad (30)$$

$$X_p = X_{R1} \quad (31)$$

Harga X_p yang telah dihitung melalui Persamaan (24) akan menjadi harga perbandingan amplitudo tekanan ke arah kanan di sisi sebelah kanan mesh j setelah rentang waktu dt (X_{R1}'). Sedangkan harga X_q dari Persamaan (25) akan menjadi harga perbandingan amplitudo tekanan ke arah kiri di sisi kiri mesh j setelah rentang waktu dt (X_{L1}').

2.3.2 Pemodelan gelombang tekanan pada saluran masuk dan keluar

Dengan menggunakan pemodelan aliran gas tak tunak di atas maka telah ditentukan harga perbandingan amplitudo tekanan yang baru pada kedua ujung mesh j setelah rentang waktu dt yaitu:

$${}_jX_{R1}' = {}_jX_p \quad (32)$$

$${}_jX_{L1}' = {}_jX_q \quad (33)$$

Selain menjadi harga perbandingan amplitudo tekanan pada ujung-ujung mesh j , perbandingan amplitudo tekanan superposisi, X_p dan X_q , juga menjadi harga perbandingan amplitudo tekanan yang baru pada ujung-ujung mesh yang bersebelahan dengan mesh j [3] yaitu harga X_p akan menjadi harga X_R' untuk mesh di sebelah kanan mesh j , mesh $(j+1)$ dan harga X_q akan menjadi harga X_{L1}' untuk mesh di sebelah kiri mesh j , mesh $(j-1)$.

$${}_jX_{R1}' = (j-1)X_p \quad (34)$$

$${}_jX_{L1}' = (j+1)X_q \quad (35)$$

Pengaruh dari mesh-mesh lain juga terjadi pada mesh j sehingga besarnya perbandingan amplitudo tekanan yang belum diketahui setelah rentang waktu dt yaitu ${}_jX_R$ dan ${}_jX_{L1}$ pada mesh j akan didapat dari hasil perhitungan tekanan superposisi pada mesh-mesh yang bersebelahan dengan mesh j yaitu mesh $(j-1)$ dan mesh $(j+1)$.

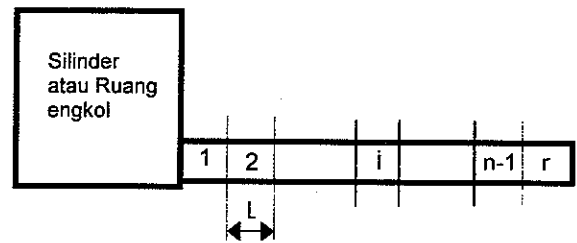
$${}_jX_R' = (j-1)X_p \quad (36)$$

$${}_jX_{L1}' = (j+1)X_q \quad (37)$$

Saluran masuk dan saluran keluar sebuah motor bakar torak dua langkah yang dimodelkan seperti pada Gambar (3) memiliki n buah mesh. Untuk saluran masuk, maka saluran dihubungkan dengan ruang engkol sedangkan untuk saluran keluar dihubungkan dengan silinder

Pemodelan gelombang tekanan memiliki dua kondisi yaitu kondisi lubang terbuka dan lubang tertutup. Pemodelan untuk kondisi lubang terbuka maupun tertutup dilakukan dengan menerapkan teori aliran gas seperti pada Persamaan (32) sampai (37)

untuk mendapatkan harga perbandingan amplitudo tekanan baru.



Gambar 3. Saluran masuk atau keluar.

Untuk mesh-mesh yang terletak di ujung saluran yaitu mesh 1 dan n maka pengaruh dari silinder/ruang engkol yang terletak di sebelah kiri mesh 1 dan ujung saluran terbuka untuk mesh n akan dibahas pada bagian berikutnya. Untuk itu, harga perbandingan amplitudo tekanan semua mesh pada saluran masuk dan keluar yang disimulasikan setelah rentang waktu dt dapat dituliskan sebagai berikut:

- Mesh 2 sampai $(n-1)$

$${}_jX_{R1}' = {}_jX_p$$

$${}_jX_{L1}' = {}_jX_q$$

$${}_jX_R' = (j-1)X_p$$

$${}_jX_{L1}' = (j+1)X_q$$

- Mesh 1

$${}_1X_{R1}' = {}_1X_p$$

$${}_1X_{L1}' = {}_1X_q$$

$${}_1X_{L1}' = {}_2X_q$$

Perhitungan perbandingan amplitudo tekanan pada sisi kiri mesh 1, ${}_1X_{R1}'$ akan dijelaskan kemudian yaitu menggunakan teori aliran gas tak tunak pada ujung saluran tertutup untuk kondisi lubang tertutup, maupun pada ujung saluran yang bertemu dengan silinder/ruang engkol untuk kondisi lubang terbuka.

- Mesh n

$${}_nX_{R1}' = {}_nX_p$$

$${}_nX_{L1}' = {}_nX_q$$

$${}_nX_R' = (n-1)X_p$$

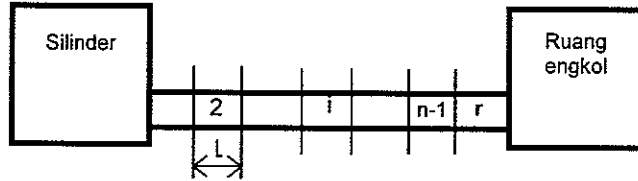
Perhitungan perbandingan amplitudo tekanan pada sisi kanan mesh n , ${}_nX_{L1}'$ menggunakan teori aliran gas tak tunak pada ujung saluran yang terbuka.

2.3.3 Pemodelan gelombang tekanan pada saluran transfer

Pemodelan untuk saluran transfer motor bakar torak dua langkah digambarkan seperti pada Gambar (4). Saluran transfer merupakan saluran yang menghubungkan silinder dengan ruang engkol.

Pada saluran transfer, ujung yang memiliki lubang adalah ujung yang berhubungan dengan silinder yaitu mesh 1. Lubang tersebut dinamakan lubang transfer, sedangkan ujung yang satunya selalu dalam kondisi terbuka. Pemodelan gelombang tekanan pada saluran transfer juga memiliki dua

kondisi yaitu kondisi lubang transfer tertutup dan terbuka.



Gambar 4. Saluran transfer.

Pemodelan pada mesh-mesh selain di ujung-ujung saluran transfer sama dengan untuk saluran masuk maupun keluar. Untuk mesh yang lain dihitung menggunakan teori aliran gas tak tunak pada ujung-ujung saluran.

- Mesh 2 sampai (n-1)

$$\begin{aligned} iX_{R1}' &= iX_p \\ iX_L' &= iX_q \\ iX_R' &= (i-1)X_p \\ iX_{L1}' &= (i+1)X_q \end{aligned}$$

- Mesh 1

$$\begin{aligned} 1X_{R1}' &= 1X_p \\ 1X_L' &= 1X_q \\ 1X_{L1}' &= 2X_q \end{aligned}$$

Perhitungan perbandingan amplitudo tekanan pada sisi kiri mesh 1, $1X_R'$ akan dijelaskan kemudian yaitu menggunakan teori aliran gas tak tunak pada ujung saluran tertutup untuk kondisi lubang transfer tertutup, maupun pada ujung saluran yang bertemu dengan silinder untuk kondisi lubang transfer terbuka.

- Mesh n

$$\begin{aligned} nX_{R1}' &= nX_p \\ nX_L' &= nX_q \\ nX_R' &= (n-1)X_p \end{aligned}$$

Perhitungan perbandingan amplitudo tekanan pada sisi kanan mesh n, nX_{L1}' akan dijelaskan kemudian yaitu menggunakan teori aliran gas tak tunak pada ujung saluran yang bertemu dengan ruang engkol.

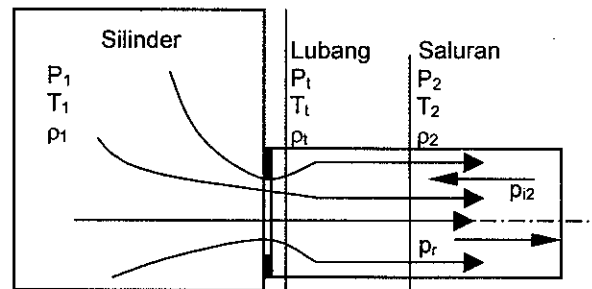
2.3.4 Pemodelan aliran gas tak tunak pada ujung saluran

Untuk mendapatkan harga perbandingan amplitudo tekanan pada ujung-ujung saluran maka harus dihitung pantulan tekanan yang dihasilkan oleh gelombang tekanan yang sampai ke ujung saluran tersebut. Sebuah gelombang tekanan yang mencapai ujung saluran yang disebut tekanan penyebab diberi subskrip i, dan pemodelan pada ujung saluran pada intinya mencari harga tekanan pantulan yang dihasilkan karena pertemuan saluran tersebut dengan silinder, pertemuan dengan ujung yang tertutup, ataupun pertemuan dengan atmosfer pada ujung saluran terbuka. Tekanan pantulan ini diberi subskrip r.

Dalam pemodelan gelombang tekanan pada ujung saluran, perbandingan amplitudo tekanan

penyebab (X_i) yang digunakan dalam perhitungannya menggunakan harga tekanan superposisi ke arah ujung yang bersangkutan yaitu harga X_p untuk mesh yang terletak di ujung kiri dan X_q untuk yang di ujung kanan. Hasil perhitungan pemodelan yang akan dijelaskan di bawah yaitu harga perbandingan amplitudo tekanan pantulan (X_r) akan menjadi harga perbandingan amplitudo tekanan yang baru yang masih belum diketahui pada pemodelan sebelumnya, yaitu X_R' untuk mesh yang terletak di ujung kiri dan X_{L1}' untuk mesh yang terletak di ujung kanan.

Pemodelan aliran dari silinder ke saluran dapat dilihat pada Gambar (5). Aliran dari silinder (1) ke lubang (t) merupakan aliran kontraksi dan dianggap isentropik. Aliran dari lubang (t) ke saluran (2) menunjukkan adanya turbulensi di sudut saluran dan hal ini merupakan penambahan entropi dari lubang ke saluran sehingga aliran dianalisis secara non-isentropik.



Gambar 5. Aliran dari silinder ke saluran.

Terdapat dua jenis aliran dalam pemodelan aliran dari silinder ke saluran yaitu aliran subsonik dan sonik dengan memperhatikan besarnya bilangan Mach pada lubang.

Untuk aliran subsonik, pemodelan dilakukan dengan menggunakan empat persamaan yaitu:

- Persamaan kontinuitas aliran massa melalui lubang (t) dan saluran (2):

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 - \dot{m}_2 &= 0 \\ \rho_{01} \cdot X_t^{G5} \cdot A_t \cdot C_d \cdot c_t - \\ \rho_{02} \cdot (X_{i2} + X_{r2} - 1)^{G5} \cdot A_2 \cdot G_5 \cdot a_{02} \cdot (X_{i1} - X_{r2}) &= 0 \end{aligned} \quad (38)$$

- Hukum Termodinamika I untuk aliran dari silinder (1) ke saluran (2):

$$\begin{aligned} h_1 + \frac{c_1^2}{2} &= h_2 + \frac{c_2^2}{2} \\ G_5 \cdot (a_{01} \cdot X_1^2)^2 - \left[(G_5 \cdot a_{02} \cdot (X_{i2} - X_{r2}))^2 + \right. \\ &\quad \left. G_5 \cdot a_{02}^2 \cdot (X_{i2} + X_{r2} - 1)^2 \right] = 0 \end{aligned} \quad (39)$$

- Hukum Termodinamika I untuk aliran dari silinder (1) ke lubang (t):

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_t + \frac{c_t^2}{2}$$

$$C_p \cdot (T_1 - T_t) - \frac{c_t^2}{2} = 0$$

$$G_5 \left[(a_{01} \cdot X_1)^2 - (a_{01} \cdot X_t)^2 \right] - c_t^2 = 0 \quad (40)$$

- Persamaan momentum untuk aliran dari lubang (t) ke saluran (2):

$$A_2 \cdot (p_t - p_{s2}) + \dot{m}_{s2} \cdot (c_t - c_{s2}) = 0$$

$$p_0 \left[X_t^{G_7} - (X_{i2} + X_{r2} - 1)^{G_7} \right] + [\rho_{02} \cdot (X_{i2} + X_{r2} - 1)]^{G_5} \times$$

$$G_5 \cdot a_{02} \cdot (X_{i2} - X_{r2}) \times [c_t - G_5 \cdot a_{02} \cdot (X_{i2} - X_{r2})] = 0 \quad (41)$$

Harga-harga yang telah diketahui ialah besarnya luas penampang saluran, A_2 , luas penampang lubang, A_t , dan tingkat keadaan dalam silinder yaitu X_1 , a_{01} , dan ρ_{01} . Sifat-sifat gas yang digunakan dalam perhitungan adalah sifat gas dalam silinder.

Empat harga yang belum diketahui yaitu X_{r2} , T_{02} , X_t , dan c_t dapat diselesaikan dengan empat persamaan yang ada. Keempat persamaan di atas merupakan empat persamaan yang non linear dan penyelesaiannya dilakukan dengan metode Newton-Raphson [8].

Setelah mendapat harga X_t dan c_t lalu dihitung bilangan Mach pada lubang. Apabila melebihi satu maka harganya dijadikan satu.

$$M_t = \left| \frac{c_t}{a_{01} \cdot X_t} \right| = 1$$

sehingga:

$$c_t = a_{01} \cdot X_t \quad (42)$$

Dengan mensubstitusikannya ke Persamaan (40), maka didapat:

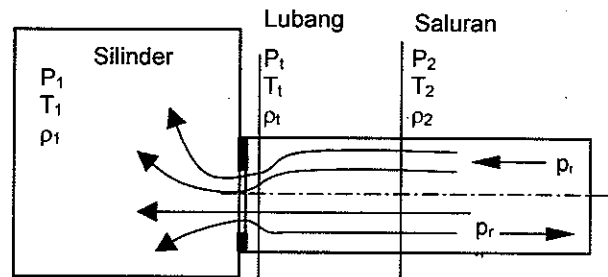
$$X_t = X_1 \times \sqrt{\frac{G_5}{G_5 + 1}} \quad (43)$$

Perhitungan untuk mencari dua variabel lain yang belum diketahui yaitu T_{02} dan X_{r2} dilakukan dengan memilih dua persamaan di antara empat Persamaan (38)-(41). Dua persamaan yang dipilih ialah Persamaan (38) dan (39) dan karena keduanya merupakan persamaan non linear maka diselesaikan juga dengan metode Newton Raphson [8].

Aliran gas melalui lubang tidak menutup kemungkinan terjadinya aliran yang sebaliknya yaitu dari saluran masuk ke silinder. Aliran tersebut dapat dilihat pada Gambar (6) dan seperti pada aliran keluar maka pemodelan aliran dari saluran masuk ke silinder juga dibagi atas aliran subsonik dan aliran sonik.

Analisis aliran dari saluran ke silinder menggunakan persamaan kontinuitas aliran massa melalui lubang (t) dan saluran (2) dan Hukum Termodinamika I untuk aliran dari saluran ke lubang. Harga-harga yang telah diketahui ialah besarnya luas penampang saluran, A_2 , luas penampang lubang, A_t , tingkat keadaan dalam silinder yaitu X_1 , a_{01} , dan ρ_{01} , dan tingkat keadaan dalam saluran yaitu a_{02} dan ρ_{02} .

Sifat-sifat gas yang digunakan untuk perhitungan ialah sifat-sifat gas pada saluran.



Gambar 6. Aliran dari saluran masuk ke silinder.

Persamaan yang digunakan dalam aliran subsonik seperti yang telah disebutkan bahwa tekanan di lubang sama dengan tekanan silinder yaitu:

$$X_t = X_1 \quad (44)$$

- Persamaan kontinuitas massa:

$$\dot{m}_t - \dot{m}_2 = 0$$

$$\rho_{02} \cdot X_1^{G_5} \cdot C_d \cdot A_t \cdot c_t -$$

$$\rho_{02} \cdot (X_{i1} + X_{r2} - 1)^{G_5} \cdot A_2 \cdot G_5 \cdot a_{02} \cdot (X_{i2} - X_{r2}) = 0 \quad (45)$$

- Hukum Termodinamika I:

$$h_2 + \frac{c_2^2}{2} = h_t + \frac{c_t^2}{2}$$

$$\left[G_5 \cdot (a_{02} \cdot (X_{i2} + X_{r2} - 1))^2 - G_5 \cdot (a_{02} \cdot X_1)^2 \right] +$$

$$\left[(G_5 \cdot a_{02} \cdot (X_{i2} - X_{r2}))^2 - c_t^2 \right] = 0 \quad (46)$$

Kedua persamaan ini diselesaikan dengan metode Newton-Raphson [8] untuk mencari dua harga yang tidak diketahui yaitu X_{r2} dan c_t .

Setelah mendapat harga X_t dan c_t lalu dihitung bilangan Mach pada lubang. Apabila dalam perhitungan didapat bilangan Mach lebih dari 1 maka terjadi aliran sonik. Untuk itu, dalam perhitungan bilangan Mach tersebut dijadikan 1.

$$M_t = \frac{c_t}{a_{02} \cdot X_t} = 1$$

$$c_t = a_{02} \cdot X_t \quad (47)$$

Karena bilangan Mach pada lubang telah melebihi satu maka asumsi tekanan silinder sama dengan tekanan lubang pada Persamaan (44) tidak berlaku, tetapi harga c_t sudah diketahui dari Persamaan (47). Untuk itu kedua persamaan yang digunakan pada perhitungan aliran subsonik tetap digunakan dengan mensubstitusikan Persamaan (47) menjadi:

- Persamaan kontinuitas massa:

$$\dot{m}_t - \dot{m}_2 = 0$$

$$a_{02} \cdot \rho_{02} \cdot X_1^{G5} \cdot C_d \cdot A_1 - \rho_{02} \cdot (X_{r1} + X_{r2} - 1)^{G5} \cdot A_2 \cdot G_5 \cdot a_{02} \cdot (X_{r2} - X_{r1}) = 0 \quad (48)$$

- Hukum Termodinamika I:

$$h_2 + \frac{c_2^2}{2} = h_1 + \frac{c_1^2}{2} \\ \left[G_5 \cdot (a_{02} \cdot (X_{r2} + X_{r1} - 1))^2 - G_5 \cdot (a_{02} \cdot X_1)^2 \right] + \\ \left[(G_5 \cdot a_{02} \cdot (X_{r2} - X_{r1}))^2 - (a_{02} \cdot X_1)^2 \right] = 0 \quad (49)$$

Kedua persamaan di atas juga diselesaikan dengan metode Newton Raphson [8] untuk memperoleh dua harga yang belum diketahui yaitu X_{r2} dan X_1 .

Pada ujung saluran masuk yang bertemu dengan ruang engkol, ujung saluran keluar yang bertemu dengan silinder, maupun ujung saluran transfer yang bertemu dengan silinder dan ruang engkol harus dihitung dengan menggunakan kedua pemodelan di atas karena selalu ada dua kemungkinan yaitu aliran masuk dan aliran keluar.

2.4 Pemodelan Lain dan Proses Simulasi

Pemodelan aliran gas tak tunak ini kemudian digabungkan dengan pemodelan lainnya [1] yaitu:

1. Keseimbangan energi,
2. Pemodelan sifat gas,
3. Pemodelan perpindahan panas,
4. Pemodelan pembilasan,
5. Pemodelan pelepasan panas,
6. Pemodelan koefisien aliran melalui lubang,

Proses simulasi dilakukan dengan pemrograman menggunakan komputer. Proses iterasi dilakukan dengan menggunakan efisiensi termal siklus untuk menguji konvergensi perhitungan [1].

3. ANALISIS SALURAN

3.1 Data Motor Bakar Torak Dua Langkah

Data motor bakar torak yang digunakan untuk analisis adalah data motor bakar torak MK1 yaitu sebuah motor bakar torak dua langkah satu silinder dengan volume langkah sebesar 380 cc. MK1 ini merupakan produksi Greeves Motorcycles dengan spesifikasi yang lebih lengkap dapat dilihat pada Tabel (1).

Dengan menggunakan data ini, dilakukan simulasi motor bakar torak dua langkah dengan memasukkan harga putaran mesin dalam putaran per menit serta harga panjang saluran masuk dan keluar. Harga keluaran yang didapat ialah harga parameter operasi motor bakar torak dua langkah seperti daya indikator, tekanan efektif rata-rata indikator atau *Indicator Mean Effective Pressure* (IMEP), dan pemakaian bahan bakar spesifik atau *Indicator Specific Fuel Consumption* (ISFC). Perlu diperhatikan bahwa harga keluaran ini merupakan harga indikator, yaitu harga yang didapatkan dari

pengukuran tekanan di dalam silinder, karena proses simulasi tidak memperhitungkan gesekan.

Tabel 1. Spesifikasi Motor Bakar Torak Dua Langkah MK1 [4]

Jenis Pembakaran	Otto	
Diameter silinder:	82	mm
Panjang langkah:	72	mm
Perbandingan panjang batang penghubung/jari-jari engkol:	3,88	
Perbandingan kompresi silinder:	6,57	
Perbandingan kompresi ruang engkol:	1,6	
Diameter saluran keluar:	49,5	mm
Lebar lubang buang:	58	mm
Diameter saluran masuk:	32	mm
Lebar lubang masuk:	46	mm
Diameter saluran transfer:	47	mm
Panjang saluran transfer:	10	mm
Lebar lubang transfer:	64	mm
Jari-jari radius lubang:	3	mm
Lubang masuk terbuka:	284	ATDC
Lubang buang terbuka:	115	ATDC
Lubang transfer terbuka:	96	ATDC
Pelepasan Panas		
AFR:	13	
Mulai Pembakaran:	10	BTDC
Efisiensi Pembakaran:	85	%
Lama Pembakaran:	60	CAD
Jenis Pembilasan:	Loop	

3.2 Analisis Panjang Saluran Masuk

Aliran gas tak tunak pada saluran masuk sangat mempengaruhi jumlah fluida kerja yang masuk ke ruang engkol. Proses pemasukan fluida kerja terjadi apabila tekanan pada saluran masuk lebih besar dari tekanan pada ruang engkol.

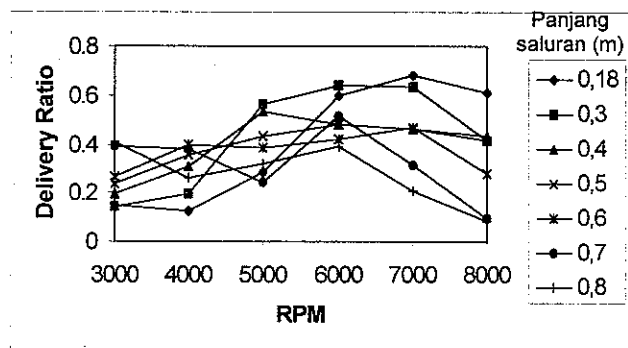
Pada saat lubang masuk tertutup, gelombang tekanan pada saluran masuk merambat antara lubang masuk dan ujung saluran masuk dan menimbulkan pulsa tekanan. Pada saat lubang masuk terbuka, gelombang tekanan ekspansi ($P < 1$) merambat menuju ujung saluran, dan ketika mencapai ujung saluran akan menimbulkan gelombang tekanan pantulan berupa tekanan kompresi ($P > 1$) yang akan merambat menuju lubang masuk.

Apabila gelombang tekanan kompresi ini sampai ke silinder pada saat lubang masuk terbuka maka gelombang ini akan membantu proses pemasukan udara.

Panjang saluran masuk dan kecepatan putar poros engkol sangat berpengaruh terhadap aliran gas tak tunak. Proses *tuning* pada saluran masuk ialah proses untuk menentukan panjang saluran yang paling optimum untuk memanfaatkan gelombang tekanan kompresi hasil proses pantulan di ujung saluran.

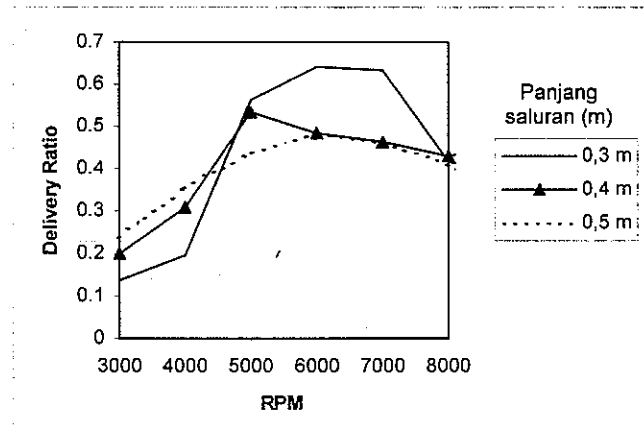
Parameter yang digunakan untuk melakukan proses optimasi panjang saluran masuk ini ialah *delivery ratio* (DR). DR menyatakan perbandingan antara jumlah massa udara yang masuk ke dalam ruang engkol melalui lubang masuk terhadap massa yang dibutuhkan untuk mengisi silinder pada kondisi atmosfer.

Gambar (7) merupakan kurva harga DR pada motor bakar torak dua langkah pada putaran poros engkol 3000 sampai 8000 rpm untuk beberapa panjang saluran masuk. Gambar tersebut didapat dari simulasi motor bakar MK1.



Gambar 7. Pengaruh panjang saluran masuk terhadap *Delivery Ratio* pada MK1 (panjang saluran dalam m).

Dari Gambar (7) terlihat untuk panjang saluran yang pendek, pada putaran poros engkol yang rendah menunjukkan harga DR yang rendah. Sebaliknya untuk panjang saluran yang panjang, yaitu di atas 60 cm, terjadi penurunan harga DR yang drastis pada putaran tinggi. Untuk itu panjang saluran masuk yang baik ialah antara 30 cm sampai 50 cm. Untuk memilih panjang saluran masuk yang terbaik maka kurva DR terhadap kecepatan putar poros engkol untuk ketiga harga panjang saluran masuk antara 30 sampai 50 cm digambarkan lagi pada Gambar (8).



Gambar 8. Kurva DR terhadap RPM untuk panjang saluran masuk sebesar 0,3 sampai 0,5 m.

Dari Gambar (8) terlihat bahwa untuk panjang saluran masuk 30 cm didapat harga *delivery ratio* yang tinggi pada putaran menengah, tetapi rendah pada putaran rendah. Pada gambar tersebut juga terlihat bahwa untuk panjang saluran masuk 50 cm menunjukkan harga DR yang cukup baik pada putaran rendah, tetapi menurun pada putaran tinggi.

Pada panjang saluran masuk sebesar 40 cm, didapat harga DR yang cukup tinggi pada putaran rendah, dan pada putaran menengah menunjukkan karakteristik yang stabil. Karakteristik ini merupakan karakteristik saluran masuk yang diinginkan dalam proses *tuning*.

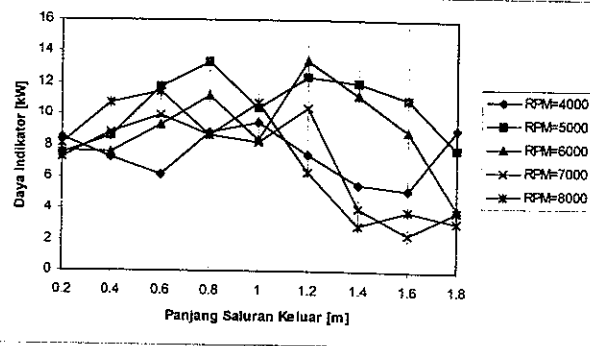
3.3 Analisis Panjang Saluran Keluar

Pengaruh aliran gas tak tunak terhadap performansi sebuah motor bakar torak dua langkah terlihat pada proses pembilasan. Proses pembuangan gas sisa pembakaran terjadi apabila tekanan saluran buang lebih rendah dari tekanan saluran masuk. Pengaturan panjang saluran keluar terhadap proses pembilasan bertujuan untuk mendapatkan tekanan saluran buang yang cukup rendah untuk membantu proses pembuangan tersebut. Proses pembuangan gas sisa pembakaran juga akan menurunkan tekanan dalam silinder selama tahap hembusan buang sehingga diharapkan saat lubang transfer terbuka, tekanan silinder sudah cukup rendah sehingga aliran gas dari saluran transfer masuk ke dalam silinder dapat terjadi.

Pada saat lubang buang terbuka, gelombang tekanan berupa tekanan kompresi akan merambat menuju ujung saluran. Pada saat mencapai ujung saluran, maka gelombang tekanan tersebut akan mengalami pantulan yang menghasilkan gelombang tekanan ekspansi yang merambat menuju lubang buang. Apabila gelombang tekanan ekspansi ini sampai di lubang buang maka akan membantu proses pengeluaran gas buang dari silinder karena akan memperbesar beda tekanan antara silinder dan saluran keluar.

Sama seperti pada saluran masuk, kecepatan putar poros engkol juga mempengaruhi bentuk gelombang tekanan yang pada akhirnya mempengaruhi proses pembilasan. Untuk saluran keluar yang berupa pipa dengan diameter tetap, maka perlu ditentukan suatu panjang saluran yang memberikan daya terbesar pada suatu harga kecepatan putar poros engkol yang diinginkan.

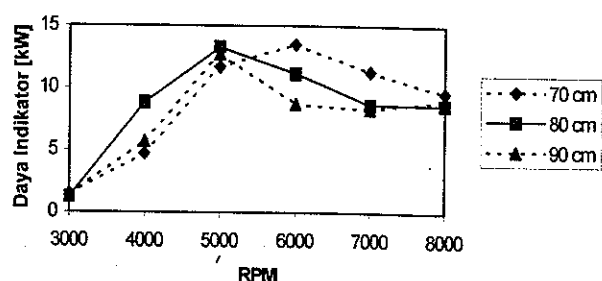
Hasil simulasi motor bakar torak dua langkah MK1 untuk panjang saluran antara 0,2 m sampai 0,18 m untuk bermacam-macam harga kecepatan putar poros engkol dapat dilihat pada Gambar (9).



Gambar 9. Pengaruh panjang saluran keluar terhadap daya indikator.

Dari Gambar (9) terlihat bahwa sulit untuk memperoleh harga panjang saluran keluar yang menghasilkan daya tinggi pada semua harga kecepatan, karena itu dipilih harga 5000 rpm sebagai harga kecepatan putar poros engkol yang menghasilkan daya indikator maksimum. Pada harga kecepatan ini terlihat bahwa panjang saluran keluar yang terbaik ialah pada sekitar 0,8 m. Untuk lebih jelasnya dibuat kurva daya indikator untuk panjang saluran keluar sebesar 0,7 m, 0,8 m, dan 0,9 m seperti terlihat pada Gambar (10).

Pada Gambar (10) terlihat bahwa untuk panjang saluran keluar 70 cm didapat harga daya indikator yang baik pada kecepatan putar lebih dari 6000 rpm, namun untuk harga putaran rendah menunjukkan harga daya indikator yang paling rendah. Pada gambar juga terlihat bahwa panjang saluran keluar 90 cm menghasilkan harga daya indikator yang sedang pada putaran rendah dan paling rendah pada putaran tinggi, karena itu dipilih harga panjang saluran keluar 80 cm yang pada putaran rendah menghasilkan daya indikator yang paling tinggi dan pada putaran tinggi menghasilkan daya indikator yang sedang.



Gambar 10. Kurva daya indikator terhadap RPM untuk panjang saluran keluar 70, 80, dan 90 cm.

4. KESIMPULAN

1. Pemodelan motor bakar torak dua langkah dengan memperhitungkan aliran gas tak tunak dapat digunakan untuk melakukan analisis panjang saluran yang paling baik dari segi perolehan daya untuk motor bakar torak dua langkah.
2. Perhitungan panjang saluran keluar yang paling baik tidak dapat dilakukan untuk semua harga putaran poros engkol, untuk itu perlu dipilih harga putaran yang diinginkan agar terjadi daya maksimum.
3. Dengan adanya tampilan grafik dalam program simulasi ini, aliran gas tak tunak selama proses pembilasan pada motor bakar torak dua langkah dapat diamati yaitu dengan menggunakan grafik yang menunjukkan tekanan saluran transfer, saluran keluar, dan silinder pada saat lubang transfer dan lubang buang terbuka.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Soelaiman, T. A. F., R. K. Bachrun, A. M. Mangaranap, dan A. Arifin, *Simulasi Proses Pembakaran Pada Motor Bakar Torak Dua Langkah*, Mesin, Jurnal Teknik Mesin, v. XIII, no. 1, pp. 1-8, Maret (1998).
2. Annand, W. J. D., dan G. E. Roe, *Gas Flow in the Internal Combustion Engine*, GT Foulis (1974).
3. Blair, G. P., *Design and Simulation of Two-Stroke Engines*, Society of Automotive Engineers, Inc. (1996).
4. Blair, G. P. dan W. L. Cahoon, *A More Complete Analysis of Unsteady Gas Flow Through a High-Specific-Output Two-Cycle Engine*, SAE Paper No. 720156, Society of Automotive Engineers (1972).
5. Thornhill, D. dan R. Flack, *Design of a Blower Scavenged, Piston Ported, V6, Two Stroke Automotive Engine*, SAE Paper No. 930980, Society of Automotive Engineers (1993).
6. Ramos, J. I., *Internal Combustion Engine Modeling*, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
7. Benson, R. S. dan N. D. Whitehouse, *Internal Combustion Engines*, volume 2, Pergamon Press (1983).
8. Stoecker, W. F., *Design of Thermal Systems*, McGraw-Hill Book Company (1989).