

Simulasi Regulator Tekanan Untuk Kendaraan Berbahan Bakar Gas Dengan Program Fire

Tulus Burhanuddin Sitorus

Dosen Jurusan Teknik Mesin - Universitas Sumatera Utara (USU)

Arief Hariyanto, Rachmat Kentardjo, Wiranto Arismunandar

Dosen Jurusan Teknik Mesin – Institut Teknologi Bandung (ITB)

Abstrak

Serangkaian penelitian yang dilakukan terhadap karakteristik stabilitas dan prestasi kit menunjukkan bahwa kit konversi yang diimpor di Indonesia masih memerlukan beberapa perbaikan. Peralatan kit konversi ini antara lain terdiri dari tabung pengisian BBG, pencampur, dan penurun tekanan. Pada penelitian ini disimulasikan penurun tekanan yang terdiri dari tiga ruang yang bekerja dengan perubahan posisi katup dipengaruhi oleh tekanan masuk dan tekanan di dalam ruang penurun tekanan. Simulasi 3-D aliran fluida di dalam penurun tekanan ini menggunakan perangkat lunak program CFD Fire versi v7.0b_pl3. Pada pemodelan penurun tekanan ini dilakukan perubahan posisi lubang masuk dan posisi lubang keluar. Hal ini dilakukan untuk melihat korelasi perubahan tekanan di dalam ruang penurun tekanan terhadap perubahan posisi tersebut dan pengaruhnya terhadap laju aliran massa keluar. Disamping itu dilakukan juga perubahan terhadap diameter lubang keluar, tekanan keluar, dan perubahan tekanan masuk. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa perubahan posisi lubang masuk dan posisi lubang keluar yang dilakukan tidak menunjukkan perubahan yang signifikan baik terhadap tekanan dalam ruang maupun laju aliran massa keluar dari penurun tekanan.

Kata kunci: prestasi kit konversi, penurun tekanan, perubahan posisi lubang masuk dan lubang keluar, tekanan dan laju aliran massa keluar.

Abstract

A series of researches about characteristic of stability and performance of conversion kits shows that imported conversion kits manufactured by several vendors that are used by public in Indonesia still need some improvement in their design. The conversion kits consist of CNG main tank, mixer and pressure regulator. In this research simulated pressure regulator which have three steps restriction which the change of valves position is influenced by pressure inlet and pressure in the chambers. The simulation of fluid flow in pressure regulator can be modelled with the aide of FIRE v70b_PL3. In this modelling were done variation of inlet and outlet position. The varying made which aim to observe correlation of the change of pressure and outlet mass flow with position changing. Besides, were done varying outlet diameter of pressure regulator and the change of inlet pressure. The results show that the change of inlet and outlet position were done not shows significant changing both pressure in the chambers and outlet mass flow from pressure regulator.

Keywords: performance of conversion kit, pressure regulator, the change of inlet and outlet position, pressure and outlet mass flow.

1. Pendahuluan

Saat ini Bahan Bakar Gas atau *Compressed Natural Gas* (CNG) merupakan bahan bakar alternatif yang sedang dikembangkan untuk menggantikan bahan bakar cair untuk dipergunakan dibidang transportasi khususnya kendaraan roda empat. Supaya dapat menggunakan BBG, kendaraan berbahan bakar bensin memerlukan seperangkat peralatan

tambahan yang disebut kit konversi (*conversion kit*) yang terdiri dari tabung BBG, katup manual, pipa tekanan tinggi, manometer, dan saklar pilih, katup otomatis, regulator tekanan (*pressure regulator*), katup pengisian BBG (*filling valve*), pencampur gas dan udara (*mixer*) serta katup otomatis untuk bensin. Sistem pengaturan laju aliran dan langkah penurunan tekanan pada regulator tekanan akan sangat menentukan prestasi motor tersebut. Dari beberapa kajian yang pernah dilakukan terhadap karakteristik stabilitas dan prestasi kit konversi di Laboratorium Motor Bakar dan Sistem Propulsi ITB Bandung^[3,4,5], menunjukan

Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Februari 2003. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 5 Nomor 1 April 2003.

bahwa kit konversi yang diimpor oleh beberapa penjual (*vendor*) di Indonesia masih memerlukan beberapa perbaikan. Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk mencari penyebabnya^[6,7], menyimpulkan bahwa masalah utama dari gangguan ini adalah ketidakstabilan dan respon transien yang kurang baik dari satu atau lebih mekanisme pegas-massa yang terdiri dari restriksi katup, pegas, diafragma, saluran orifis, dan ruang dari regulator tekanan. Mekanisme tersebut diharapkan untuk memungkinkan regulator tekanan menghantarkan secara baik sejumlah gas yang dibutuhkan oleh kendaraan bermotor, pada saat yang tepat, meskipun tekanan gas di dalam tangki berkurang selama pengoperasian kendaraan.

Penelitian ini dimaksudkan untuk memperoleh suatu hal yang berarti dalam memperbaiki prestasi kit konversi khususnya regulator tekanan mengenai kondisi tunak dan laju aliran massanya. Hal ini dapat diketahui dengan melakukan beberapa perubahan seperti posisi lubang masuk dan posisi lubang keluar yang memiliki indikasi prestasi kondisi tunak yang kurang baik. Penelitian simulasi aliran fluida CNG di dalam regulator tekanan ini menggunakan perangkat lunak FIRE v7.0b_pl3.

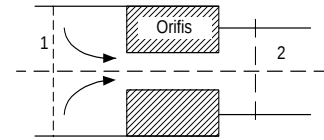
2. Teori Dasar Persamaan Aliran Melalui Suatu Restriksi

Pada beberapa bagian dari siklus mesin, fluida mengalir melalui suatu restriksi dalam penampang aliran. Aliran sebenarnya ini biasanya dihubungkan dengan aliran ideal. Persamaan aliran ideal tersebut adalah aliran adiabatik reversibel atau aliran isentropik dari suatu fluida ideal yang melalui saluran dengan geometri dan ukuran yang sama. Dalam kenyataannya aliran fluida diperoleh dari koefisien keluaran (*discharge coefficient*) C_D yang didefinisikan sebagai ⁽²⁾:

$$C_D = \frac{\text{aliran massa aktual}}{\text{aliran massa ideal}}$$

Alternatif lain, koefisien keluaran dapat didefinisikan dalam bentuk perbandingan luas penampang efektif saluran dan luas penampang referensi. Bila penampang referensi yang biasanya diambil sebagai luas penampang minimum adalah A_R dan luas penampang efektif dari restriksi aliran adalah A_E maka bisa dinyatakan bahwa :

$$C_D = \frac{A_E}{A_R} \quad (1)$$



Gambar 1. Skema aliran cairan melalui orifis ⁽²⁾

Bila ditinjau aliran fluida cair melalui suatu orifis seperti gambar 1 maka untuk aliran ideal, persamaan Bernoulli dapat ditulis

$$p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} \quad (2)$$

Untuk aliran inkompresibel, persamaan kontinuitasnya adalah $V_1 A_1 = V_2 A_2$ dan laju aliran massa ideal melalui sebuah orifis adalah:

$$m_{\text{ideal}} = A_2 \left[\frac{2\rho(p_1 - p_2)}{1 - (A_2/A_1)^2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Laju aliran massa sebenarnya diperoleh dari hubungan :

$$m_{\text{sebenarnya}} = C_D A_2 \left[\frac{2\rho(p_1 - p_2)}{1 - (A_2/A_1)^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Koefisien keluaran merupakan fungsi dari ukuran, bentuk, kekasaran permukaan orifis, laju aliran massa serta sifat fluida seperti massa jenis, tegangan permukaan, dan viskositas. Bilangan Reynolds untuk orifis yaitu:

$$Re_o = \frac{\rho V_2 D_2}{\mu} = \frac{V_2 D_2}{\nu} \quad (5)$$

sebagai korelasi parameter untuk penghitungan koefisien keluaran dimana μ viskositas dinamik (kg/m.s) dan ν viskositas kinematik (m²/s). Untuk suatu gas ideal yang memiliki panas jenis konstan mengalir melalui saluran seperti gambar 2 maka untuk aliran idealnya, temperatur stagnasi T_o dan tekanan stagnasi P_o dihubungkan dengan kondisi lainnya di dalam saluran oleh persamaan energi untuk aliran tunak yaitu:

$$T_o = T + \frac{V^2}{2c_p} \quad (6)$$

$$\left(\frac{T}{T_o} \right) = \left(\frac{p}{P_o} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (7)$$

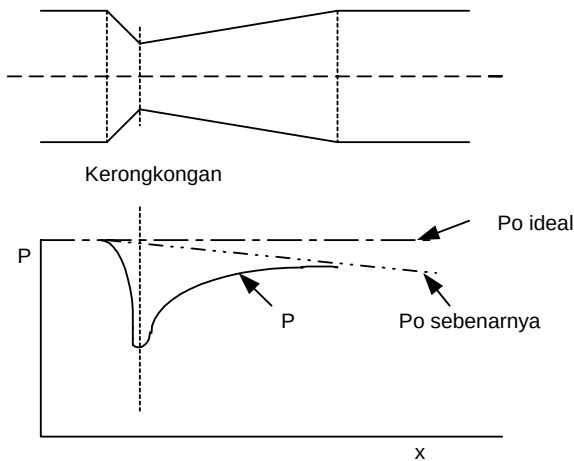
Untuk bilangan Mach $M = V/a$, dimana a merupakan kecepatan suara ($= \sqrt{\gamma RT}$), maka persamaannya menjadi :

$$\frac{T_o}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (8)$$

$$\frac{P_o}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (9)$$

Dan laju aliran massa m adalah :

$$m = \rho \cdot A \cdot V \quad (10)$$



Gambar 2. Distribusi tekanan untuk aliran gas melalui restriksi ⁽²⁾

Berdasarkan hukum gas ideal dan hubungan antara p dan T , maka persamaan di atas menjadi :

$$m_{ideal} = \frac{A p_o}{\sqrt{T_o}} \left\{ \frac{2\gamma}{(\gamma-1) R} \left[\left(\frac{p}{p_o}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p}{p_o}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (11)$$

Untuk harga P_o dan T_o yang diberikan, laju aliran massa maksimum terjadi saat kecepatan pada penampang minimum atau kerongkongan (*throat*) sama dengan kecepatan suara. Keadaan ini disebut dengan aliran tercekik (*choked*). Saat aliran tercekik pada kerongkongan, maka hubungan p_T dengan tekanan stagnasi p_o menjadi:

$$\frac{p_T}{p_o} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (12)$$

Perbandingan ini disebut dengan perbandingan tekanan kritis. Untuk (p_T/p_o) kurang atau sama dengan perbandingan tekanan kritis maka :

$$m_{ideal} = \frac{A_T P_o}{\sqrt{T_o}} \left[\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{1/2} \quad (13)$$

Besarnya perbandingan tekanan kritis adalah 0,528 untuk $\gamma = 1,4$ dan 0,546 untuk $\gamma = 1,3$. Untuk aliran subkritis, laju aliran massa sebenarnya pada penampang minimum atau kerongkongan adalah⁽²⁾ :

$$m_{sebenarnya} = \frac{C_D A_T P_o}{\sqrt{RT_o}} \left(\frac{p_T}{p_o}\right)^{1/\gamma} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_T}{p_o}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (14)$$

Untuk aliran tercekik, maka

$$m_{sebenarnya} = \frac{C_D A_T P_o}{\sqrt{RT_o}} \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (15)$$

Kemudian persamaan (13) dapat dibuat seperti persamaan (4) dengan $A_2 \propto A_1$ diperoleh :

$$m_{sebenarnya} = C_D A_R \left[2 p_o (p_o - p_T) \right]^{1/2\Phi} \quad (16)$$

$$\Phi = \left\{ \frac{[\gamma/(\gamma-1)] [(p_T/p_o)^{2/\gamma} - (p_T/p_o)^{(\gamma+1)/\gamma}]}{1 - p_T/p_o} \right\}^{1/2} \quad (17)$$

dimana:

Φ = fungsi kompresibilitas aliran

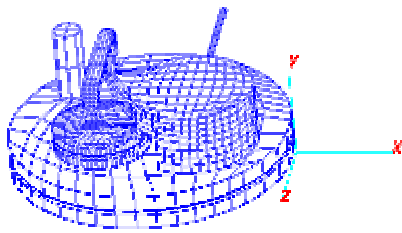
3. Metode Penelitian

Untuk melakukan pemodelan atau simulasi ini maka dipakai perangkat lunak pendukung yaitu program Fire v70b_pl3. Program Fire v70b_pl3 merupakan suatu perangkat lunak untuk tujuan CFD (*computational fluid dynamics*). Dalam mensimulasikan sistem fluida tersebut program FIRE menggunakan metode volume hingga (*finite volume*)⁽¹⁾.

Pada pemodelan geometri dilakukan pembuatan gambaran matematis dari suatu sistem fluida dan menampilkan gambaran tersebut pada layar, dimana di dalam gambaran tersebut kemudian diisi dengan volume *grid*. Karena regulator tekanan ini terdiri dari tiga ruang yang dihubungkan oleh pipa maka pembuatan geometrinya dibagi atas beberapa bagian. Pertama-tama dibuat geometri *surface* untuk ruang pertama, ruang kedua dan ruang ketiga. Kemudian dibuat pipa berbentuk lurus dan pipa bengkok yang akan menghubungkan ketiga ruang tersebut. Setelah pembuatan ketiga ruang geometri *surface* dan pipa penghubung selesai maka tahap selanjutnya adalah pembuatan volume *grid*. Pembuatan *grid* dilakukan dengan mengadaptasi *grid* bentuk standar seperti kubus, bujur sangkar, dan hexahedron kepada tiap-tiap bagian geometri *surface* tadi.



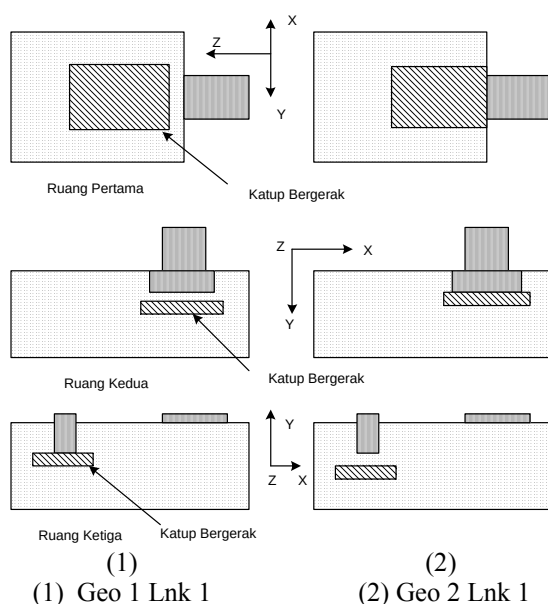
(a) Tampak depan



(b) Tampak atas

Gambar 3. Regulator tekanan setelah terbentuk

Pada simulasi ini terdapat bagian yang bergerak yaitu katup. Di sini pergerakan ketiga katup dipengaruhi oleh tekanan masuk dan tekanan pada tiap ruang tersebut. Pada program Fire ini interpolasi di antara dua posisi dilakukan oleh suatu subrutin yang disebut *usrblk*, yaitu suatu subrutin khusus untuk pergerakan *mesh*. Pada *usrblk* ini fungsi dari subrutin ini adalah mengubah posisi katup dari keadaan maksimum ke keadaan minimum dan sebaliknya. Perubahan posisi katup ini didasarkan pada perubahan tekanan yang terjadi dimana prosedur perhitungannya telah ditulis ke subrutin yang terdapat pada fungsi pengguna (*user functions*). Proses pergerakan katup ini dapat dilihat pada gambar 4 yang menunjukkan bahwa pada *geo*=1 dan *lnk*=1, posisi katup pada ruang satu dan ruang dua adalah maksimum, sedangkan posisi katup pada ruang ketiga ialah minimum. Namun pada *geo*=2 dan *lnk*=1, posisinya berubah dimana posisi katup pada ruang satu dan ruang dua adalah minimum, sedangkan posisi katup pada ruang ketiga ialah maksimum.

**Gambar 4. Prinsip katup bergerak**

Posisi di antara dua posisi tersebut ini didapat dengan interpolasi geometri seperti yang telah dijelaskan pada prinsip interpolasi di atas. Pada pemodelan ini digunakan kondisi tekanan total masuk sedangkan kondisi batas pada lubang keluar yang digunakan adalah tekanan statis. Pada pemodelan ini, model volume *grid* memiliki dua jenis dinding, yaitu dinding tetap dan dinding bergerak. Dinding tetap terdiri bagian luar regulator tekanan berupa ketiga ruang dan pipa penghubung, sedangkan dinding bergerak yaitu katup yang terdapat pada ketiga ruang.

4. Hasil Dan Pembahasan

Pada penelitian ini dilakukan beberapa modifikasi untuk mengetahui pengaruh terhadap tekanan di tiap ruang dan laju aliran massa yang terjadi. Modifikasi yang dilakukan berupa perubahan tekanan masuk, posisi lubang masuk, posisi lubang keluar, dan perubahan diameter lubang keluar sehingga diharapkan nanti dapat diketahui perubahan yang memiliki laju aliran massa optimum. Dan diasumsikan bahwa aliran yang terjadi saat gas masuk hingga keluar dari regulator tekanan merupakan aliran isentropik dengan fluida kerja metana. Pergerakan katup telah ditentukan jarak minimum dan maksimumnya dimana penentuan rentang jarak ini berdasarkan data pengujian yang pernah dilakukan sebelumnya^[7] dimana untuk katup pertama memiliki jarak minimum 0,01 mm dan jarak maksimum 0,18 mm, katup kedua berjarak minimum 0,06 mm dan maksimum 0,6 mm sedangkan untuk katup ketiga berjarak 0,07 mm untuk minimum dan 0,7 mm untuk maksimumnya.

Untuk kondisi batas lubang keluar dibuat 0,99 bar dan tekanan awal di dalam regulator tekanan sebesar 1 bar. Tekanan masuk ke regulator tekanan dibuat sebesar 25 bar. Hal ini dilakukan untuk mempersingkat waktu perhitungan dan mempermudah analisa yang akan dilakukan karena untuk menjalankan satu program diperlukan waktu yang cukup lama.

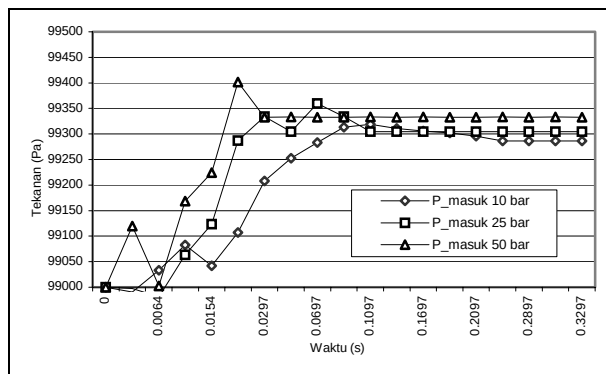
Untuk dimensi regulator tekanan dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Dimensi Regulator Tekanan

No	Nama	Dimensi (mm)
1	Lubang masuk	$\varnothing = 3$
2	Lubang keluar	$\varnothing = 16$
3	Ruang pertama	$\varnothing = 70$, L = 35
4	Ruang kedua	$\varnothing = 54$, L = 13
5	Ruang ketiga	$\varnothing = 154$, L = 20

4.1 Perubahan Tekanan Masuk

Seperti diketahui bahwa kuantitas massa gas di dalam tabung gas turut mempengaruhi tekanan yang masuk ke regulator tekanan. Perubahan tekanan masuk ini diakibatkan berkurangnya persediaan jumlah massa gas di dalam tabung. Untuk menganalisa perubahan yang terjadi akibat perubahan tekanan masuk maka digunakan regulator tekanan dengan tekanan masuk sebesar 10 bar, 25 bar, dan 50 bar. Tampak dari grafik 1 bahwa perubahan tekanan yang terjadi kurang signifikan walaupun tekanan masuk mengalami perubahan antara 10 bar, 25 bar dan 50 bar.

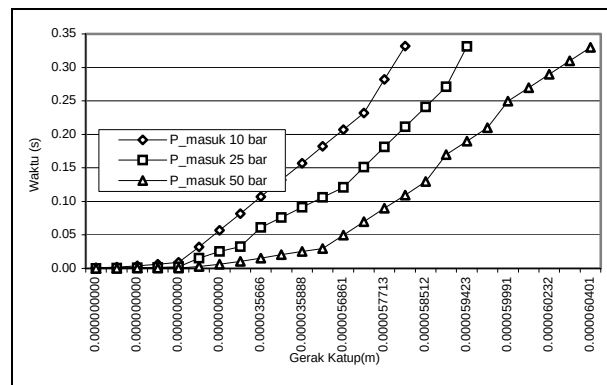


Grafik 1. Perubahan Tekanan dalam Ruang-3 Akibat Perubahan Tekanan Masuk

Pada tekanan masuk 10 bar besarnya tekanan pada tiap ruang adalah 2,832 bar, 1,687 bar, dan 0,9928 bar. Untuk tekanan masuk 25 bar tekanan pada ruang satu hingga ruang ketiga berturut-turut adalah 2,868 bar, 1,701 bar, dan 0,9930 bar. Sedangkan untuk tekanan masuk 50 bar besarnya tekanan pada ruang pertama adalah 2,889 bar, pada ruang kedua sebesar 1,695 bar, dan ruang ketiga 0,9933 bar. Perubahan tekanan yang terjadi pada ruang pertama yang berkisar 2,832 bar hingga 2,889 bar disebabkan oleh perbedaan besar laju aliran massa masuk ke ruang pertama. Laju aliran massa masuk dipengaruhi oleh besarnya bukaan katup dan perbedaan tekanan yang terjadi antara tekanan masuk dengan tekanan pada ruang pertama. Untuk kondisi tunak maka laju aliran massa masuk yang paling besar diperoleh regulator tekanan yang memiliki tekanan masuk sebesar 10 bar yaitu sekitar 0,00228 kg/s. Sedangkan untuk tekanan masuk 25 bar laju aliran massa masuknya sebesar 0,00196 kg/s dan pada tekanan masuk 50 bar didapatkan laju aliran massa masuk sekitar 0,00190 kg/s.

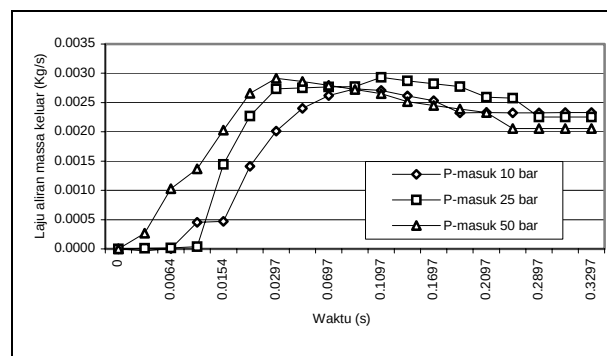
Hal ini diakibatkan oleh bukaan katup yang terjadi pada ruang pertama. Pada kondisi tunak

regulator tekanan yang memiliki tekanan masuk 10 bar memiliki bukaan katup yang lebih besar dibanding tekanan masuk 25 bar dan 50 bar. Perbedaan besarnya bukaan katup ini disebabkan oleh beda tekanan yang terjadi yang akhirnya mengakibatkan kecepatan pergerakan katup berbeda seperti terdapat pada grafik 2. Untuk tekanan masuk 10 bar kecepatan katup sekitar 0,0000614 m/s, tekanan masuk 25 bar diperoleh kecepatan katup sekitar 0,000205 m/s sedangkan untuk tekanan masuk 50 bar kecepatan pergerakan katupnya sebesar 0,000362 m/s.



Grafik 2. Perubahan Jarak Katup pada Ruang -1 Akibat Perubahan Tekanan Masuk

Karena pada kondisi awal posisi katup pada ruang pertama terbuka maka dengan pergerakan katup yang semakin besar diperoleh luas bukaan katup semakin kecil. Pada grafik 3 untuk laju aliran massa keluar tampak juga bahwa perbedaan yang terjadi tidaklah terlalu besar karena untuk tekanan masuk 10 bar, 20 bar, dan 50 bar laju aliran massa keluaranya berkisar 0,00205 kg/s hingga 0,002327 kg/s. Sehingga dapat dikatakan bahwa perubahan tekanan masuk yang terjadi tidak menunjukkan perubahan yang signifikan baik terhadap perubahan tekanan di dalam ruang maupun laju aliran massa keluar.

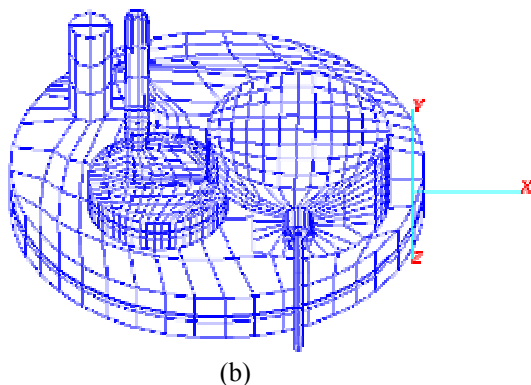
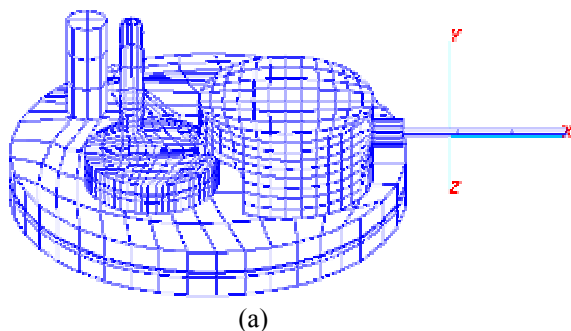


Grafik 3. Perubahan Laju Aliran Massa Keluar Akibat Perubahan Tekanan Masuk

Tampak juga dengan perubahan tekanan masuk ikut mempengaruhi waktu pencapaian kondisi tunak pada ruang pertama, kedua, dan ketiga. Dari grafik dapat dilihat bahwa bila tekanan masuk ke regulator tekanan semakin besar maka waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi tunak pada tiap ruang cenderung semakin cepat. Pada tekanan masuk 10 bar kondisi tunak yang dicapai untuk tiap ruang adalah 0,157s untuk ruang pertama, 0,157s untuk ruang kedua, dan 0,282s untuk ruang ketiga. Untuk tekanan masuk 25 bar kondisi tunak untuk tiap ruang berturut-turut adalah 0,03244s, 0,04624s, dan 0,06124s. Sedangkan untuk tekanan masuk 50 bar waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi tunak merupakan paling singkat yaitu 0,0154s untuk ruang pertama, 0,0297s untuk ruang kedua, dan 0,0297s untuk ruang ketiga.

4.2 Perubahan posisi lubang masuk

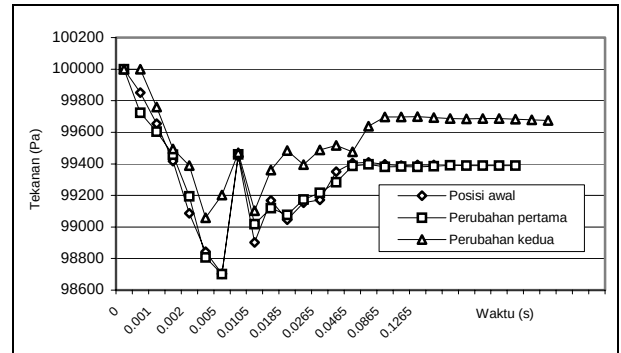
Pada ruang pertama ini terdapat dua perubahan dilakukan. Perubahan pertama yaitu dengan memutar atau memindahkan lubang masuk sebesar 90 derajat ke arah sumbu X, sehingga arah masuk menjadi sumbu X-negatif seperti tampak pada gambar 5a



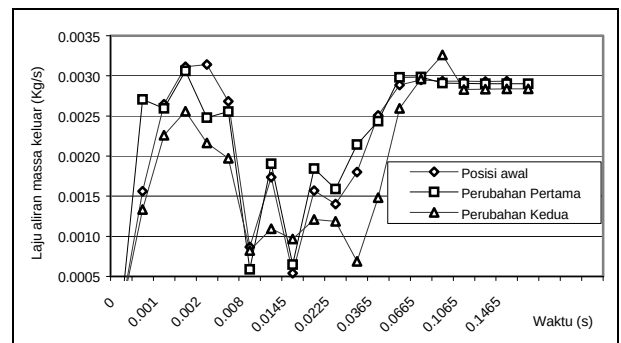
Gambar 5. Perubahan (a) Pertama dan (b) Kedua Posisi Lubang Masuk

Sedangkan perubahan kedua yang tampak di gambar 5b adalah dengan memutar arah lubang masuk sebesar 180° namun arah masuk tetap arah Sumbu Z_{negatif}.

Untuk melihat perubahan yang terjadi baik tekanan maupun laju aliran massa keluar dapat dilihat dari grafik 4 dan grafik 5.



Grafik 4. Perubahan Tekanan pada Ruang-3 Akibat Perubahan Posisi Lubang Masuk pada Ruang- 1



Grafik 5. Perubahan Laju Aliran Massa Keluar Akibat Perubahan Posisi Lubang Masuk

Tampak bahwa pada kedua perubahan terjadi perubahan tekanan pada ruang pertama yang memiliki kecenderungan naik. Hal ini disebabkan laju aliran massa masuk yang lebih besar setelah diubah dimana sebelum diubah berkisar 0,00199 kg/s.

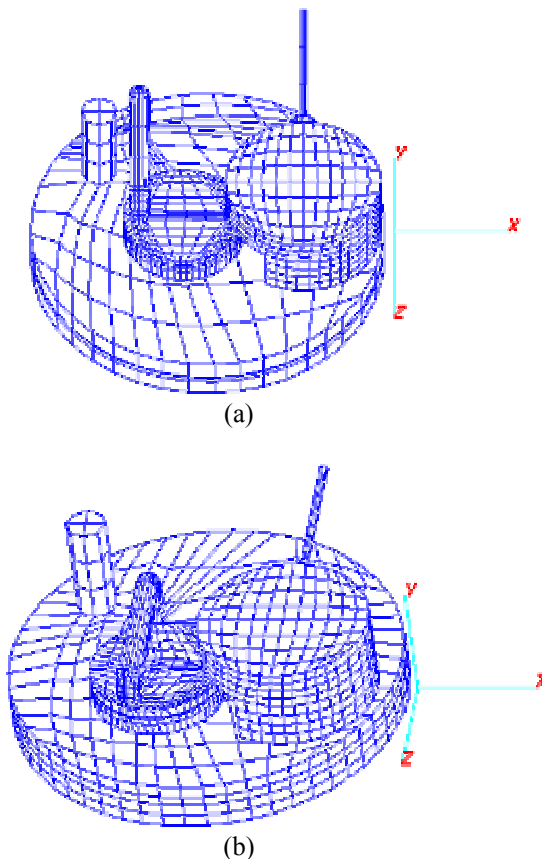
Untuk perubahan pertama diperoleh laju aliran massa masuk sebesar 0,0021 kg/s sedangkan dengan perubahan kedua yang dilakukan besarnya laju aliran massa masuk yang diperoleh 0,00205 kg/s.

Sedangkan laju aliran massa keluar yang paling besar dicapai perubahan lubang masuk yang kedua yaitu 0,0029 kg/s seperti terlihat pada grafik 5. Untuk perubahan lubang masuk yang pertama diperoleh laju aliran massa keluar sebesar 0,00271 kg/s. Perubahan laju aliran massa keluar ini diakibatkan oleh adanya beda tekanan antara ruang ketiga dan tekanan pada bagian keluar. Beda tekanan

yang terjadi untuk perubahan pertama sebesar 0,00388 bar, pada perubahan kedua sekitar 0,00663 bar, dan untuk regulator tekanan sebelum diubah beda tekanannya sebesar 0,00393 bar. Seperti diketahui bahwa semakin besar beda tekanan semakin besar pula laju aliran massa yang terjadi.

4.3 Perubahan saluran masuk pada ruang kedua

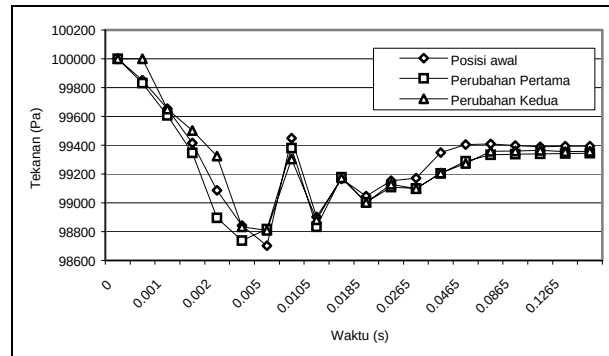
Seperti pada ruang pertama, ada dua perubahan posisi yang dilakukan pada ruang kedua ini yaitu dengan mengubah arah saluran masuk menuju ruang ketiga.



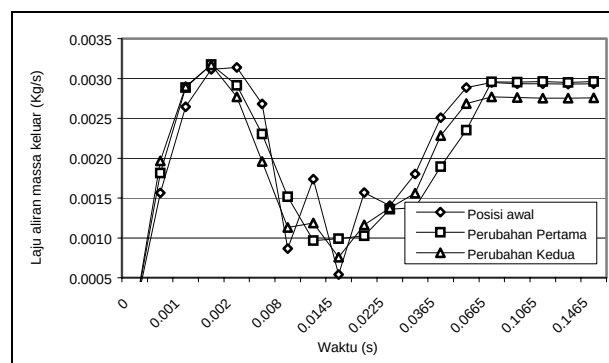
Gambar 6. Perubahan (a) Pertama dan (b) Kedua pada Ruang Kedua

Perubahan pertama yaitu dengan membuat pipa saluran masuk ke ruang kedua sejajar dengan pipa saluran keluar ke ruang ketiga. Untuk perubahan kedua dilakukan dengan menggeser pipa saluran ke ruang ketiga menuju sumbu Z_positif dan membentuk sudut 90° dengan pipa saluran masuk ke ruang kedua. Kedua perubahan tersebut dapat dilihat pada gambar 6. Secara singkat dapat dilihat perubahan yang terjadi baik pada tekanan maupun pada laju aliran massa keluar pada dan grafik 6 dan grafik 7.

Untuk perubahan pertama dari ruang kedua tekanan yang dicapai pada ruang pertama sebesar 2,86717 bar, pada ruang kedua 1,739 bar, dan pada ruang ketiga 0,99366 bar. Perubahan kedua yang dilakukan menghasilkan tekanan 2,86799 bar pada ruang pertama, 1,717 bar pada ruang kedua, dan 0,99347 bar pada ruang ketiga.



Grafik 6. Perubahan Tekanan Ruang-3 Akibat Perubahan Saluran Masuk Ruang-2

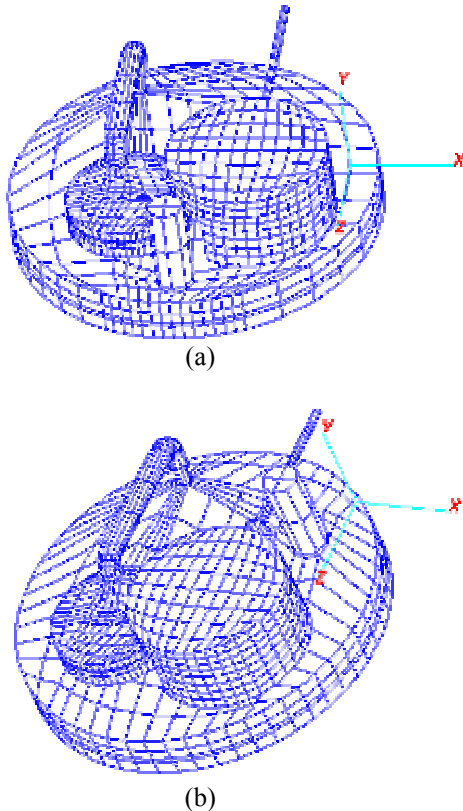


Grafik 7. Perubahan Laju Aliran Massa Keluar Akibat Perubahan Saluran Masuk Ruang-2

Pada laju aliran masuk terjadi penurunan yaitu 0,0017184 kg/s untuk perubahan pertama dan 0,0017836 kg/s untuk perubahan kedua. Hal ini disebabkan pada ruang pertama bukaan katupnya lebih kecil untuk kedua perubahan tersebut dibandingkan dengan bukaan katup sebelum diubah. Kecenderungan penurunan terjadi juga pada laju aliran massa keluar. Pada perubahan pertama besarnya laju aliran massa keluar adalah 0,00288 kg/s dan pada perubahan kedua kuantitas laju aliran massa keluar 0,002708 kg/s sedangkan sebelum diubah laju aliran massanya sebesar 0,00289 kg/s. Penurunan ini disebabkan beda tekanan antara ruang ketiga dan tekanan keluar kedua perubahan tersebut lebih kecil dibanding beda tekanan sebelum diubah.

4.4 Perubahan posisi lubang keluar

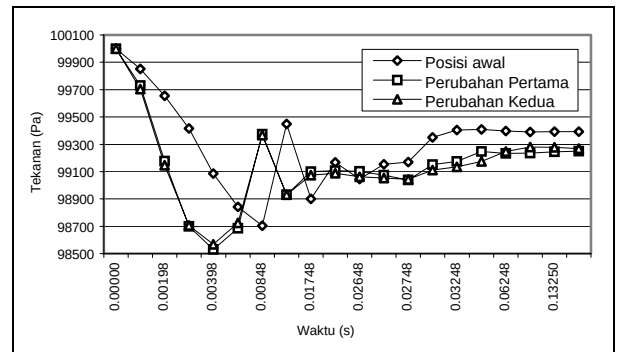
Disini perubahan dilakukan dengan mengubah posisi lubang keluar regulator tekanan. Pertama dengan memindahkan posisi lubang keluar ke arah sumbu Z_positif sejauh 24 mm.



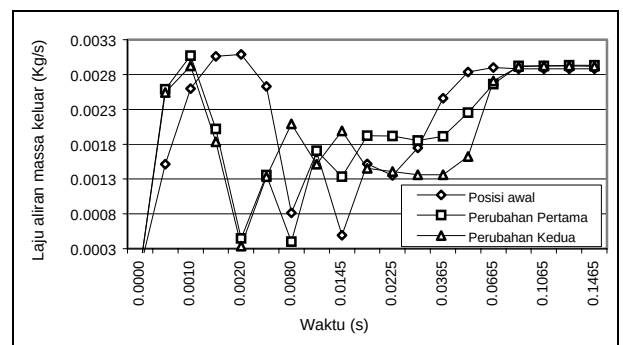
Gambar 7. Perubahan (a) Pertama dan (b) Kedua pada Posisi Lubang Keluar

Sedangkan perubahan kedua dengan memindahkan posisi lubang keluar ke arah sumbu X_positif sejauh 24 mm.

Sedangkan tekanan di dalam ruang ketiga sebesar 0,9925 bar untuk perubahan pertama dan 0,99267 bar untuk perubahan kedua. Untuk laju aliran massa keluar terjadi penurunan setelah perubahan posisi lubang keluar dilakukan. Perubahan yang terjadi akibat kedua perubahan tersebut dapat dilihat pada grafik 8 dan grafik 9. Akibat kedua perubahan posisi lubang keluar ini terdapat sedikit kenaikan tekanan di dalam ruang pertama. Dimana pada perubahan pertama tekanannya berkisar 2,86902 bar sedangkan untuk perubahan kedua sebesar 2,86973 bar. Kenaikan yang sedikit ini disebabkan bukaan katup ke ruang pertama lebih besar sehingga laju aliran massa masuk menjadi lebih besar. Tekanan di ruang kedua untuk perubahan pertama sekitar 1,711 bar dan untuk perubahan kedua 1,704 bar.



Grafik 8. Perubahan Tekanan pada Ruang-3 Akibat Perubahan Posisi Lubang Keluar



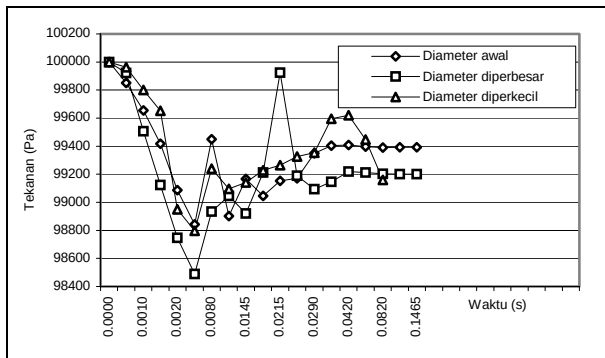
Grafik 9. Perubahan Laju Aliran Massa Keluar Akibat Perubahan Posisi Lubang Keluar

Untuk perubahan pertama laju aliran massa keluar yang bisa dicapai untuk keadaan tunak sekitar 0,00259 kg/s dan untuk perubahan kedua besarnya laju aliran massa keluar 0,002606 kg/s. Penurunan laju aliran massa keluar ini disebabkan beda tekanan yang terjadi antara ruang ketiga dengan tekanan keluar semakin kecil.

4.5 Perubahan Terhadap Diameter Lubang Keluar

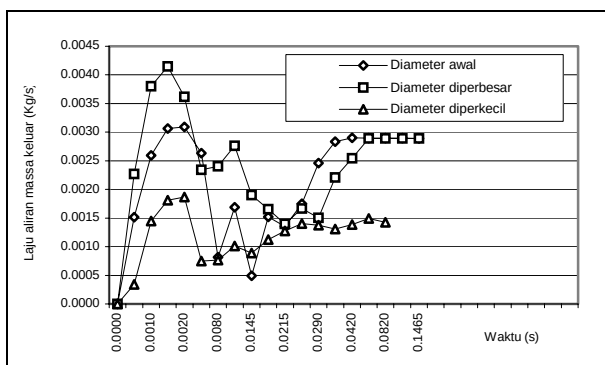
Perubahan selanjutnya yang dilakukan adalah mengubah diameter lubang keluar dari regulator tekanan. Perubahan pertama dengan memperbesar diameter lubang keluar menjadi 20 mm sedangkan perubahan kedua dengan memperkecil diameter lubang keluar menjadi 12 mm. Dengan memperbesar diameter lubang keluar diperoleh tekanan di dalam ruang pertama 2,868 bar, tekanan di ruang kedua sebesar 1,716 bar, dan tekanan di ruang ketiga 0,9920 bar. Sedangkan dengan memperkecil diameter lubang keluar kondisi tunak belum dicapai karena tekanan di dalam ruang maupun laju aliran massa masih berfluktuasi atau transien. Besarnya laju aliran massa keluar paling besar diperoleh regulator tekanan yang

diameter lubang keluarnya diperbesar yaitu 0,002899 kg/s. Untuk pengecilan diameter lubang keluar laju aliran massa keluar masih berfluktuasi dan cenderung berkurang.



Grafik 10. Perubahan Tekanan pada Ruang-3 Akibat Perubahan Diameter Lubang Keluar

Hal ini disebabkan karena pada kedua perubahan baik pengecilan maupun pembesaran diameter lubang keluar berhubungan dengan perubahan koefisien keluarannya. Berdasarkan persamaan (1) dimana harga koefisien keluaran dipengaruhi oleh luas penampang referensi aliran dan luas penampang restriksi aliran. Dengan pembesaran diameter lubang keluar membuat koefisien keluaran semakin besar dan sebaliknya bila diameter lubang keluar diperkecil. Sehingga perubahan harga koefisien keluaran ini berpengaruh terhadap laju aliran massa keluar sesuai dengan persamaan (16).



Grafik 11. Perubahan Laju Aliran Massa Keluar Akibat Perubahan Diameter Lubang Keluar

Secara umum semua regulator tekanan mencapai keadaan tunak setelah mencapai 0,03s. Kecuali untuk regulator tekanan yang diameter lubang keluarnya diperkecil menjadi 12 mm, membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi tunak atau masih dalam keadaan transien.

5. Kesimpulan Dan Saran

5.1 Kesimpulan

- Simulasi 3-D dengan program Fire ini memberikan gambaran tentang perubahan yang dilakukan pada regulator tekanan berupa perubahan posisi lubang masuk, posisi lubang keluar, diameter lubang keluar, tekanan keluar, dan pengaruhnya terhadap tekanan serta laju aliran massa keluar.
- Untuk perubahan tekanan masuk yang dilakukan dapat disimpulkan tidak menunjukkan adanya perubahan tekanan dan laju aliran massa keluar yang signifikan.
- Untuk perubahan posisi lubang masuk dan posisi lubang keluar yang dilakukan tampaknya tidak menunjukkan perubahan yang berarti baik terhadap tekanan di dalam ruang maupun laju aliran massa keluar regulator tekanan.
- Pada perubahan diameter lubang keluar, pengecilan diameter membuat aliran gas pada regulator tekanan menjadi lebih lama untuk mencapai kondisi tunak.

5.2 Saran

- Pada simulasi ini terdapat kesulitan dalam hal penentuan nilai *timestep increment* dimana hal ini berkaitan langsung dengan pencapaian waktu keadaan tunak sehingga untuk penelitian selanjutnya diperlukan informasi tambahan mengenai hal ini.
- Untuk penelitian selanjutnya perlu dipertimbangkan juga bagaimana pengaruh luas penampang katup terhadap perubahan tekanan dan laju aliran massa.

Daftar Pustaka

1. *Advanced Simulation Technology* (AST), "FIRE CFD v70b_pl3 User Manual", AVL List GmbH, 1998.
2. Heywood, J.B., *'Internal Combustion Engine Fundamental'*, McGraw-Hill, Singapore, 1988.
3. Laboratorium Motor Bakar dan Sistem Propulsi, *"Proyek Percontohan Bahan Bakar Gas"*, Lembaga Pengabdian Masyarakat ITB-Direktorat Jenderal Perhubungan Darat-Pertamina, 1988.
4. Wahidin, M Nur, *"Pengujian Prestasi Motor Diesel OM 352 dengan Bahan Bakar Solar"*

- dan Gas Solar*”, Tugas Sarjana, Laboratorium Motor Bakar dan Sistem Propulsi Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung, 1989.
5. Radjo Zein, Mazda, *“Analisis Pemakaian Conversion Kit pada Motor Otto dengan BBG serta Penentuan saat Penyalaan Optimum-nya”*, Tugas Sarjana, Laboratorium Motor Bakar dan Sistem Propulsi Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung, 1990.
 6. Kusnandar, Unang, *“Analisis Pengaturan BBG pada Motor Diesel Berbahan Bakar Ganda BBG-Minyak Diesel”* Tugas Sarjana, Laboratorium Motor Bakar dan Sistem Propulsi Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung, 1990.
 7. Wahyudi Chandra, *“Analisis Sistem Otorregulasi Tekanan pada Regulator Kit Konversi untuk Motor Bensin dengan Bahan Bakar CNG”* ,Tugas Sarjana, Institut Teknologi Bandung, 1991.
 8. Gerhard, Philip M, 1985, *“Fundamental of Fluid Mechanics”* 2nd, Addison-Wesley Inc