

Aplikasi Aktuator Pneumatik sebagai Simulator Beban Dinamis Vertikal pada Mekanisme Suspensi Roda Kendaraan Seperempat

Simon Ka'ka^{1,a}, Syukri Himran², Ilyas Renreng² dan Onny Sutresman²

¹ Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Sulawesi Selatan 90245, Indonesia

² Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Sulawesi Selatan 90245, Indonesia

^asimon_kaka@poliupg.ac.id



Abstract— Driving comfort for riders and passengers is a key target to be achieved. Fluctuations in vehicle loads, bumps, perforated surfaces, and other road damage will greatly affect the vehicle suspension working system. This study aims to calculate the vertical dynamic load of the vehicle actually which occurs on road construction after through the vehicle wheel suspension mechanism. The Pneumatic cylinder that was driven by pressurized air directly weigh on the spring and Shock Absorber that contained on the wheels of the vehicle. The load fluctuations of the medium weight category vehicle are determined by the regulation of the amount of pressurized air entering into the pneumatic cylinder chamber pushing the piston and connecting rods. The deviation that occurs during compression on the Spring and Shock Absorber, is substituted into the vehicle dynamic load equation by taking also the magnitude of the spring stiffness constant, and the fluid or gas coefficient of the damper. The results showed that the magnitude of the displacement when the compression force worked has significantly influenced the amount of vertical dynamic load of the vehicle that overlies the road construction. Experimental results using pneumatic actuators instead of real dynamic vehicle loads illustrate the characteristics of the relationship between work pressure and dynamic load. If the working pressure of P_2 (bar) is given great, the vertical dynamic load F_t (N) which overloads the structure of the road is also greater. From the graph shows that shock absorbers have greater ability to reduce dynamic load vertically when compared to spring ability.

Keywords— *Dynamic load; Pneumatic Cylinder; Pressurized air; Suspension; and Road*

Abstrak— Kenyamanan berkendara oleh para pengemudi merupakan suatu target utama yang ingin dicapai. Fluktuasi beban-beban kendaraan, gundukan-gundukan, serta kerusakan jalan lainnya akan berpengaruh besar terhadap sistem kerja suspensi kendaraan. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung besarnya beban dinamis vertikal kendaraan sesungguhnya terjadi pada konstruksi jalan setelah melalui mekanisme suspensi

roda kendaraan. Silinder Pneumatik yang digerakkan oleh udara bertekanan membebani langsung pegas dan *Shock Absorber* yang terdapat pada roda kendaraan. Fluktuasi beban dari kendaraan kategori bobot sedang ditentukan oleh pengaturan besarnya udara bertekanan masuk ke dalam ruang silinder pneumatik mendorong torak dan batang penghubung. Simpangan yang terjadi pada saat kompresi pada Pegas dan Shock Absorber, disubstitusi ke dalam persamaan beban dinamis kendaraan dengan memperhitungkan pula besarnya konstanta kekakuan pegas, dan koefisien cairan atau gas peredam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa besarnya perpindahan saat gaya kompresi bekerja telah memberikan pengaruh secara signifikan terhadap besarnya beban dinamis vertikal kendaraan yang membebani konstruksi jalan. Terdapatnya beban dinamis kendaraan yang berfluktuasi dan berulang, juga berdampak pada berkurangnya kemampuan jalan menerima beban. Hasil eksperimen yang menggunakan *actuator pneumatic* sebagai pengganti beban dinamis nyata kendaraan memberikan gambaran karakteristik hubungan antara tekanan kerja dan beban dinamis. Jika tekanan kerja P_2 (bar) yang diberikan semakin besar, maka beban dinamis vertikal F_t (N) yang membebani struktur jalan semakin besar pula. Dari grafik menunjukkan bahwa shock absorber memiliki kemampuan lebih besar meredam beban dinamis vertikal apabila dibandingkan dengan kemampuan pegas.

Kata Kunci— *Beban dinamis; Silinder Pneumatik; Udara bertekanan; Suspensi; dan Jalan*

I. Pendahuluan

Sejumlah jenis kendaraan roda empat atau lebih yang melintas di atas permukaan jalan raya setiap saat menghasilkan sejumlah beban dinamis yang fluktuatif. Pembebanan yang fluktuatif ini selain diperoleh dari variasi beban dinamis, VBD dapat pula disebabkan oleh adanya beban lebih (overload, OL) dan beban berulang

(Repetition loads,RL)[1]. Efek dari transfer beban fluktuatif (BF), beban lebih OL dan beban berulang RL akan menurunkan kemampuan/stabilitas struktur jalan dalam bentuk deformasi permukaan yang berlubang atau bergelombang. Kemampuan struktur jalan menerima beban dinamis vertikal kendaraan tersebut adalah tergantung pada jenis lapisan permukaan, lapisan pondasi elastis dan lapisan pondasi geser.

Variasi bobot kendaraan ringan, sedang dan berat yang melintas di atas permukaan jalan secara simultan akan sangat mempengaruhi kemampuan lapisan pondasi elastis jalan menerima beban tersebut. Berdasarkan permasalahan tersebut maka diperlukan kajian terhadap beberapa variabel yang berpengaruh baik yang sifatnya langsung maupun tak langsung. Pembebanan fluktuatif dipengaruhi oleh variabel berat sumbu roda dan berat kendaraan. Kondisi pembebanan berulang RL adalah juga sangat dipengaruhi oleh arus pengulangan lalu lintas, volume rerata arus lalu lintas (Jumlah.kend./jam) yang dihasilkan oleh setiap jenis kendaraan serta lamanya kendaraan melintas.

Suatu upaya yang dilakukan untuk mengkaji beban dinamis dari kendaraan kategori bobot sedang yang melintas di jalan maka diperlukan sebuah eksperimen terhadap pembebanan seperempat bagian kendaraan yang berpusat pada sebuah roda depan kendaraan. Kajian yang inovatif ini didasarkan pada pengetahuan dasar tentang mekanisme transfer pembebanan vertikal melalui sistem suspensi roda yang terdiri atas kerja pegas dan shock absorber.

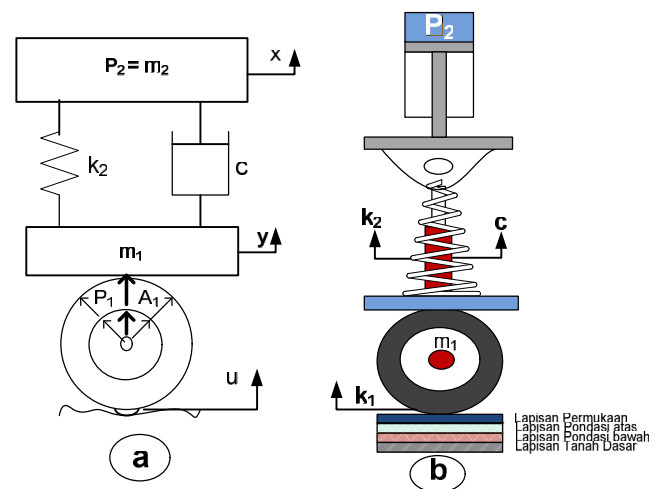
Kajian tentang beban dinamis yang ditransformasikan melalui mekanisme kerja suspensi pada roda kendaraan terhadap jalan adalah (1) bertujuan untuk mengetahui bentuk formula dan besarnya beban dinamis vertikal dari setiap jenis bobot kendaraan sedang yang melintas, (2) mengetahui karakteristik kemampuan jalan menerima beban berulang RL dan beban lebih OL serta (3) menghasilkan suatu nilai konstanta hubungan/perbandingan antara beban dinamis vertikal kendaraan dan kemampuan jalan dalam bentuk parameter tak berdimensi.

Sebuah unsur kebaruan yang ditargetkan dalam penelitian ini adalah memanfaatkan aktuator pneumatik pada alat uji/eksperimen sebagai pengganti beban dinamis kendaraan membebani permukaan jalan. Udara

bertekanan dari kompresor memberikan gaya tekan kompresi secara bervariasi terhadap pegas dan shock absorber yang terdapat pada sistem suspensi.

Mekanisme suspensi pasif dan kondisi struktur pembebanan seperempat kendaraan ditunjukkan pada gambar 2.4.[2, 3]. Berat badan kendaraan (mass sprung) m_2 dengan kekakuan pegas k_2 dan koefisien redaman c akan membebani poros roda kendaraan (mass unsprung) m_1 selanjutnya memberikan gaya aksi terhadap kontur permukaan jalan.

Untuk kendaraan **kategori ringan**: memiliki beban sumbu $m_1= 400$ kg, dan berat kendaraan, $m_2=835$ sampai 1394 kg. Kendaraan **kategori sedang**: memiliki beban sumbu, $m_1= 480$ sampai 600 kg dan berat kendaraan, $m_2 = 1185$ sampai 1990 kg. Sedangkan kendaraan **kategori berat**: memiliki beban sumbu, $m_1= 525$ sampai 850 kg, dan berat badan kendaraan, $m_2 = 5200$ sampai 8730 kg (sumber: P.T. Astra Internasional, 2014, Lampiran 1). Kondisi pembebanan lebih OL, tergantung pada nilai konstanta k dan beban sumbu $m_1 \sim L$ (kg, ton) untuk setiap jenis kendaraan. Besarnya nilai k untuk sumbu **tunggal**: $k=1$, sumbu **ganda**: $k=0.086$ dan sumbu **triple**: $k=0.031$.



Gambar 1. (a) Model suspensi pasif (b) Unit suspensi, shock absorber, sumbu dan roda pada struktur lapisan jalan.

Gaya reaksi dari kontur jalan terhadap ban akan terdistribusi dalam arah u melalui konstanta elastisitas ban k_1 . Besarnya gaya dinamis vertikal oleh aktuator pneumatik ekuivalen pada gaya berat badan kendaraan (2) adalah dijelaskan pada persamaan (2.5). Simpangan kompresi sejauh x_2 (cm) akan bervariasi sesuai dengan

besarnya tekanan kerja P_2 (bar) yang divariasikan mulai dari 1 bar sampai 8 bar.

$$\left. \begin{aligned}
 F_{p2} = F_{sf} = F_k - R_f = F_k - 0.1F_k = 0.9F_k \\
 \sum F_v = 0 \\
 F_{sf} - (F_{k2} + F_{c2}) = 0 \\
 0.9F_k - (k_2 + c)x_2 = 0 \\
 F_k = \frac{(k_2 + c)x_2}{0.9} \\
 F_{p2} = F_k = 1.1(k_2 + c)x_2
 \end{aligned} \right\} (N)(1)$$

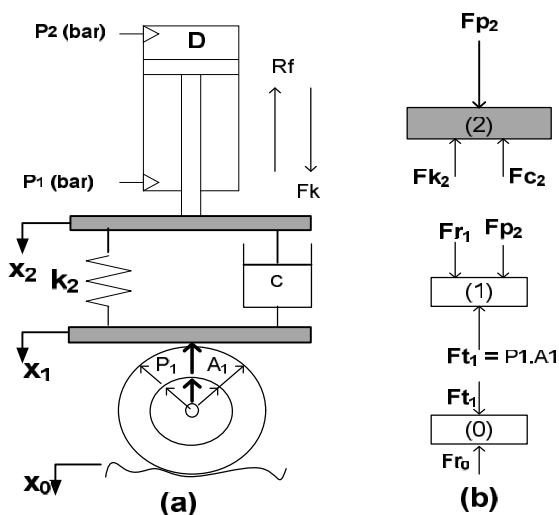
Jika gaya N bekerja bersama-sama dengan gaya berat sumbu pada roda (1) maka diperoleh hubungan:

$$\left. \begin{aligned}
 F_{t1} = F_{p2} + F_{r1} \\
 F_{t1} = 0.9F_k + (m_1 \cdot g)
 \end{aligned} \right\} (N) \quad (2)$$

Apabila diameter torak, $D=100$ mm (0.100 m), k_2 =konstanta pegas, c = koefisien redaman, m_1 = berat sumbu roda, percepatan gravitasi $g=10$ m/s² dan gaya dorong torak silinder pneumatik, $F_k = \pi/4 (D^2) P_2$, maka persamaan (2) menjadi:

$$F_{t1} = 785 P_2 + 10m_1 (N) \quad (3)$$

Gaya efektif F_{ef} . (N) torak silinder pada langkah maju adalah selisih antara gaya teoritis, F_k (N) dan gaya gesek R_f (N) [4]. Jika gaya gesek R_f ditetapkan sebesar 10% x F_k (N) maka secara keseluruhan mekanisme transfer beban terhadap struktur jalan aspal adalah mengacu pada Diagram Benda Bebas (DBB) berikut:



Gambar 2. Mekanisme pembebanan ekperimental sistem pneumatik

Jika pegas dan shock absorber mengalami pembebanan bervariasi dari tekanan $P=1$ sampai 8 bar, maka akan terjadi simpangan ke arah kompresi sejauh x (mm). Berdasarkan hukum aksi-reaksi, menjelaskan bahwa beban yang diberikan pada pegas adalah sebanding dengan besarnya lendutan dikali dengan konstanta pegas. Besarnya perpindahan (displacement) rata-rata pada sistem suspensi hasil optimasi $x = 0.009264$ m dengan percepatan vertikal maksimum adalah 15.5707 m/s². Pada kondisi ini diperoleh nilai koefisien kekakuan pegas suspensi $k_s = 41821$ N/m, serta koefisien peredam suspensi $c_s = 68574$ N.s/m [5] serta $c_s = 1920$ J/kg.K [6]. Prototipe suspensi yang diuji oleh [7] mempunyai data konstanta pegas $k_s = 10581,292$ N/m, koefisien redaman kejut, $c_s = 96,073$ Ns/m dan konstanta elastis ban, $k_e = 98041,246$ N/m. Kajian tentang hubungan antara diameter piston D dengan diameter lubang saluran d_i telah dilakukan studi pendahuluan [8, 9] dalam bentuk persamaan (4).

$$d_i = 0.065713 D \quad (4)$$

Dimensi saluran udara yang akan digunakan adalah disesuaikan dengan dimensi piston silinder pneumatik yang dipilih.

Berdasarkan spesifikasi ban/roda untuk kendaraan ringan dan kendaraan sedang digunakan tekanan standar tekanan angin dalam ban sebesar **2 bar**, dan **5.86 bar** untuk kendaraan berat. Jika ukuran ban/roda yang digunakan berdimensi: **215/60/16** yang berarti, lebar ban $S=215$ mm, tinggi $T=60\% \times S$ (mm) = 129 mm = 0.129 m, dan Diameter roda, $D_1=16$ "(inches) = 16x25mm = 400 mm = 0.4 m, dan tekanan udara dalam ban $P_1=2$ bar = 200000 N/m², dan luasan ban

$$A_1 = \pi[r_o^2 - r_i^2] = 3.14[0.102^2 - 0.020^2] = 0.031412 \text{ m}^2,$$

maka gaya inner ban/roda menahan beban vertikal kendaraan adalah $F_{t1} = P_1 \times A_1 = 6282.4$ N.

Besarnya koefisien beban dinamis kendaraan dirumuskan [10] sebagai perbandingan antara beban dinamis rata-rata dengan beban statis sebagai berikut:

$$DLC = \frac{\text{Rerata bebandinamis}}{\text{Beban statis}} = \frac{FD_{rms}}{F_S} \quad (5)$$

Untuk kendaraan dengan suspensi hydro-pneumatic maka beban dinamis dapat berkurang sebesar 20 %. Pada kondisi tersebut *Dynamic Load Coefficient* (DLC)

menjadi, $DLC = \frac{(100-20)\%}{100\%} = 0.80$. Apabila roda kendaraan $\frac{1}{4}$ sedang menggelinding di atas permukaan jalan, maka beban dinamis vertikal kendaraan diformulasikan sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} F_{DV} &= 0.8 \times F_{t1} \\ &= 628P_2 + 8m_1 \leq F_{A0} \end{aligned} \right\} \text{ (N)} \quad (6)$$

II. Metode Penelitian

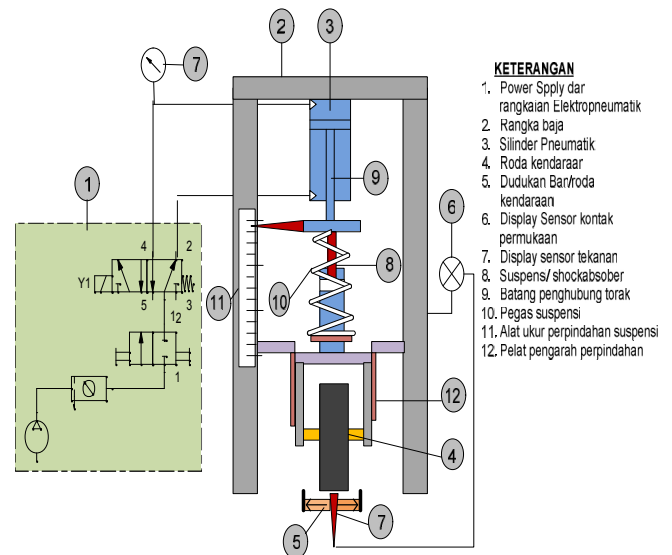
A. Eksperimen

Secara eksperimen pembebanan terhadap struktur pondasi jalan dilakukan dengan mengekuivalenkan berat total badan kendaraan m_1 (kg) dan bobot sumbu roda m_2 (kg), dengan gaya dorong torak silinder pneumatik, F_{et} (N) sebagai aktuator bekerja pada tekanan kerja $P_2 = 1$ sampai 8 (bar). Penelitian yang berorientasi pada simulasi gaya piston silinder pneumatik yang diidentikkan sebagai beban dinamis nyata kendaraan ditunjukkan pada gambar 3. Jika gaya tekan dari torak silinder pneumatik menekan pegas dan shock Absorber maka akan terjadi proses kompresi yang ditandai oleh penunjukan jarum x pada skala perpindahan (mm).

B. Pengumpulan Data

Berdasarkan pada simulasi pembebanan, maka pengumpulan data-data eksperimen dilakukan dengan membaca skala (11) penunjukan jarum /dial indikator perpindahan, x (mm) sesaat terjadi kompresi pada pegas (10). Besarnya perubahan perpindahan yang terjadi adalah sangat ditentukan oleh besarnya tekanan udara P_2 (bar) yang diatur mulai dari 1 (bar) sampai 8 (bar). Agar supaya hasil pengukuran x mm dapat lebih mendekati keadaan nyata maka perlu dilakukan pengukuran x (mm) sampai 5 kali pada setiap pengaturan tekanan kerja dengan mengitung harga x (mm) rerata.

Kecepatan aliran fluida kerja masuk ke dalam silinder menurut [11] adalah sangat memberikan suatu pengaruh secara signifikan terhadap gaya pada suspensi kendaraan.



Gambar 3. Simulasi pembebanan dengan aktuator pneumatik

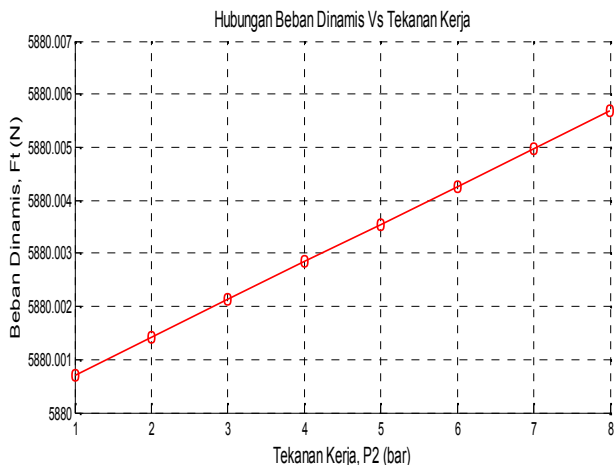
C. Analisis Data

Besarnya perpindahan rerata x (mm) yang diperoleh tersebut selanjutnya disubstitusi ke persamaan (1) dan (4) sebagai gaya berat badan kendaraan, Fp_2 (N) dan gaya dinamis vertikal nyata kendaraan, Ft_1 (N) terhadap konstruksi jalan. Dengan bantuan analisis program Mat-Lab/Simulink, maka besarnya Fp_2 (N) dan, Ft_1 (N) dapat diperoleh, serta karakteristik pembebanan yang dilakukan terhadap konstruksi jalan dapat ditunjukkan melalui gambar grafik.

III. Hasil dan Pembahasan

Simulasi beban dinamis kendaraan yang diperankan oleh silinder/aktuator pneumatik menghasilkan besarnya beban dinamis kendaraan membebani struktur jalan dengan mengacu pada persamaan (3). Jika tekanan kerja, P_2 sebagai pengganti beban m_2 divariasikan dari 1 bar sampai 8 bar, maka karakteristik kerja beban dinamis terhadap tekanan kerja ditunjukkan pada Gambar 4.

Grafik hubungan antara tekanan kerja P_2 (bar) dan Beban dinamis vertikal membebani struktur jalan menggambarkan kenaikan beban dinamis secara signifikan dengan kenaikan beban total kendaraan. Kondisi signifikansi ini diperlihatkan dalam gambar grafik sebagai garis lurus.



Gambar 4. Karakteristik Beban Dinamis sistem pneumatik

Karakteristik beban dinamis yang diperoleh dari hubungan antara tekanan operasi dengan konstanta pegas k_2 , Gaya tekan piston silinder pneumatik, F_{p2} , redaman shock absorber c_2 serta besarnya beban dinamis vertikal yang membebani struktur jalan F_{t1} ditunjukkan pada Gambar 5(a). Pengaruh redaman oleh shock absorber memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap beban dinamis kendaraan membebani struktur jalan. Kondisi yang demikian menyebabkan besarnya beban dinamis F_{t1} (N) menurut Gambar 5 (b) berada disekitar 10000 (N) atau ekuivalen dengan 1000 kg.

Jadi jika kendaraan kategori bobot sedang yang diuji memiliki bobot sumbu roda $m_1=600$ kg , bobot badan $m_2=1665$ kg dan bobot total/net $m_t = 2265$ kg sesuai data dalam Tabel 1 maka diperoleh beban dinamis kendaraan yang tereduksi yaitu $m_r = m_t - 1000$ kg = $2265 - 1000 = 1265$ kg.

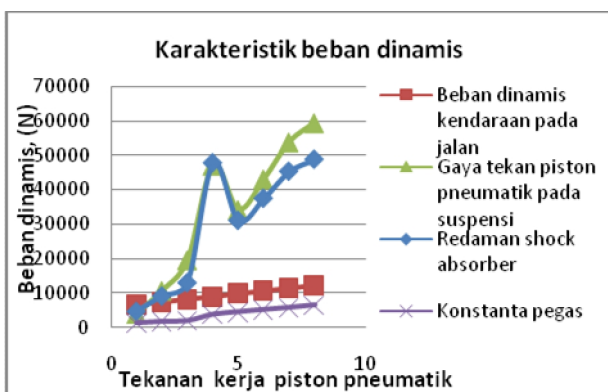


Gambar 5 (a) Karakteristik beban dinamis oleh gaya piston, F_{p2} terhadap pegas dan shock absorber. (b) Hubungan antara gaya piston F_{p2} dan beban dinamis F_{t1} yang membebani struktur jalan.

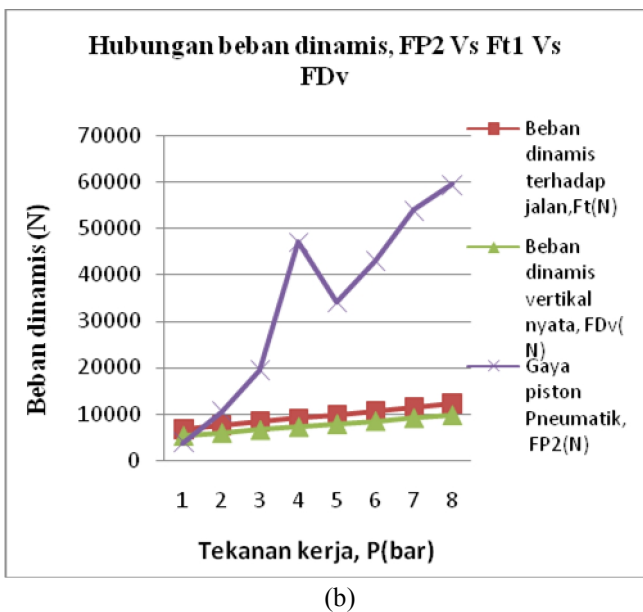
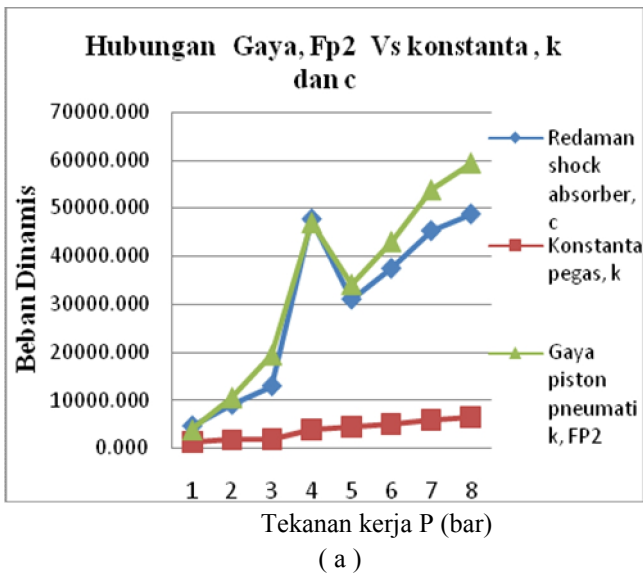
Presentasi penurunan beban dinamis yang membebani struktur jalan oleh adanya redaman dari shock absorber adalah

$$\frac{2265}{1265} \times 100\% = 55.85 \%$$

Gambar 6 (a) menunjukkan suatu gambaran yang cukup fantastic bahwa redaman shock absorber yang terpasang pada mekanisme suspensi kendaraan memberikan nilai redaman c (Ns/cm) terhadap beban dinamis yang sangat besar yaitu berkisar antara 4523.729 Ns/cm dan 48702.041 Ns/cm. Pengaruh redaman terkecil yang juga digunakan pada sistem suspensi kendaraan uji adalah kontribusi redaman pegas ulir k_2 (N/cm) yang nilainya berkisar antara 1330.508 N/cm dan 6408.163 N/cm. Nilai senjang atau gap yang terjadi antara peredam shock absorber dan pegas ulir, menunjukkan bahwa shock absorber memegang peranan yang sangat besar untuk mereduksi getaran yang ditimbulkan oleh beban dinamis vertikal kendaraan. Gambar 6 (b) menggambarkan karakteristik hubungan antara beban dinamis hasil eksperimen dengan beban dinamis nyata yang terjadi. Dengan menggunakan nilai Koefisien



(a)



Gambar 6. (a) Hubungan gaya piston FP2 (N) dengan peredam shock absorber dan pegas ulir (mapershot), (b) Hubungan gaya piston silinder pneumatik FP₂ (N) dengan beban dinamis kendaraan uji F_t (N) dan Beban dinamis vertikal nyata, FD_v (N).

Beban Dinamis, KBD (Dynamic Load Coefficient, DLC) sebesar 20 % yang berlaku untuk kendaraan dengan suspensi hydro-pneumatic maka transformasi beban dinamis vertikal kendaraan yang sesungguhnya adalah mengikuti persamaan (3) dengan nilai kisaran antara 5332 (N) dan 9728 (N) atau lebih kecil dari nilai bobot 10000 (N).

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian eksperimen dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Beban dinamis total kendaraan yang dihasilkan dari setiap kendaraan bobot sedang adalah sebesar FD_v = 22197 N. Shock Absorber yang terpasang pada mekanisme suspensi kendaraan mampu meredam getaran pada kendaraan sebesar: 55.85%
2. Karakteristik beban lebih F_(OL) = 16204 N serta beban dinamis berulang sebesar F_(RL) = 45841 N selalu akan mempengaruhi kemampuan struktur jalan menerima beban- OL dan beban RL.
3. Hubungan antara beban dinamis dan kekuatan struktur jalan menerima beban yang dinyatakan dalam bentuk parameter tak berdimensi yakni k_{dv} = 0.000075 pada sumbu terberat, k_{dv} = 0.000103 untuk beban dinamis total kendaraan serta k_{dv} = 0.000213 untuk beban dinamis berulang.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang, dan Menristekdikti yang telah memfasilitasi dan membiayai penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] A. A. R. Leo Santoso, "Analisis Dampak Beban Overloading Kendaraan pada Struktur Rigid Pavement Terhadap Umur Rencana Perkerasan," *Teknik Sipil*, vol. 19, p. 8, 2 Agustus 2012.
- [2] A. Rehnberg, "Vehicle dynamic analysis of wheel loaders with suspended axles," *TRITA-AVE*, vol. 15, 2008.
- [3] K. Ogata. (1997). *Modern Control Engineering* (3 ed.).
- [4] M. M. Simon Ka'ka, "A method to Compute the Dimension of An Air Distribution Channel of A Pneumatic Cylinder," presented at the IGCESH Conference, Johor Bahru, Malaysia, 2013.
- [5] E. Nurcahyanto, "Penggunaan Algoritma Genetik Untuk Perancangan Sistem Suspensi Optimal Pada Model Kendaraan Seperempat," p. 10, 2004.
- [6] Yuxin Zhang, Konghui Guo, Dai Wang, Chao Chen, "Energy conversion mechanism and regenerative potential of vehicle suspensions," *Energy Conversion and Management*, pp. 1-10, 2016.
- [7] N. Bangsing, "Pengujian Prototip Suspensi Aktif Tegar (Robust) Model Seperempat Kendaraan," *PROC. ITB Sains & Tek.*, vol. Vol. 36 A, No. 1., pp. 83-95, 2004.
- [8] Simon Ka'ka, "Kajian Dimensi Saluran Distribusi Udara pada Silinder Pneumatik," S2, Teknik Mesin, Universitas Hasanuddin, Makassar, 2000.

- [9] K. k. Simon, "IbM Pengajar SMK Tri Tunggal 45 dan SMK Handayani untuk Mengembangkan Pembelajaran Pneumatik dan Hidrolik Berbasis Fluid Sim," *Prosiding Seminar Nasional Pengabdian Kepada Masyarakat*, pp. 122-128, 2017.
- [10] Caitrans, "Simulation of a Mobile Crane's Dynamic Load Using the CraneSim Program," *The Pavement Research Group*, vol. Vol.1 No.1, p. 2, 2005.
- [11] Y. klistafani, "Karakteristik Aliran Fluida di Dalam Asymmetric Diffuser dengan Penambahan Vortex Generator," *Intek Politeknik Negeri Ujung Pandang*, vol. Vol. 5, pp. 22-27, 2018.