

PENGARUH ZALIR DAN PUTARAN KATUP TERHADAP UNJUK KERJA PEREDAM VISKOUS

Djarot B. Darmadi* & Gunawan Dwi Haryadi

Abstrak

Fenomena getaran bebas teredam dengan getaran satu derajat kebebasan ini diuji di Laboratorium Fenomena Dasar Mesin dengan memanfaatkan alat uji getaran Sanderson (Sanderson Simple Vibration Aparatus). Pengujian dilakukan dengan mengganti peredam zalir yaitu SAE 20, SAE 40 dan SAE 90, serta mengganti jumlah putaran katup (dashpot) untuk menghasilkan osilasi pada alat uji yang ditunjukkan dengan grafik gelombang sinusoidal di plotter alat uji.

Data yang didapatkan berupa data amplitudo getaran terhadap waktu. Dipilih dua amplitudo X_1 dan X_2 yang berurutan sehingga didapatkan besaran-besaran yang mempunyai hubungan dengan fenomena getaran bebas teredam yaitu pengurangan logaritmik (δ), rasio peredaman (ζ) dan konstanta peredaman (c). Dengan melakukan analisa data secara grafik dan matematik diperoleh kesimpulan semakin besar putaran katup memberikan efek peredaman yang menurun dan peredam zalir yang memberikan efek peredaman dari yang terbesar secara berturut-turut SAE 40, SAE 90 dan SAE 20.

Abstract

The Phenomena of damping on free vibration with one degree of freedom had observed at The Base of Mechanical Engineering Phenomena Laboratory by using Sanderson Simple Vibration Apparatus. The observation had done by changing the fluid of viscous damping those were SAE 20, SAE 40 and SAE 90, and changing the number of dashpot turning to found oscillation of testing apparatus which shows on sinusoid graphics at a testing apparatus' plotter.

Vibration amplitude will be received as a data (primary amplitude and secondary amplitude as in a series). So the number that had influence on phenomena of damping free vibration would be received, there are; logarithmic decrement (δ), damping ratio (ζ) and damping rate (c). The data were analysed mathematically and graphically, which shows that the higher the number of dashpot turning will give the smaller of damping effect and the higher effect of damping fluid were SAE40, SAE90 SAE20 respectively.

PENDAHULUAN

Perkembangan industri otomotif, terutama dalam era globalisasi mengalami persaingan yang sangat ketat. Masing-masing industri otomotif tersebut saling berpacu untuk menampilkan produk otomotif yang banyak disukai konsumen. Salah satu faktor yang selalu mendapat perhatian dari industri otomotif adalah faktor kenyamanan, dalam hal ini faktor kenyamanan tidak terlepas dari peran *shock breaker* sebagai peredam getaran pada kendaraan untuk kondisi jalan yang tidak rata dan bergelombang.

Beberapa komponen yang berperan sebagai *shock breaker* pada kendaraan adalah: pegas baik yang berupa pegas keong (*coil spring*) atau pegas daun (*leaf spring*) yang bekerjasama dengan sebuah peredam viscous yang memiliki piringan berkatup (*dashpot*) untuk menahan laju gerak bolak-balik dari getaran kendaraan yang diterima oleh pegas.

Pemberian gambaran tentang masalah ini tentunya akan menjadi rumit, terutama untuk mahasiswa yang berada pada tingkat awal kuliah. Sebagai pengertian awal, fenomena tersebut akan lebih mudah diterima oleh mahasiswa dengan mengetahui kondisi sebenarnya pada getaran bebas teredam satu derajat kebebasan dibandingkan dengan hanya

menunjukkan grafik getaran teredam (biasanya dalam bentuk amplitudo vs waktu) pada saat kuliah. Penelitian yang dilakukan diharapkan dapat menjelaskan dan mengetahui secara jelas perolehan grafik-grafik pengaruh fluida peredam dan putaran katup pada getaran bebas teredam satu derajat kebebasan, sehingga gambaran dan persamaan-persamaan yang rumit dari getaran teredam akan mudah dipahami.

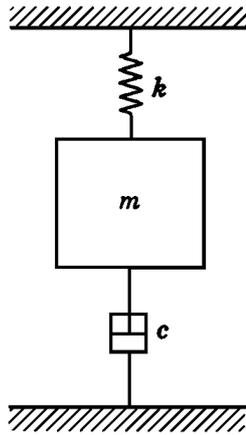
TINJAUAN PUSTAKA

1. Peredam Viskous

Gambar 1 menampilkan model sistem yang bergetar bebas dengan peredam viscous. Piringan berkatup ini melawan gerak massa m dengan gaya $c \dot{x}$.

Jika massa itu dianggap sebagai benda bebas, berpindah kebawah sejauh x dari keadaan setimbang statisnya dengan kecepatan \dot{x} , dapat dituliskan persamaan differential gaya-gaya yang beraksi pada massa m . Berat balok W diimbangi oleh defleksi statik awal yang bisa diabaikan, yaitu, $W = k\delta_{st}$. Gaya pegas kx melawan perpindahan massa ke bawah, jadi beraksi ke atas dan bernilai negatif.

* Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang



gambar 1
Getaran Bebas Teredam

Gaya peredaman melawan arah kecepatan ke bawah, dan juga beraksi ke atas dan bernilai negatif.

$$-c \dot{x} - kx = m \ddot{x}$$

atau :

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

persamaan ini memiliki penyelesaian :

$$x = e^{pt} \quad (2)$$

dimana p adalah konstanta dan t adalah waktu. Dengan mendiferensialkan persamaan 2 maka:

$$\dot{x} = p e^{pt} \quad \ddot{x} = p^2 e^{pt}$$

mensubstitusikannya dalam persamaan 1 :

$$m p^2 e^{pt} + c p e^{pt} + k e^{pt} = 0$$

atau :

$$e^{pt} (m p^2 + c p + k) = 0$$

Persamaan 1 akan memenuhi persamaan differential jika persamaan dalam kurung sama dengan 0, yaitu jika:

$$m p^2 + c p + k = 0 \quad (3)$$

ada 2 nilai p sebagai penyelesaiannya :

$$p_1 = -\frac{c}{2m} + \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (4)$$

dan

$$p_2 = -\frac{c}{2m} - \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (5)$$

karenanya, $x = e^{p_1 t}$ dan $x = e^{p_2 t}$ keduanya mungkin merupakan pemecahan persamaan 1. Penyelesaian umum ditemukan dengan mengkombinasikannya:

$$x = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} \quad (6)$$

dimana B_1 dan B_2 adalah sembarang bilangan konstan. Penyelesaian itu benar sepanjang p_1 tidak sama dengan p_2 .

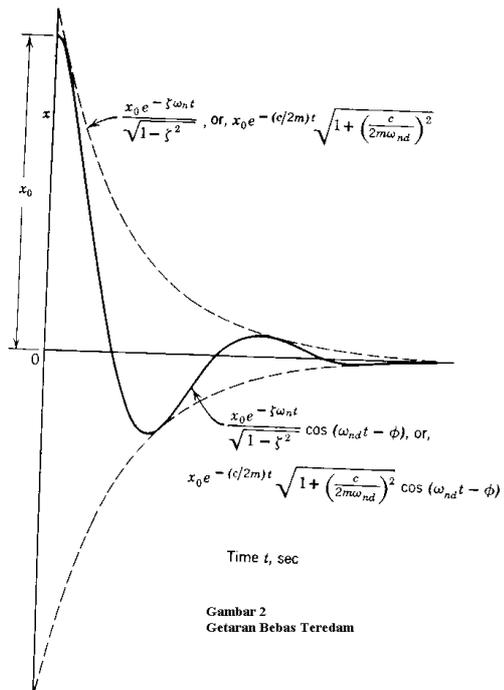
Ketika $(c/2m)^2$ lebih besar dari k/m terjadi redaman berlebih (*overdamping*). Akan terjadi getaran teredam (*underdamped*) ketika $(c/2m)^2$ lebih kecil daripada k/m . Hal ketiga terjadi ketika $p_1 = p_2$, yaitu jika persamaan dibawah tanda akar pada persamaan 4 dan 5 bernilai nol, kasus ini dikenal dengan peredaman kritis. Dalam tulisan kali ini pembahasan dibatasi untuk kasus getaran bebas teredam.

2. Getaran Bebas Teredam

Kondisi getaran bebas teredam terjadi ketika $(c/2m)^2$ lebih kecil daripada k/m ; atau ketika nilai

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{(c/2m)^2}{k/m}$$

lebih kecil daripada satu. Massa yang bergetar bebas teredam bergetar dengan amplitudo yang berkurang seperti terlihat pada gambar 2.



Gambar 2
Getaran Bebas Teredam

Karena $(c/2m)^2$ lebih kecil daripada k/m ; maka eksponen p_1 dan p_2 adalah bilang kompleks;

$$p_1 = -\frac{c}{2m} + j\sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2}$$

$$\text{dan } p_2 = -\frac{c}{2m} - j\sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2}$$

terlihat bahwa

$$\sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} = \omega_{nd}$$

yaitu frekwensi natural getaran teredam.

Dengan memperhatikan persamaan 6 dan bahwa

$$e^{-a+b} + e^{-a-b} = e^{-a} (e^b + e^{-b})$$

maka :

$$x = e^{-(c/2m)t} (B_1 e^{j\omega_{nd}t} + B_2 e^{-j\omega_{nd}t}) \quad (7)$$

dan karena $e^{ja} = \cos a + j \sin a$, karena itu persamaan 7 dapat ditulis :

$$x = e^{-(c/2m)t} (B_1 (\cos \omega_{nd}t + j \sin \omega_{nd}t) +$$

$$B_2 (\cos \omega_{nd}t - j \sin \omega_{nd}t))$$

$$x = e^{-(c/2m)t} ((B_1 + B_2) \cos \omega_{nd}t +$$

$$(jB_1 - jB_2) \sin \omega_{nd}t) \quad (8)$$

$$x = e^{-(c/2m)t} \left[x_0 \cos \omega_{nd}t + \frac{1}{\omega_{nd}} \left(v_0 + \frac{c}{2m} x_0 \right) \sin \omega_{nd}t \right] \quad (9)$$

Persamaan dalam tanda kurung bisa diwakili oleh 2 vektor yang berotasi dengan kecepatan putar yang sama ω_{nd} . Dua vektor itu saling tegak-lurus karena yang satu adalah fungsi cosinus sedang yang lainnya dalam fungsi sinus. Vektor-vektor tersebut ditunjukkan pada gambar 3, dengan vektor resultannya =

$$\sqrt{x_0^2 + \frac{[v_0 + (c/2m)x_0]^2}{\omega_{nd}^2}}$$

Persamaan 8 dapat disederhanakan dengan mempertimbangan kasus umum untuk getaran bebas yaitu $x = x_0$ dan $\dot{x} = v_0$ ketika $t = 0$. Dengan mensubstitusikan kondisi $x = x_0$ ketika $t = 0$ diperoleh $x_0 = B_1 + B_2$. Dengan mendefereensialkan persamaan 8 terhadap waktu :

$$\dot{x} = -\frac{c}{2m} e^{-(c/2m)t} (B_1 + B_2) \cos \omega_{nd}t$$

$$- e^{-(c/2m)t} (B_1 + B_2) \omega_{nd} \sin \omega_{nd}t$$

$$- \frac{c}{2m} e^{-(c/2m)t} (jB_1 - jB_2) \sin \omega_{nd}t$$

$$+ e^{-(c/2m)t} \omega_{nd} (jB_1 - jB_2) \cos \omega_{nd}t$$

dengan mensubstitusikan $\dot{x} = v_0$ ketika $t = 0$ kedalam persamaan ini diperoleh :

$$v_0 = -\left(\frac{c}{2m}\right)(B_1 + B_2) + \omega_{nd}(jB_1 - jB_2)$$

$$v_0 = -\left(\frac{c}{2m}\right)x_0 + \omega_{nd}(jB_1 - jB_2)$$

kemudian

$$(jB_1 - jB_2) = \frac{1}{\omega_{nd}} \left(v_0 + \frac{c}{2m} x_0 \right)$$

dengan mempertimbangkan hal ini pada persamaan 8 diperoleh :

Vektor itu tertinggal dari vektor cosinusnya dengan sudut fase yang konstan ϕ , dan mendahului vektor sinus dengan sudut fase ψ ; dimana ;

$$\tan \phi = \frac{v_0 + (c/2m)x_0}{\omega_{nd}x_0}$$

$$\text{dan } \tan \psi = \frac{1}{\tan \phi}$$

sehingga persamaan 9 bisa ditulis dalam bentuk :

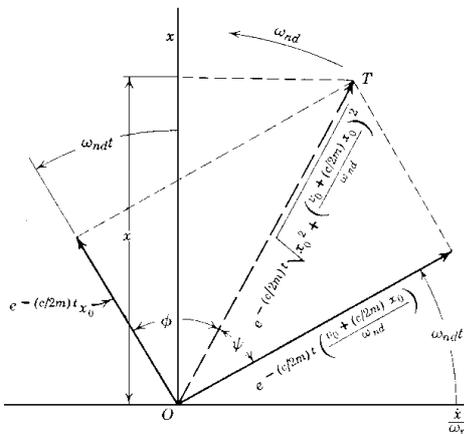
$$x = e^{-(c/2m)t} \sqrt{x_0^2 + \frac{[v_0 + (c/2m)x_0]^2}{\omega_{nd}^2}} \quad (10)$$

$$\cos(\omega_{nd}t - \phi)$$

atau

$$x = e^{-(c/2m)t} \sqrt{x_0^2 + \frac{[v_0 + (c/2m)x_0]^2}{\omega_{nd}^2}} \quad (11)$$

$$\sin(\omega_{nd}t + \psi)$$



gambar 3
Diagram Bidang Fasa Getaran Bebas Teredam

Gambar 2 menunjukkan kurva sinus dengan amplitudo yang menurun dengan kondisi awal $x = x_0$ dan $\dot{x} = v_0$ ketika $t = 0$. Modifikasi dari persamaan 10 untuk kasus khusus ini diberikan pada gambar tersebut. Dapat dimengerti bahwa suku $e^{-(c/2m)t}$ yang mengurangi amplitudo getaran dengan bertambahnya waktu. Walaupun perbandingan vektor-vektor yang berputar pada gambar 3 tidak berubah, tetapi secara kontinu menyusut bersesuaian dengan suku $e^{-(c/2m)t}$ tersebut, sehingga ujung dari vektor resultannya menggambarkan sebuah spiral eksponensial.

Persamaan 9 dan 10 terdiri dari 2 faktor perkalian; pertama adalah suku eksponensial; sedang yang kedua adalah gerak getar harmonis. Kurva gerak resultannya kemudian adalah kurva sinusoidal dengan amplitudo yang berkurang bersesuaian dengan suku $e^{-(c/2m)t}$; seperti ditunjukkan pada gambar 2. Garis gores menunjukkan selubung dari amplitudo dan selubung ini menjadi semakin datar dengan semakin kecil nilai redaman c .

Dapat disimak dari persamaan 9 dan 10 bahwa frekwensi dari getaran teredam itu adalah

$$\omega_{nd} = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2}$$

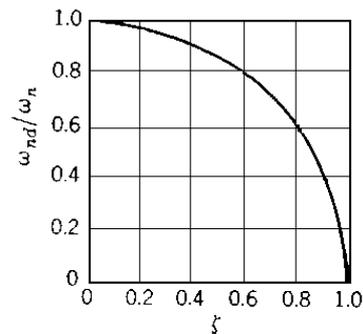
Frekwensi getaran tak teredam adalah

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

terlihat bahwa frekwensi getaran teredam lebih kecil daripada getaran tidak teredam. Perbandingan diantara keduanya dalam bentuk perbandingan redaman ζ bisa ditemukan dengan bantuan persamaan $c_c^2 = 4mk$;

$$\begin{aligned} \frac{\omega_{nd}}{\omega_n} &= \frac{\sqrt{k/m - (c/2m)^2}}{\sqrt{k/m}} \\ &= \sqrt{1 - \frac{c^2}{4m^2} \frac{m}{k}} = \sqrt{1 - \zeta^2} \end{aligned} \quad (12)$$

yang merupakan persamaan lingkaran; persamaan ini ditunjukkan pada gambar 4; dan bisa terlihat bahwa redaman memiliki pengaruh yang kecil sampai perbandingan ζ menjadi cukup besar (sekitar 0.2). Kenyataan ini merupakan alasan kenapa redaman bisa diabaikan saat mencari frekwensi narutral dari sistem dengan sejumlah kecil redaman.



gambar 4
pengaruh ζ thd frekwensi

Persamaan 10 bisa ditransformasikan dengan mudah kedalam bentuk tak berdimensi dengan menggunakan persamaan $2m = c_c/\omega_n$; dan persamaan 12.

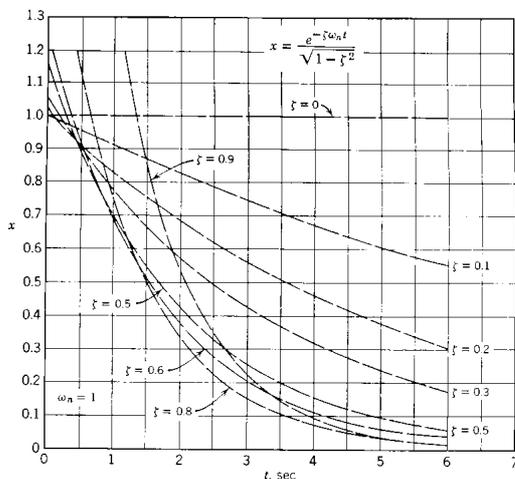
$$x = e^{-\zeta\omega_n t} \sqrt{x_0^2 + \frac{[v_0 + \zeta\omega_n x_0]^2}{\omega_n^2 (1 - \zeta^2)}} \quad (13)$$

$$\cos\left((\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2})t - \phi\right)$$

Untuk kasus massa bergetar dengan kondisi awal yang sudah dipindahkan $x_0=1$ dan dilepaskan tanpa kecepatan awal ($v_0 = 0$);

$$x = \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos\left((\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})t - \phi\right) \quad (14)$$

Selubung sisi atas dari kurva sinusoidal untuk kondisi khusus ini tergantung pada suku pertama persamaan 14 ; dan ditunjukkan pada gambar 5 untuk $\omega_n = 1$ dan untuk nilai ζ yang bervariasi. Jika tidak ada redaman, yaitu saat $\zeta = 0$; getaran yang terjadi tidak pernah berhenti, sehingga kurva selubungnya adalah garis lurus horizontal. Dengan perbandingan ζ mendekati 1 (atau dengan c mendekati peredaman kritis), getaran akan berhenti dengan semakin cepat.



gambar 5
Posisi Setiap Saat Untuk Nilai Damping Ratio Tertentu

Merupakan hal yang menarik untuk meneliti cara berkurangnya amplitudo dari getaran teredam dan mengadakan suatu ukuran untuk mengukur laju pengurangan tersebut. Hal ini merupakan fungsi dari selubung eksponensial persamaan 10.

Anggap t_n adalah waktu yang diperlukan mulai awal getaran bebas teredam tersebut hingga sembarang titik pada kurva selubung x_n ; dan t_{n+1} adalah waktu yang diperlukan mulai awal getaran bebas teredam tersebut hingga ke titik lain pada kurva selubung satu periode kemudian, x_{n+1} . Waktu yang diperlukan antara 2 titik ini sama dengan periodenya yaitu $2\pi/\omega_{nd}$;

$$t_{n+1} = t_n + \frac{2\pi}{\omega_{nd}}$$

dari suku eksponensial persamaan 10,

$$x_n = e^{-(c/2m)t_n}$$

$$x_{n+1} = e^{-(c/2m)t_{n+1}} = e^{-(c/2m)(t_n + 2\pi/\omega_{nd})}$$

dengan memperbandingkan x_{n+1}/x_n ;

$$\begin{aligned} \frac{x_{n+1}}{x_n} &= \frac{e^{-(c/2m)t_n - (c/2m)(2\pi/\omega_{nd})}}{e^{-(c/2m)t_n}} \\ &= e^{-(\pi c/m\omega_{nd})} \end{aligned} \quad (15)$$

Jelaslah dari persamaan ini bahwasanya amplitudo berkurang dalam perbandingan geometri yang konstan; yang merupakan fungsi c, m dan ω_{nd} . Suku $\pi c/m\omega_{nd}$ dinamakan pengurang logaritmik (*logarithmic decrement*) dan disimbulkan dengan δ . Jadi $x_{n+1}/x_n = e^{-\delta}$ dan $\delta = -\log(x_{n+1}/x_n) = -\log(x_n/x_{n+1})$.

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Dalam pemberian matakuliah getaran di Jurusan Teknik-Mesin Unibraw kurang banyak diikuti dengan praktikum yang menunjang pengertian yang baik bagi mahasiswa. Ada praktikum tentang getaran tetapi hanya menyangkut getaran bebas 1 dof tak teredam, dan getaran bebas 1 dof teredam. Bagaimana pengaruh zalir dan bukaan katup dalam aksi peredaman, khususnya peredaman viskous, belum mendapatkan perhatian. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekurangan tersebut.

Penelitian ini hanyalah merupakan awal ,bagi peneliti sendiri khususnya, untuk mengerti fenomena getaran secara lebih luas lagi. Dengan memanfaatkan hasil penelitian ini, Penelitian lanjutan, misalkan tentang getaran paksa, getaran dengan derajat kebebasan lebih dari satu dan lain-lain, dapat dilaksanakan secara bertahap.

METODE PENELITIAN

Data diperoleh secara langsung dari grafik getaran yang diplot pada kertas pelacak pada alat uji getaran mekanik (*Sanderson Simple Vibration Apparatus*). Konstanta pegas bukan merupakan variabel bebas, dipilih konstanta pegas tertentu, dalam penelitian kali ini dipilih $K = 1,22$ kN/m. Getaran diberikan dengan memberikan eksitasi awal pada massa yang bergetar.

Variabel bebasnya adalah jenis fluida peredam dan putaran katup. Dengan mengganti-ganti jenis fluida peredamnya, dan merubah-ubah putaran katup dapat diteliti pengaruh jenis fluida dan putaran katup terhadap efek peredaman.

Efek peredaman diukur dengan tiga variabel, yaitu pengurangan logaritmik δ , *damping ratio* (perbandingan peredaman) ζ , dan konstanta peredaman c .

Data yang diperoleh kemudian ditampilkan dalam grafik-grafik untuk memperjelas penyajian.

HASIL PENELITIAN dan PEMBAHASAN

Data-data yang diperoleh dari penelitian berupa grafik getaran teredam seperti dicontohkan pada gambar 2. Dengan mengukur amplitudo getaran ke-n dan ke-n+1 diperoleh data untuk X_1 dan X_2 . Nilai kolom yang lain dapat diisi berdasarkan rumus pada studi pustaka.

Nilai-nilai pada tabel tersebut setelah dilengkapi disajikan dalam diagram garis seperti terlihat.

SAE-20

KATUP	X_1	X_2	δ	ζ	c
6	17.61	7.88	0.80414	0.04008	0.04890
11	20.81	9.74	0.75919	0.03791	0.04625
16	23.94	11.30	0.75075	0.03750	0.04575
21	24.62	12.14	0.70705	0.03537	0.04315
26	25.66	13.54	0.63929	0.03205	0.03911
29	28.77	15.89	0.59364	0.02981	0.03637

SAE-40

KATUP	X_1	X_2	δ	ζ	c
6	11.93	2.11	1.73237	0.08156	0.09951
11	16.09	3.92	1.41211	0.06810	0.08308
16	17.04	4.50	1.33149	0.06455	0.07876
21	16.79	5.07	1.19744	0.05854	0.07142
26	16.52	4.59	1.20518	0.05889	0.07184
29	17.13	5.38	1.15814	0.05674	0.06923

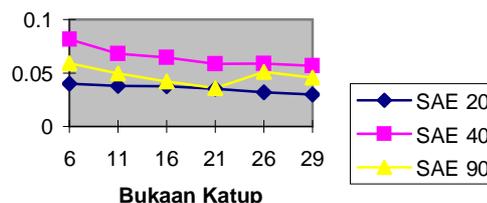
SAE-90

KATUP	X_1	X_2	δ	ζ	c
6	10.70	1.65	1.20925	0.05907	0.07207
11	17.08	4.17	1.00044	0.04943	0.06030
16	19.85	5.78	0.84854	0.04222	0.05151
21	14.11	3.53	0.71634	0.03582	0.04371
26	14.21	3.87	1.03229	0.05092	0.06212
29	15.29	3.86	0.91855	0.04556	0.05558

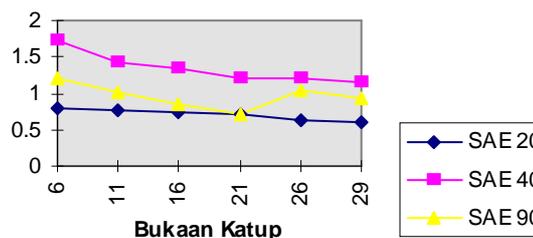
Dari diagram dapat dilihat, secara umum dengan semakin banyak putaran katup memiliki nilai peredaman semakin menurun. Jika dilihat dari jenis fluida yang beraksi sebagai peredam viskous, secara berturut turut SAE40, SAE90 dan SAE20 memberikan efek peredaman yang lebih baik.

Kalau dilihat diagram-diagram tersebut secara kualitatif menunjukkan nilai yang sama, atau dengan kata lain satu nilai peredaman dapat mewakili nilai peredaman lainnya.

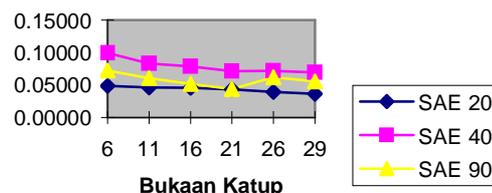
Damping Ratio



Nilai Perbandingan Logaritmik



Konstanta Peredaman



Jadi untuk mengetahui besarnya efek peredaman suatu sistem hanya diperlukan satu nilai saja dari variabel peredaman yaitu δ (perbandingan logaritmik) atau ζ (damping ratio) atau c (konstanta peredaman).

Hubungan ini bisa dianalisa secara matematis. Jika nilai c dan δ dinyatakan dalam nilai perbandingan redaman ζ , maka :

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{(c/2m)^2}{k/m} = \frac{c^2}{4km} \Rightarrow c = 2\sqrt{km\zeta}$$

dan untuk δ dengan bantuan persamaan ; $c_c^2 = 4mk$ atau $mk = c_c^2/4$.

$$\delta = \frac{\pi c}{m\omega_{nd}} = \frac{\pi c}{m\sqrt{(k/m) - (c^2/4m^2)}}$$

$$= \frac{\pi c}{\sqrt{(m^2k/m) - (c^2m^2/4m^2)}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$

KESIMPULAN dan SARAN

A. Kesimpulan

Dari bagian pembahasan dapat diambil kesimpulan:

1. Semakin banyak putaran katup semakin rendah efek peredamannya.
2. Jika diurutkan dari yang memberikan efek peredaman yang tertinggi dari fluida viskous adalah SAE40, SAE90 dan SAE20.
3. Untuk mengetahui efek peredaman suatu sistim hanya diperlukan satu variabel peredam yaitu δ , ζ atau c .

B. Saran

Jenis fluida sebenarnya dapat diwakili oleh nilai viskositasnya, karena itu agar didapat hasil yang komprehensif perlu diadakan penelitian hubungan viskositas dengan peredaman secara detail.

Putaran katup sebenarnya dapat diwakili oleh luasnya celah peredam, karenanya perlu diadakan penelitian berikutnya yang komprehensif yang membahas luas celah dengan peredaman secara detail.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis, mengucapkan terimakasih kepada segala pihak atas kesempatan dan biaya yang diberikan

dalam melakukan penelitian sehingga dihasilkannya tulisan ini. Penelitian ini dibiayai dari Dana Pembinaan Pembinaan Pendidikan Unibraw dengan kontrak nomor : 79/PT13.H4.FT./N4/96.

DAFTAR PUSTAKA

1. Austin H. Church, 1963, *Mechanical Vibration*, John Wiley and Sons, Inc. New York.
2. Black Paul H, Adam O. Eugene, Jr, 1988, *Machine Design*, Mc. Graw-Hill Book Company, Singapore.
3. Khurmi R.S., Gupta J.K., 1982, *A Text Book of Machine Design*, Eurasia Publishing House (Pvt) LTD, New Delhi.
4. Sears, Francis W., Zemansky, Mark W., 1962, *University Physics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts.
5. Thomson Wiliam T, Prasetyo Lea Drs, M.Sc., 1986, *Teori Getaran dengan Penerapannya*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
6. Timoshenko S., Young D.H., Prapto Cendy Ir., 1992, *Mekanika Teknik*, Penerbit Erlangga, Jakarta.