

# Sistem Kendali Aktif Menggunakan Sensor – Aktuator PZT untuk Meredam Getaran Struktur Kapal

Wibowo H Nugroho<sup>1</sup>

## Abstrak

Penulisan ini bertujuan untuk memperlihatkan kemungkinan penggunaan dari suatu desain alat peredam getaran yang dikendalikan secara aktif untuk mengurangi atau bahkan secara ideal menghilangkan getaran struktur kapal. Hal yang penting dari sistem kendali ini adalah kemampuan untuk merasakan respon dan bereaksi terhadap respon tersebut sesuai dengan yang diinginkan. Dalam penulisan ini secara numerik kemampuan tersebut akan ditampilkan dengan penggunaan sensor dan aktuator yang berasal dari satu jenis material cerdas ( smart material) yaitu Lead Zirconate Titanate (PZT). Material ini dikatakan cerdas karena PZT ini akan menghasilkan beda potensial jika diberi gaya mekanik dan juga sebaliknya jika diberi beda potensial akan menghasilkan gaya mekanik berupa regangan atau “strain”. Pada kasus getaran struktur kapal ini hipotesa yang akan diuji adalah kesanggupan sistem kendali dengan penggunaan pasangan sensor – aktuator PZT untuk meredam getaran struktur yang terjadi.

**Kata kunci :** getaran kapal, sensor – aktuator PZT, peredam aktif getaran

## Abstract

*This paper reports the numerical investigation of an active vibration suppression of the ship structure. In this research the ability of the suppression is represented on the use of the pairs of sensor – actuators Lead Zirconate Titanate (PZT). This active vibration suppression works by reading the vibration response of the structure using a sensor, then the signal from a PZT sensor is inputted to the control box. This control box can be a simple op – amp or computer to digitally process the signal where in this investigation the signal is processed by positive position feedback (ppf) algorithm to control a power – amplifier to actuate a PZT actuator. FEM analysis is used prior to the placement of the pairs of sensor – actuator on the critical area of the ship structure. This area is usually selected that have the largest deflection due to the vibration excitation. By adjusting the gain of the control system the results show that on the resonant condition this active vibration works effectively.*

**Keywords:** ship vibration, PZT, Active Vibration Suppression

---

## PENDAHULUAN

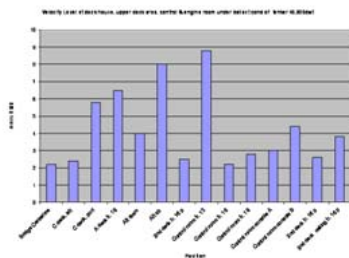
Getaran yang berlebih atau yang tidak diinginkan pada struktur badan kapal merupakan suatu permasalahan yang sering ditemui oleh para operator kapal dimana hal ini sangat mempengaruhi kehandalan konstruksi kapal. Selain mempercepat kelelahan struktur kapal, getaran kapal dapat juga menyebabkan berkurangnya kenyamanan penumpang dan awak kapal serta rusak atau tak berfungsi dengan baik peralatan mekanik dan listrik yang terdapat di atas kapal. Problem getaran kapal saat ini semakin

kompleks dan sering terjadi. Terutama pada kapal – kapal muat ( cargo atau tanker ) antar samudra dimana bangunan atas tempat akomodasi dan ruang mesin semakin mendekati pada daerah baling – baling kapal. Hal ini diperlihatkan pada Gambar 1. Disamping itu dengan semakin ketatnya persyaratan dari biro klasifikasi kapal untuk tingkat getaran yang diijinkan agar penumpang dan awak kapal semakin nyaman dan aman. Tingkat getaran dibagi dalam tiga daerah (Zone), daerah I dimana tingkat getaran cukup rendah dan tidak ada keluhan dari orang yang berada di atas

---

1. UPT BPPH-BPPT, Surabaya

kapal, kemudian daerah II dimana tingkat getaran sedikit terasa dan mulai ada keluhan dari beberapa orang sedangkan untuk daerah III dimana tingkat getaran dan reaksi dari penumpang dan awak sangat cepat dan terdapat keluhan secara umum. Hal ini membuat para peneliti melakukan riset yang intensif untuk menghindari tingkat getaran yang tak diinginkan terutama untuk menghindari kondisi resonansi karena kapal seperti juga layaknya struktur hasil rekayasa mempunyai redaman yang kecil. Sayangnya kondisi resonansi ini tak dapat dihindari karena selain getaran global seperti moda lateral bending, torsional dan aksial pada badan kapal (hull girder) juga terjadi pada daerah local seperti system perpipaan, system plat penegar atau tangga dan lain sebagainya.



Gbr. 1. Contoh tingkat getaran pada bangunan atas dan ruang mesin

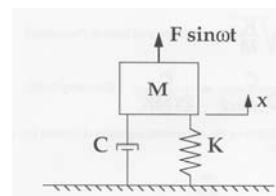
Selain itu juga kondisi muatan kapal juga dapat mempengaruhi kejadian resonansi, getaran dapat terjadi saat tanpa muatan (ballast condition) tetapi tidak terjadi saat sarat penuh. Penulisan ini bertujuan untuk menggambarkan dasar – dasar perencanaan/pembuatan suatu prototype sistem kontrol aktif terhadap parameter yang menyebabkan getaran pada struktur kapal sehingga tingkat getaran dapat dikendalikan ke daerah I atau bahkan lebih rendah dari daerah tersebut. Dalam penulisan ini getaran yang dianalisa diasumsikan dalam kondisi linear dan badan kapal merupakan mengikuti kaidah balok euler – bernoulli serta respon yang dikendalikan/ dianalisa berupa respon lateral badan kapal. Pengendalian getaran kapal ini dilakukan dengan menggunakan pasangan sensor – aktuator Piezoceramics (PZT) pada sistem struktur kapal sehingga akan terdapat gaya tambahan yang kan melawan respon getaran dari struktur. Material Lead Zirconate Titanate ( PZT ) adalah termasuk dari golongan material cerdas (smart material), dimana

material ini akan menghasilkan beda potensial jika dikenakan padanya beban mekanik, dan sebaliknya akan memberikan gaya/regangan mekanik jika padanya diberikan beda potensial. Aplikasi dari material PZT pada struktur cerdas untuk meredam getaran sangat potensial terutama pada bidang peredam getaran, kebisingan dan pengaturan bentuk. Teori linear berlaku pula untuk sensor – aktuator PZT dan sistem kendali elektronika. Sudah banyak tingkat kemajuan dalam dunia analisa getaran begitu juga sistem kendali namun kombinasi dari struktur – sensor – aktuator PZT – sistem kendali baru dimulai sejak 10 tahun lalu, dimana bidang ini biasa disebut dengan struktur cerdas (smart structure) dan setahu penulis untuk riset hal ini di dunia maritim belum begitu terdengar. Tujuan dari penggunaan sistem kendali aktif untuk meredam getaran struktur kapal adalah;(1) Mengendalikan tingkat getaran yang berlebih atau tidak diinginkan ke tingkat yang aman bagi struktur kapal dan nyaman bagi penumpang ataupun awak kapal (2) Memperpanjang umur pakai ekonomis kapal karena kelelahan material yang cepat akibat beban getaran dapat teratasi. Dengan demikian penulisan buku ini dapat berupa kontribusi penulis untuk menunjang kemandirian dan kemajuan dunia industri maritim di Indonesia.

## DASAR TEORI

### A. Persamaan Getaran Umum

Untuk mengerti fenomena getaran kapal, hal ini dapat dimodelkan dengan sistem getaran 1 derajat kebebasan yang berperedam dengan eksitasi harmonis, walaupun kenyataannya pada kapal eksitasi gaya berupa periodis tapi tak harmonis sederhana ( gelombang sinusoidal). Model getaran ini diperlihatkan pada Gambar 2 dibawah ini.



Gbr. 2. Model Getaran dengan satu derajat kebebasan

Dimana persamaan getarannya adalah

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \sin \omega t \quad (1)$$

Dimana  $M$  adalah massa struktur/benda,  $C$  adalah koefisien peredam, dan  $K$  adalah kekakuan sistem. Penyelesaian persamaan differensial di atas adalah  $X = X_c + X_p$ , dimana  $X_c$  merupakan penyelesaian kondisi transient, yang berlangsung sesaat, kondisi steady state lah yang diperlukan karena akan berlangsung terus, sehingga hal ini dapat ditulis :

$$X_p = X \sin(\omega t - \Phi) \quad (2)$$

Jika dimasukkan ke dalam persamaan (1) maka dihasilkan:

$$X = \frac{F_0/k}{\left\{ \left[ 1 - (\omega/\omega_n)^2 \right]^2 + \left[ 2\zeta\omega/\omega_n \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (3)$$

Dan

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{2\zeta\omega/\omega_n}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right] \quad (4)$$

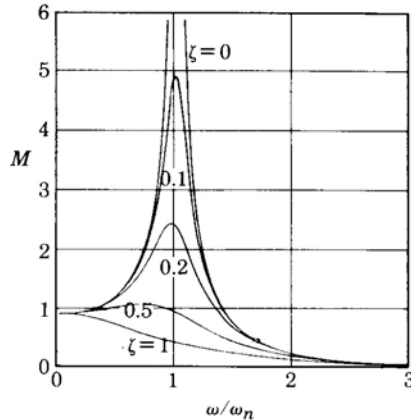
Jika  $M$  adalah rasio amplitudo atau faktor penguat (Magnification factor)  $M = X/(F_0/k)$  maka dapat

dihasilkan rasio :

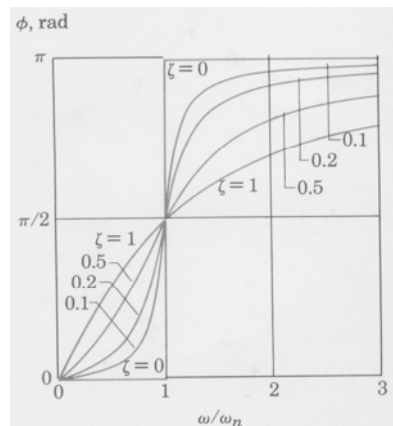
$$M = \frac{1}{\left\{ \left[ 1 - (\omega/\omega_n)^2 \right]^2 + \left[ 2\zeta\omega/\omega_n \right]^2 \right\}^{1/2}} \quad (5)$$

Angka  $M$  ini diperlihatkan pada Gbr. 3. Pada gambar ini ditunjukkan bahwa ;

- (1) Untuk getaran dengan 1(satu) derajat kebebasan yang mengalami suatu eksitasi harmonik, jika terjadi amplitudo yang berlebih maka untuk meredakannya diperlukan dengan memperbesar redaman atau mengatur frekuensi eksitasi jauh di luar frekuensi pribadi sistem. Selain itu penambahan redaman(damping) akan lebih efektif pada daerah sekitar frekuensi resonansi.
- (2) Gambar.3 juga menunjukkan, kecuali pada  $\zeta = 0$ , faktor magnifikasi sebenarnya tidak berpuncak (peak) pada perbandingan frekuensi ( $\omega/\omega_n = 1$ ). Puncak tersebut dapat dihitung untuk setiap nilai  $\zeta$  dengan menentukan nilai maksimum dari  $M$  pada persamaan (5).



Gbr. 3. Faktor pengali - fungsi dari rasio frekuensi eksitasi terhadap pribadi



Gbr. 4. Sudut fasa terhadap rasio frekuensi eksitasi terhadap pribadi

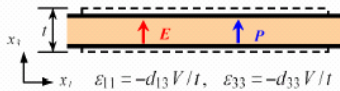
Gambar 4 di atas menunjukkan sudut fasa yang berubah terhadap perbandingan frekuensi ( $\omega/\omega_n = 1$ )

untuk berbagai nilai rasio redaman  $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$ . Dapat diperhatikan bahwa nilai sudut fasa  $\Phi$  pada resonansi adalah  $\pi/2$  untuk setiap nilai rasio redaman  $\zeta$ .

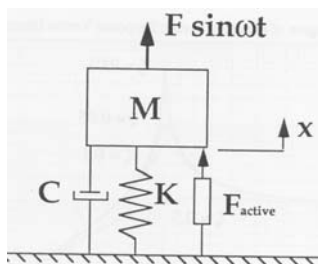
### B. Persamaan Getaran dengan Redaman Aktif

Salah satu cara untuk melakukan peredaman getaran dilakukan dengan menggunakan material piezoceramics dimana sistem pada Gambar 1 di atas akan mendapat gaya tambahan yang nantinya akan melawan respon dari struktur. Material Lead Zirconate Titanate ( PZT ) adalah termasuk dari golongan material cerdas (smart material), dimana material ini akan menghasilkan beda potensial jika dikenakan

padanya beban mekanik, dan sebaliknya akan memberikan gaya/regangan mekanik jika padanya diberikan beda potensial. PZT ini dapat berupa lempengan dimana pemberian tegangan listrik pada arah ketebalannya dapat menyebabkan terjadinya perubahan dimensi dalam arah lateral bertambah atau berkurang. Medan listrik  $E_3$  jika diaplikasikan dalam arah ketebalan menyebabkan regangan memanjang sebesar  $\epsilon_1 = d_{13} E_3$ , dimana  $d_{13}$  adalah konstanta regangan piezoelectric dan berhubungan dengan regangan axial terhadap aliran listrik transversal. Sebagai tambahan medan listrik akan menginduksi regangan normal transversal  $\epsilon_3 = d_{33} E_3$ , dimana  $d_{33}$  konstanta regangan piezoelectric dan berhubungan dengan regangan transversal normal terhadap aliran listrik transversal. Sebagai contoh nilai untuk koefisien PZT-5A,  $d_{35}$ ,  $d_{13}$  adalah  $584 \times 10^{-12}$  m/V,  $-171 \times 10^{-12}$  m/V. Biasanya aktuator PZT untuk aktuator perpanjangan (extension actuator) yang diperlihatkan pada Gambar 5 ditempelkan pada permukaan dari sebuah struktur yang akan diaktifkan. Diagram benda bebas dari kondisi aktif struktur saat aktuator bekerja diperlihatkan pada Gambar 6.



Gbr. 5. PZT untuk aktuator regangan



Gbr. 6.. Diagram 1 derajat kebebasan dengan pemasangan aktuator

Maka persamaan diagram benda bebasnya menjadi :

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \sin \omega t + F_{aktif} \quad (6)$$

Sehingga untuk mengatur redaman diperlukan gaya umpan balik sebesar :

$$F_{aktif} = C_{aktif} \dot{x} \quad (7)$$

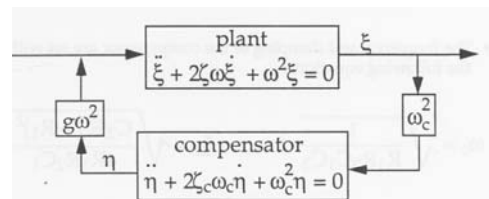
dan untuk mengatur kekakuan diperlukan gaya umpan balik sebesar :

$$F_{aktif} = K_{aktif} x \quad (8)$$

Ada tiga hal yang perlu diperhatikan dalam penulisan ini pertama adalah analisa getaran dari struktur kapal, kemudian kemampuan dan penempatan pasangan sensor – aktuator PZT dan yang terakhir adalah sistem kendali aktifnya.

### C. Persamaan Sistem Kendali Aktif Peredam Getaran

Penempatan PZT dilakukan pada daerah energi regangan terbesar untuk mode shape yang dipilih dari hasil analisa persamaan getaran di atas. Sepasang lembar piezo ceramics (PZT) dapat ditempelkan saling berdekatan pada permukaan struktur ( seperti strut atau balok) di daerah yang mana getaran tidak diinginkan. Dalam hal ini satu PZT berlaku sebagai sensor yang merasakan perubahan regangan permukaan struktur. Keluaran dari sensor ini diumpankan pada kotak kendali ( smart box) yang mana bisa terdiri dari op-amp sederhana hingga komputer untuk melakukan signal processing secara digital untuk mengendalikan power – amplifier menggerakkan PZT pasangannya sebagai aktuator. Secara ideal aktuator ini dapat menghasilkan getaran ke struktur dengan besaran yang sama dan berlawanan arah dengan yang dialami oleh sensor sehingga getaran dapat dihilangkan. Selanjutnya akan dipakai sistem kendali yang memakai algoritma Positive Position Feedback (PPF). Pengendali ini mempunyai keuntungan tidak terpengaruh oleh kelebihan sedikit tegangan (spillover) dan tetap stabil walaupun terjadi dinamika aktuator. PPF ini merupakan sistem ordo 2 yang diberi input oleh koordinat struktur kemudian response dari kompensator diperbesar oleh gain kemudian diumpankan kembali ke struktur yang secara blok diagram diperlihatkan Gbr. 7 di bawah ini:



Gbr. 7. Diagram blok PPF

Seperti diperlihatkan pada diagram blok di atas  $\xi$  adalah koordinat modal dan menggambarkan deformasi dari struktur, sedangkan  $\omega$  frekuensi pribadi struktur dan  $\zeta$  adalah rasio redaman, kemudian  $\eta$  adalah koordinat kompensator dan  $\omega_c$  adalah frekuensi resonansi kompensator dan  $\zeta$  merupakan parameter redaman dari kompensator dan  $g$  merupakan penguatan (gain) umpan balik. Gambar blok diagram di atas mempunyai persamaan getaran yang menggambarkan sistem kendali aktif ini sebagai berikut :

Persamaan getaran untuk struktur:

$$\ddot{\xi} + 2\zeta\omega\dot{\xi} + \omega^2\xi = g\omega^2\eta \quad (9)$$

Persamaan getaran untuk kompensator:

$$\ddot{\eta} + 2\zeta_c\omega_c\dot{\eta} + \omega_c^2\eta = \omega_c^2\xi \quad (10)$$

Kedua persamaan (9) dan (10) ini akan diselesaikan dengan menggunakan simulasi komputer menggunakan MATLAB.

## HASIL SIMULASI NUMERIK

Perhitungan getaran kapal dilakukan pada model struktur kapal cepat dengan panjang 1,7m lebar 0,32 m dan tinggi 0,20m. Dasar pemilihan lebih didasarkan pada konstruksi lambung yang sederhana dan karena pada prateknya untuk kapal cepat terdapat pemakaian putaran baling – baling kecepatan tinggi sehingga getaran struktur badan kapal besar kemungkinan terjadi.

### A. Pemodelan Getaran Model Struktur Kapal dengan Metoda Elemen Hingga

Pemodelan awal dari model struktur kapal dengan metoda elemen hingga (MEH) untuk menentukan letak/posisi dari sensor – aktuator PZT yang akan dipasang. Analisa getaran kapal akan dilakukan untuk getaran struktur kapal yang dimodelkan sebagai sebuah balok sehingga persamaan dari hal ini adalah

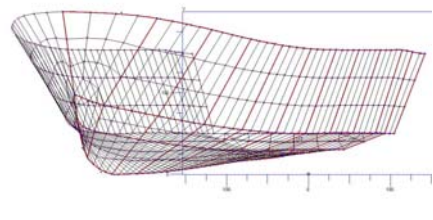
$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = \{P(t)\} \quad (11)$$

Dimana  $[K]$  dan  $[M]$  adalah matriks massa global dan kekakuan dari struktur sistem serta  $[C]$  matriks

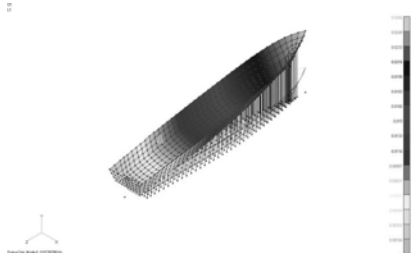
redaman dan  $P(t)$  vektor beban. Persamaan di atas dapat di selesaikan dengan metoda iterasi. Analisa getaran kapal dilakukan untuk getaran bebas tak teredam dimana hubungannya dengan mode shape struktur kapal yang dimodelkan sebagai sebuah balok sehingga persamaan dari hal ini adalah :

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \quad (12)$$

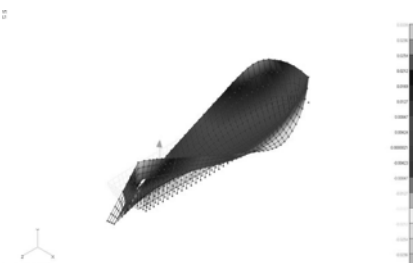
Dimana  $\omega^2$  adalah nilai eigen sedangkan  $[K]$  dan  $[M]$  adalah matriks massa global dan kekakuan dari struktur sistem serta  $\{\phi\}$  adalah vektor eigen. Ada banyak algoritma yang tersedia untuk memecahkan masalah nilai eigen dari house holder , subspace iteration dan metoda lacons. Kemudian pemecahan getaran tereksitasi yang pada struktur kapal berbagai tingkat getaran dapat dihasilkan oleh mesin utama atau bantu kapal, atau tekanan berfluktuasi badan kapal karena baling – baling atau yang lainnya. Peletakan sensor – aktuator ini akan diletakkan pada bagian struktur yang mengalami lendutan terbesar sehingga dapat dirasakan oleh sensor dan nantinya akan dilawan juga oleh aktuator pasangannya. Ada 30 moda getaran yang dihitung pada penelitian ini, tetapi hanya 5 moda awal realistis getaran yang ditampilkan. Gambar 8 menunjukkan model struktur kapal yang didiskritkan oleh metoda elemen hingga. Kemudian Gambar 8, 9, 10, 11 dan 12 menunjukkan respon getaran pada mode 6, 7, 8, 9 dan 10 dengan frekuensi eksitasi resonansi sebesar 0,0239 Hz, 0,149 Hz, 0,3215 Hz, 0,3373 Hz, 0,4228 Hz. Informasi tentang mode shape ini sangat penting dalam artian untuk menghasilkan sistem kendali aktif yang efektif, karena menentukan letak aktuator PZT untuk meredam getaran struktur kapal secara tepat. Simulasi komputer dari sistem kendali aktif ini diperlihatkan pada berikut.



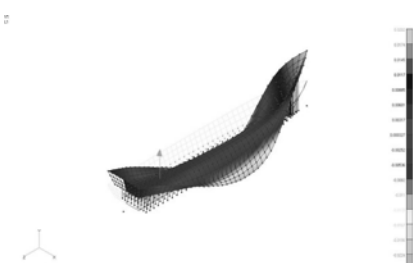
Gbr. 8. Meshing Struktur Model Kapal pandangan samping



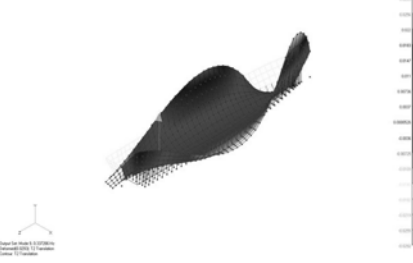
Gbr. 9. Moda 6 dari getaran model struktur kapal



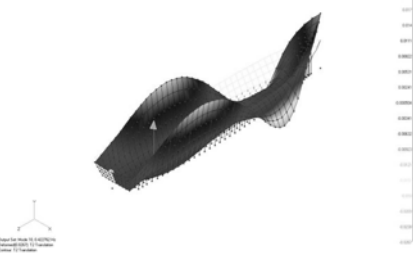
Gbr. 10. Moda 7 dari getaran model struktur kapal



Gbr. 11. Moda 8 dari getaran model struktur kapal



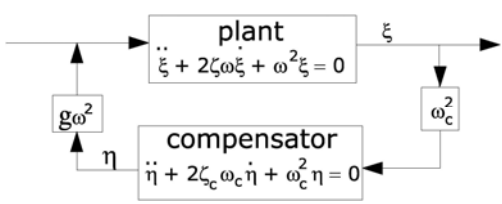
Gbr. 12. Moda 9 dari getaran model struktur kapal



Gbr. 13. Moda 10 dari getaran model struktur kapal

### B. Sistem Kendali Aktif Redaman Getaran Struktur Kapal

Hasil analisa getaran kapal dengan menggunakan metode elemen hingga pada bagian sebelumnya, telah menghasilkan lokasi dari pasangan aktuator sensor PZT akan ditempatkan. Simulasi di bawah ini menggambarkan respon dari sistem jika lokasi tersebut mengalami getaran yang mendekati fekuensi resonansinya (modenya). Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan bahwa blok diagram yang dipakai untuk menggambarkan sistem kendali ini menggunakan algoritma Positive Position Feedback (PPF). Pengendali ini mempunyai keuntungan tidak terpengaruh oleh kelebihan sedikit tegangan (spillover) dan tetap stabil walaupun terjadi dinamika aktuator. PPF ini merupakan sistem ordo 2 yang diberi input oleh koordinat struktur kemudian response dari kompensator diperbesar oleh gain kemudian diumpankan kembali ke struktur yang secara blok diagram diperlihatkan Gambar 14 di bawah ini:



Gbr. 14. Diagram blok PPF

Seperti diperlihatkan gambar blok diagram di atas maka persamaan getaran yang akan menggambarkan getaran untuk struktur:

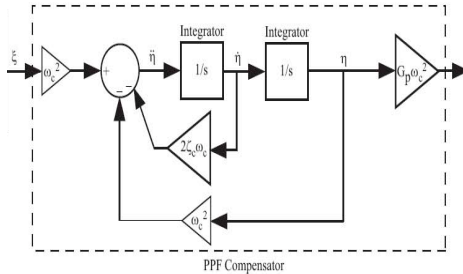
$$\ddot{\xi} + 2\zeta\omega\xi + \omega^2\xi = g\omega^2\eta \quad (13)$$

Persamaan getaran untuk kompensator:

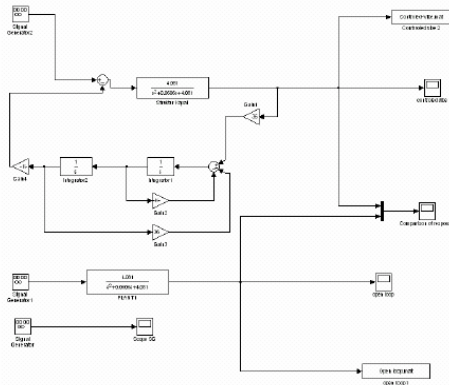
$$\ddot{\eta} + 2\zeta_c\omega_c\dot{\eta} + \omega_c^2\eta = \omega_c^2\xi \quad (14)$$

Dimana  $\xi$  adalah koordinat modal dan menggambarkan deformasi dari struktur, sedangkan  $\omega$  frekuensi pribadi struktur dan  $\zeta$  adalah rasio redaman, kemudian  $\eta$  adalah koordinat kompensator dan  $\omega_c$  adalah frekuensi resonansi kompensator dan  $\zeta_c$  merupakan parameter redaman dari kompensator dan  $g$  merupakan penguatan (gain) umpan balik. Diagram blok PPF ini secara detail diperlihatkan

pada Gambar 14. Kedua persamaan (13) dan (14) ini akan diselesaikan dengan menggunakan simulasi komputer menggunakan MATLAB. Hasil – hasil simulasi dilakukan dengan diagram yang ditunjukkan pada Gambar 15.



Gbr. 15. Detail Diagram Blok Kompensator PPF



Gbr. 16. Diagram Simulasi sistem kendali peredam getaran

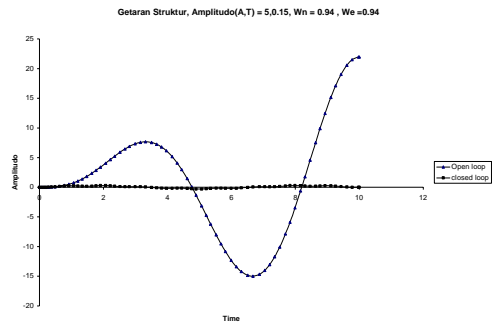
Dengan melakukan berbagai perubahan parameter getaran melalui pengaturan  $\omega$ -kompensator (rad/dt), nilai redaman  $\zeta$  kompensator dan gain pada simulasi sistem kendali maka hasil terbaik dari redaman getaran sinusoidal dengan kondisi yang diperlihatkan pada Tabel 1.

Hasil simulasi dari ke enam belas mode getaran di atas, yang ditampilkan pada penulisan ini hanya frekuensi eksitasi yang mendekati resonansi struktur, yaitu 0,942, 2,01, 2,117 dan 2,656 (rad/det). Hasil – hasil yang diperlihatkan pada Gambar 17 hingga 20 memperlihatkan bahwa secara numerik sistem kendali aktif untuk meredam getaran struktur model kapal ini dapat bekerja dengan baik. Gambar – gambar tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi resonansi getaran struktur model kapal akan semakin membesar(open-loop) walaupun amplitudo eksitasi adalah tetap ( dalam hal ini sinusoidal), kemudian saat kendali aktif ini difungsikan( closed-loop), getaran tersebut dapat

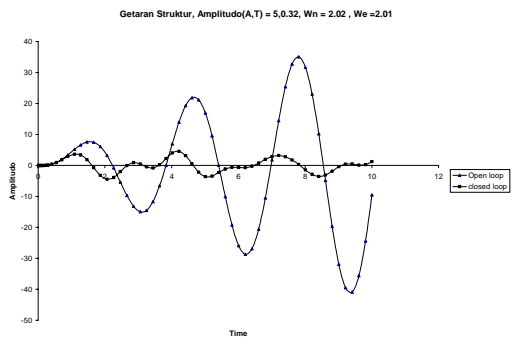
diredam dengan efektif. Walaupun demikian kondisi resonansi seharusnya dihindari oleh struktur kapal.

Tabel 1. Parameter getaran hasil dari simulasi sistem kendali

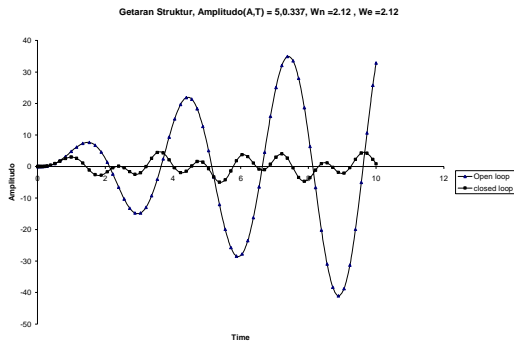
No	$\omega$ -ntrl (rad/s)	$\zeta$ struct	freq Eks (Hz)	$\omega$ Eks (rad/s)	$\omega$ compstr (rad/s)	$\zeta$ compstr	Gain
101	0.9415	0.015	0.15	0.9425	9	0.003	0.25
102	idem	idem	0.32	2.0106	idem	idem	Idem
103	idem	idem	0.337	2.1174	idem	idem	Idem
104	idem	idem	0.4228	2.6565	idem	idem	Idem
201	2.0201	0.015	0.15	0.9425	6	0.003	0.05
202	idem	idem	0.32	2.0106	idem	idem	Idem
203	idem	idem	0.337	2.1174	idem	idem	Idem
204	idem	idem	0.4228	2.6565	idem	idem	Idem
301	2.1191	0.015	0.15	0.9425	7	0.003	0.05
302	idem	idem	0.32	2.0106	idem	idem	Idem
303	idem	idem	0.337	2.1174	idem	idem	Idem
304	idem	idem	0.4228	2.6565	idem	idem	Idem
401	2.6563	0.015	0.15	0.9425	8	0.003	0.05
402	idem	idem	0.32	2.0106	idem	idem	Idem
403	idem	idem	0.337	2.1174	idem	idem	Idem
404	idem	idem	0.4228	2.6565	idem	idem	Idem



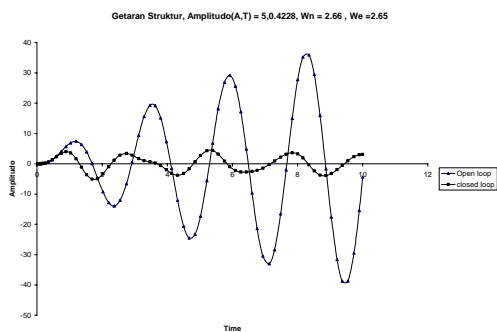
Gbr. 17. Respon sistem aktif untuk meredam getaran model struktur( $\omega_n = 0.9415$  rad/dt) amplitudo 5KN dengan frekuensi 0,15 Hz( $\omega_c = 0.9425$  rad/det)



Gbr. 18. Respon sistem aktif untuk meredam getaran model struktur ( $\omega_n = 2.0201$  rad/dt) amplitudo 5KN dengan frekuensi 0.32 Hz( $\omega_c = 2.0106$  rad/det)



Gbr. 19. Respon sistem aktif untuk meredam getaran model struktur ( $\omega_n = 2.0201$  rad/dt) amplitudo 5KN dengan frekuensi 0.337 Hz ( $\omega_c = 2.1174$  rad/det)



Gbr. 20. Respon sistem aktif untuk meredam getaran model struktur ( $\omega_n = 2.6563$  rad/dt), amplitudo 5KN dengan frekuensi 0.4228 Hz ( $\omega_c = 2.6565$  rad/det)

## KESIMPULAN

Hasil simulasi kendali aktif untuk getaran struktur model kapal secara numerik yang telah menunjukkan tingkat keefektifan yang sangat baik, walaupun tetap disimpulkan bahwa sistem kendali aktif ini bekerja kurang efektif pada daerah mendekati frekuensi natural struktur model kapal yang ditunjukkan dengan penurunan amplitudo respon hanya 50%, sehingga sebaiknya sumber eksitasi yang mendekati mode – mode frekuensi natural struktur dihindari akan tetapi seyogyanya hasil – hasil dari simulasi numerik ini dikonfirmasi secara eksperimen untuk mengetahui seberapa besar beda kesalahan (error) yang terjadi pada model struktur sebenarnya.

Secara garis besar apabila peralatan sistem kendali ini berhasil maka keluhan akan getaran pada struktur kapal pada daerah bangunan atas kapal dan atau ruang mesin serta pondasi dapat diatasi tanpa harus merubah

atau menambah desain struktur kapal yang mungkin dapat mengurangi volume muat kapal. Dengan berkembangnya sistem elektronika yang sangat cepat sehingga kemampuan mengolah data dapat dengan cepat dengan ukuran yang semakin kecil, maka besar kemungkinan dari sistem ini jika digabungkan dengan sistem elektronika kapal hanya menambah sedikit ataupun dapat diabaikan terhadap bobot kapal, sehingga volume muat tak akan berpengaruh. Sistem ini juga sangat menunjang unjuk kerja dari kapal – kapal ringan patroli untuk keperluan militer ataupun sipil seperti SAR.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bronowicki, A. J, ” Design and Implementations of Active Structures”, TRW Space & Technology Division
- Brian P. Baillargeon1, Senthil S. Vel2 and Jeffery S. Koplak3, ”Utilizing ABAQUS to Analyze the Active Vibration Suppression of Structural Systems”, *2004 ABAQUS Users’ Conference*
- Meriem J.L. and Kraige, L.G. “ Vibration and Time Response”, Engineering Mechanics Vol 2, DYNAMICS”, Chap 8(1987)
- Senthil S. Vel1 Brian P. Baillargeon, ” ACTIVE VIBRATION SUPPRESSION OF SMART STRUCTURES USING PIEZOELECTRIC SHEAR ACTUATORS “, *Proceedings of the 15th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Bar Harbor, Maine, October 24-27, 2004*
- Walsh G.C, ” Control System”, Chap 10 of An Engineer’s Guide to MATLAB by Magrab B. E, Prentice Hall (2000)
- [www.piezo.com](http://www.piezo.com)