

---

**SIMULASI PENGENDALIAN STRUKTUR BERBASIS PADA MATERIAL CERDAS**

Oleh:

Totok Yulianto \*

I Ketut Suastika\*

M. Nurul Misbah\*

*\* Staff Pengajar pada Teknik Perkapalan FT. Kelautan ITS***Abstrak**

Pelat sisi Kapal salah satu bagian kritis yang terjadi pada kapal terutama hubungan frame memanjang dan melintang. Salah satu cara untuk menyelesaikan masalah ini adalah dengan pendekatan struktur cerdas. Tujuan penelitian ini adalah menurunkan atau mengurangi pengaruh beban luar yang bekerja pada pelat sisi kapal dengan pendekatan struktur cerdas. Pemodelan struktur dinamis pelat sisi dengan pendekatan metode elemen hingga.. Metode pengendalian struktur dilakukan dengan pendekatan metode Linier Quadratic Regulator (LQR). Selanjutnya, hasil simulasi numerik pada pelat sisi kapal yang diusulkan menunjukkan bahwa penerapan sistem pengendalian LQR mampu menurunkan pengaruh beban luar yang terjadi pada struktur sebesar 4,7 % untuk LQR tipe-1, 28,7 untuk LQR tipe-2 dan sebesar 66,7 % untuk LQR tipe-3.

*Key words:* Pelat Sisi Kapal, Struktur Cerdas, Metode Elemen Hingga, LQR.

**1. Pendahuluan**

Pengendalian getaran struktur merupakan tantangan dan bidang penelitian yang sangat penting pada teknik struktur (Housner et al, 1996 dan Kobori, 1996). Sebuah struktur dengan pengendalian aktif dapat diatur perilakunya selama beban dinamis. Struktur yang seperti ini disebut struktur adaptif atau *smart struktur*. *Smart struktur* adalah struktur yang terdiri dari *aktuator*, *sensor* dan *kontroller*. Salah satu material/bahan *aktuator* dan *sensor* aktif yang berkembang seiring dengan perkembangan teknik kontrol adalah *piezoceramic*. *Piezoceramic* yang sangat banyak dipakai dalam teknik kontrol adalah PZT (*Lead Zirconate Titanate*).

Pemakaian material cerdas telah dipelopori oleh Bailey dan Hubbard (1985) untuk pengendalian getaran balok kantilever. Mereka memakai Polyvinilide Fluoride (PVF2) sebagai polimer piezoelektrik yang dilekatkan pada permukaan balok kantilever untuk perancangan getaran umpan balik. Pada tahun 1987 Crawley dan de Luis mempresentasikan pengembangan analitis dan percobaan aktuator piezoelektrik

---

sebagai penggetar. Penggunaan model, mereka kembangkan hubungan tegangan-regangan. Crawley dan de Luis dapat memprediksi displasemen balok kantilever nyata dan susunan aktuator piezoelektrik dibawah kondisi getaran resonansi. Clark et al (1991) melakukan uji pada balok dengan tumpuan sederhana (simply supported) oleh pasangan aktuator piezoelektrik yang dilekatkan dengan sisi lain dan membandingkan hasil uji prediksi teoritis menggunakan persamaan balok satu dimensi diubah dengan memasukkan pengaruh kristal piezoelektrik. Thompson (2000), memakai model Bailey dan Hubbart untuk memodelkan hubungan regangan aktuator dengan voltage tegangan. Model ini dipakai untuk pengendalian posisi ujung balok kantilever.

Young dan Hansen (1995), melakukan pengendalian getaran pada struktur berpenegar dengan aktuator stack piezokeramik yang ditempatkan antar flange penegar dan struktur baik secara numeric maupun percobaan. Pemakaian aktuator ini mempunyai kemampuan gaya yang lebih besar dibandingkan dengan lembaran piezoelektrik. Penelitian ini juga menunjukkan kelayakan pengendalian getaran aktif memakai aktuator piezokeramik dan penegar pada struktur-struktur dasar. Pengendalian dilakukan dengan algoritma umpan maju (Feedforward).

Kwak dan Sciulli (1996), mengkonsentrasikan pada pengendalian peredaman getaran struktur aktif dengan sensor dan aktuator piezoelektrik berbasis logika fuzzy. Metodologi penelitian didasarkan pada logika fuzzy jenis system struktur variable. Kondisi yang sesuai untuk stabilisasi lingkaran tertutup (closed-loop) untuk desentralisasi diturunkan dari kondisi yang sesuai pasangan lokasi. Hasil menunjukkan bahwa pengendalian logika fuzzy dapat dirancang untuk system satu lokasi tanpa pengetahuan system yang dikendalikan. Mungkin tidak benar untuk system multi input – multi output. Semua perkembangan didemonstrasikan dengan percobaan pengendalian fuzzy waktu nyata pada balok kantilever dengan dilekatkan (bonded) sensor dan aktuator piezokeramik.

Schwinn dan Janocha (1998), memakai aktuator dan sensor yang tidak berpasangan untuk pengendalian getaran balok kantilever yang kedua ujungnya diklem. Metode ini biasanya dipakai untuk perancangan pengendalian aktif untuk menggambarkan perilaku struktur dan kemudian meletakkan aktuator dan sensor

sesuai criteria optimisasi. Algoritma Linier Quadratic Regulator (LQR) dipakai pada pengendalian balok kantilever. Keuntungan penelitian ini adalah dapat melakukan identifikasi system jika terjadi perubahan karakteristik system. Penelitian ini dilakukan baik secara teoritis maupun percobaan.

Peneliti-peneliti yang memfokuskan pada smart struktur antara lain adalah Manjunath et al (2004) telah melakukan simulasi numerik dengan banyak variabel *smart struktur* untuk balok kantilever, Murugavel et al (2002) melakukan variasi penempatan *aktuator* untuk pengendalian struktur elastis, Yaman (2002) penggunaan perancangan pengendalian *robust*  $H_\infty$  untuk pengendalian struktur plat, Waisman et al (2002) melakukan variasi frekuensi alami pada balok menggunakan sistem aktif, Moheimani (2000) telah melakukan simulasi numerik dan percobaan untuk koreksi fungsi alih untuk balok laminasi.

Berdasarkan penelitian diatas penulis melakukan penelitian dengan pendekatan metode elemen hingga untuk pemodelan smart struktur dan perancangan pengendali dipilih *Linier Quadratic Regulator (LQR)*. Penelitian ini menekankan pada simulasi numerik untuk mengurangi getaran yang terjadi pada struktur dengan berbasis *optimal kontrol*. Simulasi dilakukan dengan Software Matlab ver 6.5.

## 2. Pemodelan Dinamika Struktur Cerdas

Untuk mendapatkan hasil pengendalian struktur yang baik dan handal diperlukan model dinamika struktur yang akurat dan handal. Oleh karena itu perancangan sistem kontrol sangat dipengaruhi akurat dan tidaknya model dinamika struktur itu sendiri. Persamaan dinamika struktur yang dikendalikan dapat dituliskan, sbb: (Adeli, 1999)

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = Df + D_o f_o \quad (2.1)$$

dimana M adalah matrik massa struktur, K matrik kekakuan struktur, dan C matrik damping struktur (diasumsikan fungsi linier untuk matrik massa dan struktur). Matrik M, C, dan K adalah matrik  $N \times N$ , N jumlah derajat kebebasan displasemen struktur. Kuantitas D matrik distribusi beban  $N \times N_f$  yang berhubungan dengan vektor masukan kontrol f untuk sistem koordinat struktur. Jumlah elemen pada f harus sama dengan

jumlah aktuator,  $N_f$ . Matrik kolom  $u$  adalah vektor displasemen struktur akibat beban dinamis. Kuantitas  $D_o$  matrik distribusi beban  $N \times N_{f_o}$  yang berhubungan dengan vektor masukan kontrol  $f_o$  untuk sistem koordinat struktur. Dimana  $N_{f_o}$  jumlah beban yang diberikan pada derajat kebebasan displasemen struktur. Untuk persamaan tanpa kopel, dapat dipakai transformasi mode normal, sbb:

$$u = \Phi \Psi \quad (2.2)$$

dimana  $\Phi$  adalah matrik  $N \times N$  modal shape yang dinormalisasikan terhadap matrik massandan dan  $\Psi$  vektor normal mode koordinat. Kolum matrik  $\Phi$  adalah eigenvector persamaan homogen yang telah dinormalisasi yang menghasilkan sisi kanan persamaan (2.1) menjadi nol. Substitusikan persamaan (2.2) ke persamaan (2.1), kalikan dengan  $\Phi^T$ , dan susun ulang persamaan gerak de kopel dapat dituliskan.

$$M\ddot{\Psi} + C\dot{\Psi} + K\Psi = \Phi^T Df + \Phi^T D_o f_o \quad (2.3)$$

dimana matrik  $M$ ,  $C$ ,  $K$  adalah matrik diagonal.

Order kedua persamaan (2.3) tanpa kopel dapat direduksi menjadi persamaan order satu dengan transformasi:

$$X = \begin{bmatrix} \Psi \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

dimana  $X$  adalah  $2N \times 1$  vektor variabel keadaan. Dengan transformasi persamaan (2.4), persamaan (2.3) dapat dituliskan sebagai persamaan order satu:

$$\dot{X} = AX + Bf + B_o f_o \quad (2.5)$$

dimana  $A$  matrik plant  $2N \times 2N$ , menggambarkan sistem asal yang tidak terkontrol, dan  $B$  matrik masukan  $2N \times N_f$ .

### 3. Sistem Pengendalian Aktif

Gambar 1 menunjukkan aliran sistem pengendalian aktif pada struktur balok. Pada penelitian ini *Linier Quadratic Regulator (LQR)* dipakai untuk merancang kontroller dan mengenalkan penguatan optimal  $G$  dengan *indeks performansi* minimum  $J$ . *Indeks performansi* dituliskan sebagai berikut: (Lewis, 1992 dan Anderson, 1990)

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + f^T R f) dt \tag{3.1}$$

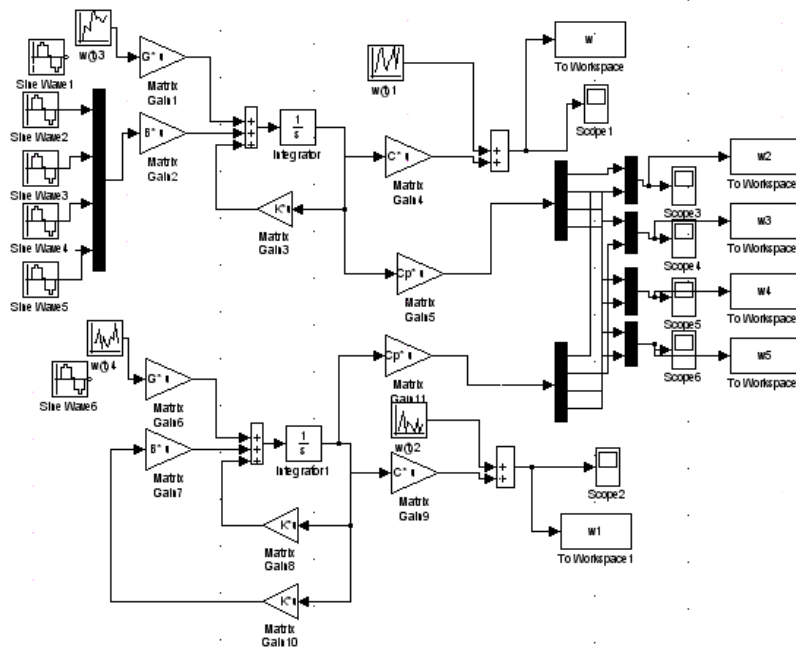
dimana Q matrik semidefinite positif dan R matrik definite positif adalah matrik keadaan dan matrik bobot. J adalah faktor indeks performansi minimum, kesalahan dan energi minimum pada perancangan kontroller dan hukum kontrol umpan balik:

$$f = -GX \tag{3.2}$$

matrik penguatan optimal G diberikan dengan

$$G = R^{-1} B^T P \tag{3.3}$$

dimana P matrik Riccati (matrik definit positif).



Gambar 1. Aliran Sistem Pengendalian Aktif berbasis *Linier Quadratic Regulator* (LQR) dengan Simulink MATLAB 6.5.

#### 4. Studi Kasus

Sebagai studi smart struktur dipilih kapal dengan dimensi dan kondisi pembebanan sebagai berikut: (Cramer, Loseth dan Olaisen)

Dimensi Utama:

Panjang kapal  $L = 221,0$  m

---

Lebar kapal	B	=	42,0 m
Koefisien blok	Cb	=	0,83 m
Tinggi kapal	T	=	20,3 m

## Kondisi Pembebanan:

Sarat beban penuh	Tt	=	14,2 m
Tinggi metasentra	MG	=	5,0 m
Jari-jari girasi roll	Kr	=	16,4 m

## Geometri Lokal Stiffener

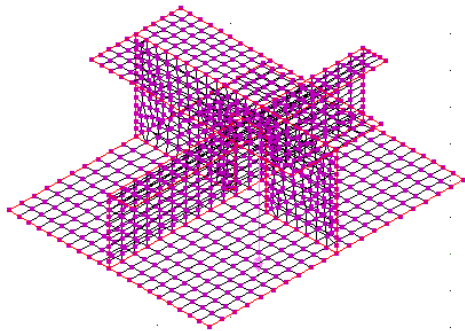
Tebal pelat sisi	tp	=	16,5 mm
Tebal web pembujur sisi	tw	=	9,0 mm
Tebal face pembujur sisi	tf	=	14,0 mm
Tebal web pelintang sisi	twp	=	10,0 mm
Jarak penegar	s	=	0,79 m

Beban Tekanan internal	pi	=	16,6 kN/m <sup>2</sup>
Beban Tekanan eksternal air laut	pe	=	38,2 kN/m <sup>2</sup>

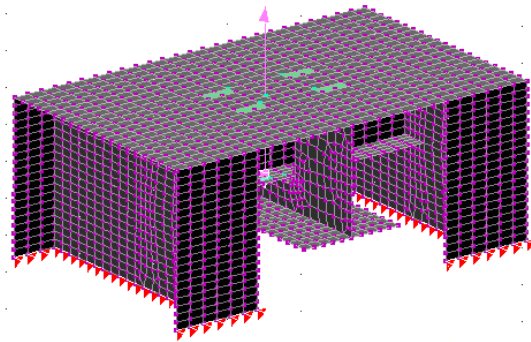
Bahan piezoelektrik ACX QP20N dengan propertis, sebagai berikut:

Tabel 1. Sifat-sifat mekanik material dan piezoelektrik

Panjang piezoelektrik	=	0,05 m
Lebar piezoelektrik	=	0,05 m
Koefisien charge piezoelektrik	=	$-179 \times 10^{-12} \text{ m/V}$
Modulus Young piezoelektrik	=	$6,9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$



Gbr 2. Skesta Struktur Pelat Sisi tanpa tumpuan

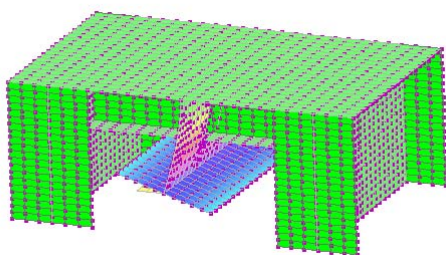


Gbr 3. Skesta Struktur Pelat Sisi dan tumpuan

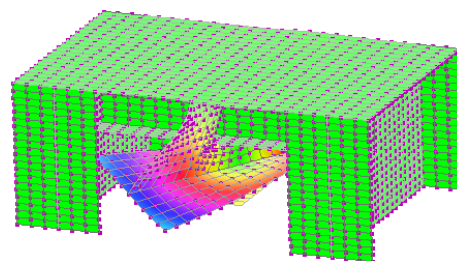
### 5. Mode Shape Pelat sisi Kapal

Untuk memperoleh informasi frekuensi alami yang paling dominan dalam arah bending dari pelat sisi dapat dilihat dari 12 mode shapes pelat sisi pada gambar 5.a sampai dengan 5.i. Mode pertama adalah mode bending pada pelintang sisi. Mode kedua adalah torsional pada pelintang sisi. Mode keempat adalah mode bending kedua dari pelintang sisi. Mode kelima adalah mode torsional pada pelintang sisi. Mode keenam adalah mode bending paa pelat sisi yaitu pada frekuensi alami 207,617 Hz.

a. Mode 1 25,232 Hz

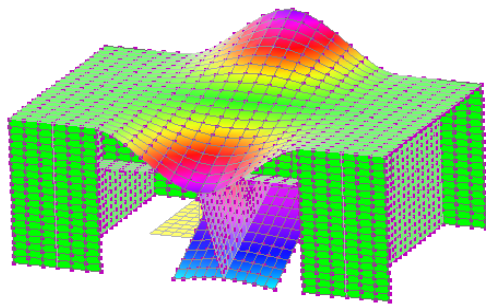


b. Mode 2 47,405 Hz

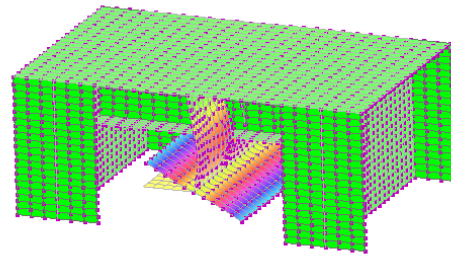


c. Mode 3 83,851 Hz

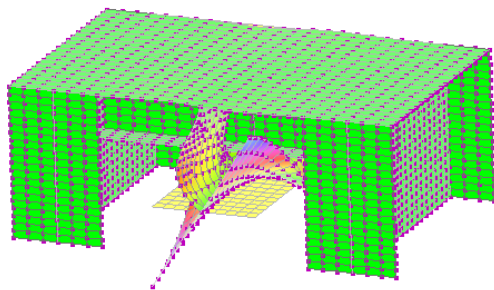
d. Mode 4 113,008 Hz



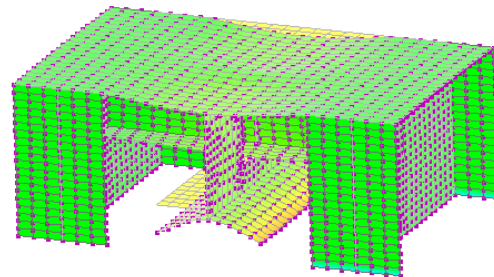
e. Mode 5 163,184 Hz



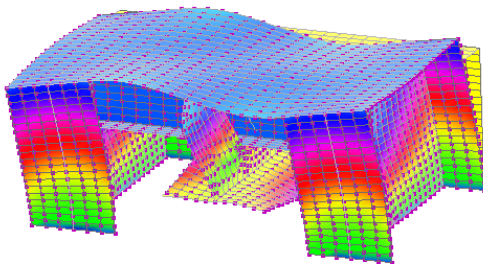
f. Mode 6 207,617 Hz



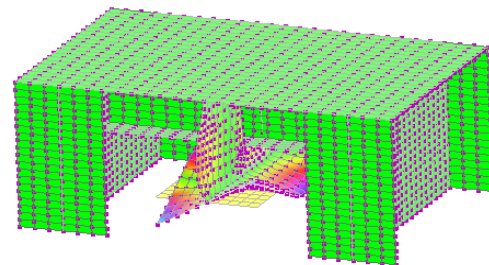
g. Mode 7 225,694 Hz



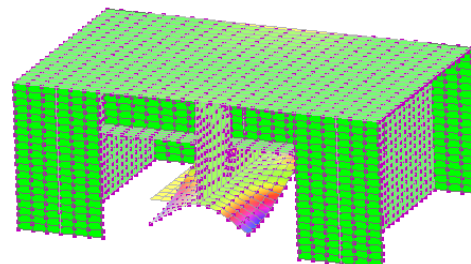
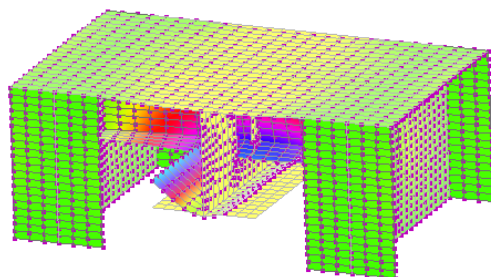
h. Mode 8 272,442 Hz



i. Mode 9 305,513 Hz



j. Mode 10 312,584 Hz





Gambar 5. Mode Shape Struktur Pelat Sisi 10 frekuensi alami

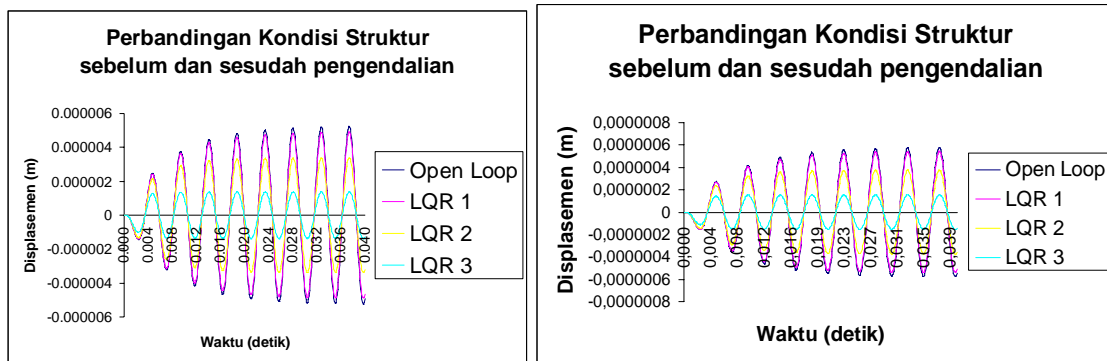
## 6. Hasil dan Analisa

### Respon Steady state

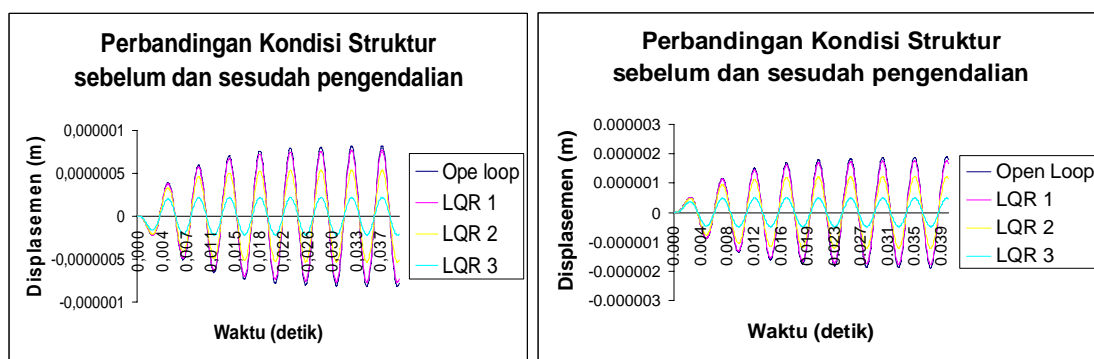
Jika struktur bekerja tekanan eksternal sebesar 38,2 kN/m<sup>2</sup> dan tekanan dari dalam sebesar 16,6 kN/m<sup>2</sup> dengan frekuensi eksitasi diasumsikan 214 Hz, maka respon yang dihasilkan untuk kondisi sebelum dan sesudah pengendalian diperlihatkan pada gambar 6.a sampai dengan 6.d. Respon amplitudo sebelum pengendalian sebesar 5.23E-06 m dan sesudah pengendalian menjadi 4.9E-06 m LQR 1, 3.39E-06 LQR 2, dan 1.37E-06 LQR 3 pada lokasi 1 seperti terlihat pada gambar 6.a. Pada lokasi 2, besar amplitudo sebelum pengendalian sebesar 5.79E-07 m dan sesudah pengendalian menjadi 5.43E-07 m LQR 1, 3.76E-07 m LQR 2, 1.54E-07 m LQR 3 seperti diperlihatkan pada gambar 6.b. Begitu juga pada lokasi 3 dan 4 bahwa sebelum dan sesudah pengendalian terjadi penurunan amplitudo respon seperti gambar 6.c. dan 6.d. besarnya amplitudo ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Variasi amplitudo sebelum dan sesudah pengendalian untuk 3 tipe pengendali lokasi 1,2,3

Lokasi Pengendalian	Open Loop	LQR 1	LQR 2	LQR 3
1	5.23E-06	4.9E-06	3.39E-06	1.37E-06
2	5.79E-07	5.43E-07	3.76E-07	1.54E-07
3	8.23E-07	7.72E-07	5.34E-07	2.17E-07
4	-1.9E-06	-1.8E-06	-1.2E-06	-4.9E-07



Gambar 6.a.b Respon sebelum dan sesudah pengendalian lokasi 1, 2



Gambar 6.c.d. Respon transien sebelum dan sesudah pengendalian lokasi 3, 4

### Respon Acak

Gambar 7.a. menunjukkan perbandingan displasemen sebelum dan sesudah pengendalian LQR, dimana respon displasemen sesudah pengendalian memberikan performansi yang baik dimana perubahan varian sebelum dan sesudah pengendalian mengalami penurunan dari  $1.53467E-13 \text{ m}^2$  menjadi  $1.46E-13 \text{ m}^2$  untuk lokasi 1. Sedangkan lokasi 2 sampai denga 4 dapat dilihat pada gambar 7.b. sampai dengan 7.d.

Untuk mendapatkan gambaran yang lebih detail mengenai varian yang terjadi sebelum dan sesudah pengendalian untuk beberapa tipe pengendalian LQR dapat dilihat pada tabel 2.a. sampai dengan 2.d. Fungsi bobot variable keadaan divariasii  $10^4$ ,  $10^5$ , dan  $10^6$  sedangkan bobot yang berkaitan dengan sinyal kontrol dibuat tetap 0,1, masing-masing untuk tipe 1, 2, dan 3.

Tabel 2.a. Varian kondisi sebelum dan sesudah pengendalian untuk 3 tipe pengendali lokasi 1

<b>Tipe Pengendali</b>	<b>Open Loop</b>	<b>Close Loop</b>
<b>LQR tipe 1 (0,1 dan 10<sup>4</sup>)</b>	1.53467E-13	1.46E-13
<b>LQR tipe 2 (0,1 dan 10<sup>5</sup>)</b>	1.53467E-13	1.09E-13
<b>LQR tipe 3 (0,1 dan 10<sup>6</sup>)</b>	1.53467E-13	5.1E-14

Tabel 2.b. Varian kondisi sebelum dan sesudah pengendalian untuk 3 tipe pengendali lokasi 2

<b>Tipe Pengendali</b>	<b>Open Loop</b>	<b>Close Loop</b>
<b>LQR tipe 1 (0,1 dan 10<sup>4</sup>)</b>	<b>1.87842E-15</b>	<b>1.79E-15</b>
<b>LQR tipe 2 (0,1 dan 10<sup>5</sup>)</b>	<b>1.87842E-15</b>	<b>1.34E-15</b>
<b>LQR tipe 3 (0,1 dan 10<sup>6</sup>)</b>	<b>1.87842E-15</b>	<b>6.27E-16</b>

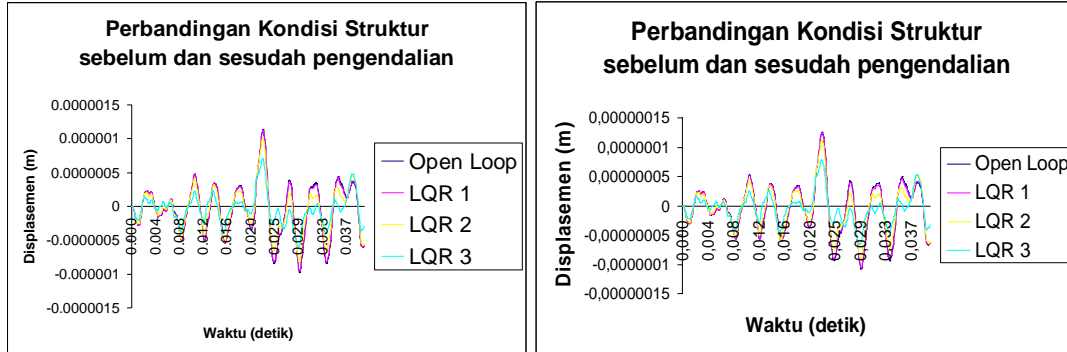
Tabel 2.c. Varian kondisi sebelum dan sesudah pengendalian untuk 3 tipe pengendali lokasi 3

<b>Tipe Pengendali</b>	<b>Open Loop</b>	<b>Close Loop</b>
<b>LQR tipe 1 (0,1 dan 10<sup>4</sup>)</b>	<b>3.79783E-15</b>	<b>3.62E-15</b>
<b>LQR tipe 2 (0,1 dan 10<sup>5</sup>)</b>	<b>3.79783E-15</b>	<b>2.71E-15</b>
<b>LQR tipe 3 (0,1 dan 10<sup>6</sup>)</b>	<b>3.79783E-15</b>	<b>1.26E-15</b>

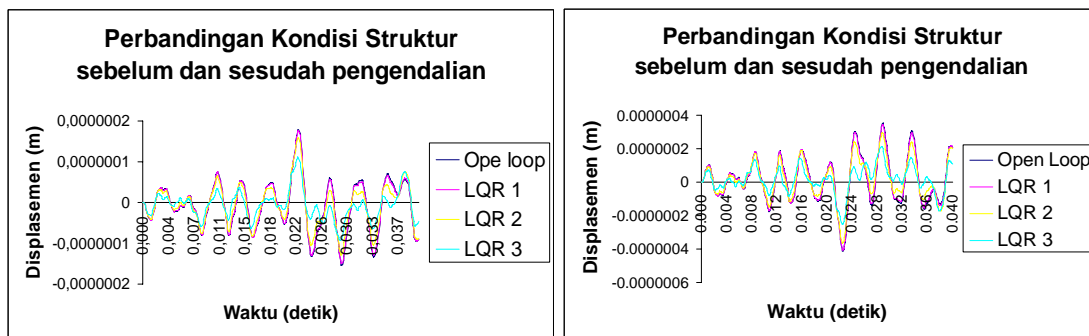
Tabel 2.d. Varian kondisi sebelum dan sesudah pengendalian untuk 3 tipe pengendali lokasi 4

<b>Tipe Pengendali</b>	<b>Open Loop</b>	<b>Close Loop</b>
<b>LQR tipe 1 (0,1 dan 10<sup>4</sup>)</b>	<b>2.00372E-14</b>	<b>1.91E-14</b>
<b>LQR tipe 2 (0,1 dan 10<sup>5</sup>)</b>	<b>2.00372E-14</b>	<b>1.42E-14</b>

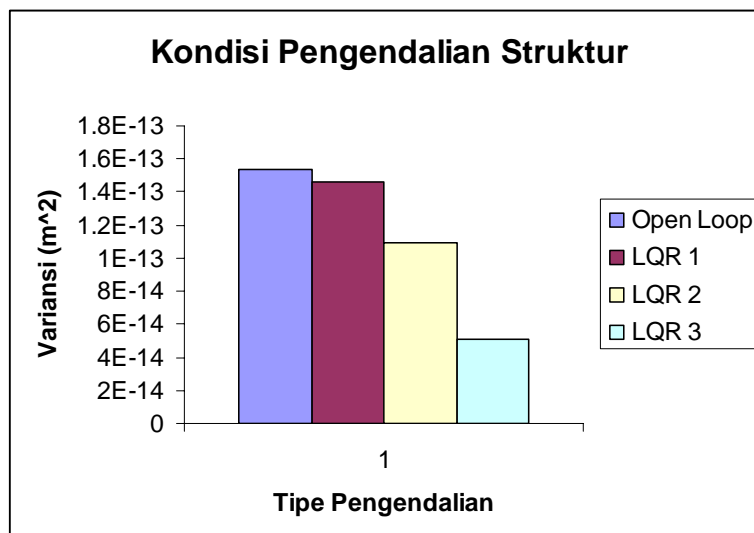
<b>LQR tipe 3 (0,1 dan <math>10^6</math>)</b>	<b><math>2.00372E-14</math></b>	<b><math>6.62E-15</math></b>
---	---------------------------------	------------------------------



Gambar 7.a.b. Respon acak sebelum dan sesudah pengendalian pada lokasi 1, 2



Gambar 7.c.d. Respon acak sebelum dan sesudah pengendalian pada lokasi 3, 4



Gambar 8. Varian displasemen sebelum dan sesudah pengendalian untuk 3 tipe pengendali

Jika kriteria performansi sebelum dan sesudah pengendalian diformulasikan, sbb:

$$p = \frac{d_{1ol} - d_{1cl}}{d_{1ol}} \times 100\% \quad (5.1)$$

dimana  $p$  menyatakan performansi pengurangan displasemen sebelum  $d_{1ol}$  dan sesudah  $d_{1cl}$  pengendalian. Maka performansi pengurangan displasemen untuk 3 tipe pengendali, berkisar 4,7 % untuk tipe 1, 28,7 % tipe 2 dan 66,7% tipe 3, seperti ditunjukkan pada diagram batang Gambar 8.

## 7. Kesimpulan

Penelitian ini sebagai studi awal untuk menunjukkan bahwa penggunaan *struktur cerdas* dapat mengurangi atau mereduksi pengaruh beban luar pada struktur dengan pencapaian yang cukup signifikan baik kondisi steady state maupun kondisi acak. Penelitian ini bisa dikembangkan untuk struktur yang lebih rumit (komplek) baik dari sisi geometri struktur maupun beban yang bekerja pada struktur. Selanjutnya bisa dipakai untuk pengendalian daerah-daerah kritis yang terjadi pada kapal dengan memasukkan beberapa pengaruh gangguan luar dengan melibatkan beberapa masukan dan keluaran (*multi-input dan multi output*). Dan dengan semakin kompleksnya struktur dan pengaruh luar ini bisa dikembangkan lebih lanjut, baik untuk sistem kontrol adaptif maupun sistem kontrol nonlinier.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Choi, Et. Al. (2002), "Control of Flow Around an Airfoil Using Piezoceramic Actuators", *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 5.
2. Darus & Tokhi (2005), "Soft computing-based active vibration control of a flexible structure", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18 pp. 93-114.
3. Halim, D. (2002), "Vibration Analysis and Control of Smart Structures", Thesis, *The University Engineering and Computer Science*, Australia
4. Housner, G.W., Soong, T.T., and Marsi, S.E. (1996), "Second Generation of the Active Structural Control in Civil Engineering", *Micro computers in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 5 pp. 289-296.
5. Hu YR & Ng A. (2005), "Active robust vibration control of flexible structures", *Journal of Sound and Vibration* 288, pp. 43-56, Elsevier.

6. Kobori, T. (1996), "Future Directions on Research and Development of Seismic-Response – Controlled Structures", Micro computers in Civil Engineering, Vol. 11, No. 5 pp. 297-304.
7. Manjunath T.C., Bandyopadhyay B, and Janardhanan S (2004), "Multivariable Control of A Smart Structure Cantilever Beam Using Fast Output Sampling Feedback", Proceeding of the III International conference "System Identification and Control Problems" SICPRO '04 Moscow.
8. Murugavel MSM (2002), "Implementation of an Actuator Placement, Switching Algorithm for Active Vibration Control in Flexible Structures", thesis, Worcester Polytechnic Institute.
9. Thompson W. (2000), "Tip Position Control of a Cantilever Beam Using Piezoceramic Actuation", National Science Foundation, Research Experience for Undergraduates Program, University of Missouri-Columbia.
10. Waisman, H. & Abramovich, H. (2002), "Variation of natural frequencies of beams using the active stiffening effect", Composites B 33, 415-424, Elsevier.
11. Yaman, et. Al. (2002), "Active Vibration Control of A Smart Plate", ICAS, CONGRESS.
12. Young, A.,J. & Hansen, C.,H., "Control of Flexurel Vibration in Stiffened Structures Using Multiple Piezoceramic Actuators", Applied Acoustics, Elsevier, Vol. 49 No. 1, pp. 17-48, 1996.