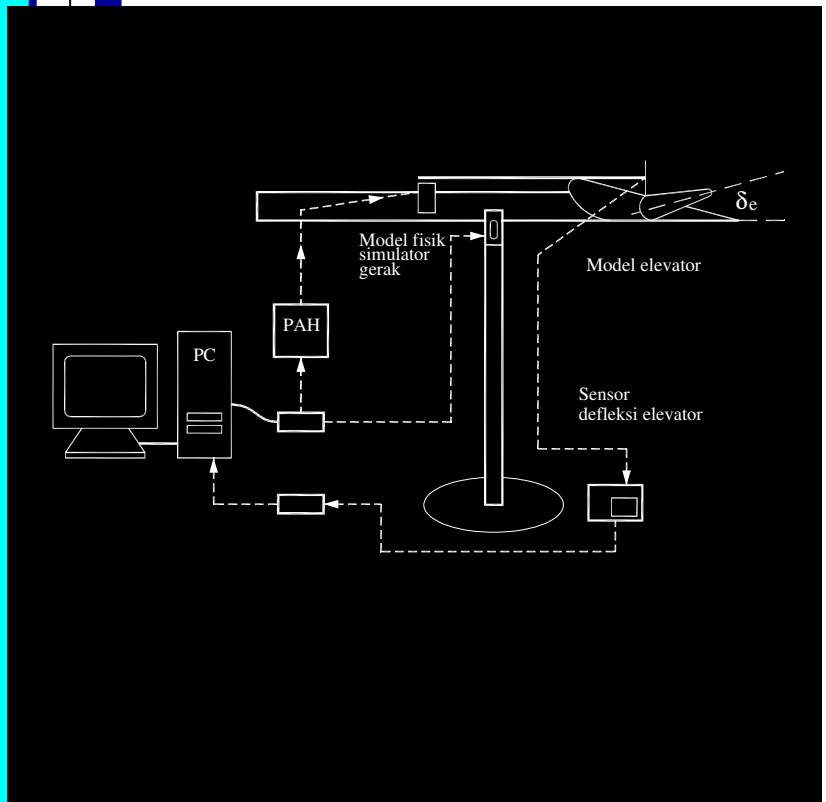


Jurnal Teknik Mesin  
Volume 22, No.1, April 2007

W  
E  
S  
E  
W



## EDITOR

B. Sutjiatmo (Ketua)  
A. Suwono  
D. Suharto  
K. Bagiasna  
S. D. Jenie  
S. S. Brodjonegoro  
Abdurrachim  
I. Nurhadi  
R. Suratman  
P. S. Darmanto

## MITRA BESTARI

Ign. P. Nurprasetio (ITB)  
I. S. Putra (ITB)  
A. I. Mahyuddin (ITB)  
Y. Yuwana M (ITB)  
Z. Abidin (ITB)  
P. Sutikno (ITB)  
T. Hardianto (ITB)  
T. A. F. Soelaiman (ITB)  
N. P. Tandian (ITB)  
S. Wiryolukito (ITB)  
A. Basuki (ITB)

## REDAKSI PELAKSANA

A. D. Pasek (Ketua)  
I M. Astina  
I. G. N. W. Puja  
Indrawanto  
W. Adriansyah  
A. Wibowo  
I N. Diasta

## ALAMAT REDAKSI

Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Bandung  
Jln. Ganesa 10, Bandung 40132  
Tel. :(022)-2504243  
Fax: (022)-2534099  
E-mail: ari@termo.pauir.itb.ac.id  
yadi@tu.ms.itb.ac.id

Terbit 2 (dua) kali dalam satu tahun  
Bulan April dan Oktober.

## EDITORIAL

Makalah pertama pada Jurnal Mesin Volume 22 No. 1 ditulis oleh Bambang Widyanto dan Achmad Sambas dari Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Bandung. Makalah ini membahas mengenai perlakuan panas (*solution treatment*) pada baja mangan austenitik. Proses perlakuan diberikan dengan mengoptimalkan temperatur pemanasan, dan waktu penahanan. Pemeriksaan terhadap hasil perlakuan dilakukan melalui pengamatan struktur mikro dan uji kekerasan. Baja mangan hasil perlakuan ini mempunyai keuletan yang lebih tinggi dan tingkat ketahanan aus yang memadai.

Makalah kedua yang berjudul Optimasi Pelapisan Material Peredam Viskoelastik pada Struktur Pelat Elastik yang ditulis oleh I Wayan Suweca dan Mokhammad Nuriman Yusuf dari Fakultas Teknologi Industri ITB. Metode optimasi yang digunakan merupakan modifikasi dari algoritma SUMT (*Sequential Unconstrained Minimization Technique*). Dari hasil kajian diketahui bahwa distribusi optimum lapisan material viskoelastik pada material elastik sangat dipengaruhi oleh jenis tumpuan struktur dan jumlah modus getar yang dilibatkan dalam analisis.

Indra Herlamba Siregar dari Universitas Negeri Surabaya, dan Abdul Muis dari Politeknik Samarinda, menulis makalah ketiga yang berjudul Karakteristik Aerodinamis Dua Silider Teriris Type 1 yang Tersusun *Side by Side* pada Bilangan Reynolds Subkritis. Makalah ini berisi hasil-hasil pengamatan terhadap kondisi aliran fluida yang melintasi sepasang silinder teriris. Besaran-besaran yang dimati antara lain distribusi koefisien *drag*, dan distribusi koefisien tekanan.

Makalah keempat berjudul Kaji Numerik dan Eksperimental Penyerapan Energi Tabung Aluminium Bergalur dengan Beban Aksial ditulis oleh Bambang K. Hadi et al dari Kelompok Keahlian Struktur Ringan Fakultas Teknologi Industri ITB. Makalah ini berisi kajian kemungkinan penggunaan tabung aluminium bergalur sebagai komponen penyerap energi. Kajian dilakukan baik dengan menggunakan pendekatan analitis, numerik dengan dinamik eksplisit ABAQUS dan pengujian. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah galur semakin kecil beban peruntuhan rata-rata. Beban peruntuhan rata-rata hasil pengujian yang diperoleh selalu lebih besar dari hasil prediksi secara analitis maupun numerik.

Makalah terakhir berjudul Pembuatan dan Pengujian Sensor Ultrasonik Sebagai *Feedback* pada Sistem Kendali Otomatik *Pitch Attitude Hold* ditulis oleh U.M. Zaeny dari Fakultas Teknologi Industri ITB. Makalah ini membahas mengenai hasil-hasil uji coba penggunaan sensor jarak ultrasonik yang diusulkan untuk digunakan sebagai alternatif pengganti *static tube* yang biasa digunakan. Usulan penggantian ini dilakukan berdasarkan pertimbangan bahwa *static tube* tidak bekerja cukup akurat untuk wahana yang terbang hanya beberapa meter dari permukaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor ultrasonik dapat diandalkan sebagai sensor jarak.

Akhir kata Redaksi mengucapkan selamat membaca semoga makalah-makalah dalam Jurnal Mesin memberi informasi dan pengetahuan yang bermanfaat.

---

# MESIN

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 22, No. 1, April 2007

ISSN 0852-6095

---

Diterbitkan oleh : Program Studi Teknik Mesin,  
Fakultas Teknologi Industri - ITB

Surat ijin : STT No. 964/DIT-JEN/PPG/STT/1982.

---

## DAFTAR ISI

*Pengaruh waktu austenitisasi pada proses pelarutan karbida baja mangan austenitik.*

**Bambang Widyanto dan Achmad Sambas**

**1-8**

*Optimasi pelapisan material peredam viskoelastik pada struktur pelat elastik*

**I Wayan Suweca dan Mokhamad Nuriman Yusuf**

**9-20**

*Karakteristik aerodinamis dua silinder teriris type 1 yang tersusun side by side pada bilangan Reynolds subkritis.*

**Indra Herlamba Siregar dan Abdul Muis**

**21-28**

*Kaji numerik dan eksperimental penyerapan energi tabung aluminium bergalur dengan beban aksial.*

**Bambang K. Hadi, Ichsan S. Putra, David Basuki dan Yanyan Tedy S.**

**29-34**

*Pembuatan dan pengujian sensor ultrasonik sebagai feedback pada sistem kendali otomatis pitch attitude hold.*

**U.M. Zaeny, T. Indriyanto dan H. Muhammad**

**35-43**

---

# M E S I N

Jurnal Teknik Mesin

*Vol. 22, No. 1, April 2007*

ISSN 0856-6095

---

# OPTIMASI PELAPISAN MATERIAL PEREDAM VISKOELASTIK PADA STRUKTUR PELAT ELASTIK

I Wayan Suweca<sup>(1)</sup>, Mokhamad Nuriman Yusuf<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Kelompok Keahlian Perancangan Mesin, Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Bandung  
E-mail: csuweca@edc.ms.itb.ac.id  
<sup>(2)</sup>PT. Dirgantara Indonesia

## Ringkasan

Makalah ini membahas aplikasi metode optimasi untuk aplikasi pelapisan peredam viskoelastik pada pelat elastik. Metode optimasi ini merupakan inovasi dari algoritma SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique). Inovasi dilakukan dengan memanfaatkan informasi distribusi energi regangan elemen pelat untuk menentukan vektor arah pencarian (search direction vector). Dalam penelitian ini, pelat elastik yang telah dilapisi dengan peredam viskoelastik dimodelkan sebagai pelat tunggal dengan karakteristik ekuivalen yang sebanding dengan kombinasi lapisan-lapisan penyusunnya. Selanjutnya karakteristik dinamik pelat tunggal dan distribusi energi regangannya dihitung menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan paket piranti lunak MSC/Nastran. Strategi optimasi yang dikembangkan telah berhasil diaplikasikan untuk memperoleh distribusi optimum lapisan material peredam viskoelastik pada berbagai kasus. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pola distribusi optimum lapisan material viskoelastik pada material elastik sangat dipengaruhi oleh jenis tumpuan struktur dan jumlah modus getar yang dilibatkan dalam analisis.

## Abstract

This paper discusses a method to optimize the distribution of viscoelastic-damping layer on elastic plate structures. This method is based on well known SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique) algorithm. An innovation where elements' strain energy distribution over the plate structure is used to determine the search direction vector. The method models the two layers damped plate as a single layer damped plate. The mechanical properties of single layer damped plate were determined such that they are equivalent to those of two-layers elastic-viscoelastic laminate. MSC/Nastran finite element software was used to calculate the dynamic characteristics and the elements' strain energy distribution of the single layer plate. The proposed innovation has successfully determined the optimum distribution of viscoelastic material. The results show that the optimum distribution of viscoelastic material on elastic structure is strongly influenced by structural support type and number of modes retained for the analysis.

**Keywords :** optimization, SUMT, elastic-viscoelastic single layer, equivalent properties, strain energy

## 1. PENDAHULUAN

Salah satu cara untuk mengatasi terjadinya getaran berlebih pada struktur adalah dengan memberikan piranti peredam getaran yang tepat [1-3, 5-6]. Material peredam yang banyak digunakan untuk struktur pelat adalah lapisan peredam viskoelastik. Peredam viskoelastik biasanya dibuat dari material polimer atau gelas. Cara penggunaannya adalah dengan melapiskan material tersebut pada permukaan struktur elastik.

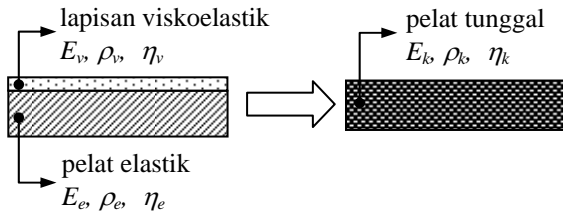
Untuk memperoleh efek redaman yang optimum dengan menggunakan material peredam sehemat mungkin, maka diperlukan suatu strategi penempatan material peredam pada struktur dengan suatu ketebalan tertentu. Strategi ini dapat dilakukan dengan menerapkan teknik optimasi perancangan [1,4,5].

Ide dasarnya adalah melapiskan peredam viskoelastik di suatu lokasi yang tepat pada struktur elastik dengan ketebalan yang optimum. Untuk memperoleh rancangan yang optimum, struktur pelat yang ada terlebih dahulu dibagi-bagi menjadi sejumlah elemen. Selanjutnya tiap elemen dilapisi dengan peredam viskoelastik dengan ketebalan yang berbeda-beda, sedemikian hingga hasil rancangan yang optimum diperoleh.

## 2. KARAKTERISTIK EKUIVALEN PELAT KOMPOSIT ELASTIK-VISKOELASTIK

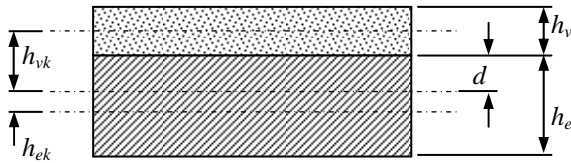
Struktur pelat komposit elastik-viskoelastik adalah suatu struktur yang minimum terdiri dari 2 (dua) lapisan, yaitu satu lapisan pelat dari material elastik dan satu lapisan dari material viskoelastik. Tujuan pelapisan viskoelastik

tersebut adalah untuk memberikan efek redaman pada struktur elastik. Untuk memudahkan pemodelan pelat komposit elastik-viskoelastik dalam elemen hingga, maka pelat komposit dua lapisan tersebut dimodelkan sebagai pelat tunggal, yang selanjutnya disebut pelat komposit, yang memiliki karakteristik ekuivalen dengan pelat dua lapisan penyusunnya. Proses pemodelan karakteristik ekuivalen tersebut diilustrasikan pada Gambar 1. Parameter  $E$ ,  $\rho$ , dan  $\eta$  adalah masing-masing sebagai modulus elastik, massa jenis, dan *loss factor* dari material. Sedangkan sub-skrip  $e$ ,  $v$ , dan  $k$  adalah masing-masing untuk material elastik, viskoelastik, dan pelat komposit.



**Gambar 1.** Pelat komposit elastik-viskoelastik [2]

Bidang atau sumbu netral pelat komposit akan berada pada jarak  $d$  dari bidang kontak antara material elastik dan viskoelastik. Ketebalan masing-masing material dan lokasi bidang netral pelat komposit ditunjukkan pada Gambar 2.



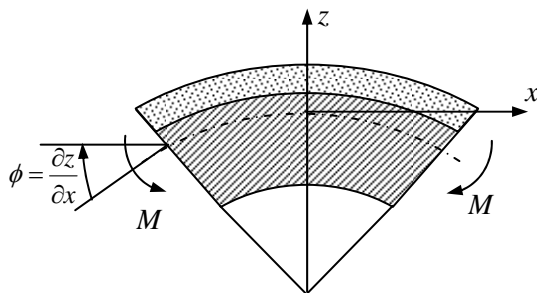
**Gambar 2.** Penampang tipikal pelat komposit [2]

Berdasarkan geometri pada Gambar (2) di atas dapat diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$h_{ek} = \frac{1}{2} h_e - d \quad (1)$$

$$h_{vk} = \frac{1}{2} h_v + d \quad (2)$$

Pada Gambar 3 ditunjukkan geometri pelat komposit melengkung dengan sudut lengkung  $\phi$ . Lapisan peredam dianggap mengikuti kelengkungan ini.



**Gambar 3.** Pelat komposit terdeformasi akibat momen lentur  $M$  [2]

Dengan asumsi bahwa tidak ada gerak relatif antara material elastik dan viskoelastik pada bidang kontak (*perfect bonding assumption*), maka hubungan antara momen-dalam untuk masing-masing material elastik dan viskoelastik dapat dituliskan sebagai berikut [2].

Momen-dalam pada lapisan material elastik:

$$M_e = D_e \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{E_e h_e^3}{12(1-\nu_e^2)} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3)$$

Momen-dalam pada lapisan material viskoelastik:

$$M_v = D_v \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{E_v h_v^3}{12(1-\nu_v^2)} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (4)$$

Dengan  $\nu_e$  dan  $\nu_v$  adalah masing-masing rasio Poisson untuk material elastik dan material viskoelastik.

Sedangkan gaya-dalam pada lapisan material elastik dan viskoelastik dapat dituliskan sebagai berikut [2]:

Gaya-dalam pada lapisan material elastik:

$$F_e = \frac{E_e h_e}{(1-\nu_e^2)} h_{ek} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (5)$$

Gaya-dalam pada lapisan material viskoelastik:

$$F_v = \frac{E_v h_v}{(1-\nu_v^2)} h_{vk} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (6)$$

Keseimbangan gaya-dalam dan gaya-luar pada pelat komposit memberikan,

$$F_e + F_v = 0$$

$$\frac{E_e h_e}{(1-\nu_e^2)} h_{ek} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{E_v h_v}{(1-\nu_v^2)} h_{vk} \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

Untuk pelat komposit, diasumsikan bahwa rasio Poisson material sama, jadi  $\nu_e = \nu_v = \nu_k$ . Memperhatikan hubungan pada Persamaan (1) dan (2), maka dari Persamaan (7) dapat diperoleh

$$E_e h_e \left( \frac{1}{2} h_e - d \right) + E_v h_v \left( \frac{1}{2} h_v + d \right) = 0$$

atau

$$(E_e h_e - E_v h_e) d = \frac{1}{2} (E_e h_e^2 + E_v h_v^2) \quad (8)$$

Sehingga besarnya jarak bidang netral pelat komposit dengan bidang kontak material elastik dan viskoelastik,  $d$  dapat dihitung sebagai

$$d = \frac{1}{2} \frac{(E_e h_e^2 + E_v h_v^2)}{(E_e h_e - E_v h_v)} = 0 \quad (9)$$

Adanya pergeseran bidang netral tersebut berpengaruh terhadap kekakuan bending dari masing-masing lapisan pelat. Keseimbangan momen-dalam dan momen-luar untuk pelat komposit pada Gambar 3 dapat dituliskan [2].

$$M = M_{ek} + M_{vk} \quad (10)$$

yang mana:

$$M_{ek} = D_{ek} \frac{\partial \phi}{\partial x} = M_e + F_e h_{ek} \quad (11)$$

$$M_{vk} = D_{vk} \frac{\partial \phi}{\partial x} = M_v + F_v h_{vk} \quad (12)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (3) dan (5) ke dalam Persamaan (11) dapat diperoleh hubungan berikut

$$D_{ke} \frac{\partial \phi}{\partial x} = \left( \frac{E_e h_e^3}{12(1-\nu_e^2)} + \frac{E_e h_e}{(1-\nu_e^2)} h_{ek}^2 \right) \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (13)$$

Dengan melakukan substitusi  $h_{ek} = \frac{1}{2}h_e - d$  ke dalam Persamaan (13), maka diperoleh

$$D_{ke} = \frac{E_e h_e^3}{12(1-\nu_e^2)} \left[ 4 - 12 \left( \frac{d}{h_e} \right) + 12 \left( \frac{d}{h_e} \right)^2 \right]$$

atau

$$D_{ke} = 4D_e \left[ 1 - 3 \left( \frac{d}{h_e} \right) + 3 \left( \frac{d}{h_e} \right)^2 \right] \quad (14)$$

dengan

$$D_e = \frac{E_e h_e^3}{12(1-\nu_e^2)} \quad (15)$$

Dengan cara serupa, kekakuan bending untuk pelat viskoelastik  $D_{vk}$  diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (4) dan (6) ke dalam persamaan (12) dan memperhatikan hubungan  $h_{vk} = \frac{1}{2}h_v + d$  pada Persamaan (2), diperoleh

$$D_{kv} = 4D_v \left[ 1 - 3 \left( \frac{d}{h_v} \right) + 3 \left( \frac{d}{h_v} \right)^2 \right] \quad (16)$$

dengan

$$D_v = \frac{E_v h_v^3}{12(1-\nu_v^2)} \quad (17)$$

Persamaan diferensial getaran lentur suatu pelat setebal  $h$ , dengan kekakuan lentur  $D$ , dan massa jenis  $\rho$  adalah

$$D \nabla_{xy}^4 w + \rho h \ddot{w} = F(x, y, t) \quad (18)$$

Persamaan diferensial getaran lentur pelat komposit dua layer dengan menggunakan pendekatan modulus kompleks [2] adalah:

$$[D_{ek} + D_{vk} (1 + i\eta_v)] \nabla_{xy}^4 w + (\rho_e h_e + \rho_v h_v) \ddot{w} = F(x, y, t) \quad (19)$$

Sedangkan persamaan diferensial getaran lentur pelat tunggal, dengan menggunakan pendekatan modulus kompleks dapat dituliskan

$$[D_k (1 + i\eta_k)] \nabla_{xy}^4 w + \rho_k h_k \ddot{w} = F(x, y, t) \quad (20)$$

Karakteristik ekuivalen pelat komposit tunggal diperoleh dengan membandingkan Persamaan (19) dengan Persamaan (20), yang menghasilkan hubungan berikut

$$D_k = D_{ek} + D_{vk} \quad (21a)$$

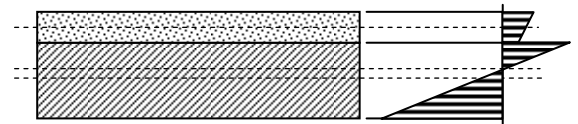
$$\eta_k = \eta_v \left( \frac{D_{vk}}{D_k} \right) \quad (21b)$$

$$h_k = h_e + h_v \quad (21c)$$

$$\rho_k = \frac{\rho_e h_e + \rho_v h_v}{h_k} \quad (21d)$$

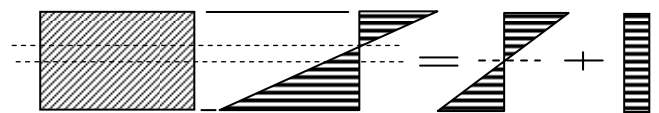
$$E_k = \frac{12 D_k (1 - \nu_k^2)}{h_k^3} \quad (21e)$$

Karakteristik ekuivalen di atas diperoleh dengan asumsi bahwa tegangan akibat momen bending  $M$  jauh lebih besar dari momen yang lain hingga tegangan selain akibat momen bending dapat diabaikan. Hal ini berlaku pada pelat komposit sederhana yang pergeseran bidang netralnya  $h_{pk}$  relatif kecil. Distribusi tegangan yang sesungguhnya pada pelat komposit digambarkan pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Distribusi tegangan pada pelat komposit [2]

Distribusi tegangan pada tiap lapisan pelat dapat digambarkan secara lebih jelas pada Gambar 5. Dapat dilihat bahwa sebenarnya terdapat gaya membran pada pelat komposit akibat dari momen bending  $M$ . Hal ini telah diamati oleh Carfagni et al. [3].



(a) Distribusi tegangan pada pelat elastik



(b) Distribusi tegangan pada pelat viskoelastik

**Gambar 5.** Distribusi tegangan pada lapisan pelat komposit, [3]

Adanya gaya membran mengubah persamaan diferensial getaran lentur pelat tunggal, persamaan (20) menjadi:

$$[D_k(1+i\eta_{kb})]\nabla_{xy}^4 w + F_k(1+i\eta_{km})\nabla_x^2 w + \rho_k h_k \ddot{w} = F(x, y, t) \quad (22)$$

dengan  $F_k$  adalah gaya membran pada pelat komposit tunggal. Gaya membran pada pelat elastik adalah  $F_e$  dan gaya membran pada lapisan peredam viskoleastik adalah  $F_v$ . Karena pelat komposit tunggal sebanding dengan pelat komposit berlapis maka

$$F_k = F_p + F_v \\ E_k h_k = E_e h_e + E_v h_v$$

Sehingga dapat diperoleh hubungan

$$E_k = \frac{E_e h_e + E_v h_v}{h_k} \quad (23)$$

Membandingkan modulus elastisitas untuk model pada Persamaan (21e) dan pada Persamaan (23), maka dapat dituliskan

$$\frac{12D_k(1-\nu_k^2)}{h_k^3} = \frac{E_e h_e + E_v h_v}{h_k}$$

Sehingga besarnya ketebalan pelat komposit tunggal dapat diperoleh

$$h_k = \sqrt{\frac{12D_k(1-\nu_k^2)}{E_e h_e + E_v h_v}} \quad (24)$$

Perhitungan nilai  $\rho_k$  dan  $E_k$  pada Persamaan (21d) dan (21e) harus menggunakan nilai  $h_k$  seperti diberikan pada Persamaan (24).

Besaran *loss factor* untuk model bending,  $\eta_{kb}$  diberikan pada Persamaan (21b). Sedangkan besarnya *loss factor* untuk model membran,  $\eta_{km}$  dapat dituliskan

$$\eta_{km} = \eta_v \left( \frac{F_v}{F_k} \right)$$

atau

$$\eta_{km} = \eta_v \left( \frac{E_v h_v}{E_e h_e + E_v h_v} \right) \quad (25)$$

Pada Tabel 1 diberikan perbandingan karakteristik antara pelat komposit tunggal model bending dan membran [3].

Karakteristik pelat komposit pada Tabel 1 dapat digunakan untuk memodelkan pelat dengan geometri penampang baik yang sederhana maupun yang rumit, seperti misalnya *corrugated plate* dan *beaded panel* [2].

**Tabel 1.** Karakteristik pelat komposit tunggal model bending dan membran [3]

Karakteristik	Model	
	Membran	Bending
Kekakuan	0	$D_k$ [Pers. (21a)]
Ketebalan	$h_k$ [Pers. (24)]	0
Massa jenis	$\rho_k$ [Pers. (21d)]	0
Modulus elastisitas	$E_k$ [Pers. (21e)]	$E_k$ [Pers. (21e)]
<i>Loss factor</i>	$\eta_{km}$ [Pers. (25)]	$\eta_{kb}$ [Pers. (21b)]

### 3. PERHITUNGAN KARAKTERISTIK REDAMAN

Salah satu tujuan penelitian ini adalah menyusun suatu strategi optimasi dengan memanfaatkan piranti lunak metode elemen hingga yang sudah ada, seperti MSC/Nastran. Hal ini dimaksudkan agar metode optimasi dapat diaplikasikan secara lebih praktis dalam kegiatan perancangan.

Prosedur analisis dengan elemen hingga dimulai dengan membagi struktur pelat menjadi elemen-elemen pelat. Elemen-elemen ini mempunyai beberapa nodal. Setiap nodal mempunyai sejumlah derajat kebebasan. Jadi, getaran pada pelat merupakan getaran sistem dengan banyak derajat kebebasan. Prosedur selanjutnya adalah menyusun persamaan gerak sistem. Persamaan gerak getaran bebas suatu sistem dapat dinyatakan dengan himpunan dari persamaan-persamaan diferensial biasa orde dua.

Dalam bentuk matriks, persamaan gerak getaran bebas sistem multi derajat kebebasan teredam dengan notasi kekakuan kompleks dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + [\mathbf{K}(1+i\eta)]\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{0} \quad (26)$$

Dengan  $\mathbf{M}$  dan  $\mathbf{K}$  adalah masing-masing sebagai matriks inersia dan matriks kekakuan sistem. Sedangkan  $\mathbf{X}$  adalah vektor perpindahan nodal. Persamaan (26) dapat dituliskan kembali secara lebih kompak sebagai

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_c \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{0} \quad (27)$$

dengan

$$\mathbf{K}_c = \mathbf{K}(1+i\eta) \quad (28)$$

Matriks  $\mathbf{K}_c$  adalah matriks kekakuan kompleks struktur beserta peredamnya. Dalam metode elemen hingga nilai *loss factor*,  $\eta$  dapat berbeda-beda untuk tiap elemen. Matriks  $\mathbf{K}_c$  merupakan penjumlahan dari matriks kekakuan kompleks seluruh elemen penyusun struktur tersebut atau dapat dituliskan sebagai

$$\mathbf{K}_c = \sum_{j=1}^n \mathbf{K}_j (1+i\eta_j) \quad (29)$$

Dengan  $\mathbf{K}_j$  dan  $\eta_j$  adalah masing-masing sebagai matriks kekakuan dan *loss factor* untuk elemen ke  $j$ .

Respons kompleks dari Persamaan (27) dapat dituliskan

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}e^{\lambda t} \quad (30)$$

dengan  $\lambda = \alpha + i\omega$  adalah *eigenvalue* kompleks dan  $\omega$  adalah frekuensi pribadi tak teredam dan  $\alpha$  merepresentasikan aspek redaman struktur. Frekuensi pribadi teredam,  $\omega_d$  dapat dihitung dengan rumus

$$\omega_d = \sqrt{\alpha^2 + \omega^2} \quad (31)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (30) beserta turunannya terhadap waktu, maka dari Persamaan (27) diperoleh

$$[\lambda^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}_c] \mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (32)$$

Persamaan (32) adalah persamaan karakteristik sistem yang solusinya akan memberikan nilai *eigenvalue* kompleks  $\lambda$  dan *eigenvector* kompleks  $\mathbf{U}$ . Solusi Persamaan (32) dapat diperoleh dengan menggunakan berbagai metode numerik seperti misalnya *upper Hessenberg* atau *complex Lanczos*, dan lain-lain. Setelah *eigenvalue* kompleks  $\lambda$  diperoleh, maka faktor redaman viskus ekuivalen struktur pelat dapat dihitung. Sifat redaman dapat dinyatakan dengan rasio redaman  $\xi$  atau sebagai *loss factor*  $\eta$ . Besar faktor redaman tersebut dapat dihitung sebagai berikut.

$$\zeta = \frac{-\alpha}{\omega} \quad (33a)$$

$$\eta = \frac{-2\alpha}{\omega} \quad (33b)$$

Piranti lunak komputer berbasis metode elemen hingga umumnya telah memuat modul-modul untuk dapat menyelesaikan prosedur perhitungan yang dijelaskan di atas. Seperti misalnya pada MSC/Nastran versi 70.5, persoalan *eigenvalue* kompleks seperti di atas, dapat diselesaikan dengan menggunakan modul SOL 107.

#### 4. FORMULASI PROBLEM OPTIMASI

Formulasi persoalan optimasi pelapisan material viskoelastik pada struktur pelat elastik dapat dilakukan melalui 3 tahapan berikut.

- Langkah pertama adalah menentukan variabel perancangan. Variabel perancangan adalah variabel yang akan diubah-ubah selama proses iterasi sampai diperoleh redaman yang optimum. Variabel perancangan yang diambil dalam penelitian ini adalah ketebalan lapisan material viskoelastik untuk setiap elemen,  $h_{vj}$ ,  $j = 1, n$ ; dengan  $n$  adalah jumlah total elemen dalam struktur.
- Langkah kedua adalah menentukan fungsi objektif, yaitu fungsi yang diinginkan untuk diminimumkan. Fungsi objektif yang diambil dalam penelitian ini adalah berat material peredam yang diinginkan sekecil mungkin atau nilai redaman yang diinginkan semaksimal mungkin. Secara matematis berat total material viskoelastik pada seluruh struktur dapat dituliskan

$$W_v(\mathbf{H}) = \sum_{j=1}^n \rho_v A_{vj} h_{vj}$$

dengan

- $W_v$  : berat total material viskoelastik
- $A_v$  : luas lapisan elemen viskoelastik ke  $j$
- $\mathbf{H}$  : vektor variabel perancangan,  
 $\mathbf{H} = [h_{v1}, h_{v2}, \dots, h_{vj}, \dots, h_{vn}]^T$
- $n$  : jumlah elemen hingga dalam struktur.

- Langkah ketiga adalah menentukan fungsi kendala yang harus dipenuhi. Kendala yang harus dipenuhi adalah bahwa *loss factor* struktur pelat komposit untuk setiap modus getar yang diinginkan harus lebih besar dari atau sama dengan suatu nilai *loss factor* yang ditetapkan atau berat total material viskoelastik lebih kecil atau sama dengan yang ditetapkan, atau secara matematis dapat dituliskan:

$$\eta_k(\mathbf{H}) - \bar{\eta}_k \leq 0, \quad k = 1, m$$

yang mana

$\eta_k$  : adalah *loss factor* struktur komposit pada modus ke  $r$

$\bar{\eta}_k$  : adalah *loss factor* yang diinginkan pada modus ke  $r$ .

Permasalahan optimasi di atas adalah permasalahan optimasi berkendala dengan  $n$  variabel perancangan dan  $m$  buah kendala, yang secara lebih kompak dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$\text{Minimumkan: } W_v(\mathbf{H}) = \sum_{j=1}^n \rho_v A_{vj} h_{vj} \quad (34)$$

$$\text{dengan kendala: } \eta_k(\mathbf{H}) - \bar{\eta}_k \leq 0, \quad k = 1, m \quad (35)$$

yang mana

$$\mathbf{H} = \begin{Bmatrix} h_{v1} \\ \vdots \\ h_{vj} \\ \vdots \\ h_{vn} \end{Bmatrix} \quad (36)$$

Salah satu metode penyelesaian persoalan seperti ini adalah dengan metode *Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT)* seperti dijelaskan pada [7]. Strategi penyelesaian dalam metode ini adalah dengan terlebih dahulu mereformulasikan persoalan berkendala menjadi persoalan tak-berkendala melalui pemberian suatu fungsi penalti. Pemberian penalti dilakukan secara bertahap untuk menghindari kondisi numerik yang buruk.



Formulasi persoalan optimasi tak-berkendala dari persoalan berkendala awal dapat dituliskan sebagai.

$$\Phi(\mathbf{H}, r_p) = \sum_{j=1}^n \rho_v A_{vj} h_{vj} + r_p \sum_{k=1}^m [\eta_k(\mathbf{H}) - \bar{\eta}_k]^2 \quad (37)$$

Fungsi  $\Phi$  dikenal sebagai fungsi *pseudo objective* yang akan diminimumkan dan  $r_p$  adalah suatu parameter penalti. Suku pertama dari fungsi pseudo objectif adalah fungsi obyektif awal. Sedangkan suku keduanya adalah fungsi penalti yang disusun dari fungsi-fungsi kendala.

Untuk meminimumkan fungsi pseudo objektif di atas ada banyak metode optimasi yang dapat digunakan [7]. Hampir semua metode penyelesaian masalah optimasi secara numerik menggunakan metode iteratif. Metode penyelesaian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode iteratif orde nol. Pertimbangannya adalah bahwa informasi turunan pertama dan kedua dari fungsi pseudo objectif sukar untuk diperoleh secara analitis. Informasi turunan ini mungkin saja dapat didekati dengan perhitungan *finite difference*, tetapi hal ini berarti harus melakukan eksekusi *solver* (MSC/Nastran) setiap kali kita menurunkan fungsi pseudo objectif terhadap satu variabel perancangan. Jika terdapat  $n$  variabel perancangan dan untuk optimasinya diperlukan  $N$  kali iterasi maka akan diperlukan  $n \times N$  kali eksekusi *solver*. Hal ini akan membutuhkan *CPU time* yang sangat lama.

Secara matematis, prosedur iteratif untuk meng-*update* variabel perancangan dapat dituliskan sebagai

$$\mathbf{H}^{q+1} = \mathbf{H}^q + \alpha^* \mathbf{S}^q \quad (38)$$

dengan  $q$  menyatakan tahap iterasi ke  $q$  dan  $\alpha^*$  adalah panjang langkah optimum pada arah  $\mathbf{S}^q$ .

Penerapan metode orde nol memiliki kelemahan utama, yaitu seringkali diperlukan jumlah iterasi yang banyak untuk mencapai konvergensi yang diinginkan. Hal ini merupakan konsekuensi dari tidak digunakannya informasi turunan yang lebih tinggi untuk memantau sensitivitas fungsi pseudo-obyektif terhadap perubahan variabel perancangan. Tidak adanya informasi turunan yang digunakan akan menyebabkan pemilihan arah langkah perubahan  $\mathbf{S}$  cenderung sembarang atau acak.

Untuk mengatasi kelemahan ini, metode optimasi yang dikembangkan dalam penelitian ini memanfaatkan pola distribusi energi regangan pada setiap elemen pelat dalam penentuan vektor  $\mathbf{S}$ . Penggunaan distribusi energi regangan sebagai dasar penentuan  $\mathbf{S}$  didasarkan pada kenyataan bahwa fenomena redaman berkaitan dengan suatu disipasi energi. Jadi, redaman dapat dibayangkan sebagai tempat menampung atau meredam energi getaran. Semakin besar energi getaran suatu elemen maka untuk meredamnya dibutuhkan peredam yang semakin besar. Pertimbangan lain dari penggunaan energi regangan adalah karena besaran ini mudah diperoleh dan umumnya sudah dihitung dan tersedia dalam analisa elemen hingga dengan piranti lunak standar yang sudah ada di pasaran.

Strategi di atas dapat diwujudkan antara lain dengan menentukan energi regangan rata-rata dari seluruh elemen pelat. Elemen dengan energi regangan di bawah nilai rata-rata akan mengalami pengurangan ketebalan material viskoelastik. Elemen dengan energi regangan sama dengan energi regangan rata-rata tidak mengalami perubahan ketebalan, sedangkan elemen dengan energi regangan di atas rata-rata akan mengalami penambahan ketebalan material viskoelastik. Strategi ini secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut

$$s_j = \frac{u_j - \bar{u}}{u_{\max}}, \quad j = 1, n \quad (39)$$

dengan

$s_j$  : komponen vektor langkah  $\mathbf{S}$  yang ke  $j$

$u_j$  : energi regangan elemen ke  $j$

$n$  : jumlah elemen total dalam struktur

$\bar{u} = \frac{\sum_{j=1}^n u_j}{n}$  : energi regangan rata-rata ekemen

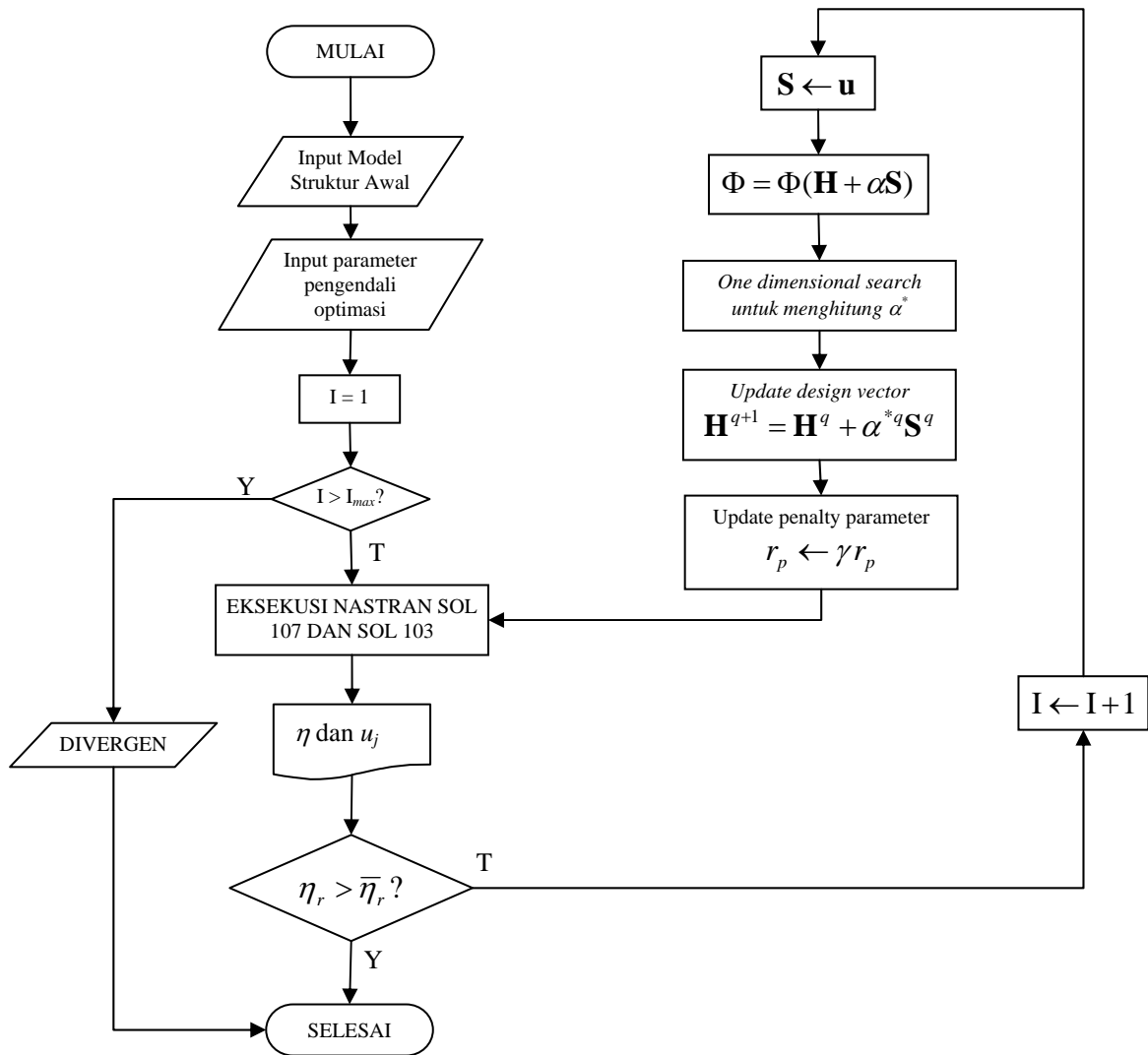
$u_{\max} = \max\{u_j\}$  : nilai maksimum dari energi regangan

Dengan menggunakan Persamaan (38) dan (39), maka fungsi pseudo objektif pada Persamaan (37) dapat dituliskan sebagai fungsi dengan hanya satu perubah, yaitu  $\Phi = \Phi(\alpha)$ . Fungsi satu perubah ini kemudian dapat diminimumkan dengan suatu metoda yang baku, misalnya *Golden Section* atau pendekatan polinomial untuk memperoleh  $\alpha^*$ . Proses pencarian nilai  $\alpha^*$  dikenal dengan proses pencarian arah satu dimensi (*one dimensional search*).

Setelah besar nilai  $\alpha^*$  diperoleh, selanjutnya distribusi optimum ketebalan material viskoelastik dapat di-*update* menggunakan Persamaan (38). Penggunaan Persamaan (38) membutuhkan nilai awal dari vektor  $\mathbf{H}$ . Pemberian nilai awal ini merepresentasikan keadaan struktur awal yang akan dioptimumkan. Secara diagramatik, pada Gambar 6 diberikan diagram alir dari prosedur penyelesaian persoalan optimasi yang telah dijelaskan di atas.

Secara ringkas strategi proses optimasi yang diusulkan dalam penelitian ini dapat dijelaskan dalam tiga tahapan berikut.

1. Penentuan sifat ekuivalen pelat komposit tunggal. Tahap ini sangat penting, agar karakteristik material dapat diinputkan ke dalam piranti lunak yang telah ada.
2. Menghitung redaman pelat komposit tunggal dengan metode elemen hingga.
3. Melakukan optimasi pelapisan material viskoelastik dengan menggunakan metode yang dijelaskan pada sub-judul 4.



**Gambar 6.** Diagram alir penyelesaian persoalan optimasi

Ketiga proses di atas dilakukan secara berurutan dan berulang (merupakan proses iteratif) sampai diperoleh suatu nilai redaman yang diinginkan atau sampai batas maksimum jumlah iterasi tercapai. Satu program komputer juga dikembangkan dalam penelitian ini untuk melakukan keseluruhan proses optimasi tersebut. Program komputer yang dikembangkan diberi nama NV 1.0.

Program NVDO 1.0 ini terdiri dari tiga bagian utama yaitu *SOLVER*, *OPTIMIZER*, dan *INTERFACE*.

### 1. SOLVER

Bagian ini berfungsi untuk menghitung besarnya redaman (*loss factor*) pelat komposit dan energi regangan. Program ini memanfaatkan jasa piranti lunak metode elemen hingga standar yang sudah ada, yaitu MSC/NASTRAN, khususnya urutan penyelesaian dengan modul SOL 107 dan SOL 103. Modul SOL 107 digunakan untuk menghitung *loss factor*, sedangkan SOL 103 digunakan untuk menghitung energi regangan elemen.

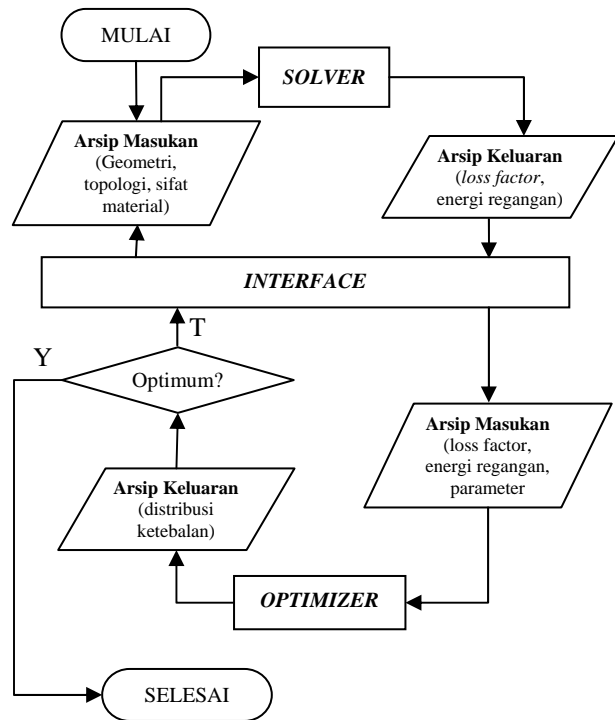
Data masukan utama untuk bagian ini adalah data geometri, topologi, dan sifat material dari struktur yang dianalisis. Keluaran bagian ini adalah besarnya *loss factor* struktur pelat dan distribusi energi regangan tiap elemen pada pelat. Data keluaran ini lalu dikirimkan ke bagian *OPTIMISER* melalui program *INTERFACE*.

### 2. OPTIMIZER

Bagian ini berfungsi untuk melakukan proses optimasi dengan menggunakan metode yang dijelaskan pada sub-judul 4. Data masukan utama untuk bagian ini adalah data keluaran dari *SOLVER* ditambah dengan parameter pengontrol optimasi. Proses optimasi dilakukan dengan metode SUMT dengan menggunakan metode zero order untuk menentukan vektor arah pencarian. Keluaran bagian ini adalah distribusi ketebalan peredam yang baru. Data keluaran akan dikirimkan ke *SOLVER* melalui penghubung untuk memperoleh *loss factor* struktur pelat yang baru. Jika *loss factor* yang baru ini belum memenuhi kendala maka kembali dilakukan proses optimasi hingga semua kendala dapat dipenuhi atau hingga proses iterasi mencapai jumlah maksimumnya, yang berarti proses optimasinya adalah divergen.

### 3. INTERFACE

Selama eksekusi program NVDO 1.0, akan terjadi *loop* antara *SOLVER* dan *OPTIMIZER*. Program *INTERFACE* akan membaca arsip (*file*) keluaran *SOLVER* dan memasukkan kembali nilai-nilai yang diperlukan ke dalam variabel-variabel yang telah disediakan oleh bagian *OPTIMIZER*. Sebaliknya penghubung akan mengambil nilai variabel-variabel keluaran *OPTIMIZER* dan menyusunnya dalam suatu arsip yang dapat dijadikan masukan untuk *SOLVER*. Gambar 7 merepresentasikan proses hubungan antara ketiga bagian dalam Paket Program NVDO 1.0.



Gambar 7. Hubungan antar bagian NVDO 1.0

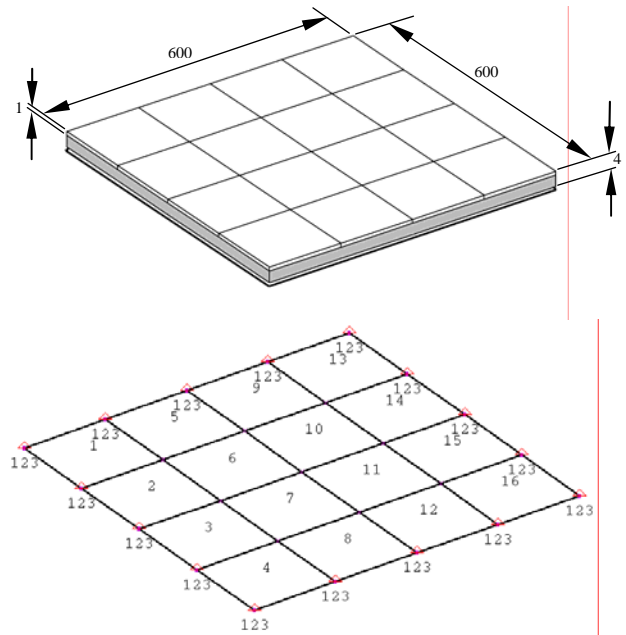
## 5. STUDI KASUS

Beberapa studi kasus optimasi pelapisan material viskoelastik pada struktur pelat elastik akan dicoba diselesaikan dengan menggunakan metode yang telah dikembangkan dalam penelitian ini. Semua studi kasus yang dibahas dilakukan dengan bantuan piranti lunak NVDO 1.0.

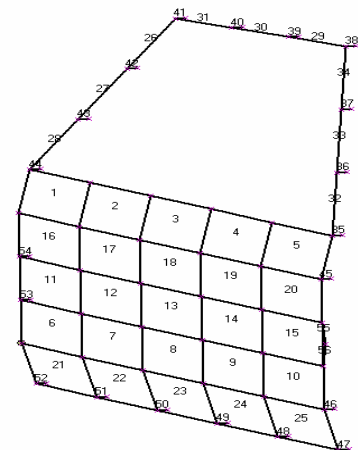
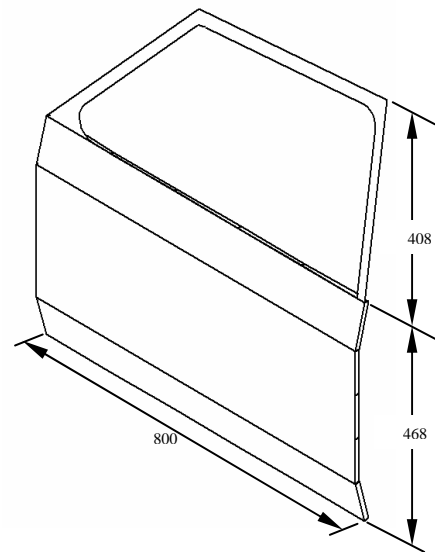
### 5.1 Macam Studi Kasus

Dalam penelitian ini dibahas 3 (tiga) studi kasus yaitu (1) kasus dengan struktur pelat bujur sangkar yang ditumpu sederhana, (2) kasus struktur pelat bujur sangkar yang ditumpu jepit, dan (3) kasus model pintu mobil. Struktur pelat bujur sangkar ditunjukkan pada Gambar (8). Sedangkan untuk kasus pintu mobil diberikan pada Gambar (9). Data material struktur diberikan pada Tabel 2. Untuk setiap studi kasus akan dibagi menjadi empat sub studi kasus, seperti diberikan pada Tabel 3. Pada semua kasus hanya ketebalan material viskoelastik yang diambil sebagai variabel

perancangan. Sedangkan ketebalan material elastik diambil tetap konstan selama proses iterasi.



Gambar 8. Model pelat bujur sangkar beserta penomoran elemen-hingganya



Gambar 9. Model panel pintu mobil beserta penomoran elemen-hingganya

**Tabel 2.** Data sifat-sifat material pada kondisi awal

Sifat material	Material Elastik	Material Viskoe-elastik	Komposit Equivalen	
			Kasus 1 & 2 (tebal awal 4 mm)	Kasus 3 (tebal awal 1 mm)
Modulus Elastisitas $E$ (daN/mm <sup>2</sup> )	7000	20	2971,8	6050,35
Berat Jenis $\rho$ (daN/mm <sup>3</sup> )	2,700E-6	1,750E-6	2,462E-6	2,654E-6
Loss factor $\eta$	0,00	0,50	3,14E-3	2,10E-4

**Tabel 3.** Kasus pada setiap studi kasus

Struktur	No. Kasus	Obyektif	Kendala
Pelat bujur sangkar ditumpu sederhana pada keempat sisinya	1A	Maksimumkan sifat redaman $\eta$ pada modulus getar pertama	Berat peredam tetap $W_r = W_{r0} = \text{konstan}$
	1B	Maksimumkan sifat redaman $\eta$ pada 5 modulus getar pertama	Berat peredam tetap $W_r = W_{r0} = \text{konstan}$
	1C	Minimumkan berat peredam $W_r$ pada modulus getar pertama	sifat redaman tetap $\eta = \eta^* = \text{konstan}$
	1D	Minimumkan berat peredam $W_r$ pada 5 modulus getar pertama	sifat redaman tetap $\eta = \eta^* = \text{konstan}$
Pelat bujur sangkar dijepit pada keempat sisinya	2A	Maksimumkan sifat redaman $\eta$ pada modulus getar pertama	Berat peredam tetap $W_r = W_{r0} = \text{konstan}$
	2B	Maksimumkan sifat redaman $\eta$ pada 5 modulus getar pertama	Berat peredam tetap $W_r = W_{r0} = \text{konstan}$
	2C	Minimumkan berat peredam $W_r$ pada modulus getar pertama	sifat redaman tetap $\eta = \eta^* = \text{konstan}$
	2D	Minimumkan berat peredam $W_r$ pada 5 modulus getar pertama	sifat redaman tetap $\eta = \eta^* = \text{konstan}$
Panel pintu mobil	3A	Maksimumkan sifat redaman $\eta$ pada modulus getar pertama	Berat peredam tetap $W_r = W_{r0} = \text{konstan}$
	3B	Maksimumkan sifat redaman $\eta$ pada 5 modulus getar pertama	Berat peredam tetap $W_r = W_{r0} = \text{konstan}$
	3C	Minimumkan berat peredam $W_r$ pada modulus getar pertama	sifat redaman tetap $\eta = \eta^* = \text{konstan}$
	3D	Minimumkan berat peredam $W_r$ pada 5 modulus getar pertama	sifat redaman tetap $\eta = \eta^* = \text{konstan}$

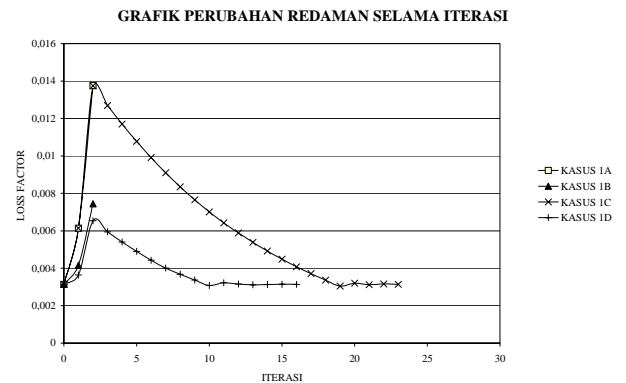
### 5.2 Hasil-hasil Optimasi

Hasil optimasi dari berbagai kasus yang dibahas disajikan pada Gambar 10 dan 11. Gambar 10 menampilkan grafik perubahan *loss factor* struktur selama proses iterasi. Sedangkan pada Gambar 11 ditampilkan grafik perubahan berat peredam selama proses iterasi.

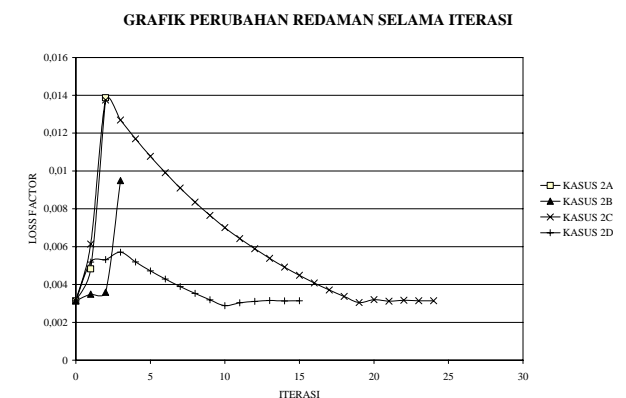
Berdasarkan grafik pada Gambar 10 dan 11 dapat dikatakan bahwa karakteristik konvergensi dari metode optimasi yang dibuat cukup stabil. Kasus dengan fungsi objektif memaksimalkan sifat redaman (kasus A dan B) memiliki laju konvergensi yang lebih cepat dibandingkan dengan kasus dengan fungsi objektif meminimumkan berat redaman (kasus C dan D). Hal ini memberikan indikasi bahwa kasus optimasi yang meminimumkan pemakaian material viskoelastik untuk mendapatkan suatu nilai redaman struktur tertentu relatif

lebih mudah dilakukan jika dibandingkan dengan kasus optimasi di mana diinginkan untuk mencapai nilai redaman maksimum dengan mempertahankan berat total material viskoelastik tetap sama.

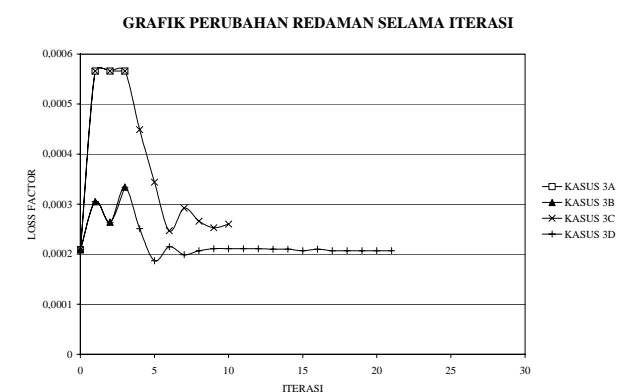
Pada Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6 disajikan hasil numerik serta sketsa geometri dan topologi struktur setelah optimasi masing-masing untuk kasus 1, kasus 2, dan kasus 3.



(a) Kasus 1

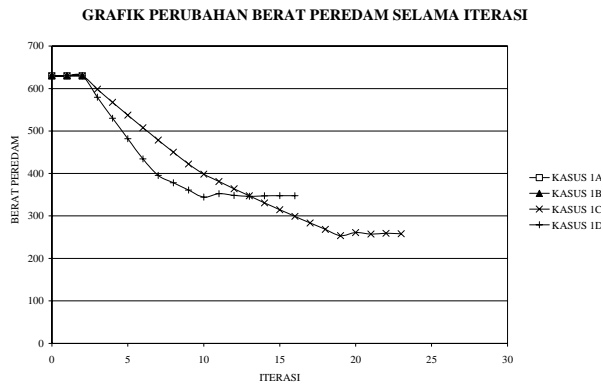


(b) Kasus 2

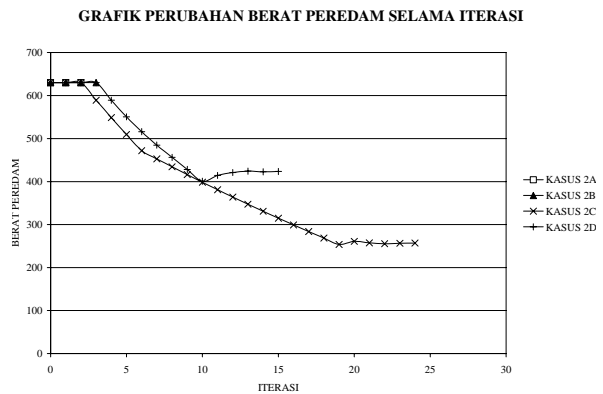


(c) Kasus 3

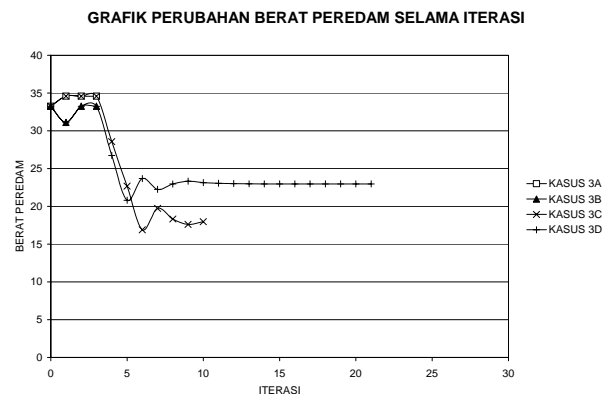
**Gambar 10.** Grafik perubahan nilai *loss factor* selama proses iterasi



(a) Kasus 1



(b) Kasus 2



(c) Kasus 3

**Gambar 11.** Grafik perubahan berat material peredam

**Tabel 4.** Hasil optimasi untuk studi kasus 1

Kasus	Ringkasan Hasil Optimasi	Sketsa distribusi lapisan material viskoelastik (tidak berskala)
1A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = berat akhir = 630 gram</li> <li>Redaman awal = <math>3,14E-3</math></li> <li>Redaman akhir = <math>13,75E-3</math></li> <li>Pengurangan berat = 0,0%</li> <li>Penambahan redaman = 337,8%</li> </ul>	

1B	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = berat akhir = 630 gram</li> <li>Redaman awal = <math>3,14E-3</math></li> <li>Redaman akhir = <math>7,44E-3</math></li> <li>Pengurangan berat = 0,0%</li> <li>Penambahan redaman = 137,1%</li> </ul>	
1C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = 630 gram</li> <li>Berat akhir = 257 gram</li> <li>Redaman awal = redaman akhir = <math>3,14E-3</math></li> <li>Pengurangan berat = 59,2%</li> <li>Penambahan redaman = 0,0%</li> </ul>	
1D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = 630 gram</li> <li>Berat akhir = 348 gram</li> <li>Redaman awal = redaman akhir = <math>3,14E-3</math></li> <li>Pengurangan berat = 44,8%</li> <li>Penambahan redaman = 0,0%</li> </ul>	

**Tabel 5.** Hasil optimasi untuk studi kasus 2

Kasus	Ringkasan Hasil Optimasi	Sketsa distribusi lapisan material viskoelastik (tidak berskala)
2A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = berat akhir = 630 gram</li> <li>Redaman awal = <math>3,14E-3</math></li> <li>Redaman akhir = <math>13,87E-3</math></li> <li>Pengurangan berat = 0,0%</li> <li>Penambahan redaman = 341,8%</li> </ul>	
2B	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = berat akhir = 630 gram</li> <li>Redaman awal = <math>3,14E-3</math></li> <li>Redaman akhir = <math>9,49E-3</math></li> <li>Pengurangan berat = 0,0%</li> <li>Penambahan redaman = 202,1%</li> </ul>	
2C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = 630 gram</li> <li>Berat akhir = 258 gram</li> <li>Redaman awal = redaman akhir = <math>3,14E-3</math></li> <li>Pengurangan berat = 59,0%</li> <li>Penambahan redaman = 0%</li> </ul>	
2D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = 630 gram</li> <li>Berat akhir = 424 gram</li> <li>Redaman awal = redaman akhir = <math>3,14E-3</math></li> <li>Pengurangan berat = 32,8%</li> <li>Penambahan redaman = 0,0%</li> </ul>	

**Tabel 6.** Hasil optimasi untuk studi kasus 3

Ka sus	Ringkasan Hasil Optimasi	Sketsa Distribusi Optimum Peredam (tidak berskala)
3A	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = berat akhir = 33,25 gram</li> <li>Redaman awal = <math>2,10E-4</math></li> <li>Redaman akhir = <math>5,7E-4</math></li> <li>Pengurangan berat = 0%</li> <li>Penambahan redaman = 171,4%</li> </ul>	
3B	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = berat akhir = 33,25 gram</li> <li>Redaman awal = <math>2,10E-4</math></li> <li>Redaman akhir = <math>3,3E-4</math></li> <li>Pengurangan berat = 0%</li> <li>Penambahan redaman = 57,1%</li> </ul>	
3C	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = 33,25 gram</li> <li>Berat akhir = 18 gram</li> <li>Redaman awal = <math>2,10E-4</math></li> <li>Redaman akhir = <math>2,10E-4</math></li> <li>Pengurangan berat = 46%</li> <li>Penambahan redaman = 0 %</li> </ul>	
3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berat awal = 33,25 gram</li> <li>Berat akhir = 23 gram</li> <li>Redaman awal = <math>2,10E-4</math></li> <li>Redaman akhir = <math>2,10E-4</math></li> <li>Pengurangan berat = 30,9%</li> <li>Penambahan redaman = 0%</li> </ul>	

Berdasarkan hasil yang diberikan pada Table 4, Tabel 5, dan Tabel 6, dapat dilihat bahwa pola distribusi optimum ketebalan material viskoelastik dipengaruhi oleh jenis tumpuan pada struktur serta jumlah modus getar yang diperhitungkan. Pada kasus 1, di mana tumpuan struktur berupa tumpuan sederhana pada ke 4 sisinya, lokasi penempatan peredam paling efektif terletak pada bagian tengah pelat. Sedangkan untuk kasus 2, di mana tumpuan struktur berupa tumpuan jepit pada ke 4 sisinya, lokasi penempatan peredam paling efektif terletak pada bagian tengah pelat dan pada bagian sudut pelat. Hal serupa juga terjadi pada kasus 3.

## 6. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil-hasil yang telah diperoleh dari aplikasi metoda optimasi yang dikembangkan dalam penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Metoda optimasi yang telah dikembangkan, secara umum dapat bekerja sesuai dengan tujuan awal, yaitu untuk memperoleh distribusi optimum dari lapisan material viskoelastik pada struktur elastik.

Berdasarkan studi kasus yang dibahas, diperoleh adanya peningkatan *loss factor* sampai dengan 300% atau lebih dan penghematan material peredam sampai sekitar 60%.

- Distribusi optimum lapisan peredam viskoelastik dipengaruhi baik oleh jenis tumpuan pada struktur maupun pada jumlah modus getar yang dilibatkan dalam analisis. Bagian struktur dengan densitas energi regangan yang tinggi sangatlah efektif sebagai lokasi penempatan lapisan material viskoelastik.
- Secara umum dapat dikatakan bahwa metoda optimasi yang dikembangkan dapat diterapkan baik untuk struktur yang sederhana maupun struktur yang kompleks. Hal ini dimungkinkan dengan adanya bantuan dari aplikasi piranti lunak metoda elemen hingga yang sudah baku, baik untuk menghitung karakteristik dinamik struktur maupun perhitungan energi regangan sebagai representasi sensitivitas struktur.

## DAFTAR PUSTAKA

- I.W. Suweca, B. Budiwantoro, Gatot Santoso, Djoeli Satrijo, Optimasi Pelapisan Material Viskoelastik, *Jurnal Mesin*, XI, 1, 1996.
- D. Ross, E.E Ungar dan E.M Kerwin, *Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic Laminae*, Structural Damping, ASME, New York, NY, 1959.
- M. Carfagni, P. Citti, F. Palloni, M. Pierini dan H. Bloemhof, *Application of Simplified Method for The Dynamic Simulation of Multilayer Panels*, Proceedings of 18<sup>th</sup> Modal Analysis Conference, San Antonio, TX. 2000.
- M. Carfagni, P. Citti, F. Palloni, dan M. Pierini, *An ANSYS-based Finite Element Method For The Dynamic Simulation of Multilayer Panels*, Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Universita di Firenze, Firenze, Italy, 2000.
- A. Yildiz dan K. Stevens, Optimum Thickness Distribution of Unconstrained Viscoelastic Damping Layer Treatments for Plates, *Journal of Sound and Vibration*, 103(2), 183-199, Academic Press Inc, London, 1985
- M.A. Trindade, A. Benjeddou dan R. Ohayon, Modeling of Frequency Dependent Viscoelastic Materials for Active-Passive Vibration Damping, *Journal of Vibration and Acoustics*, 122, 169-174, ASME, 2000.
- G.N. Vanderplaats, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: With Applications*, McGraw-Hill, New York, 1984.
- B. C. Nakra, Structural Dynamic Modification Using Additive Damping, *Sādhanā*, 25, 3, 277-289, India, 2000.
- A. Baz dan J. Ro, Optimum Design and Control of Active Constrained Layer Damping, *Transactions of the ASME*, 117, 135-144, ASME, 1995.
- A.D. Nashif, D.I.G. Jones dan J.P. Henderson, *Vibration Damping*, John Willey & Sons, 1985.

11. S. Singiresu Rao, *Mechanical Vibration*, Purdue University, Addison Wesley Publishing Company.
12. D.J. Ewins, *Modal Testing Theory and Practice*, John Willey & Sons, 1984.
13. D. Robert Cook, *Concept and Applications of Finite Element Analysis*, University of Wisconsin-Madison, John Willey & Sons, 1981
14. M.A. Gockel, *MSC/NASTRAN Handbook for Dynamic Analysis*, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1983.
15. Ken Blakely, *Basic Dynamic Analysis, MSC/NASTRAN User's Guide*, The MacNeal-Schwendler Corp, 1993.
16. The MSC, *MSC/NASTRAN Dynamic Analysis, Seminar Notes*, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1995.
17. The MSC, *MSC/NASTRAN Design Sensitivity and Optimization, Seminar Notes*, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1995.
18. Louis Komzsik, *Numerical Methods, MSC/NASTRAN User's Guide*, The MacNeal-Schwendler Corporation, 1983.