

APLIKASI METODE OPTIMASI STRUKTUR UNTUK MENAIKKAN KEKAKUAN PINTU AIR G2517

I Wayan Suweca ¹⁾, Satryo Soemantri B. ¹⁾, Suhariyono ²⁾

1) Lab. Perancangan Mesin, ITB

2) Mahasiswa Program Pasca Sarjana Jurusan Teknik Mesin ITB

Ringkasan

Dalam operasinya struktur pintu air, khususnya pintu air tipe Slide Gate, seringkali mengalami getaran yang cukup besar, terutama pada saat awal pintu air tersebut dibuka. Getaran yang timbul pada pintu air ini diduga diakibatkan oleh karena frekuensi aliran air mendekati frekuensi natural dari struktur. Salah satu upaya untuk menghilangkan terjadinya resonansi pada struktur pintu air tersebut adalah dengan melakukan modifikasi pada disain awal dari struktur tersebut. Untuk melakukan modifikasi tersebut, dalam makalah ini diterapkan metode optimasi struktur dengan tujuan menaikkan frekuensi natural semaksimal mungkin dengan menjaga berat keseluruhan struktur masih tetap sama. Proses optimasi tersebut dilakukan dengan bantuan paket program ANSYS 5.4.

Kata kunci : optimasi struktur, kekakuan, kekuatan, vibrasi, resonansi.

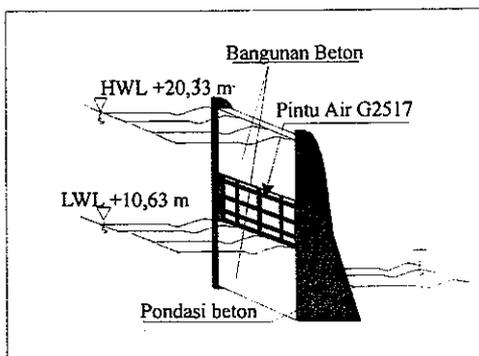
Abstract

During its operation, Slide-Water-Gate structure, receive an excessive vibration due to resonance effect caused by water current. To avoid this undesirable effect, in this paper we propose the application of structural optimization method to modify the initial structure. The goal of this optimization is to maximize the first natural frequencies so that the resonance effect can be minimized and the weight of structure is remained constant. The optimization is conducted by using the ANSYS 5.4 finite element program package.

Keywords : structural optimization, rigidity, strength, vibration, resonance.

1. PENDAHULUAN

Pintu air adalah salah satu hasil disain struktur yang terdiri dari susunan pelat dan pengkaku (*stiffner*), seperti ditunjukkan pada gambar 1. Pemberian pengkaku tersebut dimaksudkan untuk mendapatkan suatu tingkat kekuatan dan kekakuan (*strength and rigidity*) yang tertentu. Penggunaan pengkaku ini selain untuk mendapatkan struktur yang kuat dan ringan, juga dimaksudkan untuk memudahkan proses produksi maupun proses modifikasi jika terjadi perubahan disain.



Gambar 1 Struktur pintu air jenis Slide Gate

Persoalan yang sering timbul di lapangan adalah bahwa pintu air yang telah didisain, dalam operasinya, seringkali mengalami getaran yang cukup besar, terutama pada saat awal pintu air tersebut dibuka. Getaran yang timbul pada pintu air ini diduga diakibatkan oleh karena frekuensi aliran air yang ada dibawahnya mendekati frekuensi natural dari struktur pintu air tersebut. Fenomena ini sering terjadi pada pintu air jenis *Slide Gate* dan jarang sekali terjadi pada jenis *Radial Gate*. Frekuensi aliran air sangat tergantung dari laju arus air dari sungai di mana pintu air tersebut dipasang. Data mengenai frekuensi aliran sungai belum ada sampai penelitian ini dilakukan.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mereduksi atau bahkan menghilangkan efek getaran yang berlebih ini adalah dengan menghindarkan terjadinya resonansi melalui peningkatan frekuensi natural struktur pintu air tersebut setinggi-tingginya. Upaya ini dilakukan dengan memodifikasi disain struktur seoptimum mungkin melalui aplikasi metode optimasi struktur.

Metode optimasi struktur adalah suatu cara untuk mendapatkan sebuah struktur yang optimum sesuai dengan kriteria yang telah ditentukan. Karakteristik struktur yang ingin dioptimumkan diperoleh dengan memvariasikan beberapa dimensi dan atau penampang struktur. Proses optimasi tersebut umumnya dilakukan

dengan melibatkan beberapa kendala yang harus diperhitungkan dalam analisis kekuatan dan kekakuan struktur tersebut.

Dalam melakukan modifikasi struktur pintu air sedapat mungkin dihindarkan melakukan perubahan total disain struktur. Hal ini, karena selain mahal juga membutuhkan waktu yang relatif lebih lama jika dibandingkan dengan melakukan modifikasi secara parsial. Untuk menaikkan kekakuan struktur pintu air, memodifikasi posisi dan jenis pengkaku lebih mudah dan lebih murah dilakukan dibandingkan dengan memodifikasi bagian struktur yang lain.

Pengkajian modifikasi struktur secara parsial untuk menaikkan kekakuan struktur tersebut telah banyak dilakukan. Misalnya pengaturan jarak antara satu pengkaku dengan yang lain secara optimum dapat menaikkan frekuensi natural struktur, [5-6].

Proses modifikasi kekakuan struktur untuk menaikkan frekuensi natural struktur pintu air dalam penelitian ini, dilakukan dengan mencari kombinasi yang optimum dari jarak antar pengkaku dan bentuk penampang pengkaku tersebut. Proses modifikasi ini dilakukan dengan menggunakan paket program ANSYS 5.4. Tujuan utama yang ingin dicapai adalah mengetahui sejauh mana frekuensi natural struktur pintu air jenis G2517 dapat dinaikkan, dan jenis pengkaku yang bagaimana yang mempunyai kontribusi besar untuk menaikkan frekuensi natural.

2. DASAR TEORI

Tiga tahapan utama yang harus dilakukan dalam memformulasikan suatu persoalan optimasi adalah pertama : menentukan variabel disain, yaitu variabel yang akan divariasikan selama proses optimasi untuk mendapatkan struktur yang optimum. Tahap kedua : menentukan fungsi objektif, yaitu suatu fungsi yang merepresentasikan karakteristik dari struktur yang ingin dioptimumkan. Tahap ketiga : menentukan berbagai kendala yang harus diperhitungkan dalam proses optimasi tersebut.

Secara matematis ketiga langkah tersebut dapat dinyatakan dalam formulasi sbb.

$$\begin{aligned} \text{Minimumkan} & : F(\mathbf{X}) \\ \text{dengan kendala} & : g_j(\mathbf{X}) \leq 0 \\ & : h_k(\mathbf{X}) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$$

di mana

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T : \text{vektor variabel disain} \\ F(\mathbf{X}) & : \text{fungsi objektif} \\ g_j(\mathbf{X}), \quad j &= 1, \dots, p : \text{fungsi kendala ketaksamaan} \\ h_k(\mathbf{X}), \quad k &= 1, \dots, q : \text{fungsi kendala kesamaan} \\ x_i^U & : \text{batas atas disain variabel ke-} i \\ x_i^L & : \text{batas bawah disain variabel ke-} i \end{aligned}$$

Berbagai metode penyelesaian persoalan optimasi pada persamaan (1) di atas diberikan dalam berbagai buku tentang metode optimasi [4]. Salah satu metode yang dikenal cukup luas adalah metode SUMT (*Sequential Unconstrained Minimization Techniques*).

Dalam metode SUMT, persoalan optimasi dengan kendala seperti pada persamaan (1) ditransformasikan ke dalam bentuk persoalan tanpa kendala dengan memperkenalkan fungsi pseudo-objektif yang diperoleh dengan mengkombinasikan fungsi objektif awal dengan fungsi kendala melalui pendefinisian *penalty function*. Metode SUMT ini digunakan dalam paket program ANSYS 5.4.

Secara matematis formulasi persoalan optimasi pada metode SUMT dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$Q(x, q) = \frac{F}{F_0} + \sum_{i=1}^n P_x(x_i) + r_p \left[\sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) \right] \quad (2)$$

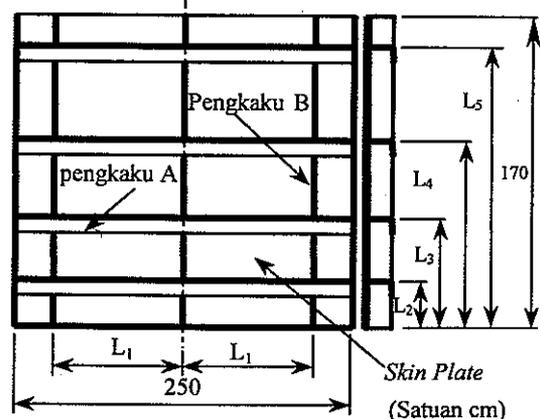
dimana :

- Q : fungsi pseudo-objektif tanpa kendala
- P_x : *exterior penalty function* pada disain variabel
- F : fungsi objektif awal yang diminimumkan.
- F_0 : referensi nilai fungsi objektif, diperoleh dengan jalan memasukkan nilai awal variabel disain.
- r_p : *penalty scalar*, yang diberikan secara *sequential* (dari kecil membesar) selama proses iterasi.
- P_g, P_h : *extended-interior penalty function* yang diterapkan terhadap fungsi kendala

3. DISAIN PINTU AIR YANG OPTIMUM

Bagian pintu air yang akan dimodifikasi adalah bagian pengkakunya saja sedangkan bagian *skin plate*-nya dibuat tidak berubah. Hal ini dilakukan karena faktor kemudahan dalam melakukan modifikasi dan pengadaan komponen-komponennya.

Bentuk pintu air jenis G2517 ini dapat dilihat pada gambar 2 berikut ini.



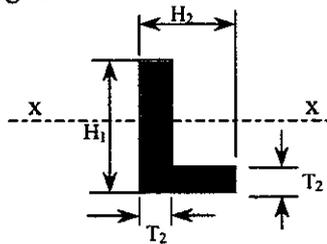
Gambar 2 Pintu air jenis G2517

Dimensi awal untuk jarak antara pengkaku yang belum diberikan pada gambar adalah sebagai berikut :

- jarak $L_1 = 110$ cm
- jarak $L_2 = 10$ cm
- jarak $L_3 = 48$ cm
- jarak $L_4 = 98$ cm
- jarak $L_5 = 162$ cm

Bentuk pengkaku yang digunakan ada dua macam yaitu pengkaku A berbentuk profil L dan pengkaku B berbentuk profil I, seperti ditunjukkan pada gambar 3 dan 4 berikut ini.

Bentuk pengkaku A



Gambar 3 Bentuk pengkaku A

di mana :

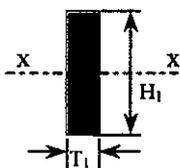
- H_1 = tinggi pengkaku A
- H_2 = lebar pengkaku A
- T_2 = tebal pengkaku A

Volume total material pengkaku A dapat dihitung sebagai berikut :

$$v_A = \sum_{i=1}^n [H_1 T_2 + (H_2 - T_2) T_2]_i L_i \quad (3)$$

di mana L_i adalah panjang elemen hingga ke- i

Bentuk pengkaku B



Gambar 4 Bentuk pengkaku B

di mana

- H_1 = tinggi pengkaku B
- T_1 = tebal pengkaku B

Besarnya volume material pengkaku ini adalah :

$$v_B = \sum_{i=1}^n [H_1 T_1]_i L_i \quad (4)$$

Volume total material pengkaku diperoleh dengan menjumlahkan volume material kedua jenis pengkaku tersebut, yaitu $V = v_A + v_B$.

3.1. Penentuan Variabel Disain

Seperti telah disebutkan terdahulu, bahwa hanya parameter dimensi yang berhubungan dengan pengkaku saja yang diperhitungkan.

Variabel disain yang diambil dan digunakan untuk mendefinisikan berbagai kasus adalah sebagai berikut :

$$\mathbf{X} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Kasus 1 : } H_1, H_2, T_1, T_2 \\ \text{Kasus 2 : } H_1, H_2, L_1, L_2, L_3, L_4 \\ \text{Kasus 3 : } H_1, H_2, T_1, T_2, L_1, L_2, L_3, L_4 \end{array} \right\} \quad (5)$$

Pemilihan variabel disain untuk berbagai kasus tersebut di atas dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh dari berbagai dimensi pengkaku tersebut terhadap hasil optimasi yang dihasilkan.

3.2. Penentuan Fungsi Objektif

Tujuan optimasi struktur dalam penelitian ini adalah untuk menaikkan beberapa frekuensi natural dasar dari struktur pintu air semaksimal mungkin dengan menjaga berat total pengkaku tetap seperti struktur awal. Berdasarkan tujuan tersebut, maka fungsi objektif dari persoalan optimasi dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\text{Maksimumkan : } F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N (f_i - f_{oi}) \quad (6)$$

di mana

- f_i : frekuensi natural struktur ke- i setelah optimasi
- f_{oi} : frekuensi ke- i sebelum optimasi
- N : jumlah frekuensi natural yang dilibatkan

3.3. Penentuan Fungsi Kendala

Untuk dapat mencapai tujuan optimasi struktur pintu air seperti yang dijelaskan di atas, maka fungsi-fungsi kendala yang harus diambil adalah :

$$g_j(\mathbf{X}) : V_a(\mathbf{X}) - V_b(\mathbf{X}) \leq 0 \quad (7)$$

di mana :

- V_a : volume total material pengkaku setelah proses optimasi
- V_b : volume total material pengkaku sebelum proses optimasi

Untuk keperluan praktis, selain fungsi kendala tersebut, maka variabel disain juga diberikan kendala batas (*side constraint*) sebagai berikut :

$$0,5 < T_1, T_2 < 3 \text{ cm}$$

$$5 < H_1, H_2 < 20 \text{ cm}$$

$$55 < L_1 < 120 \text{ cm}$$

$$8 < L_2 < 20 \text{ cm}$$

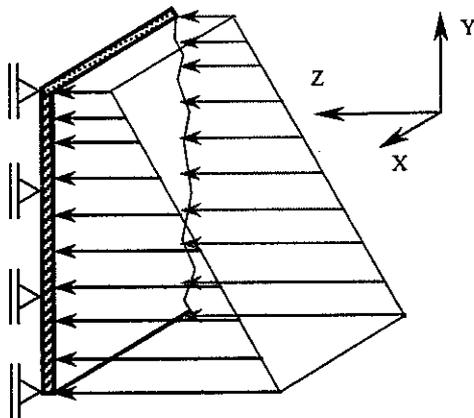
$$28 < L_3 < 68 \text{ cm}$$

$$68 < L_4 < 118 \text{ cm}$$

Penentuan *side constraint* untuk masing-masing variabel disain tersebut dilakukan dengan memperhatikan faktor bentuk dan pertimbangan praktis, seperti misalnya pelat yang tipis akan sulit untuk dilas karena cenderung bengkok oleh panas akibat proses pengelasan, dsb.

3.4. Analisis Statik Struktur Pintu Air G2517

Untuk mendapatkan struktur yang memiliki kekakuan dan kekuatan yang diinginkan, maka setelah dilakukan proses optimasi perlu dilakukan analisis kekuatan statik pada struktur pintu air yang dihasilkan dari proses optimasi. Model beban akibat tekanan hidrostatik seperti ditunjukkan pada Gb. 5.



Gambar 5 Model beban statik pada pintu air

Hasil distribusi tegangan yang diperoleh dari analisis statik setelah optimasi dibandingkan dengan struktur awal.

Data material yang digunakan adalah jenis baja karbon dengan kode material SS400 dengan data-data sebagai berikut:

- Modulus Elastisitas (E) : $2,039 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
- Rasio poisson (ν) : 0,3
- Kekuatan luluh : 2.400 kgf/cm^2
- Kekuatan tarik : $40.000 - 42.000 \text{ kgf/cm}^2$
- Berat Jenis : $7,83 \cdot 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3$

4. ANALISIS HASIL NUMERIK

4.1. Analisis Hasil Optimasi

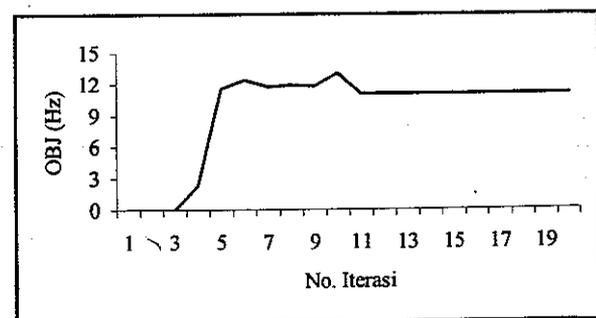
Pada Tabel 1 diberikan harga-harga fungsi objektif untuk ketiga kasus (kasus 1, kasus 2 dan kasus 3) selama proses iterasi berlangsung.

Tabel 1 Harga fungsi objektif

No. Iterasi	Fungsi objektif (Hz)		
	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	1,3457	0,0000	1,4349
3	3,3016	0,0000	6,0228
4	2,8301	2,3475	5,1587
5	2,8300	11,5840	5,1587
6	2,8300	12,4030	5,1586
7	2,8299	11,7470	5,1586
8	2,8299	11,9090	5,1585
9	2,8299	11,8180	5,1585
10	2,8299	13,0730	5,1585
11	2,8299	11,0770	5,1584
12	2,8299	11,0760	5,1584
13	2,8299	11,0760	5,1584
14	2,8299	11,0760	5,1583
15	2,8299	11,0760	5,1583
16	2,8299	11,0760	5,1583
17	2,8298	11,0760	5,1582
18	2,8298	11,0760	5,1582
19	2,8298	11,0760	5,1581
20	2,8298	11,0750	5,1581

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa harga fungsi objektif yang paling besar diperoleh pada kasus 2. Kasus 1 dan kasus 3 memperlihatkan laju konvergensi yang lebih cepat (setelah 5 iterasi) dibandingkan dengan kasus 2 (setelah iterasi ke 11). Kasus 1 dan kasus 3 masing-masing melibatkan 4 dan 8 variabel disain, sedangkan kasus 2 hanya melibatkan 6 buah variabel disain seperti diberikan pada persamaan (5). Perbedaan nilai fungsi objektif yang dicapai dan perbedaan laju konvergensi pada ketiga kasus di atas menunjukkan adanya pengaruh dari penentuan jenis dan jumlah variabel disain dalam suatu proses optimasi. Ditinjau dari tujuan optimasi yaitu menaikkan frekuensi natural struktur yang setinggi-tingginya, maka kasus 2 memberikan hasil yang paling baik.

Pada gambar 6 ditunjukkan evolusi harga fungsi objektif selama proses iterasi untuk kasus 2. Sedangkan pada tabel 2 diberikan perubahan volume total pengkaku selama proses iterasi. Untuk semua kasus volume ini diinginkan lebih kecil atau sama dengan volume awal.

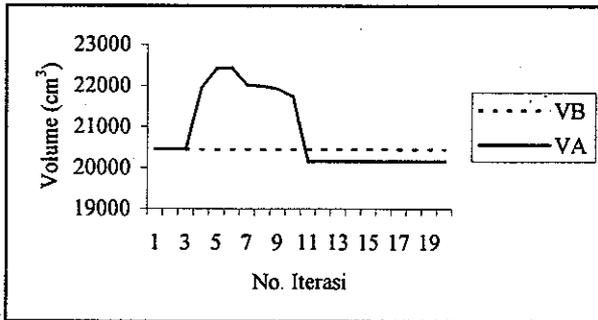


Gambar 6 Evolusi harga fungsi objektif (Kasus 2)

Tabel 2 Volume (cm³) total pengkaku

No. Iterasi	Vb (awal)	Va (akhir)		
		Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
1	20444	20444	20444	20444
2	20444	21883	20444	21930
3	20444	20923	20444	21389
4	20444	20251	21954	20176
5	20444	20250	22426	20176
6	20444	20250	22441	20176
7	20444	20250	22029	20176
8	20444	20250	21997	20176
9	20444	20250	21923	20176
10	20444	20250	21741	20176
11	20444	20250	20158	20176
12	20444	20250	20158	20176
13	20444	20250	20158	20176
14	20444	20250	20158	20176
15	20444	20250	20158	20176
16	20444	20250	20158	20176
17	20444	20250	20158	20176
18	20444	20250	20158	20176
19	20444	20250	20158	20176
20	20444	20250	20158	20176

Dalam tabel 2 tersebut di atas dapat dilihat bahwa volume akhir untuk semua kasus menjadi lebih kecil dari volume awal. Volume akhir paling kecil diperoleh untuk kasus 2. Evolusi volume total pengkaku selama proses iterasi untuk kasus 2 ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7 Perubahan volume pengkaku (Kasus 2)

Tabel 3 Harga variabel disain

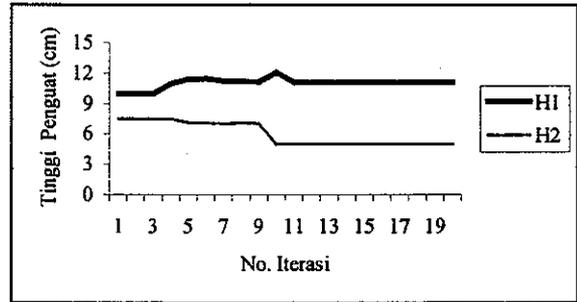
Variabel disain	Nilai						
	Awal	Kasus 1		Kasus 2		Kasus 3	
		Akhir	%	Akhir	%	Akhir	%
H ₁	10,0	12,54	25,4	11,09	10,1	12,13	21,3
H ₂	7,5	7,30	-2,7	5,00	-33,3	7,44	-0,8
T ₁	0,8	0,72	-10,0	*)	*)	0,74	-7,5
T ₂	0,7	0,50	-28,6	*)	*)	0,50	-28,6
L ₁	110,0	*)	*)	86,53	-21,3	100,87	-8,3
L ₂	10,0	*)	*)	14,01	40,1	10,22	2,2
L ₃	48,0	*)	*)	61,65	28,4	48,490	1,0
L ₄	98,0	*)	*)	113,60	15,9	99,97	2,0
L ₅	162,0	*)	*)	*)	*)	*)	*)

*) tidak berubah (bukan variabel disain)

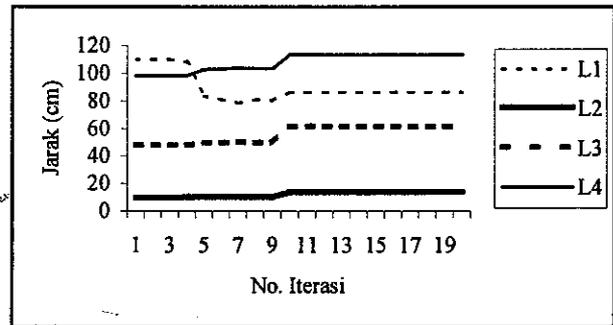
Satuan : cm

Dari tabel 3 dapat dilihat bahwa pada kasus 1 dan kasus 5, variabel H₁ dan T₁ dan memiliki sensitivitas yang besar jika dilihat dari prosentase perubahan dari variabel tersebut antara sesudah dan sebelum optimasi. Sedangkan pada kasus 2, variabel disain yang memiliki sensitivitas yang tinggi adalah H₂, L₁, L₂, dan L₃. Hal ini menunjukkan bahwa macam variabel disain yang dilibatkan dapat mempengaruhi hasil akhir optimasi. Sensitivitas dari variabel disain dapat digunakan sebagai pedoman untuk menentukan variabel disain yang akan digunakan, selain aspek teknologi dan praktis di lapangan.

Pada gambar 8 dan gambar 9 ditunjukkan evolusi perubahan variabel disain yang dilibatkan dalam optimasi pada kasus 2.



Gambar 8 Perubahan tinggi pengkaku (Kasus 2)



Gambar 9 Perubahan jarak antar pengkaku (Kasus 2)

Pada tabel 4 ditunjukkan perubahan frekuensi natural 10 yang pertama dari struktur pintu air untuk ketiga kasus yang dibahas.

Tabel 4 Frekuensi natural (Hz)

Frek. ke	Frek. Awal	Frekuensi Akhir					
		Kasus 1		Kasus 2		Kasus 3	
		Nilai	(%)	Nilai	(%)	Nilai	(%)
f ₁	2,57	2,96	14,91	2,85	10,90	2,98	15,97
f ₂	3,03	3,55	17,37	3,22	6,53	3,50	15,75
f ₃	3,63	3,68	1,56	4,38	20,68	4,02	10,82
f ₄	3,94	4,41	11,92	5,52	39,95	4,40	11,74
F ₅	4,87	5,20	6,64	5,87	20,44	5,43	11,39
f ₆	5,14	5,41	5,11	6,22	20,86	5,46	6,13
f ₇	6,21	6,14	-1,21	6,53	5,06	6,85	10,25
f ₈	6,33	6,54	3,43	7,12	12,48	7,05	11,46
f ₉	6,41	6,75	5,28	9,12	42,39	7,08	10,51
f ₁₀	6,83	7,15	4,80	9,21	34,95	7,34	7,49

Dari tabel 4 dapat dilihat bahwa perubahan frekuensi natural yang paling besar untuk kasus 1 terjadi pada frekuensi f_2 yang besarnya 17,37 % disusul kemudian oleh f_4 yang besarnya 11,92 %. Perubahan frekuensi paling kecil terjadi pada f_3 sebesar 1,56 %.

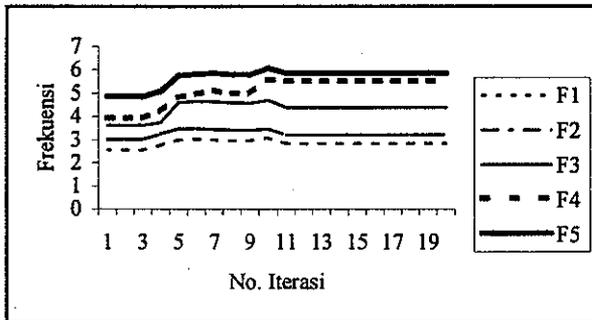
Untuk kasus 2, nilai perubahan frekuensi natural yang paling besar terjadi pada frekuensi f_5 yaitu sebesar 42,39 % yang kemudian disusul frekuensi f_4 sebesar 39,95 % dan yang paling kecil adalah f_2 sebesar 20,68 %.

Sedangkan untuk kasus 3, perubahan frekuensi natural terbesar terjadi pada dua frekuensi yang pertama, yaitu masing-masing sebesar 15,97 % dan 15,75 % yang kemudian disusul oleh frekuensi f_4 sebesar 11,74 %. Evolusi dari perubahan frekuensi natural untuk kasus 2 ditunjukkan pada gambar 10 dan 11.

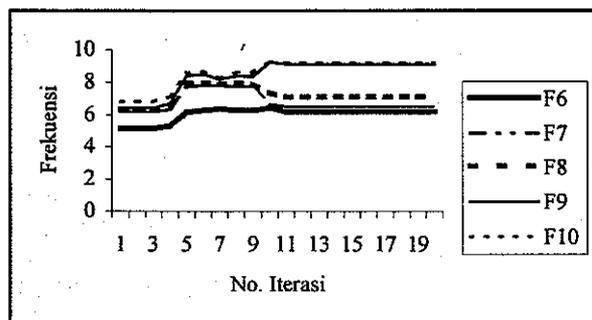
Pada tabel 5 diberikan hasil optimasi yang berupa perubahan frekuensi natural struktur pintu air dengan variabel disain seperti pada kasus 2 tetapi dengan jumlah frekuensi yang dilibatkan lebih sedikit dari sebelumnya, yaitu sebanyak 2 buah dan 5 buah.

Dari tabel 5 tersebut dapat dilihat adanya kenaikan frekuensi natural f_1 sebesar 4,94 % untuk kasus dengan melibatkan 2 frekuensi dan sebesar 4,08 % untuk kasus dengan 5 frekuensi saja. Jika nilai f_1 ini dibandingkan dengan hasil optimasi yang melibatkan 10 frekuensi, maka kedua nilai tersebut masih lebih kecil sekitar setengah kalinya.

Berdasarkan perbedaan kenaikan frekuensi f_1 tersebut dapat dilihat bahwa jumlah frekuensi yang dilibatkan juga dapat mempengaruhi hasil akhir proses optimasi walaupun jumlah dan jenis variabel disain yang digunakan adalah sama. Oleh karena adanya pengaruh tersebut, maka jumlah frekuensi yang akan dilibatkan dalam optimasi harus ditentukan sesuai dengan daerah kerja frekuensi pembebanan struktur pintu air.



Gambar 10 Evolusi frekuensi f_1 s/d f_5 (Kasus 2)



Gambar 11 Evolusi frekuensi f_6 s/d f_{10} (Kasus 2)

Tabel 5 Perubahan frekuensi akhir kasus 2 dengan 2 dan 5 frekuensi yang dilibatkan

	Frek. Awal	Frekuensi Akhir (Hz)			
		2 Frek. terlibat		5 Frek. terlibat	
		Nilai	(%)	Nilai	(%)
F ₁	2,57	2,709	4,948	2,68	4,08
F ₂	3,03	3,19	5,35	3,30	9,02
F ₃	3,63			3,94	8,72
F ₄	3,94			4,02	1,92
F ₅	4,87			5,80	19,99

Nilai setiap variabel disain yang diperoleh untuk kasus 2 dengan melibatkan 2, 5 dan 10 frekuensi natural diberikan dalam tabel 6.

Tabel 6 Nilai variabel disain untuk kasus 2 pada berbagai jumlah frekuensi natural yang dilibatkan

Nama Variabel	Nilai Awal	Nilai Akhir (cm)		
		2 Frek.	5 Frek.	10 Frek.
H ₁	10,00	11,20	11,15	11,09
H ₂	7,50	5,00	5,00	5,00
T ₁	0,80	*)	*)	*)
T ₂	0,70	*)	*)	*)
L ₁	110,00	108,32	96,31	86,53
L ₂	10,00	10,05	9,954	14,01
L ₃	48,00	48,45	51,05	61,65
L ₄	98,00	112,00	117,56	113,60

*) tidak berubah (bukan variabel disain)

4.2. Analisis Kekuatan Struktur

Akibat adanya perubahan dimensi dan jarak pengkaku sebagai akibat dari optimasi untuk menaikkan frekuensi yang semaksimal mungkin akan dapat menyebabkan terjadinya perubahan kekuatan struktur. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis statik pada struktur optimum yang telah diperoleh dari hasil optimasi. Analisis kekuatan struktur pintu air dilakukan pada semua kasus optimasi yang dibahas sebelumnya.

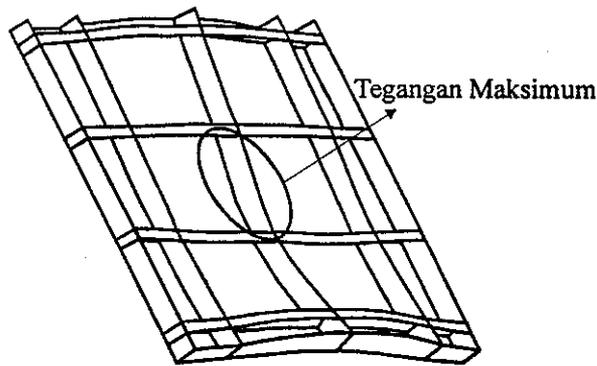
Perubahan kekuatan struktur kasus 1, kasus 2 dan kasus 3 secara umum menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu berubah secara simetris terhadap garis vertikal titik tengah pintu air. Selain itu tegangan terbesar dialami oleh pengkaku vertikal bagian tengah bawah seperti ditunjukkan pada gambar 12. Hal ini sesuai dengan karakteristik beban akibat tekanan hidrostatis air yang diterima oleh struktur pintu air. Besar tegangan Von Mises maksimum dan minimum pada struktur untuk ketiga kasus yang dibahas diberikan pada tabel 7.

Tabel 7 Tegangan Von Mises yang terjadi

Von Mises (kg/cm ²)	Disain Awal	Disain Akhir		
		Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
Maks.	547,79	470,06	1218	459,17
Min.	3,033	0,4693	1,509	0,5483

Dari tabel 7 tersebut dapat dilihat bahwa kekuatan struktur hasil analisis statik untuk kasus 2 yang menghasilkan nilai perubahan frekuensi yang paling besar ternyata menunjukkan penurunan kekuatan yang besar pula. Ini berarti bahwa perubahan kekakuan kearah optimum pada kasus 2 itu tidak menghasilkan struktur dengan kekuatan seperti yang diharapkan. Tegangan Von Mises maksimum yang terjadi pada kasus 2 naik dari 547,79 kg/cm² menjadi 1.218 kg/cm². Tegangan ini melebihi tegangan yang diijinkan sebesar 1.200 kg/cm².

Sementara itu pada kasus 3 yang menghasilkan perubahan frekuensi natural sebesar 15,97 %, dari analisis statik diperoleh tegangan Von Mises maksimum sebesar 459,17 kg/cm². Tegangan ini tidak melebihi tegangan ijin bahan SS400 dan bahkan lebih kecil dari tegangan yang terjadi pada struktur awal.



Gambar 12 Daerah dengan tegangan Von Mises yang cukup besar

4.3. Analisis Lendutan Struktur

Analisis terhadap lendutan maksimum yang diijinkan juga perlu dilakukan sebagaimana yang dipersyaratkan oleh pemesan. Secara teknis lendutan maksimum harus dibatasi karena menyangkut komponen atau *part* yang beroperasi menurut suaian tertentu, yaitu maksimum sebesar 1/800 lebar pintu air.

Pada pintu air yang digerakkan oleh tenaga motor listrik melalui transmisi *gear reducer*, lendutan pintu air maksimum yang berakibat pada terdefleksinya poros keluaran *gear reducer* harus dibatasi. Jika hal ini tidak dipatuhi, maka *gear reducer* maupun motor listrik tidak akan bekerja dengan baik. Hasil defleksi maksimum untuk masing-masing kasus dapat dilihat pada tabel berikut ini.

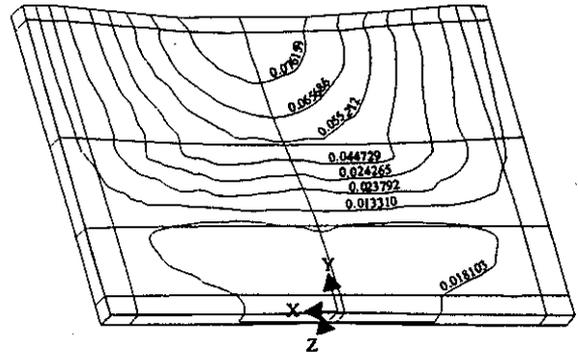
Tabel 8 Defleksi maksimum yang terjadi

Defleksi (cm)	Disain Awal	Disain Akhir		
		Kasus1	Kasus 2	Kasus 3
Maks.	0,0762	0,0549	0,0889	0,0548

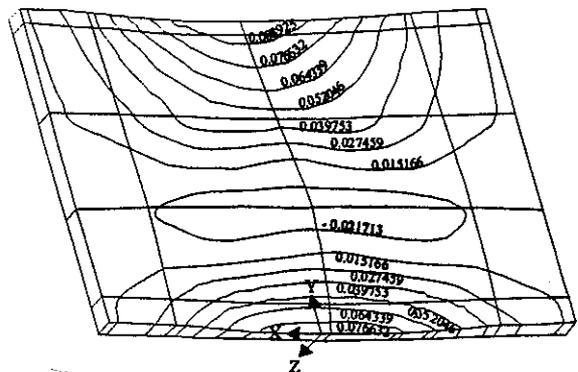
Dari tabel 8 dapat diketahui bahwa besarnya defleksi maksimum, terjadi pada kasus 2, yaitu sebesar 0,0889 cm. Defleksi maksimum ini lebih kecil dari yang dipersyaratkan sebesar 1/800 lebar pintu atau sebesar 0,3125 cm. Dari tabel 8 juga dapat dilihat bahwa defleksi

maksimum untuk kasus 2 dan kasus 3 lebih kecil dari defleksi maksimum struktur awal. Pola defleksi pada struktur awal pintu air, untuk kasus 2 dan kasus 3 diberikan masing-masing pada gambar 13, gambar 14 dan gambar 15.

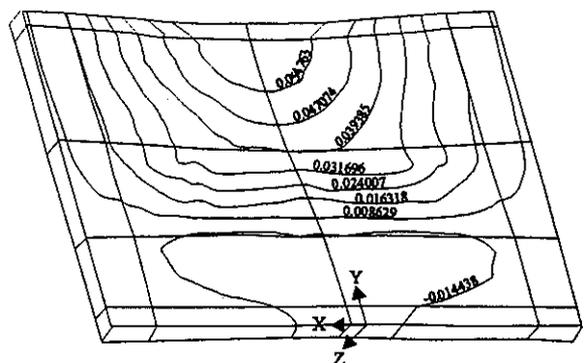
Daerah defleksi pada kasus 2 terlihat terpecah menjadi dua bagian, yaitu bagian tengah atas dan bagian tengah bawah. Luas daerah kontur defleksinya juga terlihat menyempit yang berarti nilai defleksi maksimum hanya terjadi pada daerah yang sempit dan terkonsentrasi.



Gambar 13 Iso-Line defleksi (Z) struktur Awal G2517



Gambar 14 Iso-Line Defleksi (Z) Kasus 2 Struktur G2517



Gambar 4.15 Iso-Line Defleksi (Z) Kasus 3 Struktur G2517

Berdasarkan hasil-hasil yang diperoleh baik dari hasil optimasi maupun analisis kekuatan statik, maka proses optimasi pada kasus 3 adalah yang memenuhi kriteria yang diinginkan, yaitu struktur dengan berat yang hampir sama dengan berat struktur awal, tetapi dengan karakteristik kekakuan dan kekuatan yang lebih baik dari struktur awal.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari serangkaian proses optimasi yang dilakukan terhadap pintu air jenis G2517 maka dapat disimpulkan beberapa hal penting sebagai berikut:

1. Pemilihan jenis dan jumlah variabel desain mempunyai pengaruh cukup penting dalam proses optimasi. Pemilihan ini haruslah disesuaikan dengan kebutuhan dan didasarkan pada pertimbangan praktis.
2. Untuk mendapatkan struktur yang optimum baik dari segi kekuatan maupun kekakuan, maka sebaiknya dilakukan suatu optimasi yang melibatkan kendala baik kendala statik maupun kendala dinamik sekaligus. Sementara ini paket program ANSYS 5.4 belum bisa menangani persoalan tersebut, sehingga antara analisis dinamik dan statik terpaksa dilakukan secara terpisah.
3. Dalam kasus optimasi pintu air tipe G2517 yang telah dilakukan diperoleh bahwa kepekaan variabel desain yang berupa penampang pengkaku (H_i dan T_i) terhadap fungsi objektif lebih kecil dibandingkan dengan variabel jarak antar pengkaku (L_i).

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Agung B. Ismadi dan Didi Budyarso "Perhitungan Pelat Dengan Batang Pengkaku", Prosiding Seminar MEH'91, Bandung, Desember 1991
2. "ANSYS-PC/LINEAR 4.3 User's Manuals Supplement A1", Swanson Analysis Systems, Inc, 1987.
3. Darrell W Pepper and Juan C. Heinrich, "The Finite Element Method, Basic Concept And Application", Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1992.
4. Garret N. Vanderplaats, "Numerical Optimization Techniques For Engineering Design with application", McGraw-Hill Book Company, 1984.
5. I Wayan Suweca, "Metode Elemen Hingga Dan Optimasi Struktur", Prosiding Seminar MEH'91, Bandung, Desember 1991
6. L. Mesquita and P. Kemat, "Structural Optimization For Control of Stiffened Laminated Composite Structures", Journal of Sound and Vibration Report No. 116(1), 33-48, 1987.
7. Mario Paz, "Dinamika Struktur, Teori dan Perhitungan", Edisi Kedua, Penerbit Airlangga, 1987.
8. Darmawan Harsokoemo, Satryo Sumantri B., "Diktat Kuliah Metoda Elemen Hingga", Jurusan Teknik Mesin ITB, 1995.
9. Roy R. Craig, "Structural Dynamics an introduction to computer methods", John Wiley & Sons, New York, 1981.
10. Uri Kirsch, "Optimum Structural Design", McGraw-Hill Book Company, 1981.