

MODIFIKASI PERILAKU DINAMIK STRUKTUR DENGAN MENAMBAHKAN MASSA STUDI KASUS CONVEYOR 230 DI PT FREEPORT INDONESIA

Ramses Y Hutahaean
Divisi Concentrating PT Freeport Indonesia
Email : ramses_yh@yahoo.com

Abstrak

Perancangan suatu struktur berdasarkan beban statik yang selama ini banyak dilakukan hanya cocok untuk digunakan pada struktur yang mengalami beban statik, namun jika struktur tersebut digunakan untuk menahan beban dinamik, kita harus melakukan analisa perilaku dinamik struktur tersebut.

Masalah lain yang timbul jika pada awalnya suatu struktur tidak mengalami masalah ketika mengalami beban dinamik, kemudian digunakan tambahan berupa mesin yang memiliki kecepatan putaran yang berbeda, maka hal ini dapat menimbulkan masalah getaran atau resonansi pada struktur tersebut. Dengan demikian kita harus melakukan modifikasi struktur, modifikasi struktur dapat berupa menambahkan kekakuan pada struktur atau menambahkan massa pada struktur.

Tahap awal untuk melakukan identifikasi sifat dinamik adalah dengan memodelkan dengan menggunakan pemodelan dengan metoda elemen hingga, kemudian dilakukan analisis ragam getar untuk menentukan komponen mana yang harus ditambahkan massa atau strukturnya diperkuat. Pada makalah ini penulis akan melakukan penambahan kekakuan pada struktur.

Kata kunci : Resonansi, identifikasi sifat dinamik.

1. PENDAHULUAN

Conveyor 230 adalah conveyor yang digunakan untuk mengalirkan ore yang berasal dari Crusher 7 dan crusher 8, pada awal perancangan conveyor tersebut memiliki kecepatan 3 m/s, setelah terjadi peningkatan produksi, maka kecepatan conveyor tersebut dinaikkan menjadi 4 m/s. Namun saat di uji coba, terjadi amplitudo getaran yang besar, sehingga diputuskan untuk melakukan modifikasi struktur.

Modifikasi struktur tersebut tidak bisa dilakukan dengan hanya menambahkan kekakuan, tetapi harus dilakukan pemodelan elemen hingga, untuk mengetahui bagian struktur mana saja yang harus diperkuat atau di tambahkan massanya.

2. PEMODELAN STRUKTUR

Kita akan memodelkan suatu struktur yang merupakan struktur penopang mesin pada conveyor 230 di PT.Freeport Indonesia, seperti ditunjukkan pada gambar 1.

Dimana struktur tersebut terdiri dari balok baja W 250x80 dan siku baja L152x152x19 dengan beban statik dan dinamik

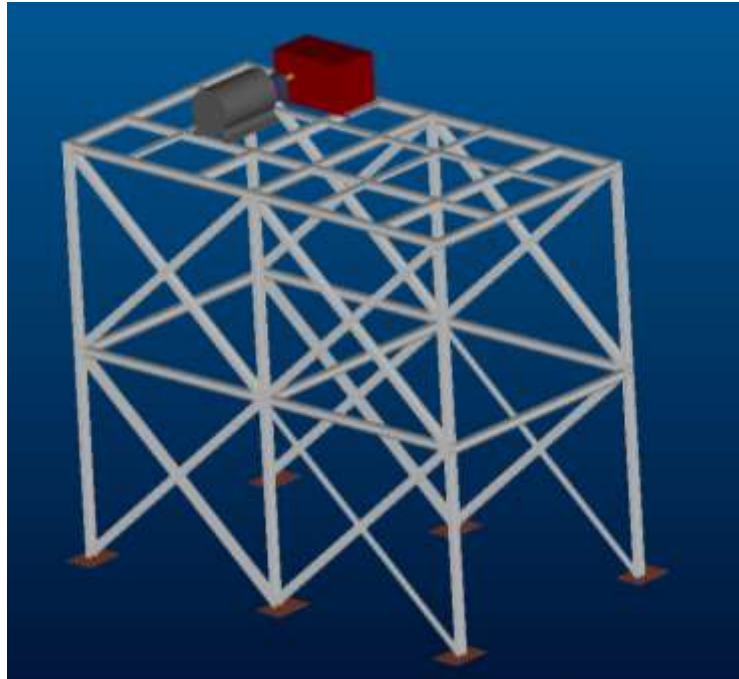
Berat motor listrik : 1850 kg

Berat gear box : 2170 kg

Putaran input gear box : 1790 rpm

Putaran output gear box : 120 rpm

Agar tidak terjadi resonansi maka frekwensi natural struktur tidak boleh berada di sekitar frekwensi $1790 \text{ rpm} = 29.83 \text{ Hz}$ dan di sekitar $120 \text{ rpm} = 2 \text{ Hz}$.



Gambar 1.1. Struktur penopang motor penggerak conveyer 230

2.1 Persamaan Gerak

Persamaan gerak sistim struktur tersebut ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

dimana $[M]$ adalah matriks massa, $[C]$ adalah matriks redaman, $[K]$ adalah matriks kekakuan, $\{x\}$ adalah matriks perpindahan dan $\{F(t)\}$ adalah matriks gaya eksitasi. Dimana matriks $[M]$, $[C]$ dan $[K]$ diperoleh dengan merakit matriks masing masing komponen struktur yang berupa balok W dan L.

2.2 Matriks Massa Dan Kekakuan Struktur

Analisa yang kita lakukan, adalah pada tahap awal dengan menurunkan massa dan kekakuan masing masing elemen struktur.

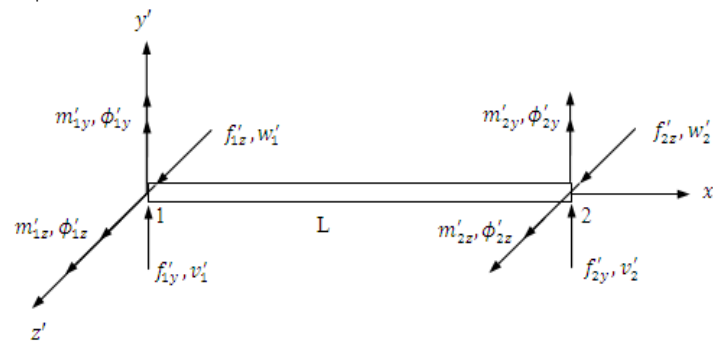
Perhatikan gambar elemen frame yang ditunjukkan pada gambar 2, dan kita akan turunkan matriks kekakuan pada saat lenturan pada bidang $x' - z'$ dan bidang $x' - y'$.

Lenturan pada bidang $x' - z'$

Pertama-tama kita perhatikan lenturan pada bidang $x' - z'$ yang di akibatkan momen m'_y . Dengan demikian rotasi sudut θ'_y mempunyai arah yang sama seperti halnya lenturan tunggal. Matriks kekakuan terhadap lenturan pada bidang $x' - z'$ adalah ;

$$[k_y] = \frac{EI_y}{L^4} \begin{bmatrix} 12L & -6L^2 & -12L & -6L^2 \\ & 4L^3 & 6L^2 & 2L^3 \\ & & 12L & 6L^2 \\ \text{Simetri} & & & 4L^3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

dimana I_y adalah momen inersia penampang yang melalui sumbu y' , sumbu yang lebih lemah dimana $I_y < I_z$.



Gambar 2.1 Pemodelan balok 6 derajat kebebasan

Lenturan pada bidang $x' - y'$

Sekarang kita perhatikan lenturan pada bidang $x' - y'$ yang di akibatkan momen m'_z . Sudut rotasi positif ϕ'_z adalah dalam arah berlawanan jarum jam. Matriks kekakuan terhadap lenturan pada bidang $x' - y'$ adalah

$$[k_z] = \frac{EI_z}{L^4} \begin{bmatrix} 12L & -6L^2 & -12L & -6L^2 \\ & 4L^3 & 6L^2 & 2L^3 \\ & & 12L & 6L^2 \\ \text{Simetri} & & & 4L^3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

dimana I_z adalah momen inersia penampang yang melalui sumbu z' .

Matriks kekakuan frame tiga dimensi diperoleh dengan mensuperposisikan persamaan 3 dan persamaan 2 dengan perpindahan aksial dan persamaan 5.25 untuk perpindahan torsional yang ditunjukkan dari referensi 2, dimana persamaan matriks kekakuan frame 3 dimensi ditunjukkan oleh persamaan

$$[k_m] = \begin{bmatrix} k_{m11} & k_{m12} \\ \text{simetri} & k_{m22} \end{bmatrix}$$

dimana

$$k_{m11} = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$k_{m12} = \begin{bmatrix} -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$k_{m22} = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Sehingga matriks kekakuan dalam koordinat global dinyatakan dalam

$$[k] = [T]^T [k'] [T] \quad (7)$$

Transformasi matriks dari koordinat lokal ke koordinat global dinyatakan dalam persamaan 8.

$$[T_1] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & & \\ & \lambda_1 & & & & \\ & & \lambda_1 & & & \\ & & & \lambda_1 & & \\ & & & & \lambda_1 & \\ & & & & & \lambda_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sedangkan untuk mencari matriks massa, dapat dilihat lebih detail pada referensi2, dimana matriks massa elemen balok adalah

$$[m'] = \begin{bmatrix} [m'_{11}] & [m'_{12}] \\ [m'_{21}] & [m'_{22}] \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[m'_{11}] = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 0 & 0 & 0 & 22L \\ 0 & 0 & 156 & 0 & -22L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 140r_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -22L & 0 & 4L^2 & 0 \\ 0 & 22L & 0 & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[m'_{12}] = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & -13L \\ 0 & 0 & 54 & 0 & 13L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70r_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -13L & 0 & -3L^2 & 0 \\ 0 & 13L & 0 & 0 & 0 & -3L^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[m'_{21}] = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 0 & 0 & 0 & 13L \\ 0 & 0 & 54 & 0 & -13L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70r_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 13L & 0 & -3L^2 & 0 \\ 0 & -13L & 0 & 0 & 0 & -3L^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[m'_{22}] = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 0 & 0 & 0 & -22L \\ 0 & 0 & 156 & 0 & 22L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70r_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 22L & 0 & 4L^2 & 0 \\ 0 & -22L & 0 & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$



2.3 Penentuan Matriks Transformasi

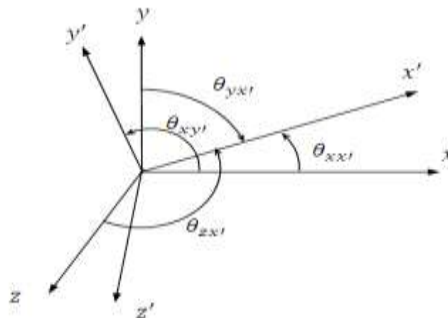
Transformasi Pertama λ_1

Sebelum menurunkan matriks transformasi, mari kita perhatikan gambar 3, dimana ditunjukkan sudut sudut transformasi. Arah cosinus pada komponen sumbu x' adalah

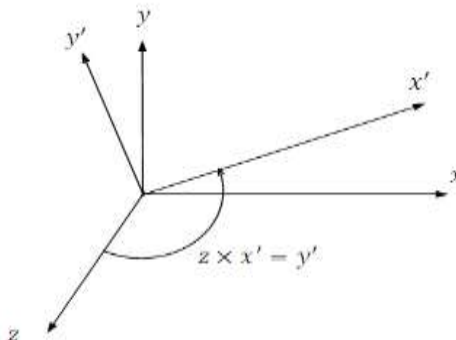
$$x' = \cos \theta_{xx'} \mathbf{i} + \cos \theta_{yx'} \mathbf{j} + \cos \theta_{zx'} \mathbf{k} \quad (5.40)$$

dimana

$$\begin{aligned} \cos \theta_{xx'} &= \frac{x_2 - x_1}{L} = C_x \\ \cos \theta_{yx'} &= \frac{y_2 - y_1}{L} = C_y \\ \cos \theta_{zx'} &= \frac{z_2 - z_1}{L} = C_z \end{aligned} \quad (14)$$



Gambar 2.2 Transformasi koordinat



Gambar 2.3 Transformasi terhadap sumbu z

Sumbu y' dipilih tegak lurus dengan sumbu x' dan sumbu z , yang artinya ortogonal, sehingga perkalian cross antara vektor yang searah dengan sumbu z dan sumbu x' , akan menghasilkan vektor yang searah dengan sumbu y' , seperti ditunjukkan pada gambar 4, sehingga dengan

$$z = \mathbf{k}$$

diperoleh

$$z \times x' = y' = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & 1 \\ C_x & C_y & C_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Sehingga diperoleh

$$y' = -\frac{C_y}{D} \mathbf{i} + \frac{C_x}{D} \mathbf{j} \quad (16)$$

dan

$$D = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$$



Sedangkan sumbu z' diperoleh dari kondisi ortogonal dari $z' = x' \times y'$ sebagai berikut :

$$z' = x' \times y' = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ C_x & C_y & C_z \\ -C_y & C_x & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

diperoleh

$$z' = -\frac{C_x C_z}{D} \mathbf{i} - \frac{C_y C_z}{D} \mathbf{j} + D \mathbf{k} \quad (18)$$

Dengan mengkombinasikan persamaan 13, persamaan 14 dan persamaan 18, diperoleh

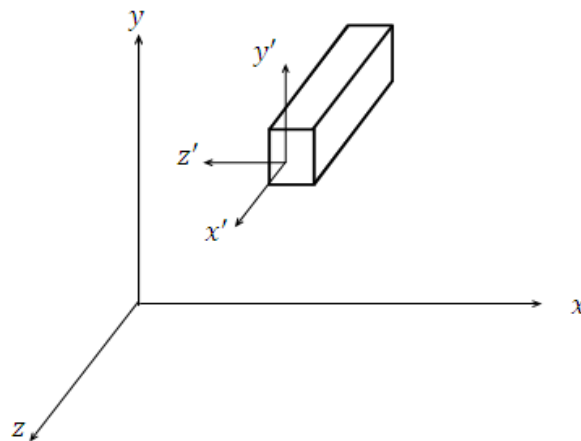
$$[\lambda_1] = \begin{bmatrix} C_x & C_y & C_z \\ -\frac{C_y}{D} & \frac{C_x}{D} & 0 \\ -\frac{C_x C_z}{D} & -\frac{C_y C_z}{D} & D \end{bmatrix} \quad (19)$$

Terdapat dua pengecualian, ketika sumbu lokal mempunyai orientasi khusus terhadap sumbu global. Jika sumbu lokal x' searah dengan sumbu global z , maka elemen frame akan paralel dengan sumbu global z , maka sumbu y' tidak dapat di tentukan (lihat persamaan 15) karena tidak ortogonal, seperti ditunjukkan pada gambar 5. Maka untuk kasus ini sumbu lokal y' dipilih sebagai sumbu global y . Untuk kasus ini nilai $[\lambda_1]$. Menjadi

$$[\lambda_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_z \\ 0 & 1 & 0 \\ -C_z & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Sehingga untuk x' positif dengan arah yang sama dengan sumbu global z , $[\lambda_1]$, ditunjukkan pada persamaan 20.

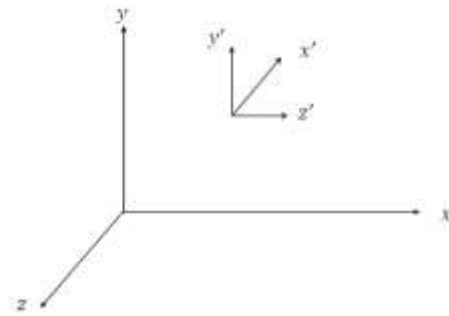
$$[\lambda_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$



Gambar 2.4 Balok dalam koordinat ruang

Sedangkan untuk x' negatif dengan arah yang berlawanan dengan sumbu global z seperti ditunjukkan pada gambar 6, maka $[\lambda_1]$ menjadi

$$[\lambda_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$



Gambar 2.5 Koordinat lokal

Sehingga hubungan antara koordinat lokal dengan koordinat hasil transformasi pertama adalah

$$\{P_1\} = [\lambda_1]\{P\} \quad (23)$$

dimana

$$\{P_1\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{Bmatrix} \quad \text{dan} \quad \{P\} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}$$

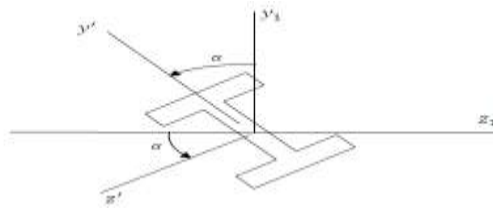
Transformasi kedua λ_2

Transformasi kedua dibutuhkan jika frame berorientasi terhadap penampang utamanya (x, y, z) , dan membentuk sudut α dengan sumbu x', y', z' dimana sumbu x sama dengan sumbu x' , transformasi antara kedua sistem koordinat tersebut adalah dimana nilai y_1 dan z_1 merupakan hasil dari transformasi dengan menggunakan transformasi pertama $[\lambda_1]$, atau maka hubungan antara koordinat global dan transformasi kedua adalah

$$\{P_2\} = [\lambda_2][\lambda_1]\{P\} \quad (24)$$

dimana

$$[\lambda] = [\lambda_2][\lambda_1] \quad \text{dan} \quad \{P_2\} = \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix}$$



Gambar 2.6 Transformasi kedua

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{Bmatrix} \equiv [\lambda_2] \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{Bmatrix} \quad (25)$$

dimana $[\lambda_2]$

$$[\lambda_2] = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{Bmatrix} \quad (26)$$

Sehingga matriks transformasi dengan kondisi jika frame berorientasi terhadap penampang utamanya (x, y, z) , dan membentuk sudut α dengan sumbu x', y', z' , adalah



$$[\lambda] = [\lambda_2][\lambda_1] \quad (27)$$

atau

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_x & C_y & C_z \\ -\frac{C_y}{D} & \frac{C_x}{D} & 0 \\ -\frac{C_x C_z}{D} & -\frac{C_y C_z}{D} & D \end{bmatrix}$$

diperoleh

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} C_x & C_y & C_z \\ \frac{-(C_y \cos \alpha + C_x C_z \sin \alpha)}{D} & \frac{C_x \cos \alpha - C_y C_z \sin \alpha}{D} & D \sin \alpha \\ \frac{C_y \sin \alpha - C_x C_z \cos \alpha}{D} & \frac{-(C_x \sin \alpha + C_y C_z \cos \alpha)}{D} & D \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (28)$$

Sehingga matriks transformasi untuk kasus ini menjadi

$$[T] = \begin{bmatrix} \lambda & & & \\ & \lambda & & \\ & & \lambda & \\ & & & \lambda \end{bmatrix}$$

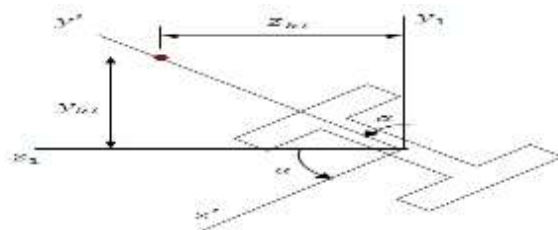
Sedangkan untuk kasus dimana sumbu lokal x' searah dengan sumbu global z , diperoleh

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_z \\ 0 & 1 & 0 \\ -C_z & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

diperoleh

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_z \\ -C_z \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ -C_z \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Sekarang jika kita ingin mencari $[\lambda_2]$ berdasarkan koordinat, tentunya kita harus mencari node ketiga yaitu node k . Kita definisikan terlebih dahulu koordinat node k spt ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 2.7 Transformasi koordinat k

Jika node pada elemen adalah node i, j dan k , maka kita definisikan terlebih dahulu

$$\begin{aligned} x_{ki} &= x_k - x_i \\ y_{ki} &= y_k - y_i \\ z_{ki} &= z_k - z_i \end{aligned} \quad (30)$$

dengan menggunakan persamaan 19

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{Bmatrix} = [\lambda_1] \begin{Bmatrix} x_{ki} \\ y_{ki} \\ z_{ki} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_x & C_y & C_z \\ -\frac{C_y}{D} & \frac{C_x}{D} & 0 \\ -\frac{C_x C_z}{D} & -\frac{C_y C_z}{D} & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{ki} \\ y_{ki} \\ z_{ki} \end{Bmatrix} \quad (31)$$

$$x_1 = C_x x_{ki} + C_y y_{ki} + C_z z_{ki} \quad (32)$$

$$y_1 = -\frac{C_y x_{ki}}{D} + \frac{C_x y_{ki}}{D}$$

$$z_1 = -\frac{C_x C_z x_{ki}}{D} - \frac{C_y C_z y_{ki}}{D} + D z_{ki}$$

Dari gambar 8 dan dari trigonometri sederhana kemudian dengan menggunakan persamaan 32, diperoleh

$$\sin \alpha = \frac{z_1}{\sqrt{y_1^2 + z_1^2}} \quad \text{dan} \quad \cos \alpha = \frac{y_1}{\sqrt{y_1^2 + z_1^2}} \quad (33)$$

Untuk kasus sumbu lokal x' searah dengan sumbu global z , diperoleh dengan cara yang sama tetapi menggunakan persamaan 31.

$$[\lambda_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_z \\ 0 & 1 & 0 \\ -C_z & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_z \\ 0 & 1 & 0 \\ -C_z & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{ki} \\ y_{ki} \\ z_{ki} \end{Bmatrix} \quad (34)$$

$$x_1 = C_z z_{ki}$$

$$y_1 = y_{ki} \quad (35)$$

$$z_1 = -C_z x_{ki}$$

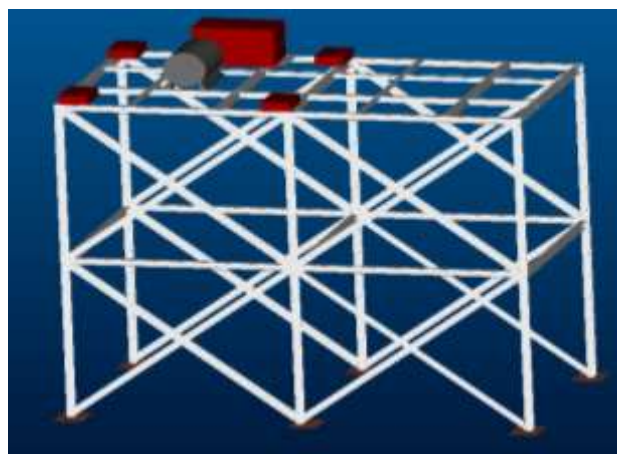
Dengan cara yang sama diperoleh

$$\sin \alpha = \frac{z_1}{\sqrt{y_1^2 + z_1^2}} \quad \text{dan} \quad \cos \alpha = \frac{y_1}{\sqrt{y_1^2 + z_1^2}} \quad (36)$$

3. MODIFIKASI STRUKTUR

3.1 Penambahan Massa

Massa tergumpal yang dimodelkan berupa distribusi berat motor, scoup coupling dan gear box, sedang penambahan massa lainnya pada kasus ini adalah dengan menambahkan massa di empat titik lainnya, dengan masing masing sebesar 2000 kg yang terbagi pada dua titik dan 1600 kg pada dua titik lainnya seperti ditunjukkan pada gambar 2. Proses penambahan massa dilakukan dengan cara trial dan error melalui perhitungan, kemudian dilakukan penambahan massa dan dilakukan pengujian dengan menggunakan “bump test”.



Gambar 3.1 Penambahan massa pada struktur

3.2 Menentukan Frekwensi Natural

Kita dapat mencari frekwensi natural dengan menggunakan metoda elemen hingga, kita mengabaikan faktor redaman, dalam hal ini matriks $[C]$ kita abaikan, sehingga persamaan gerak menjadi

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (37)$$

Dimana $[M]$ adalah matriks massa struktur dan $[K]$ adalah matriks kekakuan struktur. Solusi homogen untuk persamaan 3 adalah

$$x = X e^{i\omega t} \quad (38)$$

Dimana q adalah amplitudo dari perpindahan nodal, dengan mensubstitusikan persamaan 4 pada persamaan 3, diperoleh

$$[K - \omega^2 M]\{X\} = 0 \quad (39)$$

Atau

$$[K - \lambda M]\{X\} = 0 \quad (40)$$

Dimana

$$\lambda = \omega^2 \quad (41)$$

Persamaan 6 atau persamaan 7 dinamakan persamaan eigen. Untuk memperoleh nilai eigen tersebut, harus terpenuhi kondisi

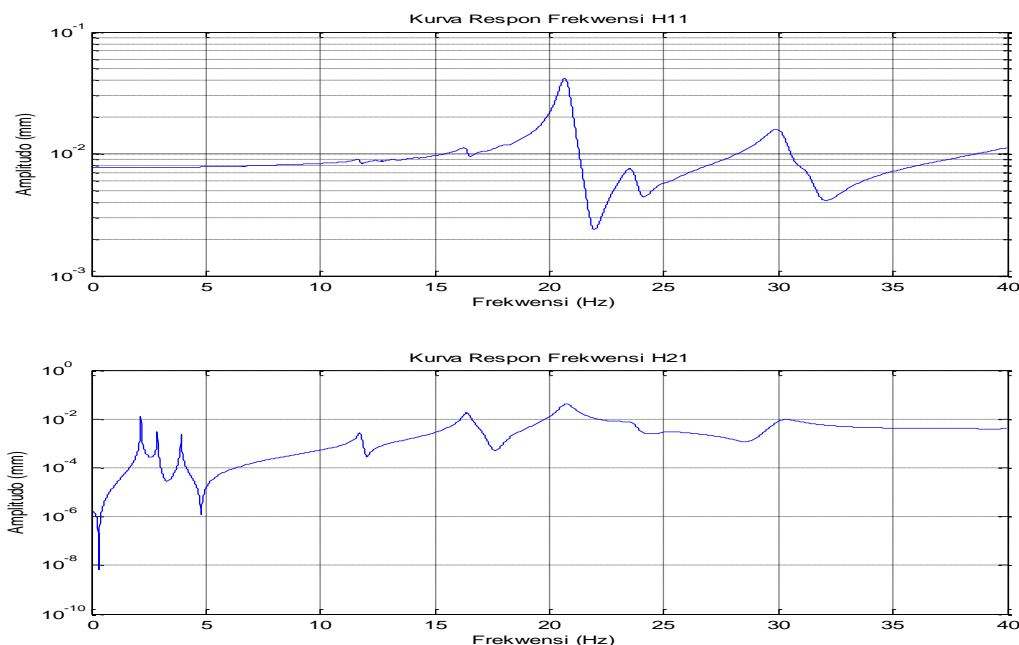
$$\det[K - \lambda M] = |K - \lambda M| = 0 \quad (42)$$

Dari persamaan 8 akan diperoleh nilai eigen $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$, dimana N adalah jumlah derajat kebebasan struktur.

3.3 Hasil Perhitungan

Kita akan melakukan perhitungan frekwensi natural struktur yang di modifikasi, dan pada tabel 1. Terlihat bahwa salah satu frekwensi naturalnya dekat dengan frekwensi putaran mesin yaitu 1786 rpm atau 29.76 Hz, sedangkan berdasarkan standard frekwensi natural struktur tidak boleh berada pada rentang 25 dan 35 Hz.

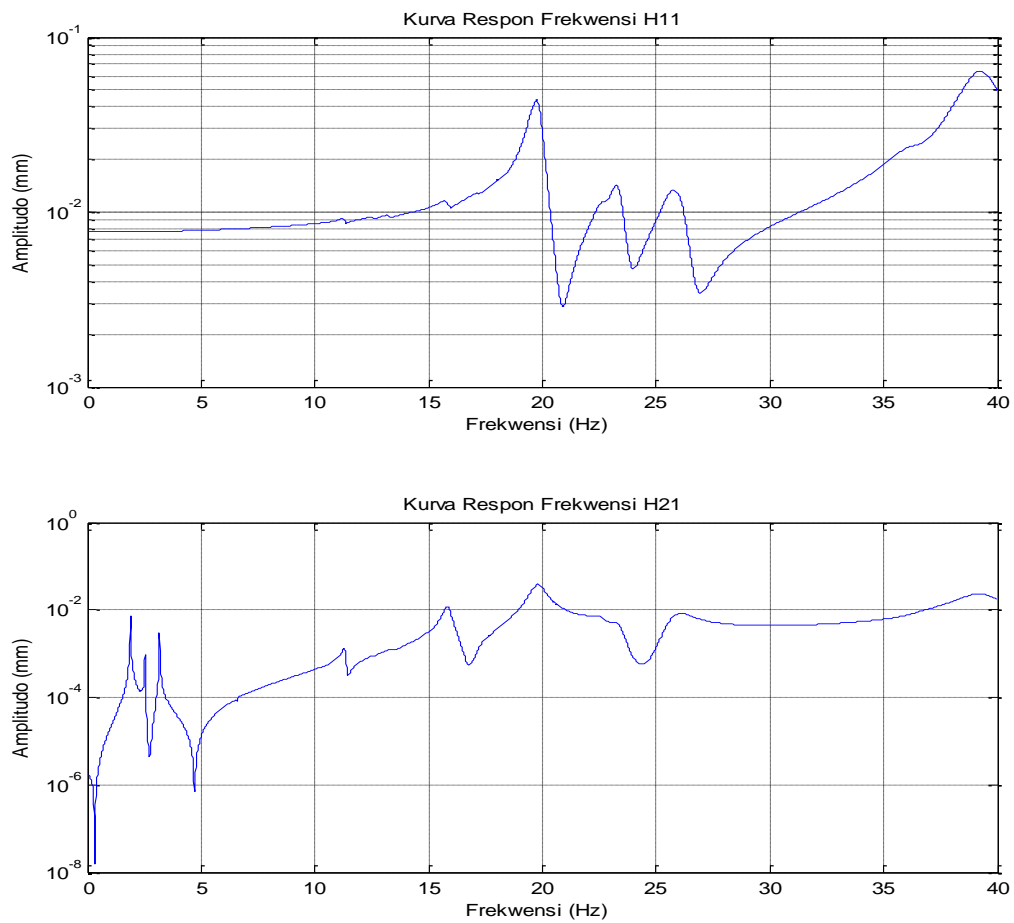
Dari hasil perhitungan menggunakan MATLAB diperoleh frekwensi natural struktur yang belum dimodifikasi dan dibandingkan dengan struktur yang sudah di naikan kekakuannya.



Gambar 3.2

Kurva Fungsi Respon Frekwensi Struktur Asli





Gambar 3.3
Kurva Fungsi Respon Frekwensi Struktur Yang Dimodifikasi

| Mode | <i>Frekwensi Natural Struktur Asli (Hz)</i> | Frekwensi Natural Struktur Modifikasi (Hz) |
|------|---|---|
| 1 | 2.1537 | 1.8881 |
| 2 | 2.8726 | 2.5246 |
| 3 | 3.9172 | 3.1670 |
| 4 | 6.6216 | 6.6215 |
| 5 | 8.1918 | 8.1907 |
| 6 | 10.7828 | 10.7731 |
| 7 | 11.7323 | 11.3059 |
| 8 | 12.5375 | 12.0474 |
| 9 | 13.3050 | 12.5352 |
| 10 | 13.4264 | 13.2234 |
| 11 | 14.2675 | 13.3040 |
| 12 | 14.6664 | 13.4499 |
| 13 | 16.3946 | 15.8304 |
| 14 | 17.1982 | 17.1915 |
| 15 | 18.1618 | 18.1571 |

| | | |
|----|----------|---------|
| 16 | 20.7207 | 19.5618 |
| 17 | 22.9482 | 19.8051 |
| 18 | 23.6755 | 22.6870 |
| 19 | 24.9991 | 23.3647 |
| 20 | 30.1518 | 25.7329 |
| 21 | 31.2602 | 26.0821 |
| 22 | 40.8466 | 36.3462 |
| 23 | 53.5381 | 39.2860 |
| 24 | 85.3624 | 72.3696 |
| 25 | 91.9240 | 73.5108 |
| 26 | 93.3905 | 75.8116 |
| 27 | 94.4515 | 76.9883 |
| 28 | 98.9704 | 79.3674 |
| 29 | 111.5220 | 82.4703 |
| 30 | 116.6223 | 86.0600 |

4. KESIMPULAN

1. Efek penambahan massa akan mengurangi frekwensi natural struktur.
2. Jika salah satu natural frekwensi struktur berada dibawah frekwensi eksitasi, maka solusi yang terbaik adalah dengan menambahkan massa.
3. Diperlukan suatu metode optimasi yang akan merubah salah satu frekwensi natural, dan menentukan lokasi penambahan massa yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

1. Hutahaean, Ramses Y, “ *Mekanika Kekuatan Material* “ Graha Ilmu, Yogyakarta, 2014.
2. Hutahaean, Ramses Y, “ *Getaran Mekanik* “ Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2014.
3. Khrisnamoorthy, “ *Finite Element Analysis* “, McGraw-Hill, 1987.
4. Liu, G.R, Quek,S.S, “ *The Finite Element Method, A Practical Course*” Elseiver Science,Ltd, 2003.
5. Logan, Daryl L,” *A First Course In The Finite Element Method* “ , 5th Edition, Global Engineering, 2012.
6. Weaver, William Jr, Johnston, Paul R,” *Structural Dynamic By Finite Element* “ Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

