

# Analysis of the Combustion Engine Component Structure Using The Finite Element Method

Sangriyadi Setio<sup>1</sup>, Wiranto Arismunandar<sup>1</sup>, Adi Setiakarsa<sup>1</sup>, Claudia Kurniawan<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung – Bandung

\*Corresponding author:angela\_claudia@students.itb.ac.id

**Abstract.** Connecting-rod representing the most critical component in combustion engine because not only experience high vibration and load, but also experience load of thermal from combustion chamber. In consequence, it is necessary to design that takes into account some of these aspects, so the connecting-rod will have high reliability. The most accurate method for designing connecting rod is to use the using finite element method. With finite element method, we know the static and dynamic characteristic of connecting-rod better so it can be designed in various types of connecting-rod for various needs. This paper discussed about the creation of finite element software for structural analysis of a system by using solid three dimension elements. The software was called ConnAn. With this method it obtained a good result for the design of connecting-rod structure.

**Abstrak.** Batang penghubung (connecting rod) merupakan komponen paling kritis dalam motor bakar torak karena selain mendapat beban dan getaran yang besar, batang penghubung juga mengalami beban termal dari ruang bakar. Karena itu perlu dilakukan perancangan yang memperhatikan beberapa aspek tersebut, sehingga batang penghubung akan memiliki kehandalan yang tinggi. Metode yang paling akurat untuk merancang batang penghubung adalah dengan menggunakan metode elemen hingga. Dengan metode elemen hingga dapat diketahui karakteristik statik dan dinamik dari batang penghubung dengan baik sehingga dapat dirancang berbagai jenis batang penghubung untuk berbagai kebutuhan. Pada tulisan ini dibahas pembuatan perangkat lunak metode elemen hingga untuk analisis struktur suatu sistem dengan elemen padat tiga dimensi. Perangkat lunak ini diberi nama ConnAn. Dengan metode ini diperoleh hasil yang cukup baik untuk perancangan struktur dari batang penghubung tersebut.

**Keywords:** Hexahedral, Matrix Kekakuan, Matrix Massa, Eigen Value, Eigen Vector

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

## Pendahuluan

Motor bakar torak merupakan mesin yang paling banyak digunakan untuk menunjang mobilitas manusia. Keandalan yang dimilikinya cukup tinggi dengan efisiensi relatif lebih tinggi dibanding mesin-mesin rotasi lainnya. Permasalahan yang dihadapi motor bakar torak adalah getaran yang dialaminya cukup besar sehingga dapat mengurangi umur atau dapat menyebabkan kegagalan fungsi komponen-komponen didalamnya.

Berdasarkan permasalahan ini maka perlu dilakukan perancangan yang akurat terhadap komponen motor bakar torak tersebut. Batang penghubung merupakan komponen yang paling kritis selama motor bakar torak bekerja. Selain mendapat beban termal, batang penghubung juga mengalami beban mekanik dan menjadikannya rentan terhadap kegagalan. Metode yang paling baik untuk melakukan perancangan adalah dengan menggunakan metode elemen hingga. Dengan metode ini dapat dirancang batang penghubung yang dapat bekerja pada spesifikasi kerja tertentu dengan lebih baik.

Metode elemen hingga sendiri terdiri atas beberapa jenis yang kegunaannya berbeda-beda tergantung jenis dari sistem yang hendak dianalisis. Untuk analisis batang penghubung, dibutuhkan analisis metode elemen hingga dalam ruang tiga dimensi sehingga menggambarkan semua fenomena yang terjadi secara akurat. Bila temperatur dianggap cukup mempengaruhi terjadinya kegagalan maka metode elemen hingga ini juga harus dapat menggambarkan fenomena perpindahan panasnya bersamaan dengan fenomena fisik lainnya, sehingga diketahui efeknya secara lebih baik.

Fenomena yang tampak adalah getaran yang terjadi memberi pengaruh cukup besar terhadap batang penghubung sehingga dapat menyebabkan kegagalan bila terjadi resonansi pada batang penghubung tersebut. Karena itu perangkat lunak yang digunakan juga harus mampu menganalisis fenomena getaran ini. Perangkat lunak tersebut harus dapat memperhitungkan frekuensi natural yang dimilikinya dan juga modus getar yang akan dialaminya pada frekuensi tersebut. Dari analisis fenomena getaran ini akan diketahui respon yang

akan terjadi bila batang penghubung diberi eksitasi tertentu.

Metode elemen hingga merupakan metode yang relatif mudah digunakan untuk melakukan analisis-analisis tersebut. Permasalahan yang dialami adalah tidak berkembangnya metode ini dengan baik di Indonesia, sehingga banyak praktisi teknik yang tergantung dengan perangkat lunak impor dan tidak mengetahui bagaimana prinsip dasar dari metode ini dapat diterapkan secara mudah pada bidang mereka tetapi cukup memadai. Berdasarkan kenyataan ini maka perlu dimulai suatu langkah awal pembuatan perangkat lunak analisis metode elemen hingga untuk memberikan gambaran bahwa metode ini sangat mudah untuk dikembangkan sendiri untuk kasus-kasus sederhana.

### 1. Teori dasar motor bakar torak

Motor bakar torak merupakan salah satu teknologi yang paling tua sebagai mesin penggerak utama, namun dapat dikatakan mengalami perkembangan yang relatif lambat. Inovasi yang dilakukan terhadapnya lebih dititik beratkan untuk menghasilkan mesin dengan efisiensi dan daya yang tinggi namun menghasilkan emisi yang rendah. Motor bakar torak memegang peranan penting dalam menunjang mobilitas hidup manusia.

Pada saat bekerja motor bakar torak melakukan suatu proses termodinamika dan kimia yang kompleks dan sulit untuk dianalisis menurut teori [1]. Untuk memudahkan analisis tersebut perlu diasumsikan suatu keadaan yang paling ideal. Tetapi pengidealan ini menyebabkan analisis tersebut jauh menyimpang dari keadaan sebenarnya. Namun untuk proses perancangan, hal ini dapat diabaikan. Asumsi ideal analisis motor bakar torak yang sering dipergunakan adalah siklus udara sebagai siklus ideal. Beberapa kesamaan yang digunakan oleh siklus ideal ini terhadap keadaan aslinya adalah :

1. Langkah-langkah siklus;
2. Perbandingan kompresi;
3. Pemilihan temperatur dan tekanan pada suatu keadaan; dan
4. Penambahan kalor yang sama per satuan berat udara.

Pada mesin yang ideal proses pembakaran yang dapat menghasilkan gas bertekanan dan bertemperatur tinggi itu dimisalkan sebagai proses pemasukan kalor ke dalam fluida kerja didalam silinder. Di dalam analisis siklus udara, khususnya pada motor bakar torak terdapat tiga jenis siklus ideal, yaitu:

1. Siklus udara volume-konstan (siklus Otto)

2. Siklus udara tekanan-konstan (siklus Diesel)
3. Siklus udara tekanan-terbatas (siklus gabungan)

Pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap siklus udara volume konstan. Persamaan energi yang akan dipakai dalam analisis ini adalah :

$$\Delta u = u_e - u_i = c_v (T_e - T_i) = q - \frac{w}{J} \quad (1)$$

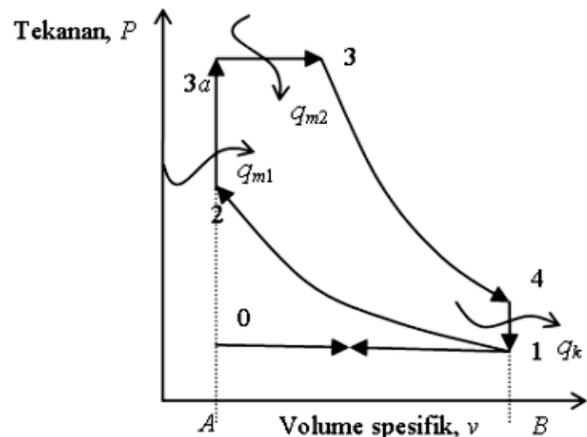
dimana  $u$ ,  $q$ , dan  $w$  berturut-turut menyatakan energi-dalam [kcal/kg], perpindahan kalor [kcal/kg], dan kerja, [mkg/kg].

Entalpi ( $H$ ) didefinisikan sebagai:

$$\Delta h = h_e - h_i = c_p (T_e - T_i) = (u_e - u_i) + \frac{(P_e v_e - P_i v_i)}{J} \quad (2)$$

dengan catatan  $h$  adalah entalpi per satuan berat dan  $k$  adalah  $c_p/c_v$  yaitu perbandingan kalor spesifik.

Berdasarkan asumsi idealnya maka akan diperoleh suatu grafik tekanan pada ruang bakar seperti pada gambar berikut:



**Gambar 1** Diagram  $P$  vs  $v$  pada siklus tekanan terbatas Proses (0-1); langkah isap. Dalam proses ini udara seolah-olah melakukan kerja sebesar

$$\frac{W_{0-1}}{J} = \frac{P_0(V_1 - V_0)}{J} \quad (3)$$

Proses (1-2); langkah kompresi. Karena dalam proses isentropik berlaku hubungan :

$$\frac{T_e}{T_i} = \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{v_i}{v_e}\right)^{k-1} = \left(\frac{\gamma_e}{\gamma_i}\right)^{k-1} \quad (4)$$

maka

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right)^{k-1} \quad (5)$$

dimana  $r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_L + V_s}{V_s}$  adalah perbandingan kompresi

$V_L$  = volume langkah torak [m<sup>3</sup>]

$V_s$  = volume sisa [m<sup>3</sup>]

$\gamma$  = berat jenis fluidal kerja [kg/m<sup>3</sup>]

*Proses (2-3a) pemasukan kalor pada volume konstan.* Fluida kerja tidak melakukan atau dikenai kerja sehingga  $W/J = 0$ . Oleh karena itu

$$Q_{2-3a} = \Delta U = U_{3a} - U_2 = Gc_v(T_{3a} - T_2) \quad (6)$$

*Proses (3a - 3); pemasukkan kalor pada tekanan konstan.* Jumlah kalor yang dimasukkan adalah :

$$\begin{aligned} Q_{3a-3} &= U_3 - U_{3a} + \frac{P_{3a}(V_3 - V_{3a})}{J} \\ &= \left( U_3 + \frac{P_{3a}V_3}{J} \right) - \left( U_{3a} + \frac{P_{3a}V_{3a}}{J} \right) \\ &= H_3 - H_{3a} = Gc_p(T_3 - T_{3a}) \end{aligned} \quad (7)$$

*Proses (3-4); langkah ekspansi atau langkah kerja.* Proses ekspansi berlangsung secara isentropik. Jadi  $Q = 0$  dan  $\Delta S = 0$  sehingga berlaku hubungan

$$\frac{T_4}{T_3} = \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = \left( \frac{\gamma_4}{\gamma_3} \right)^{k-1} \quad (8)$$

sedangkan kerja yang dihasilkan adalah

$$\frac{W_{3-4}}{J} = -\Delta U = U_3 - U_4 \quad (9)$$

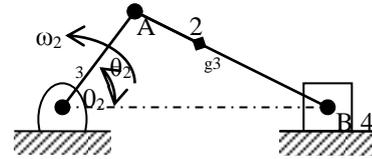
*Proses (4-1); proses pengeluaran kalor.* Proses ini berlangsung pada volume-konstan ( $V_4 = V_1$  atau  $v_4 = v_1$ ) sehingga  $W_{4-1}/J = 0$ . Maka jumlah kalor yang harus dikeluarkan adalah sebanyak  $Q_{4-1} = -\Delta U = Gc_v(T_1 - T_4)$  atau  $Q_{keluar} = Gc_v(T_4 - T_1)$

*Proses (1-0); langkah buang.* Dalam proses ini fluida kerja dikenai kerja aliran sebesar:

$$\frac{W_{1-0}}{J} = \frac{P_0(V_1 - V_0)}{J} \quad (10)$$

Untuk mendapatkan siklus gaya dalam lengan engkol maka perlu dianalisis terlebih dahulu kinematika kecepatan-percepatan dari sistem piston-engkol. Salah satu metoda dari analisis kecepatan dan percepatan adalah dengan menggunakan metoda analitik berbasis vektor yang diekspresikan dalam bentuk bilangan kompleks [2].

Pada mekanisme piston-engkol pada Gambar 2, batang penghubung berputar dengan kecepatan sudut  $\omega_2$  yang konstan.



**Gambar 2** Mekanisme lengan engkol

Untuk sistem ini dapat diturunkan persamaan-persamaan berikut :

$$r_1 = r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3} \quad (11)$$

dimana kecepatan  $V_B$  dan  $A_B$  dinyatakan sebagai berikut:

$$V_B = \dot{r}_1 = r_2 \omega_2^2 e^{i\theta_2} + r_3 \omega_3^2 e^{i\theta_3} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} A_B = \ddot{r}_1 &= r_2 (i\alpha_2 - \omega_2^2) i e^{i\theta_2} \\ &+ r_3 (i\alpha_3 - \omega_3^2) i e^{i\theta_3} \end{aligned} \quad (13)$$

Dari Persamaan (11) hingga Persamaan (13) dapat dicari parameter yang sama untuk posisi yang lainnya .

Analisis dinamik gaya-gaya yang bekerja pada batang penghubung dapat diperoleh dengan menggunakan prinsip kesetimbangan gaya dan momen pada masing-masing komponen mekanismenya. Analisis ini dilakukan untuk setiap sudut engkolnya, sehingga akan diperoleh matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ r_{O/G_2} \sin \theta_2 & -r_{O/G_2} \cos \theta_2 & 1 & -r_{A/G_2} \sin \theta_2 & r_{A/G_2} \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -r_{A/G_2} \sin \theta_3 & r_{A/G_2} \cos \theta_3 & r_{B/G_2} \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Ox} \\ F_{Oy} \\ T_{Out} \\ F_{Ax} \\ F_{Ay} \\ F_{Sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_2 a_{2x} \\ m_2 a_{2y} \\ I_2 a_2 \\ m_3 a_{3x} + F + m_4 a_{4x} \\ m_3 a_{3y} \\ I_3 a_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

pada saat analisis tegangan/regangan, maka vektor input beban yang digunakan dapat diperoleh dari Persamaan (14).

### Metode Penelitian

**Metode elemen hingga.** Metode elemen hingga adalah sebuah metode numerik untuk memecahkan persoalan teknik. Persoalan-persoalan yang dapat dipecahkan menggunakan metode elemen hingga antara lain adalah persoalan dalam analisis struktur,

perpindahan panas, aliran fluida, perpindahan massa, dan tegangan elektromagnetik [3].

Beberapa pendekatan dapat digunakan untuk mentransformasikan formulasi fisik dari permasalahan ke elemen hingga diskrit yang analog dengan persoalan tersebut. Jika formulasi fisik dari persoalan diketahui sebagai persamaan diferensial, maka metode yang paling populer digunakan adalah metode Galerkin [4].

Bila suatu sistem disusun oleh unit-unit elemen seperti pada Gambar (3) yang jumlahnya tak terhingga, maka dapat diasumsikan suatu matrik kolom tegangan dan regangan sebagai berikut :

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

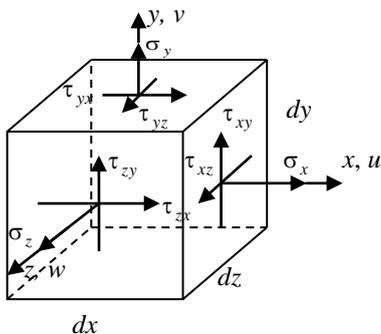
dengan hubungan tegangan/regangan untuk material isotropik adalah :

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (16)$$

dimana matrik tegangan/regangan [D] diberikan oleh :

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

simetri



Gambar 3 Tegangan tiga dimensi pada suatu elemen

Pada penelitian ini digunakan elemen heksahedral isoparametrik linier dengan 8 titik simpul seperti pada Gambar (4). Bila perpindahan masing-masing titik simpulnya adalah  $d$  maka

hubungan perpindahan/regangan dinyatakan sebagai berikut:

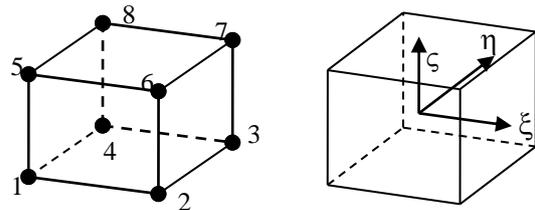
$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (18)$$

dengan  $B$  adalah :

$$[B] = [D][N] = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ \dots] \quad (19)$$

Variabel  $N$  merupakan fungsi bentuk yang dinyatakan sebagai berikut:

$$N_i = \frac{(1+ss_1)(1+tt_1)(1+z'z'_1)}{8} \quad (20)$$



Elemen Linier

Koordinat Lokal

Gambar 4 Elemen heksahedral dengan 8 titik simpul

Berdasarkan metode Galerkin dapat diperoleh matrik kekakuan  $k$  dan matrik massa  $m$  lokal sebagai berikut:

$$[k] = \iiint_V [B]^T [D][B] dV \quad (21)$$

$$[m] = \iiint_V \rho [N]^T [N] dV \quad (22)$$

Persamaan kesetimbangan untuk elemen solid tiga dimensi mempunyai bentuk sebagai berikut :

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (23)$$

Untuk kasus perpindahan panas maka beban  $f$  memiliki persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \{f\} &= \{p\} + \{h\} \\ \{p\} &= \int_V [N]^T \{p^V\} dV + \int_S [N]^T \{p^S\} dS \\ \{h\} &= \int_V [B]^T [D]\{\varepsilon'\} dV \end{aligned} \quad (24)$$

dimana  $\varepsilon'$  adalah regangan yang terjadi karena pengaruh temperatur, sedangkan  $p^V$  dan  $p^S$  secara berurutan adalah beban pada tubuh dan permukaan sistem.

**Teori Dasar Dinamika Struktur.** Getaran berhubungan dengan gerakan-gerakan osilasi dari suatu sistem dan gaya-gaya yang berasosiasi dengan getaran tersebut. Sistem yang memiliki massa dan elasitas pasti dapat bergetar. Dalam perancangan suatu sistem diijinkan untuk bergetar

hingga batas tertentu, karena itu perancangan dari sistem tersebut membutuhkan aspek getaran untuk mengetahui karakteristik getaran sistem tersebut.

Persamaan gerak sistem dengan satu-derajat-kebebasan sebagai persamaan keseimbangan dari gaya-gaya dalam dan gaya luar adalah [5]:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (25)$$

dengan  $m$ ,  $c$ , dan  $k$  berturut-turut adalah massa, redaman, dan kekakuan struktur. Variabel  $\ddot{x}(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ ,  $kx(t)$ , dan  $f(t)$  adalah percepatan, kecepatan, perpindahan dan gaya luar dinamik fungsi waktu  $t$  yang selanjutnya untuk alasan praktis, fungsi waktu  $t$  dapat tidak ditulis.

Persamaan (25) dapat diperluas untuk keperluan analisis sistem dengan derajat kebebasan yang lebih tinggi, dimana nilai eigen dan vektor eigennya dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$-\left[\omega^2\right][m]\{x\} + [k]\{x\} = 0 \quad (26)$$

Respon getaran dari sistem dapat diperoleh dengan menggunakan analisis modal. Dengan mengetahui bentuk mode getar struktur  $\phi$ , dan memanfaatkan hubungan ortogonal, maka akan diperoleh persamaan :

$$Q_r = \frac{f_r}{-\Omega^2 m_r + k_r + i\Omega c_r} \quad (27)$$

dengan

$$m_r = \phi_r^T M \phi_r, \quad c_r = \phi_r^T C \phi_r, \quad (28)$$

$$k_r = \phi_r^T K \phi_r, \quad \text{dan} \quad f_r = \phi_r^T f$$

dimana  $M, C$ , dan  $K$  merupakan matrik-matrik yang besarnya adalah sebesar  $s \times s$  dengan  $s$  adalah jumlah mode yang diambil, sedangkan  $f$  adalah vektor beban modal.  $Q_r$  adalah koordinat modal untuk mode ke  $r$ .

Respon  $X_{Re}$  dan  $X_{Im}$  untuk titik  $p$  adalah:

$$X_{pRe} = \sum_{r=1}^N \phi_{pr} Q_{rRe} \quad (29)$$

$$X_{pIm} = \sum_{r=1}^N \phi_{pr} Q_{rIm} \quad (30)$$

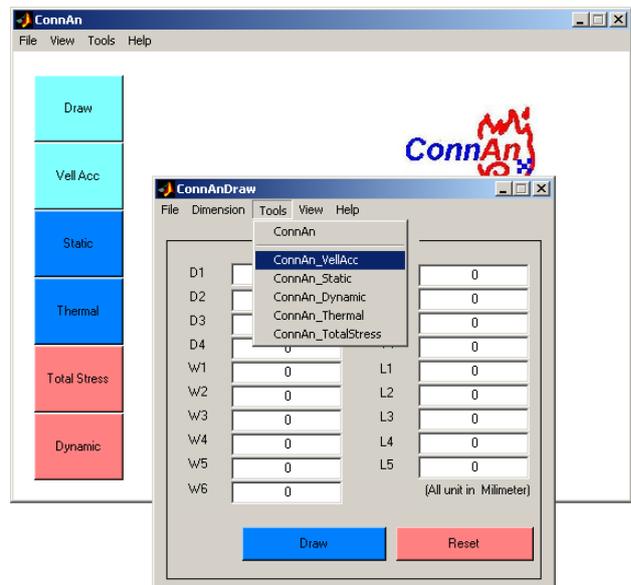
Amplitudo  $X$  untuk titik simpul derajat kebebasan ke  $p$  dapat diperoleh melalui hubungan:

$$X_p = \sqrt{X_{pRe}^2 + X_{pIm}^2} \quad (31)$$

**Perangkat Lunak ConnAn.** Program ini dirancang untuk melakukan analisis struktur sistem tiga dimensi. Pada studi kasus ini akan dilakukan

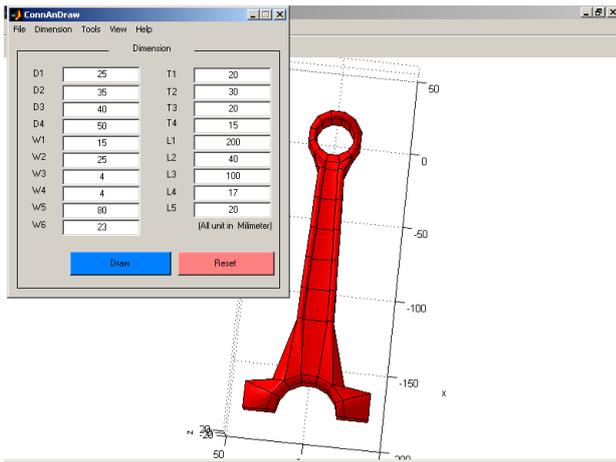
analisis terhadap batang penghubung saja. Langkah-langkah yang dilakukan untuk penggunaan program ini meliputi beberapa langkah umum. Langkah yang pertama dilakukan adalah dengan mencari parameter-parameter yang menjadi persyaratan dalam merancang batang penghubung tersebut. Parameter tersebut antara lain adalah spesifikasi dari kendaraan bermotor seperti perbandingan kompresi dan daya maksimumnya. Langkah selanjutnya adalah dengan menentukan bentuk dan dimensinya sesuai dengan standard yang ada. Pada kenyataannya dimensi dan bentuk dari batang penghubung untuk kendaraan bermotor tidak jauh berbeda. Namun biasanya untuk kasus khusus terdapat perbedaan dalam bentuk maupun materialnya. Langkah berikutnya adalah dengan melakukan *meshing* terhadap batang penghubung dan memasukkan parameter serta kondisi batas sesuai dengan kondisi kerjanya. Proses utama berikutnya adalah dengan melakukan *processing* dan *post processing* terhadap model dari batang penghubung. Proses iterasi dapat dilakukan bila diinginkan optimasi dalam perancangan.

Gambar 5 memperlihatkan tampilan untuk memberikan dimensi pada batang penghubung sesuai yang diinginkan. Obyek ini berfungsi untuk memberikan gambaran tiga dimensi dari batang penghubung yang akan dianalisis sesuai dengan tipe dari batang penghubungnya.



**Gambar 5** Tampilan perangkat lunak ConnAn

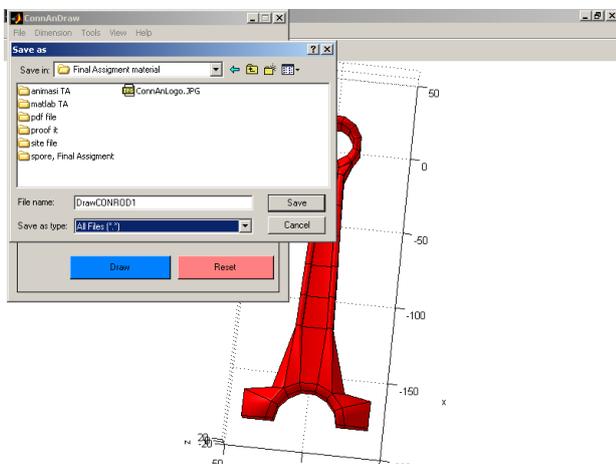
Pada saat dilakukan *meshing* maka akan diperoleh tampilan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.



**Gambar 6** Tampilan hasil *meshing* batang penghubung

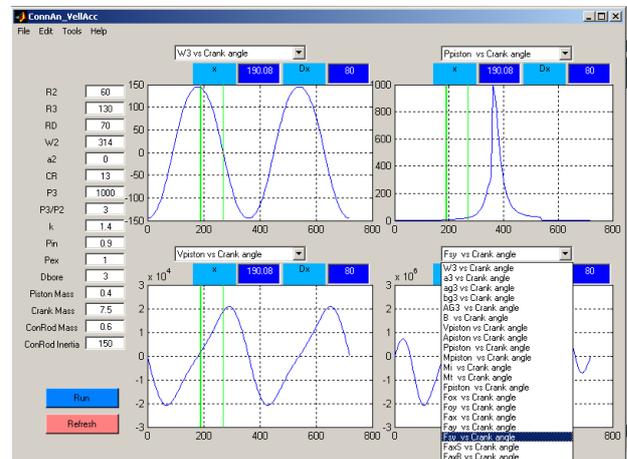
Setelah dilakukan *meshing* pada batang penghubung, maka dengan fasilitas dari ConnAn dapat dilakukan analisis statik, dinamik maupun thermal. Parameter-parameter awal yang dibutuhkan adalah berupa karakteristik fisik dari batang penghubung seperti modulus elastisitas dan perbandingan Poisson. Kondisi batas yang diperlukan adalah berupa gaya-gaya reaksi yang bekerja maupun kondisi thermal pada batang penghubung.

Dimensi yang digunakan dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Pada program ini batang penghubung dapat diputar dalam ruang untuk dilihat bentuk keseluruhannya. Bentuk maupun dimensinya dapat diedit sesuai kebutuhan. Setelah model sesuai dengan kebutuhan, maka data yang ada disimpan dalam memori komputer sehingga dapat dipanggil lagi bila dibutuhkan. Gambar 7 menunjukkan proses penyimpanan data dari model yang telah dibuat.



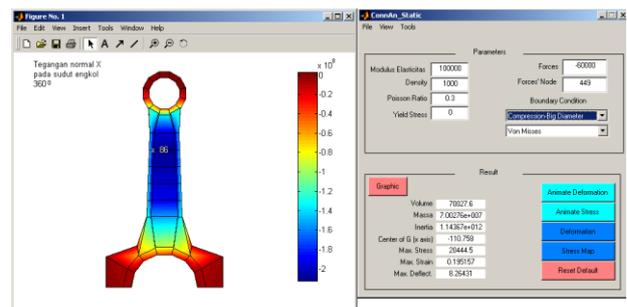
**Gambar 7** Proses penyimpanan model batang penghubung pada komputer

Langkah berikutnya adalah memasukkan parameter kondisi kerjanya, sehingga didapat grafik-grafik yang mendukung analisis batang penghubung. Grafik yang tersedia antara lain adalah grafik tekanan ruang bakar terhadap sudut engkol. Gambar 8 menunjukkan tampilan dari *fitur* yang memberikan grafik-grafik yang dibutuhkan.



**Gambar 8** Tampilan perangkat lunak ConnAn untuk menampilkan hasil perhitungan dalam bentuk grafik

Analisis selanjutnya dapat dilakukan untuk mengetahui tegangan regangan dari batang penghubung untuk beban statik maupun beban yang berubah-ubah. Dalam fasilitas ini dapat dilakukan penghitungan volume, massa, dan inersia dari sistem. Gambar 9 menunjukkan tampilan dari fasilitas analisis beban pada batang penghubung dengan menunjukkan distribusi tegangan pada batang penghubung



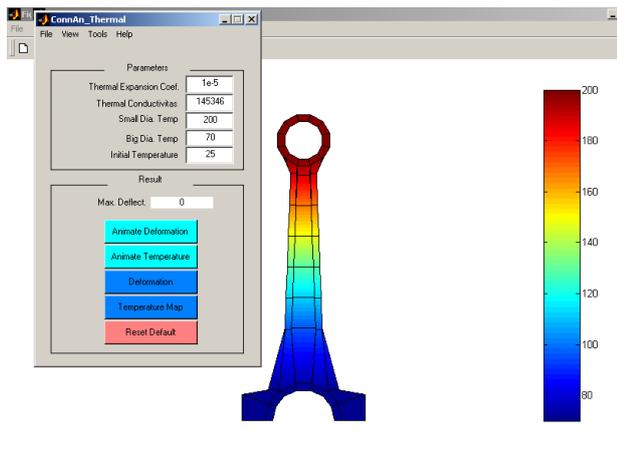
**Gambar 9** Tampilan perangkat lunak ConnAn untuk menunjukkan distribusi tegangan dan regangan.

Pada fitur ini dapat ditampilkan animasi dari perubahan tegangan regangan baik dalam bentuk perubahan dimensi maupun dalam bentuk perubahan warnanya. Dengan fasilitas ini maka dapat diperoleh gambaran yang jelas mengenai fenomena perubahan tegangan regangan akibat perubahan dari beban yang diterima. Fasilitas ini juga menggambarkan bagaimana perubahan dimensi yang terjadi bila pengaruh perubahan temperatur diperhitungkan dalam analisis. Untuk kasus batang penghubung yang bekerja pada

temperatur tinggi, maka temperatur adalah parameter yang cukup mempengaruhi umur dari batang penghubung. Perubahan temperatur akan memberikan dinamika perubahan tegangan regangan yang cukup signifikan terhadap batang penghubung.

Bila ingin diketahui bagaimana temperatur terdistribusi dalam batang penghubung, maka harus diketahui parameter temperaturnya beserta karakteristik temperatur dari material.

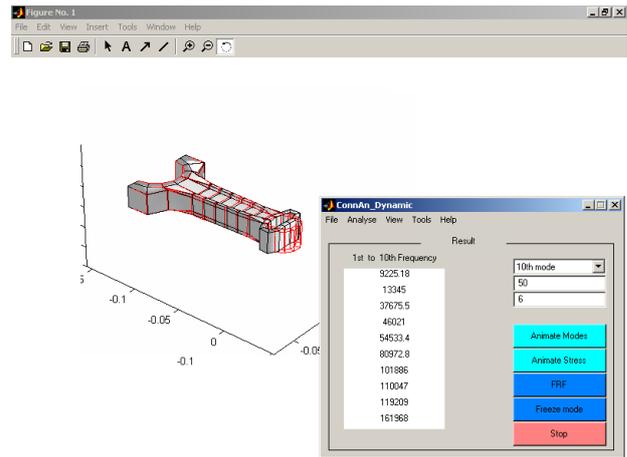
Gambar 10 menunjukkan tampilan dari analisis temperatur ConnAn :



**Gambar 10** Tampilan perangkat lunak ConnAn menunjukkan distribusi temperatur pada batang penghubung.

Dari fasilitas ini dapat terlihat bagaimana kalor berpindah dari ujung diameter kecil ke ujung diameter besar. Perubahan temperatur ini tentu memberikan efek perubahan dimensi dan menimbulkan tegangan pada batang penghubung.

ConnAn juga memberikan fasilitas untuk melakukan analisis getaran pada struktur batang penghubung. Parameter yang dapat diperoleh adalah frekuensi natural dari batang penghubung serta modus getar yang dimilikinya. Dari fasilitas ini dapat dipelajari fenomena-fenomena getaran tersebut dengan baik karena didukung dengan animasi untuk setiap modus getar yang diinginkan. Animasi yang ada dapat diatur kecepatannya sehingga memberikan kemudahan. Gambar 11 menunjukkan bagaimana ConnAn menampilkan animasi untuk modus getar kesepuluh.



**Gambar 11** Animasi getaran oleh ConnAn untuk modus getar kesepuluh

Dengan program ini maka dapat dilakukan analisis struktur tiga dimensi secara mudah terhadap berbagai model sistem terutama untuk batang penghubung.

### Hasil dan Analisis struktur batang penghubung

Batang penghubung merupakan komponen penting dalam motor bakar torak, karena karakteristik yang dimilikinya akan menentukan prestasi kerja dari motor bakar torak. Batang penghubung berfungsi untuk mentransmisikan daya yang dihasilkan ruang bakar dengan mengubahnya dari gerakan translasi ke gerakan rotasi. Dengan adanya beban yang berat tersebut, maka batang penghubung merupakan komponen yang paling kritis dalam motor bakar torak, dan kemungkinan untuk mengalami gagal cukup tinggi. Untuk itu perlu dilakukan proses perancangan struktur yang akurat mencakup beberapa aspek pembebanannya. Sumber utama pembebanannya adalah berasal dari tekanan yang dihasilkan dalam ruang bakar, temperatur dari ruang bakar, dan juga dari pengaruh getaran.

Analisis yang dilakukan menggunakan perangkat lunak metode elemen hingga ConnAn yang telah dibandingkan terhadap perangkat lunak Nastran. Perlu diketahui bahwa semua hasil analisis yang diperoleh pada penelitian ini dihitung menggunakan perangkat lunak ConnAn secara otomatis. Pemodelan yang digunakan menggunakan elemen heksahedral isoparametrik dengan delapan titik simpul. Langkah pertama yang dilakukan adalah dengan melakukan penyusunan elemen-elemen untuk melakukan diskritisasi terhadap batang penghubung. Penyusunan dilakukan terhadap elemen dengan perincian sebagai berikut :

1. Jumlah elemen = 74
2. Jumlah titik simpul tiap elemen = 8
3. Jumlah derajat kebebasan tiap titik simpul = 3

4. Jumlah total titik simpul dalam sistem = 204

Untuk simulasi ini maka digunakan asumsi motor bakar menggunakan siklus udara ideal volume konstan, atau siklus Otto. Siklus beban yang terjadi pada kedua ujung batang penghubung dibutuhkan untuk analisis tegangan dan regangannya sehingga diperlukan parameter input berupa tekanan dalam ruang bakar. Untuk mensimulasikan perubahan tekanan pada ruang bakar maka harus diketahui tekanan maksimum dalam ruang bakar untuk kemudian dilakukan perhitungan berdasarkan rumus-rumus siklus udara ideal volume konstan. Parameter luar yang dibutuhkan dalam analisis simulasi ini dapat dilihat Tabel 1 berikut ini:

**Tabel 1** Spesifikasi batang penghubung

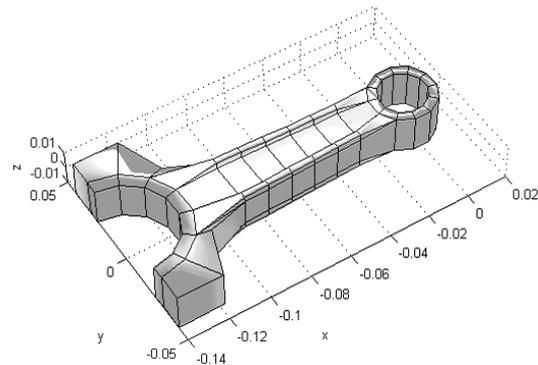
Lambang	Definisi	Satuan	Nilai
$r$	Perbandingan kompresi	-	10.3
$k$	Koefisien ekspansi	-	1.4
$p_{max}$	Tekanan maksimum	N/m <sup>2</sup>	1013250
$p_{atm}$	Tekanan atmosfer	N/m <sup>2</sup>	101325
$N$	Putaran Mesin	RPM	3000
$D$	Diameter bore	mm	81

Karena analisis menggunakan metode elemen hingga, maka dibutuhkan parameter spesifikasi material berupa data yang tercantum dalam Tabel 2 berikut ini:

**Tabel 2** Spesifikasi material batang penghubung

Simbol	Keterangan	Satuan	Nilai
$E$	Modulus elastisitas	N/m <sup>2</sup>	2,07x10 <sup>11</sup>
$\rho$	Massa jenis	Kg/m <sup>2</sup>	6000
$\nu$	Perbandingan Poisson	-	0.3
$YS$	Tegangan luluh	N/m <sup>2</sup>	7 x10 <sup>8</sup>
$K$	Koefisien konduksi	W/m°C	35
$\alpha$	Koefisien ekspansi termal	(m/m)/°C	2.0x10 <sup>-6</sup>

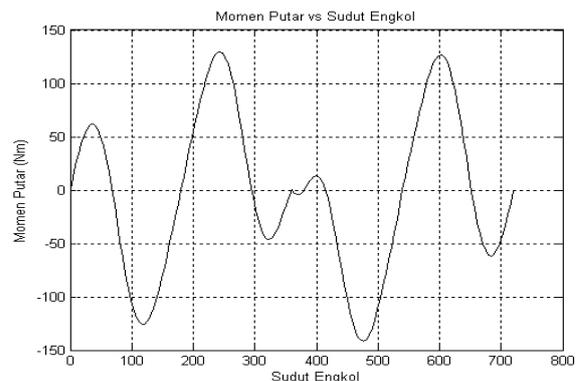
Meshing yang dihasilkan oleh program ConnAn dapat dilihat pada Gambar 12 berikut :



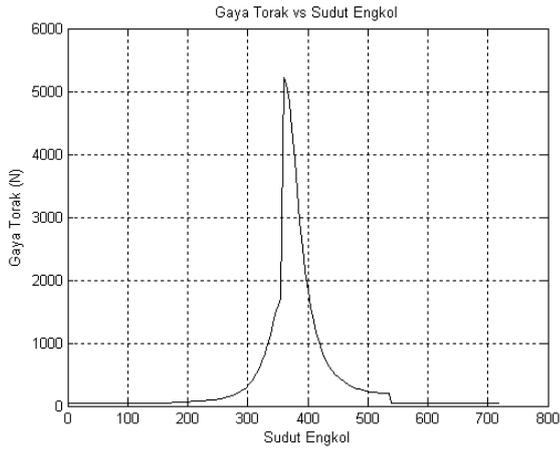
**Gambar 12** Meshing pada batang penghubung menggunakan program ConnAn (satuan meter)

Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan yang diperoleh dengan menggunakan program ConnAn untuk nilai-nilai maksimumnya. Siklus momen putar, gaya pada torak, dan reaksi gaya pada salah satu sambungan pada ujung batang penghubung secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 13, Gambar 14, dan Gambar 15.

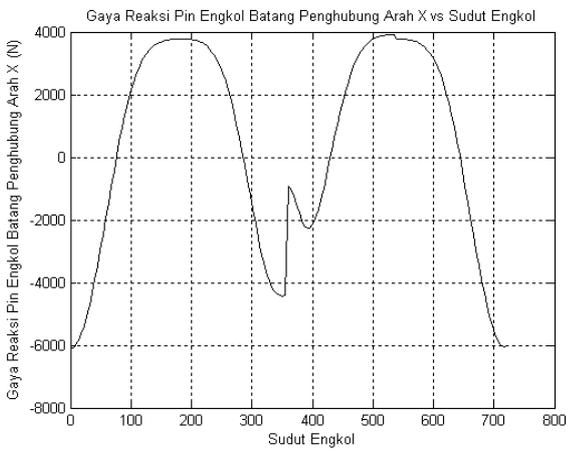
Tampilan keluaran grafis hasil perhitungan berupa defleksi, distribusi temperatur, distribusi tegangan normal dapat dilihat pada Gambar 16 hingga Gambar 19.



**Gambar 13** Momen putar terhadap sudut engkol



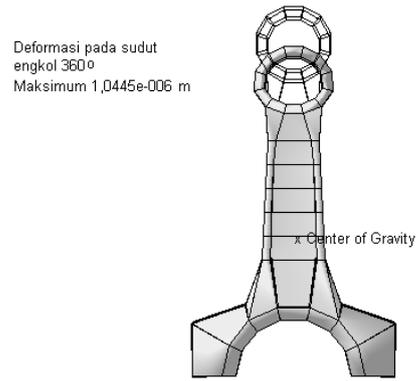
**Gambar 14** Grafik gaya torak terhadap sudut engkol



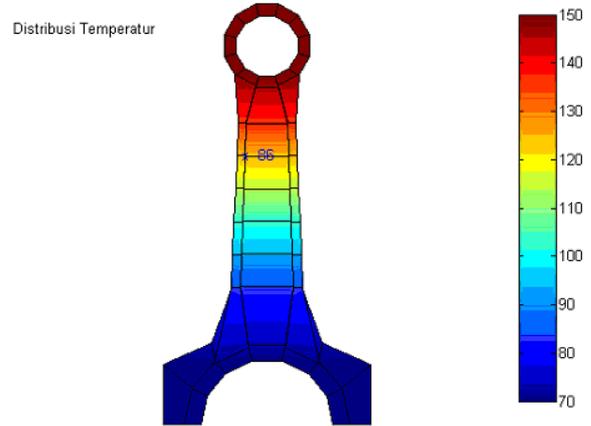
**Gambar 15** Grafik reaksi pin engkol batang penghubung arah sumbu x terhadap sudut engkol

**Tabel 3** Kriteria Analisis Untuk Nilai Maksimum dan Minimum

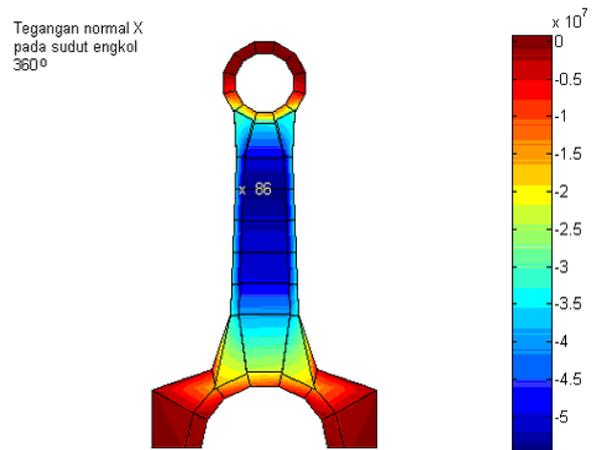
Kriteria	Maksimum	Minimum
Defleksi Total [m]	$4,4 \times 10^{-5}$	0
Tegangan Normal $x$ [ $N/m^2$ ]	$3,3 \times 10^8$	$-2,2 \times 10^8$
Tegangan Normal $y$ [ $N/m^2$ ]	$6,8 \times 10^6$	$4,8 \times 10^6$
Tegangan Normal $z$ [ $N/m^2$ ]	$2,7 \times 10^6$	$3,9 \times 10^6$
Tegangan Geser $xy$ [ $N/m^2$ ]	$2,5 \times 10^6$	$3,5 \times 10^7$
Tegangan Geser $yz$ [ $N/m^2$ ]	$7 \times 10^5$	$1,1 \times 10^6$
Tegangan Geser $zx$ [ $N/m^2$ ]	$6 \times 10^5$	$8,5 \times 10^5$
Tegangan Von Misses [ $N/m^2$ ]	$3,4 \times 10^8$	$4 \times 10^7$



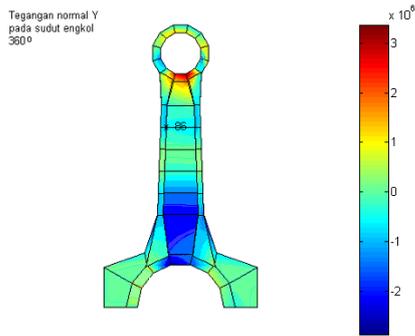
**Gambar 16** Defleksi yang terjadi akibat gaya reaksi pada kedua pinnya



**Gambar 17** Distribusi temperatur



**Gambar 18** Distribusi tegangan normal  $x$  pada sudut engkol  $360^\circ$



**Gambar 19** Distribusi tegangan normal y pada sudut engkol 360°

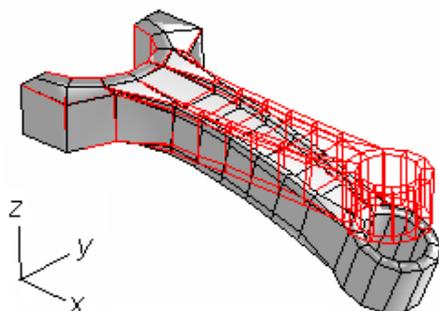
Pada bagian berikut akan dianalisis karakteristik dinamik dari batang penghubung menggunakan bantuan dari program ConnAn.

**Tabel 4** Frekuensi Natural dan Perbandingan Redaman

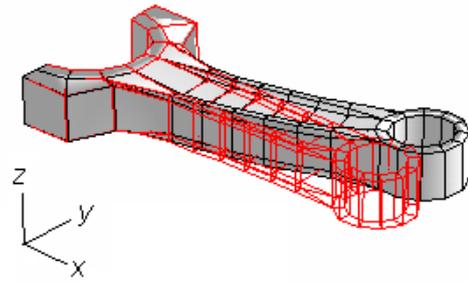
Modus Getar	Frekuensi Natural [Hz]	Perbandingan Redaman
1	1468,90	0.0461
2	2125,00	0.0667
3	5999,28	0.1884
4	7328,10	0.2301
5	8683,66	0.2727
6	12893,75	0.4049
7	16223,88	0.5094
8	17523,40	0.5502
9	18982,30	0.5960
10	25791,08	0.8098

Tabel 4 di atas menunjukkan 10 frekuensi natural pertamanya disertai perbandingan redamannya. Terlihat bahwa frekuensi naturalnya yang pertama adalah 1468,90 Hz. Untuk menghindari terjadinya kegagalan, maka batang penghubung hanya boleh bekerja pada daerah dibawah frekuensi natural tersebut.

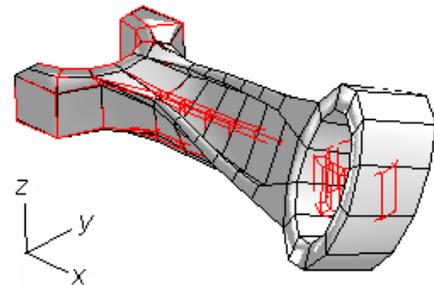
Masing-masing modus getarnya ditunjukkan pada Gambar 20 hingga Gambar 29.



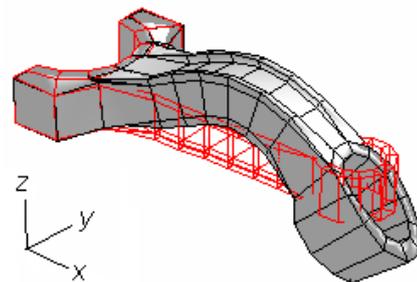
**Gambar 20** Modus pertama bending



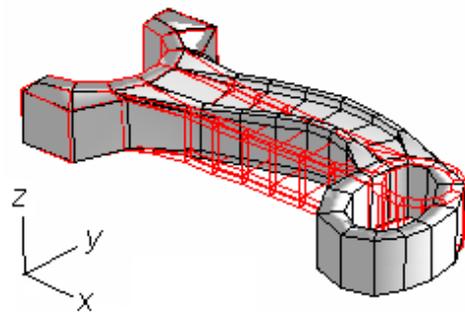
**Gambar 21** Modus kedua bending



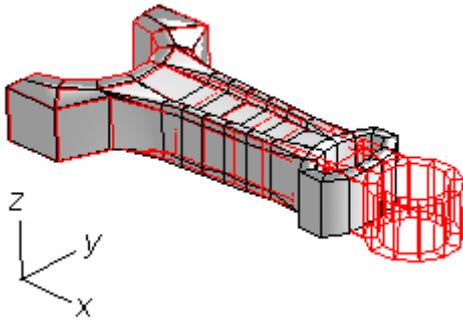
**Gambar 22** Modus ketiga puntir



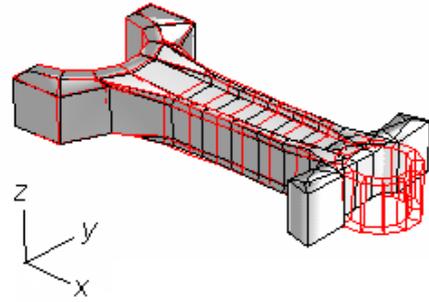
**Gambar 23** Modus keempat bending



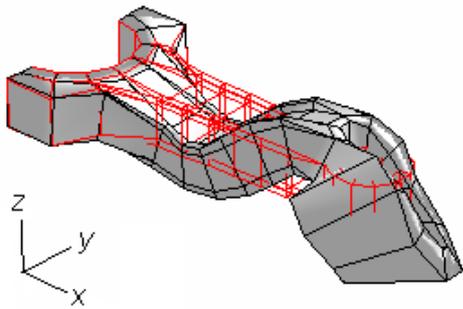
**Gambar 24** Modus kelima bending



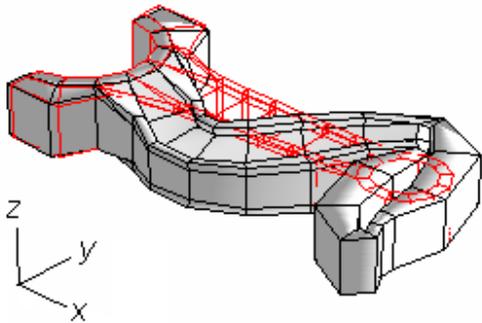
**Gambar 25** Modus keenam tarik-tekan



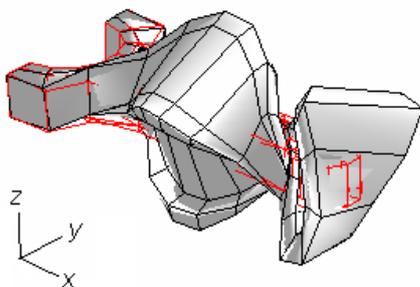
**Gambar 29** Modus kesepuluh tarik-tekan



**Gambar 26** Modus ketujuh bending



**Gambar 27** Modus kedelapan bending



**Gambar 28** Modus kesembilan puntir

## Kesimpulan

Dari penelitian penelitian ini dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Program elemen hingga yang dibuat pada penelitian ini yang menggunakan metoda elemen hingga dapat digunakan untuk berbagai kasus analisis struktur yang berupa analisis tegangan-regangan, analisis perpindahan panas dan juga analisis untuk mencari parameter dinamik.
2. Perangkat lunak ini memiliki keakuratan yang sangat baik. Hal ini terlihat dalam proses perbandingan dengan program-program aplikasi komersial.

## Penghargaan

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, FTMD ITB atas dukungan dan bantuan dana untuk penelitian ini.

## Referensi

- [1] Wiranto, Arismunandar, Motor Bakar Torak, Bandung: Penerbit ITB, 2002.
- [2] H. R. C. Mabie, Mechanisms and Dynamics of Machinery 4th ed., Canada: John Wiley & Sons, 1987.
- [3] Setio, Sangriyadi, Catatan Kuliah Metode Elemen Hingga.
- [4] D. Logan, Finite Element Method 3rd ed., New York: Brooks, 2002.
- [5] Wiranto, Arismunandar, Sangriyadi Setio, *Pemasangan Motor dan Pondasi*, Paper Teknik: Bandung.
- [6] D. Pepper, The Finite Element Method, New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
- [7] Setio, Sangriyadi, Catatan Kuliah Analisis Struktur.