

**KOMPUTASI DINDING BERLUBANG LAPIS GEDEK  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA  
DENGAN ELEMEN SEGITIGA**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**ALWAN WIJAYA**

**NIM. 0001060005 - 61**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2007**

**KOMPUTASI DINDING BERLUBANG LAPIS GEDEK  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA  
DENGAN ELEMEN SEGITIGA**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**



**Disusun oleh:**

**ALWAN WIJAYA  
NIM. 0001060005 – 61**

**DOSEN PEMBIMBING**

**Prof. Ir. Sri Murni Dewi, MS**  
NIP. 130 938 855

**Ir. M. Ruslin Anwar, MSI**  
NIP. 132 215 097

**KOMPUTASI DINDING BERLUBANG LAPIS GEDEK  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA  
DENGAN ELEMEN SEGITIGA**

Disusun oleh :

**ALWAN WIJAYA**  
NIM. 0001060005 – 61

**Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus  
pada tanggal 10 Agustus 2007**

**DOSEN PENGUJI**

**Ir. Widodo Suyadi**  
NIP. 110 015 579

**Prof. Ir. Sri Murni Dewi, MS**  
NIP. 130 938 855

**Ir. M. Ruslin Anwar, MSI**  
NIP. 132 215 097

**Mengetahui :**  
**Ketua Jurusan Teknik Sipil**

**Ir. As'ad Munawir, MT**  
NIP. 131 574 850

## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah skripsi ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur PLAGIASI, saya bersedia skripsi ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (SARJANA TEKNIK) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 tahun 2003 pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

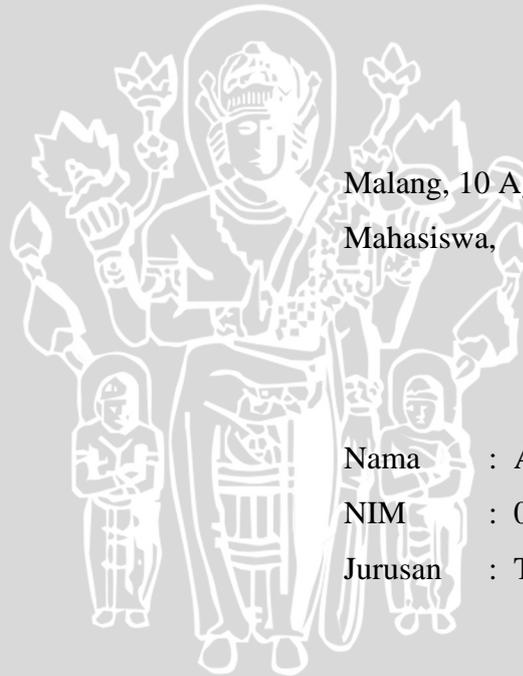
Malang, 10 Agustus 2007

Mahasiswa,

Nama : ALWAN WIJAYA

NIM : 0001060005-61

Jurusan : TEKNIK SIPIL



## KATA PENGANTAR

Skripsi yang saya susun ini merupakan sebuah prasyarat untuk mencapai gelar kesarjanaan S1 yang saya tempuh. Dari skripsi yang berjudul *Komputasi Dinding Berlubang Lapis Gedek Menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM) dengan Elemen Segitiga* ini, saya mencoba membuat program sederhana guna mempermudah proses analisis dinding terutama dinding gedek yang masih jarang diterapkan dalam sebuah struktur. Metode yang saya gunakan adalah metode elemen hingga yang kemudian dikomputasikan dalam bahasa Fortran. Saya berharap hal ini dapat digunakan oleh para engineer sipil ataupun semua kalangan untuk dapat diterapkan dalam aplikasi pembangunan suatu struktur sehingga dapat bermanfaat bagi semua masyarakat.

Sebagai penutup, penyusun mengucapkan terima kasih tak terhingga kepada semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung mendukung penyelesaian skripsi ini, yaitu:

- Prof. DR. Ir. Sri Murni Dewi, MS., selaku dosen pembimbing,
- Ir. M. Ruslin Anwar, MSI, selaku dosen pembimbing,
- Ir. Widodo Suyadi, M.Eng, selaku ketua majelis seminar proporsal skripsi dan Ketua Kelompok Dewan Keahlian Aplikasi,
- Keluarga Besar Teknik Sipil Universitas Brawijaya,
- Keluarga, yang terkasih dan para sahabat.

Walaupun skripsi ini telah selesai, tetapi kritik dan saran tetap perlu ditujukan demi kebaikan dalam penelitian yang mungkin akan dilakukan pada masa mendatang. Sehingga penelitian terhadap dinding dengan elemen hingga dapat selalu berkembang dan berguna bagi masyarakat. Semoga Allah SWT meridhoi. Amin.

Terima kasih.

Malang, 10 Agustus 2007

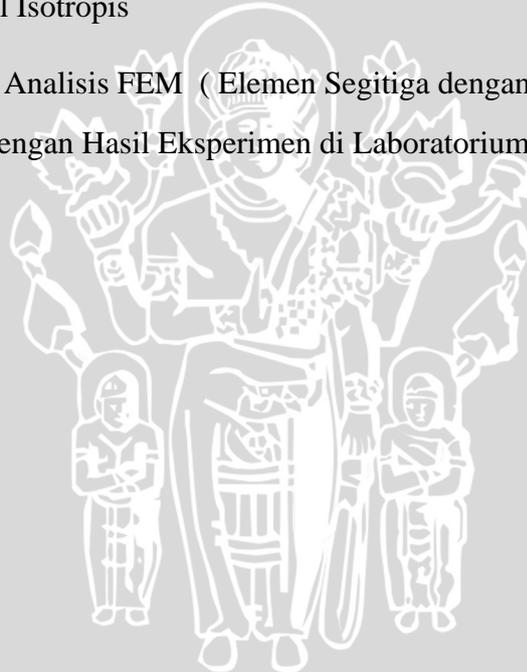
Penyusun

## DAFTAR ISI

## Halaman

<b>KATA PENGANTAR</b>	i
<b>DAFTAR ISI</b>	ii
<b>DAFTAR TABEL</b>	iv
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	v
<b>DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL</b>	viii
<b>RINGKASAN</b>	x
<b>I. PENDAHULUAN</b>	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Pembatasan Masalah	4
1.3. Perumusan Masalah	4
1.4. Tujuan	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	5
2.1. Material Bambu Petung	5
2.2. Transformasi Tegangan - Regangan pada Kontinum dari Arah Material ke Arah Struktur	6
2.3. Elemen Hingga Segitiga	11
2.4. Kondisi Batas Peralihan	17
2.5. Perakitan Matriks Kekakuan Struktur	19
2.6. Metode Solusi Persamaan Simultan	20
2.7. Persyaratan Konvergensi	25
2.8. Batasan Wilayah Tegangan pada Struktur	26
2.9. Respon Panel Dinding Berlubang terhadap Beban Luar	28
2.10. Bahasa Pemrograman FORTRAN	30
<b>III. METODE ANALISIS</b>	37
3.1. <i>Input Data</i>	37
3.2. Prosedur Analisis	37
3.3. Diagram Alir Analisis	38
3.4. Algoritma Pemrograman	39

3.5.	Diagram Alir Pemrograman	44
3.6.	Program Elemen Hingga	76
3.7.	<i>Software</i> Aplikasi Sipil	77
3.8.	Eksperimen Uji Kuat Tekan Spesi dan Bambu	77
<b>IV.</b>	<b>PEMBAHASAN</b>	78
4.1.	Uji Persyaratan Konvergensi pada Panel Dinding Gedek	78
4.2.	Perbandingan Hasil Analisis FEM Segitiga dengan FEM Segiempat	82
4.3.	Perbandingan Hasil Analisis FEM dan <i>Software</i> Staad-Pro2004 untuk Material Isotropis	84
4.4.	Perbandingan Analisis FEM ( Elemen Segitiga dengan Elemen Segiempat ) dengan Hasil Eksperimen di Laboratorium	88
<b>V.</b>	<b>PENUTUP</b>	91
5.1.	Kesimpulan	94
5.2.	Saran	92
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		



## DAFTAR TABEL

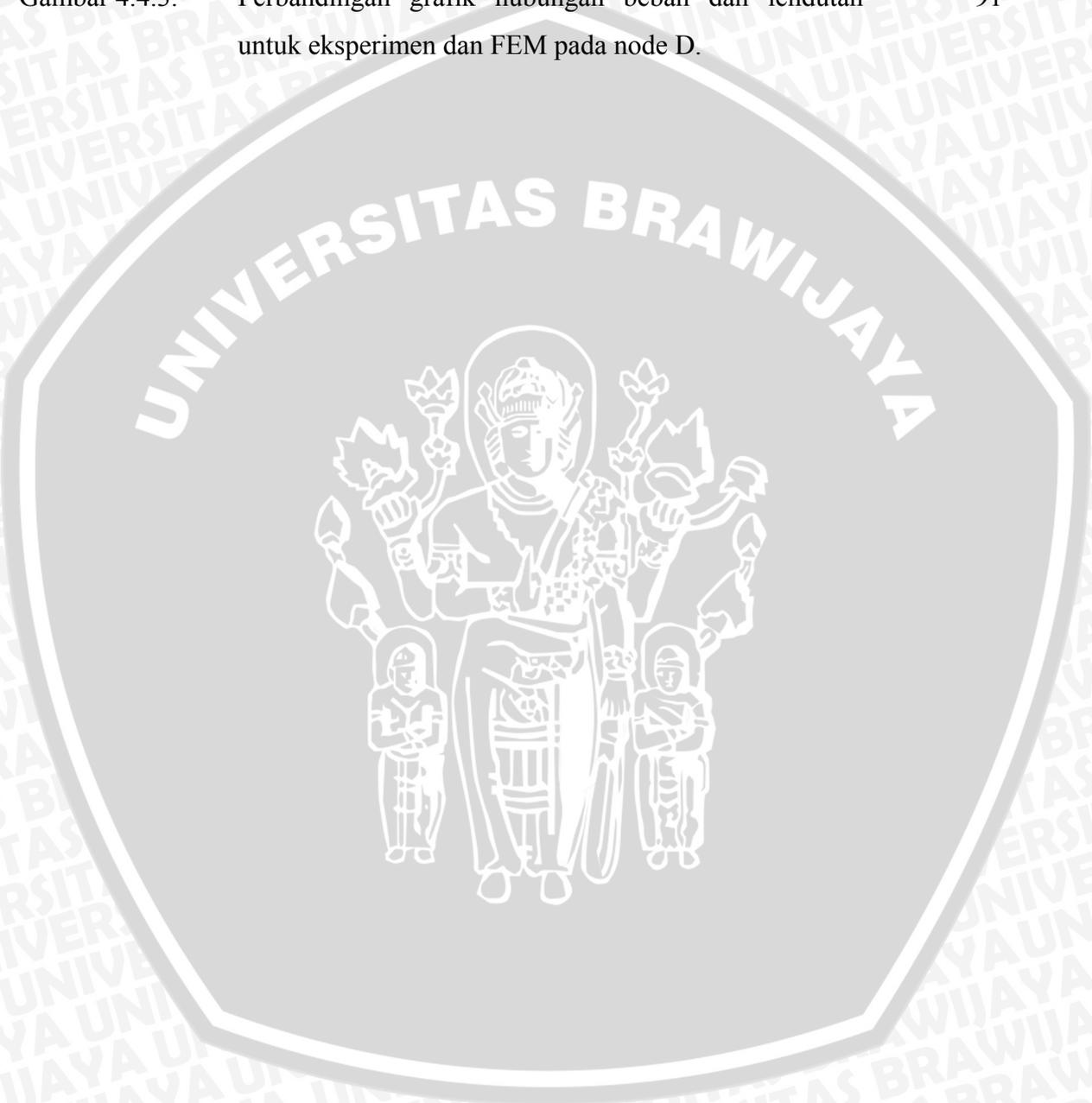
No.	Judul	Halaman
Tabel 2.6.1.	Banyak operasi aritmatika dalam metode solusi persamaan simultan.	21
Tabel 2.6.2.	Ilustrasi perbandingan jumlah operasi aritmatik pada metode determinan, eliminasi gauss, gauss-jordan, crout, doolittle dan cholesky	22
Tabel 2.10.1.	Operator arithmatika.	32
Tabel 2.10.2.	Operator hubungan.	33
Tabel 2.10.3.	Operator logika.	33
Tabel 3.4.1.	Daftar Variabel dalam Program.	39
Tabel 4.1.1.	Tabulasi perpindahan node A, B, C, dan D dengan analisis FEM.	80
Tabel 4.1.2.	Selisih perpindahan terhadap perubahan dimensi elemen.	81
Tabel 4.2.1	Perbandingan analisis FEM Segitiga dan FEM Segiempat pada node A, B, C dan D	83
Tabel 4.3.1.	Perbandingan analisis FEM dan Staad-Pro pada node A dan B.	86
Tabel 4.3.2.	Perbandingan analisis FEM dan Staad-Pro pada node C dan D.	86
Tabel 4.4.2.	Perbandingan lendutan hasil eksperimen dan analisis FEM.	89

## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.1.	Penampang tipikal bambu	5
Gambar 2.1.2.	Foto bambu petung	5
Gambar 2.2.1.	Tegangan dua dimensi pada elemen kecil.	7
Gambar 2.2.2.	Tegangan dalam arah miring pada elemen kecil.	7
Gambar 2.2.3.	Regangan dalam dua dimensi.	8
Gambar 2.2.4.	Bahan ortotropis.	10
Gambar 2.3.1.	Elemen hinggga regangan konstan.	12
Gambar 2.3.1.	Segiempat induk dari elemen isoparametrik kuadrilateral	15
Gambar 2.4.1.	Struktur rangka batang bidang	18
Gambar 2.4.2.a.	Larik $ID$ untuk rangka batang pada Gambar 2.4-1 sesudah nilai 1 dimasukkan untuk derajat bebas yang dikekang	19
Gambar 2.4.2.b.	Larik $ID$ untuk rangka batang pada Gambar 2.4-1 sesudah konversi menjadi daftar nomor persamaan.	19
Gambar 2.5.1.	Struktur yang terdiri atas 4 titik simpul dan 1 derajat kebebasan tiap titik simpul	20
Gambar 2.5.2.	Perakitan matriks kekakuan struktur untuk struktur pada Gambar 2.5-1 ( $NUMEL$ = jumlah elemen)	20
Gambar 2.6.1.	Grafik hubungan jumlah operasi perkalian terhadap jumlah persamaan pada metode eliminasi gauss, gauss-jordan, crout, doolittle dan cholesky	22
Gambar 2.6.2.	Grafik hubungan jumlah operasi penjumlahan terhadap jumlah persamaan pada metode eliminasi gauss, gauss-jordan, crout, doolittle dan cholesky	22
Gambar 2.7.1.	Lima jenis kurva uji konvergensi.	25
Gambar 2.8.1.	Hubungan antara beban luar $P$ dan perpindahan $\delta$ .	28
Gambar 2.9.1.	Grafik hubungan faktor reduksi ( $\gamma$ ) dengan rasio keliling lubang ekuivalen ( $p$ )	29

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.9.2.	Gambar portal dinding dengan lubang yang besar	30
Gambar 2.10.1.	Struktur dan elemen-elemen statement program fortran	32
Gambar 2.10.2.	Bentuk statement continue	34
Gambar 4.1.1.	Lokasi titik A, B, C, dan D pada panel dinding gedek.	78
Gambar 4.1.2.	Contoh data masukan CST.EXE untuk uji konvergensi.	79
Gambar 4.1.3.	Gambar penempatan node untuk elemen 250mm x 250mm di file NODE.txt.	80
Gambar 4.1.4.	Contoh data masukan program CST.EXE untuk uji konvergensi.	80
Gambar 4.1.5.	Grafik uji konvergensi program FEM.	81
Gambar 4.2.1.	Grafik perbandingan program FEM Segitiga dan FEM Segiempat pada node A.	83
Gambar 4.2.2.	Grafik perbandingan program FEM Segitiga dan FEM Segiempat pada node B.	83
Gambar 4.2.3.	Grafik perbandingan program FEM Segitiga dan FEM Segiempat pada node C.	84
Gambar 4.2.4.	Grafik perbandingan program FEM Segitiga dan FEM Segiempat pada node D	84
Gambar 4.3.1.	Contoh data masukan CSTSTD.EXE sebagai material <i>isotropis</i> .	85
Gambar 4.3.2.	Grafik perbandingan program FEM dan Staad pada node A.	86
Gambar 4.3.3.	Grafik perbandingan program FEM dan Staad pada node B.	86
Gambar 4.3.4.	Grafik perbandingan program FEM dan Staad pada node C.	87
Gambar 4.3.5.	Grafik perbandingan program FEM dan Staad pada node D.	87
Gambar 4.4.1.	Contoh data masukan program FEM dengan <i>input</i> beban beragam.	89

No.	Judul	Halaman
Gambar 4.4.2.	Perbandingan grafik hubungan beban dan lendutan untuk eksperimen dan FEM pada node B.	90
Gambar 4.4.3.	Perbandingan grafik hubungan beban dan lendutan untuk eksperimen dan FEM pada node D.	91



## DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

Besaran dasar, keterangan simbol	Satuan	Simbol
Beban terpusat	N	$P$
Matriks fungsi bentuk peralihan elemen hingga segiempat	-	$f$
Matriks geometri elemen hingga segiempat	-	$g$
Matriks kekakuan elemen hingga segiempat	N/mm	$K$
Matriks kekakuan umum ( <i>generalized stiffness</i> )	N/mm	$K_c$
Matriks operator diferensial	-	$D$
Matriks regangan - peralihan	-	$B$
Matriks regangan - peralihan umum	-	$B_c$
Matriks segitiga atas	-	$U$
Matriks tegangan - peralihan	-	$EB$
Matriks transformasi dari arah material ke struktur	-	$T_{ms}$
Matriks transformasi regangan arah struktur ke material	-	$T_{\theta}^{-T}$
Matriks transformasi tegangan arah struktur ke material	-	$T_{\theta}$
(Matriks) modulus elastisitas	N/mm <sup>2</sup>	$E, E$
(Matriks) modulus elastisitas pada arah sumbu material	N/mm <sup>2</sup>	$E_m, E_m$
(Matriks) modulus elastisitas pada arah sumbu struktur	N/mm <sup>2</sup>	$E_s, E_s$
Elemen matriks modulus elastisitas	N/mm <sup>2</sup>	$E_{11}, E_{12}, E_{22},$ $E_{33}$
Modulus geser	N/mm <sup>2</sup>	$G$
(Vektor) peralihan titik nodal	mm	$Q$
Peralihan umum pada elemen hingga segiempat	mm	$u, v$
Rasio <i>Poisson</i>	-	$\nu$
Rasio <i>Poisson</i> (rasio regangan arah sumbu $y$ dan arah $x$ )	-	$\nu_{xy}$
Rasio <i>Poisson</i> (rasio regangan arah sumbu $x$ dan arah $y$ )	-	$\nu_{yx}$
Regangan aksial arah sumbu $x$	-	$\epsilon_x$
Regangan aksial arah sumbu $y$	-	$\epsilon_y$
Regangan geser	-	$\gamma$
Sudut sumbu material terhadap sumbu struktur (utama)	0	$\theta$
Tegangan geser	N/mm <sup>2</sup>	$\tau$



Besaran dasar, keterangan simbol	Satuan	Simbol
Tegangan geser yang bekerja pada sisi $x$ dalam arah $y$	$\text{N/mm}^2$	$\tau_{xy}$
Tegangan normal arah sumbu $x$ dan $y$	$\text{N/mm}^2$	$\sigma_x, \sigma_y$
Vektor peralihan titik nodal bebas	mm	$D_F$
Vektor peralihan titik nodal terkekang	mm	$D_R$
Lebar dan tinggi elemen hingga segiempat	mm	$2a, 2b$
Tegangan maksimum	$\text{N/mm}^2$	$f_{maks}$
Momen lentur pada penampang melintang yang ditinjau,	Nmm	$M$
Jarak suatu titik yang ditinjau terhadap bidang netral	mm	$y$
Momen inersia penampang melintang	$\text{mm}^4$	$I_x$
Ketegaran dinding berlubang	-	$D_F$
Ketegaran dinding tanpa lubang	-	$D_S$
Faktor reduksi ketegaran	-	$\gamma$
Rasio keliling lubang ekuivalen	-	$p$
Luas bagian dinding	$\text{mm}^2$	$A_w$
Luas lubang	$\text{mm}^2$	$A_o$



## RINGKASAN

ALWAN WIJAYA, Jurusan Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2007. *Komputasi Dinding Berlubang Lapis Gedek Menggunakan Metode Elemen Hingga dengan Elemen Segitiga*. Dosen Pembimbing: Prof. DR. Ir. Sri Murni Dewi, MS. dan Ir. M. Ruslin Anwar, MSi.

Dalam fungsinya sebagai analisis struktur, metode eksak untuk hal-hal tertentu dianggap sudah tidak efisien lagi. Oleh karena itu metode pendekatan dirasakan perlu untuk mempercepat dan mempermudah proses pengerjaan. Sesuai dengan judul skripsi yang membahas tentang analisis dinding berlubang lapis gedek, penulis merasa kesulitan dalam menganalisis hal tersebut secara eksak. Dengan demikian salah satu cara yang paling cepat dan tepat dalam menganalisisnya adalah menggunakan metode pendekatan dalam hal ini Metode Elemen Hingga / *Finite Element Method (FEM)*.

Tujuan utama yang ingin dicapai dalam menganalisis dinding lapis gedek menggunakan elemen hingga ini adalah untuk mendapatkan hasil analisis FEM yang benar, yang konvergen dengan jawaban ekasak.

Untuk menyelesaikan analisis dengan FEM ini, digunakan bahasa pemrograman yang bertujuan agar proses analisis dapat berjalan dengan cepat dan tentunya supaya dapat diakses oleh pengguna yang lain. Dalam skripsi ini penulis merakit analisis FEM tersebut menggunakan *Fortran Power Station v. 1.00* dan dihasilkan sebuah program FEM yang dapat menganalisis perpindahan tiap node pada panel dinding. Dari hasil analisis didapat bahwa program FEM telah memberikan suatu jawaban yang bisa diterima, dengan batasan penggunaan ukuran elemen memakai ukuran elemen maksimum. Dengan pembatasan tersebut perbandingan program FEM terhadap program *Staad – Pro 2004*, menghasilkan analisis perpindahan hampir mendekati satu sama lain. Begitu pula perbandingannya dengan program FEM dengan elemen segiempat, juga menghasilkan analisis perpindahan mendekati satu sama lain.



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Penggunaan metode pendekatan dalam menyelesaikan permasalahan dalam bidang teknik sipil semakin populer dimana metode eksak mulai dirasakan oleh sebagian praktisi teknik sipil kurang efisien, walaupun filosofi metode eksak sangat penting dan mendasari lahirnya metode pendekatan.

Salah satu keunggulan metode pendekatan adalah keandalannya dalam menyelesaikan hampir semua permasalahan teknik sipil. Namun, seperti nama yang disandangnya, metode pendekatan hanya mampu mendekati solusi eksak, sehingga konsekuensi yang selalu timbul pada saat seseorang menggunakan metode pendekatan adalah munculnya konsep *kesalahan* atau *galat (error)* yang harus berada dalam ambang yang masih dapat ditoleransi. Sehebat dan secanggih apapun metode pendekatan yang digunakan seseorang, konsep *kesalahan* tetap berlaku dan membedakannya dengan metode eksak.

Kelemahan lain yang dimiliki metode pendekatan adalah kemampuan yang terbatas dalam mencari solusi pada titik sembarang dalam sebuah *domain*, dimana kita tidak akan menemukan persamaan tertutup (*closely equation*) yang mampu mencari besaran yang tidak diketahui (*unknown*) pada titik sembarang seperti pada metode eksak.

Selain itu, metode pendekatan juga membutuhkan banyak data masukan (*input*) dan asumsi yang digunakan untuk menyederhanakan permasalahan. Kemampuan menginterpretasikan data keluaran (*output*) juga mutlak dibutuhkan karena data keluaran bisa sangat banyak jumlahnya dan tidak semua dibutuhkan dalam analisis.

Penggunaan *software* sangat membantu dalam menyelesaikan permasalahan dalam bidang teknik sipil. Namun, bila kita hanya menjadi operator *software* tanpa pernah berusaha memahami konsep dasar yang digunakan perancang *software* tersebut (walaupun kita tidak akan pernah mengetahui detail perencanaan *software* yang tentu saja dirahasiakan), kita akan mengalami kesulitan dalam menginterpretasikan data keluaran.

Ada beberapa metode pendekatan yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan dalam bidang teknik sipil, seperti metode beda hingga (*finite difference method*), metode elemen hingga (*finite element method*), dan sebagainya.

Dari beberapa metode pendekatan tersebut, metode elemen hingga (selanjutnya disingkat *FEM* saja) mencapai kepopuleran yang cukup tinggi dibandingkan metode beda hingga. Perkembangan *FEM* begitu pesat dan mencakup permasalahan di luar bidang teknik, seperti biomekanis, geologi, dan sebagainya.

Pada skripsi yang berjudul *Analisis Dinding Berlubang Lapis Gedek menggunakan Metode Elemen Hingga dengan Elemen Segitiga* ini, penyusun mencoba menggunakan *FEM* untuk mencari berapa besar perpindahan yang terjadi jika struktur dinding komposit spesi dan anyaman serat bambu (selanjutnya disebut dinding gedek saja) dibebani gaya sejajar bidang (*in-plane force*).

Pemilihan model struktur dinding gedek oleh penyusun didasarkan atas beberapa sifat bambu yang cukup menguntungkan, di samping nilai ekonomisnya yang cukup tinggi. Beberapa sifat bambu yang menguntungkan adalah kuat tarik dan tekan sejajar serat tinggi dan bentuk penampang melintang berupa tabung berdinding tebal yang berlubang (diperkaku dengan *node* berjarak teratur) yang menguntungkan dalam mengatasi tekuk dan lentur (Janssen, 1981: 230). Namun, bambu juga memiliki beberapa kelemahan mendasar yang cukup fatal, yaitu kuat geser sejajar serat dan tekan tegak lurus serat rendah, modulus elastisitas sangat rendah, sifat kembang susut besar, keawetan bambu terhadap serangga sangat kurang, dan sebagainya.

Oleh karena itu, kita harus mampu mengoptimalkan kelebihan yang dimiliki oleh bambu dan meminimalisasi kekurangan yang dimilikinya. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk memanfaatkan kelebihan bambu, seperti pemanfaatan bambu sebagai alternatif pengganti tulangan baja, pemakaian bambu sebagai elemen rangka batang dan jembatan, pemanfaatan serat bambu sebagai perkuatan beton bertulang, dan sebagainya.

Namun, tanpa mengesampingkan penelitian-penelitian di atas, ada satu aplikasi bambu yang sangat populer di negara kita dan negara berkembang lainnya, yaitu anyaman serat bambu atau lazim disebut *gedek*. *Gedek* tersusun atas anyaman serat bambu yang saling tegak lurus. Anyaman yang saling tegak lurus tersebut mampu mengatasi kelemahan bambu pada arah tegak lurus serat.

Umumnya, *gedek* dimanfaatkan sebagai dinding rumah. Privasi yang rendah akibat tembus pandangnya anyaman *gedek* sering diatasi dengan melapisi dinding *gedek* dengan spesi. Namun, lekatan yang lemah antara *gedek* dan spesi menyebabkan spesi perlahan-lahan rontok.

Ide pemanfaatan bambu dalam bentuk *gedek* semakin berkembang dengan adanya tantangan yang cukup besar, yaitu bagaimana kita meningkatkan lekatan antar *gedek* dan spesi ? Salah satu ide yang muncul adalah penempatan *shear connector* (penghubung geser) pada jarak tertentu untuk menambah daya lekat spesi dan *gedek*. Penghubung geser tersebut berupa kawat bendrat berdiameter 1 mm. Dengan adanya penghubung geser berupa kawat, aksi komposit diharapkan terjadi dan slip geser antara *gedek* dan spesi diminimalisasi.

Pertanyaan berikutnya adalah bagaimana komposisi struktur dinding komposit tersebut ? Apakah terdiri dari dua lapis saja, yaitu *gedek* dan spesi plus penghubung gesernya ? Ataukah seperti struktur *sandwich* atau multipleks, yaitu spesi - *gedek* - spesi atau *gedek* - spesi - *gedek* ?

Jawaban yang dipilih adalah struktur dinding komposit yang tersusun atas *gedek* - spesi - *gedek*. Maksudnya, lapisan spesi dengan tebal tertentu diapit oleh dua lapisan luar berupa *gedek*. Pemilihan komposisi ini didasarkan atas pertimbangan lapisan yang lebih kuat namun tipis berada pada sisi luar dan lapisan yang lebih lemah dan tebal berada pada sisi dalam. Multipleks adalah contoh yang bagus dalam pemanfaatan komposisi tersebut.

Pertanyaan selanjutnya yang muncul adalah bagaimanakah cara mengatasi atau paling tidak mengurangi sifat kembang susut bambu yang cukup besar ? Sifat kembang susut tersebut berkaitan erat dengan keawetan bambu terhadap serangan serangga. Salah satu solusi yang sering dilakukan adalah melapisi bambu (dalam hal ini adalah *gedek*) dengan lapisan kedap air, seperti cat, kapur, aspal, vernis, dan sebagainya. Akhirnya, lapisan kedap air yang dipilih adalah pemberian lapisan vernis pada *gedek*.

Pada penelitian sebelumnya, struktur dinding *gedek* tersusun atas dua lapis anyaman serat bambu yang mengapit spesi. Dan pada penelitian ini, akan dianalisa struktur dinding *gedek* yang tersusun atas tiga lapis anyaman serat bambu yang mengapit spesi menjadi *gedek-spesi-gedek-spesi-gedek* yang diberikan lubang yang besar dan penempatannya divariasi.

Bambu yang digunakan adalah bambu petung. Bambu petung atau *Dendrocalamus asper* (Roem. & Schultf.) Backer ex Heyne memiliki kuat tekan sejajar serat, kuat tekan tegak lurus serat, dan kuat tarik sejajar serat rata-rata yang cukup tinggi, yaitu berturut-turut 49,5 MPa, 188 MPa, dan 259 MPa (Ignatius Aji, 1995: XV). Selain data-data numerik yang menarik tersebut, bambu petung merupakan salah satu

spesies bambu yang sangat populer dan banyak diaplikasikan sebagai bahan bangunan, saluran air, dan sebagainya.

### 1.2. Pembatasan Masalah

Beberapa pembatasan masalah perlu diberikan pada skripsi ini, terutama berkaitan dengan asumsi yang digunakan dalam analisis *FEM*. Beberapa asumsi yang digunakan dalam analisis ini adalah:

- ▶▶ Slip geser antara anyaman serat bambu diabaikan.
- ▶▶ Elemen hingga yang digunakan adalah *elemen hingga segitiga regangan konstan* (*constant strain triangle* – CST).
- ▶▶ Keruntuhan dinding gedek yang ditandai dengan delaminasi dinding gedek tidak ditinjau.
- ▶▶ Elemen antar lamina (gedek dengan spesi dan antar anyaman gedek) tidak ditinjau.
- ▶▶ Gaya sejajar bidang *P* bekerja terpusat pada dinding gedek dengan interval tertentu.
- ▶▶ Nilai modulus *Young* bambu dan spesi, kuat tekan bambu sejajar serat dan spesi, kuat tekan tegak lurus serat, kuat tarik bambu sejajar serat, kadar air bambu, gradasi agregat halus dan kasar, dan rasio *Poisson* bambu ditentukan dari hasil pengujian laboratorium dan dipakai dalam analisis *FEM* skripsi ini.
- ▶▶ Penyangga pada sisi panjang dinding gedek dipasang untuk menahan gerakan dinding gedek sejajar dinding gedek.

### 1.3. Perumusan Masalah

Dari subbab 1.1 sebelumnya, kita tentu dapat merumuskan permasalahan dalam skripsi ini, yaitu:

- ▶▶ Bagaimanakah respon struktur dinding berlubang komposit spesi - gedek ketika ia menerima gaya sejajar bidang.
- ▶▶ Bagaimanakah perbandingan analisa program FEM segitiga dengan FEM segiempat.

### 1.4. Tujuan

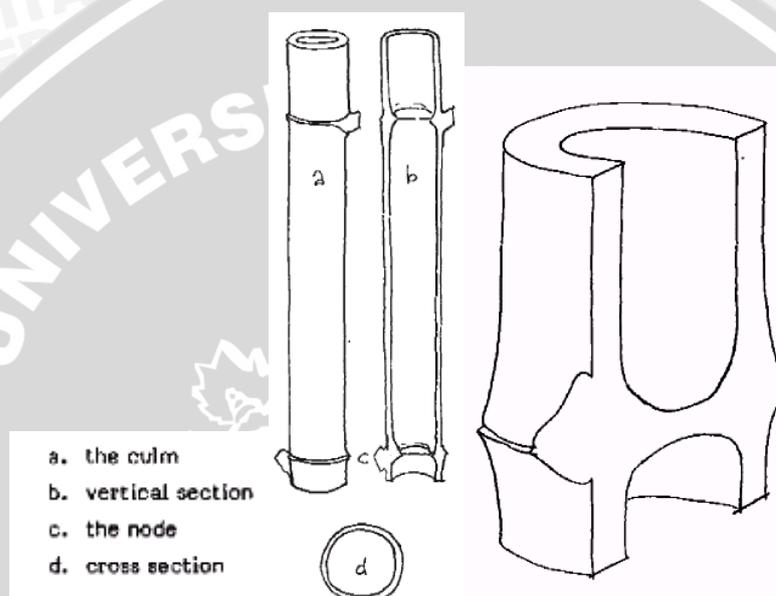
Tujuan yang ingin dicapai dari penyusunan skripsi ini adalah:

- ▶▶ Mendapatkan respon perpindahan struktur dinding berlubang komposit spesi - gedek ketika ia menerima gaya sejajar bidang.
- ▶▶ Mendapatkan hasil analisis FEM yang konvergen dengan jawaban eksak.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Material Bambu Petung

Secara umum, bambu (termasuk bambu petung) memiliki penampang tipikal seperti digambarkan dalam Gambar 2.1.1 berikut ini.



Gambar 2.1.1. Penampang tipikal bambu (Janssen, 1981: 24).



Gambar 2.1.2. Foto bambu petung *Dendrocalamus asper* (Roem. & Schultf.) Backer ex Heyne (<http://www.indonesianforest.com/>).

Selanjutnya, pembahasan mengenai bambu petung dan anyaman serat bambu (*gedek*, Jawa) diambil dari (Rudi Basuki, 1982: 4-5, 23-24).

Pada saat bambu petung masih muda, warnanya hijau kekuningan. Tingginya mencapai 20 m dan bergaris tengah hingga 20 cm. Buku-bukunya sering berakar pendek menggerombol. Panjang ruas 40-60 cm dan tebal dinding buluhnya 1-1,5 cm. Pada buku-buku bagian atas, cabangnya bercabang lagi. Cabang primer lebih besar dan sering dominan. Pelepah buluh yang panjangnya 20-25 cm mudah jatuh dan miangnya bewarna coklat muda keputih-putihan. Daun pelepah buluh sempit dan melipat ke bawah.

Bambu petung dapat dijumpai dan tumbuh baik di dataran rendah hingga daerah dengan ketinggian 2000 m di bawah permukaan laut. Ia tumbuh baik di tanah subur, terutama di daerah beriklim tidak terlalu kering.

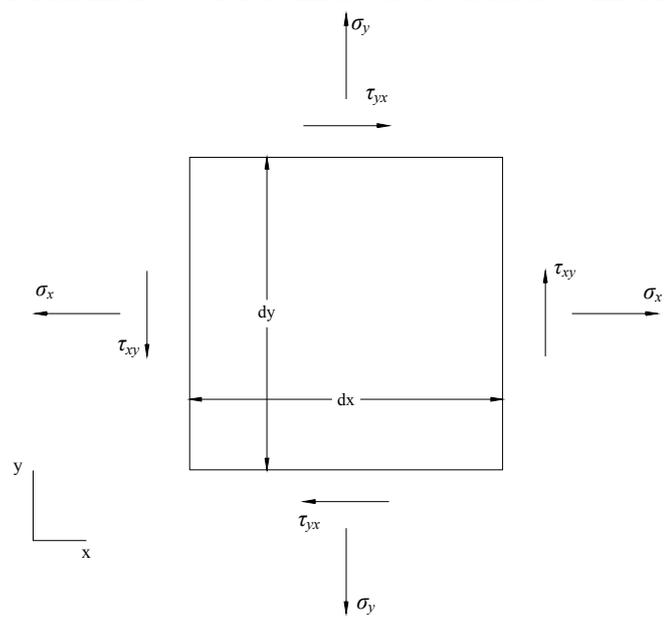
Karena sifat bambu petung keras dan seratnya besar serta ruasnya panjang, ia digunakan sebagai bahan bangunan, tempat air, saluran air di desa-desa, penampung sadapan dan pipa penyuling air aren, bahan baku anyaman, dan sebagainya.

Anyaman yang digunakan sebagai material dinding lapis anyaman bambu adalah anyaman sasag dengan lebar anyaman (*iratan*, Jawa) 8 mm dan 16 mm. Anyaman sasag diperoleh dengan prinsip mengangkat satu lusi dan menumpangkan satu pakan. Pakan adalah bagian anyaman yang melintang dan lusi adalah bagian anyaman yang membujur. Lembaran anyaman yang sudah selesai (sesuai ukuran) disebut *ilab*.

## **2.2. Transformasi Tegangan-Regangan pada Kontinum dari Arah Material ke Arah Struktur**

Sebelum membahas metode elemen hingga pada subbab 2.3, kita perlu mengetahui persamaan dasar transformasi tegangan dan regangan suatu kontinum dari arah material ke arah struktur. Pembahasan berikut diambil dari (William Weaver J.R. dan Paul R. Johnston, 1993: 73-86).

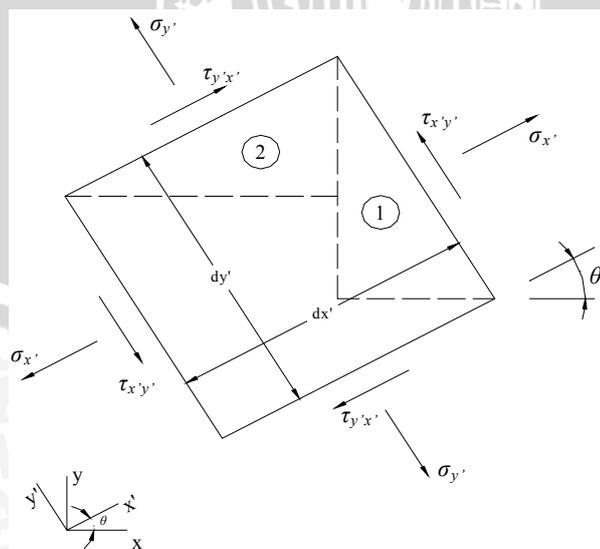
Bila pelat tipis dibebani gaya sejajar bidang pelat, keadaan tegangan dan deformasinya disebut *tegangan bidang* yang dapat dianalisis dalam arah 2 dimensi (pada bidang pelat tersebut). Sebaliknya, sebuah benda pejal prismatis yang dibebani pada arah normal terhadap sumbunya dapat dianalisis sebagai keping kecil 2 dimensi per satuan tebal (dikenal dengan nama *regangan bidang*).



Gambar 2.2.1. Tegangan dua dimensi pada elemen kecil (William Weaver, J.R. dan Paul R. Johnston, 1993: 74).

Vektor tegangan bebas dalam elemen kecil berdimensi  $dx$  dan  $dy$ , memiliki tegangan normal  $\sigma_x$  dan  $\sigma_y$ , tegangan geser  $\tau_{xy}$  yang bekerja pada sisi  $x$  dalam arah  $y$ , dan tegangan geser komplement  $\tau_{yx}$ , dapat ditulis (lihat Gambar 2.2.1):

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.2-1)$$



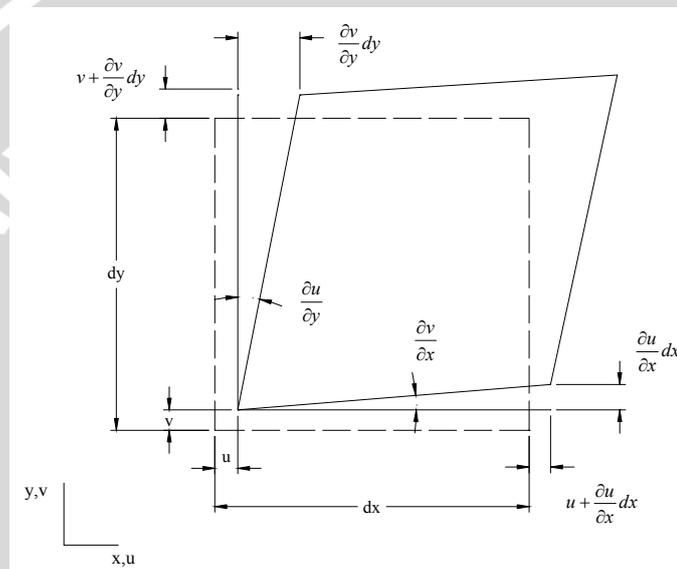
Gambar 2.2.2. Tegangan dalam arah miring pada elemen kecil (William Weaver, J.R. dan Paul R. Johnston, 1993: 74).

Tegangan elemen dalam arah bukan utama,  $x'$  dan  $y'$  (sumbu  $x'$  dan  $y'$  membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu  $x$  dan  $y$ ) adalah :

$$\sigma' = T_{\theta} \sigma \quad (2.2-2)$$

dengan  $T_{\theta}$  mempunyai bentuk :

$$T_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.2-3)$$



Gambar 2.2.3. Regangan dalam dua dimensi (William Weaver, J.R. dan Paul R. Johnston, 1993: 78).

Jika elemen tersebut mengalami perpindahan sebesar  $u$  dan  $v$  dalam arah sumbu  $x$  dan  $y$  seperti pada Gambar 2.2.3 di atas, regangan yang terjadi dapat ditulis :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.2-4)$$

di mana  $\varepsilon_x$  dan  $\varepsilon_y$  adalah *regangan normal* dalam arah  $x$  dan  $y$  serta  $\gamma_{xy}$  adalah *regangan geser*. Sedangkan regangan dalam arah  $x'$  dan  $y'$ ,  $\varepsilon'$ , dapat ditulis :

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = T_{\theta}^T \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.2-5)$$

dengan :

$$T_{\theta}^T = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2 \sin \theta \cos \theta & 2 \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2.2-6)$$

Bila material diasumsikan *isotropis* berada dalam keadaan tegangan bidang, asumsi yang dapat diambil untuk mencari hubungan tegangan dan regangan adalah :

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad \varepsilon_z \neq 0 \quad (2.2-7)$$

Matriks hubungan tegangan regangan pada kondisi tegangan bidang adalah :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C}\boldsymbol{\sigma} \quad (2.2-8)$$

dengan :

$$\mathbf{C} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad (2.2-9)$$

Selain itu,

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.2-10)$$

Dengan :

$$\mathbf{E} = \mathbf{C}^{-1} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}, \text{ di mana } \lambda = \frac{1-\nu}{2} \quad (2.2-11)$$

Sedangkan hubungan tegangan dan regangan material *isotropis* dalam kondisi regangan bidang dapat dicari berdasarkan asumsi di bawah ini :

$$\varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad \sigma_z \neq 0 \quad (2.2-12)$$

Nilai  $\mathbf{C}$  dan  $\mathbf{E}$  pada Persamaan 2.2-8 dan 2.2-10 berturut-turut adalah :

$$\mathbf{C} = \frac{1+\nu}{E} \begin{bmatrix} 1-\nu & -\nu & 0 \\ -\nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.2-13)$$

dan

$$\mathbf{E} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.2-14)$$

Bila sebuah material diasumsikan *anisotropis ortogonal (ortotropis)* dalam arah  $x$  dan  $y$  untuk kasus tegangan bidang, nilai  $\mathbf{C}$  dan  $\mathbf{E}$  pada Persamaan 2.2-8 dan 2.2-10:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \quad (2.2-15)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} \begin{bmatrix} E_x & \nu_{xy}E_x & 0 \\ \nu_{yx}E_y & E_y & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_{xy}\nu_{yx})G_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.2-16)$$

di mana :  $\frac{1}{G_{xy}} \approx \frac{1+\nu_{yx}}{E_x} + \frac{1+\nu_{xy}}{E_y}$  dan  $\frac{E_y}{E_x} = \frac{\nu_{xy}}{\nu_{yx}}$  (teorema resiprok)

Untuk kasus regangan bidang material *ortotropis*, nilai  $\mathbf{C}$  dan  $\mathbf{E}$  adalah :

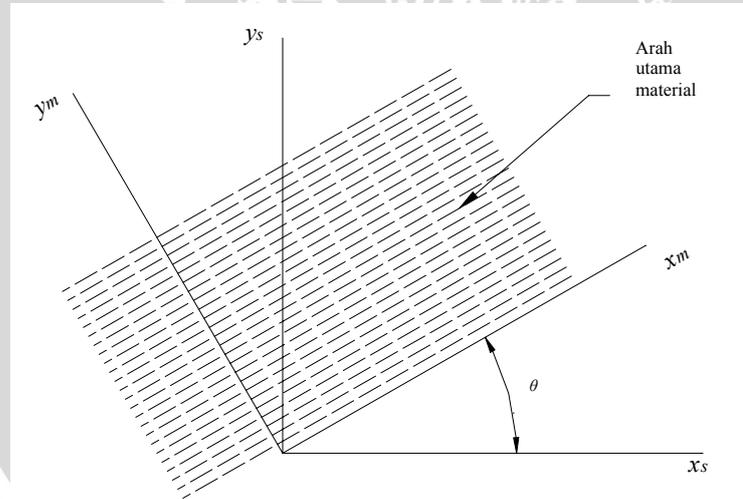
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{d}{E_x} & -\frac{b}{E_y} & 0 \\ -\frac{c}{E_x} & \frac{a}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \quad (2.2-17)$$

dan

$$\mathbf{E} = \frac{1}{ad-bc} \begin{bmatrix} aE_x & bE_x & 0 \\ cE_y & dE_y & 0 \\ 0 & 0 & (ad-bc)G_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.2-18)$$

dengan :

$$a = 1 - \nu_{yz}\nu_{zy} \quad b = \nu_{xy} + \nu_{xz}\nu_{zy} \\ c = \nu_{yx} + \nu_{yz}\nu_{zx} \quad d = 1 - \nu_{xz}\nu_{zx}$$



Gambar 2.2.4. Bahan ortotropis (William Weaver, J.R. dan Paul R. Johnston, 1993: 85).

Persamaan 2.2-7 sampai 2.2-18 bekerja pada arah utama bahan, yaitu sumbu  $x$  dan  $y$  dan mengambil asumsi sumbu bahan sesungguhnya berhimpit dengan sumbu  $x$  dan  $y$ . Jika sebuah kontinum ortotrop 2 dimensi dengan sumbu struktur  $x_m$  dan  $y_m$  membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu struktur  $x_s$  dan  $y_s$ , transformasi regangan dari arah struktur ke arah material dan tegangan dari arah sebaliknya dapat ditulis

$$\boldsymbol{\varepsilon}_m = \mathbf{T}_{ms} \boldsymbol{\varepsilon}_s \quad (2.2-19)$$

$$\sigma_s = T_{ms}^T \sigma_m \quad (2.2-20)$$

$$T_{ms} = T_{\theta}^{-T} \quad (2.2-21)$$

di mana :  $\sigma_m = E_m \epsilon_m$  dan  $\sigma_s = E_s \epsilon_s$  (2.2-22 dan 2.2-23)

dan  $E_s = T_{ms}^T E_m T_{ms}$  (2.2-24)

Struktur dinding gedek yang dibahas pada skripsi ini terdiri dari gedek dan spesi. Spesi dapat diasumsikan sebagai bahan *isotropis*, sedangkan gedek diasumsikan sebagai bahan *anisotropis orthogonal (orthotropis)*. Gedek memiliki sifat-sifat mekanis yang berbeda pada arah sejajar serat dan tegak lurus serat yang dibuktikan dalam percobaan di laboratorium. Selain itu, gedek terdiri dari dua jenis anyaman yang saling tegak lurus, sehingga sifat mekanis serat yang membentuk sudut  $90^0$  harus ditransformasikan terhadap sumbu struktur. Jika sifat mekanis yang diambil adalah *modulus Young E*, matriks modulus *Young* yang timbul pada lapisan gedek adalah:

$$E_{s(\text{gedek})} = E_{m(\text{gedek } 0^0)} + T_{ms}^T E_{m(\text{gedek } 90^0)} T_{ms} \quad (2.2-25)$$

Karena elemen antar lamina dan slip geser antar anyaman gedek diabaikan, matriks *E* pada gedek dan spesi dapat dijumlahkan seperti operasi penjumlahan matriks biasa untuk mendapatkan sifat mekanis (ataupun kekakuan) komposit gedek dan spesi.

### 2.3. Elemen Hingga Segitiga

Pembahasan subbab 2.3 ini diambil dan diringkas dari (William Weaver, J.R. dan Paul R. Johnston, 1993: 1-4, 101-108) dengan beberapa perubahan seperlunya.

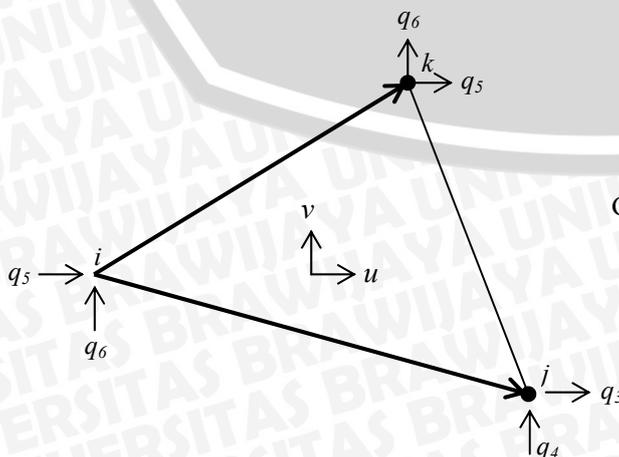
Bila suatu kontinum dibagi menjadi beberapa bagian yang lebih kecil, mereka disebut *elemen hingga*. Elemen hingga ini berukuran kecil namun berhingga dan memiliki geometri yang lebih sederhana dibandingkan dengan kontinumnya. Dengan metode ini, kita dapat mengubah masalah dengan jumlah derajat kebebasan tak berhingga menjadi masalah dengan derajat kebebasan tertentu.

Ada beberapa pendekatan yang digunakan dalam analisis struktur, seperti pendekatan *klasik*, *metode beda hingga*, maupun *metode elemen hingga*. Pendekatan klasik analisis benda pejal memerlukan fungsi tegangan atau peralihan yang harus memenuhi persamaan diferensial keseimbangan, hubungan tegangan dan regangan, dan kompatibilitas pada tiap titik kontinum, termasuk syarat batas (*boundary conditions*). Ketatnya persyaratan tersebut menyebabkan sedikit pemecahan klasik yang ditemukan. Selain pendekatan klasik, kita dapat menggunakan *metode beda hingga*. Namun, syarat batas metode ini sulit dipenuhi dan akurasi perhitungan rendah.

Sebaliknya, pendekatan dengan elemen hingga berdasarkan asumsi peralihan atau tegangan maupun kombinasi keduanya dalam setiap elemen. Berikut ini adalah langkah-langkah penyelesaian masalah dengan metode elemen hingga berdasarkan fungsi peralihan (merupakan teknik yang sering sekali digunakan):

1. Bagilah kontinum menjadi sejumlah elemen (*subregion*) yang berhingga dengan bentuk geometri sederhana (segitiga, segiempat, dan sebagainya).
2. Pilihlah titik-titik pada elemen yang diperlakukan sebagai titik nodal di mana syarat keseimbangan dan kompatibilitas harus dipenuhi.
3. Asumsikan fungsi peralihan pada setiap elemen sedemikian rupa sehingga peralihan pada setiap titik sembarang dipengaruhi oleh nilai titik nodalnya.
4. Pada setiap elemen khusus yang dipilih tadi harus dipenuhi persyaratan hubungan regangan dan peralihan serta hubungan tegangan dan regangannya.
5. Tentukan kekakuan dan beban titik nodal ekuivalen untuk setiap elemen dengan menggunakan prinsip usaha atau energi.
6. Turunkan persamaan keseimbangan untuk setiap titik nodal dari diskretisasi kontinum ini sesuai dengan kontribusinya.
7. Selesaikan persamaan keseimbangan ini untuk mencari peralihan titik nodal.
8. Hitunglah tegangan pada titik-titik tertentu dalam elemen tadi.
9. Tentukan reaksi perletakan pada titik nodal yang tertahan bila diperlukan.

Selanjutnya, kita akan membahas elemen hingga segitiga yang bermanfaat dalam menganalisis masalah 2 dimensi. Elemen segitiga yang akan dibahas dalam analisis ini adalah elemen segitiga yang cukup terkenal yaitu *elemen segitiga konstan* (constant strain triangle – CST). Gambar berikut memperlihatkan sebuah elemen segitiga regangan konstan dengan tebal  $t$ .



Gambar 2.3.1. Elemen hingga regangan konstan (William Weaver, J.R. dan Paul R. Johnston, 1993: 102).

Peralihan umum elemen ini  $\mathbf{u}$  terdiri dari translasi dalam bidang  $x$ - $y$ , yaitu :

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.3-1)$$

Pada setiap titik nodal terjadi translasi dalam arah  $x$  dan  $y$ , sehingga vektor peralihan titik nodal  $\mathbf{q}$  menjadi :

$$\mathbf{q} = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_6\} = \{u_1, v_1, \dots, v_3\} \quad (2.3-2)$$

Fungsi peralihan asumsi untuk elemen ini adalah :

$$\begin{aligned} u &= c_1 + c_2x + c_3y \\ v &= c_4 + c_5x + c_6y \end{aligned} \quad (2.3-3)$$

Persamaan (2.3-3) menunjukkan fungsi peralihan asumsi tersebut adalah konstan sehingga elemen segitiga ini disebut elemen *segitiga regangan konstan*. Dengan menggunakan fungsi peralihan (2.3-3), matriks geometri  $\mathbf{g}$  menjadi :

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \quad (2.3-4)$$

Matriks  $\mathbf{g}$  di atas dapat dihitung untuk setiap titik nodal agar mendapatkan matriks  $\mathbf{h}$  :

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{g}_2 \\ \mathbf{g}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i \\ \hline 1 & x_j & y_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j \\ \hline 1 & x_k & y_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \quad (2.3-5)$$

Untuk mencari invers dari matriks  $\mathbf{h}$ , matriks  $\mathbf{h}$  diubah menjadi matriks  $\mathbf{h}_T$  :

$$\mathbf{h}_T = \mathbf{T} \mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_1 & O \\ O & h_1 \end{bmatrix} \quad (2.3-6)$$

Operator penyusun ulang (*rearrangement operator*)  $\mathbf{T}$  memiliki bentuk :

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3-7)$$

Dan submatriks  $h_1$ , yang muncul dua kali dalam  $h$ , menjadi :

$$\mathbf{h}_1 = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \quad (2.3-8)$$

Matriks invers  $h^{-1}$  didapatkan dari :

$$h^{-1} = \mathbf{h}_T^{-1} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} h_1^{-1} & O \\ O & h_1^{-1} \end{bmatrix} \mathbf{T} \quad (2.3-9)$$

Submatriks invers  $h_1^{-1}$  dalam persamaan ini adalah :

$$\mathbf{h}_1^{-1} = \frac{h_1^a}{|h_1|} = \frac{(h_1^c)}{|h_1|} = \frac{1}{|h_1|} \begin{bmatrix} x_j y_k - x_k y_j & x_k y_i - x_i y_k & x_i y_j - x_j y_i \\ -y_{jk} & -y_{ki} & -y_{ij} \\ x_{jk} & x_{ki} & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.3-10)$$

dengan  $h_1$  menunjukkan ajoin dari matriks  $h_1^a$ , dan  $h_1^c$  adalah matriks kofaktornya.

Invers matriks  $h$  menjadi :

$$\mathbf{h}^{-1} = \frac{1}{2A_{ijk}} \begin{bmatrix} x_j y_k - x_k y_j & 0 & x_k y_i - x_i y_k & 0 & x_i y_j - x_j y_i & 0 \\ -y_{jk} & 0 & -y_{ki} & 0 & -y_{ij} & 0 \\ x_{jk} & 0 & x_{ki} & 0 & x_{ij} & 0 \\ 0 & x_j y_k - x_k y_j & 0 & x_k y_i - x_i y_k & 0 & x_i y_j - x_j y_i \\ 0 & -y_{jk} & 0 & -y_{ki} & 0 & -y_{ij} \\ 0 & x_{jk} & 0 & x_{ki} & 0 & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.3-11)$$

$A_{ijk}$  merupakan luas segitiga  $ijk$ . Terlihat bahwa :

$$\begin{aligned} 2A_{ijk} &= |h_1| = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \\ &= x_i y_j + x_j y_k + x_k y_i - x_i y_k - x_j y_i - x_k y_j \\ &= x_{ij} y_k + x_{jk} y_i - x_{ik} y_j \\ &= x_{ij} y_{ik} - x_{ik} y_{ij} \end{aligned} \quad (2.3-12)$$

Rumus untuk dua kali luas ini dapat juga dicari dengan mengambil nilai absolut dari perkalian vektor (*cross product*) antara  $\mathbf{V}_{ij}$  dan  $\mathbf{V}_{ik}$ , yaitu :

$$2A_{ijk} = \text{Abs.} (V_{ij} \times V_{ik}) = x_{ij} y_{ik} - x_{ik} y_{ij} \quad (2.3-13)$$

Dengan menggunakan  $h^{-1}$ , kita dapat menentukan fungsi bentuk peralihan  $\mathbf{f}$  yang besarnya :

$$\mathbf{f} = \mathbf{g}\mathbf{h}^{-1} = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & f_2 & 0 & f_3 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 & f_2 & 0 & f_3 \end{bmatrix} \quad (2-3-14a)$$

Dimana :

$$f_1 = \frac{1}{2A_{ijk}}(x_j y_k - x_k y_j - y_{jk} x + x_{jk} y)$$

$$f_2 = \frac{1}{2A_{ijk}}(x_k y_i - x_i y_k - y_{ki} x + x_{ki} y)$$

$$f_3 = \frac{1}{2A_{ijk}}(x_i y_j - x_j y_i - y_{ij} x + x_{ij} y) \quad (2.3-14b)$$

Karena  $f_1, f_2, f_3$ , dan  $f_4$  dinyatakan dalam  $\xi$  dan  $\eta$ , operator diferensial linear  $\mathbf{d}$  menjadi :

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \xi} & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial \eta} & \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \xi} \end{bmatrix} \quad (2.3-15)$$

Selanjutnya, matriks  $\mathbf{B}$  yang menunjukkan regangan pada sembarang titik dalam elemen akibat satu satuan peralihan titik nodal adalah :

$$\mathbf{B} = \mathbf{d}\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \mathbf{f} = \frac{1}{2A_{ijk}} \begin{bmatrix} -y_{jk} & 0 & -y_{ki} & 0 & -y_{ij} & 0 \\ 0 & x_{jk} & 0 & x_{ki} & 0 & x_{ij} \\ x_{jk} & -y_{jk} & x_{ki} & -y_{ki} & x_{ij} & -y_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.3-16)$$

Terlihat bahwa semua elemen matriks  $\mathbf{B}$  berupa konstanta, sehingga elemen ini disebut juga segitiga regangan konstan (*constant strain triangle – CST*).

Hubungan tegangan-regangan yang terjadi adalah :

$$\mathbf{E} = \frac{E}{(1+\nu)e_2} \begin{bmatrix} e_1 & \nu & 0 \\ \nu & e_1 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{bmatrix} \quad (2.3-17)$$



lapisan spesi dan gedek, sehingga Persamaan 2.3-19 dapat ditulis kembali untuk pemecahan kasus panel dinding, yaitu:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_c &= \int_V B_c^T E B_c dV \\ &= ab \left\{ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B_c^T (3 E_{s(\text{gedek})}) B_c d\xi d\eta + t_{\text{spesi}} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B_c^T (2 E_{s(\text{spesi})}) B_c d\xi d\eta \right\} \quad (2.3-20) \end{aligned}$$

Selanjutnya, matriks kekakuan  $\mathbf{K}$  dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 2.3-21.

Untuk menghitung nilai vektor peralihan titik nodal  $\mathbf{q}$  menggunakan persamaan sederhana berikut :

$$[\mathbf{K}] \cdot \{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{p}\} \Rightarrow \{\mathbf{q}\} = [\mathbf{K}]^{-1} \cdot \{\mathbf{p}\} \quad (2.3-22)$$

Namun, matriks  $\mathbf{K}$  dalam Persamaan 2.3-22 singular dan tidak dapat dicari invers matriksnya, kecuali kondisi batas dimasukkan dan penataan ulang matriks  $\mathbf{K}$  dilakukan. Matriks  $\mathbf{K}$  tersebut tersusun atas bagian bebas (*free*) dan bagian tertahan (*restraint*) seperti digambarkan dalam Persamaan 2.3-23 berikut ini.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{FF} & \mathbf{K}_{FR} \\ \mathbf{K}_{RF} & \mathbf{K}_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_F \\ \mathbf{D}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_F \\ \mathbf{A}_R \end{bmatrix} \quad (2.3-23)$$

di mana indeks  $F$  menunjukkan peralihan titik nodal bebas dan  $R$  menunjukkan peralihan titik nodal tertahan.  $D$  sendiri dapat diartikan sebagai peralihan titik nodal dan beban titik nodal ekuivalen akibat  $D$  untuk definisi simbol  $A$ .

Selanjutnya, vektor peralihan  $\mathbf{D}_F$  dapat dicari dari Persamaan 2.3-24, yaitu:

$$\mathbf{D}_F = \mathbf{K}_{FF}^{-1} (\mathbf{A}_F - \mathbf{K}_{FR} \mathbf{D}_R) \quad (2.3-24)$$

Jika  $\mathbf{D}_R = \mathbf{0}$ , Persamaan 2.3-24 menjadi lebih sederhana, yaitu:

$$\mathbf{D}_F = \mathbf{K}_{FF}^{-1} \cdot \mathbf{A}_F \quad (2.3-25)$$

#### 2.4. Kondisi Batas Peralihan

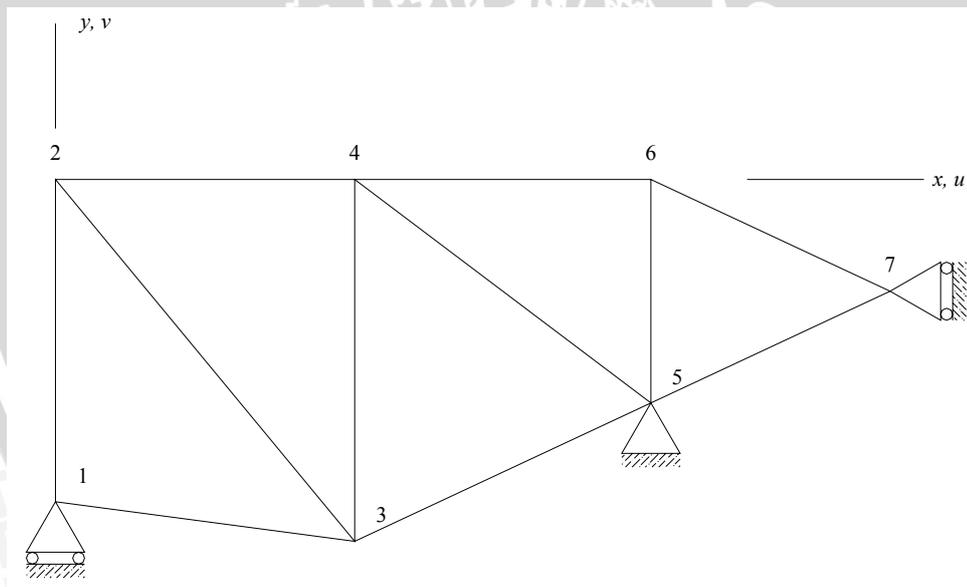
Pembahasan pada subbab 2.4 ini diambil dari (Robert D. Cook, 1998: 38, 41-45) dan (Chandrakant S. Desai, 1996: 27-29, 53-54) dengan perubahan seperlunya.

Seperti telah dijelaskan pada subbab 2.3, matriks kekakuan struktur pada persamaan (2.3.22) masih singular. Dengan kata lain, solusi tunggal dapat diperoleh apabila gerak benda tegar (*rigid body motion*) dapat dicegah (Robert D. Cook, 1998: 41), yaitu dengan memasukkan kondisi (syarat) batas (*boundary condition*).

Secara umum, ada tiga macam kondisi batas, yaitu kondisi batas *pertama* (*Dirichlet*), *kedua* (*Neumann*), dan *ketiga* (*campuran*). Kondisi batas *Dirichlet* menentukan perpindahan atau besaran lain yang diketahui dan berkaitan dengan perpindahan tersebut. Sedangkan kondisi batas *Neumann* menentukan kemiringan atau gradien yang tak diketahui. Sedangkan kondisi batas *campuran* memadukan kondisi batas *Dirichlet* dan *Neumann* (Chandrakant S. Desai, 1996: 53).

Metode partisi pada Persamaan 2.3-23 tidak cocok untuk pemrograman komputer. Sebuah metode diperlukan untuk membentuk Persamaan 2.3-25 tanpa mengandung unsur  $D_R$  ( $D_R$  dianggap sama dengan nol).

Cara yang diambil adalah dengan membentuk sebuah larik (*array*), sebut saja larik *ID*, yang berisi daftar nomor persamaan derajat kebebasan setiap titik simpul yang tidak dikekang (*unsupported*). Dimensi baris dan kolom larik *ID* berturut-turut sama dengan jumlah derajat bebas maksimum tiap titik simpul dan jumlah titik simpul pada struktur tersebut (Robert D. Cook, 1998: 41).



Gambar 2.4.1. Struktur rangka batang bidang (Robert D. Cook, 1998: 38).

Sebagai ilustrasi saja, sebuah struktur rangka batang pada Gambar 2.4.1 diberikan di atas. Struktur tersebut dianalisis dengan memberikan 6 derajat kebebasan tiap titik simpul (tiga peralihan dan tiga rotasi). Akibatnya, larik *ID* memiliki enam baris dan tujuh kolom. Selanjutnya, semua elemen matriks *ID* diberi nilai awal nol. Kekangan pada titik 1, 5, dan 7 diwakili dengan nilai 1 pada matriks *ID* yang menandakan derajat kebebasan yang tidak terpakai dalam analisis. Misalnya,  $ID(2,1) = ID(1,5) = ID(2,5) =$

$ID(1,7) = 1$  dapat diartikan  $v_1 = u_5 = v_5 = u_7 = 0$ , sehingga derajat kebebasan tersebut tidak akan dipakai dalam analisis.

Selanjutnya, banyaknya nilai nol pada larik  $ID$  dihitung berurutan untuk setiap kolom dan menggantinya dengan nilai satu secara berurutan membesar. Bentuk larik  $ID$  yang ‘baru’ ini dapat dinyatakan sebagai  $u_1$  sebagai derajat kebebasan nomor 1,  $u_2$  sebagai derajat kebebasan nomor 2, dan seterusnya sampai  $v_7$  derajat kebebasan nomor 10 (terakhir). Matriks kekakuan struktur  $[K]$  akan berdimensi  $10 \times 10$ .

$$[ID] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad [ID] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 6 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 3 & 5 & 7 & 0 & 9 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(a) (b)

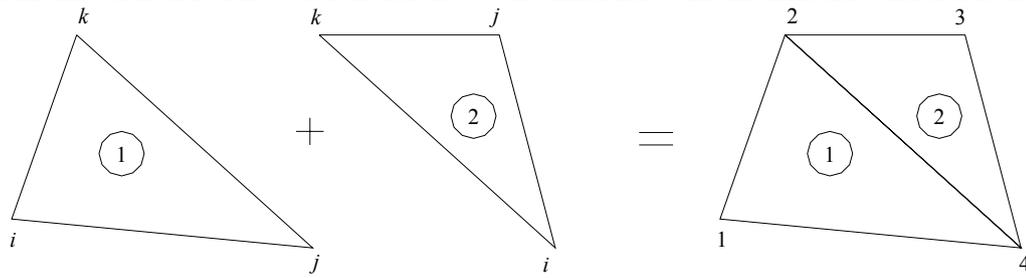
Gambar 2.4.2. Larik  $ID$  untuk rangka batang pada Gambar 2.4-1, di mana (a). sesudah nilai 1 dimasukkan untuk derajat bebas yang dikekang dan (b). sesudah konversi menjadi daftar nomor persamaan (Robert D. Cook, 1998: 42).

## 2.5. Perakitan Matriks Kekakuan Struktur

Pembahasan pada subbab 2.5 ini diambil dari (Robert D. Cook, 1998: 31-37) dengan perubahan seperlunya.

Setelah memasukkan kondisi batas dengan cara yang dibahas pada subbab 2.4, langkah berikutnya adalah merakit matriks kekakuan struktur. Secara simbolis, perakitan matriks kekakuan struktur  $[K]$  dimulai dengan matriks kekakuan sama dengan nol (*inisialisasi*) dan diikuti dengan penambahan matriks kekakuan elemen  $[k]$ .

Pernyataan simbolis tersebut dapat diterjemahkan menjadi sebuah program sederhana pada Gambar 2.5.2. Larik  $S$  dan  $SE$  berturut-turut mewakili matriks  $[K]$  dan  $[k]$ . Label titik simpul struktur yang berhubungan dengan label titik elemen ( $i, j, k$ ) disimpan dalam baris 1, 2, dan 3 pada larik  $NOD$  yang mempunyai jumlah kolom sama dengan jumlah elemen. Subrutin *ELEMNT* (tidak diperlihatkan) memberikan harga  $[k]$  ke larik  $SE$ . Informasi pada larik  $SE$  berubah-ubah untuk masing-masing elemen secara bergiliran. Yang perlu diperhatikan, larik  $S$  diberi nilai awal sama dengan nol (Robert D. Cook, 1998: 31, 34).



Gambar 2.5.1. Struktur yang terdiri atas 4 titik simpul dan 1 derajat kebebasan tiap titik simpul (Robert D. Cook, 1998: 33).

```

DO 500 N=1, NUMEL
CALL ELEMNT
KK(1)=NOD(1,N)
KK(2)=NOD(2,N)
KK(3)=NOD(3,N)
DO 400 I=1,3
K=KK(I)
DO 300 J=1,3
L=KK(J)
S(K,L)=S(K,L)+SE(I,J)
300 CONTINUE
400 CONTINUE
500 CONTINUE

```

Gambar 2.5.2. Perakitan matriks kekakuan struktur untuk struktur pada Gambar 2.5-1 ( $NUMEL$  = jumlah elemen) (Robert D. Cool, 1998: 36).

## 2.6. Metode Solusi Persamaan Simultan

Metode elemen hingga (*FEM*) tidak bisa dipisahkan dari kehadiran matriks. Salah satu bentuk aplikasi matriks dalam *FEM* adalah mencari solusi perpindahan yang tidak lain adalah solusi persamaan simultan.

Secara garis besar, ada dua kategori metode solusi, yaitu metode langsung (*direct method*) dan tak langsung (*indirect method* atau *iterative method*). Sebagian besar pembahasan pada subbab 2.6 ini diambil dari (L.L. Bhirud, 1975: 48-85, Robert D. Cook, 1998: 46-48, 49-51, dan Daryl L. Logan, 1996: 605-607, 613-614) dengan perubahan seperlunya.

Metode langsung adalah metode solusi persamaan simultan yang melibatkan sejumlah perhitungan aritmatika tertentu (*definite*) yang sebanding dengan jumlah persamaan atau besaran yang akan dicari (*unknown*). Tabel 2.6.1 akan menunjukkan jumlah operasi aritmatika (pembagian  $D$ , perkalian  $M$ , dan penjumlahan  $A$ ) untuk metode langsung. *Plot* hubungan jumlah operasi aritmatika terhadap jumlah persamaan diberikan pada Gambar 2.6.1 dan 2.6.2.

Metode determinan (berdasarkan aturan *Cramer*), eliminasi *Gauss*, *Gauss-Jordan*, *Crout*, *Doolittle*, *Cholesky*, dan invers matriks adalah beberapa contoh metode langsung yang cukup penting. Namun, metode *Cholesky* dan eliminasi *Gauss* mendapatkan perhatian yang cukup besar daripada metode lainnya.

Metode *Cholesky* adalah salah satu metode solusi persamaan simultan yang hanya dapat digunakan untuk matriks simetris yang definit positif (non-singular). Ada dua bagian penting dalam metode ini, yaitu *dekomposisi* dan substitusi (dari belakang atau depan).

Tabel 2.6.1. Banyak Operasi Aritmatika dalam Metode Solusi Persamaan Simultan.

No	Metode	Pembagian	Perkalian	Penjumlahan
1	Determinan	$n^4/3$	$n^4/3$	-
2	Eliminasi <i>Gauss</i>	$n$	$\frac{1}{3}n^3 + n^2 - \frac{1}{3}n$	$\frac{1}{3}n^3 + n^2 - \frac{5}{6}n$
3	<i>Gauss-Jordan</i>	$n$	$\frac{1}{2}n^3 + n^2 - \frac{1}{2}n$	$\frac{1}{2}n^3 - \frac{1}{2}n$
4	<i>Crout</i>	$n$	$\frac{1}{3}n^3 + n^2 - \frac{1}{3}n$	$\frac{1}{3}n^3 + n^2 - \frac{5}{6}n$
5	<i>Doolittle</i>	$n$	$\frac{1}{3}n^3 + n^2 - \frac{1}{3}n$	$\frac{1}{3}n^3 + n^2 - \frac{5}{6}n$
6	<i>Cholesky</i>	$n$	$\frac{1}{6}n^3 + \frac{3}{2}n^2 + \frac{1}{3}n$	$\frac{1}{6}n^3 + n^2 - \frac{7}{6}n$

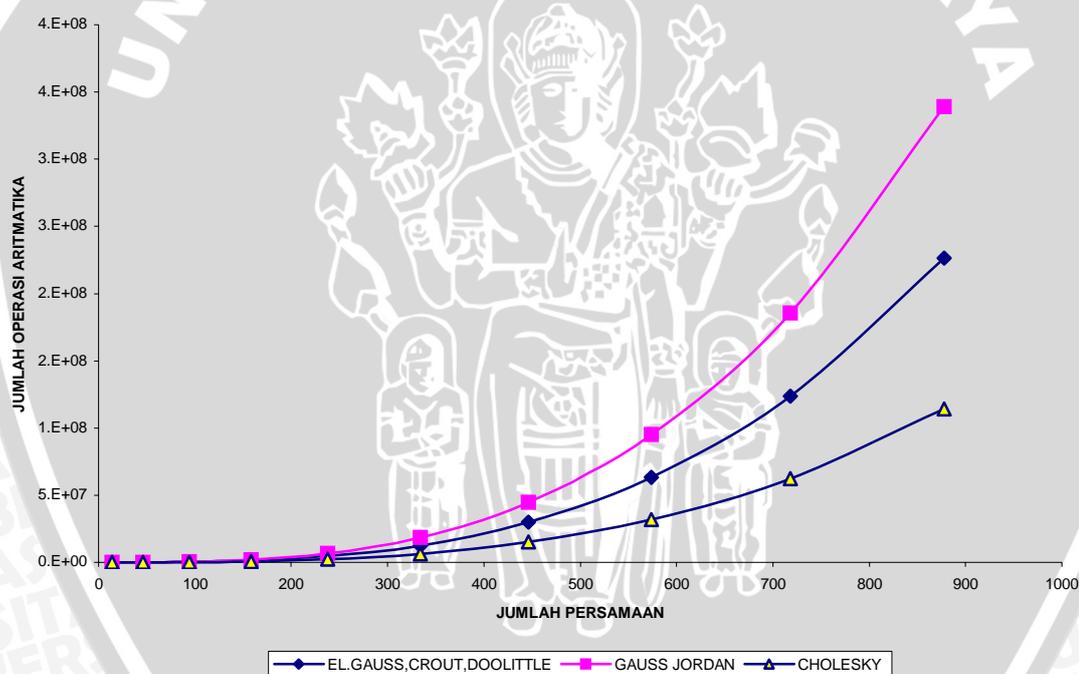
Sumber: L.L. Bhirud, 1975: 51, 52, 58, 64, 65, 67.

Tabel 2.6.2. Ilustrasi Perbandingan Jumlah Operasi Aritmatika pada Metode Determinan, Eliminasi *Gauss*, *Gauss-Jordan*, *Crout*, *Doolittle*, dan *Cholesky*

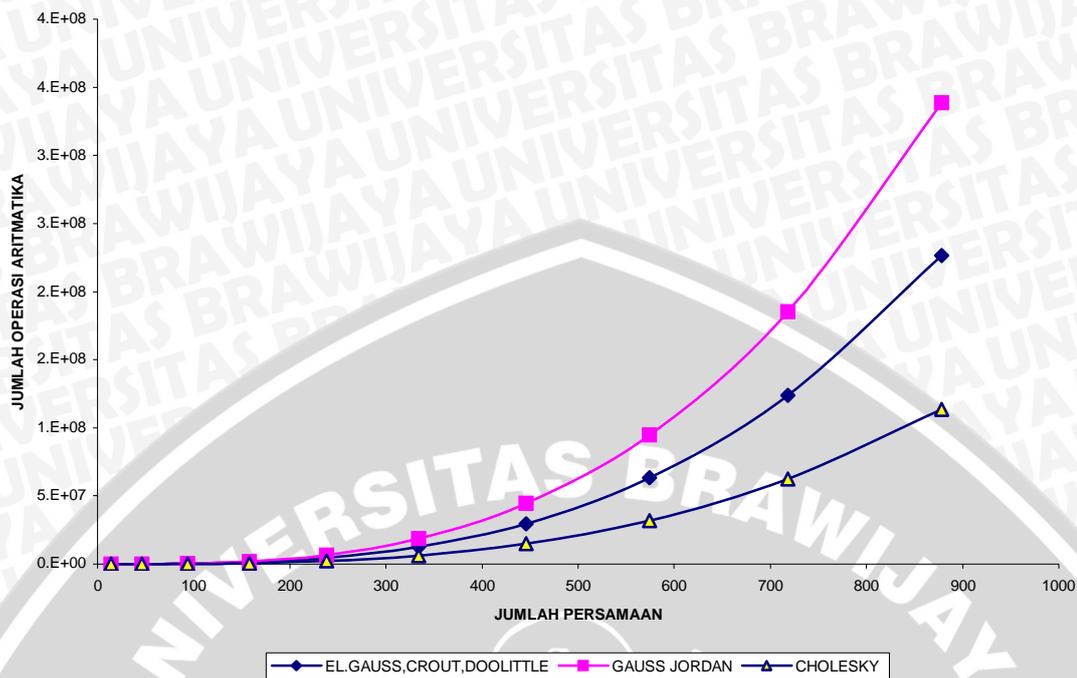
Numel	Nunod	Ndof	Ndof aktif	Determinan		Eliminasi Gauss		
				D	M	D	M	A
4	9	18	14	12805	12805	14	1106	1099
16	25	50	46	1492485	1492485	46	34546	34523
36	49	98	94	26024965	26024965	94	285666	285619
64	81	162	158	207733765	207733765	158	1339682	1339603
100	121	242	238	1069514245	1069514245	238	4550322	4550203
144	169	338	334	4148247045	4148247045	334	12531346	12531179
196	225	450	446	13189191685	13189191685	446	29770946	29770723
256	289	578	574	36184811525	36184811525	574	63369026	63368739
324	361	722	718	88588331525	88588331525	718	123897362	123897003
400	441	882	878	198087380485	198087380485	878	226382642	226382203

Tabel 2.6.2. (lanjutan).

Numel	Nunod	Ndof	Ndof aktif	Gauss-Jordan			Cholesky		
				D	M	A	D	M	A
4	9	18	14	14	1561	1365	14	756	637
16	25	50	46	46	50761	48645	46	19412	18285
36	49	98	94	94	424081	415245	94	151716	147157
64	81	162	158	158	1997041	1972077	158	694884	682165
100	121	242	238	238	6797161	6740517	238	2331924	2303245
144	169	338	334	334	18741241	18629685	334	6377396	6321117
196	225	450	446	446	44556961	44358045	446	15084612	14984485
256	289	578	574	574	94888801	94559325	574	32014276	31848677
324	361	722	718	718	185588281	185072757	718	62464564	62205725
400	441	882	878	878	339188521	338417637	878	113962644	113575885



Gambar 2.6.1. Grafik hubungan jumlah operasi perkalian terhadap jumlah persamaan pada metode eliminasi Gauss, Gauss-Jordan, Crout, Doolittle, dan Cholesky.



Gambar 2.6.2. Grafik hubungan jumlah operasi penjumlahan terhadap jumlah persamaan pada metode eliminasi *Gauss*, *Gauss-Jordan*, *Crout*, *Doolittle*, dan *Cholesky*.

Dalam metode *Cholesky*, matriks  $\mathbf{K}$  yang definit positif dapat dinyatakan sebagai:

$$[\mathbf{K}] = [\mathbf{U}]^T [\mathbf{U}] \quad (2.6-1)$$

Matriks  $\mathbf{U}$  sendiri adalah matriks segitiga atas. Persamaan 2.6-1 adalah bentuk dekomposisi *Cholesky* dari matriks  $\mathbf{K}$ . Koefisien  $U_{ij}$  dapat diketahui dengan menuliskan hasil kali Persamaan 2.6-1, yaitu:

$$\begin{aligned} U_{ij} &= 0, \text{ untuk } i > j \text{ (bentuk segitiga atas)} \\ U_{11} &= \sqrt{K_{11}} \\ U_{ij} &= K_{ij} / U_{11} \end{aligned} \quad (2.6-2)$$

$$\begin{aligned} U_{11} &= \left( K_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} U_{ki}^2 \right)^{1/2}, \text{ untuk } i > 1 \\ U_{ij} &= \left( K_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} U_{ki} U_{kj} \right) / U_{ii}, \text{ untuk } i > 1 \text{ dan } j > 1 \end{aligned}$$

Selanjutnya, solusi dapat dicari dengan substitusi ke depan atau belakang. Bila  $[\mathbf{K}]$ ,  $\{\mathbf{D}\}$ , dan  $\{\mathbf{R}\}$  berturut-turut adalah matriks kekakuan struktur, perpindahan (yang akan dicari), dan beban nodal, solusi dengan metode *Cholesky* dicari dengan substitusi

ke depan (*forward substitution*) dan ke belakang (*back substitution*). Persamaan 2.6-2.a dan 2.6-2.b berturut-turut memberikan kedua bentuk substitusi tersebut.

$$D_i = \left( R_i - \sum_{k=1, \dots, i-1} K_{ki} K_{kj} \right) / K_{ii}, \text{ untuk } i = 1, \dots, n$$

$$j = 1, \dots, n$$

$$k = 1, \dots, i-1 \quad (2.6-2.a)$$

$$D_i = \left( D_i - \sum_{k=i+1, \dots, n} K_{ik} D_k \right) / K_{ii}, \text{ untuk } i = n, \dots, 1$$

$$k = i+1, \dots, n \quad (2.6-2.b)$$

Sedangkan metode eliminasi *Gauss* adalah metode yang cukup populer diterjemahkan ke dalam bahasa program. Metode ini didasarkan atas *triangularisasi* (pembentukan segitiga atas) sebuah matriks non-singular dan mencari besaran yang tidak diketahui dengan substitusi ke belakang yang dimulai dari persamaan terakhir.

Sebuah ciri khas dari eliminasi *Gauss* adalah pencarian *pivot* ( $a_{kk}$  dalam Persamaan 2.6-3), yaitu koefisien matriks yang digunakan dalam setiap eliminasi koefisien besaran anu. Proses reduksi ke depan (*forward reduction*) ini mengubah [K] menjadi matriks segitiga atas. Persamaan 2.6-3 akan memberikan bentuk umum reduksi ke depan dan substitusi ke belakang untuk mendapatkan besaran anu, yaitu  $D$ .

$$a_{ij} = a_{ij} - a_{kj} \frac{a_{ik}}{a_{kk}}, \text{ di mana } k = 1, 2, \dots, n-1$$

$$i = k+1, \dots, n$$

$$j = k, \dots, n+1 \quad (2.6-3)$$

$$x_i = \frac{1}{a_{ii}} \left( a_{i, n+1} - \sum_{r=1}^n a_{ir} x_r \right)$$

Notasi  $a$ ,  $a_{1, n+1}$ , dan  $x$  dapat diganti menjadi  $K$ ,  $R$ , dan  $D$ .

Yang perlu diperhatikan, persamaan ke- $k$  digunakan untuk mengeliminasi anu ke- $k$  dan semua *pivot* adalah koefisien diagonal  $K_{ii}$ . Pencarian *pivot* terbesar tidak perlu dilakukan pada setiap eliminasi karena *pivot* tidak akan sama dengan nol, kecuali struktur yang dianalisis tidak stabil atau dimodelkan dengan buruk. Kedua perkecualian tersebut dapat timbul karena sebuah elemen atau daerah yang memiliki kekakuan besar ditumpu oleh elemen atau daerah berkekakuan rendah. Selain itu, kasus struktur yang tidak dikekang merupakan penyebab lainnya (Robert D. Cook, 1998: 46, 441).

Selanjutnya, metode kedua di samping metode langsung adalah metode tak langsung atau metode iterasi. Metode iterasi diawali dengan memasang nilai awal

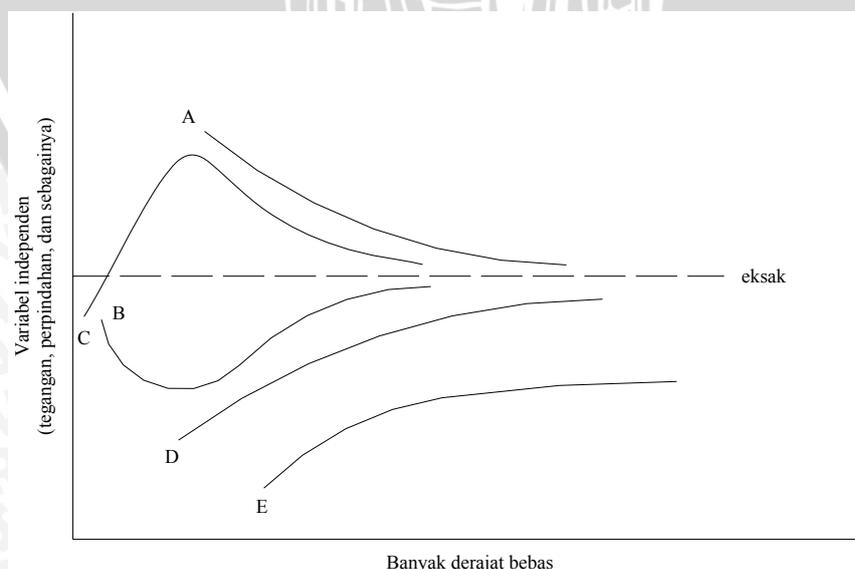
sembarang untuk besaran anu dan berulang sampai sejumlah putaran (*cycle*) perhitungan hingga konvergensi terjadi.

Secara umum, metode iterasi bersifat *self-correcting*, di mana kesalahan yang dihasilkan dari perhitungan pada suatu iterasi akan diperbaiki pada iterasi berikutnya. Salah satu metode iterasi yang populer dan mudah diprogram adalah iterasi *Gauss-Seidel* yang membutuhkan  $n$  operasi pembagian,  $n^2$  perkalian, dan  $(n^2-n)$  penjumlahan pada setiap iterasinya (Daryl L. Logan, 1996: 613-614). Keberhasilan metode iterasi bergantung pada pemilihan nilai awal yang sesuai dan jumlah iterasi yang dilakukan. Beberapa metode iterasi lain adalah metode gradien konjugat (*conjugate gradient method*), iterasi *Gauss* atau *Jacobi*, dan metode relaksasi (L.L. Bhirud, 1975: 48-49).

Secara jelas kita dapat melihat bahwa metode *Cholesky* lebih efisien dibandingkan dengan kelima metode lainnya karena ia memberikan harga jumlah operasi perkalian dan penjumlahan lebih sedikit. Namun, metode *Cholesky* hanya dapat digunakan untuk matriks simetris yang definit positif dan ia melibatkan operasi penarikan akar pada saat dekomposisi yang dapat menghasilkan akar imajiner. Kelemahan terakhir inilah yang menyebabkan penyusun tidak menggunakan metode *Cholesky* pada program *BPDG* dan metode eliminasi *Gauss* menjadi pilihan penyusun.

## 2.6 Persyaratan Konvergensi

Persyaratan konvergensi didefinisikan sebagai kondisi-kondisi yang menjamin jawaban eksak akan semakin didekati apabila semakin banyak elemen yang digunakan untuk memodelkan struktur sembarang (Robert D. Cook, 1998: 106).



Gambar 2.7.1. Lima jenis kurva uji konvergensi (Robert D. Cook, 1998: 110).

Dari Gambar 2.7.1 di atas tampak bahwa terdapat 5 macam kurva uji konvergensi. Di mana absis grafik tersebut adalah banyak derajat bebas (atau jumlah elemen atau titik simpul) dan ordinatnya adalah variabel independen (misalnya tegangan, regangan, perpindahan, dan sebagainya).

Kelima jenis kurva tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut. Kurva *A* dikatakan sebagai kurva *monotonik dari atas* yang menggambarkan elemen hibrida. Elemen hibrida adalah salah satu aplikasi elemen struktur yang didasarkan atas asumsi selain medan peralihan maupun fungsional energi potensial (Robert D. Cook, 1998: 454-455).

Sedangkan kurva *B* dan *C* merupakan kurva yang *tidak monotonik* dan menggambarkan elemen yang tak serasi (*incompatible*). Elemen yang tak serasi adalah elemen yang mengandung celah (*gap*) interelemen maupun elemen yang tumpang tindih. Sedangkan elemen lentur (balok dan plat, misalnya) dapat dikatakan tak serasi bila ia memiliki perubahan mendadak pada bentuk elemen (Robert D. Cook, 1998: 109).

Selanjutnya, kurva *D* menunjukkan kurva yang *monotonik dari bawah*. Kurva *D* dapat terbentuk oleh elemen berdasarkan asumsi medan peralihan yang serasi (*compatible*) yang memiliki ciri-ciri berkebalikan dari elemen tak serasi.

Yang terakhir adalah kurva *E* yang menunjukkan kurva yang *monotonik ke jawaban yang salah*. Kurva ini menunjukkan gejala konvergensi, namun ia menuju ke jawaban yang salah. Salah satu penyebab timbulnya kurva *E* ini adalah *ketidاكلengkapan* dan atau *ketidakseimbangan* fungsi peralihan asumsi yang dipilih untuk sebuah elemen. Fungsi peralihan yang diasumsikan dikatakan *lengkap* jika semua pangkat yang lebih kecil dari yang disyaratkan (agar kondisi regangan konstan tercapai) harus dimasukkan ke dalam fungsi peralihan tersebut tanpa ada bagian yang dihilangkan. Sedangkan *seimbang* dapat diartikan bahwa setiap peralihan umum harus memiliki derajat yang sama. Misalkan sebuah fungsi peralihan berderajat dua untuk kontinum 2 dimensi adalah  $u = c_1 + c_2x + c_3y + c_4x^2 + c_5xy + c_6y^2$  dan  $v = c_7 + c_8x + c_9y + c_{10}x^2 + c_{11}xy + c_{12}y^2$ , fungsi tersebut dikatakan *lengkap* dan *seimbang*. Jika ada satu saja koefisien  $c_i$  dihilangkan, kurva *E* akan terbentuk pada saat uji konvergensi.

## 2.7 Batasan Wilayah Tegangan pada Struktur

Saat kita menganalisa suatu struktur yang menerima beban lentur, maka yang harus menjadi pemikiran mendasar adalah konsep dari tegangannya. Tegangan struktur

tersebut (sebagai contoh adalah balok) untuk setiap titik dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$f = \frac{M \cdot y}{I_x} \quad (2.8.1)$$

dengan  $M$  adalah momen lentur pada penampang melintang yang ditinjau,  $y$  adalah jarak suatu titik yang ditinjau terhadap bidang netral, dan  $I_x$  adalah momen inersia penampang melintang terhadap sumbu netral. Sedangkan tegangan maksimum  $f_{maks}$  dapat ditentukan sebesar :

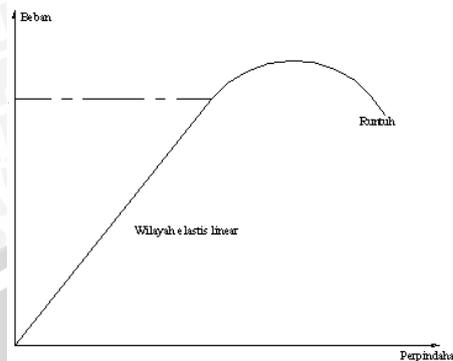
$$f_{maks} = \frac{M \cdot c}{I_x} = \frac{M}{I_x/c} = \frac{M}{S_x} \quad (2.8.2)$$

Namun, persamaan (2.8.1) dan (2.8.2) hanya berlaku jika beban memiliki intensitas yang cukup kecil sehingga material tersebut masih berada dalam wilayah elastis linear. Wilayah elastis linear sebuah material dapat dilihat pada diagram tegangan dan regangan sebuah material. Untuk baja, misalnya, wilayah elastis (*elastic range*) digambarkan dengan kurva linear yang berarti penambahan tegangan sebesar  $f$  sebanding dengan peningkatan regangan  $\varepsilon$  dan hukum *Hooke* masih berlaku pada wilayah ini.

Apabila tegangan yang terjadi  $f$  akibat beban  $P_1$  sama dengan tegangan leleh  $F_y$ , distribusi tegangan pada penampang melintang yang ditinjau sesaat sebelum leleh (disebut *first yielding*) masih linear. Namun bila beban  $P_2$  diberikan, di mana  $P_2 > P_1$ , persamaan (2.8.1) dan (2.8.2) tidak berlaku lagi dan distribusi tegangan tidak lagi linear. Selain itu, leleh akan berlanjut mulai dari serat terluar hingga sumbu netral hingga seluruh penampang melintang yang ditinjau akan leleh. Jika seluruh penampang tersebut sudah leleh akibat beban luar  $P$ , sendi plastis akan terbentuk dan beban yang lebih besar  $P$  akan menyebabkan struktur tersebut runtuh (*collapse*) serta aliran plastis yang terus-menerus akan terjadi.

Dari penjelasan singkat di atas, kita dapat melihat bahwa ada titik patok tertentu yang dimiliki oleh setiap material, di mana titik patok tersebut adalah titik leleh (*yielding point*). Selama beban yang diberikan masih berada di bawah beban yang dapat menyebabkan sebuah material mencapai titik leleh tersebut, hubungan antara beban luar  $P$  dan perpindahan  $\delta$  akan membentuk kurva linear. Namun, bila beban yang diberikan cukup besar sedemikian rupa sehingga melewati titik leleh, hubungan linear antara  $P$

dan  $\delta$  tidak dapat dipertahankan lagi hingga akhirnya keruntuhan akan terjadi. Secara sederhana, grafik hubungan antara  $P$  dan  $\delta$  dapat digambarkan berikut ini.



Gambar 2.8.1. Hubungan antara beban luar  $P$  dan perpindahan  $\delta$ .

## 2.8 Respon Panel Dinding Berlubang terhadap Beban Luar

Struktur dinding yang dalam pelaksanaannya di lapangan sering digunakan sebagai struktur penahan gempa ini banyak sekali penerapannya. Ternyata dinding ini tidak hanya berupa panel penuh, tetapi ada halnya juga menempatkan lubang pada dinding tersebut. Lubang pada dinding bisa berupa lubang jendela yang seragam di setiap tingkat bentang, lubang jendela dan pintu yang berseling, lubang kecil untuk saluran (*duct*), lubang dengan pola yang tidak beraturan, dan lubang dengan ukuran yang beraneka ragam.

Untuk menempatkan dinding dengan lubang atau bukaan sebagai struktur yang tahan gempa ini perlu meneliti perilakunya dari aspek ketegaran dan kekuatannya. Oleh karena itu bukaan pada dinding dibedakan menjadi lubang kecil dan besar. Analisa yang diterapkan pada kasus lubang kecil dilakukan dengan memasukkan faktor koreksi pada dinding tak berlubang. Sedangkan untuk lubang besar, metode yang diterapkan adalah dengan melakukan konversi ke portal ekuivalen.

Pada kasus lubang yang kecil, kita lebih baik menganggapnya sebagai dinding geser dengan lubang (bukaan) daripada sebagai portal. Deformasi untuk kasus ini diperoleh dengan mengalikan deformasi untuk dinding tanpa lubang dengan suatu faktor koreksi. Bila dinyatakan dengan angka ketegaran, ketegaran dinding berlubang,  $D_F$ , bisa dihitung dengan mengalikan ketegaran dinding tanpa lubang,  $D_S$ , dengan faktor reduksi ketegaran  $\gamma$  :

$$D_F = D_S \times \gamma$$

$$\gamma = 1 - 1,25p$$

$$p = \sqrt{\frac{A_o}{A_w}}$$

dimana :  $p$  = rasio keliling lubang ekivalen

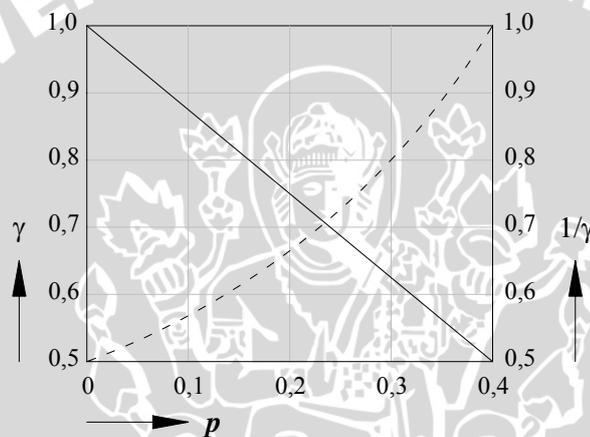
$A_w$  = luas bagian dinding

$A_o$  = luas lubang

Persamaan di atas bisa diterapkan bila  $p < 0,4$ , jika lebih besar dari nilai tersebut maka dinyatakan sebagai kasus lubang besar. Bila dinyatakan dengan perpindahan relatif, persamaan yang selaras adalah,

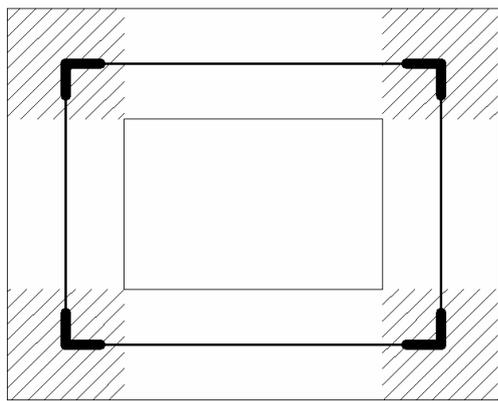
$$\delta_F = \frac{1}{\gamma} \times \delta_S$$

Faktor  $\gamma$  dan  $1/\gamma$ , ditunjukkan pada gambar 2.9.1



Gambar 2.9.1. Grafik hubungan faktor reduksi ( $\gamma$ ) dengan rasio keliling lubang ekivalen ( $p$ ) (Kiyosi Muto, 1973: 175).

Bila ukuran lubang pada dinding besar, maka sifat-sifat dinding akan mendekati sifat portal. Keadaan dinding berlubang seperti ini dianalisa menggunakan metode portal dinding (walled frame). Portal dinding merupakan dinding luar gedung yang ditujukan untuk bekerja sebagai balok dan kolom serta penahan gaya gempa. Oleh karena itu dinding berlubang ini didasarkan atas garis as kolom dinding dan as balok dinding. Karena balok dan kolom tersebut mengelilingi jendela-jendela atau lubang (opening) maka penampang melintang balok dan kolom sangat besar dan portal menjadi sangat tegar (rigid) dan kuat. Daerah dengan ketegaran yang tinggi ini berada pada bagian titik kumpul balok dinding (walled beam) dan kolom dinding (walled column), seperti ditunjukkan pada gambar 2.9.2 oleh daerah yang diarsir.



Gambar 2.9.2. Gambar portal dinding dengan lubang yang besar  
(Kiyosi Muto, 1973: 129).

## 2.9 Bahasa Pemrograman FORTRAN

Fortran yang mempunyai kepanjangan FORMula TRANslator ini merupakan suatu bahasa tingkat tinggi atau bahasa yang berorientasi ke suatu masalah tertentu. Bahasa pemrograman ini merupakan bahasa tingkat tinggi tertua yang banyak digunakan oleh para ahli teknik sampai saat ini. Dengan lahirnya bahasa-bahasa komputer yang lain, bahasa fortran telah mengalami pergeseran. Tetapi keadaan ini tidak terjadi di kalangan teknik karena bahasa ini masih dianggap sebagai bahasa yang penting untuk aplikasi teknik dan merupakan dasar bagi bahasa-bahasa program lainnya. Oleh karena itulah penulis menggunakan bahasa program fortran sebagai aplikasi dalam analisis *finite element* yang dikerjakannya.

Dalam kita mempelajari suatu bahasa program yang pertama harus kita perhatikan adalah struktur dari program yang akan kita tulis dengan bahasa tersebut. Pada bahasa ini fortran mempunyai aturan penulisan tertentu yang berhubungan dengan pembagian kolomnya yaitu sebagai berikut :

1. Kolom 1 digunakan untuk indikasi bahwa baris yang digunakan adalah berisi komentar atau berisi metacommand.

Bila kolom ke 1 diisi dengan karakter “C” atau “c” atau “\*” (asterik) menunjukkan bahwa baris tersebut berisi komentar bebas.

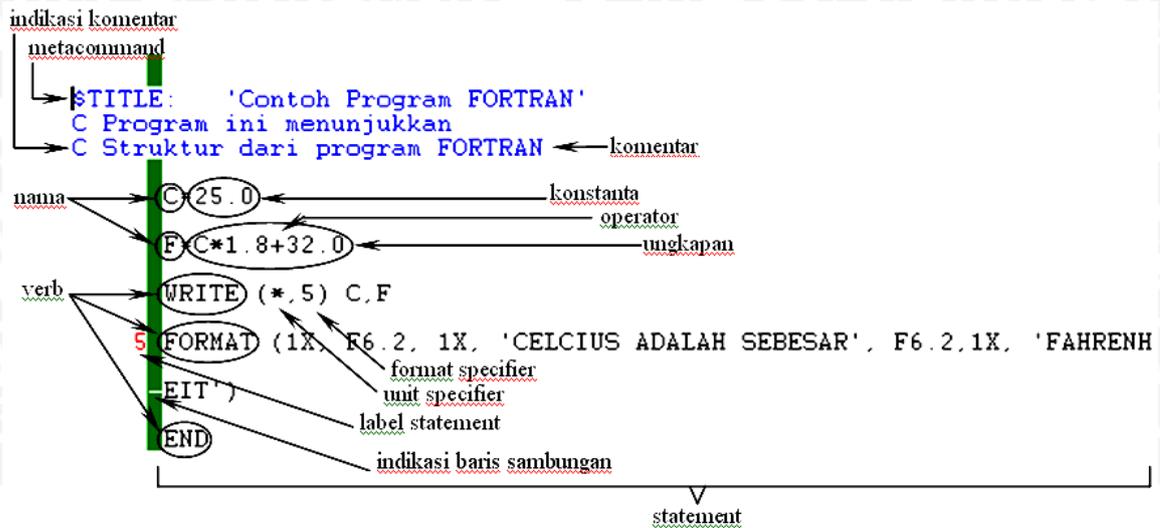
Bila kolom ke 1 diisi dengan karakter “\$” (dollar) menunjukkan bahwa baris tersebut berisi metacommand.

2. Kolom 1 sampai dengan kolom ke 5 digunakan untuk penulisan label statement, berupa suatu angka yang menunjukkan letak dari suatu statement.

3. Kolom ke 6 digunakan untuk indikasi sambungan statement dari baris sebelumnya. Kalau suatu statement tidak cukup untuk ditulis dalam satu baris, maka dapat disambung ke baris berikutnya. Baris sambungan harus diberi indikasi dengan cara meletakkan di kolom ke 6 karakter apapun kecuali blank atau O. Sampai 19 baris sambungan berturut-turut dapat dipergunakan.
4. Kolom ke 7 sampai dengan kolom ke 72 digunakan untuk menulis statement fortran.
5. Kolom ke 73 sampai dengan kolom ke 80 tidak digunakan oleh fortran, sehingga dapat dimanfaatkan untuk menulis komentar bebas yang menerangkan statement bersangkutan, tanpa mempengaruhi isi dari baris tersebut.

Aturan terpenting selanjutnya dan harus kita pelajari dari suatu bahasa program adalah statement. Statement merupakan inti dari program yang berupa intruksi-intruksi kepada komputer. Instruksi ini ditulis dengan suatu aturan tata bahasa atau bentuk umum atau grammer atau *syntax* tertentu yang sudah ditentukan. Kalau penulisan statement menyalahi *syntax*-nya, berarti terjadi suatu kesalahan *syntax* (*syntax error*). Untuk suatu statement dalam fortran dapat dibentuk dengan elemen-elemen sebagai berikut :

1. Konstanta
2. Operator
3. Ungkapan
4. Nama
5. *Verb*
6. *Unit specifier*
7. *Format specifier*



Gambar 2.10.1. Struktur dan elemen-elemen statement program fortran  
(Jogiyanto, H. M,1989: 6-7).

Setelah melihat gambar di atas, maka kita akan mencoba mengupas sebagian kecil perintah-perintah dalam statement yang akan digunakan dalam pemrograman selanjutnya.

#### 1. Statement WRITE / PRINT

Statement ini digunakan untuk mentransfer atau menampilkan data dari *input / output list* yang berupa suatu nama variabel.

#### 2. Statement READ

Statement ini digunakan untuk mentransfer atau membaca data dari suatu file / concole (layar).

#### 3. Operator

Operator di dalam bahasa fortran dapat terdiri dari operator arithmatika, operator hubungan, dan operator logika.

##### a. Operator Arithmatika

Merupakan tanda operasi yang digunakan dalam perhitungan arithmatika.

Tabel 2.10.1. Operator arithmatika

Operator arithmatika	Maksud
**	Perpangkatan
*	Perkalian
/	Pembagian
+	Pertambahan
-	Pengurangan

b. Operator Hubungan

Merupakan tanda operasi yang digunakan untuk menyatakan hubungan antara dua buah elemen.

Tabel 2.10.2. Operator hubungan

Operator hubungan	Maksud
. LT .	lebih kecil dari
. LE .	lebih kecil sama dengan dari
. EQ .	sama dengan
. NE .	tidak sama dengan
. GT .	lebih besar dari
. GE .	lebih besar sama dengan dari

c. Operator Logika

Merupakan tanda operasi yang digunakan di dalam perbandingan logika.

Tabel 2.10.3. Operator logika

Operator logika	Maksud
. NOT .	tidak atau bukan
. AND .	dan
. OR .	atau

4. Statement IF

Statement ini digunakan untuk menyeleksi suatu kondisi atau syarat dan proses akan melakukan suatu tindakan tertentu bila kondisi yang diseleksi benar dan akan melakukan tindakan yang lainnya bila kondisi yang diseleksi tidak benar.

Statement penyeleksian kondisi ini dapat digolongkan menjadi :

a. Statement IF logika (*logical IF*)

Digunakan untuk menyeleksi suatu ungkapan logika atau ungkapan hubungan dan jika kondisinya benar (.TRUE.) maka statement yang mengikutinya akan diproses. Sebaliknya bila ungkapan logika atau ungkapan hubungan yang diseleksi tersebut salah (.FALSE.), maka proses akan dilanjutkan ke statement berikutnya.

b. Statement IF aritmatika (*arithmetic IF*)

Digunakan untuk menyeleksi kondisi dari suatu ungkapan aritmatika, apakah bernilai negatif, nol, atau positif.

c. Statement IF blok (*block IF*)

Dapat terdiri dari statement IF-THEN, ELSE, ELSEIF, dan ENDIF

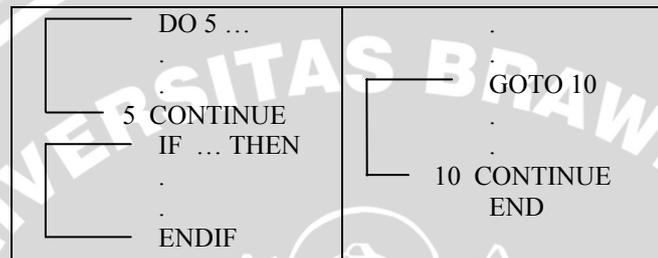
Digunakan untuk menyeleksi suatu kondisi dan mengambil tindakan apa yang harus dilakukan dalam bentuk blok-blok statement

#### 5. Statement DO

Statement ini digunakan untuk memproses berulang-ulang statement-statement yang berada diantara statement DO sampai dengan label statement yang ditunjukkan oleh *executable statement* / statement yang terolah.

#### 6. Statement CONTINUE

Statement ini digunakan sebagai *dummy statement*, yang biasanya digunakan untuk *terminal statement* pada statement DO atau GOTO.



Gambar 2.10.2. Bentuk statement continue (Jogiyanto. H. M, 1989: 151).

#### 7. Statement SUBROUTINE

Statement ini digunakan untuk mengidentifikasi bahwa suatu unit program adalah suatu rutin bagian, serta sekaligus memberikan nama dan argument-argumennya.

Beberapa ketentuan dari *subroutine* adalah :

- *Subroutine* merupakan unit program tersendiri yang diawali dengan statement SUBROUTINE dan diakhiri dengan statement END atau RETURN serta dipergunakan oleh unit program yang lain dengan statement CALL.
- *Subroutine* dapat berisi statement-statement apapun kecuali statement PROGRAM, statement SUBROUTINE yang lainnya atau statement FUNCTION.
- Didalam suatu subroutine dapat memanggil subroutine yang lainnya.
- Argumen sesungguhnya yang tampak di statement CALL harus sesuai urutannya, jumlahnya dan tipenya dengan *dummy argument* yang tampak di statement SUBROUTINE. Antara nama argumen sesungguhnya dengan *dummy argument* boleh sama atau pun boleh tidak sama.

#### 8. Statement CALL

Statement ini digunakan untuk mengidentifikasi bahwa suatu unit program adalah suatu rutin bagian, serta sekaligus memberikan nama dan argument-argumennya.

Beberapa ketentuan dari *subroutine* adalah :

- *Subroutine* merupakan unit program tersendiri yang diawali dengan statement SUBROUTINE dan diakhiri dengan statement END atau RETURN serta dipergunakan oleh unit program yang lain dengan statement CALL.
- *Subroutine* dapat berisi statement-statement apapun kecuali statement PROGRAM, statement SUBROUTINE yang lainnya atau statement FUNCTION.
- Didalam suatu subroutine dapat memanggil subroutine yang lainnya.
- Argumen sesungguhnya yang tampak di statement CALL harus sesuai urutannya, jumlahnya dan tipenya dengan *dummy argument* yang tampak di statement SUBROUTINE. Antara nama argumen sesungguhnya dengan *dummy argument* boleh sama atau pun boleh tidak sama.

#### 9. Statement CALL

Statement ini digunakan untuk memanggil dan sekaligus mengeksekusi suatu rutin bagian (*subroutine*).

#### 10. Statement OPEN

Statement ini digunakan untuk membuka file supaya data dapat direkamkan atau diambil dari file tersebut.

#### 11. Statement CLOSE

Statement ini digunakan untuk menutup file karena sudah tidak digunakan lagi.

#### 12. Statement STOP

Statement END digunakan untuk menghentikan proses pengerjaan program.

Perbedaan antara statement STOP dengan END adalah :

- Statement STOP tidak harus ada di dalam suatu unit program.
- Statement STOP boleh berada di bagian manapun di dalam program.
- Statement STOP dapat ditambahkan tulisan tertentu sebagai berita.

#### 13. Statement END

Di dalam program utama, statement END digunakan untuk mengakhiri proses dari program. Statement END ini harus diletakkan paling akhir dari suatu program dan harus berdiri sendiri tidak boleh digabung dengan statement lainnya.

## BAB III

### METODE ANALISIS

#### 3.1. Input Data

Data-data yang diperlukan untuk mencari hubungan  $P$ -  $\delta$  dengan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*, FEM) adalah :

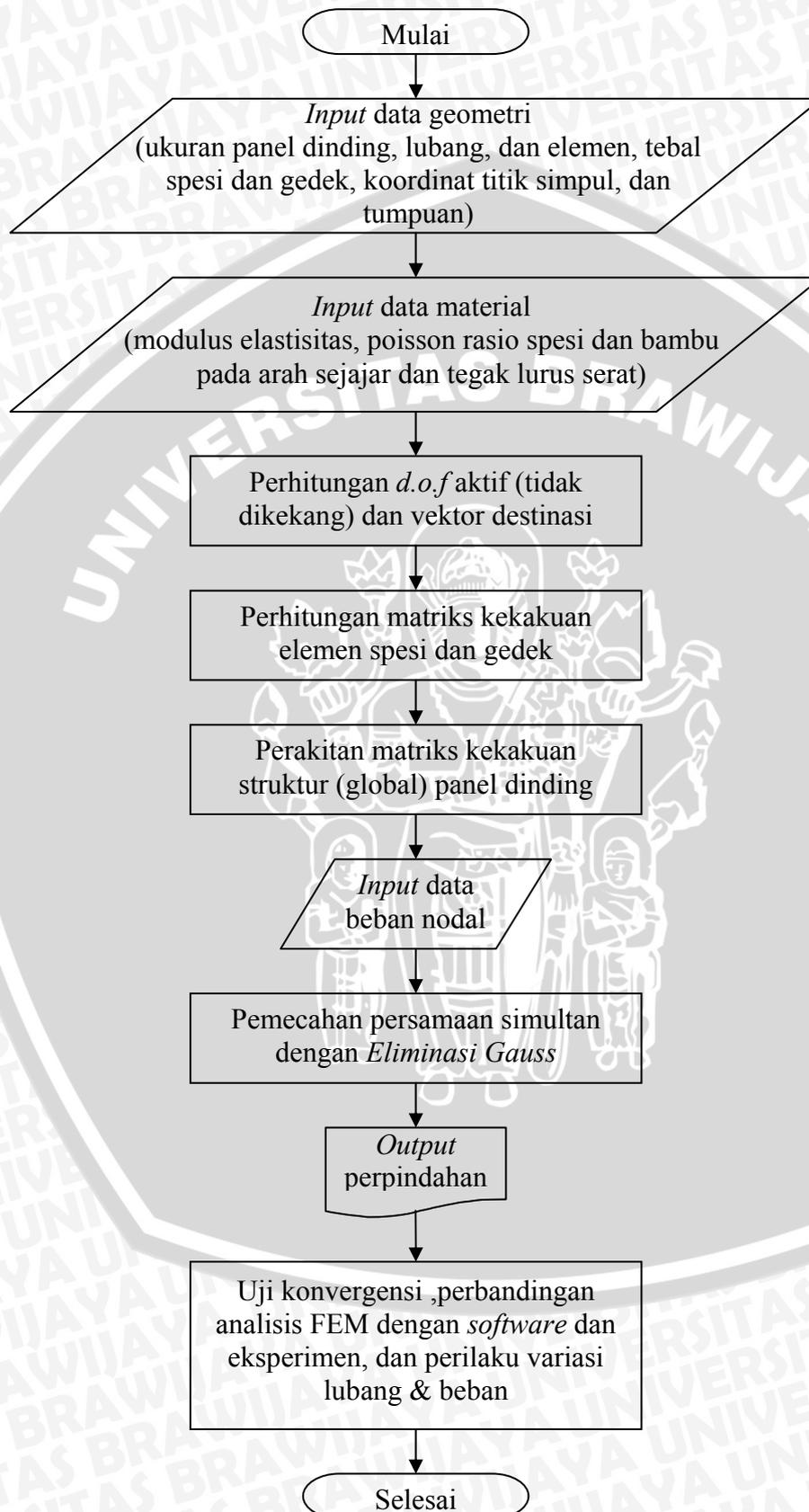
1. Data geometri panel dinding gedek
  - Ukuran panel dinding, lubang, dan elemen.
  - Tebal lapisan spesi dan gedek.
  - Koordinat titik simpul (vektor insiden).
  - Tumpuan (lokasi dan jumlah kekangan titik simpul pada arah  $x$  dan  $y$ ).
2. Data material panel dinding gedek
  - Modulus *Young* spesi  $E_s$ , bambu sejajar serat  $E_{bx}$ , bambu tegak lurus serat  $E_{by}$ .
  - Rasio *Poisson* spesi  $\nu_s$ , dan bambu ( $\nu_{bxy}$  dan  $\nu_{byx}$ ).
3. Data beban nodal
  - Lokasi beban nodal.
  - Harga beban nodal pada arah  $x$  dan  $y$ .

#### 3.2. Prosedur Analisis

Analisis berdasarkan metode FEM ini dilakukan dengan menggunakan program yang dibuat dengan *software Fortran Power Station v. 1.00*. Sedangkan langkah-langkah dalam pengerjaan program beserta analisisnya adalah sebagai berikut :

1. Memberikan data masukan geometri panel dinding gedek.
2. Memberikan data masukan material panel dinding gedek.
3. Menghitung derajat kebebasan (*degree of freedom, d.o.f*) yang aktif (tidak dikekang pada arah  $x$  dan  $y$ ) pada setiap titik simpul, sehingga vektor destinasi dapat disusun.
4. Menghitung matriks kekakuan elemen spesi dan gedek.
5. Merakit matriks kekakuan struktur panel dinding gedek.
6. Memberikan data masukan beban nodal.
7. Mencari solusi perpindahan dengan menggunakan metode *Eliminasi Gauss*.
8. Memeriksa validitas hasil analisis FEM dengan melakukan uji konvergensi
9. Membandingkan analisis i tersebut dengan *software* dan hasil eksperimen
10. Mengetahui perilaku variasi ukuran lubang, penempatan lubang, dan penempatan beban pada panel dinding gedek.

### 3.3. Diagram Alir Analisis



### 3.4. Algoritma Pemrograman

Algoritma merupakan suatu proses atau sejumlah aturan (*rules*) yang dibutuhkan untuk sebuah perhitungan. Berikut ini adalah berbagai macam variabel yang digunakan dalam program penyusun yang dijelaskan pada Tabel 3.4.1.

Tabel 3.4.1. Daftar Variabel dalam Program.

Variabel	Keterangan
AIJK	Luas segitiga tiap elemen
B1	Jumlah baris elemen hasil pembagian tinggi panel di bawah lubang dengan lebar elemen
B2	Jumlah baris elemen hasil pembagian tinggi lubang dengan lebar elemen
B3	Jumlah baris elemen hasil pembagian tinggi panel di atas lubang dengan lebar elemen
DISP(P)	Perpindahan titik simpul yang dinyatakan dalam nomor derajat kebebasan struktur P ( $P \leq 2 * NNODE$ ).
DISPL(I)	Transformasi dari perpindahan dalam derajat kebebasan menjadi perpindahan dalam titik simpul I ( $I \leq NNODE$ ).
E2	Konstanta elastisitas 2 untuk tegangan bidang pada pembentukan matriks kekakuan
E3	Konstanta elastisitas 3 untuk tegangan bidang pada pembentukan matriks kekakuan
E4	Konstanta elastisitas 4 untuk tegangan bidang pada pembentukan matriks kekakuan
E5	Konstanta elastisitas 5 untuk tegangan bidang pada pembentukan matriks kekakuan
ELM(I,J)	Nomor elemen segiempat hingga pada baris I dan kolom J
ELS(J,I)	Nomor elemen segitiga dengan membagi dua elemen segiempat menjadi elemen segitiga bawah (ELS(1,I)) dan elemen segitiga atas (ELS(2,I)), atau $1 \leq J \leq 2$ , dimana $1 \leq I \leq NELM$
FORC(L)	Beban titik (nodal) yang bekerja pada titik simpul struktur L ( $L \leq 2 * NNODE$ ), di mana FORC(L) dinyatakan dalam N.
IDS(L,I)	Vektor destinasi yang menghubungkan nomor titik simpul L dengan arah perpindahan tiap titik simpul I ( $I = 1,2$ ) untuk mendapatkan nomor derajat kebebasan titik simpul ( $IDS(L,I) \leq 2 * NNODE$ ).
INS(J,I)	Vektor insiden, yaitu vektor yang menghubungkan nomor elemen segiempat I dengan nomor titik simpul elemen J ( $1 \leq J \leq 4$ ) untuk mendapatkan nomor titik simpul struktur.
INST(J,I)	Vektor insiden, yaitu vektor yang menghubungkan nomor elemen segitiga I dengan nomor titik simpul elemen J ( $1 \leq J \leq 3$ ) untuk mendapatkan nomor titik simpul struktur.
JBAR1	Jumlah baris elemen di bawah lubang
JBAR2	Jumlah baris elemen pada lubang
JBAR3	Jumlah baris elemen di atas lubang
JKOL1	Jumlah kolom elemen di bawah lubang
JKOL2	Jumlah kolom elemen pada lubang
JKOL3	Jumlah kolom elemen di atas lubang
K1	Jumlah kolom elemen hasil pembagian panjang panel di kiri lubang dengan panjang elemen
K2	Jumlah kolom elemen hasil pembagian panjang lubang dengan panjang elemen
K3	Jumlah kolom elemen hasil pembagian panjang panel di kanan lubang dengan panjang elemen

Variabel	Keterangan
NB	Jumlah baris elemen
NDL	Nomor titik simpul yang diberi beban nodal
NELM	Jumlah elemen hingga segiempat pada panel dinding gedek
NELS	Jumlah elemen hingga segitiga pada panel dinding gedek
NKO	Jumlah kolom elemen
NNDL	Jumlah titik simpul yang diberi beban nodal
NNODE	Jumlah seluruh titik simpul (node) pada panel dinding gedek
NODE(I,J)	Nomor node hingga pada baris I+1 dan kolom J+1
P	Panjang dimensi elemen hingga (dalam mm)
P1	Panjang sisa pembagian elemen untuk sisi di kiri lubang (mm)
P2	Panjang sisa pembagian elemen untuk sisi pada lubang (mm)
P3	Panjang sisa pembagian elemen untuk sisi di kanan lubang (mm)
PKA	Jarak sisi kiri panel dari sisi kiri lubang (mm)
PKI	Jarak sisi kanan panel dari sisi kanan lubang (mm)
PLU	Panjang lubang pada panel dinding (dalam mm)
PPN	Panjang panel dinding (dalam mm)
STES(J,K)	Matriks kekakuan elemen lokal untuk spesi pada baris ke-J dan kolom ke-K, dimana $1 \leq J \leq 6$ dan $1 \leq K \leq 6$
STET(J,K)	Matriks kekakuan elemen lokal total pada baris ke-J dan kolom ke-N, dimana $1 \leq J \leq 6$ dan $1 \leq K \leq 6$
STEX(J,K)	Matriks kekakuan elemen lokal untuk gedek sejajar serat pada baris ke-J dan kolom ke-K, dimana $1 \leq J \leq 6$ dan $1 \leq K \leq 6$
STEY(J,K)	Matriks kekakuan elemen lokal untuk gedek tegak lurus serat pada baris ke-J dan kolom ke-K, dimana $1 \leq J \leq 6$ dan $1 \leq K \leq 6$
STG(IR,IC)	Matriks kekakuan elemen global struktur pada baris ke-IR dan kolom ke-IC, dimana $1 \leq (IR \text{ dan } IC) \leq 2*(NNODE-NNDR)$
T	Tinggi dimensi elemen hingga (dalam mm)
T1	Tinggi sisa pembagian elemen untuk sisi di bawah lubang (mm)
T2	Tinggi sisa pembagian elemen untuk sisi pada lubang (mm)
T3	Tinggi sisa pembagian elemen untuk sisi di atas lubang (mm)
TA	Jarak sisi atas panel dari sisi bawah lubang (mm)
TB	Jarak sisi bawah panel dari sisi bawah lubang (mm)
TG	Tebal gedek untuk panel dinding (mm)
TLU	Tinggi lubang pada panel dinding (dalam mm)
TPN	Tinggi panel dinding (dalam mm)
TS	Tebal spesi untuk panel dinding (mm)
VES	Modulus elastisitas spesi (material isotropis, dalam Mpa)
VEX	Modulus elastisitas bambu sejajar serat (material ortotropis dalam Mpa)
VEY	Modulus elastisitas bambu tegak lurus serat (material ortotropis dalam Mpa)
VS	Poisson rasio spesi ( $0 < VS < 1$ )
VX	Poisson rasio gedek sejajar serat ( $0 < VX < 1$ )
VY	Poisson rasio gedek tegak lurus serat ( $0 < VY < 1$ )
X(I)	Koordinat x untuk tiap node, dimana $1 \leq I \leq NNODE$
XI	Koordinat x untuk insiden I elemen segitiga
XIJ	Vektor koordinat hasil pengurangan XJ dengan XI
XIK	Vektor koordinat hasil pengurangan XK dengan XI
XINS(J,I)	Koordinat x vektor insiden elemen segiempat, dimana I adalah jumlah elemen segiempat ( $1 \leq I \leq NELM$ ) dan J adalah insiden elemen segiempat ( $1 \leq J \leq 4$ )
XINST(J,I)	Koordinat x vektor insiden elemen segitiga dimana I adalah jumlah elemen segiempat ( $1 \leq I \leq NELM$ ) dan J adalah insiden elemen segiempat ( $1 \leq J \leq 3$ )
XJ	Koordinat x untuk insiden J elemen segitiga
XJK	Vektor koordinat hasil pengurangan XK dengan XJ

Variabel	Keterangan
XK	Koordinat x untuk insiden K elemen segitiga
Y(I)	Koordinat x untuk tiap node, dimana $1 \leq I \leq \text{NNODE}$
YI	Koordinat y untuk insiden I elemen segitiga
YIJ	Vektor koordinat hasil pengurangan YJ dengan YI
YIK	Vektor koordinat hasil pengurangan YK dengan YI
YINS(J,I)	Koordinat y vektor insiden elemen segiempat, dimana I adalah jumlah elemen segiempat ( $1 \leq I \leq \text{NELM}$ ) dan J adalah insiden elemen segiempat ( $1 \leq J \leq 4$ )
YINST(J,I)	Koordinat y vektor insiden elemen segitiga dimana I adalah jumlah elemen segiempat ( $1 \leq I \leq \text{NELM}$ ) dan J adalah insiden elemen segiempat ( $1 \leq J \leq 3$ )
YJ	Koordinat y untuk insiden J elemen segitiga
YJK	Vektor koordinat hasil pengurangan YK dengan YJ
YK	Koordinat y untuk insiden K elemen segitiga

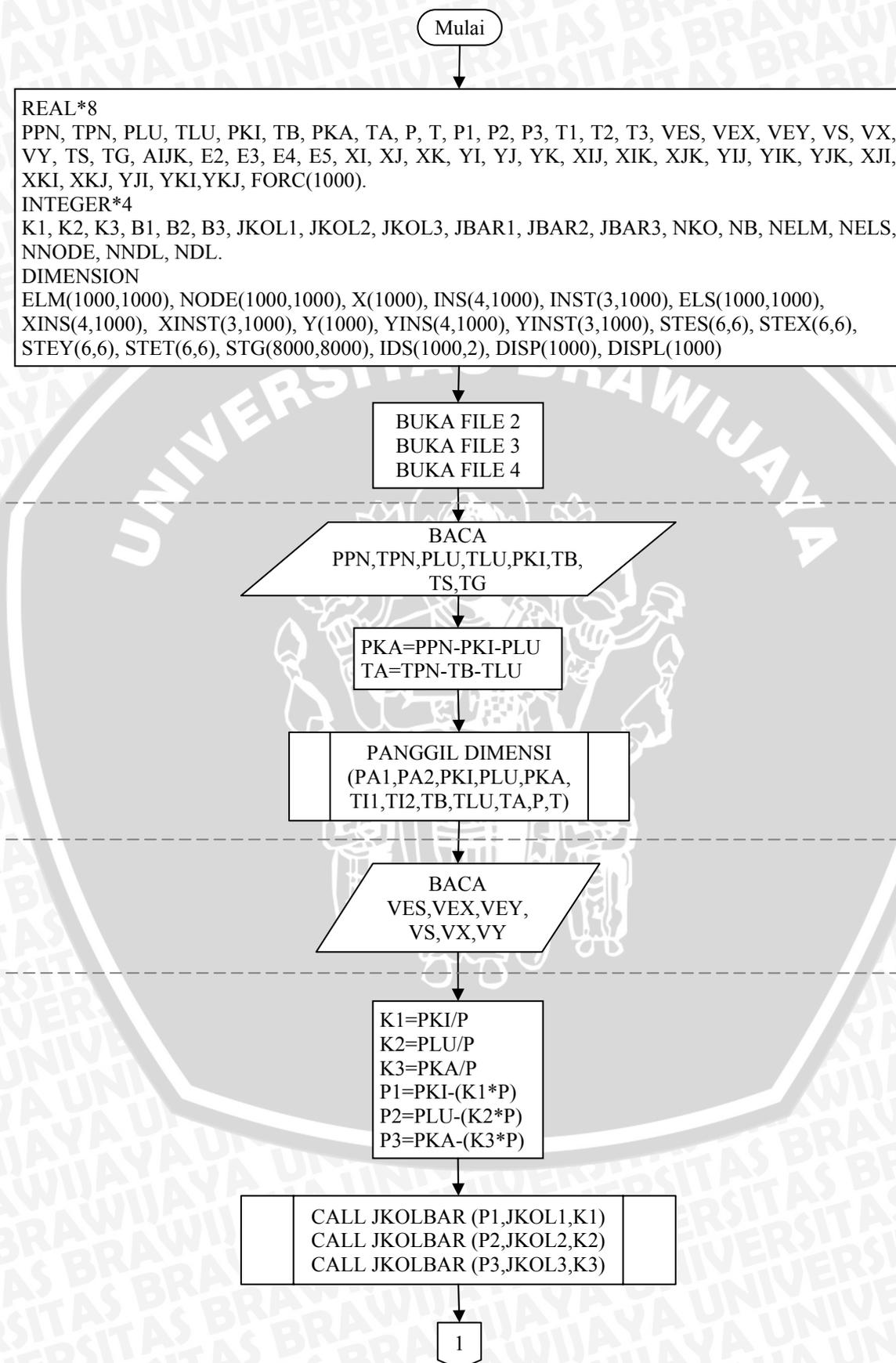
Selanjutnya, algoritma pemrograman dapat diuraikan di bawah ini.

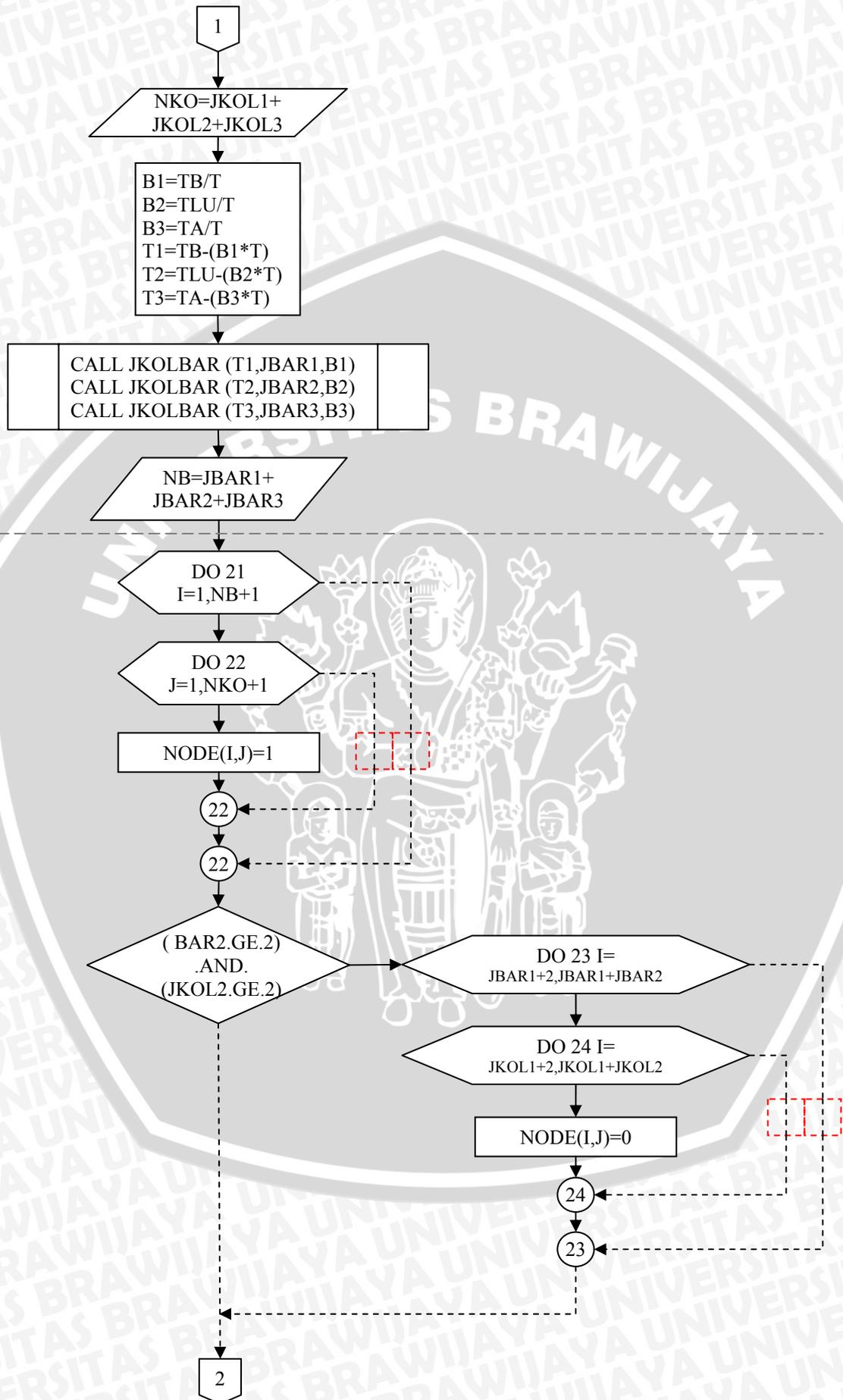
- Mendeklarasikan nilai konstanta variabel
  - Real ketepatan ganda 8 byte : PPN, TPN, PLU, TLU, PKI, TB, PKA, TA, P, T, P1, P2, P3, T1, T2, T3, VES, VEX, VEY, VS, VX, VY, TS, TG, AIJK, E2, E3, E4, E5, XI, XJ, XK, YI, YJ, YK, XII, XIK, XJK, YIJ, YIK, YJK, XJI, XKI, XKJ, YJI, YKI, YKJ, FORC(1000).
  - Integer ketepatan ganda 4 byte : K1, K2, K3, B1, B2, B3, JKOL1, JKOL2, JKOL3, JBAR1, JBAR2, JBAR3, NKO, NB, NELM, NELS, NNODE, NNDL, NDL.
  - Dimension larik (*array*) untuk ELM, ELS, NODE, X, Y, INS, INST, XINS, YINS, XINST, YINST, STES, STEX, STEY, STET, STG, IDS, DISP, DISPL
- Memasukkan data geometri, yaitu PPN, TPN, PLU, TLU, PKI, TB, TS, dan TG. Sehingga didapat  $\text{PKA} = \text{PPN} - \text{PKI} - \text{PLU}$ , dan  $\text{TA} = \text{TPN} - \text{TB} - \text{TLU}$ .
- Memasukkan data material, yaitu spesi sebagai material isotropis (VES dan VS) dan bambu sebagai material orthotropis (VEX, VX, VEY, dan VY).
- Memasukkan data diskretisasi berupa dimensi dari elemen, yaitu panjang elemen (P) yang harus lebih kecil atau sama dengan nilai terkecil dari PKI, PLU, dan PKA. Begitu juga dengan tinggi elemen ( $T \leq \text{TB}, \text{TLU}, \text{dan TA}$ ).
- Membagi tiap sisi pada PKI, PLU, PKA, dengan P dan TB, TLU, TA dengan T yang hasilnya berturut-turut adalah K1, K2, K3, B1, B2, dan B3. Dimana sisa pembagiannya berturut-turut disebut P1, P2, P3 dan T1, T2, T3. Sehingga variasi panjang elemen menjadi P, P1, P2, dan P3, sedangkan variasi untuk tinggi elemen menjadi T, T1, T2, dan T3.
- Melakukan penomoran node dan menentukan node yang terletak pada lubang untuk selanjutnya dihilangkan sehingga didapat node-node baru yangurut.

7. Menghitung jumlah node (NNODE).
8. Menentukan koordinat node terhadap sb. X dan sb. Y.
9. Melakukan penomoran elemen master (elemen segiempat) dan menentukan elemen master yang terletak pada lubang untuk selanjutnya dihilangkan sehingga didapat elemen-elemen master baru yang urut.
10. Menentukan vektor insiden dan memberikan koordinat x - y untuk sudut-sudut elemen master.
11. Menghitung jumlah elemen master (NELM).
12. Pembentukan elemen segitiga dengan membagi dua elemen master menjadi elemen segitiga 1 (segitiga bagian bawah) dan elemen segitiga 2 (segitiga bagian atas).
13. Menentukan vektor insiden dan memberikan koordinat x - y untuk sudut-sudut elemen segitiga.
14. Menentukan jumlah elemen segitiga (NELS) yaitu  $2 \times \text{NELM}$ .
15. Membuat gambar penempatan node serta menyertakan koordinat x - y pada masing-masing node panel dinding berlubang yang disimpan didalam file node.txt.
16. Menyimpan koordinat x - y untuk sudut-sudut elemen segitiga (i, j, k) yang disimpan di dalam file koor.txt.
17. Menyimpan data-data geometri, material,vektor insiden serta nilai A dan B pada file finite1.txt
18. Memberikan nilai awal 1 kepada seluruh derajat kebebasan titik simpul (vektor destinasi = 1) sebagai sinyal bahwa tidak ada kekangan pada titik simpul manapun.
19. Memasukkan jumlah perpindahan yang dikekang (NNDR) serta nomor perpindahannya (dapat dilihat di file node.txt), dan kemudian memberikan nilai 0 kepada node dengan derajat kebebasan yang dikekang (NDR). Sehingga nilai vektor destinasi adalah sama dengan 0 dan 1 sampai dengan  $2 \times (\text{NNODE} - \text{NNDR})$  dengan inkremen 1 kepada derajat kebebasan lainnya.
20. Memberikan nilai awal nol pada elemen matriks kekakuan struktur STG.
21. Menghitung vektor koordinat untuk setiap variasi vektor yang terjadi terhadap x dan y.
22. Menghitung luas segitiga (AIJK) dan konstanta-konstanta elastis tegangan bidang.

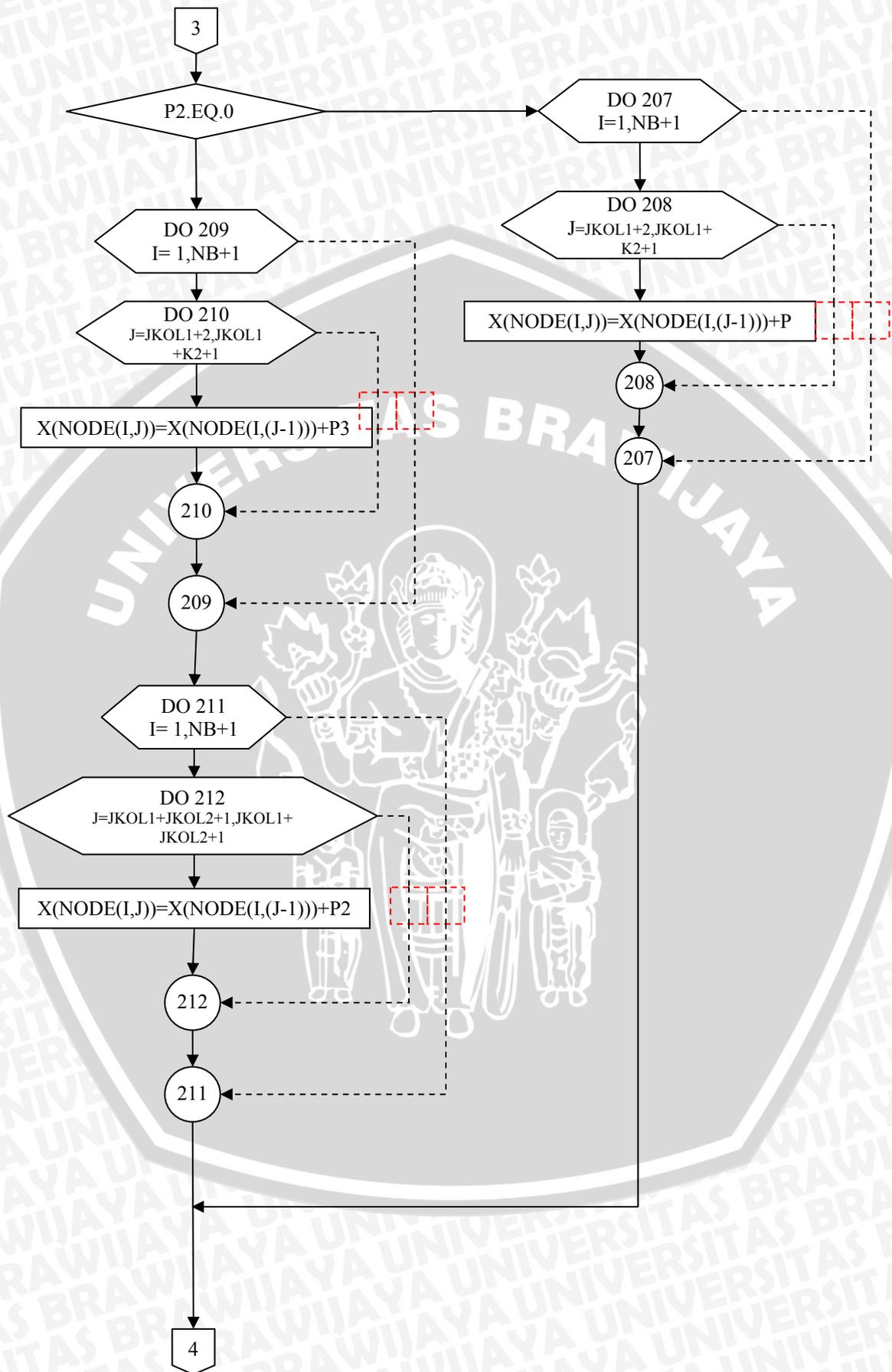
23. Merakit matriks kekakuan elemen lokal untuk spesi STES(6x6), gedek sejajar serat STEX(6X6) dan gedek tegak lurus serat STEY(6x6).
24. Simetrisasi matriks kekakuan lokal.
25. Menghitung matriks kekakuan lokal total, yaitu  $STET(6x6) = 3 \times STES + 2 \times (STEX + STEY)$ .
26. Merakit matriks kekakuan struktur STG berdimensi  $(2 \times (NNODE - NNDR)) \times (2 \times (NNODE - NRD))$ . Pembentukan elemen matriks STG diawali dengan pembacaan indeks baris dan kolom, yaitu IDR1, IDR2, IDC1, dan IDC2 dimana merupakan pernyataan kontrol untuk mengantisipasi tidak terbacanya indeks baris dan kolom untuk titik simpul yang dikekang.
27. Memberikan nilai awal 0 pada beban nodal yang bekerja pada tiap titik simpul ke dalam variabel FORC(IDG).
28. Memasukkan data jumlah titik simpul yang dibebani beban nodal (NNDL) dan nomor titik simpul yang diberi beban nodal (NDL) serta nilai beban nodal untuk kedua arah FORC(IDX), dan FORC(IDY). Sebelum input data tersebut, gambar penempatan node dapat dilihat di file node.txt.
29. Melakukan proses *Eliminasi Gauss* dengan menjalankan triangularisasi dan *back-substitution* pada variabel STG, DISP, dan FORC untuk mencari solusi perpindahan (variabel DISP).
30. Mentransformasikan perpindahan (DISP) dalam derajat kebebasan menjadi perpindahan dalam titik simpul (DISPL).
31. Menyimpan data perpindahan titik simpul di file Disp.txt.

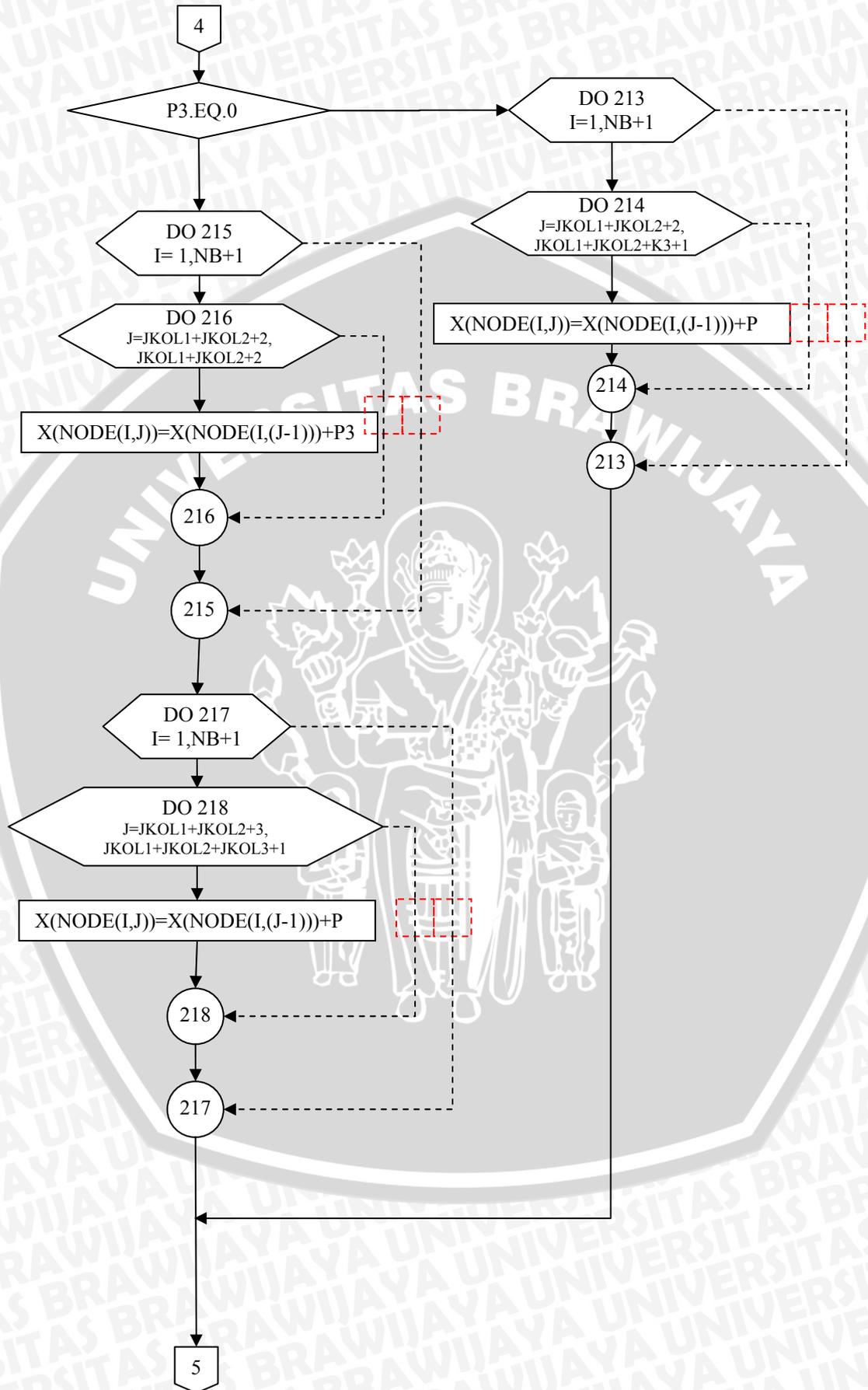
### 3.5. Diagram Alir Pemrograman

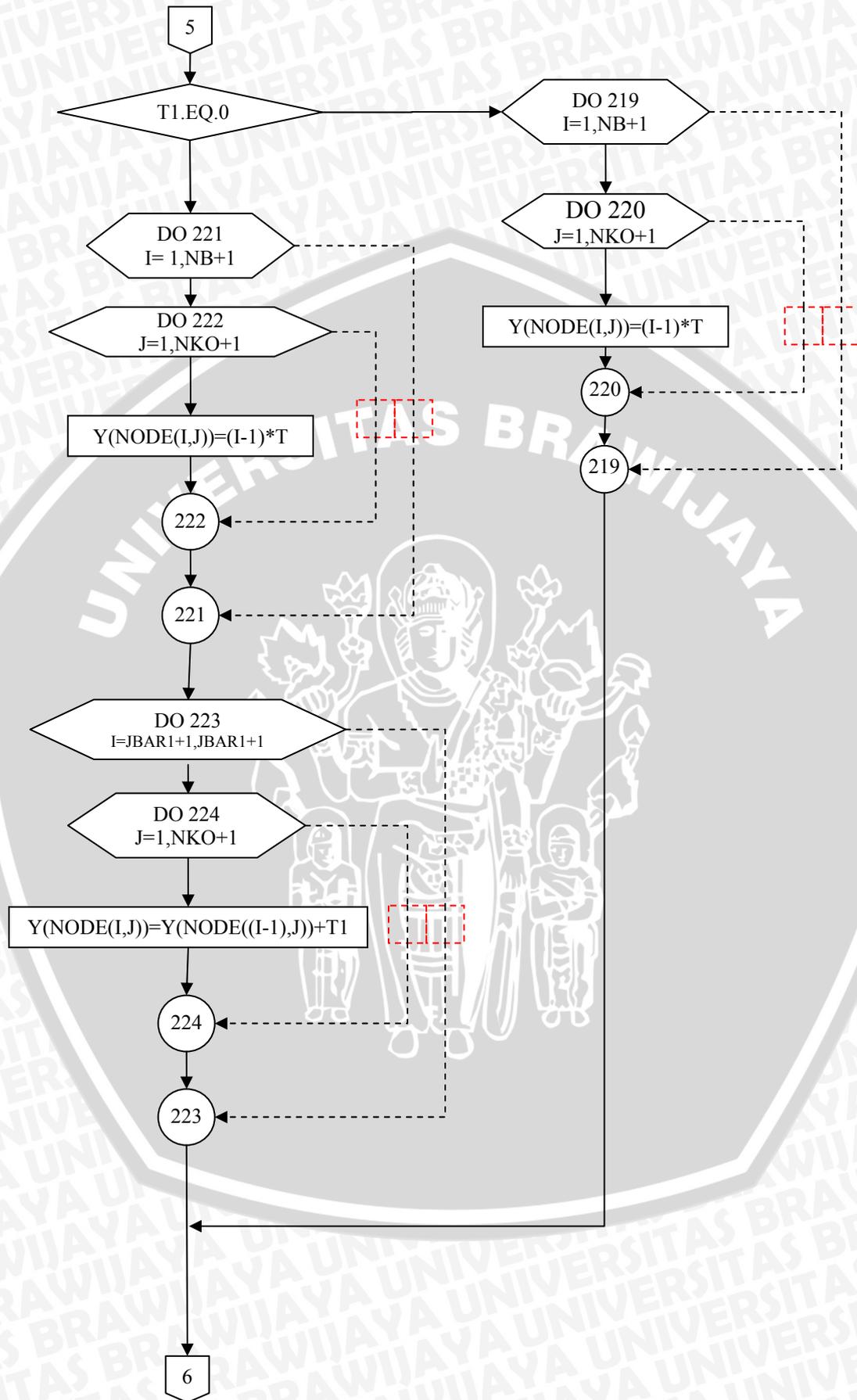


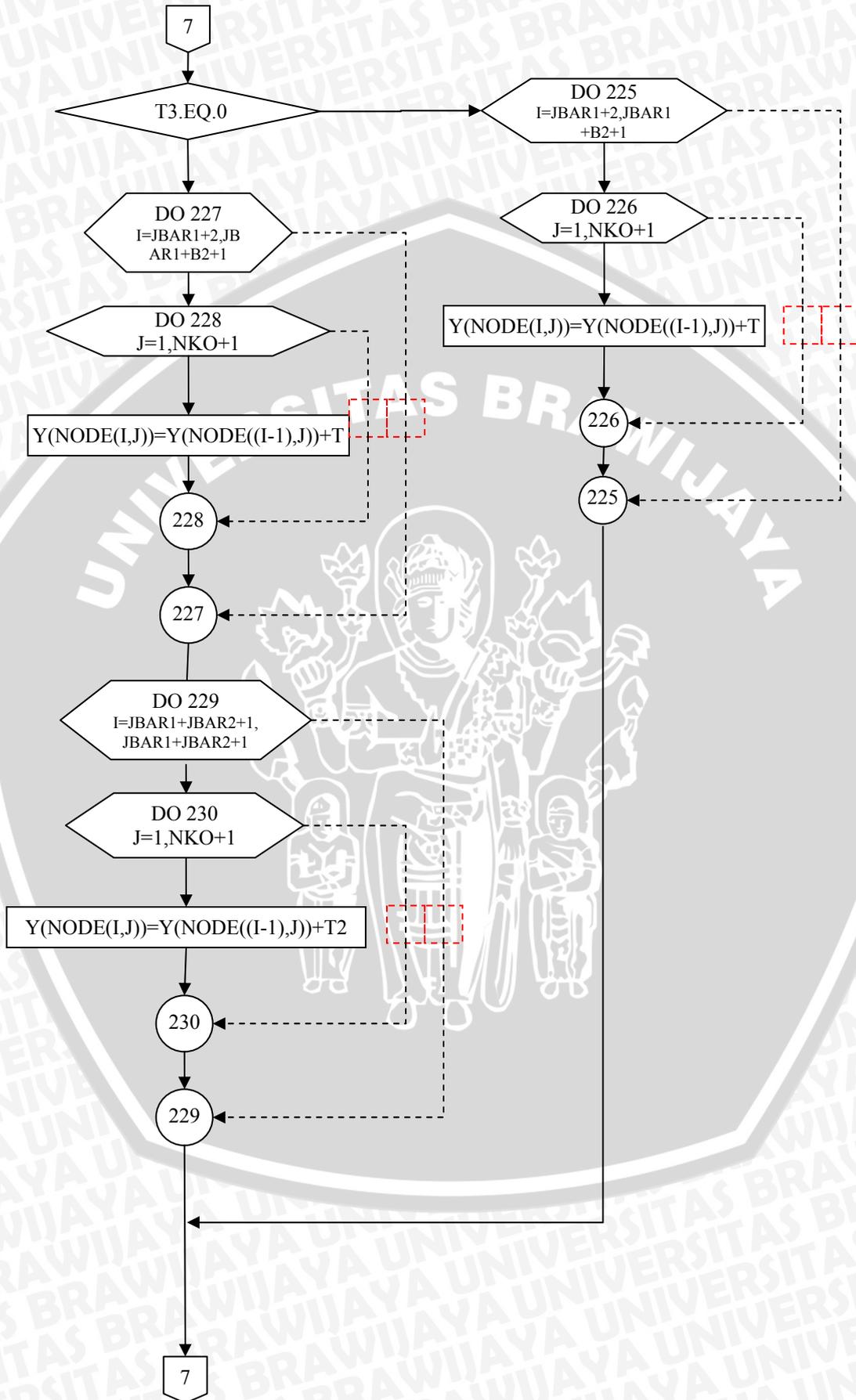




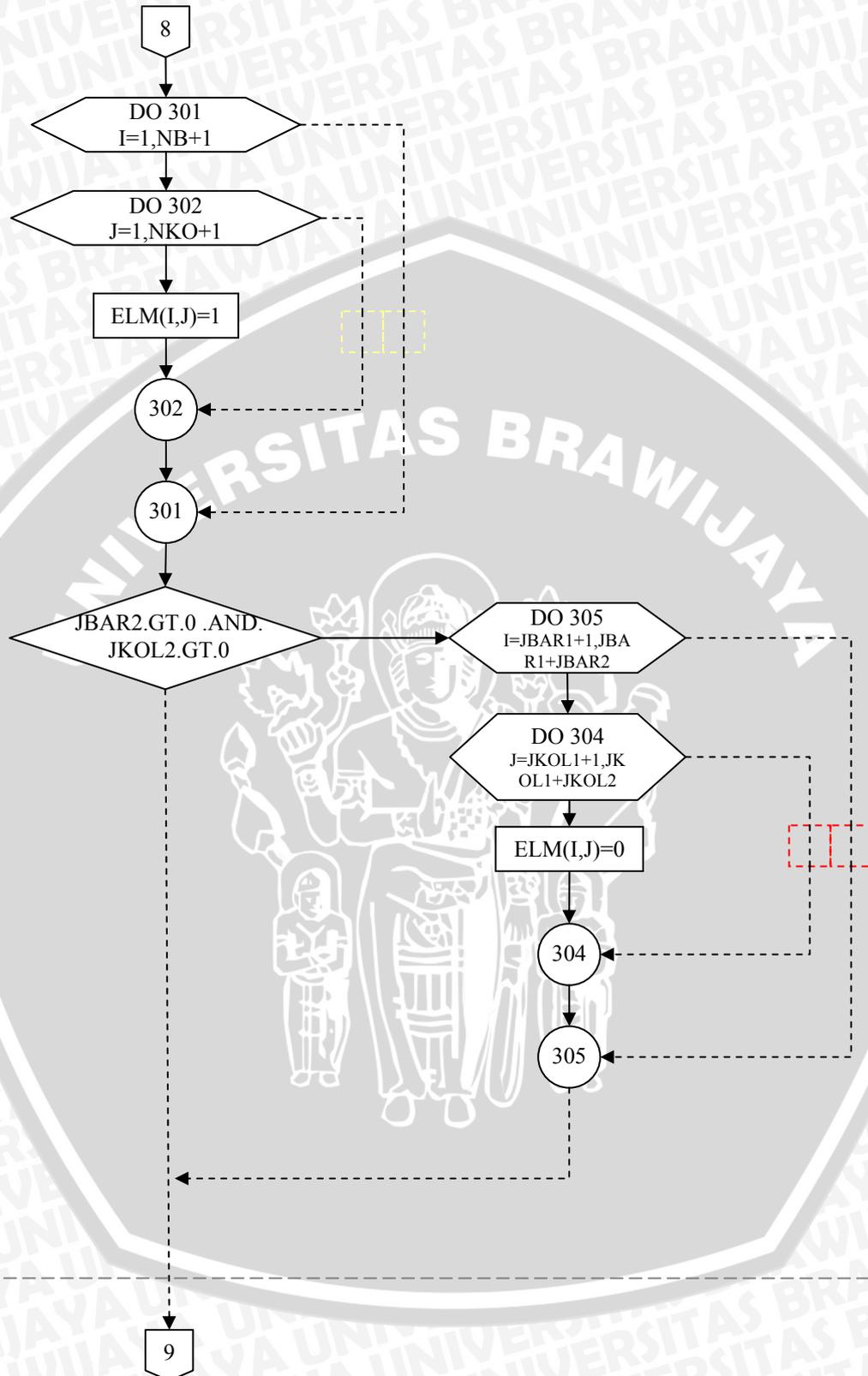


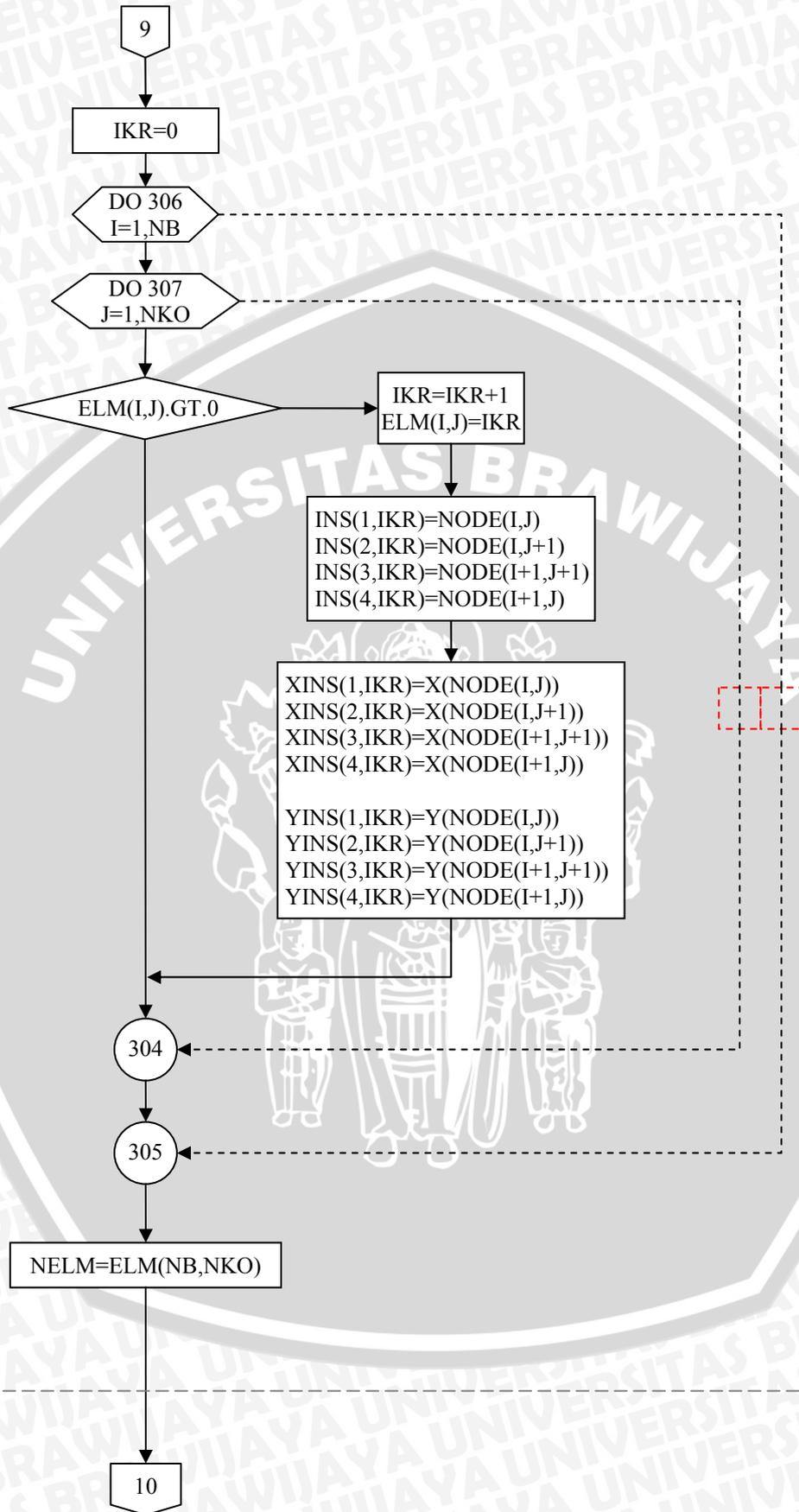


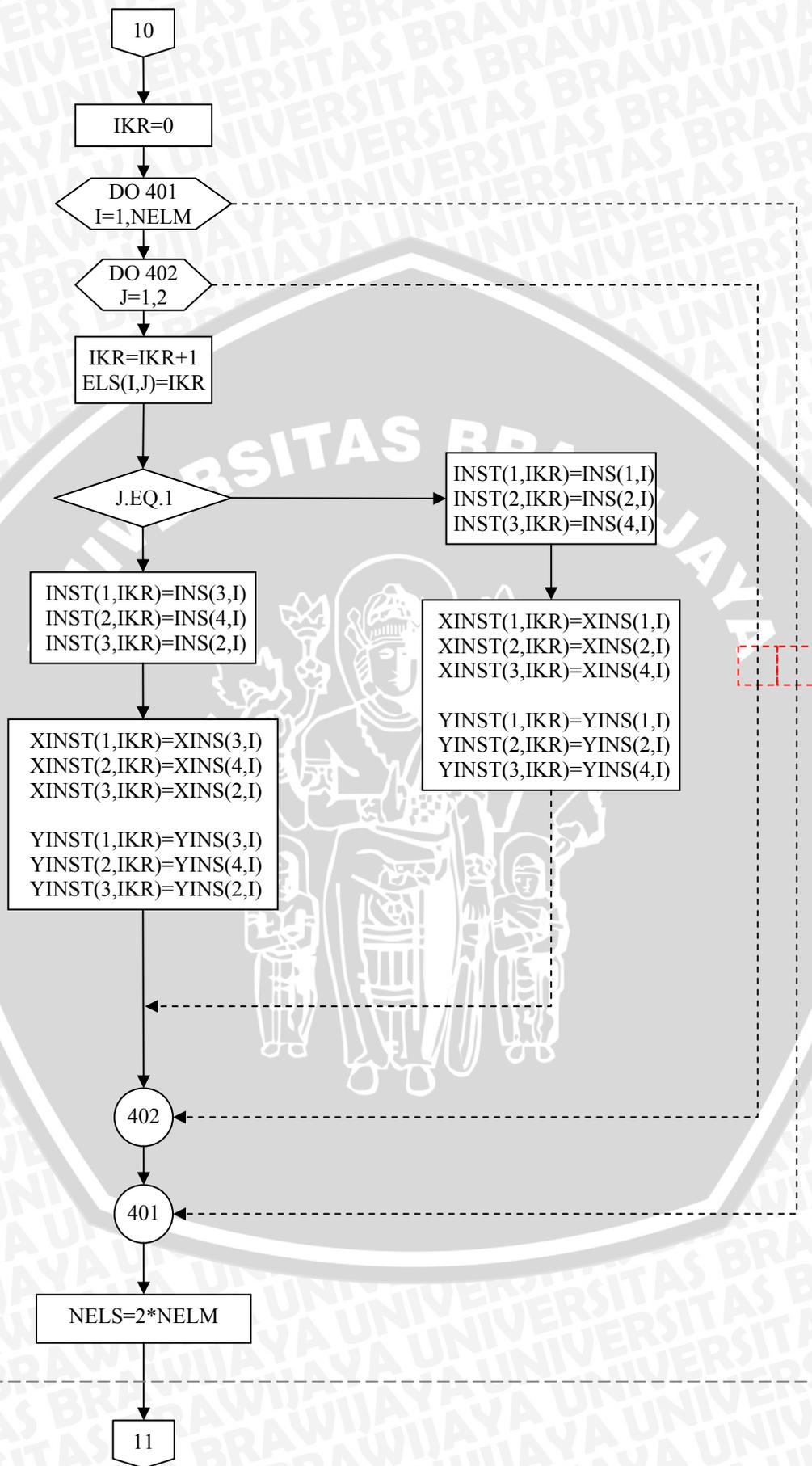


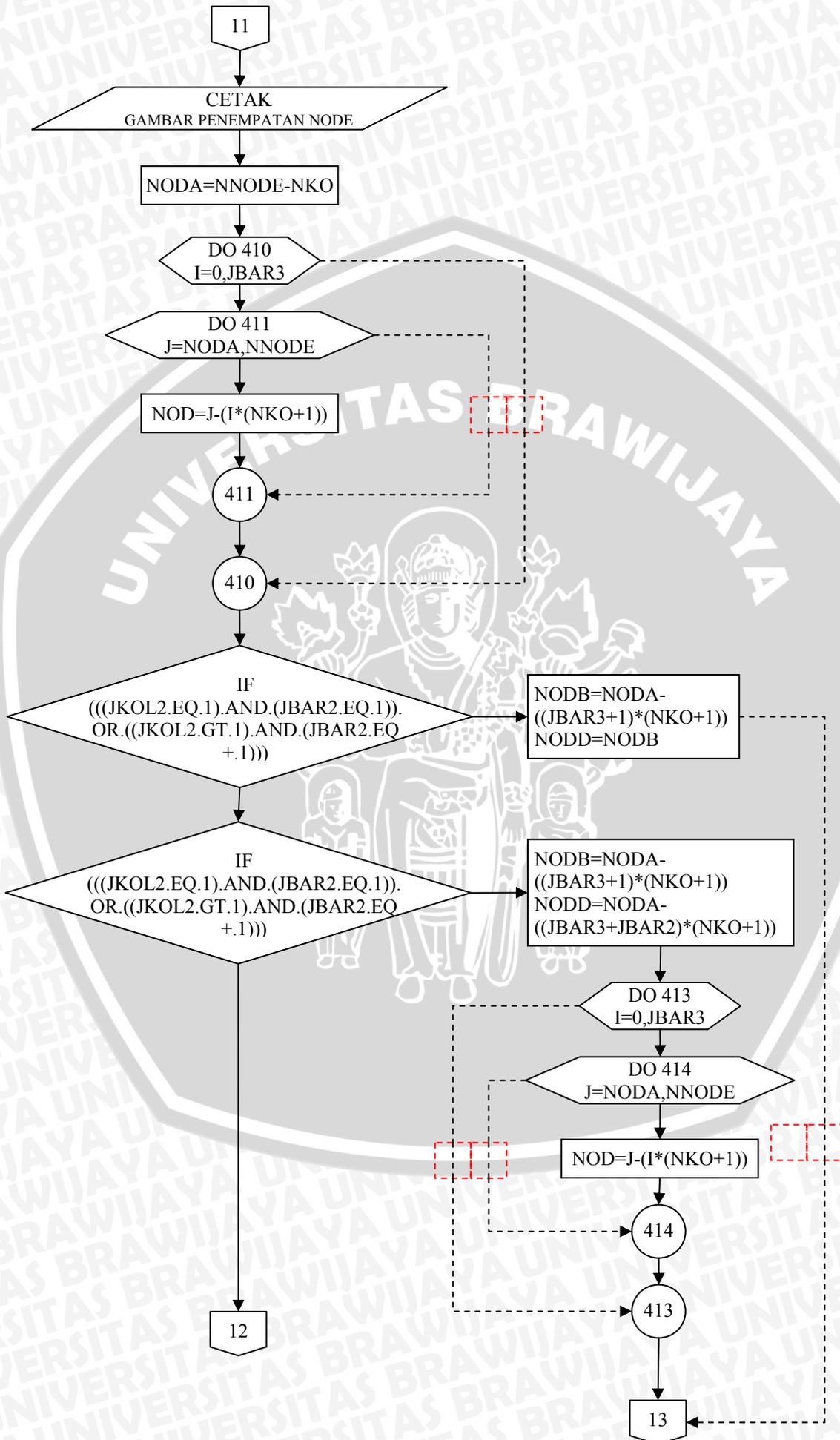


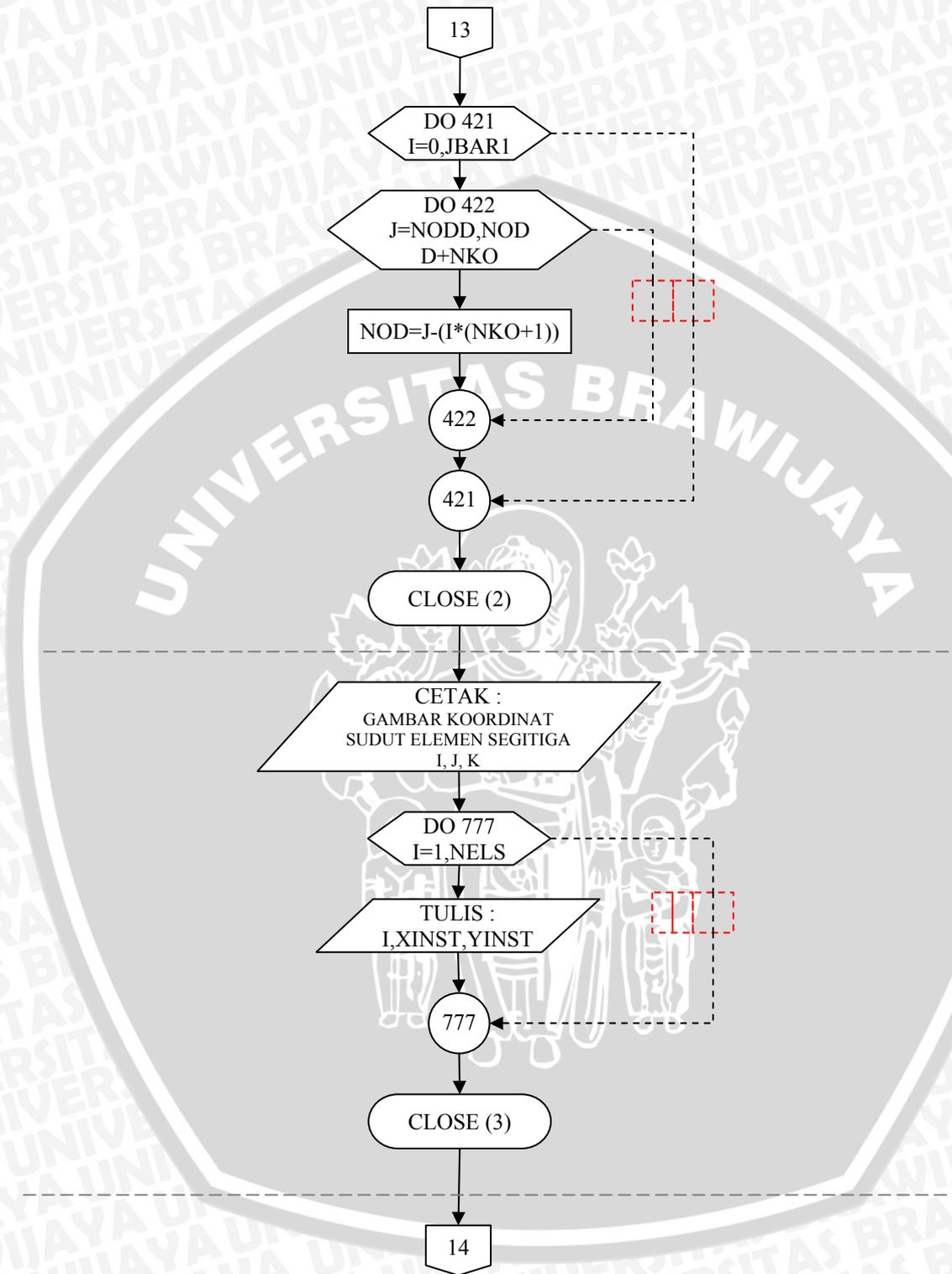


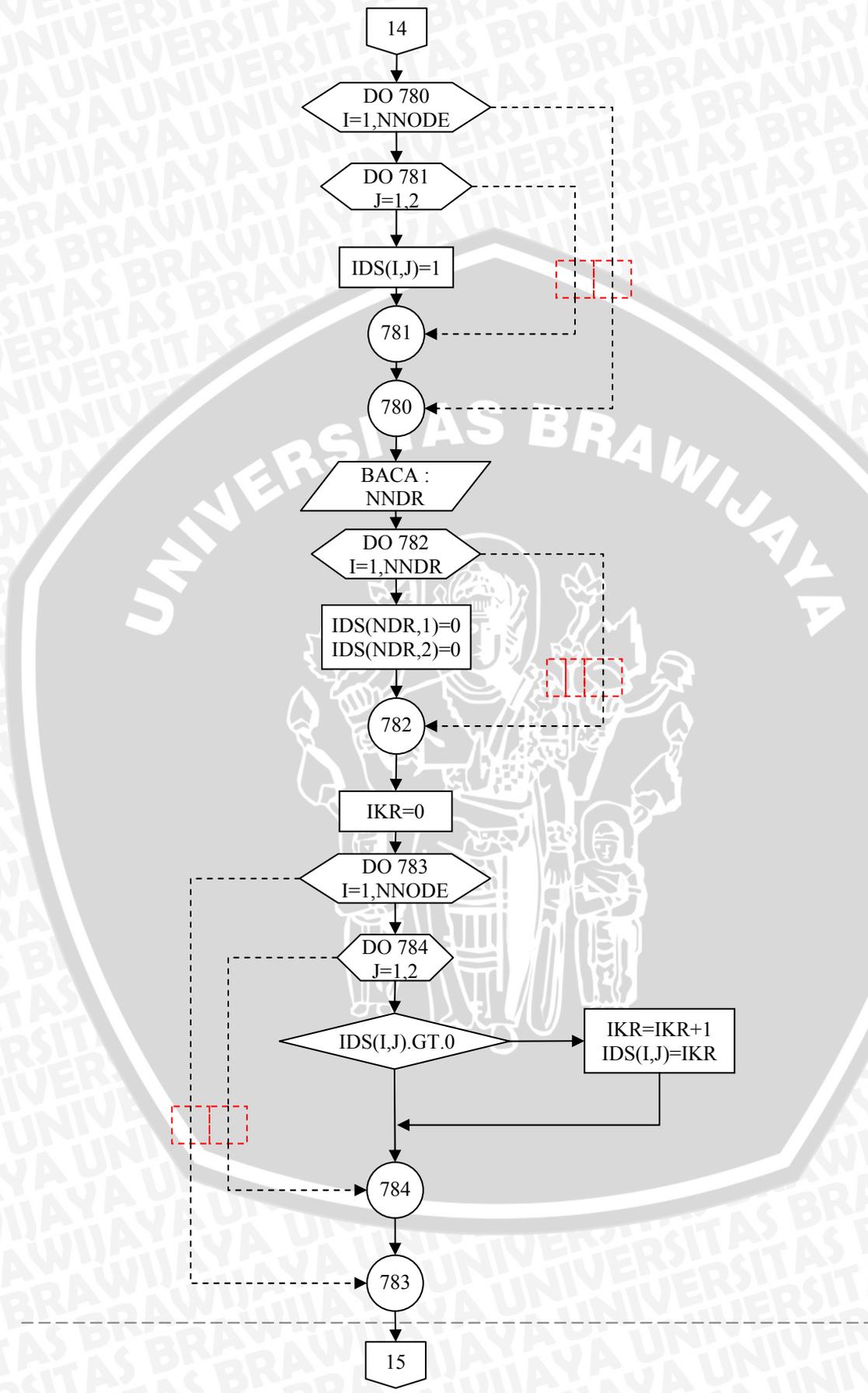


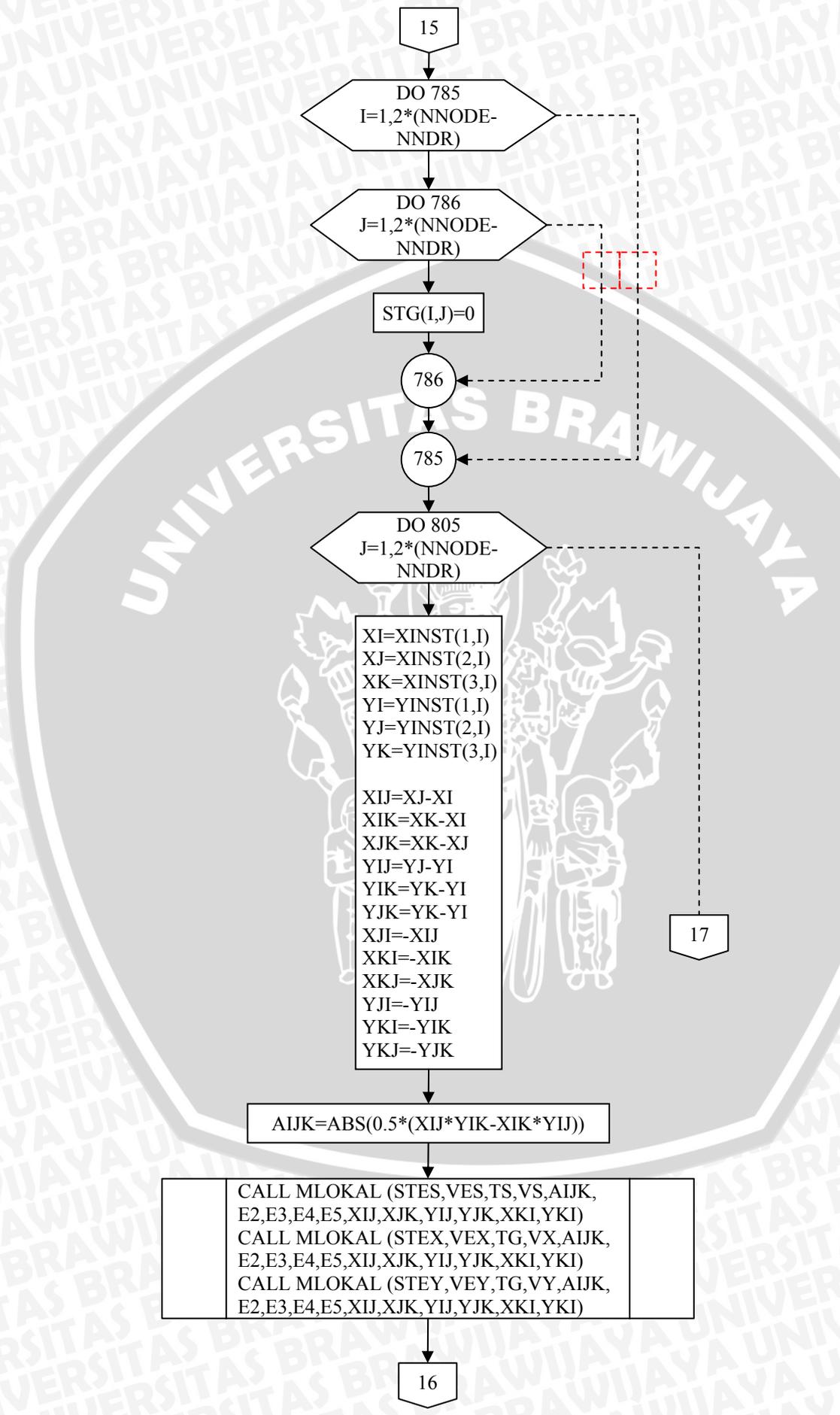


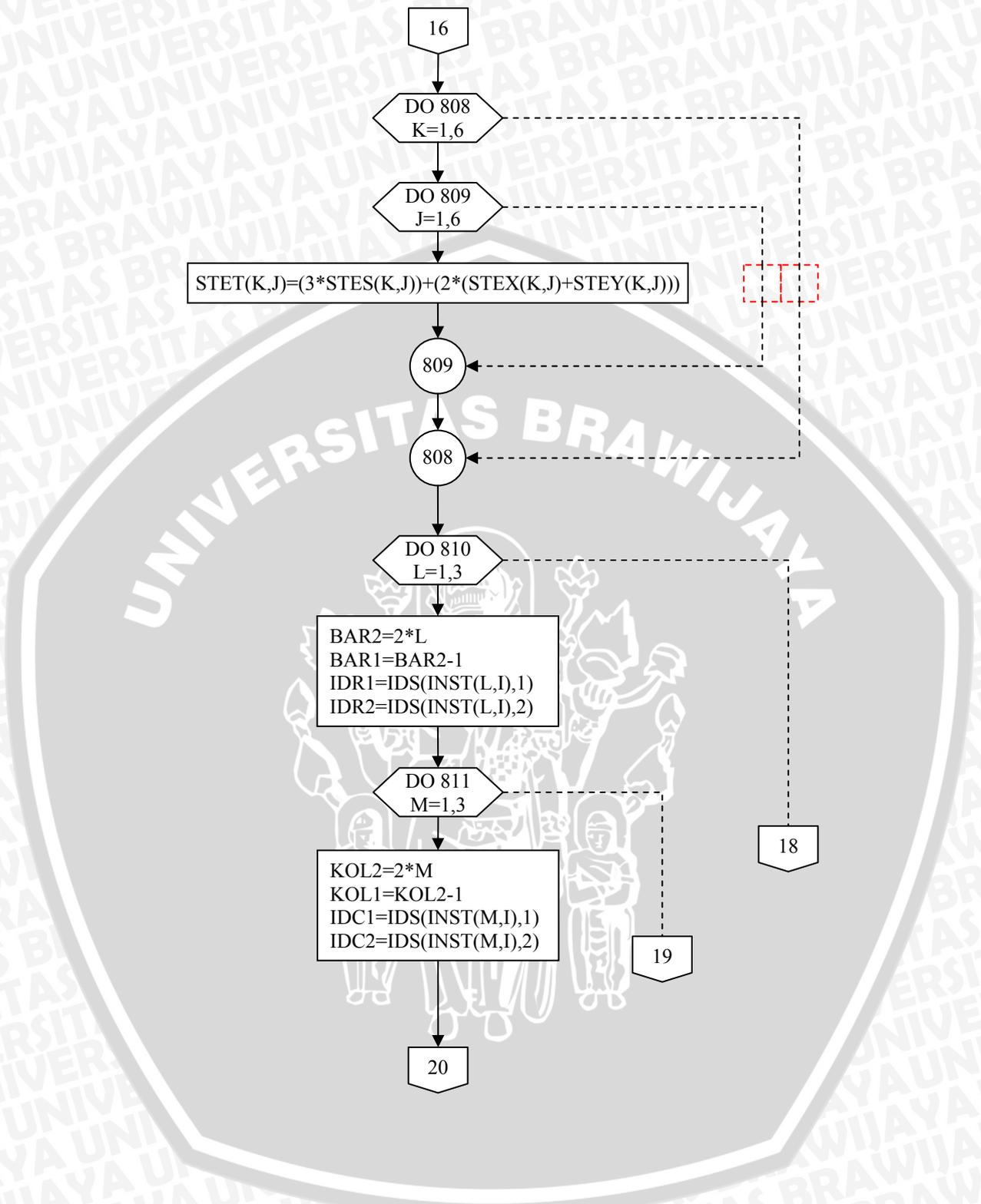


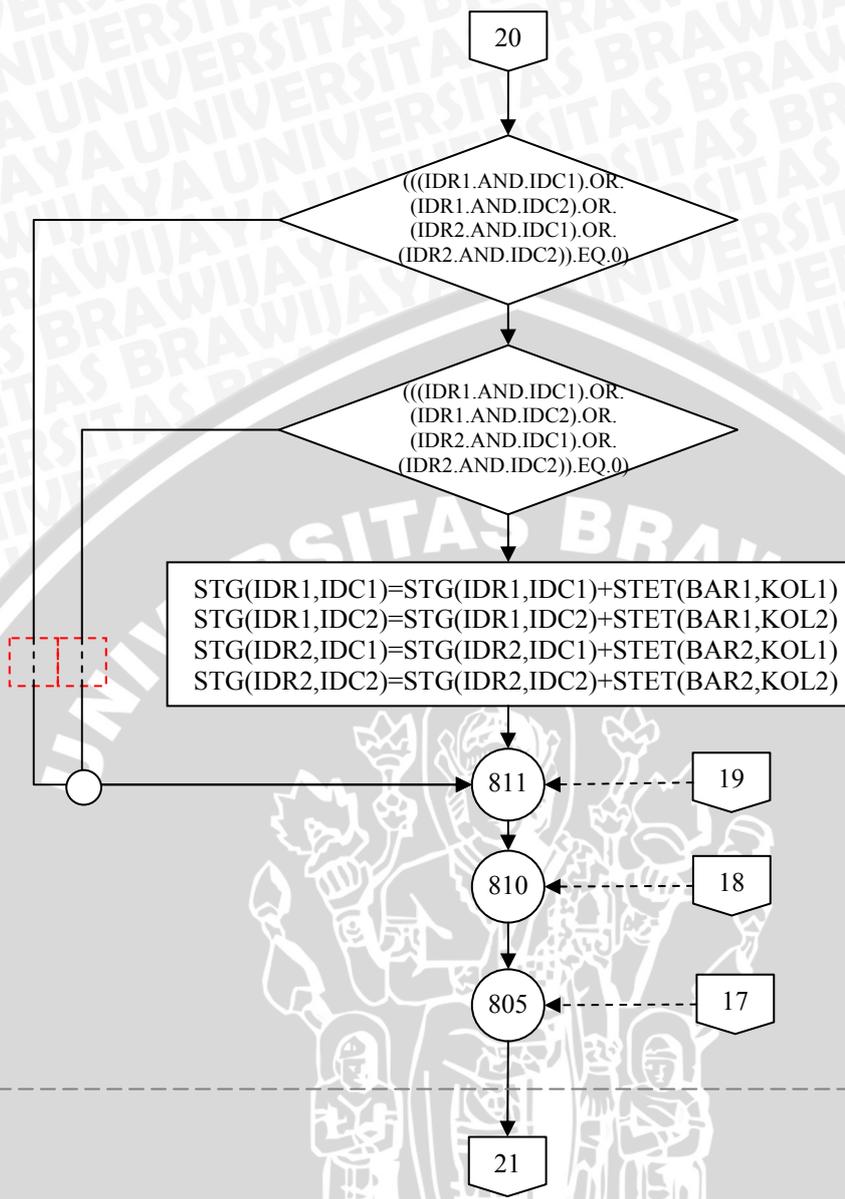


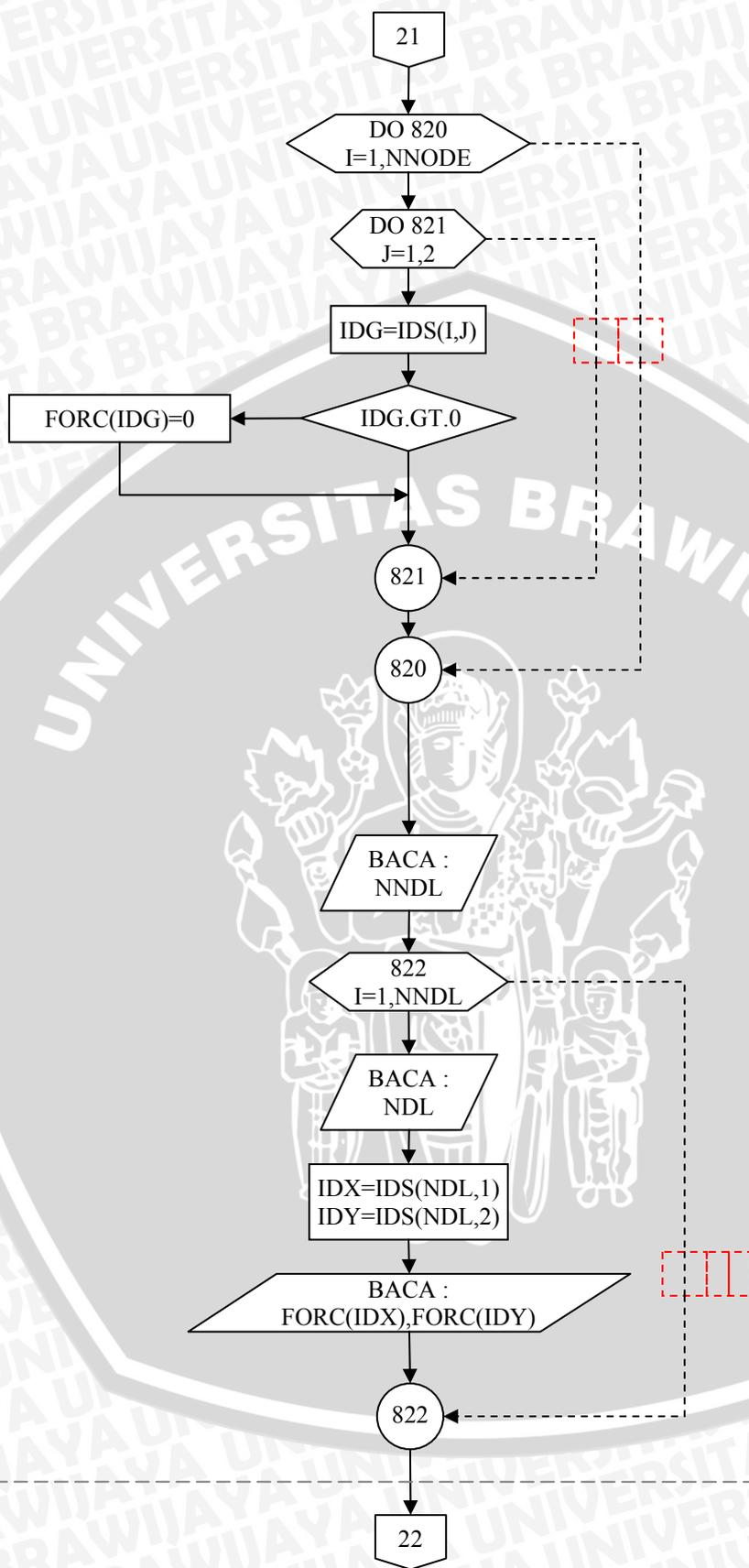


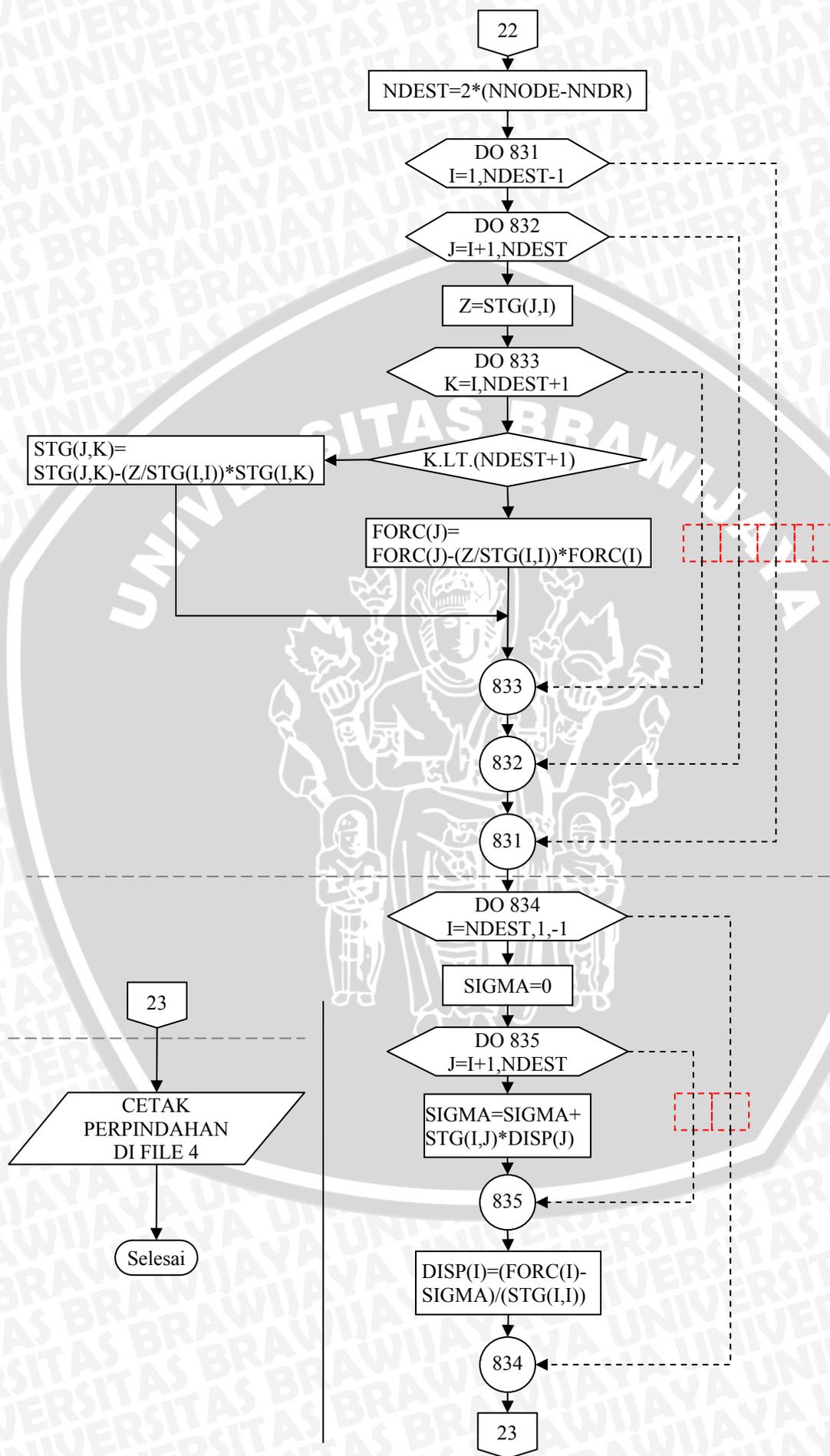


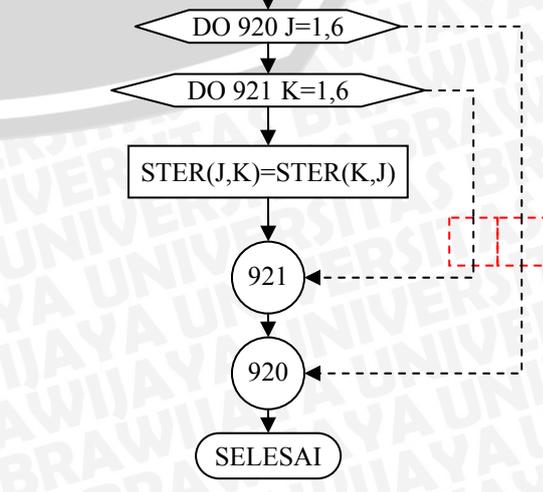
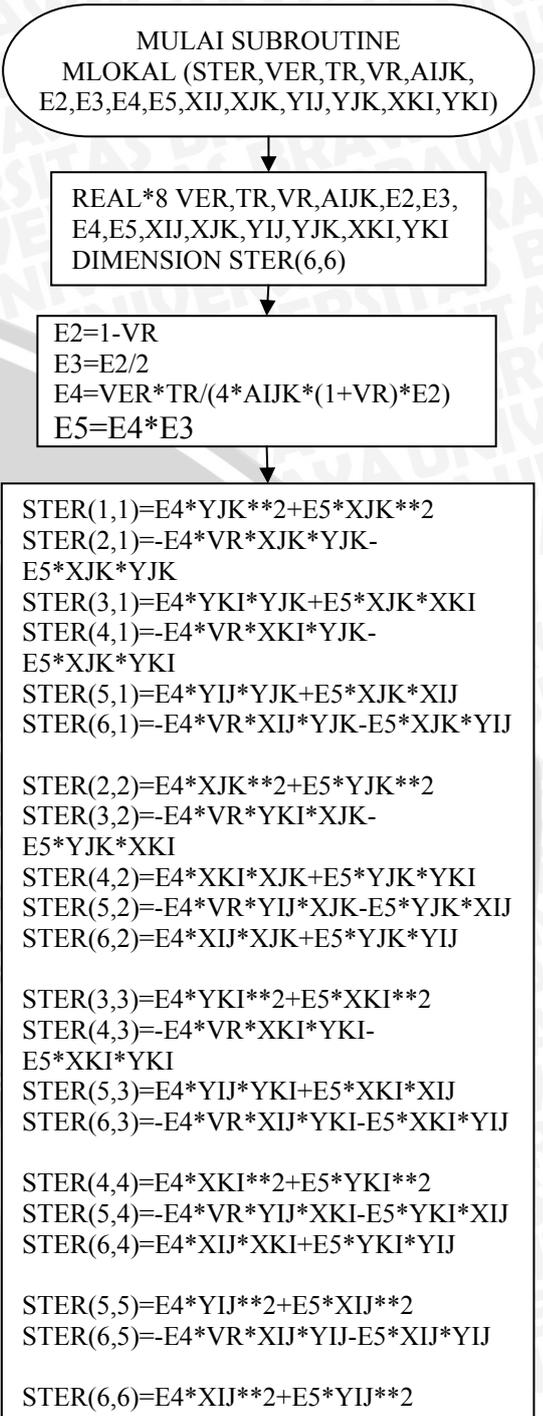
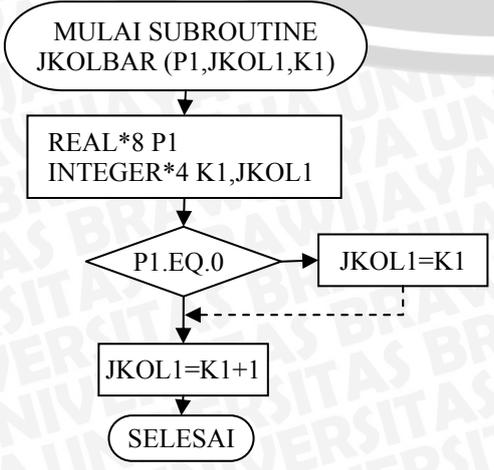
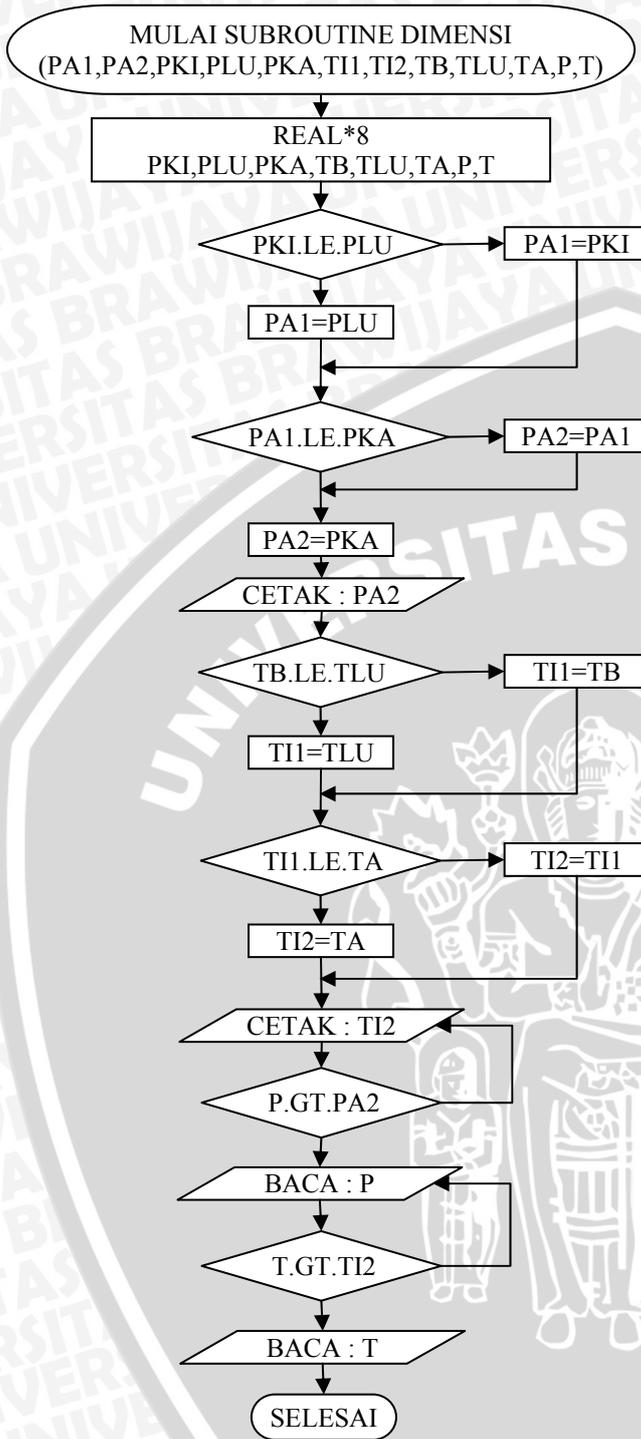














```

PKA=PPN-PKI-PLU
TA=TPN-TB-TLU

cc  dimensi elemen hingga
CALL DIMENSI (PA1,PA2,PKI,PLU,PKA,TI1,TI2,TB,TLU,TA,P,T)

cc  data material
WRITE (*,*)
WRITE (*,*) '>> DATA MATERIAL '
WRITE (*,*) '-----'
WRITE (*,*(1X,A,\)) 'MOD.ELASTIS SPESI (MPa) = '
READ (*,(F20.4)) VES
WRITE (*,*(1X,A,\)) 'MOD.ELASTIS BAMBU SEJAJAR SERAT (MPa) = '
READ (*,(F20.4)) VEX
WRITE (*,*(1X,A,\)) 'MOD.ELASTIS BAMBU TGK LURUS SERAT (MPa)= '
READ (*,(F20.4)) VEY
WRITE (*,*(1X,A,\)) 'RASIO POISSON SPESI = '
READ (*,(F20.4)) VS
WRITE (*,*(1X,A,\)) 'RASIO POISSON BAMBU VXY = '
READ (*,(F20.4)) VX
WRITE (*,*(1X,A,\)) 'RASIO POISSON BAMBU VXY = '
READ (*,(F20.4)) VY

c -----
C 2) PENENTUAN JUMLAH KOLOM & BARIS
c -----
K1=PKI/P
K2=PLU/P
K3=PKA/P
P1=PKI-(K1*P)
P2=PLU-(K2*P)
P3=PKA-(K3*P)

cc  jumlah kolom di kiri lbng, pada lubang,& di kanan lubang
CALL JKOLBAR (P1,JKOL1,K1)
CALL JKOLBAR (P2,JKOL2,K2)
CALL JKOLBAR (P3,JKOL3,K3)

NKO=JKOL1+JKOL2+JKOL3

c -----
B1=TB/T
B2=TLU/T
B3=TA/T
T1=TB-(B1*T)
T2=TLU-(B2*T)
T3=TA-(B3*T)

cc  jumlah baris di bawah lbng, pada lubang,& di atas lubang
CALL JKOLBAR (T1,JBAR1,B1)
CALL JKOLBAR (T2,JBAR2,B2)
CALL JKOLBAR (T3,JBAR3,B3)

NB=JBAR1+JBAR2+JBAR3

c -----
C 3) PENOMORAN NODE
c -----
DO 21 I=1,NB+1
DO 22 J=1,NKO+1
NODE(I,J)=1
22 CONTINUE
21 CONTINUE

cc  Penentuan node yang akan terhapus
IF((JBAR2.GE.2).AND.(JKOL2.GE.2)) THEN
DO 23 I=JBAR1+2,JBAR1+JBAR2
DO 24 J=JKOL1+2,JKOL1+JKOL2
NODE(I,J)=0
24 CONTINUE
23 CONTINUE
ENDIF

c -----
IKR=0
DO 25 I=1,NB+1
DO 26 J=1,NKO+1

```

```

IF(NODE(I,J).GT.0) THEN
IKR=IKR+1
NODE(I,J)=IKR
ENDIF

26 CONTINUE
25 CONTINUE

NNODE=NODE(NB+1,NKO+1)

c -----
C 4) KOORDINAT NODE
c -----
cc Absis (koordinat x)
ccc di kiri lubang
IF (P1 .EQ. 0) THEN
DO 201 I=1,NB+1
DO 202 J=1,K1+1
X(NODE(I,J))=(J-1)*P
202 CONTINUE
201 CONTINUE

ELSE
DO 203 I=1,NB+1
DO 204 J=1,K1+1
X(NODE(I,J))=(J-1)*P
204 CONTINUE
203 CONTINUE

DO 205 I=1,NB+1
DO 206 J=JKOL1+1,JKOL1+1
X(NODE(I,J))=X(NODE(I,(J-1)))+P1
206 CONTINUE
205 CONTINUE

ENDIF

ccc di lubang
IF (P2 .EQ. 0) THEN
DO 207 I=1,NB+1
DO 208 J=JKOL1+2,JKOL1+K2+1
X(NODE(I,J))=X(NODE(I,(J-1)))+P
208 CONTINUE
207 CONTINUE

ELSE
DO 209 I=1,NB+1
DO 210 J=JKOL1+2,JKOL1+K2+1
X(NODE(I,J))=X(NODE(I,(J-1)))+P
210 CONTINUE
209 CONTINUE

DO 211 I=1,NB+1
DO 212 J=JKOL1+JKOL2+1,JKOL1+JKOL2+1
X(NODE(I,J))=X(NODE(I,(J-1)))+P2
212 CONTINUE
211 CONTINUE

ENDIF

ccc di kanan lubang
IF (P3 .EQ. 0) THEN
DO 213 I=1,NB+1
DO 214 J=JKOL1+JKOL2+2,JKOL1+JKOL2+K3+1
X(NODE(I,J))=X(NODE(I,(J-1)))+P
214 CONTINUE
213 CONTINUE

ELSE
DO 215 I=1,NB+1
DO 216 J=JKOL1+JKOL2+2,JKOL1+JKOL2+2
X(NODE(I,J))=X(NODE(I,(J-1)))+P3
216 CONTINUE
215 CONTINUE

DO 217 I=1,NB+1

```



```

DO 218 J=JKOL1+JKOL2+3,JKOL1+JKOL2+JKOL3+1
X(NODE(I,J))=X(NODE(I,(J-1)))+P
218 CONTINUE
217 CONTINUE
ENDIF

```

```

cc Ordinat (koordinat y)
ccc di bawah lubang
IF (T1 .EQ. 0) THEN
DO 219 I=1,B1+1
DO 220 J=1,NKO+1
Y(NODE(I,J))=(I-1)*T
220 CONTINUE
219 CONTINUE

```

```

ELSE
DO 221 I=1,B1+1
DO 222 J=1,NKO+1
Y(NODE(I,J))=(I-1)*T
222 CONTINUE
221 CONTINUE

```

```

DO 223 I=JBAR1+1,JBAR1+1
DO 224 J=1,NKO+1
Y(NODE(I,J))=Y(NODE((I-1),J))+T1
224 CONTINUE
223 CONTINUE

```

```
ENDIF
```

```

ccc di lubang
IF (T2 .EQ. 0) THEN
DO 225 I=JBAR1+2,JBAR1+B2+1
DO 226 J=1,NKO+1
Y(NODE(I,J))=Y(NODE((I-1),J))+T
226 CONTINUE
225 CONTINUE

```

```

ELSE
DO 227 I=JBAR1+2,JBAR1+B2+1
DO 228 J=1,NKO+1
Y(NODE(I,J))=Y(NODE((I-1),J))+T
228 CONTINUE
227 CONTINUE

```

```

DO 229 I=JBAR1+JBAR2+1,JBAR1+JBAR2+1
DO 230 J=1,NKO+1
Y(NODE(I,J))=Y(NODE((I-1),J))+T2
230 CONTINUE
229 CONTINUE

```

```
ENDIF
```

```

ccc di atas lubang
IF (T3 .EQ. 0) THEN
DO 231 I=JBAR1+JBAR2+2,JBAR1+JBAR2+B3+1
DO 232 J=1,NKO+1
Y(NODE(I,J))=Y(NODE((I-1),J))+T
232 CONTINUE
231 CONTINUE

```

```

ELSE
DO 233 I=JBAR1+JBAR2+2,JBAR1+JBAR2+2
DO 234 J=1,NKO+1
Y(NODE(I,J))=Y(NODE((I-1),J))+T3
234 CONTINUE
233 CONTINUE

```

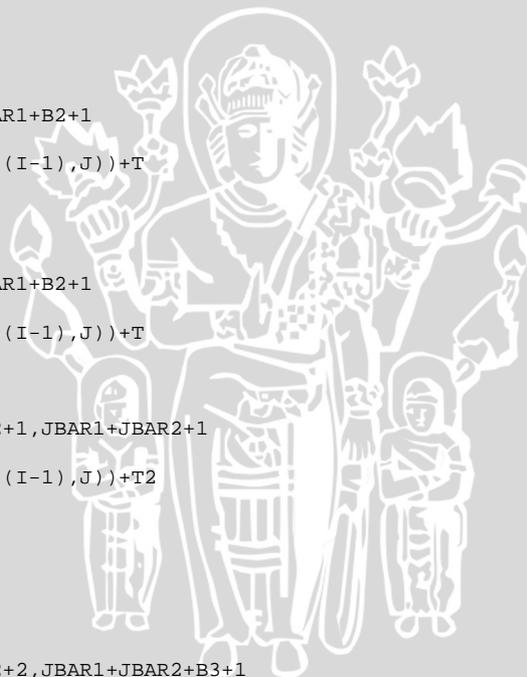
```

DO 235 I=JBAR1+JBAR2+3,JBAR1+JBAR2+JBAR3+1
DO 236 J=1,NKO+1
Y(NODE(I,J))=Y(NODE((I-1),J))+T
236 CONTINUE
235 CONTINUE

```

```
ENDIF
```

```
c -----
```



C 5) PENOMORAN ELEMEN MASTER

```

c -----
DO 301 I=1,NB+1
DO 302 J=1,NKO+1
ELM(I,J)=1
302 CONTINUE
301 CONTINUE

cc Penentuan elemen yang akan terhapus
IF((JBAR2.GT.0).AND.(JKOL2.GT.0)) THEN
DO 304 I=JBAR1+1,JBAR1+JBAR2
DO 305 J=JKOL1+1,JKOL1+JKOL2
ELM(I,J)=0
305 CONTINUE
304 CONTINUE
ENDIF
c -----

IKR=0
DO 306 I=1,NB
DO 307 J=1,NKO

IF(ELM(I,J) .GT. 0) THEN
IKR=IKR+1
ELM(I,J)=IKR

cc Insiden
INS(1,IKR)=NODE(I,J)
INS(2,IKR)=NODE(I,J+1)
INS(3,IKR)=NODE(I+1,J+1)
INS(4,IKR)=NODE(I+1,J)

cc Koordinat Insiden
XINS(1,IKR)=X(NODE(I,J))
XINS(2,IKR)=X(NODE(I,J+1))
XINS(3,IKR)=X(NODE(I+1,J+1))
XINS(4,IKR)=X(NODE(I+1,J))

YINS(1,IKR)=Y(NODE(I,J))
YINS(2,IKR)=Y(NODE(I,J+1))
YINS(3,IKR)=Y(NODE(I+1,J+1))
YINS(4,IKR)=Y(NODE(I+1,J))

ENDIF

307 CONTINUE
306 CONTINUE

NELM=ELM(NB,NKO)

```

C 6) PEMBENTUKAN ELEMEN SEGITIGA

```

c -----
cc Penomoran, Penentuan, dan Pengkoordinatan Insiden Elemen Segitiga

IKR=0
DO 401 I=1,NELM
DO 402 J=1,2

IKR=IKR+1
ELS(I,J)=IKR

IF(J .EQ. 1) THEN
ccc insiden
INST(1,IKR)=INS(1,I)
INST(2,IKR)=INS(2,I)
INST(3,IKR)=INS(4,I)

ccc koordinat
XINST(1,IKR)=XINS(1,I)
XINST(2,IKR)=XINS(2,I)
XINST(3,IKR)=XINS(4,I)

YINST(1,IKR)=YINS(1,I)
YINST(2,IKR)=YINS(2,I)
YINST(3,IKR)=YINS(4,I)

```

```

ELSE
ccc insiden
INST(1,IKR)=INS(3,I)
INST(2,IKR)=INS(4,I)
INST(3,IKR)=INS(2,I)
ccc koordinat
XINST(1,IKR)=XINS(3,I)
XINST(2,IKR)=XINS(4,I)
XINST(3,IKR)=XINS(2,I)

YINST(1,IKR)=YINS(3,I)
YINST(2,IKR)=YINS(4,I)
YINST(3,IKR)=YINS(2,I)

ENDIF
402 CONTINUE
401 CONTINUE

NELS=2*NELM

C -----
C OUTPUT >> GAMBAR PENEMPATAN NODE
C -----
WRITE (2,*)
WRITE (2,'(5X,A,\)') ' GAMBAR PENEMPATAN NODE '
WRITE (2,'(//)')

ccc penempatan node di atas lubang
NODA=NNODE-NKO
DO 410 I=0,JBAR3
DO 411 J=NODA,NNODE
NOD=J-(I*(NKO+1))
WRITE (2,'(I4,A,\)') NOD , ' '
411 CONTINUE
WRITE (2,'(//)')
410 CONTINUE

ccc penempatan node di atas lubang
IF (((JKOL2.EQ.1).AND.(JBAR2.EQ.1)).OR.((JKOL2.GT.1).AND.(JBAR2.EQ
+.1))) THEN
NODB=NODA-((JBAR3+1)*(NKO+1))
NODD=NODB

ELSE
IF ((JKOL2.EQ.1).AND.(JBAR2.GT.1)) THEN
NODB=NODA-((JBAR3+1)*(NKO+1))
NODD=NODA-((JBAR3+JBAR2)*(NKO+1))

DO 413 I=0,JBAR2-2
DO 414 J=NODB,NODB+NKO
NOD=J-(I*(NKO+1))
WRITE (2,'(I4,A,\)') NOD , ' '
414 CONTINUE
WRITE (2,'(//)')
413 CONTINUE

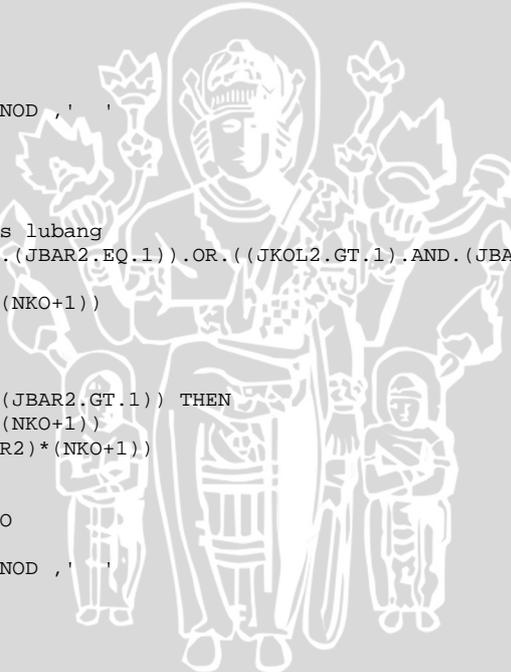
ELSE
IF ((JKOL2.GT.1).AND.(JBAR2.GT.1)) THEN
NODB=NODA-((JBAR3+1)*(NKO+1))+ (JKOL2-1)
NODC=NODB+JKOL1+1
NODD=NODA-((JBAR3+JBAR2)*(NKO+1))+((JKOL2-1)*(JBAR2-1))
DO 415 I=0,JBAR2-2

DO 416 J=NODB,NODB+JKOL1
NOD=J-(I*(JKOL1+JKOL3+2))
WRITE (2,'(I4,A,\)') NOD , ' '
416 CONTINUE

DO 417 J=1,JKOL2-1
WRITE (2,'(A,\)') ' '
417 CONTINUE

DO 418 J=NODC,NODC+JKOL3
NOD=J-(I*(JKOL1+JKOL3+2))
WRITE (2,'(I4,A,\)') NOD , ' '
418 CONTINUE
WRITE (2,'(//)')

```



```

415 CONTINUE

      ENDIF
      ENDIF
      ENDIF

ccc  penempatan node di bawah lubang
420 DO 421 I=0,JBAR1
      DO 422 J=NODD,NODD+NKO
          NOD=J-(I*(NKO+1))
          WRITE (2, '(I4,A,\)') NOD , ' '
422 CONTINUE
          WRITE (2, '(/)')
421 CONTINUE

c -----
C OUTPUT >> KOORDINAT NODE
c -----
      WRITE (2,*) ' '
      WRITE (2,*) ' '
      WRITE (2,*) ' '
      WRITE (2,*) '*****'
      WRITE (2,*) '
                                KOORDINAT NODE
      WRITE (2,*) '-----'
      WRITE (2,*) ' NODE                X                Y
      WRITE (2,*) '-----'

      DO 430 I=1,NNODE
          WRITE (2,429) I,X(I),Y(I)
429 FORMAT (1X,I4,F20.4,F20.4)
430 CONTINUE

      CLOSE (2)

c -----
C OUTPUT >> KOORDINAT SUDUT ELEMEN SEGITIGA I,J,K
c -----

      WRITE (3,*) '*****'
      +*****'
      WRITE (3,*) '
                                KOORDINAT SUDUT ELEMEN SEGITIGA I,J,K '
      WRITE (3,*) '-----'
      +-----'
      WRITE (3,*) ' ELM ! I ! J
      +! K '
      WRITE (3,*) '-----'
      +-----'
      WRITE (3,*) ' ! X Y ! X Y
      +! X Y '
      WRITE (3,*) '-----'
      +-----'

      DO 777 I=1,NELS
          WRITE (3,666) I,XINST(1,I),YINST(1,I),XINST(2,I),YINST(2,I),XINST
          +(3,I),YINST(3,I)
666 FORMAT (I4,F12.2,F12.2,F12.2,F12.2,F12.2,F12.2)

777 CONTINUE

      CLOSE (3)

c -----
C 7) PENENMPATAN TUMPUAN
c -----

      WRITE (*,*)
      WRITE (*,*) '-----'
      WRITE (*,*) ' BUKA FILE NODE.TXT PADA PROGRAM ANDA '
      WRITE (*,*) ' UNTUK MENENTUKAN PENEMPATAN TUMPUAN DAN BEBAN '
      WRITE (*,*) '-----'
      WRITE (*,*)

cc  PENETAPAN INDEKS DESTINASI
ccc masukan indeks awal = 1 utk semua D.O.F sbg syarat tdk ada kekangan pd
ccc semua node
      DO 780 I=1,NNODE
          DO 781 J=1,2

```

```

      IDS(I,J)=1
781 CONTINUE
780 CONTINUE
ccc masukan indeks = 0 pada D.O.F terkekang
  WRITE (*,'(1X,A,\)') ' JUMLAH NODE YANG DIKEKANG      = '
  READ (*,'(I20)') NNDR
  DO 782 I=1,NNDR
  WRITE (*,'(4X,A,I2,A,\)') ' NODE TERKEKANG KE-',I,' = '
  READ (*,'(I20)') NDR
  IDS(NDR,1)=0
  IDS(NDR,2)=0
782 CONTINUE
ccc masukan indeks = 1 s/d 2x(j.node - j.tumpuan) pada D.O.F lainnya
  IKR=0
  DO 783 I=1,NNODE
  DO 784 J=1,2
  IF(IDS(I,J).GT.0) THEN
  IKR=IKR+1
  IDS(I,J)=IKR
  ENDIF
784 CONTINUE
783 CONTINUE

c -----
c 8) PERAKITAN MATRIKS
c -----
cc  memberikan nilai awal = 0 pada m.kekakuan struktur / m.global
  DO 785 I=1,2*(NNODE-NNDR)
  DO 786 J=1,2*(NNODE-NNDR)
  STG(I,J)=0
786 CONTINUE
785 CONTINUE

cc  Perakitan Matriks Lokal (STET)

  DO 805 I=1,NELS

  XI=XINST(1,I)
  XJ=XINST(2,I)
  XK=XINST(3,I)
  YI=YINST(1,I)
  YJ=YINST(2,I)
  YK=YINST(3,I)

  XIJ=XJ-XI
  XIK=XK-XI
  XJK=XK-XJ
  YIJ=YJ-YI
  YIK=YK-YI
  YJK=YK-YJ
  XJI=-XIJ
  XKI=-XIK
  XKJ=-XJK
  YJI=-YIJ
  YKI=-YIK
  YKJ=-YJK

ccc luas segitiga masing-2 elemen
  AIJK=ABS(0.5*(XIJ*YIK-XIK*YIJ))

ccc Pembentukan matriks kekakuan lokal
  CALL MLOKAL (STES,VES,TS,VS,AIJK,E2,E3,E4,E5,
+XIJ,XJK,YIJ,YJK,XKI,YKI)
  CALL MLOKAL (STEX,VEX,TG,VX,AIJK,E2,E3,E4,E5,
+XIJ,XJK,YIJ,YJK,XKI,YKI)
  CALL MLOKAL (STEY,VEY,TG,VY,AIJK,E2,E3,E4,E5,
+XIJ,XJK,YIJ,YJK,XKI,YKI)

ccc Memebentuk matrik kekakuan panel dinding
  DO 808 K=1,6
  DO 809 J=1,6
  STET(K,J)=(3*STES(K,J))+2*((STEX(K,J)+STEY(K,J)))
  809 CONTINUE
  808 CONTINUE

cc  Perakitan Matriks Global (STG)

```



```

ccc  identifikasi no.baris pd matrik STET & STG
      DO 810 L=1,3
c    destinasi ke-2 pada matrik k.elemen / STET
      BAR2=2*L
c    destinasi ke-1 pada matrik k.elemen / STET
      BAR1=BAR2-1
c    destinasi ke-1 pada matrik k.struktur / STG
      IDR1=IDS(INST(L,I),1)
c    destinasi ke-2 pada matrik k.struktur / STG
      IDR2=IDS(INST(L,I),2)

ccc  identifikasi no.kolom pd matrik STET & STG
      DO 811 M=1,3
c    destinasi ke-2 pada matrik k.elemen / STET
      KOL2=2*M
c    destinasi ke-1 pada matrik k.elemen / STET
      KOL1=KOL2-1
c    destinasi ke-1 pada matrik k.struktur / STG
      IDC1=IDS(INST(M,I),1)
c    destinasi ke-2 pada matrik k.struktur / STG
      IDC2=IDS(INST(M,I),2)

ccc  pengabaian nilai matrik yang berada di baris & kolom 0 matrik STET
      IF(((IDR1.AND.IDC1).OR.(IDR1.AND.IDC2).OR.(IDR2.AND.IDC1).OR.(IDR2
+.AND.IDC2)).EQ.0) GOTO 811
      IF(((IDR1.OR.IDR2).OR.IDC1.OR.IDC2).EQ.0) GOTO 811
c
ccc  penjumlahan matrik lokal membentuk matrik global
      STG(IDR1, IDC1)=STG(IDR1, IDC1)+STET(BAR1, KOL1)
      STG(IDR1, IDC2)=STG(IDR1, IDC2)+STET(BAR1, KOL2)
      STG(IDR2, IDC1)=STG(IDR2, IDC1)+STET(BAR2, KOL1)
      STG(IDR2, IDC2)=STG(IDR2, IDC2)+STET(BAR2, KOL2)

      811 CONTINUE
      810 CONTINUE

      805 CONTINUE

c
c 9) INPUT DATA BEBAN NODAL
c
cc  memberikan nilai awal = 0 pada matrik gaya
      DO 820 I=1,NNODE
      DO 821 J=1,2
      IDG=IDS(I,J)
      IF(IDG.GT.0) THEN
      FORC(IDG)=0
      ENDIF
      821 CONTINUE
      820 CONTINUE
c
cc  input nilai beban pada nodal tertentu
      WRITE (*,*)
      WRITE (*, '(1X,A,\)') ' JUMLAH NODE YANG DIBERI BEBAN          = '
      READ (*, '(I20)') NNDR
      DO 822 I=1,NNDR
      WRITE (*,*)
      WRITE (*, '(5X,A,I2,A,\)') 'NODE TERBEBANI KE-',I,' = '
      READ (*, '(I20)') NDL
      IDX=IDS(NDL,1)
      IDY=IDS(NDL,2)
      WRITE (*,*) '-----'
      WRITE (*,*) ' MASUKKAN DATA-2 DI BAWAH INI DENGAN BIL.REAL'
      WRITE (*,*) '-----'
      WRITE (*, '(6X,A,\)') ' BEBAN ARAH X (N)          = '
      READ (*, '(F20.4)') FORC(IDX)
      WRITE (*, '(6X,A,\)') ' BEBAN ARAH Y (N)          = '
      READ (*, '(F20.4)') FORC(IDY)
      WRITE (*,*)
      822 CONTINUE
      WRITE (*,*) 'PLEASE WAIT PROGRAM IS PROCESSING'

c
c 10) ELIMINASI GAUSS UNTUK Mencari Perpindahan Nodal
c
cc  pembentukan segitiga atas (triangularisasi)
      NDEST=2*(NNODE-NNDR)

```



```

PAUSE
END

C *****
C SUBROUTINE
C *****

C SUBROUTINE " dimensi elemen hingga "
SUBROUTINE DIMENSI (PA1,PA2,PKI,PLU,PKA,TI1,TI2,TB,TLU,TA,P,T)
REAL*8 PKI,PLU,PKA,TB,TLU,TA,P,T
WRITE (*,*)
WRITE (*,*) ' DATA DIMENSI ELEMEN HINGGA '
WRITE (*,*) ' ----- '
WRITE (*,*)

c warning bagi user untuk penentuan dimensi elemen hingga
IF (PKI.LE.PLU) THEN
PA1=PKI
ELSE
PA1=PLU
ENDIF
IF (PA1.LE.PKA) THEN
PA2=PA1
ELSE
PA2=PKA
ENDIF
WRITE (*,*) ' KETERANGAN : '
WRITE (*, '(3X,A42,F8.3,1X,A)') ' 1) PANJANG DIMENSI ELEMEN HINGGA
+MAKS = ',PA2,' mm'

IF (TB.LE.TLU) THEN
TI1=TB
ELSE
TI1=TLU
ENDIF
IF (TI1.LE.TA) THEN
TI2=TI1
ELSE
TI2=TA
ENDIF
WRITE (*, '(3X,A42,F8.3,1X,A)') ' 2) TINGGI DIMENSI ELEMEN HINGGA
+MAKS = ',TI2,' mm'
WRITE (*,*) ' ..... '

c input data dimensi elemen hingga
200 WRITE (*, '(1X,A,\)') 'PANJANG ELEMEN HINGGA (mm) = '
READ (*, '(F20.4)') P
IF (P.GT.PA2) THEN
GOTO 200
ENDIF

201 WRITE (*, '(1X,A,\)') 'TINGGI ELEMEN HINGGA (mm) = '
READ (*, '(F20.4)') T
IF (T.GT.TI2) THEN
GOTO 201
ENDIF

END

C SUBROUTINE " jumlah kolom di kiri lbng, pada lubang,& di kanan lubang "
C SUBROUTINE " jumlah baris di bawah lbng, pada lubang,& di atas lubang "
SUBROUTINE JKOLBAR (P1,JKOL1,K1)
REAL*8 P1
INTEGER*4 K1,JKOL1
IF (P1.EQ.0) THEN
JKOL1=K1
ELSE
JKOL1=K1+1
ENDIF
END

C SUBROUTINE " PERAKITAN MATRIKS "
SUBROUTINE MLOKAL (STER,VER,TR,VR,AIJK,E2,E3,E4,E5,
+XIJ,XJK,YIJ,YJK,XKI,YKI)
REAL*8 VER,TR,VR,AIJK,E2,E3,E4,E5,
+XIJ,XJK,YIJ,YJK,XKI,YKI
DIMENSION STER(6,6)

```

```
ccc konstanta elastis tegangan bidang
E2=1-VR
E3=E2/2
E4=MER*TR/(4*A1JK*(1+VR)*E2)
E5=E4*E3
```

```
ccc rumus kekakuan matriks
STER(1,1)=E4*YJK**2+E5*XJK**2
STER(2,1)=-E4*VR*XJK*YJK-E5*XJK*YJK
STER(3,1)=E4*YKI*YJK+E5*XJK*XKI
STER(4,1)=-E4*VR*XKI*YJK-E5*XJK*YKI
STER(5,1)=E4*YIJ*YJK+E5*XJK*XIJ
STER(6,1)=-E4*VR*XIJ*YJK-E5*XJK*YIJ
```

```
STER(2,2)=E4*XJK**2+E5*YJK**2
STER(3,2)=-E4*VR*YKI*XJK-E5*YJK*XKI
STER(4,2)=E4*XKI*XJK+E5*YJK*YKI
STER(5,2)=-E4*VR*YIJ*XJK-E5*YJK*XIJ
STER(6,2)=E4*XIJ*XJK+E5*YJK*YIJ
```

```
STER(3,3)=E4*YKI**2+E5*XKI**2
STER(4,3)=-E4*VR*XKI*YKI-E5*XKI*YKI
STER(5,3)=E4*YIJ*YKI+E5*XKI*XIJ
STER(6,3)=-E4*VR*XIJ*YKI-E5*XKI*YIJ
```

```
STER(4,4)=E4*XKI**2+E5*YKI**2
STER(5,4)=-E4*VR*YIJ*XKI-E5*YKI*XIJ
STER(6,4)=E4*XIJ*XKI+E5*YKI*YIJ
```

```
STER(5,5)=E4*YIJ**2+E5*XIJ**2
STER(6,5)=-E4*VR*XIJ*YIJ-E5*XIJ*YIJ
```

```
STER(6,6)=E4*XIJ**2+E5*YIJ**2
```

```
ccc simetrisasi matriks
DO 920 J=1,6
DO 921 K=1,6
STER(J,K)=STER(K,J)
921 CONTINUE
920 CONTINUE
END
```



### 3.7. *Software* Aplikasi Sipil

Bagi kita yang telah berkecimpung di bidang sipil, merupakan bukan hal yang langka lagi jika dalam menganalisis suatu struktur menggunakan *software* komputer. Ini terjadi karena perkembangan teknologi yang semakin melaju cepat dalam segala bidang kehidupan, sehingga diupayakanlah sebuah program yang dapat menganalisis berbagai macam bentuk struktur secara cepat dan tepat sebagai pendukung dalam analisis secara manual.

Dalam kita menganalisis berbagai macam struktur yang ada, maka akan terdapat banyak cara atau metode untuk menyelesaikannya yang mana berbeda juga cara penyelesaiannya satu sama lainnya. Metode yang paling terkenal saat ini adalah metode yang digunakan dalam analisis skripsi ini yaitu metode elemen hingga. Oleh karena itu *software* yang telah beredar di pasaran saat ini banyak menggunakan metode ini. *Software-software* yang tersebut antara lain adalah SAP dan Staad-Pro.

Jadi merupakan hal yang tepat jika program elemen hingga yang dibuat oleh penulis skripsi untuk menghitung besarnya perpindahan dinding panel berlubang berlapis gedek ini diteliti kebenarannya atau konvergensinya dengan menggunakan *software* yang ada karena kedua program ini menggunakan metode yang sama. Dalam hal ini perbandingan yang digunakan menggunakan Staad – Pro 2004, dikarenakan *software* ini lebih akrab digunakan oleh kalangan mahasiswa dengan berbagai kemudahan dalam pengoperasiannya.

### 3.8. Eksperimen Uji Kuat Tekan Spesi dan Bambu

Data material yang digunakan dalam *input* program ini adalah modulus elastisitas spesi  $E_s$ , bambu sejajar serat  $E_{bx}$ , bambu tegak lurus serat  $E_{by}$ , rasio *Poisson* spesi, dan rasio *Poisson* bambu ( $\nu_{xy}$  dan  $\nu_{yx}$ ) yang semuanya itu diperoleh dari hasil pengujian kuat tekan di laboratorium.

Pada pengujian kuat tekan spesi, benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan ukuran  $\varnothing 8$  cm dan tinggi 16 cm. Campuran spesi menggunakan 1 : 3 dan faktor air semen 0,4. Pengujian dilakukan pada saat benda uji berumur 28 hari. Nilai modulus elastisitas spesi didapatkan dari kemiringan grafik hasil regresi yang menyatakan hubungan tegangan dan regangan spesi tersebut. Kemudian gradien (m) dari persamaan garis lurus  $y = mx+c$  digunakan sebagai nilai dari modulus elastisitas spesi.  $R^2$  pada grafik menunjukkan koefisien determinasi, jika  $R^2$  sama dengan atau mendekati 1 maka

dapat dinyatakan bahwa nilai-nilai garis regresi linier tersebut sama dengan atau mendekati nilai-nilai data aktual. Dari data hasil pengujian didapatkan nilai modulus elastisitas spesi rata-rata sebesar 2263,2157 MPa. Sedangkan untuk rasio *Poisson* spesi diasumsikan sama dengan 0,2.

Pengujian terhadap material bambu terdiri dari uji kuat tekan bambu tegak lurus serat dan sejajar serat. Uji ini dilakukan pada penelitian sebelumnya. Untuk uji tegak lurus serat, terdiri dari 3 sampel (1 sampel dari bagian atas (*A*), tengah (*T*), dan bawah (*B*) bambu) berdimensi (25 x 25 x *tebal dinding bambu*) mm. *Electric strain gauge* dipasang pada sampel bambu (*T*) pada arah sejajar dan tegak lurus serat. Data elastisitas bambu tegak lurus serat ( $E_{byx}$ ) ini diperoleh dari kemiringan regresi linear grafik hubungan tegangan-regangan dengan nilai  $E_{byx}$  rata-rata adalah 197,59 MPa. Sedangkan rasio *Poisson*  $\nu_{yx}$  diperoleh dari kemiringan regresi linear grafik hubungan regangan sejajar serat (ordinat) dan tegak lurus serat (absis) dengan nilai rata-rata 0,0025.

Berikutnya adalah uji kuat tekan bambu sejajar serat yang dilakukan pada 9 sampel (3 sampel dari bagian atas (*A*) tengah (*T*), dan bawah (*B*) bambu). Tinggi sampel sama dengan 2 kali diameter luar bambu. Khusus untuk *satu* sampel bambu (*T*), *electric strain gauge* dipasang sejajar dan tegak lurus serat bambu untuk mengetahui regangan sejajar dan tegak lurus serat. Data elastisitas bambu sejajar serat ( $E_{bxy}$ ) diperoleh dari kemiringan linear grafik hubungan tegangan-regangan dengan nilai rata-rata adalah 77965,222 MPa. Sedangkan rasio *Poisson*  $\nu_{xy}$  diperoleh dari kemiringan regresi linear grafik hubungan regangan tegak lurus serat (ordinat) dan sejajar serat (absis) dengan nilai rata-rata 0,3255.

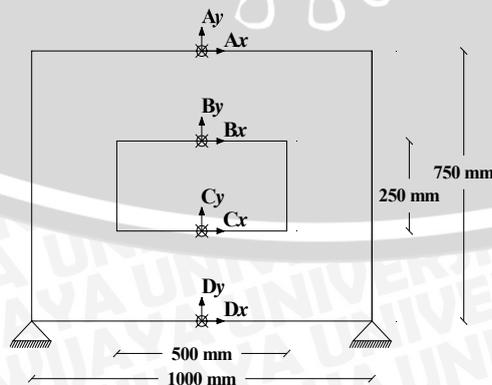
## BAB IV PEMBAHASAN

### 4.1. Uji Persyaratan Konvergensi pada Panel Dinding Gedek

Seperti telah dijelaskan sebelumnya uji konvergensi ini bertujuan untuk menyatakan kebenaran dari hasil analisis yang didasarkan pada metode elemen hingga. Kebenaran ini tampak jika jumlah elemen bertambah maka solusi yang dihasilkan akan mendekati nilai eksak. Sesuai dengan fokus skripsi maka variabel yang digunakan dalam uji konvergensi ini yaitu perpindahan sebagai ordinat dan jumlah elemen sebagai absisnya.

Diskretisasi panel dinding gedek ini menggunakan elemen segitiga regangan konstan. Asumsi yang diberikan adalah tidak adanya celah (*gap*) interelemen maupun perubahan mendadak bentuk elemen yang berpotensi membentuk kurva *B* maupun *C* (lihat Gambar 2.7.1). Kurva uji konvergensi yang terbentuk dapat berupa kurva *D* (monotonik dari bawah) atau kurva *E* (monotonik ke jawaban yang salah).

Uji konvergensi ini menggunakan sampel panel berukuran 1000mm x 750mm dengan lubang 500mm x 250mm yang ditempatkan tepat di tengah panel dinding. Penggunaan sampel dengan ukuran ini bertujuan untuk mempermudah pembagian elemen sehingga tidak ada sisa pembagian elemen (P1, P2, P3, T1, T2, dan T3). Beban yang diberikan pada sampel ini ditempatkan pada titik A sebesar 40000N ke bawah. Ukuran elemen yang digunakan dimulai dari 250mm dan dengan perubahan ukuran elemen tiap pembagian 250 dengan 1, 2, 3 dan seterusnya. Sedangkan untuk hasil analisis FEM, diteliti pada empat node yaitu A (panel sisi atas), B (lubang sisi atas), C (lubang sisi bawah), dan D (panel sisi bawah) seperti pada gambar 4.1.1.



Gambar 4.1.1. Lokasi titik A, B, C, dan D pada panel dinding gedek.



-----  
 BUKA FILE NODE.TXT PADA PROGRAM ANDA  
 UNTUK MENENTUKAN PENEMPATAN TUMPUAN DAN BEBAN  
 -----

GAMBAR PENEMPATAN NODE

```

16   17   18   19   20
11   12   13   14   15
6     7     8     9    10
1     2     3     4     5
  
```

Gambar 4.1.3. Gambar penempatan node untuk elemen 250mm x 250mm di file NODE.txt.

```

JUMLAH NODE YANG DIKEKANG           = 2
  NODE TERKEKANG KE- 1 = 1
  NODE TERKEKANG KE- 2 = 7
  
```

```

JUMLAH NODE YANG DIBERI BEBAN       = 1
  NODE TERBEBANI KE- 1 = 18
  
```

-----  
 MASUKKAN DATA-2 DI BAWAH INI DENGAN BIL.REAL  
 -----

```

  BEBAN ARAH X (N)   = 0.0000
  BEBAN ARAH Y (N)   = -40000.0000
  
```

```

PLEASE WAIT PROGRAM IS PROCESSING
***** PROGRAM SUKSES *****
*** LIHAT HASIL PERPINDAHAN DI FILE DISP.TXT ***
Pause - Please enter a blank line (to continue) or a DOS command.
  
```

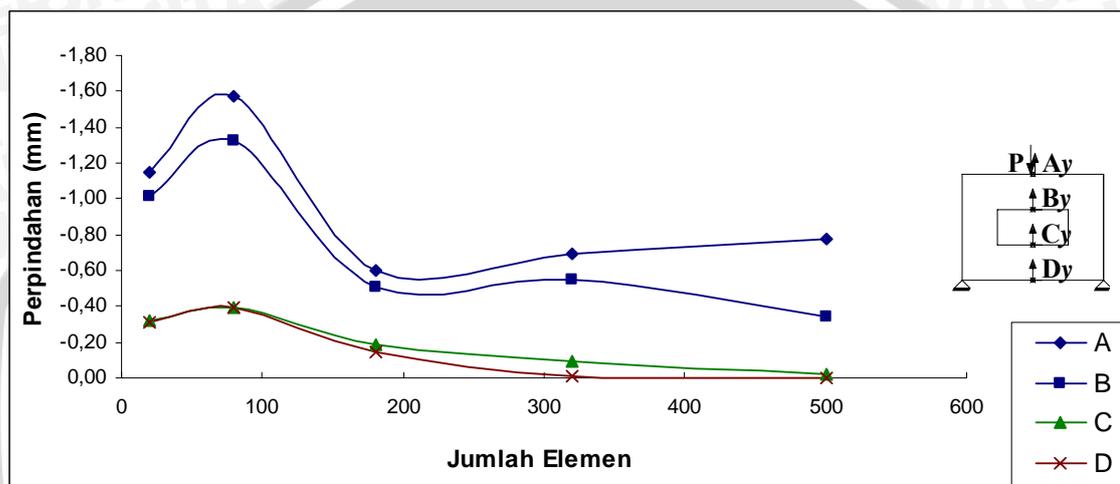
Gambar 4.1.4. Contoh data masukan program CST.EXE untuk uji konvergensi.

Tabel 4.1.1. Tabulasi perpindahan node A, B, C, dan D dengan analisis FEM.

Dimensi Elemen (mm)	$\Sigma$ elemen	Nomor Node				Perpindahan Sumbu - y			
		A	B	C	D	A	B	C	D
250	20	18	13	8	3	-1,15332	-1,01508	-0,31710	-0,31242
125	80	56	38	23	5	-1,57116	-1,32750	-0,38952	-0,39036
83,3334	180	114	75	46	7	-0,60504	-0,51084	-0,19092	-0,14580
62,5	320	192	124	77	9	-0,69456	-0,54414	-0,09144	-0,00960
50	500	290	185	116	11	-0,77832	-0,34104	-0,02190	-0,00222

Tabel 4.1.2. Selisih perpindahan terhadap perubahan dimensi elemen.

Dimensi Elemen (mm)		Selisih Perpindahan Sumbu – y (mm)			
I	II	A	B	C	D
125	250	0,417840	0,312420	0,072420	0,077940
83,3334	125	0,966120	0,816660	0,198600	0,244560
62,5	83,3334	0,089520	0,033300	0,099480	0,136200
50	62,5	0,083760	0,203100	0,069540	0,007380



Gambar 4.1.5. Grafik uji konvergensi program FEM.

Pada grafik di atas diketahui bahwa kurva konvergensi membentuk seperti gelombang yang memuncak kemudian perlahan-lahan menurun, menghasilkan nilai yang tak serasi (*incompatible*). Ini menandakan bahwa hasil program mengalami penurunan dari yang diharapkan. Keadaan seperti ini diperoleh dari proses penambahan jumlah elemen pada panel dalam setiap operasi program. Dengan semakin banyak elemen yang diproses dalam program FEM ini, maka *looping* atau perputaran program yang terjadi menjadi semakin banyak pula. Hal ini ternyata menyebabkan program berproses terlalu lama serta justru menghasilkan nilai yang memiliki tingkat pengurangan yang cukup besar. Oleh karena itu untuk menghindari keadaan ini diperlukan jumlah elemen yang optimal yaitu dengan menempatkan elemen isoparametrik pada daerah tertentu yang mempunyai aliran gaya relatif besar dan cukup dengan ukuran elemen yang optimal (lebih besar) pada daerah dengan konsentrasi gaya relatif kecil.

Tabel 4.1.2 menunjukkan bahwa dengan jangkauan ukuran elemen yang sama, tiap-tiap node akan mempunyai selisih perpindahan yang berbeda. Sebagai contoh adalah node A, selisih perpindahan pada jangkauan dimensi elemen 125mm dan 250mm adalah sama dengan 0,417840mm. Hasil ini berbeda untuk node D yaitu 0,077940mm. Tetapi untuk node D dan C menghasilkan selisih perpindahan yang relatif sama. Hal ini memberikan arti bahwa konsentrasi gaya pada node A lebih besar dari node-node lainnya sedangkan pada node D dan C relatif sama. Berdasarkan asumsi ini, menunjukkan kita untuk dapat menata ulang penempatan elemen yang lebih optimal dan menghasilkan solusi yang lebih eksak pada daerah dengan konsentrasi gaya besar.

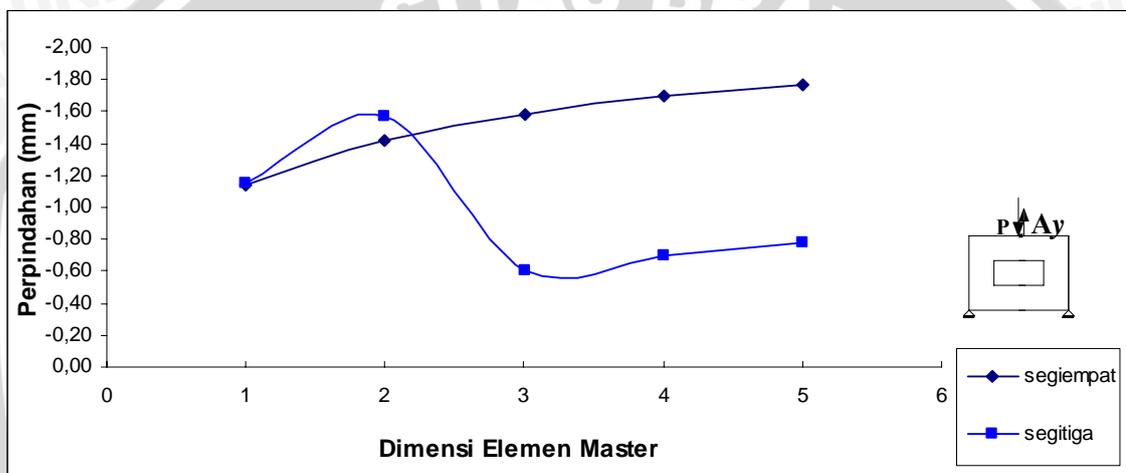
#### 4.2. Perbandingan Hasil Analisis FEM Segitiga dengan FEM Segiempat

Dipandang perlu untuk dilakukan perbandingan antara hasil analisis program FEM dengan elemen segitiga ini dengan analisis program FEM dengan elemen segiempat paling tidak untuk memberikan kesinambungan analisis dengan metode FEM dalam mendapatkan solusi. Adapun program FEM dengan elemen segiempat yang digunakan adalah program pendahulu untuk analisis dinding gedek berlubang yang disusun oleh *Fr. Dedy Mardiyani* dalam skripsinya dengan judul *Komputasi Dinding Berlubang Lapis Gedek menggunakan Elemen Hingga dengan Elemen Segiempat*.

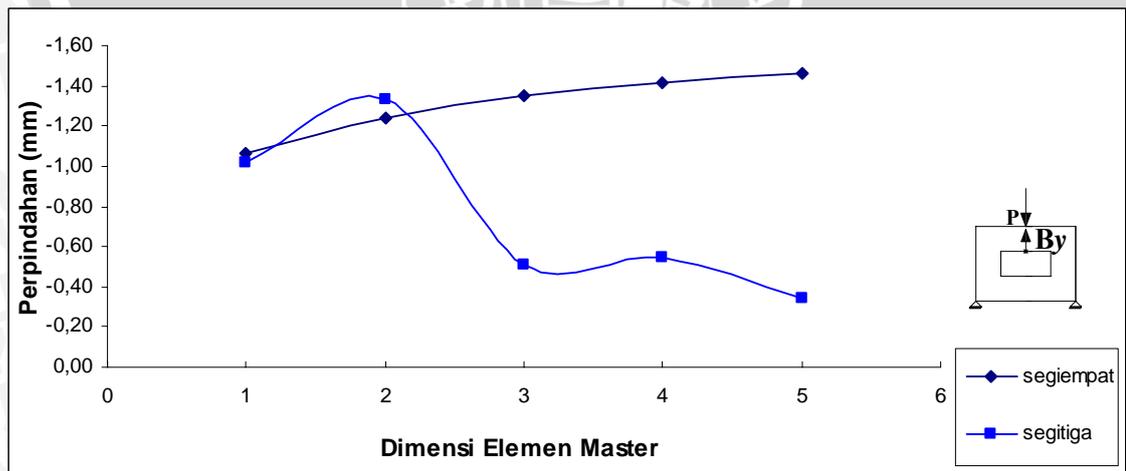
Adapun kondisi yang diberlakukan untuk uji analisis kedua program adalah sama dengan input untuk uji konvergensi yaitu menggunakan sampel panel berukuran 1000mm x 750mm dengan lubang 500mm x 250mm yang ditempatkan tepat di tengah panel dinding. Penggunaan sampel dengan ukuran ini bertujuan untuk mempermudah pembagian elemen sehingga tidak ada sisa pembagian elemen (P1, P2, P3, T1, T2, dan T3). Beban yang diberikan pada sampel ini ditempatkan pada titik A sebesar 40000N ke bawah. Ukuran elemen yang digunakan dimulai dari 250mm dan dengan perubahan ukuran elemen tiap pembagian 250 dengan 1, 2, 3 dan seterusnya. Sedangkan untuk hasil analisis FEM, diteliti pada empat node yaitu A (panel sisi atas), B (lubang sisi atas), C (lubang sisi bawah), dan D (panel sisi bawah) seperti pada gambar 4.1.1.

Tabel 4.2.1. Perbandingan analisis FEM Segitiga dan FEM Segiempat pada node A, B, C dan D.

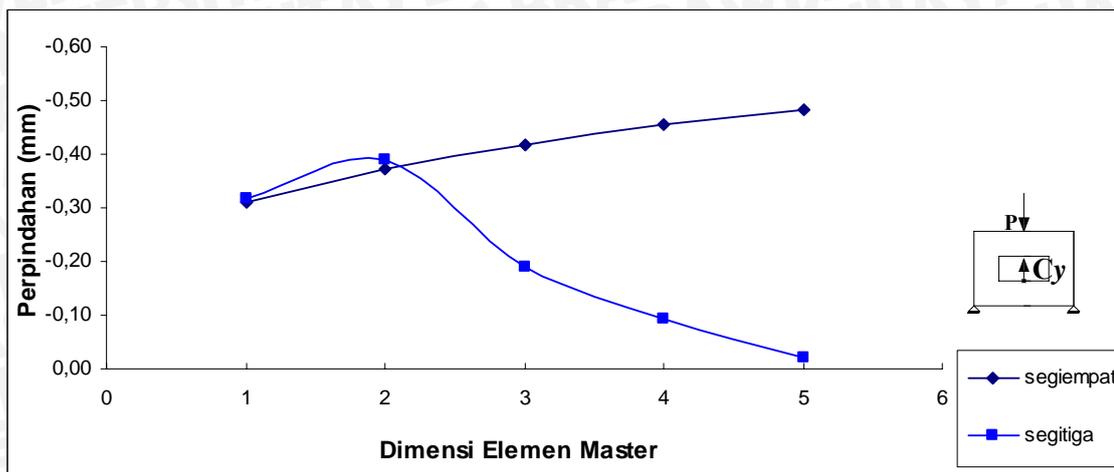
Dimensi Elemen (mm)	Perpindahan arah y							
	FEM SEGITIGA				FEM SEGIEMPAT			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1 = 250	-1,15332	-1,01508	-0,31710	-0,31242	-1,14043	-1,06628	-0,31116	-0,30161
2 = 125	-1,57116	-1,32750	-0,38952	-0,39036	-1,42069	-1,23762	-0,37158	-0,37010
3 = 83,334	-0,60504	-0,51084	-0,19092	-0,14580	-1,58601	-1,34993	-0,41891	-0,41897
4 = 62,5	-0,69456	-0,54414	-0,09144	-0,00960	-1,69274	-1,41609	-0,45490	-0,45521
5 = 50	-0,77832	-0,34104	-0,02190	-0,00222	-1,77018	-1,46309	-0,48346	-0,48397



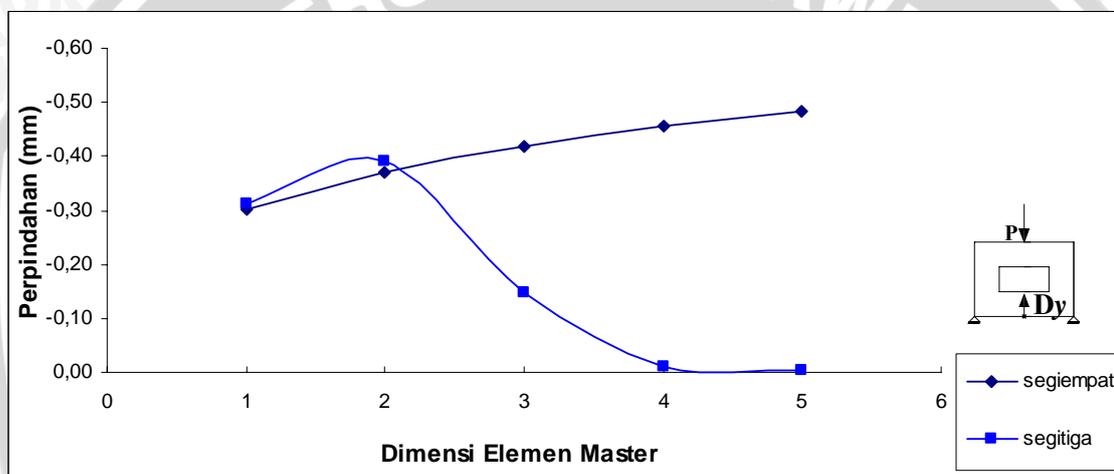
Gambar 4.2.1. Grafik perbandingan program FEM  $\Delta$  dan FEM  $\square$  pada node A.



Gambar 4.2.2. Grafik perbandingan program FEM  $\Delta$  dan FEM  $\square$  pada node B.



Gambar 4.2.3. Grafik perbandingan program FEM  $\Delta$  dan FEM  $\square$  pada node C.



Gambar 4.2.4. Grafik perbandingan program FEM  $\Delta$  dan FEM  $\square$  pada node D.

Tabel dan grafik yang disajikan diatas menunjukkan bahwa solusi perpindahan yang dihasilkan oleh kedua program FEM membentuk pola grafik yang hampir sama di tiap titik beban A, B, C maupun D. Awalnya memperlihatkan hasil yang saling mendekati yaitu pada dimensi elemen 250 dan 125 kemudian grafik FEM Segitiga semakin menjauh seiring bertambahnya dimensi elemen. Sehingga untuk analisis selanjutnya disarankan menggunakan dimensi elemen maksimum yang dapat dicapai.

#### 4.3. Perbandingan Hasil Analisis FEM dan *Software* Staad – Pro 2004 untuk Material Isotropis

Setelah diketahui bahwa program FEM tersebut dapat memberikan jawaban menuju nilai tertentu, maka langkah yang dilakukan selanjutnya untuk dapat menyatakan kebenaran adalah perbandingan hasil yang diperoleh dari *software* aplikasi sipil yaitu Staad-Pro 2004 terhadap program FEM. Tetapi kelemahan Staad-Pro 2004

yaitu tidak dapat menganalisis struktur komposit seperti struktur panel dinding lapis gedek ini. Oleh karena itu, dalam analisisnya keadaan ini hanya dikondisikan sebagai satu material spesi saja (*isotropis*). Asumsi ini menganggap bahwa kemampuan dinding gedek sebagai material komposit dalam menahan beban hanya dipikul oleh spesi. Hal ini terbukti dengan hancurnya lapisan spesi pada saat pengujian di laboratorium, sedangkan lapisan gedek tidak mengalami retak sama sekali. Ini dapat diartikan bahwa material spesi berperan dalam hal kekakuan, sedangkan material gedek berfungsi untuk menambah kekuatan pada struktur panel dinding.

Sampel yang digunakan pada analisis FEM dan Staad-Pro ini sama seperti pada uji konvergensi yaitu berukuran 1000mm x 750mm dengan lubang 500mm x 250mm. Ukuran elemen yang ditempatkan mulai dari 250mm dan dengan perubahan ukuran elemen tiap pembagian 250 dengan 1, 2, 3 dan seterusnya. Pada panel ditempatkan beban di titik A sebesar 40000N ke bawah. Node yang ditinjau perpindahannya sebagai perbandingan kedua program ini adalah node A, B, C, dan D seperti pada gambar 4.1.1.

Contoh masukan program FEM pada gambar 4.2.1 yang ada di bawah ini menunjukkan *inputing* program CSTSTD.exe (diedit seperlunya). Dengan memasukkan nilai tebal gedek sama dengan nol, maka didapat sebuah material yang bersifat *isotropis*. Untuk *output* perbandingan Staad-Pro ditunjukkan pada tabel 4.2.1 dan 4.2.2 yang juga disertakan *output* dari program FEM beserta persentase kesalahannya .

```
>> DATA GEOMETRI
-----
PANJANG PANEL (mm)           = 1000.0
LEBAR PANEL (mm)             = 750.0
PANJANG LUBANG (mm)          = 500.0
LEBAR LUBANG (mm)            = 250.0
JARAK KIRI PANEL KE KIRI LUBANG (mm) = 250.0
JARAK BAWAH PANEL KE BAWAH LUBANG (mm) = 250.0
TEBAL SPESI (mm)             = 37.0

>>DATA DIMENSI ELEMEN HINGGA
-----
KETERANGAN :
  1) PANJANG DIMENSI ELEMEN HINGGA MAKS = 250.0 mm
  2) TINGGI DIMENSI ELEMEN HINGGA MAKS  = 250.0 mm
.....
PANJANG ELEMEN HINGGA (mm)      = 250.0
TINGGI ELEMEN HINGGA (mm)      = 250.0

>> DATA MATERIAL
-----
MOD.ELASTIS SPESI (MPa)        = 2263.2157
RASIO POISSON SPESI            = 0.2
```

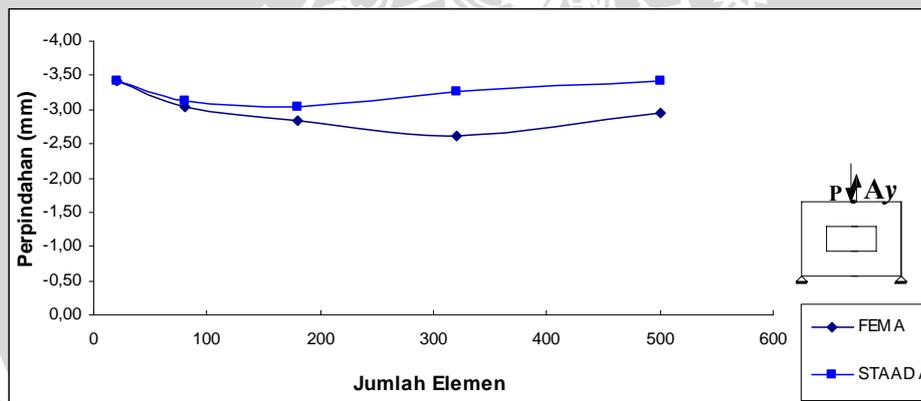
Gambar 4.3.1. Contoh data masukan CSTSTD.EXE sebagai material *isotropis*.

Tabel 4.3.1. Perbandingan analisis FEM dan Staad-Pro pada node A dan B.

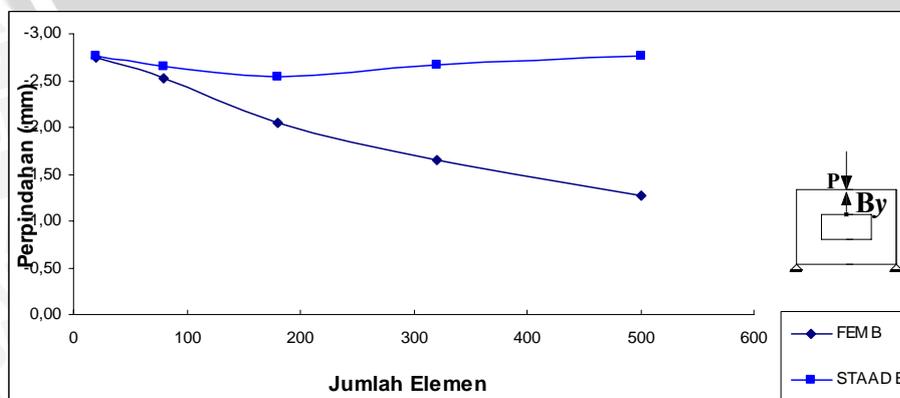
Dimensi Elemen (mm)	$\Sigma$ elemen	Perpindahan arah y					
		FEM		Staad-Pro		Persen error (%)	
		A	B	A	B	A	B
250	20	-3,41563	-2,74531	-3,414	-2,755	0,048	0,352
125	80	-3,04163	-2,51912	-3,135	-2,654	2,978	5,082
83,3334	180	-2,84213	-2,05345	-3,043	-2,540	6,601	19,156
62,5	320	-2,60968	-1,65605	-3,255	-2,664	19,825	37,836
50	500	-2,95563	-1,26524	-3,414	-2,755	13,426	54,075

Tabel 4.3.2. Perbandingan analisis FEM dan Staad-Pro pada node C dan D.

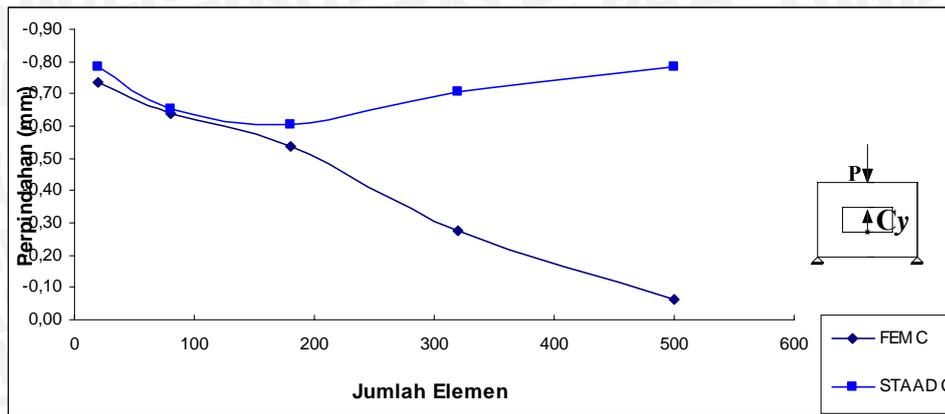
Dimensi Elemen (mm)	$\Sigma$ elemen	Perpindahan arah y					
		FEM		Staad-Pro		Persen error (%)	
		C	D	C	D	C	D
250	20	-0,73420	-0,71216	-0,784	-0,786	6,352	9,394
125	80	-0,63640	-0,61816	-0,651	-0,645	2,243	4,161
83,3334	180	-0,53610	-0,36787	-0,606	-0,607	11,535	39,395
62,5	320	-0,27340	-0,02821	-0,708	-0,709	61,384	96,021
50	500	-0,06310	-0,00822	-0,784	-0,786	91,952	98,954



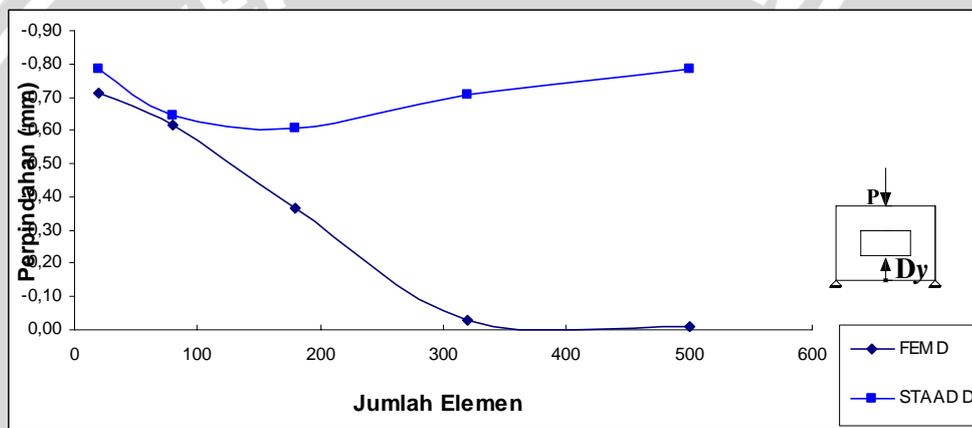
Gambar 4.3.2. Grafik perbandingan program FEM dan Staad pada node A.



Gambar 4.3.3. Grafik perbandingan program FEM dan Staad pada node B.



Gambar 4.3.4. Grafik perbandingan program FEM dan Staad pada node C.



Gambar 4.3.5. Grafik perbandingan program FEM dan Staad pada node D.

Tabel dan grafik yang disajikan diatas menunjukkan bahwa solusi perpindahan yang dihasilkan program FEM awalnya mendekati hasil yang diperoleh dari Staad-Pro tapi kemudian berangsur menjauh seiring dengan diperbanyaknya elemen. Hal ini tampak pada setiap ukuran elemen. Sebagai contoh yaitu dimensi elemen 250mm yang memberikan persentase perbedaan berkisar 0,04% untuk node A dan 0.35% untuk node B dan 6% untuk node C dan 9%D. dimana persentase *error* tersebut dianggap masih dapat diterima. Akan tetapi persentase tersebut bertambah besar dengan semakin banyaknya elemen. Perbedaan tersebut memungkinkan bahwa Staad-Pro telah menggunakan pemodelan elemen yang lebih bagus dari pada program FEM, seperti halnya elemen isoparametrik yang telah menempatkan persamaan berderajat tinggi di dalamnya. Solusi perpindahan yang dihasilkan oleh Staad-Pro ini dianggap lebih ‘eksak’ daripada program FEM, walaupun solusi yang dihasilkan Staad-Pro bukan

solusi eksak. Pernyataan diatas memberikan jawaban bahwa program FEM adalah program analisis yang menuju ke jawaban yang tertentu dan dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya. Demikian halnya analisis program CST, memberikan jawaban tertentu dan dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya dalam batasan penggunaan besar elemen yang mendekati nilai maksimum dari yang disarankan. Ini bisa diakibatkan oleh pemotongan pembulatan sehingga penggunaan elemen yang semakin jauh dari nilai maksimum akan memberikan hasil yang kurang mendekati nilai kebenaran yang diharapkan.

#### 4.4. Perbandingan Analisis FEM (Elemen Segitiga dengan Elemen Segiempat) dengan Hasil Eksperimen di Laboratorium

Membandingkan hasil analisis teoritis dengan hasil eksperimen bukanlah hal yang mudah. Hal ini dikarenakan analisis teoritis mengambil kondisi-kondisi ideal dalam mencari solusi permasalahan, sedangkan dalam eksperimen terdapat berbagai macam kesalahan yang mungkin dapat terjadi.

Subbab ini memberikan perbandingan antara hasil analisis FEM dan eksperimen di laboratorium yang disajikan dalam bentuk grafik antara beban dan lendutan. Analisis FEM sendiri menyertakan dua metode analisa yaitu FEM dengan elemen segitiga dan FEM dengan elemen segi empat. Adapun analisa FEM dengan elemen segi empat diambil dari program FEM segi empat dalam skripsi *Komputasi Dinding Lapis Gedek dengan Metode Elemen Hingga Elemen Segi Empat oleh Fr. Dedy Mardiyanto, Teknik Sipil Universitas Brawijaya – 2006*.

Sampel panel menggunakan ukuran 800mm x 500mm dengan lubang 400mm x 200mm. Dimensi elemen digunakan ukuran maksimum 200mm x 150mm dengan pertimbangan keterbatasan *processor* dan memori komputer dan waktu terpakai oleh program yang tergantung pada jumlah elemen yang terbentuk serta menghindari terjadinya proses pemotongan pembulatan. Untuk data sampel penelitian di laboratorium diambil dari hasil pembacaan dial gauge bagian tengah dan bawah pada titik B dan D.

>> DATA GEOMETRI

PANJANG PANEL (mm)	= 800.0
LEBAR PANEL (mm)	= 500.0
PANJANG LUBANG (mm)	= 400.0
LEBAR LUBANG (mm)	= 200.0
JARAK KIRI PANEL KE KIRI LUBANG (mm)	= 200.0
JARAK BAWAH PANEL KE BAWAH LUBANG (mm)	= 150.0
TEBAL SPESI (mm)	= 37.0
TEBAL GEDEK (mm)	= 3.0

## DATA DIMENSI ELEMEN HINGGA

## KETERANGAN :

- 1) PANJANG DIMENSI ELEMEN HINGGA MAKS = 200.000 mm  
 2) TINGGI DIMENSI ELEMEN HINGGA MAKS = 150.000 mm

PANJANG ELEMEN HINGGA (mm) = 200.0  
 TINGGI ELEMEN HINGGA (mm) = 150.0

## &gt;&gt; DATA MATERIAL

MOD.ELASTIS SPESI (MPa) = 2263.2157  
 MOD.ELASTIS BAMBUN SEJAJAR SERAT (MPa) = 77965.222  
 MOD.ELASTIS BAMBUN TEGANG LURUS SERAT (MPa) = 197.59  
 RASIO POISSON SPESI = 0.2  
 RASIO POISSON BAMBUN VXY = 0.3255  
 RASIO POISSON BAMBUN VYZ = 0.0025

BUKA FILE NODE.TXT PADA PROGRAM ANDA  
 UNTUK MENENTUKAN PENEMPATAN TUMPUAN DAN BEBAN

JUMLAH NODE YANG DIKEKANG = 2  
 NODE TERKEKANG KE- 1 = 1  
 NODE TERKEKANG KE- 2 = 5

JUMLAH NODE YANG DIBERI BEBAN = 1  
 NODE TERBEKANG KE- 1 = 22

MASUKKAN DATA-2 DI BAWAH INI DENGAN BIL.REAL

BEBAN ARAH X (N) = 0.0  
 BEBAN ARAH Y (N) = -538.8156

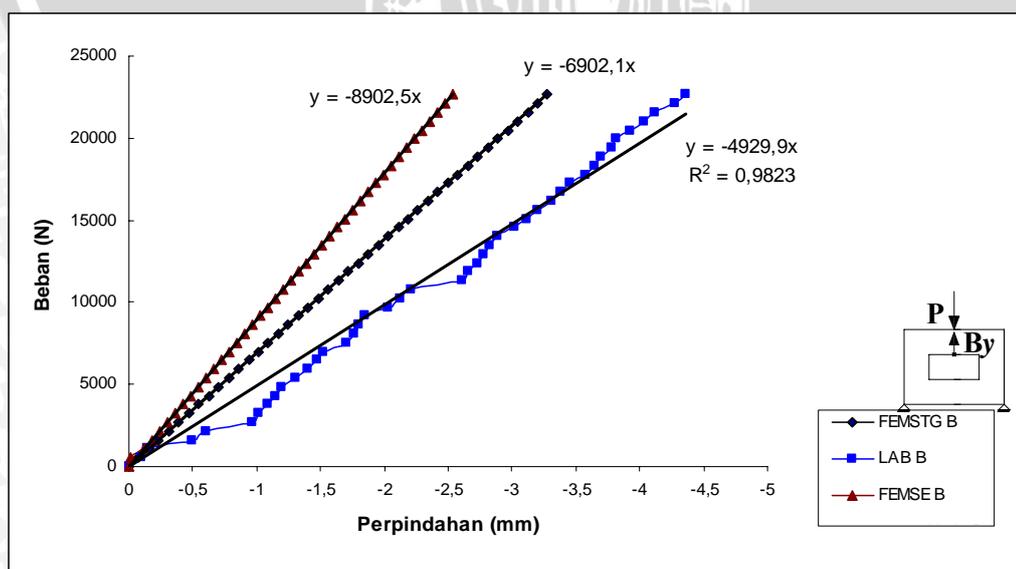
PLEASE WAIT PROGRAM IS PROCESSING  
 \*\*\*\*\* PROGRAM SUKSES \*\*\*\*\*  
 \*\*\* LIHAT HASIL PERPINDAHAN DI FILE DISP.TXT \*\*\*  
 Pause - Please enter a blank line (to continue) or a DOS command.

Gambar 4.4.1. Contoh data masukan program FEM dengan *input* beban beragam.

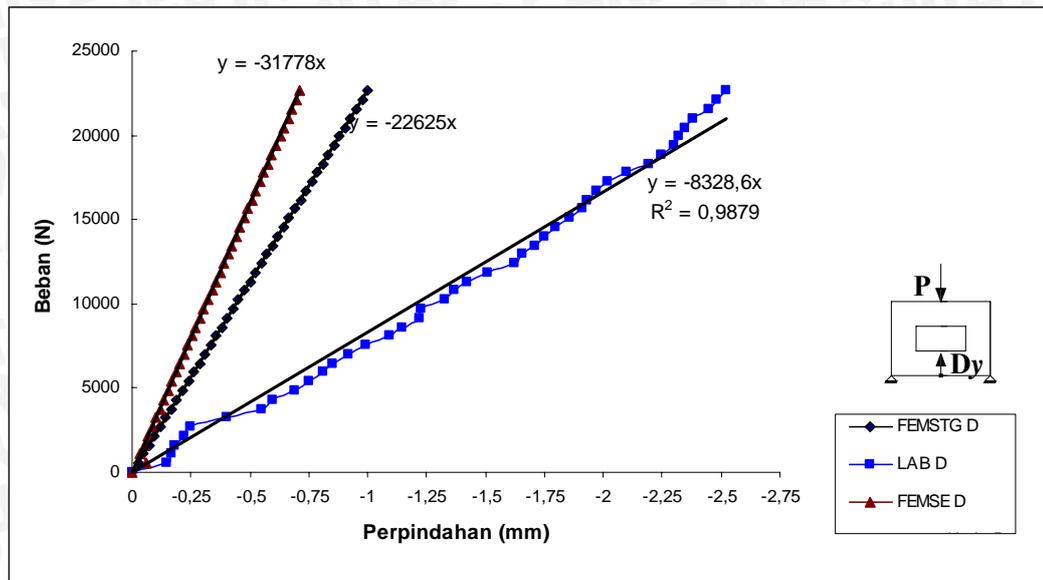
Tabel 4.4.2. Perbandingan lendutan hasil eksperimen dan analisis FEM  
 ( Elemen Segitiga dan Elemen Segi empat )

Beban (N)	Perpindahan (mm)					
	FEM SEGITIGA		FEM SEGI EMPAT		Lab.	
	D	B	D	B	D	B
0	0	0			0	0
538,8156	-0,023815	-0,078065	-0,060525	-0,016950	-0,15	-0,1
1077,6312	-0,047630	-0,156130	-0,033899	-0,121050	-0,17	-0,14
1616,4468	-0,071445	-0,234195	-0,050849	-0,181575	-0,18	-0,5
2155,2624	-0,095259	-0,312260	-0,067799	-0,242100	-0,22	-0,6
2694,078	-0,119074	-0,390325	-0,084748	-0,302624	-0,25	-0,97
3232,8936	-0,142889	-0,468390	-0,101698	-0,363149	-0,4	-1,02
3771,7092	-0,166704	-0,546455	-0,118648	-0,423674	-0,55	-1,09
4310,5248	-0,190519	-0,624520	-0,135598	-0,484199	-0,6	-1,15
4849,3404	-0,214333	-0,702585	-0,152547	-0,544724	-0,69	-1,2
5388,156	-0,238148	-0,780650	-0,169497	-0,605249	-0,75	-1,3
5926,9716	-0,261963	-0,858715	-0,186447	-0,665774	-0,81	-1,4
6465,7872	-0,285778	-0,936780	-0,203396	-0,726299	-0,85	-1,47

Beban (N)	Perpindahan (mm)					
	FEM SEGITIGA		FEM SEGI EMPAT		Lab	
	D	B	D	B	D	B
7004,6028	-0,309593	-1,014850	-0,220346	-0,786824	-0,92	-1,52
7543,4184	-0,333408	-1,092910	-0,237296	-0,847349	-0,99	-1,7
8082,234	-0,357222	-1,170975	-0,254245	-0,907873	-1,09	-1,76
8621,0496	-0,381037	-1,249041	-0,271195	-0,968398	-1,15	-1,8
9159,8651	-0,404852	-1,327106	-0,288145	-1,028923	-1,22	-1,85
9698,6807	-0,428667	-1,405171	-0,305094	-1,089448	-1,23	-2,03
10237,496	-0,452482	-1,483235	-0,322044	-1,149973	-1,33	-2,13
10776,312	-0,476429	-1,561735	-0,338994	-1,210498	-1,37	-2,21
11315,128	-0,500111	-1,639366	-0,355944	-1,271023	-1,42	-2,61
11853,943	-0,523926	-1,717431	-0,372893	-1,331547	-1,51	-2,66
12392,759	-0,547741	-1,795496	-0,389843	-1,392073	-1,62	-2,73
12931,574	-0,571556	-1,873561	-0,406793	-1,452597	-1,66	-2,78
13470,39	-0,595371	-1,951626	-0,423742	-1,513122	-1,71	-2,83
14009,206	-0,619186	-2,029691	-0,440692	-1,573647	-1,75	-2,89
14548,021	-0,643001	-2,107756	-0,457642	-1,634172	-1,8	-3,02
15086,837	-0,666815	-2,185821	-0,474591	-1,694697	-1,86	-3,12
15625,652	-0,690630	-2,263886	-0,491541	-1,755222	-1,91	-3,2
16164,468	-0,714445	-2,341951	-0,508491	-1,815747	-1,93	-3,31
16703,284	-0,738260	-2,420016	-0,525441	-1,876272	-1,97	-3,38
17242,099	-0,762075	-2,498081	-0,542391	-1,936797	-2,02	-3,46
17780,915	-0,785890	-2,576146	-0,55934	-1,997321	-2,1	-3,57
18319,73	-0,809704	-2,654211	-0,576289	-2,057846	-2,19	-3,65
18858,546	-0,833519	-2,732276	-0,593239	-2,118371	-2,25	-3,7
19397,362	-0,857334	-2,810341	-0,610189	-2,178896	-2,3	-3,78
19936,177	-0,881149	-2,888406	-0,627139	-2,23942	-2,32	-3,82
20474,993	-0,904964	-2,966471	-0,644089	-2,299946	-2,35	-3,92
21013,808	-0,928788	-3,044536	-0,661038	-2,360471	-2,38	-4,03
21552,624	-0,952593	-3,122601	-0,677988	-2,420996	-2,45	-4,12
22091,44	-0,976408	-3,200666	-0,694937	-2,48152	-2,48	-4,27
22630,255	-1,000223	-3,278731	-0,711887	-2,542045	-2,52	-4,36



Gambar 4.4.2. Perbandingan grafik hubungan beban dan lendutan untuk eksperimen, FEM segitiga dan FEM segi empat pada node B.



Gambar 4.4.3. Perbandingan grafik hubungan beban dan lendutan untuk eksperimen, FEM segitiga dan FEM segi empat pada node D.

Kedua grafik pada node B dan D di atas menunjukkan bahwa hasil regresi perpindahan dari analisis FEM segitiga dan FEM segi empat memberikan perbedaan nilai yang tidak begitu besar. Hal ini dikarenakan analisis FEM lebih mengandalkan kemampuan komputer. Sedangkan adanya perbedaan dari kedua analisis FEM ini diakibatkan disamping jumlah dan bentuk elemen yang tidak sama juga disebabkan oleh perbedaan dasar pemodelan matematis dalam pembentukan matriks kekakuan elemen dimana FEM segitiga menggunakan sistem koordinat sedangkan FEM segi empat menggunakan panjang dan lebar tiap elemen. Sehingga meskipun keduanya mengandalkan kemampuan komputer dan memakai penyelesaian persamaan yang sama yaitu dengan *eliminasi gauss* tetap akan memunculkan peluang perbedaan hasil dikarenakan perbedaan jumlah dan nilai matriks.

Berbeda halnya hasil regresi perpindahan dari analisis FEM dan uji laboratorium memberikan perbedaan nilai yang relatif jauh, terlebih pada node B. Kedua hal ini, analisis FEM dan penelitian uji laboratorium memang sulit untuk dibandingkan karena kedua-duanya mempunyai kelebihan dan kekurangan dalam mendapatkan solusi permasalahan. Penelitian di laboratorium dianggap sangat tepat untuk menyatakan hasil yang sebenarnya, tetapi dalam pelaksanaannya selalu ada unsur lain di luar kemampuan manusia yang berpengaruh terhadap hasil penelitian tersebut. Sedangkan analisis yang menggunakan FEM, solusi dapat dihasilkan dengan cepat dan perlu digarisbawahi

bahwa hasil yang diperoleh terbatas pada asumsi pemodelan yang digunakan. Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil dari kedua hal tersebut yang tidak terlalu signifikan perbedaannya, maka kita harus mengetahui unsur-unsur apa saja yang mempengaruhi sehingga dengan demikian kita akan mendapatkan garis tengah solusi penyelesaiannya.

Hasil analisis FEM ini didasarkan pada asumsi pemodelan yang telah ditunjukkan pada bab sebelumnya dalam skripsi ini. Jika ingin mendapatkan hasil yang lebih mendekati kondisi nyata, maka pemodelan seperti yang terjadi di lapangan harus ditambahkan ke dalam program tersebut. Dengan demikian bila memperhatikan model yang diterapkan kedalam program FEM ini, asumsi yang harus ditambahkan untuk mendapatkan pemodelan seperti kondisi nyata antara lain :

1. Memodelkan kedua material tersebut sebagai bahan yang komposit sesuai jarak penempatan *shear connector*,
2. Mengkondisikan struktur dalam keadaan elastis linier dan non-linier dengan memberikan nilai kekakuan sampai batas tertentu berdasarkan tegangan ijin yang terjadi,
3. Mengkonversikan lebar anyaman, tebal, dan jarak spasi antar anyaman menjadi suatu luasan penuh dengan tebal tertentu.

Begitu pula dengan eksperimen yang ada di laboratorium, hasil yang didapat belum menyatakan kondisi sempurna di lapangan seperti yang dibayangkan. Ada banyak kejadian yang tidak diharapkan terjadi pada eksperimen baik peristiwa alami maupun kesalahan manusia. Keadaan ini sangat berpengaruh terhadap hasil yang diperoleh, antara lain :

1. Penempatan beban terpusat yang tidak tepat / eksentris,
2. Penempatan *dial gauge* yang kurang akurat,
3. Kondisi tumpuan yang terjadi apakah berupa sendi atau rol,
4. Fenomena terangkatnya panel akibat beban terpusat, sehingga panel terpaksa dibebani dengan benda berat yang berpengaruh terhadap besarnya perpindahan,
5. Fenomena hancurnya ujung panel yang ditumpu karena penempatan tumpuan yang terlalu ujung,
6. Kurang teliti ataupun kesalahan dalam membaca skala *proving ring*, *dial gauge*, dan *strain meter* maupun kesalahan pencatatan.

## BAB V PENUTUP

### 5.1. Kesimpulan

Komputasi dinding lapis gedek berlubang merupakan hal yang menarik terutama dalam pemodelan jaringan dari pembagian ke dalam elemen-elemen hingga, pengurutan penomeran sampai ke pembentukan matrik kekauan.

Program FEM dengan elemen hingga segitiga yang digunakan dalam analisis skripsi ini memberikan hasil berupa perpindahan. Kemudian keakuratan output perpindahan diuji dengan uji konvergensi. Dari hasil konvergensi didapat kurva yang tak serasi (*incompatible*). Ini terlihat saat dilakukan variasi dimensi elemen hingga dimana semakin diperkecilnya dimensi (jumlah elemen semakin banyak) besar perpindahan yang dihasilkan semakin menurun menuju angka 0 terutama pada node-node ujung. Tetapi program FEM ini tetap bisa digunakan tentunya dengan beberapa batasan yang disarankan yaitu menggunakan dimensi elemen hingga maksimum.

Pada bagian akhir pembahasan dilakukan perbandingan analisa dari program FEM dengan elemen hingga segitiga dengan 3 pembanding yaitu : 1). Program FEM dengan elemen segiempat, sebagai program pendahulu untuk analisa dinding lapis gedek berlubang; 2). Software StaadPro 2004; 3). Data uji laboratorium.

Jika dibandingkan dengan program yang telah ada seperti halnya Staad-Pro maka solusi penyelesaian pada program FEM ini bisa diterima. Dari hasil perbandingan dua program tersebut didapat perbedaan berkisar 0,5 – 10 % dengan menggunakan elemen yang besar atau maksimum, tetapi perbedaan ini tidak terlalu berarti untuk dipertimbangkan. Adapun dari program FEM dengan elemen hingga pada skripsi ini yang dapat diunggulkan adalah kemampuannya mengakomodasi sifat-sifat material *ortotropis* yang diwakili oleh gedek serta kemampuannya dalam otomatisasi pembagian dan penempatan elemen. Sehingga dalam penggunaannya akan lebih cepat dan efisien dibandingkan *software* yang ada saat ini termasuk Staad Pro.

Dari hasil analisis terhadap dinding komposit ini dapat diketahui respon perpindahan yang terjadi setelah dibandingkan dengan hasil analisis dinding spesi tanpa tambahan lapisan gedek. Kesimpulan menyatakan bahwa penambahan lapisan gedek pada struktur dinding tersebut, memberikan peran yang cukup berarti dalam mengurangi besarnya perpindahan yang terjadi akibat beban yang diterima dinding. Pernyataan ini diperkuat dengan hasil analisis FEM yang menyatakan untuk dinding dengan lapisan

spesi saja, perpindahan di titik A (sisi atas panel) adalah 3,41563mm, dan jika panel ditambahkan tiga lapisan gedek, perpindahannya berkurang sampai 1,15332mm.

## 5.2. Saran

Saran yang diberikan pada skripsi ini terfokus pada perbaikan dan pengembangan program FEM yang telah ada, sehingga perilaku panel dinding gedek berlubang dapat didekati oleh program ini. Hal ini akan dirasa perlu bagi penyusun skripsi yang akan membahas metode elemen hingga untuk semakin mengembangkan teori yang ada menjadi program yang dapat digunakan dalam berbagai keadaan. Adapun perbaikan terhadap pemrograman elemen hingga elemen segitiga yang disarankan adalah :

1. Penyempurnaan jaringan elemen sehingga dapat memperkecil kesalahan-kesalahan proses seperti looping dan pemotongan pembulatan,
2. Mengatur besarnya elemen yang digunakan berdasarkan konsentrasi aliran gaya terbesar, sehingga dalam *source* program FEM perlu ditambahkan pemodelan elemen isoparametrik agar *running* program berjalan lebih singkat karena jumlah elemen yang terproses lebih sedikit,
3. Menggunakan metode penyelesaian persamaan linier yang lebih efektif untuk menghindari pemotongan pembulatan karena terlalu banyak nilai nol dalam matriks global yang dibentuk dari algoritma elemen hingga elemen segitiga ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2000. *Panduan Penulisan Skripsi*. Malang: UPT Penerbitan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Bhirud, L.L. 1975. *Matriks Operations On The Computer*. New Delhi: Mohan Pramlani dan Oxford & IBH Publishing Co.
- Cook, Robert.D. 1998. *Konsep dan Aplikasi Metode Elemen Hingga*. Bandung: PT Refika Aditama.
- Desai, Chandrakant S. 1996. *Dasar-Dasar Metode Elemen Hingga*. Jakarta: Erlangga.
- Dewi, Sri Murni. 2003. "Analisis dan Komputasi Dinding Lapis Gedek". *Makalah Seminar*. Tidak Diterbitkan. Malang: Jurusan Sipil FT Unibraw, 2003.
- Dewi, Sri Murni. 2004. "Struktur Komposit Spesi dan Anyaman Serat Bambu". *Proposal Penelitian untuk Disertasi Program Pasca Sarjana Institut Teknologi Sepuluh November*. Tidak Diterbitkan. Malang: Jurusan Sipil FT Unibraw, 2004.
- Mardyan, Fr. Dedy. 2005. "Komputasi Dinding Berlubang Lapis Gedek menggunakan Elemen Hingga dengan Elemen Segiempat". *Skripsi* Tidak Diterbitkan. Malang: Jurusan Sipil FT Unibraw, 2005.
- Hammod, Robert H., William B. Rogers, dan John B. Crittenden. 1990. *Pengantar Fortran 77 dan Komputer Pribadi*. Jakarta: Erlangga.
- Janssen, Julius Joseph Antonius. 1981. "Bamboo in Building Structures". *Tesis Doktor Technical Sciences*. Tidak Diterbitkan. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
- Jogiyanto, H.M. 1995. *Teori dan Aplikasi Program Komputer Bahasa Fortran*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Jr, William Weaver dan Johnston, Paul.R. 1993. *Elemen Hingga untuk Analisis Struktur*. PT. Eresco: Bandung.
- Logan, Daryl L. 1996. *A First Course in the Finite Element Method*. Boston: PWS-Kent Publishing Company.
- Soengeng, R. 1993. *Komputasi Numerik dengan Turbo Pascal*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Yulianto, Robert. 2004. "Analisis Dinding Komposit Spesi dan Anyaman Serat Bambu dengan Metode Elemen Hingga". *Skripsi* Tidak Diterbitkan. Malang: Jurusan Sipil FT Unibraw, 2004.