

PENGEMBANGAN PROGRAM ANALISIS STRUKTUR BERBASIS INTERNET UNTUK PEMBELAJARAN DAN PENELITIAN METODE ELEMEN HINGGA

Welly Pontjoharyo¹, Danny Wijaya², Wong Foek Tjong³, Liliana⁴

ABSTRAK : Seiring dengan perkembangan zaman, internet telah menjadi sarana yang tidak dapat dipisahkan dalam kehidupan sehari-hari, termasuk dalam bidang edukasi. Dewasa ini, telah terdapat beberapa *website* perhitungan analisis struktur yang tersedia. Termasuk Universitas Kristen Petra yang sedang mengembangkan *website* serupa dalam rangka mempermudah pemahaman metode elemen hingga. Pemilihan analisis bidang dilakukan karena metode ini telah banyak diterapkan untuk mendesain bangunan, mesin, dan sebagainya serta menjadi bahan pengajaran dalam metode elemen hingga. Elemen yang digunakan adalah elemen CST dan Q4 karena dianggap paling sederhana dan mudah dipahami. Algoritma perhitungan akan diimplementasikan ke dalam bahasa pemrograman HTML, PHP, JavaScript, dan jQuery. Dari hasil program, diketahui bahwa secara umum program sudah dapat membantu perhitungan analisis bidang, termasuk pada material isotropik maupun orthotropik. Selain itu, telah dilakukan verifikasi dengan memperhitungkan pegas dan tumpuan miring.

KATA KUNCI: analisis bidang, aplikasi *web*, JavaScript, metode kekakuan langsung, PHP.

1. PENDAHULUAN

Metode elemen hingga kini telah menjadi metode praktis yang digunakan dalam 50 tahun terakhir untuk mendesain bangunan, mesin, dan sebagainya (Cook et al., 2002). Salah satu bentuk masalah yang dipelajari dalam metode elemen hingga adalah analisis tegangan pada bidang dalam kondisi *plane stress* dan *plane strain*. Elemen paling sederhana yang digunakan dalam menyelesaikan analisis bidang adalah *Constant-Strain Triangular (CST) element* dan *isoparametric quadrilateral (Q4) element*.

Dewasa ini, telah terdapat beberapa *website* perhitungan analisis struktur yang tersedia. Termasuk Universitas Kristen Petra yang sedang mengembangkan *website* serupa dalam rangka mempermudah pemahaman metode elemen hingga. Dengan adanya penambahan materi pembelajaran analisis tegangan bidang *plane stress* dan *plane strain*, diharapkan *website* ini dapat membantu mahasiswa teknik sipil memperdalam pembelajaran metode elemen hingga. *Website* ini juga diharapkan dapat menjadi acuan pada media *e-learning* dalam mata kuliah Metode Elemen Hingga, serta menjadi dasar untuk pengembangan program elemen hingga berbasis *website* selanjutnya.

2. LANDASAN TEORI

Metode kekakuan langsung merupakan implementasi dari metode elemen hingga, di mana dalam perhitungannya menggunakan aplikasi matriks yang didasarkan pada konsep kekakuan dan

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21410016@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21410036@john.petra.ac.id

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, wftjong@petra.ac.id

⁴ Dosen Program Studi Teknik Informatika Universitas Kristen Petra, lilian@petra.ac.id

perpindahan (Logan, 2007). Pada metode kekakuan langsung, terdapat hubungan antara gaya dan perpindahan pada suatu struktur dalam koordinat global (xyz) melalui matriks kekakuan $[K]$. Apabila terdapat tumpuan miring, perlu diberikan tambahan matriks transformasi $[T]$. Adanya tambahan pegas juga dapat menambah kekakuan elemen pada suatu *node* sesuai arah pegas.

Jenis material yang digunakan adalah material isotropik atau orthotropik dengan analisis bidang *plane stress* atau *plane strain*, yang memiliki perhitungan matriks tegangan/regangan $[D]$ yang berbeda satu sama lain (Carroll, 1999). Perhitungan matriks kekakuan $[K]$ pada elemen CST berbeda dengan elemen Q4. Pada elemen Q4, diperlukan perhitungan pada sejumlah titik Gauss untuk menggunakan metode integrasi kuadrat Gauss.

Penyelesaian matriks dilakukan dengan metode matriks partisi dan eliminasi Gauss. Algoritma perhitungan akan diimplementasikan ke dalam bahasa pemrograman HTML, PHP, JavaScript, dan jQuery.

3. METODE PENELITIAN

Secara garis besar alur program yang dibuat untuk melakukan analisis *plane stress* dan *plane strain* menggunakan metode kekakuan langsung meliputi proses masukan (*input*), proses perhitungan, serta proses penyajian hasil perhitungan (*output*) dalam bentuk matriks dan diagram.

Input yang digunakan untuk menjalankan program ini membutuhkan kemampuan *user* untuk mengidentifikasi letak dan jumlah *nodal* sesuai pembebanan dan aturan yang berlaku. *Input* tersebut bersifat numerik yang meliputi:

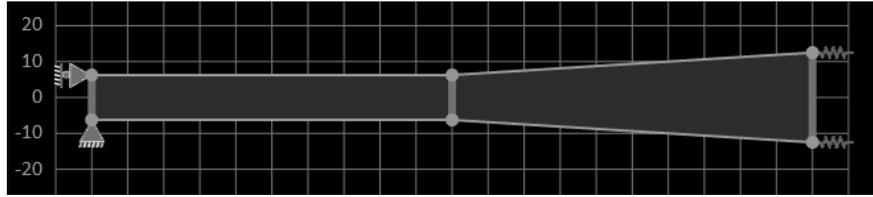
1. *Number of Node*
2. *Nodal Coordinates*
3. *Number of Gaussian Numerical Integration (Q4 only)*
4. *Boundary Condition*
5. *Element Connectivity*
6. *Material Properties*
7. *Load*

Proses perhitungan yang dilakukan dalam program ini meliputi penerapan *boundary conditions* dan perhitungan matriks untuk menghasilkan tegangan dan regangan pada tiap elemen.

Output yang dihasilkan pada program ini meliputi gambar grafik dan perhitungan matriks. Gambar *undeformed shape* diperoleh setelah proses *input* dilakukan. Selain itu, dapat diperoleh *stress contour* dari perhitungan tegangan tiap elemen serta *deformed shape* dari hasil perpindahan. Setelah itu dilakukan verifikasi program untuk mengetahui apakah program yang dibuat telah berjalan dengan benar. Verifikasi program ini dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan program yang dibuat dengan SAP2000.

4. ANALISA DAN HASIL

Untuk memulai akses ke dalam *website*, buka *web browser* lalu ketikkan alamat: <http://ta36.petra.ac.id>. Apabila pengguna ingin menyelesaikan sebuah soal analisis bidang, masukkan data pada tabel *input*. Dari data *input* dapat ditampilkan *undeformed shape* seperti pada **Gambar 1**.

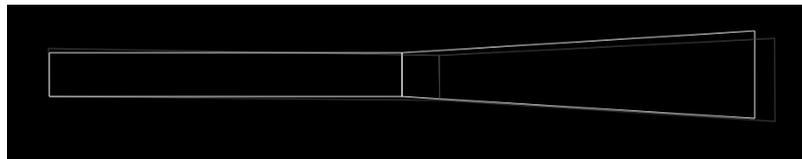


Gambar 1. Tampilan *Undeformed Shape*

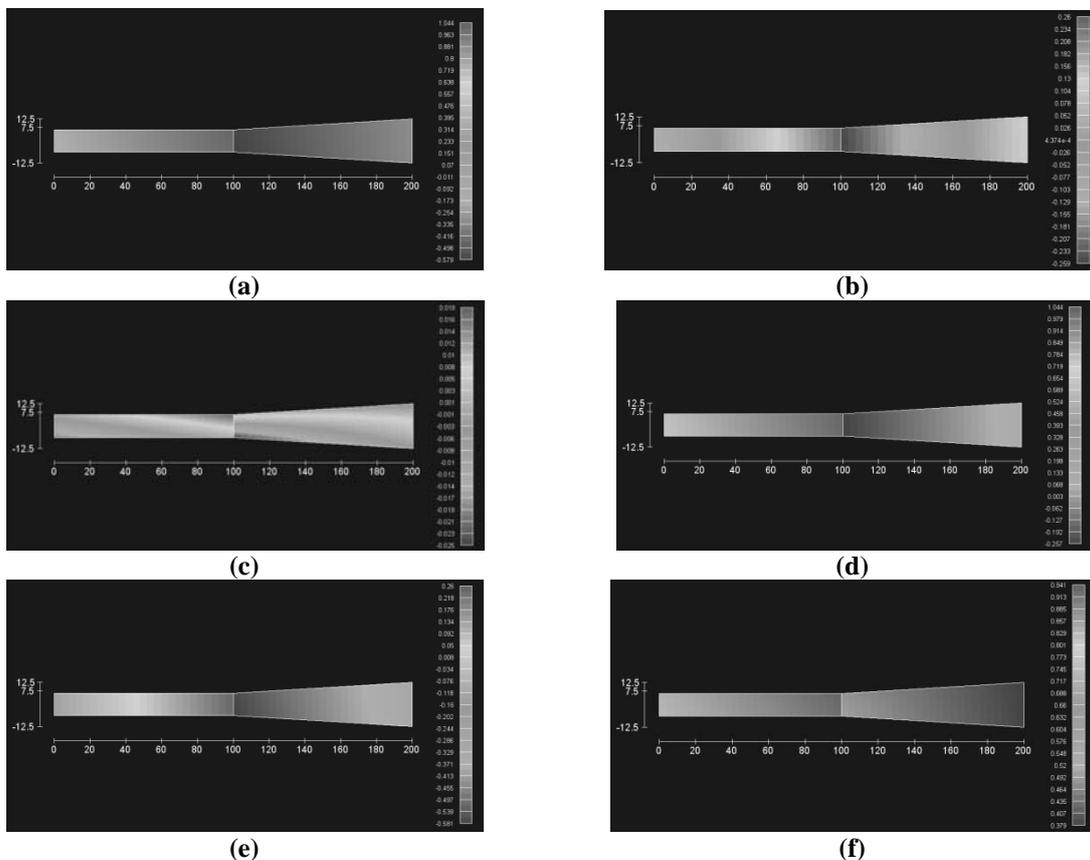
Selanjutnya dilakukan proses perhitungan dan menghasilkan *output* sebagai berikut:

1. Matriks kekakuan tiap elemen
2. Matriks kekakuan global
3. Penyelesaian matriks (matriks partisi dan eliminasi Gauss) dengan hasil perpindahan dan reaksi perletakkannya
4. Tegangan tiap elemen

Selain itu, ditampilkan juga *deformed shape* seperti pada **Gambar 2**. Ditampilkan juga kontur tegangannya, baik untuk tegangan normal, geser, utama, maupun Von Mises, seperti terlihat pada **Gambar 3**.

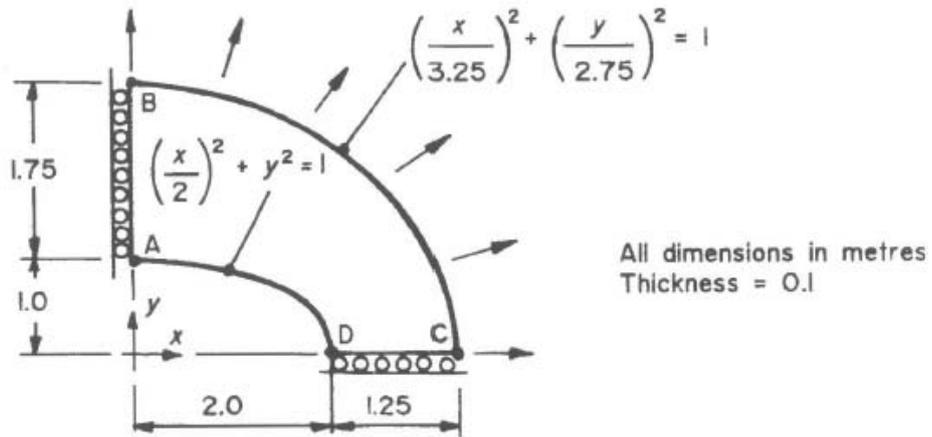


Gambar 2. Tampilan *Deformed Shape*

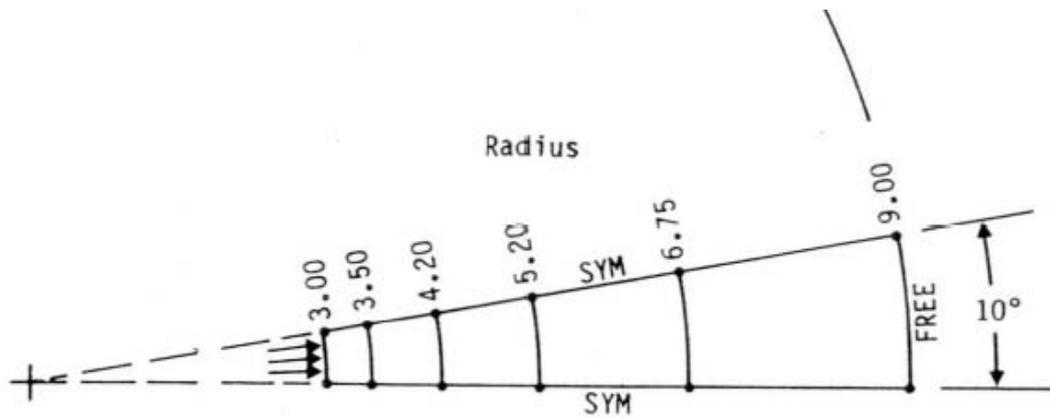


Gambar 3. Kontur Tegangan: (a) Tegangan Normal x ; (b) Tegangan Normal y ; (c) Tegangan Geser xy ; (d) Tegangan Maksimum; (e) Tegangan Minimum; (f) Tegangan Von Mises

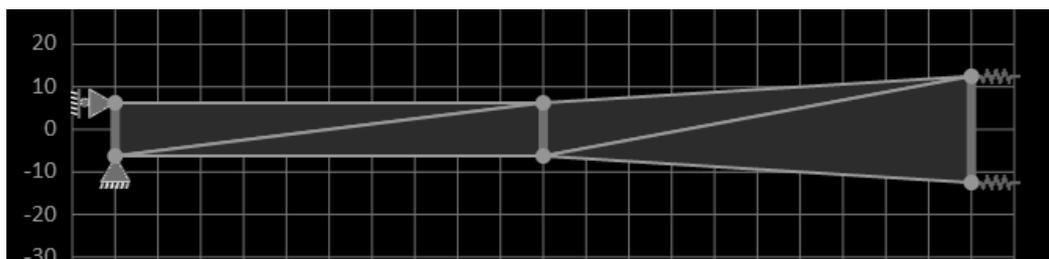
Verifikasi program dilakukan dengan membandingkan hasil perpindahan, reaksi perletakan, maupun tegangan yang dihasilkan program dengan hasil dari program SAP2000. Model permasalahan yang dicoba untuk melakukan verifikasi dapat dilihat pada **Gambar 4** sampai **Gambar 8**.



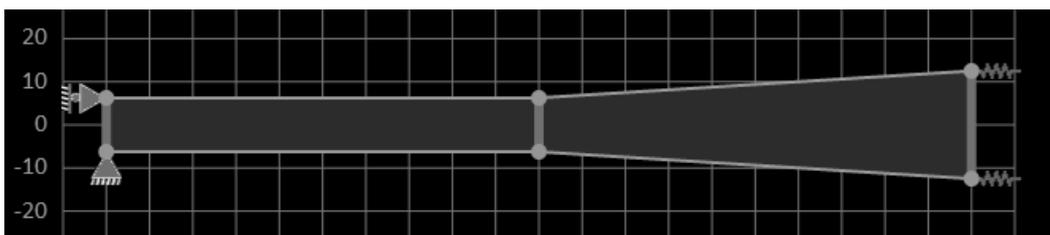
Gambar 4. *Elliptic Membrane*



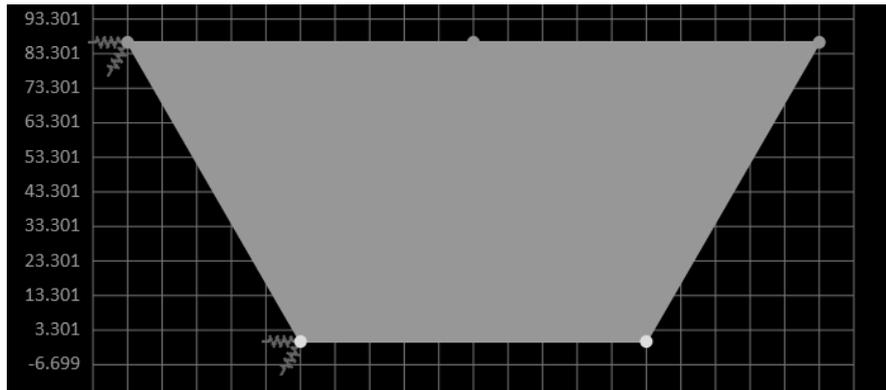
Gambar 5. *Thick-Walled Cylinder*



Gambar 6. *Material Orthotropik dengan CST, Plane Strain*



Gambar 7. *Material Orthotropik dengan Q4, Plane Stress*



Gambar 8. Bidang dengan Pegas

Perbandingan hasil perhitungan program dan SAP2000 dapat dilihat pada Tabel 1 sampai Tabel 4.

Tabel 1. Perbandingan Hasil Program dan SAP2000 pada *Elliptic Membrane*

Pengaturan <i>mesh</i>	Parameter (kN/m ² atau kPa)	Program	SAP2000	Perbedaan
CST coarse	σ_y at D	53023,9792007	53023,549406	0,00081 %
CST fine	σ_y at D	66668,2263698	66668,933933	0,00106 %
Q4 coarse	σ_y at D	70496,4877623	70497,244637	0,00107 %
Q4 fine	σ_y at D	81250,9481312	81252,773638	0,00225 %
Exact	σ_y at D	92700		

Tabel 2. Perbandingan Hasil Program, SAP2000 dan Rumus Teoritis pada *Thick-Walled Cylinder*

Poisson ratio (ν)	Parameter (m)	Program	SAP2000	Perbedaan	Rumus Teoritis	Perbedaan
0,49	d_x di radius dalam	0,0043	0,0043	0 %	0,0050399	14,681 %
0,499	d_x di radius dalam	0,0018	0,0018	0 %	0,0050602	64,428 %
0,4999	d_x di radius dalam	0,0003	0,0003	0 %	0,0050623	94,074 %

Tabel 3. Perbandingan Hasil Program dan SAP2000 pada Material Orthotropik

Model	Parameter (m dan kN/m ²)	Program	SAP2000	Perbedaan
CST, <i>Plane strain</i>	d_{3x}	0,163	0,163	0 %
	σ_{vm} pada Node 3	0,09571	0,09571	0 %
Q4, <i>Plane stress</i>	d_{3x}	0,2298	0,2298	0 %
	σ_{vm} pada Node 3	0,384494	0,384494	0 %

Tabel 4. Perbandingan Hasil Program dan SAP2000 pada Bidang dengan Pegas

Parameter (mm dan kN/mm ²)	Program	SAP2000	Perbedaan
d_{5y}	7,04	7,04	0 %
σ_{\max} elemen 3	0,102774	0,102774	0 %

Pada *elliptic membrane* terlihat bahwa dengan pengaturan *mesh* yang semakin rapat, hasil yang diperoleh juga semakin mendekati keadaan sebenarnya.

Pada *thick-walled cylinder*, terjadi perbedaan nilai yang cukup besar ketika dibandingkan dengan nilai yang diperoleh dari rumus teoritis. Hal ini dikarenakan elemen Q4 dalam kondisi *plane strain* ini mengalami “locking” (Cook et al., 2002). Pada kondisi *plane strain* diasumsikan $\varepsilon_z = 0$, sehingga regangan volumetriknya menjadi $\Delta V/V = \varepsilon_x + \varepsilon_y$. Ketika nilai ν mendekati 0,5 pada material yang menyerupai karet, tekanan yang dibutuhkan untuk menghasilkan regangan volumetrik hampir mendekati tak hingga. Akibatnya, matriks kekakuannya memiliki ketahanan hampir tak hingga terhadap perpindahan nodalnya. Hal ini menyebabkan suatu *node* hampir tidak dapat digerakkan. Oleh karena itu, saat nilai ν semakin mendekati 0,5 maka perpindahan nodal juga akan semakin kecil.

Secara keseluruhan terlihat bahwa hasil perhitungan program sudah sama dengan SAP2000. Hal ini telah dibuktikan melalui verifikasi yang memperhitungkan pegas, tumpuan miring, *prescribed displacement*, baik untuk material isotropik maupun orthotropik.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan analisa yang didapat dari website yang telah dibuat, secara umum dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Program pada website ini sudah dapat membantu dalam perhitungan analisis bidang dua dimensi pada ruang lingkupnya.
2. Untuk menggunakan program ini, pengguna tidak perlu mempunyai program khusus, cukup dengan koneksi internet dan kemampuan pengguna dalam mengidentifikasi soal.
3. Hasil perhitungan program yang dibuat telah menunjukkan hasil yang sama dengan hasil program SAP2000.
4. Penggunaan *website* ini akan sangat membantu proses pembelajaran materi Metode Elemen Hingga, karena terdapat langkah-langkah perhitungan yang jelas yang tidak dimiliki *website* lainnya, seperti perhitungan matriks, diagram kontur tegangan.

6. DAFTAR REFERENSI

- Carroll, W. F. (1999). *A Primer for Finite Elements in Elastic Structures*, John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Cook, Robert D., et al. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis* (4th ed.), John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Logan, Daryl L. (2007). *A First Course in the Finite Element Method* (4th ed.), Thomson Canada Limited, Canada.