

PENGUJIAN ELEMEN CANGKANG YANG TERDAPAT DALAM PROGRAM KOMERSIAL DENGAN ANALISIS LINIER DAN NONLINIER GEOMETRI

Andrians Juniawan¹, Michael Andrian², Wong Foek Tjong³ dan Pamuda Pudjisuryadi⁴

ABSTRAK: Penelitian ini bertujuan menguji keakuratan dan konvergensi elemen *shell* dalam analisa linier dan nonlinier geometri dalam program komersial dengan berbagai *benchmark problem* linier dan nonlinier geometri yang biasa di pakai oleh para pengembang elemen shell. *Benchmark problem* tersebut dimodelkan dengan menggunakan elemen shell S4, S4R, S4R5, S8R dan S8R5 yang berdasarkan teori cangkang tipis (*thin shell theory*) dan teori cangkang tebal (*thick shell theory*). *Output* yang diukur dalam pengujian ini adalah *displacement*, tegangan permukaan dan gaya dalam yang terjadi. Hasil penelitian dengan analisa linier secara umum menunjukkan bahwa elemen cangkang S4 dan S8R5 menghasilkan nilai yang mendekati solusi referensi dibandingkan elemen cangkang yang lain. Sedangkan hasil penelitian dengan analisa nonlinier secara umum menunjukkan bahwa semua elemen cangkang menghasilkan nilai yang mendekati solusi referensi, tetapi elemen cangkang S4 dan S4R yang paling mudah mencapai konvergensi. Hal ini merupakan suatu usulan untuk melakukan pengetesan menggunakan program lain dalam penelitian ini, untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat mengenai kinerja elemen.

KATA KUNCI: elemen cangkang, nonlinier geometri.

1. PENDAHULUAN

Elemen cangkang merupakan salah satu elemen yang perumusannya cukup sulit. Oleh karena itu para peneliti elemen cangkang ini menciptakan perumusan- perumusan elemen cangkang yang sering kali ditemui di beberapa program komersial untuk analisa struktur. Pada penelitian sebelumnya oleh Wijoyo, 2011 menguji elemen cangkang yang terdapat dalam SAP 2000 dengan analisa nonlinier. Penelitian tersebut menggunakan beberapa *benchmark problems* dari literatur (Mattiason, 1981; Hsiao & Huang, 1989; Surana, 1983; Ma, 1990; Lomboy, 2007) seperti *Cantilever Beam Problem with Point Load at The End of Beam*, *Cantilever Beam Problem with Moment at The End of Beam*, *Cantilever Plate Under Concentrated Load*, *Hinged Cylindrical Shell*, *Pinched Hemispherical Shell with 18° Hole*. Setelah dibandingkan dengan hasil eksak yang terdapat dari literatur, beberapa kesimpulan dirumuskan dalam penelitian tersebut. Diantaranya adalah ukuran dan bentuk *mesh* sangat berpengaruh terhadap hasil analisa serta kesulitan untuk mencapai hasil yang konvergen pada beberapa jenis *benchmark problems*.

Oleh karena rumitnya analisa nonlinier ini maka peneliti ingin mengetahui lebih lanjut bagaimana perilaku elemen cangkang dengan jumlah nodal yang lebih banyak seperti elemen cangkang yang terdapat dalam program ABAQUS yang nantinya akan dibandingkan dengan hasil pengujian pada beberapa peneliti elemen cangkang sebelumnya.

¹ Mahasiswa S-1 Program Studi Teknik Sipil, andrians.juniawan@gmail.com.

² Mahasiswa S-1 Program Studi Teknik Sipil, michael.andrian1@gmail.com.

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

⁴ Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, pamuda@petra.ac.id.

2. LANDASAN TEORI

2.1. ELEMEN CANGKANG (*SHELL ELEMENT*)

Elemen cangkang digunakan untuk memodelkan suatu struktur dimana ketebalannya relatif lebih kecil dibandingkan dengan bentangnya. Ada tiga pendekatan teori untuk permasalahan yang dicapai untuk menganalisa permasalahan tersebut (Cook et al., 2002, pp. 563), yaitu :

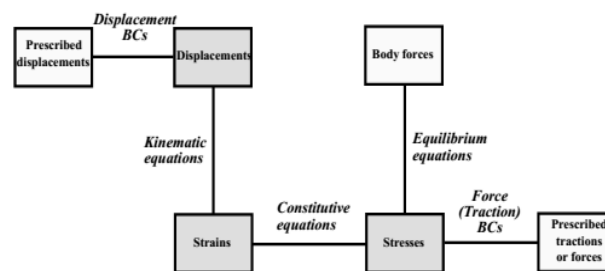
1. *Superposed Element* dibentuk dari superposisi *plane membrane element* dengan *plate bending element*.
2. *Curved Shell Elements* berdasarkan teori klasik elemen cangkang
3. *Degenerated Solid Shell Element* berdasarkan dari 3 dimensi diterapkan dengan asumsi-asumsi elemen cangkang dan memiliki 5 *DOF (Degree of Freedom)* yaitu 3 perpindahan titik *nodal* pada permukaan elemen dan 2 rotasi dari garis normal.

2.2. ANALISA NONLINIER

Analisa Nonlinier adalah memprediksi respon dari struktur yang berperilaku nonlinier dengan simulasi. Secara umum ada empat hal yang dapat membuat suatu struktur berperilaku nonlinier. Hal tersebut adalah :

1. Nonlinieritas Geometri
2. Nonlinieritas Material
3. *Force Boundary Condition*
4. *Displacement Boundary Condition/ Problem Kontak*

Gambar 1 menunjukkan hubungan matematis penyebab nonlinieritas.



Gambar 1. Hubungan Matematis Penyebab Nonlinearitas
Sumber: Carlos Felippa

Yang dimaksudkan nonlinieritas geometri adalah terjadinya deformasi yang besar pada suatu struktur setelah pemberian beban yang dapat mengakibatkan konfigurasi struktur dapat berubah. Kedua adalah nonlinieritas material, nonlinieritas material dapat terjadi ketika hubungan tegangan-regangan suatu material yang telah melewati tegangan lelehnya sehingga menyebabkan analisa pada model struktur sudah tidak berlaku lagi dibandingkan kondisi struktur *real*. Ketiga, *force boundary condition* terjadi ketika beban yang bekerja pada struktur berubah setelah terjadi deformasi pada struktur tersebut. Dan yang terakhir adalah *displacement boundary condition/ problem kontak*, problem kontak dapat terjadi bila suatu struktur mengalami perubahan pada kondisi perletakkannya hal ini biasanya diakibatkan oleh deformasi yang terjadi pada struktur, sebagai contoh suatu struktur yang perletakkannya berupa sendi dan rol, akibat pembebanan perletakan rol mengalami translasi yang melebihi batas sehingga pergerakan rol tertahan pada suatu penghambat yang mengakibatkan tidak bertranslasi lagi yang mengubah perletakan struktur itu menjadi sendi. Pada kondisi seperti ini, biasanya terjadi perubahan pada geometrinya yang cukup signifikan

3. PROSEDUR PELAKSANAAN

Pengujian ini menggunakan elemen cangkang 4 nodal (S4, S4R, S4R5) dan elemen cangkang 8 nodal (S8R dan S8R5) pada *ABAQUS* dengan berbagai kerapatan *meshing* untuk menguji keakuratan dari elemen cangkang dengan analisa linier dan nonlinier. Pengujian ini dilakukan dalam 2 jenis yaitu:

1. Memodelkan *benchmark problems* pada *ABAQUS* dengan analisa linier kemudian dibandingkan dengan hasil eksak maupun referensi yang diambil dari literatur (Dassault Systemes Simulia Corp, 2009; Knight, 1997; Simo et al., 1989; Ma, 1990; White & Abel, 1989; Wong, 2009) untuk memastikan performa dan pemodelan elemen sudah tepat.
2. Memodelkan *benchmark problem* yang dianalisa dengan nonlinier geometri pada *ABAQUS* kemudian performa elemen cangkang dinilai dengan besaran perbedaannya solusi referensi.

Tabel 1 menunjukkan elemen-elemen yang digunakan dalam pengujian.

Tabel 1. Elemen-Elemen yang Digunakan dalam Pengujian

Nama Elemen	Deskripsi
S4	Elemen 4 nodal
S4R	Elemen 4 nodal, <i>reduced integration</i>
S4R5	Elemen 4 nodal, <i>reduced integration</i> , 5 derajat kebebasan
S8R	Elemen 8 nodal, <i>reduced integration</i>
S8R5	Elemen 8 nodal, <i>reduced integration</i> , 5 derajat kebebasan

4. HASIL DAN ANALISIS

4.1 PENGUJIAN LINIER

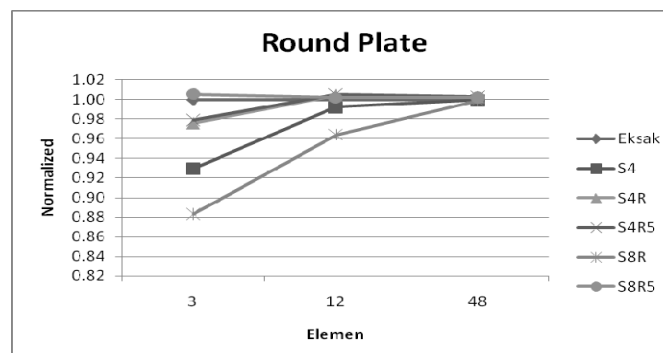
Pada pengujian linier, elemen akan diuji sesuai dengan benchmark problem. Parameter yang diperiksa adalah keakuratan elemen cangkang *ABAQUS* terhadap *displacement* yang terjadi dibandingkan dengan solusi referensi atau solusi eksak.

4.1.1. PELAT LINGKARAN

Perbandingan antara hasil *displacement* yang diperoleh dari *ABAQUS* dengan nilai referensi dapat dilihat di referensi yang terlihat pada **Tabel 2** dan **Gambar 2**.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Eksak dengan Pengujian Elemen

Jumlah Elemen	Eksak	S4	S4R	S4R5	S8R	S8R5
3	1.00	0.93	0.98	0.98	0.88	1.01
12	1.00	0.99	1.00	1.01	0.96	1.00
48	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



Gambar 2. Grafik Perbandingan Elemen Cangkang dengan Solusi Referensi

4.2. PENGUJIAN NONLINIER

Pengujian nonlinier yang dilakukan adalah elemen diuji berdasarkan *benchmark problem* yang ada dan analisis yang digunakan adalah analisis nonlinier geometri. Serta cara pembebanan yang digunakan adalah dengan *incremental load* secara otomatis melalui program *ABAQUS*.

4.2.1. CANTILEVER PLATE UNDER CONCENTRATED LOAD

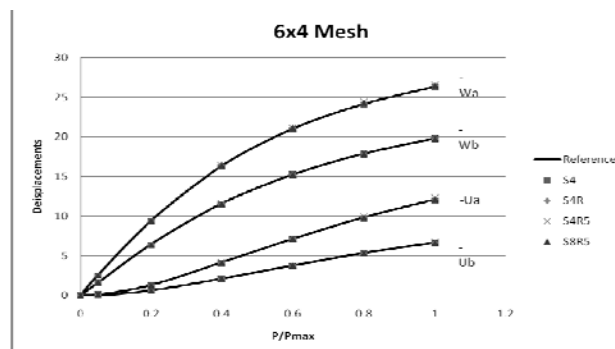
Perbandingan antara hasil *displacement* di titik A dan B yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan solusi referensi yang diperoleh dari Ma Haitao (1990) dapat dilihat di **Tabel 3** dan **Gambar 3**.

Tabel 3. Perbandingan Solusi Referensi dengan Pengujian Elemen dengan Mesh 6 x 4

P/Pmax	Eksak				S4			
	-UA	-UB	-WA	-WB	-UA	-UB	-WA	-WB
0.2	1.3348	0.64655	9.4601	6.4504	1.28788	0.62823	9.31407	6.38364
0.4	4.1787	2.1522	16.401	11.618	4.06741	2.11484	16.2223	11.5571
0.6	7.1751	3.8207	21.035	15.274	7.02954	3.77426	20.8748	15.231
0.8	9.8329	5.3592	24.153	17.871	9.6743	5.30983	24.0174	17.8444
1	12.085	6.7044	26.336	19.778	11.9237	6.65513	26.2204	19.764

P/Pmax	S4R				S4R5			
	-UA	-UB	-WA	-WB	-UA	-UB	-WA	-WB
0.2	1.30727	0.623487	9.3976	6.3641	1.31006	0.624995	9.40886	6.37238
0.4	4.14143	2.10566	16.3824	11.5394	4.16824	2.11993	16.438	11.5786
0.6	7.15563	3.75563	21.0688	15.2027	7.22626	3.7945	21.1747	15.2789
0.8	9.83266	5.27402	24.2161	17.7964	9.95273	5.3418	24.364	17.9043
1	12.0975	6.59737	26.4122	19.6949	12.2661	6.69525	26.5937	19.8295

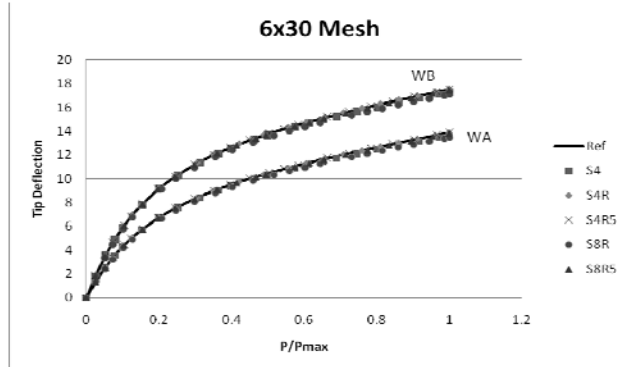
P/Pmax	S8R5			
	-UA	-UB	-WA	-WB
0.2	1.30727	0.623487	9.3976	6.3641
0.4	4.14143	2.10566	16.3824	11.5394
0.6	7.15563	3.75563	21.0688	15.2027
0.8	9.83266	5.27402	24.2161	17.7964
1	12.0975	6.59737	26.4122	19.6949



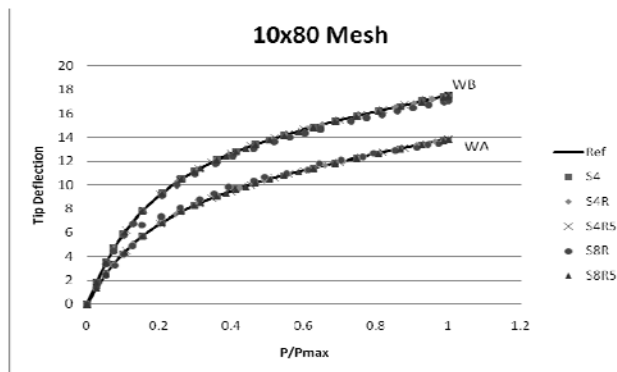
Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Cantilever Plate Under Concentrated Load

4.2.2 SLIT ANNULAR PLATE SUBJECTED TO LIFTING LINE FORCE

Perbandingan antara hasil *displacement* di titik A dan B yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan solusi referensi yang diperoleh dari K.Y.Sze, X.H.Liu, dan S.H.Lo (2004) dapat dilihat di **Gambar 4** dan **Gambar 5**.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Hasil Pengujian *Slit Annular Plate Subjected to Lifting Line Force*



Gambar 5. Grafik Perbandingan Hasil Pengujian *Slit Annular Plate Subjected to Lifting Line Force*

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Secara umum, performa dari elemen cangkang dalam program ABAQUS sudah menunjukkan konvergensi yang baik baik dengan analisa linier maupun dengan analisa nonlinier.

5.2. SARAN

Pengujian elemen cangkang disini sebaiknya dilakukan dengan *mesh* yang semakin diperhalus agar semakin terlihat hasil konvergensinya.

6. DAFTAR REFERENSI

- Cook, R. D., D.S. Malkus, M.E. Plesha and R.J. Witt. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th edition. Madison, University of Wisconsin, John Wiley and Sons.
- Dassault Systemes Simulia Corp. (2009). *Abaqus Theory Manual*. Providence, RI, USA: Author.
- K.Y.Sze, X.H.Liu, and S.H.Lo. (2004). *Popular Benchmark Problems for Geometric Nonlinear Analysis of Shells*, *Finite Elements in Analysis & Design* 40, 1551-1569, Hong Kong.
- Knight Jr., N.F. (1997). *Raasch Challenge for Shell Elements*, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 35, 375-381

- Hsiao, K.-M. and Huang, H.-C. (1989), Large Deflection Analysis of Shell Structure by Using Corrotational Total Lagrangian Formulation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 73, 209-25.
- Ma, H. (1990). *Development of a Geometrically Nonlinear Shell Element by Assumed Strain Methods*. Doctoral Dissertation. Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Mattiasson, K. (1981). Numerical Results From Large Deflection Beam and Frame Problems Analysed by Means of Elliptic Integrals, *International Journal Numerical Method in Engineering* 17, 145-54.
- Lomboy, G.R. (2007). *A Quasi-Conforming Shell Element for Geometric and Material Nonlinearity*. Unpublished doctoral dissertation. Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand.
- Simo, J. C., D. D. Fox, dan M. S. Rifai, On a Stress Resultant Geometrically Exact Shell Model. Part III: Computational Aspects of the Nonlinear Theory, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 79, pp. 21–70, 1989
- Surana, K.S. (1983). Geometrically Non-linear Formulation for the Curved Shell Elements, *International Journal Numerical Method in Engineering* 19, 581-615.
- White, D.W. and J.F. Abel (1989). Testing of Shell Finite Element Accuracy and Robustness, *Finite Elements in Analysis and Design*, 6, 129-151.
- Wong, F.T. (2009). *Kriging-based Finite Element Method for Analyses of Plate and Shells*. Doctoral Dissertation. Asian Institute of Technology. Bangkok.