

# METODE ELEMEN HINGGA UNTUK PREDIKSI DEFORMASI BENDA KERJA DAN GAYA REAKSI DALAM SISTEM FIXTURE-BENDA KERJA

Mohammad Tauviqirrahman dan Munadi <sup>1)</sup>

## Abstract

Knowledge of workpiece deformation and locator reaction forces in the fixture-workpiece system are essential for machining surface error prediction. Suitable methods for accurately predicting such deformations and forces are essential to the design and operations of fixtures. In this regard, researches based finite element analysis in fixturing has been widely applied by researchers. A finite element (FE) model of the fixture-workpiece system is well-suited for predicting workpiece deformation and reaction forces. However, these studies generally neglect the effects of different finite element model parameters on workpiece deformation. This study uses finite element method (FEM) to model a fixture-workpiece system and to explore the effects of certain finite element model parameters on the prediction. In addition, this effects on the prediction accuracy are also examined. Based on this study, the workpiece deformations and locator reaction forces predicted by the FEM model shows agreement within 3-4 % of the experimental data.

Keyword : finite element method (FEM); deformation, reaction force

## PENDAHULUAN

Metode-metode untuk menganalisa fixture adalah hal yang esensi dalam desain sistem fixture-benda kerja baik dilihat dari ketelitian proses dan hasil maupun biayanya. Dalam praktek, metode yang memiliki kemampuan untuk memodelkan dan memprediksi secara teliti deformasi benda kerja yang diakibatkan oleh beban pen-*fixture*-an serta gaya kontak benda kerja-*fixture* yang tidak diketahui merupakan sesuatu yang penting untuk mendesain fungsi *fixture*. Berdasarkan kajian literatur, salah satu metode yang digunakan adalah metode elemen hingga (FEM) [2]. Metode ini dinilai sangat *powerful* dan mampu menghitung ketidak-linierean yang ada pada sistem [8]. Meskipun metode elemen hingga telah secara luas digunakan dalam proses desain sistem *fixture*-benda kerja, pengetahuan akan pengaruh parameter-parameter model elemen hingga terhadap deformasi benda kerja dinilai masih kurang.

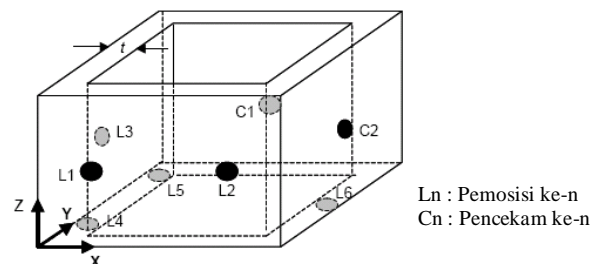
## TUJUAN PENELITIAN

Dalam studi ini, pengaruh berbagai parameter pemodelan elemen hingga, yaitu kerapatan mesh terhadap prediksi deformasi benda kerja dan gaya reaksi pemosisi (*locator*) akan diteliti. Prediksi ini selanjutnya akan dibandingkan dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh Satyanarayana [8] guna mengetahui validitas model elemen hingga yang akan dikembangkan.

## PENGEMBANGAN MODEL

Sistem *fixture*-benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari balok berlubang berpe-

nampang persegi dan memiliki ketebalan dinding,  $t$  yang seragam. Balok ini ditahan dalam suatu tata letak *fixture* 3-2-1 seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.

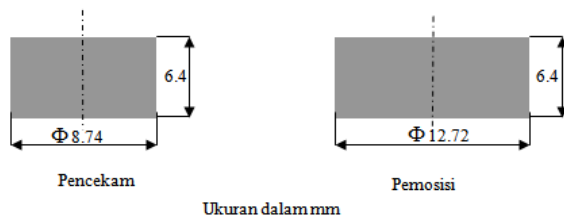


Gambar 1. Tata letak *fixture* 3-2-1

Benda kerja berukuran 153 mm x 127 mm x 76 mm terbuat dari aluminum 6061-T6 ( $E = 70$  GPa,  $\nu = 0.334$ ) dan memiliki ketebalan dinding,  $t$  sebesar 8 mm. Dua pencekam digunakan untuk menahan benda kerja melawan enam pemosisi: tiga pada bidang primer, dua pada bidang sekunder, dan satu pada bidang tersier. Elemen *fixture* berjenis planar terbuat dari baja AISI 1144 yang dikeraskan ( $E=206$  GPa,  $\nu=0.296$ ).

Model elemen hingga dibangun dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Multiphysic 9.0. Model solid terdiri dari balok dan elemen *fixture*. Semua komponen dalam sistem dimodelkan sebagai elastik isotropik. Elemen *fixture* baik itu pemosisi maupun pencekam yang digunakan untuk memosisikan dan mencekam benda kerja dimodelkan seperti terlihat dalam Gambar 2. Koordinat global tata letak elemen *fixture* disajikan dalam Tabel 1. Elemen tetrahedral 10-nodal SOLID95 digunakan untuk mengemesh semua solid.

<sup>1)</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP



Gambar 2. Elemen fixture planar

Tabel 1. Koordinat Elemen Fixture pada Model Balok

	Koordinat		
	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)
L1	30.8	0.0	41.9
L2	132.4	0.0	41.9
L3	0.0	80.0	41.9
L4	10.5	24.8	0.0
L5	10.5	112.0	0.0
L6	154.0	66.6	0.0
C1	79.1	127.0	41.3
C2	153.0	67.3	41.3

Keterangan:  
L : Pemosisi  
C : Pencekam

Kontak antara benda kerja dan fixture disimulasikan dengan menggunakan elemen kontak *surface-to-surface* TARGE170 dan CONTA174. Koefisien gesek statik konstan digunakan untuk menentukan sifat kontak pada antarmuka elemen fixture dengan benda kerja. Besarnya koefisien ini ditetapkan sebesar 0.18 berdasarkan data literatur, yaitu hasil eksperimen yang dilakukan oleh Satyanarayana [8] untuk sistem fixture-benda kerja yang sama seperti dalam simulasi.

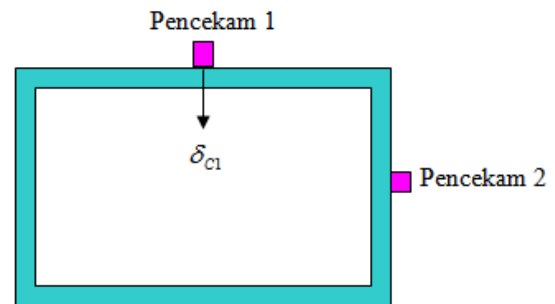
### PENGARUH KERAPATAN MESH

Berdasarkan penelusuran kajian pustaka yang menggunakan metode elemen hingga (FEM) untuk menganalisa deformasi benda kerja, kajian yang mendalam tentang pengaruh kerapatan mesh dalam memodelkan sistem fixture-benda kerja dinilai masih kurang. Faktor utama dalam menentukan model FEM yang layak untuk penelitian ini adalah kerapatan mesh yang ideal. Mesh yang kasar bisa memberikan hasil yang tidak akurat. Meskipun demikian, mesh yang terlalu halus bisa menyebabkan pemborosan komputasi. Untuk penelitian ini, fitur *meshing* pada ANSYS yaitu SMRT digunakan untuk membentuk mesh yang solid. Kisaran nilai dari 1 (mesh paling halus) sampai dengan 10 (mesh paling kasar) akan digunakan terhadap berbagai komponen solid baik itu benda kerja maupun fixture. Kombinasi ukuran mesh fixture-benda kerja akan dijadikan sebagai ukuran mesh yang optimal. Untuk menguji ketelitian hasil, deformasi benda kerja,  $\delta_1$  pada lokasi pencekam 1 seperti tampak pada Gambar 3 akan dihitung.

Deformasi benda kerja, yang dianalisa dalam studi ini, diperoleh di satu titik pada benda kerja yaitu pada titik pencekam 1 seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. Pemilihan titik ini didasarkan pada lokasi benda kerja yang mengalami deformasi terbesar akibat pencekaman. Data eksperimen oleh Satyanarayana sebagai acuan validitas hasil simulasi disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Data Eksperimen [8]

Jenis Pencekam	Gaya Pencekam	$\delta_{C1}$ ( $\mu m$ )
Planar	375 N	27.3



Gambar 3. Titik deformasi benda kerja

Gambar 4 menyajikan hasil simulasi yang menunjukkan penyimpangan (dalam persen) antara nilai yang terukur secara eksperimen dengan hasil FEM untuk kasus tipe planar. Seperti yang tergambar dalam plot, kerapatan mesh benda kerja memiliki pengaruh yang dominan terhadap ketelitian model. Mesh yang kasar dapat menghasilkan penyimpangan hingga lebih dari 18 % dengan data eksperimen. Dari Gambar 4 ini dapat diamati pula bahwa pengaruh kerapatan mesh fixture terhadap ketelitian hasil relatif kecil. Untuk kerapatan mesh SMRT fixture 1-3 untuk berbagai SMRT benda kerja cenderung konstan, sedangkan mulai dari SMRT fixture 4 hingga 10 terjadi peningkatan penyimpangan walaupun besarnya sangat kecil sekali (kurang dari 1 %). Jadi, SMRT fixture yang dipilih adalah ukuran mesh yang relatif kasar dengan pertimbangan waktu komputasi, tetapi memberikan hasil yang paling teliti. Dalam hal ini, ukuran mesh SMRT fixture yang memenuhi adalah tiga untuk berbagai ukuran mesh SMRT benda kerja.

Dengan demikian, dari Gambar 4 dapat diperoleh data bahwa ada lima kombinasi tingkat kerapatan SMRT fixture dan benda kerja yang paling memberikan hasil yang teliti yaitu sebagai berikut :

1. Tiga (SMRT fixture) – Satu (SMRT benda kerja)
2. Tiga (SMRT fixture) – Dua (SMRT benda kerja)
3. Tiga (SMRT fixture) – Tiga (SMRT benda kerja)
4. Tiga (SMRT fixture) – Empat (SMRT benda kerja)
5. Tiga (SMRT fixture) – Lima (SMRT benda kerja)

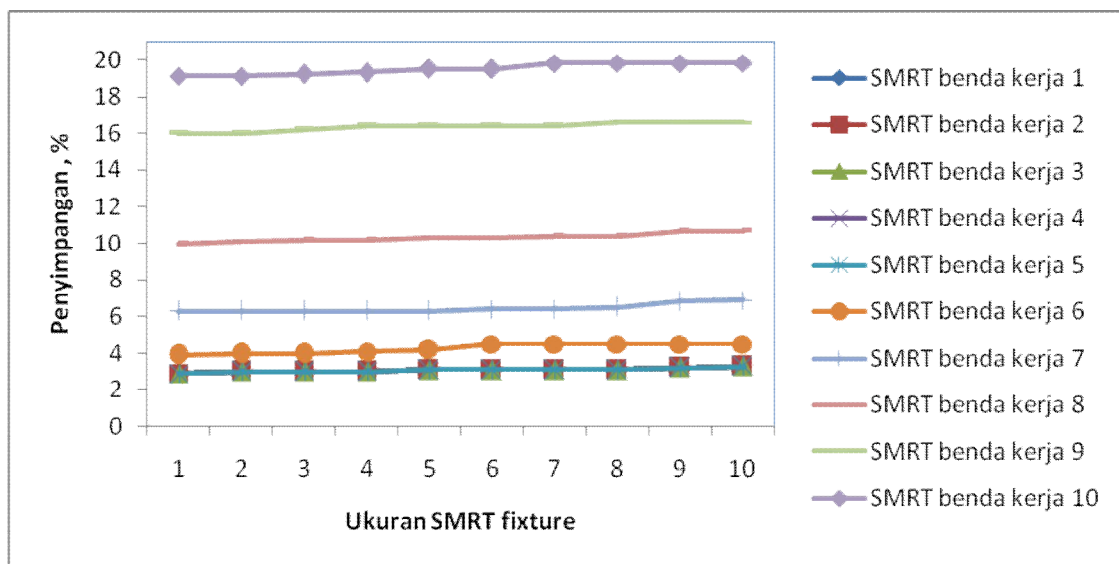
Kelima kombinasi ini memberikan penyimpangan hasil tidak lebih dari 3 % dengan data eksperimen. Sehingga dari kelima kombinasi ini, dapat dipilih satu kombinasi yang paling ideal untuk dipilih sebagai model elemen hingga dalam desain sistem fixture-benda kerja. Dasar pemilihan kombinasi yang ideal adalah ketelitian hasil (mana yang paling dekat dengan data eksperimen) dan kebutuhan waktu komputasi (mana yang paling singkat dalam memprediksi deformasi).

Gambar 5 menyajikan waktu komputasi yang diperlukan oleh perangkat lunak untuk memprediksi deformasi pada SMRT fixture tiga untuk berbagai ukuran SMRT benda kerja. Dari sini, ditarik kesimpulan bahwa untuk kelima kombinasi yang telah disebutkan, hanya pada ukuran SMRT benda kerja lima diperoleh waktu komputasi yang paling singkat, yaitu

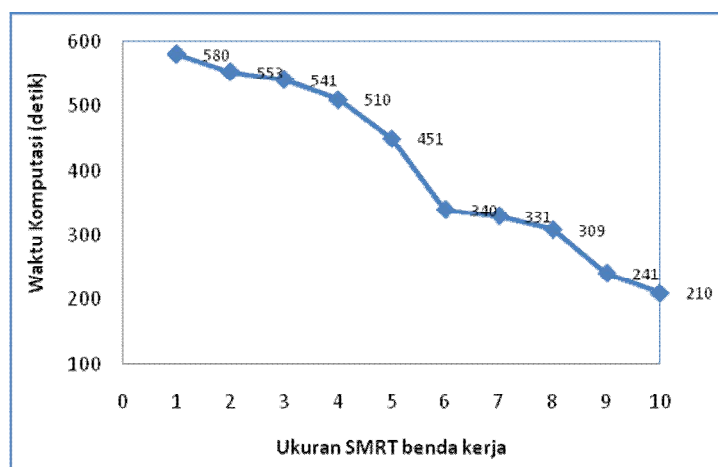
sebesar 450,6 detik atau 22 % lebih cepat jika dibanding dengan waktu komputasi SMRT benda kerja satu.

Oleh karena itu, dengan memperhatikan waktu komputasi, kombinasi ukuran kerapatan mesh SMRT yang ideal adalah lima untuk benda kerja dan tiga untuk fixture. Kombinasi ini memberikan penyimpangan hanya sebesar 3 % dengan data eksperimen dan waktu komputasi 22 % lebih cepat dibandingkan kombinasi ukuran mesh yang paling rapat.

Tabel 3 menyajikan hasil simulasi untuk kombinasi kerapatan mesh SMRT yang dipilih. Untuk selanjutnya, kombinasi kerapatan mesh ini akan digunakan untuk analisis berikutnya. Kesimpulan parameter model elemen hingga akan untuk kombinasi yang terpilih disajikan dalam Tabel 4.



Gambar 4. Penyimpangan persentasi berbagai tingkat kerapatan mesh benda kerja dan fixture



Gambar 5. Waktu komputasi (detik) pada SMRT fixture tiga untuk berbagai tingkat SMRT benda kerja

Tabel 3. Hasil simulasi vs Data eksperimen untuk kombinasi kerapatan mesh terpilih

	$\delta_{C1} (\mu m)$
Prediksi FEM	26.5
Data Eksperimen	27.3
Penyimpangan, %	2.93

Tabel 4. Parameter model elemen hingga untuk kombinasi kerapatan mesh terpilih

Jumlah elemen benda kerja	5,531
Ukuran elemen benda kerja (mm <sup>3</sup> )	53.37
Jumlah elemen fixture	5,848
Ukuran elemen fixture (mm <sup>3</sup> )	0.25
Ukuran elemen kontak (mm <sup>3</sup> )	1.72

## VALIDASI MODEL

Validasi umum parameter mesh elemen hingga yang diperoleh untuk sistem fixture-desain (Tabel 4) dengan menggunakan kombinasi ukuran SMRT benda kerja-fixture lima-tiga diperoleh dengan cara menerapkan panduan mesh yang sama untuk ketebalan dinding yang berbeda dengan gaya pencekaman yang berbeda pula. Validasi hasil-hasil simulasi dilakukan dengan cara membandingkannya dengan data eksperimen yang telah dilakukan oleh Satyanarayana [8]. Ada dua validasi yang akan diterapkan dalam penelitian ini. Pertama, validasi terhadap besarnya deformasi benda kerja. Kedua, validasi terhadap besarnya gaya reaksi pada pemosisi. Model elemen hingga yang identik dengan Gambar 1 digunakan dalam simulasi ini. Perbedaannya adalah ketebalan dinding,  $t$  yang digunakan sebesar 7 mm dengan dua gaya pencekaman berturut-turut sebesar 250 N dan 350 N. Semua parameter simulasi disesuaikan dengan parameter eksperimen.

Tabel 5 menyajikan perbandingan hasil FEM dengan data eksperimen deformasi benda kerja. Tabel ini menunjukkan bahwa penyimpangan besarnya deformasi benda kerja antara data eksperimen dengan hasil FEM tidak lebih dari 3 %.

Tabel 5. Hasil simulasi vs data eksperimen untuk deformasi benda kerja

	$\delta_{C1} (\mu m)$	
	250 N	350 N
FEM	25.8	35.1
Data Eksperimen	26.5	36.2
Penyimpangan, %	2.7	3.0

Tabel 6 menyajikan perbandingan hasil FEM dengan data eksperimen gaya reaksi pemosisi dengan benda kerja. Mengetahui gaya reaksi merupakan hal yang penting untuk menjamin stabilitas dan keseimbangan dalam sistem. Tabel 6 ini menunjukkan bahwa penyimpangan besarnya antara data eksperimen dengan hasil FEM tidak lebih dari 4 % yang oleh karena itu dapat memvalidasi model.

Tabel 6. Hasil simulasi vs data eksperimen untuk gaya reaksi pada pemosisi 1, 2, dan 3

	Gaya Reaksi, N		
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
Gaya Pencekaman 250 N			
Prediksi FEM	83	98.8	170.1
Data Eksperimen	84	102	177
Penyimpangan, %	1.2	3.1	3.9
Gaya Pencekaman 350 N			
Prediksi FEM	114.8	141.4	235.0
Data Eksperimen	117	145	244
Penyimpangan, %	1.9	2.5	3.7

Keterangan : Ln adalah gaya reaksi pada pemosisi ke-n

## KESIMPULAN

Tulisan ini menfokuskan pada faktor yang mempengaruhi prediksi deformasi benda kerja dengan menggunakan perangkat lunak metode elemen hingga (FEM). Faktor yang dimaksud adalah parameter pemodelan elemen hingga berupa kerapatan ukuran mesh.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi ukuran kerapatan mesh SMRT lima untuk benda kerja dan tiga untuk fixture mampu memprediksi deformasi benda kerja dan gaya reaksi pemosisi yang cukup teliti dengan penyimpangan tidak lebih dari 4 % dari data eksperimen. Ukuran mesh benda kerja memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap ketelitian hasil dibandingkan ukuran mesh fixture.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Arora, Jasbir S. (1989), *Introduction To Optimum Design*, McGraw-Hill, Inc.
2. Amaral, N., Rencis, Joseph J., Rong, Yiming. (2005), Development of a finite element analysis tool for fixture design integrity verification and optimization, *International Journal Advanced Manufacturing Technology* **25**, 409 - 419.
3. Boyes, William E. (1989), *Handbook of Jig and Fixture Design*, Society of Manufacturing Engineer, Michigan.

4. Kang, Yuezhuang. (2001), *Computer-Aided Fixture Design Verification*, Disertasi Program Doktor, Worcester Polytechnic Institute.
5. Kashap, S., DeVries, W.R. (1999), Finite element analysis and optimization in fixture design, *Structural Optimization*. **18**, 193 – 201.
6. Lee, J.D., Haynes, L.S. (1987), Finite element analysis of flexible fixture system, *Transaction ASME Journal OF Engineering For Industry* **109**, 134 -139.
7. Li, Bo, Melkote, S.N. (1999), Improved workpiece location accuracy through fixture layout optimization, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **39**, 871 – 883.
8. Satyanarayana, S., Melkote, S.N. (2004), Finite element modeling of fixture– workpiece contacts: single contact modeling and experimental verification, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **44**, 903 – 913.
9. Zeid, Ibrahim. (2005), *Mastering CAD/CAM International Edition*, McGraw-Hill Companies, Inc, USA.