

PEMODELAN PEMOSISI DALAM SISTEM FIXTURE-BENDA KERJA UNTUK ANALISA ELEMEN HINGGA

Mohammad Tauviqirrahman¹⁾

Abstrak

Pengetahuan deformasi elastik benda kerja akibat tata letak pemosisi sebagai elemen fixture dalam sistem fixture-benda kerja merupakan hal yang penting untuk menjamin kualitas produk. Secara tradisional, fixture dirancang secara trial and error sehingga mahal dan banyak makan waktu. Oleh karena itu, penelitian berdasarkan analisa elemen hingga dalam pen-fixturan secara luas digunakan. Pemodelan elemen hingga yang selama ini ada pada umumnya mengabaikan elastisitas pemosisi. Pemosisi sering dimodelkan dalam kondisi rigid.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan pemodelan pemosisi sebagai elemen fixture sehingga dapat memprediksi deformasi benda kerja secara akurat dan efisien. Pemodelan pemosisi yang dikembangkan adalah kontak titik (rigid dan elastik) dan kontak area (rigid dan elastik). Berdasarkan studi ini, dari dua pemodelan yang dikembangkan diperoleh kesimpulan bahwa kontak titik elastik dapat dipertimbangkan sebagai model pemosisi dalam desain fixture. Selain lebih efisien, kontak titik dapat memprediksi besarnya deformasi benda kerja dengan hasil yang tidak berbeda dengan kontak area terutama untuk rasio area benda kerja dengan pemosisi yang lebih besar dari 40.

Kata kunci: pemosisi, deformasi maksimum benda kerja (DMAX), analisa elemen hingga (FEA)

PENDAHULUAN

Fixture pemesinan digunakan untuk memosisikan benda kerja dan memegang benda kerja selama pemesinan agar tidak bergerak. Untuk menjamin agar benda kerja yang di-mesin mencapai dimensi dan toleransi yang dikehendaki, benda kerja mesti diposisikan dengan menggunakan suatu elemen fixture, yaitu pemosisi (*locator*).

Secara tradisional, fixture dirancang secara trial and error sehingga mahal dan banyak makan waktu. Oleh karena itu, penelitian berdasarkan analisa elemen hingga dalam pen-fixturan secara luas telah digunakan. Pemodelan elemen hingga yang selama ini ada pada umumnya mengabaikan elastisitas pemosisi dan tidak memperhitungkan pengaruh luas area kontak (Tabel 1).

Tabel 1. Tinjauan Pustaka Pemodelan Pemosisi

Pustaka	Pemodelan Elemen Fixture
	Pemosisi
Lee dan Haynes (1987)	Kontak titik <i>rigid</i>
Pong <i>et al.</i> (1993)	Kontak titik elastik
Cai <i>et al.</i> (1996)	Kontak titik <i>rigid</i>
Kashyap dan DeVries (1999)	Kontak titik <i>rigid</i>
Wardak (2001)	Kontak titik elastik

Pemosisi sering dimodelkan dalam kondisi *rigid*, sehingga kurang menggambarkan objek yang sebenarnya dimodelkan. Karena (1) pemosisi dimodelkan *rigid* yang berarti pengabaian elastisitas elemen fixture. (2) pemodelan pemosisi dengan hanya menggunakan kontak titik rigid berarti pengabaian gesekan yang terjadi pada area kontak antara benda kerja dengan pemosisi. Elastisitas ini terkait dengan deformasi yang mungkin juga terjadi pada elemen fixture itu sendiri. Dalam kenyataannya, pemosisi memiliki sifat elastisitas.

Dengan demikian, analisis desain tata letak fixture dengan menggunakan pemodelan elemen fixture berbasis FEA yang selama ini berkembang menjadi tidak efektif. Akibatnya bila hasil analisis desain ini diterapkan ke dunia nyata, maka apa yang diprediksi sebelumnya akan menjadi tidak cocok dengan yang ada di lapangan sehingga dimensi benda kerja yang diharapkan menjadi kurang teliti. Pemilihan pemodelan elemen fixture yang kurang sesuai dapat mempengaruhi hasil pengukuran deformasi benda kerja. Liao (2000) menyimpulkan bahwa ada ketergantungan deformasi terukur benda kerja dengan pemodelan elemen fixture [6].

TUJUAN PENELITIAN

Dalam studi ini, model elemen hingga dikembangkan untuk pemosisi dalam sistem fixture-benda dengan menggunakan perangkat lunak simulasi berdasar metode elemen hingga. Perangkat lunak yang digunakan adalah ANSYS multiphysics 9.0 Sebagai tindak lanjut penelitian analisis elemen hingga di bidang desain fixture, dalam studi ini, pemosisi dimodelkan dengan menggunakan kontak titik (*rigid* dan elastik) dan kontak area (*rigid* dan elastik).

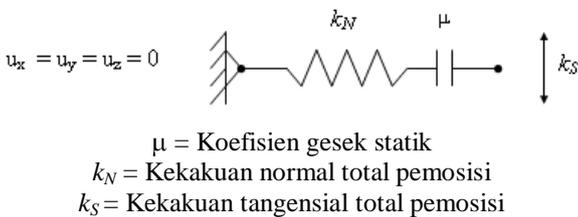
1) Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

KONTAK TITIK

Kondisi batas yang paling sederhana adalah kontak titik pada suatu nodal. Sistem koordinat lokal (LCS; *Local Coordinate System*) direferensikan dari titik asal sistem koordinat global (GCS; *Global Coordinate System*), yang dibuat pada pusat tiap area kontak pemosisi dengan benda kerja pada sumbu Z yang tegak lurus terhadap permukaan pemosisian benda kerja. Nodal yang paling dekat dengan pusat titik asal sistem koordinat lokal dipilih dan ketiga derajat kebebasan translasi (u_x , u_y , and u_z) yang ada di-*constrain*. Beban titik memodelkan suatu pemosisi bersifat *rigid*.

Untuk memodelkan kekakuan (*stiffness*) pemosisi dan gesekan pada kontak titik elastik, elemen pegas 3D ditempatkan pada pusat LCS. Berbeda dengan *constraint* yang bersifat *rigid*, penggunaan elemen pegas menjelaskan sifat elastis. Elemen CONTACT52 dalam ANSYS 9.0 hanya dapat dibebani secara tekan dan memiliki kemampuan untuk merenggang (*gap*). Elemen ini memberikan suatu keuntungan dalam pemodelan pemosisi, karena elemen tersebut tidak pernah mengalami tegangan tarik. Jika pemisahan terjadi, analisis akan gagal dikarenakan gerakan body *rigid*.

Elemen dihubungkan dengan dua nodal. Nodal yang paling dekat dengan titik asal disalin dan digeser tegak lurus terhadap permukaan pemosisian. Elemen CONTACT52 menghubungkan dua nodal dan nodal yang disalin di-*constrain* secara penuh seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.



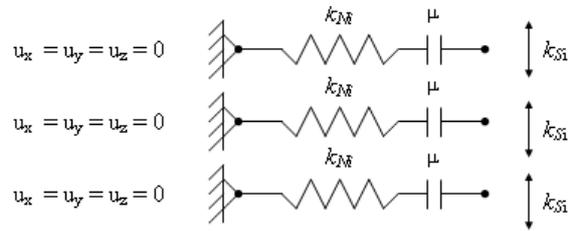
Gambar 1. Elemen CONTACT52 ANSYS digunakan untuk memodelkan kontak titik elastik pemosisi

KONTAK AREA

Untuk memodelkan suatu pemosisi *rigid* dengan kontak area, nodal-nodal di-*constrain* dalam area kontak. Sistem koordinat lokal (LCS) dibuat pada permukaan benda kerja di pusat area kontak pemosisi. Untuk area kontak sirkuler, LCS silinder dibuat dan nodal-nodal dipilih pada $0 < R < R_L$. Ketiga derajat kebebasan translasi (u_x , u_y , and u_z) pada tiap nodal di-*constrain*. Model ini mengasumsikan pemosisi *rigid*, walaupun dalam realitas pemosisi adalah elastik.

Representasi yang lebih akurat untuk pemosisi elastik terdiri dari elemen-elemen CONTACT52 ANSYS yang disusun sejajar. Nodal-nodal dipilih di dalam area kontak pemosisi dan disalin tegak lurus terhadap permukaan pemosisian. Tiap nodal yang

terpilih dihubungkan dengan nodal hasil salinan dengan elemen CONTACT52.



- i = jumlah elemen ke- i
- N = jumlah elemen total
- μ = koefisien gesek statis
- k_N = kekakuan normal total pemosisi, $k_{Ni} = k_N / N$
- k_S = kekakuan tangensial total pemosisi, $k_{Si} = k_S / N$

Gambar 2. Elemen CONTACT52 ANSYS yang disusun sejajar, digunakan untuk memodelkan kontak area elastik

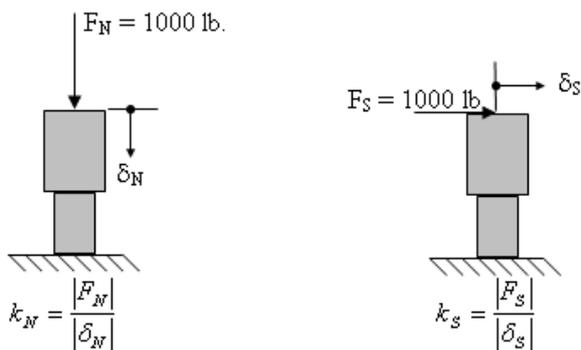
Gambar 2 menunjukkan model area kontak dengan elemen pegas berganda yang disusun sejajar. Penting untuk dicatat bahwa pengguna dibatasi oleh jumlah nodal yang ada dalam area kontak ketika menempelkan elemen CONTACT52. Ada kemungkinan bahwa jumlah elemen dalam memodelkan tiap pemosisi akan berbeda. Sehingga, kekakuan normal dan tangensial elemen yang dijelaskan dalam serangkaian konstanta real juga akan bervariasi. Untuk alasan ini, serangkaian konstanta real berganda harus dibuat untuk elemen CONTACT52, dan kemudian dinilai ketika membuat elemen dalam sistem koordinat lokal.

Tabel 2 menyajikan dua jenis pemosisi dan pemodelannya untuk tiap jenis kontak. *Adjustable locating button* memiliki area kontak yang relatif kecil sehingga cukup dimodelkan dengan kontak titik. *Rest button* memiliki area kontak yang lebih besar dan dapat dimodelkan baik dengan elemen pegas tunggal (kontak titik elastik) maupun pegas berganda yang disusun sejajar (kontak area elastik). Pemosisi diambil dari Carr Lane Manufacturing Co. (<http://www.carrlane.com>)

Tabel 2. Pemodelan Pemosisi

Jenis Pemosisi	Gambar	Nama Pemosisi	Jenis Kontak	Model	Lokasi dalam LCS
Spherical		Adjustable Locating Button	Kontak Titik Rigid	Fixed Node	0,0,0
			Kontak Titik Elastik	Pegas Tunggal	0,0,0
Planar		Rest Button	Kontak Titik Rigid	Fixed Node	0,0,0
			Kontak Titik Elastik	Pegas Tunggal	0,0,0
			Kontak Area Rigid	N Fixed Nodes	$0 \leq R \leq R_L, Z=0$
			Kontak Area Elastik	Pegas Berganda	$0 \leq R \leq R_L, Z=0$

Dalam Gambar 3, metode untuk memperoleh kekakuan normal dan tangensial pemosisi ditunjukkan. Beban titik 1000 lb diterapkan di pusat atas model pemosisi, tegak lurus terhadap area kontak untuk menentukan kekakuan normal. Beban titik 1000 lb diterapkan menyinggung terhadap area kontak pemosisi untuk menentukan kekakuan tangensial pemosisi. Kekakuan-kekakuan ini yang dibagi dengan jumlah total pegas ditentukan untuk tiap elemen pegas CONTACT52, dalam pengaturan konstanta real.



Gambar 3. Kekakuan normal dan tangensial pemodelan pemosisi

KONTAK TITIK VS KONTAK AREA

Studi ini dilakukan untuk menentukan apakah elemen pegas berganda yang disusun sejajar (kontak area elastik) yang didistribusikan sepanjang area kontak dapat diganti dengan elemen pegas tunggal (kontak titik elastik). Secara praktis untuk FEA,

pemodelan kontak titik lebih mudah diterapkan. Hasil-hasil deformasi resultan maksimum, DMAX yang dihitung pada model benda kerja berbentuk balok geser yang disangga secara elastis dibandingkan untuk berbagai area kontak pemosisi yang berbeda yang tersedia secara komersial. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan elemen CONTACT52 tunggal maupun elemen CONTACT52 berganda yang disusun sejajar yang disediakan oleh ANSYS 9.0

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan apakah ada satu ambang harga perbandingan area permukaan benda kerja terhadap area kontak pemosisi yang dapat mengakibatkan perubahan yang signifikan dalam deformasi resultan maksimum dikarenakan pengaruh ukuran area kontak. Jika tidak ada perubahan yang signifikan, maka akan lebih mudah untuk memodelkan pemosisi sebagai kontak titik pada benda kerja dengan elemen tunggal CONTACT52.

Dalam Gambar 4 dapat diperoleh kesimpulan bahwa penentuan harga perbandingan area permukaan benda kerja terhadap area kontak adalah cukup penting dalam memodelkan kondisi batas, khususnya ketika mempertimbangkan apakah menggunakan elemen kontak tunggal ataukah elemen kontak berganda untuk memodelkan pemosisi. Pertimbangkan dua pemosisi, A dan B dengan area kontak A lebih kecil dibanding B, sedangkan benda kerja berukuran sama. Tiap pemosisi dimodelkan baik dengan elemen kontak titik maupun elemen kontak area. Dalam Gambar 4.(a) dan 4.(c), ditunjukkan benda kerja dengan pemosisi A, sedangkan dalam gambar 4.(b) dan 4.(d), ditunjukkan benda kerja dengan pemosisi B. Karena perbandingan area permukaan benda kerja terhadap area kontak lebih kecil untuk pemosisi B dibanding pemosisi A, diharapkan bahwa perbedaan antara dua hasil

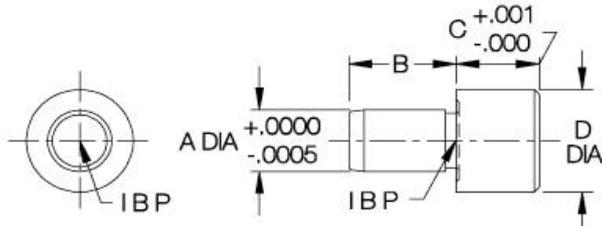
deformasi antara model 4.(b) dan 4.(d). akan lebih besar daripada perbedaan antara hasil deformasi model 4.(a) dan 4.(c). Oleh karena itu, akan tidak layak untuk memodelkan pemosisi B dengan kontak titik elastik. Sebaliknya, ketika perbandingan area permukaan benda kerja dengan area kontak besar, pemodelan dengan kontak titik elastik untuk memodelkan pemosisi A dapat diterima.

Untuk penelitian ini, lima pemosisi yang berjenis material AISI 1144 dipilih dari berbagai ukuran yang diambil dari katalog online *Carr lane Manufacturing*. Dalam penelitian ini, pemosisi dengan area kontak terbesar yang disediakan secara komersial adalah sebesar 0.785 in² (≈ 506.5 mm²). Nomor part dan dimensi pemosisi-pemosisi yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 3.

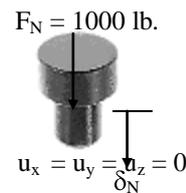
Tabel 3. Dimensi-dimensi Pemosisi

Nomor Part Pemosisi	A (in)	B (in)	C (in)	D (in)	Area Kontak Pemosisi, A _c (in ²)
CL-14-RB	0.1875	0.3750	0.5000	0.3750	0.1104
CL- 1-RB	0.2500	0.5000	0.5000	0.5000	0.1963
CL- 8-RB	0.3750	0.6250	0.7500	0.6250	0.3068
CL-16-RB	0.5000	0.6250	0.6250	0.8750	0.6013
CL-10-RB	0.6250	0.7500	0.5000	1.0000	0.7854

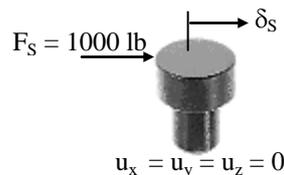
Keterangan:



Nilai kekakuan normal, k_N dan tangensial, k_S untuk tiap pemosisi ditentukan secara numerik melalui analisa elemen hingga (Gambar 5). Elemen SOLID92, 10-nodal tetrahedral digunakan untuk mengemesh model pemosisi. Semua derajat kebebasan translasi di dasar permukaan tiap pemosisi di-*constrain*. Beban titik 1000 lb diterapkan pada pusat atas pemosisi, tegak lurus terhadap area kontak untuk menentukan kekakuan normal, k_N . Beban titik 1000 lb diterapkan menyinggung terhadap area kontak pemosisi untuk menentukan kekakuan tangensial pemosisi, k_S . Nilai kekakuan ini kemudian dimasukkan ke elemen ANSYS CONTACT52 melalui konstanta real, R. Nilai kekakuan pemosisi disajikan dalam Tabel 4.



$$\text{Kekakuan normal, } k_N = \frac{F_N}{\delta_N}$$



$$\text{Kekakuan tangensial } k_S = \frac{F_S}{\delta_S}$$

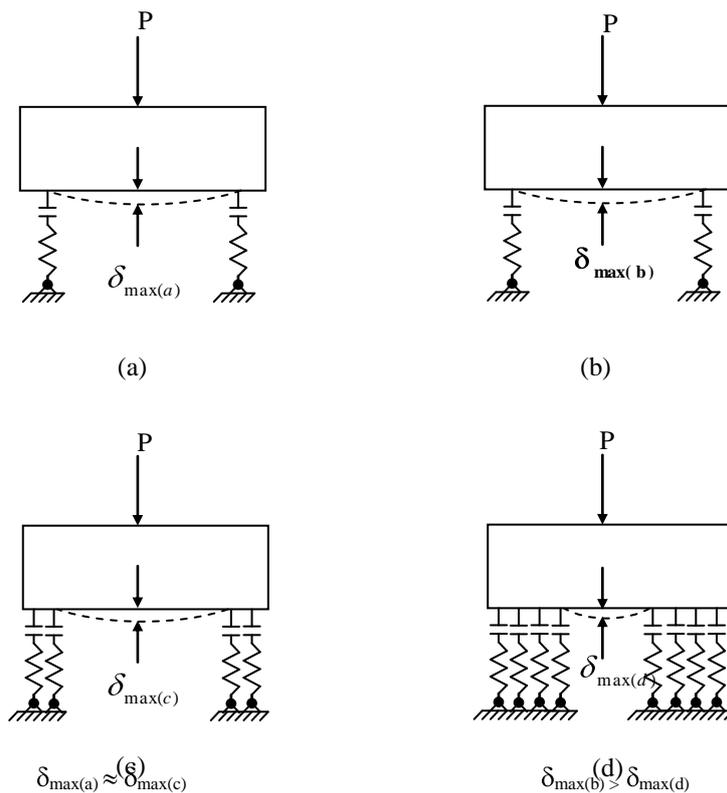
Gambar 5. Metode untuk menghitung kekakuan normal dan tangensial pemosisi

Dari Tabel 4 dapat disimpulkan bahwa pertama, kekakuan tangensial, k_S secara signifikan jauh lebih rendah harganya daripada kekakuan normal, k_N dan kedua, harga kekakuan meningkat seiring dengan meningkatnya area dan panjang pemosisi

Dalam studi ini, tiga pemosisi yang menyangga balok geser dimodelkan baik dengan elemen CONTACT52 tunggal (kontak titik elastik) maupun elemen CONTACT52 berganda yang disusun sejajar (kontak area elastik), ditempelkan ke nodal-nodal terpilih dalam area kontak pada balok berukuran 10 x 3 x 2 in³. Tabel 5 menyajikan letak titik koordinat tiap pemosisi dalam model balok. Gaya nodal 1000 lb diterapkan pada pusat atas balok secara tegak lurus. Gambar 6 menunjukkan balok geser sederhana yang disangga dengan *constraint* elastik. Sifat material benda kerja dan pemosisi disajikan dalam Tabel 6. Untuk ketelitian yang lebih tinggi, model balok dimesh dengan SOLID45 jenis *brick*. Sedangkan informasi model ANSYS yang lain yang digunakan dalam simulasi ini yang meliputi jenis elemen, kerapatan mesh, jumlah nodal dan elemen serta derajat kebebasan disajikan dalam Tabel 7.

Tabel 5. Koordinat Pemosisi pada Model Balok

Pemosisi	Koordinat		
	X (in)	Y (in)	Z (in)
1	8	0	2
2	5	0	1
3	2	0	2



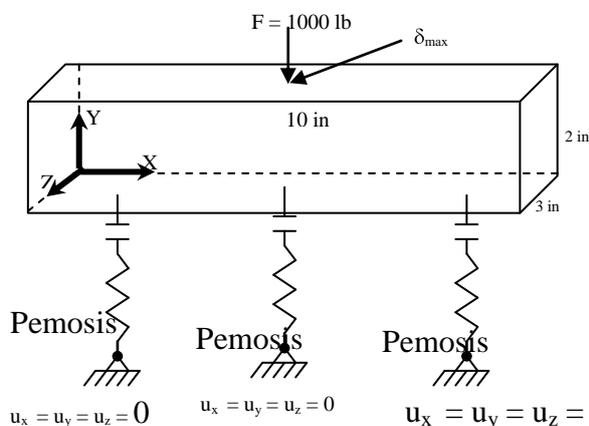
Gambar 4. Perbandingan area permukaan benda kerja dengan area kontak pemosisi. Gambar (a) dan (c) menggunakan pemosisi A, sedang (b) dan (d) menggunakan pemosisi B. ($A_{pA} < A_{pB}$).

Tabel 4. Hasil Perhitungan Kekakuan Pemosisi

Nomor Part Pemosisi	Jumlah Nodal	Jumlah Elemen	δ_N 10^{-3} (in)	k_N 10^5 (lb/in)	δ_s 10^{-3} (in)	k_s 10^3 (lb/in)
CL-14-RB	30,801	21,130	3.13	3.20	182.16	5.49
CL- 1-RB	44,665	31,372	2.27	4.41	75.41	13.26
CL- 8-RB	44,300	30,970	1.64	6.10	33.94	29.46
CL-16-RB	65,157	46,352	1.04	9.62	8.98	111.36
CL-10-RB	67,150	47,750	0.78	12.82	4.12	242.72

Tabel 6. Sifat Material Benda Kerja dan Pemosisi

	Material	E (psi)	ρ (lb/in ³)	ν	σ_y (psi)
BENDA KERJA	Aluminium 6061-T6	1.0×10^7	0.0975	0.334	3.99×10^4
Pemosisi	AISI 1144	2.9×10^7	0.284	0.295	9.7×10^3



Gambar 6. Model balok dengan kondisi batas elastik

Tabel 7. Informasi Model Elemen Hingga dalam ANSYS

Jenis model	: Balok elastik
Bentuk	: Kotak Persegi
Dimensi benda kerja	: 10 in x 3 in x 2 in
Jenis elemen benda kerja	: SOLID45 brick
Jenis mesh	: Mapped Hexagonal
Panjang sisi elemen	: 0.15 in.
Jumlah nodal	: 21,420
Jumlah elemen	: 18,772
Jumlah elemen kontak	: 3
Jenis elemen kontak	: CONTAC52

Tabel 8 menyajikan hasil-hasil simulasi berupa persentase perbedaan hasil deformasi resultan maksimum antara dua model kontak untuk tiap pemosisi. Deformasi resultan maksimum terjadi pada titik diterapkannya beban seperti diperlihatkan pada Gambar 6. δ_{pmax} adalah deformasi resultan maksimum untuk model kontak titik elastik dan δ_{Amax} adalah deformasi resultan maksimum untuk model kontak area sirkuler elastik. A_b adalah area permukaan benda kerja dan A_p adalah area kontak pemosisi.

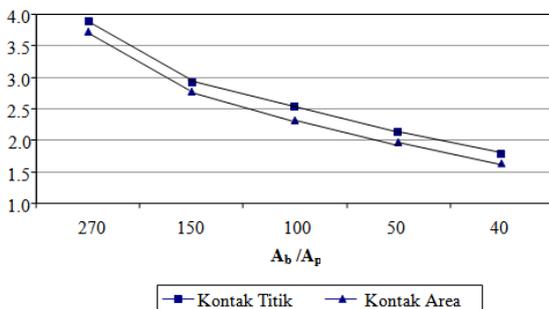
Tabel 8. Hasil Simulasi Deformasi Resultan Maksimum

Nomor Part Pemosisi	A_b/A_p	$\delta_{pmax} 10^{-3}$ (in)	$\delta_{Amax} 10^{-3}$ (in)	E
CL-14-RB	270	3.81	3.71	2.60
CL- 1-RB	150	2.98	2.84	4.70
CL- 8-RB	100	2.53	2.34	7.50
CL-16-RB	50	2.17	1.97	9.20
CL-10-RB	40	2.03	1.82	10.30

Keterangan:

$$E = \frac{\delta_{pmax} - \delta_{Amax}}{\delta_{pmax}} \times 100\%$$

Perpindahan ($\times 10^{-3}$ in)



Gambar 7. Deformasi resultan maksimum vs perbandingan area permukaan benda kerja dengan area kontak pemosisi

Dari Gambar 7 diperoleh kesimpulan bahwa hasil deformasi resultan maksimum tidak berubah secara signifikan antara model elemen kontak tunggal (kontak titik elastik) dengan elemen kontak berganda (kontak area elastik). Perbedaan dalam orde sepersepuluh ribu inch secara signifikan tidak mempengaruhi hasil analisis untuk menentukan ketelitian pemesinan. Persentase perbedaan hasil deformasi resultan maksimum antara dua model disajikan dalam Tabel 8. Selain lebih mudah diterapkan, kontak titik elastik lebih konservatif karena menghasilkan deformasi yang lebih besar dan lebih sedikit kemungkinan memberikan solusi yang salah untuk desain fixture yang optimum.

Pada penelitian ini, untuk memperkuat kesimpulan yang diperoleh dari Tabel 8 juga ditampilkan Tabel 9 yang merangkum data waktu komputasi yang dihitung oleh ANSYS untuk setiap kasus simulasi. Waktu komputasi adalah waktu yang diperlukan oleh ANSYS untuk melakukan sejumlah iterasi pada modul *solution*. Dari Tabel 9 ini diperoleh informasi bahwa proses pemecahan masalah dengan memakai kontak area elastik lebih banyak membutuhkan waktu komputasi dibanding dengan kontak titik elastik. Walaupun selisih waktu komputasi antar-model sangat kecil ($< 1\%$), namun berdasarkan pengalaman peneliti untuk membuat model elemen pegas berganda pada model balok membutuhkan lebih banyak waktu (non-komputasi) dibanding dengan elemen pegas tunggal karena memiliki tingkat kesulitan yang lebih tinggi.

Tabel 9. Waktu Komputasi untuk Tiap Pemosisi

Nomor Part Pemosisi	Waktu Komputasi (menit)		$\frac{T_{EB} - T_{ET}}{T_{EB}} \times 100\%$
	Kontak Area, T_{EB}	Kontak Titik, T_{ET}	
CL-14-RB	27	19	30
CL- 1-RB	28	20	29
CL- 8-RB	29	21	28
CL-16-RB	30	22	27
CL-10-RB	31	23	26

Dengan demikian, berdasarkan data dari Tabel 8 dan 9 diperoleh kesimpulan bahwa kontak titik elastik cukup sesuai untuk memodelkan pemosisi elastik ketika perbandingan area permukaan benda kerja dengan area kontak pemosisi ≥ 40 . Selain lebih menghemat waktu komputasi, prediksi deformasi benda kerja dengan kontak titik juga tidak terlalu berbeda jauh dibanding dengan kontak area ($\leq 10\%$).

KESIMPULAN

Dalam studi ini, model elemen hingga dikembangkan untuk mencari pemodelan elemen fixture, pemosisi. Dari dua pemodelan yang dikembangkan yaitu kontak titik dan kontak elastik, diperoleh kontak titik elastik dapat dipertimbangkan

sebagai model pemosisi dalam desain fixture. Selain lebih efisien, kontak titik elastik dapat memprediksi besarnya deformasi benda kerja dengan hasil yang tidak berbeda dengan kontak area elastik terutama untuk rasio area benda kerja dengan pemosisi yang lebih besar dari 40.

DAFTAR PUSTAKA

1. 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.
2. Carr Lane Manufacturing Company (2006) Online Catalog. Carr Lane Manufacturing Company, St. Louis, MO. <http://www.carrlane.com/>.
3. Cai W. Hu SJ, Yuan JX. (1996), Deformable sheet metal fixturing: principles, algorithms, and simulations, *Transaction ASME Journal Of Engineering For Industry* **118**, 318-324.
4. Kashap, S., DeVries, W.R. (1999), Finite element analysis and optimization in fixture design, *Structural. Optimization.* **18**, 193 – 201.
5. Lee, J.D., Haynes, L.S. (1987), Finite element analysis of flexible fixture system, *Transaction ASME Journal Of Engineering For Industry* **109**, 134 -139.
6. 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.
7. Siebenaler, Shane P., Melkote, S.N. (2006), Prediction of workpiece deformation in a fixture system using the finite element method, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **46**, 51- 58..
8. Wardak, Khaled. (2001), Optimal fixture design for drilling through deformable plate workpieces—part 1: model formulation, *Journal of Manufacturing System* **20**, 23 – 21.