

PEMODELAN PEMESINAN UNTUK PREDIKSI DEFORMASI BENDA KERJA DALAM SISTEM FIXTURE DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Mohammad Tauvqiirrahman¹⁾

Abstract

Pengetahuan deformasi elastik benda kerja akibat pemesinan dalam sistem fixture-benda kerja merupakan hal yang penting dalam memprediksi penyimpangan permukaan hasil pemesinan dan analisis stabilitas sistem fixture-benda kerja. Pemodelan elemen hingga yang selama ini ada pada umumnya mengabaikan beban pemesinan dalam desain sistem fixture-benda kerja.

Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga untuk memodelkan beban pemesinan dalam sistem fixture-benda kerja. Berbagai pemodelan elemen hingga untuk dua operasi pemesinan yaitu penggurdian dan pengefreisan dikembangkan untuk dicari pengaruhnya terhadap deformasi maksimum benda kerja dalam sistem fixture-benda kerja. Dengan demikian dapat dipilih pemodelan pemesinan yang paling sesuai untuk desain sistem.

Untuk sistem fixture-benda kerja yang dianalisa dalam studi ini, diperoleh kesimpulan bahwa pemodelan torsi, gaya aksial, dan gaya transversal untuk keperluan desain sistem fixture adalah perlu dipertimbangkan untuk menjamin ketelitian hasil pemesinan. Gaya aksial dimodelkan dengan gaya titik tunggal pada suatu nodal. Begitu juga dengan gaya transversal yang dimodelkan dengan gaya titik tunggal dengan orientasi arah yang berbeda pada nodal yang sama. Torsi dimodelkan dengan gaya-gaya tangensial yang bekerja pada nodal-nodal yang menyinggung keliling lingkaran kontak pahat dengan diameter tertentu.

Kata kunci: penggurdian, pengefreisan, deformasi maksimum benda kerja (DMAX), metode elemen hingga

PENDAHULUAN

Fixture dalam pemesinan digunakan untuk memosisikan benda kerja dan membatasi perpindahan benda kerja selama proses pemesinan. Untuk menjamin bahwa benda kerja diproses menurut dimensi dan toleransi yang telah ditentukan, benda kerja diletakkan dan dicekam. Mengurangi deformasi benda kerja akibat pemotongan dalam pemesinan adalah hal yang penting untuk ketelitian hasil pemesinan.

Proses manufaktur meliputi operasi yang secara intensif mempergunakan pemerkakasan, dimana pen-*fixture-an* merupakan aspek penting pemerkakasan dan mempengaruhi kualitas, biaya, dan waktu siklus produksi secara signifikan. Pada umumnya, fixture dirancang dan dikembangkan dengan cara *trial and error*. Cara ini cukup mahal dan menghabiskan banyak waktu. Selain itu, kualitas produk sering dikorbankan ketika kemampuan pemegang benda kerja berupa fixture sulit diperkirakan. Hampir 40% komponen yang ditolak adalah dikarenakan kesalahan dimensi benda kerja yang disebabkan desain fixture yang buruk [3].

Oleh karena itu, banyak peneliti melakukan penelitian dalam bidang pemerkakasan fixture yang fleksibel serta desain fixture berbasis komputer (CAFD, *Computer Aided Fixture Design*). Penerapan hasil penelitian ini secara signifikan telah mengurangi *lead time* dan biaya produksi dalam proses produksi.

Meskipun beberapa penelitian tentang desain fixture dengan metode elemen hingga telah dilakukan, namun pemodelan pemesinan untuk penggurdian dan pengefreisan belum dikembangkan secara menyeluruh

Desain fixture mengasumsikan beban pemesinan yang diterapkan terkonsentrasi. Dalam hampir semua kasus, torsi pahat potong yang menghasilkan kecenderungan rotasi benda kerja tidak dipertimbangkan. Tabel 1 merangkum berbagai pustaka yang dilakukan dalam bidang desain fixture dengan metode elemen hingga.

Tabel 1. Tinjauan Pustaka Model Pemesinan

Pustaka	Model Pembebanan	
	Penggurdian	Pengefreisan
Lee dan Haynes (1987)	TD	Beban aksial, Beban transversal
Pong <i>et al.</i> (1993)	Beban aksial	TD
Trappey <i>et al.</i> (1995)	Beban aksial	Beban aksial, Beban transversal
Cai <i>et al.</i> (1996)	Beban aksial	Beban aksial, Beban transversal
Kashyap dan DeVries (1999)	Beban aksial	Beban aksial, Beban transversal
Wardak (2001)	Beban aksial	TD
Amaral (2005)	Beban aksial, Torsi	Beban aksial, Beban transversal, Torsi

Keterangan:

TD : Tidak dijelaskan

TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. mengkaji pengaruh beban pemesinan terhadap deformasi maksimum benda kerja;
2. mengembangkan pemodelan proses penggurdian dan pengefreisan dengan metode elemen hingga untuk keperluan desain sistem fixture-benda kerja.

¹⁾ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

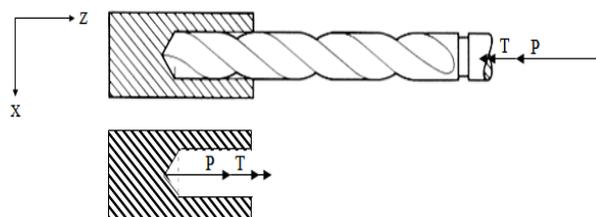
Pada penelitian ini, representasi beban pemesinan dikembangkan. Model pemesinan yang dikembangkan dalam studi ini meliputi torsi, gaya aksial, dan gaya transversal untuk proses penggurdian dan pengefreisan. Beban yang terdistribusi dan terkonsentrasi juga dipertimbangkan dalam studi ini, dimana pada hampir semua penelitian terdahulu gaya pemesinan hanya dimodelkan sebagai beban titik tunggal.

Tujuan penelitian ini memang tidak untuk secara akurat memodelkan proses pemesinan, melainkan untuk menerapkan torsi dan gaya beban yang dipindahkan ke benda kerja selama pemesinan untuk menentukan reaksi pada kondisi batas benda kerja selama pemesinan. Hasil yang diinginkan dari pemodelan pembebanan adalah kecenderungan rotasi dari torsi pahat potong yang diterapkan, serta translasi, dikarenakan pemakanan aksial terhadap benda kerja dan gerakan transversal meja kerja dalam pengefreisan.

PENGEMBANGAN MODEL

Penggurdian

Dalam penggurdian, pahat potong putar silinder digunakan. Pahat ini memiliki satu atau lebih sisi potong. *Flute* yang ada bisa lurus maupun heliks. Jenis pahat gudi yang paling umum adalah *twist drill*, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Pahat gudi ini mempunyai dua mata potong dan dua *flute* sepanjang sisi pahat. Gaya dalam operasi penggurdian meliputi torsi, T untuk menghasilkan rotasi pahat yang akan dipindahkan ke benda kerja; serta beban aksial, P dikarenakan pemakanan. Gaya dalam penggurdian adalah merupakan fungsi waktu dan posisi karena sisi potong pahat tidak mengalami kontak yang konstan dengan benda kerja pada lokasi tertentu. Gaya pemotongan meningkat secara monoton selama penetrasi pahat dan kemudian mendekati keadaan tunak. Fluktuasi dalam gaya pemotongan terjadi karena distribusi pemakanan pahat potong selama rotasi. Dalam studi ini, torsi dan gaya aksial (*trust*) selama pemakanan diasumsikan konstan, karena penetrasi awal pahat tidak dipertimbangkan.

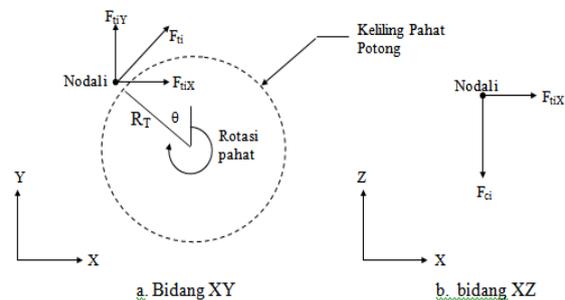


Gambar 1. Pahat gudi dua *flute* dengan reaksi pada benda kerja

Penggurdian dimodelkan sebagai beban titik tunggal yang diterapkan tegak lurus terhadap permukaan benda kerja. Model penggurdian yang dikembangkan dalam studi ini meliputi suatu beban

aksial dan torsi yang diterapkan pada permukaan benda kerja pada lokasi kontak pahat potong.

Gambar 2 menunjukkan model beban untuk penggurdian. Torsi dimodelkan dengan gaya-gaya tangensial yang ditempatkan pada radius terluar area kontak pahat potong. Gaya kopel tangensial diuraikan menjadi komponen global X dan Y. Beban aksial dimodelkan dengan menerapkan gaya-gaya pada nodal-nodal yang ada dalam arah global Z. Nodal i sedikit digeser dari keliling pahat potong. Karena suatu nodal tidak bisa berada secara cermat pada lokasi yang ditentukan oleh R , θ , dan Z , maka nodal yang paling dekat dengan pusat LCS (*Local Coordinate System*) dipilih dan gaya-gaya diterapkan sebagai beban titik dengan komponen global X, Y, dan Z. Pengguna dapat mengurangi jarak antara lokasi koordinat yang ditentukan dan nodal yang ada dengan meningkatkan kerapatan mesh. Nodal-nodal dipilih pada interval θ di dekat keliling pahat potong. Pada tiap nodal yang terpilih, komponen global X dan Y gaya kopel tangensial, F_{ti} serta komponen gaya aksial, F_{ci} diterapkan. Torsi yang diterapkan sama dengan jumlah gaya tangensial dikali jari-jari pahat potong, R_T . F_{tiX} dan F_{tiY} merupakan komponen global X dan Y gaya tangensial, F_{ti} . F_{ci} sama dengan beban aksial total, F_c dibagi dengan jumlah nodal dimana gaya ini diterapkan. Beban-beban diterapkan pada nodal-nodal pada radius, R_T dari pusat keliling pahat potong dan pada kenaikan sudut, θ .



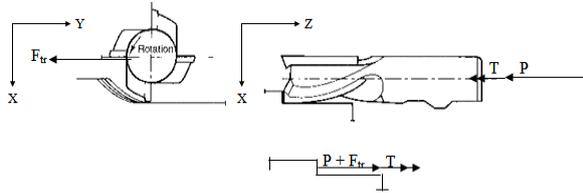
Gambar 2. Pemodelan penggurdian

Model yang disederhanakan menggunakan suatu gaya titik tunggal yang tegak lurus dengan permukaan benda kerja untuk memodelkan beban aksial pahat potong dan suatu kopel untuk memodelkan torsi yang diterapkan. Studi ini dilakukan untuk menentukan apakah gaya titik berganda yang diterapkan sepanjang keliling pahat potong memang suatu keharusan atau tidak untuk memodelkan beban aksial.

Pengefreisan

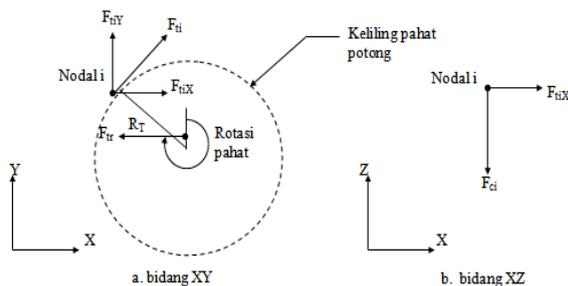
Pengefreisan ujung (*end milling*) menggunakan pahat putar bermata potong banyak sebagai pahat potongnya, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3, dengan torsi dan beban yang diterapkan pada benda kerja. Pergerakan geram terjadi secara terus-menerus

dengan menggabungkan gerakan berputar pahat potong dan gerakan linear benda kerja. Tiap mata potong pada pahat bertindak sebagai pemotong titik-tunggal ketika menyentuh benda kerja.



Gambar 3. Pahat freis *end-mill* empat *flute* dengan reaksi pada benda kerja

Pembebanan dalam proses pengefreisan meliputi gaya aksial, gaya transversal dikarenakan pemakanan linear benda kerja, dan torsi untuk menghasilkan rotasi pahat yang dipindahkan ke benda kerja. Gambar 4 adalah model pembebanan untuk pengefreisan *end-mill*. Model pengefreisan *end-mill* sama seperti halnya model pengguridian dengan penambahan beban transversal ($F_{tr} \neq 0$). Dalam pengefreisan *end-mill*, pembebanan merupakan fungsi waktu karena gigi ditempatkan pada suatu interval pada pahat potong. Karena tujuan analisis adalah untuk menentukan deformasi resultan maksimum dan tegangan-tegangan yang ekuivalen dalam benda kerja selama operasi dan penetrasi awal pahat tidak dipertimbangkan, maka hanya besar beban keadaan tunak rata-rata yang digunakan. Dalam penelitian ini, gaya pemotongan diterapkan sebagai beban tunak. Dalam penelitian FEA sebelumnya, gaya-gaya pengefreisan umumnya dimodelkan sebagai beban titik tunggal dan torsi diabaikan. Beban aksial dikarenakan pemakanan dapat diterapkan baik sebagai beban titik berganda di sekeliling pahat potong maupun beban titik. Beban transversal, F_{tr} diterapkan sebagai beban titik tunggal pada pusat pahat.



Gambar 4. Pemodelan pengefreisan

PENGEMBANGAN MODEL UNTUK MEH

Dua proses pemesinan yang dipertimbangkan dalam penelitian ini adalah pengguridian dan pengefreisan. Ada delapan pemodelan beban yang dikembangkan seperti tampak pada Tabel 2, yaitu empat untuk pengguridian dan empat untuk pengefreisan. Pengguridian terdiri dari beban aksial dan torsi. Sedangkan pengefreisan terdiri dari beban aksial,

torsi, dan beban transversal. Garis putus-putus yang ada dalam Tabel 2 menggambarkan diameter keliling pahat potong. Beban aksial pada tiap kasus beban dapat dimodelkan baik dengan menggunakan gaya titik berganda yang didistribusikan sepanjang keliling pahat maupun dengan gaya titik tunggal pada pusat lingkaran pahat. Demikian halnya dengan torsi dimodelkan baik sebagai gaya titik berganda yang menyinggung keliling pahat maupun sebagai kopel sederhana. Dalam studi pembebanan ini, pengaruh penerapan torsi sebagai kopel versus gaya tangensial berganda pada keliling pahat tidak dipertimbangkan, karena torsi resultan yang dihasilkan masing-masing model pada pusat keliling pahat akan sama. Beban transversal diterapkan untuk memodelkan pemakanan linear pahat freis. Oleh karena itu, model pengguridian yang dikembangkan dalam studi ini dapat dipertimbangkan sebagai kasus pengefreisan terbatas, dimana gaya transversal, $F_{tr} = 0$, yang terjadi karena tidak adanya pemakanan linear.

Tabel 2. Model Beban untuk Pengguridian dan Pengefreisan

Operasi Pemesinan	Model Pembebanan			
	Beban Aksial Titik Berganda dan Torsi terdistribusi	Beban Aksial Titik Tunggal dan Torsi terdistribusi	Beban Aksial Titik Tunggal dan Satu Kopel	Beban Aksial Titik Tunggal dan Tanpa Torsi
Pengguridian				
Pengefreisan				

TAHAPAN PENELITIAN

Mengacu pada Tabel 2, ada dua tahapan penelitian yang dilakukan, yaitu sebagai berikut :

- (1) Studi pemodelan gaya aksial pahat dengan cara membandingkan pemodelan gaya titik berganda di sepanjang keliling pahat dengan pemodelan gaya titik tunggal yang diterapkan tegak lurus terhadap permukaan benda untuk menentukan kecenderungan besar deformasi benda kerja dalam proses pengefreisan maupun pengguridian;
- (2) Studi untuk menentukan perlu tidaknya pemodelan torsi dalam model pembebanan terhadap deformasi benda kerja. Arti pentingnya torsi yang diabaikan tergantung pada besarnya torsi yang diterapkan. Oleh karena itu beberapa torsi dengan besar yang berbeda akan diterapkan.

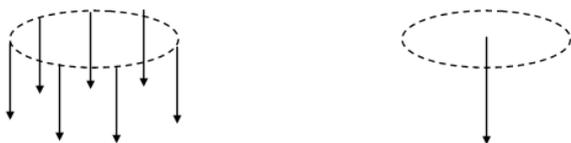
Semua tahapan penelitian dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga, ANSYS *Multiphysics* 9.0.

STUDI PEMODELAN GAYA AKSIAL

Pemodelan Gaya Aksial

Pembebanan dalam pemesinan dapat dimodelkan baik sebagai gaya titik tunggal maupun gaya titik berganda yang disusun sejajar. Tujuan penelitian ini adalah mencari pemodelan beban aksial untuk proses pengguridian dan pengefreisan dengan

cara menentukan kecenderungan besar deformasi benda kerja yang dihasilkan dengan membandingkan pemodelan gaya titik tunggal maupun gaya titik berganda yang disusun sejajar seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5. Selain itu, mungkin ada suatu ambang batas perbandingan diantara keduanya dimana diameter pahat potong yang besar tidak dapat secara akurat dimodelkan dengan gaya titik tunggal. Tujuan penelitian ini juga adalah untuk mencari berapa besarnya ambang tersebut.

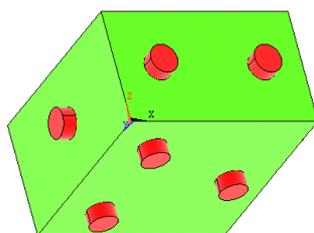


Gambar 5. Pemodelan gaya aksial: Gaya titik berganda vs Gaya titik tunggal

Studi Simulasi Gaya Aksial

Dalam penelitian ini, keadaan tegangan lokal bukanlah bagian yang menjadi pusat pembahasan kecuali jika melebihi tegangan luluh material benda kerja. Sehingga hanya deformasi resultan maksimum saja yang dianalisa dalam penelitian ini. Sedangkan variabel yang digunakan hanyalah diameter keliling pahat potong. Jika tidak ada perubahan yang berarti dalam hasil deformasi resultan benda kerja untuk kisaran berbagai diameter pahat potong yang tersedia secara komersial, maka akan lebih mudah untuk memodelkan gaya aksial dengan model gaya titik tunggal.

Dalam studi ini, model balok yang digunakan berukuran 90 x 90 x 50 mm³. Balok disimulasikan berada dalam tata letak konfigurasi fixture 3-2-1 seperti ditunjukkan dalam Gambar 6. Koordinat masing-masing elemen fixture ditunjukkan dalam Tabel 3. Pemosisi yang digunakan berjenis planar dengan nomor part pemosisi CL-1 RB yang diambil dari katalog *Carrlane manufacturing*. Pencekam yang digunakan berjenis *push/pull* berbentuk silinder. Dengan demikian, baik pencekam maupun pemosisi dapat dimodelkan dengan silinder 3D untuk simulasi prediksi deformasi benda kerja. Jenis material elemen fixture dan benda kerja yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan oleh Tabel 4.



Gambar 6. Tata letak fixture 3-2-1 dan bentuk pemodelan elemen fixture yang digunakan. Pemosisi dan pencekam dimodelkan dengan silinder 3D

Tabel 3. Koordinat Pemosisi dan Pencekam dalam Model

Elemen Fixture	Koordinat		
	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)
Pemosisi 1	20	0	25
Pemosisi 2	70	0	25
Pemosisi 3	0	45	25
Pemosisi 4	20	20	0
Pemosisi 5	20	70	0
Pemosisi 6	70	45	0
Pencekam 1	45	90	25
Pencekam 2	90	45	25

Tabel 4. Sifat Material Benda Kerja dan Pemosisi

	Material	E (MPa)	ρ (Kg/m ³)	ν	σ_y (MPa)
Benda kerja	AISI 1212	2.0×10^5	7861	0.295	4.15×10^2
Elemen fixture	AISI 1144	2.0×10^5	7861	0.295	6.70×10^2

Beberapa diameter pahat potong yang tersedia di pasaran akan digunakan. Diameter pahat potong yang meliputi sebagian besar kisaran ukuran yang tersedia akan dipilih. Karena torsi yang diterapkan sama caranya baik untuk penggurdian maupun pengefreisan, maka torsi diabaikan dalam studi ini. Diameter maksimum 25 mm akan digunakan untuk menjamin kisaran diameter pahat potong yang umum digunakan.

Besarnya gaya aksial akan berbeda untuk tiap diameter pahat yang digunakan. Hal ini dikarenakan gaya aksial merupakan fungsi dari diameter pahat dan laju pemakanan. Sedangkan laju pemakanan itu sendiri dipengaruhi oleh besarnya diameter pahat untuk membuat fitur lubang yang dikehendaki. Sehingga dapat dikatakan besarnya gaya aksial tergantung pada diameter pahat potong. Informasi model elemen hingga sistem fixture-benda kerja untuk studi gaya aksial ini dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Informasi Model Elemen Hingga dalam ANSYS

Jenis model	: Balok
Dimensi benda kerja	: 90 x 90 x 50 mm ³
Nomor part pemosisi	: CL-1 RB
Jenis pencekam	: <i>Push/pull</i>
Jenis elemen balok	: SOLID45
Jenis elemen <i>fixture tip</i>	: SOLID92
Jenis mesh balok	: <i>mapped hexagonal</i>
Jenis mesh <i>fixture tip</i>	: <i>free</i>
Panjang sisi elemen balok	: 0.15 in.
SMRTSIZE untuk mesh	
Elemen fixture	: 1
Jumlah nodal	: 22,388
Jumlah elemen	: 16,907
Jumlah elemen kontak	: 8
Jenis elemen kontak	: CONTA174 dan TARGE170

Hasil dan Pembahasan

Tabel 6 menunjukkan hasil simulasi berupa deformasi resultan maksimum benda kerja (DMAX) yang dihasilkan antara dua bentuk model pembebanan aksial, yaitu gaya titik tunggal dan gaya titik berganda. Dalam tabel tersebut juga ditunjukkan perbandingan area antara A_b dengan A_T dimana A_b adalah area permukaan benda kerja dan A_T adalah luas area pahat berdiameter tertentu. Area permukaan benda kerja yang dimaksud adalah permukaan benda kerja yang mengalami proses pemesinan sehingga terjadi kontak antara benda kerja dengan pahat. Area ini berukuran $90 \times 90 \text{ mm}^2$. Rasio A_b/A_T ini akan digunakan untuk mengetahui berapa nilai rasio luas area permukaan benda kerja dengan luas area diameter pahat potong yang akan dijadikan dasar pemodelan gaya aksial tunggal.

Dari Tabel 6 dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan yang berarti untuk harga deformasi resultan maksimum benda kerja (DMAX) antara model aksial untuk gaya titik tunggal dengan gaya titik berganda. Perbedaan persentasi antara kedua model tersebut untuk berbagai kisaran diameter dari diameter pahat yang paling kecil (5 mm) hingga diameter pahat terbesar sekalipun (25 mm) relatif kecil, yaitu kurang dari 10 %. Dari data rasio A_b/A_T juga dapat diketahui bahwa pada rasio > 17 , perbedaan DMAX yang dihasilkan antara pemodelan gaya titik tunggal dengan gaya titik dapat diterima (≤ 1 mikron). Dengan kata lain, untuk berbagai ukuran diameter pahat dan benda kerja, bila rasio yang dihasilkan kurang dari 17, pemodelan gaya aksial tunggal patut untuk tidak dipertimbangkan dalam proses pemesinan yang memerlukan ketelitian produk tinggi karena bisa dinilai kurang representatif untuk memodelkan gaya aksial dibanding gaya aksial berganda yang mampu mendistribusikan gaya di sepanjang keliling diameter pahat diakibatkan perbedaan DMAX akan lebih kecil 1 mikron dari yang seharusnya. Dengan demikian, kesimpulan yang diperoleh adalah bahwa pemodelan gaya aksial dengan gaya titik tunggal dapat digunakan secara teliti bila rasio A_b/A_T kurang dari 17.

Tabel 6. Hasil Simulasi dua Model Gaya Aksial

Diameter Pahat, R_p (mm)	A_b/A_T	Gaya Aksial (N)	DMAX (μ mm)		Perbedaan (%)
			Gaya Titik Tunggal	Gaya Titik Berganda	
5	400	650	2.8	2.8	0.0
10	100	1500	2.8	3.0	6.6
15	46	2600	4.8	5.2	7.7
20	26	3800	6.9	7.5	8.0
25	17	5100	9.3	10.3	9.7

STUDI PEMODELAN TORSI

Pemodelan Torsi

Tujuan studi ini adalah untuk menentukan perlu tidaknya pemodelan torsi dalam memprediksi deformasi benda kerja. Dalam bagian studi pemodelan gaya aksial, telah ditarik kesimpulan bahwa pemodelan dengan menggunakan beban aksial titik tunggal dapat diterima. Dalam penggurdian maupun pengefreisan, model beban aksial dan torsi yang telah dijelaskan akan digunakan. Oleh karena itu, hanya ada dua perbandingan yang dibuat untuk tiap simulasi, yaitu :

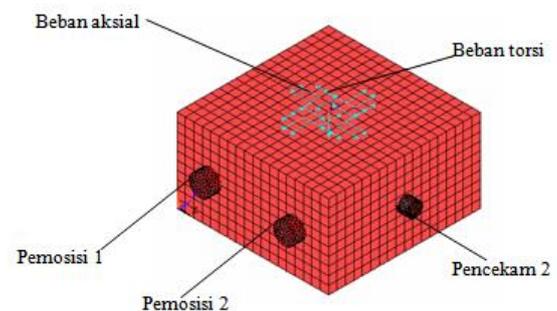
- (1) Penggurdian dengan model beban aksial titik tunggal dengan torsi vs model beban aksial titik tunggal tanpa torsi;
- (2) Pengefreisan dengan model beban aksial titik tunggal, beban transversal, dan torsi vs model beban aksial titik tunggal, beban transversal, dan tanpa torsi.

Studi Simulasi Torsi

Dalam studi ini, model balok yang digunakan dalam studi pemodelan aksial di bagian sebelumnya kembali digunakan. Perbedaannya adalah material benda kerja yang digunakan pada studi torsi ini adalah aluminium 6061-T6. Sifat material ini dapat dilihat pada Tabel 7. Pemodelan gaya aksial dengan gaya titik tunggal digunakan. Diameter pahat dipilih secara sembarang, yaitu 20 mm. Beban aksial konstan, F_c sebesar 3,800 N diterapkan pada satu nodal di pusat atas balok. Untuk pengefreisan, beban transversal konstan, F_{tr} sebesar 1,500 N diterapkan pada nodal yang sama. Gambar 7 menggambarkan model elemen hingga balok dengan kondisi batas dan beban yang diterapkan dalam ANSYS 9.0.

Tabel 7. Sifat Material Benda Kerja dan Pemosisi

	Material	E (MPa)	ρ (Kg/m ³)	ν	σ_y (MPa)
Benda kerja	Aluminum 6061-T6	6.9×10^{10}	2700	0.334	2.75×10^8
Elemen fixture	AISI 1144	2.0×10^5	7861	0.295	6.70×10^2



Gambar 7. Model benda kerja dalam tata letak fixture 3-2-1 dengan kondisi batas dan beban

Pada simulasi kali ini, untuk tiap proses penggurdian dan pengefreisan, empat nilai torsi, T akan digunakan, yaitu 0 N-mm (atau tanpa torsi), 5,000 N-mm, 10,000 N-mm, dan 15,000 N-mm. Tujuannya adalah untuk mengetahui kecenderungan pengaruh torsi yang nilainya dibuat meningkat secara drastis terhadap besarnya deformasi benda kerja (D_{MAX}).

Hasil dan Pembahasan

Hasil-hasil simulasi disajikan dalam Tabel 8. Dari tabel ini dapat disimpulkan bahwa torsi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap deformasi resultan maksimum benda kerja (D_{MAX}). Makin besar torsi yang diterapkan maka makin besar pula deformasi benda kerja yang dihasilkan. Perbedaan besarnya deformasi benda kerja antara model dengan torsi dan model tanpa torsi bila dipersentasikan diperoleh kisaran harga sebesar 10-90 % baik untuk penggurdian maupun pengefreisan. Meskipun seluruh kisaran besar torsi yang mungkin bisa diterapkan tidak diakomodasi oleh studi ini, dapat ditarik kesimpulan bahwa pengabaian torsi dalam model elemen hingga tidak dapat diterima karena prediksi deformasi benda kerja akan menjadi tidak valid sehingga optimisasi desain tata letak fixture akan kurang berguna.

Tabel 8. Hasil Simulasi Studi Torsi

Jenis Pemesinan	Kasus Beban		D _{MAX} (μ mm)	E (%)
	F _c (N) F _{tr} (N)	T (N-mm)		
Penggurdian	F _c = 3,800 F _{tr} = 0	0	19.2	-
		5,000	21.1	10
		10,000	29.1	52
		15,000	37.0	93
Pengefreisan	F _c = 3,800 F _{tr} = 1,500	0	21.5	-
		5,000	24.7	15
		10,000	33.3	55
		15,000	41.6	93

Keterangan:

E : Penyimpangan

$$: \left| \frac{\delta_{\max}(T_0) - \delta_{\max}(T_n)}{\delta_{\max}(T_0)} \times 100\% \right|$$

$\delta_{\max}(T_0)$: Deformasi resultan maksimum benda kerja, D_{MAX} pada model tanpa torsi.

$\delta_{\max}(T_n)$: Deformasi resultan maksimum benda kerja, D_{MAX} pada model dengan torsi dimana n adalah besarnya tingkatan torsi

Tabel 8 ini juga menunjukkan bahwa pemodelan gaya transversal pada proses pengefreisan juga perlu dipertimbangkan, mengingat perbedaan antara dimodelkannya gaya transversal dengan diabaikannya

gaya transversal berkisar antara 10-11 % pada berbagai kisaran torsi pada besar yang sama. Dengan demikian, untuk studi implementasi optimisasi desain tata letak fixture pemodelan penggurdian akan memperhitungkan gaya aksial dan torsi, sedangkan pengefreisan selain gaya aksial dan torsi, juga akan memperhitungkan gaya transversal.

KESIMPULAN

Dalam desain sistem fixture-benda kerja, pemodelan proses pemesinan perlu dipertimbangkan karena dapat mempengaruhi prediksi deformasi benda kerja. Penggurdian dimodelkan dengan gaya aksial dan torsi. Sedangkan pengefreisan dimodelkan dengan gaya aksial, torsi, dan gaya transversal. Dalam studi ini, semuanya dipertimbangkan dalam model.

Gaya aksial dimodelkan dengan gaya titik tunggal untuk rasio yang besar (>17) antara area permukaan benda kerja dengan area kontak pahat. Gaya transversal dimodelkan dengan gaya titik tunggal sama seperti halnya gaya aksial dengan orientasi arah yang berbeda pada nodal yang sama. Torsi dimodelkan dengan gaya-gaya tangensial yang bekerja pada nodal-nodal yang menyinggung keliling lingkaran kontak pahat dengan diameter tertentu

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.carllane.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.