

ALGORITMA PENENTUAN TITIK PENCEKAMAN *HOLE-BASED MODULAR FIXTURE*

Josef Hernawan Nudu¹, Isa Setiasyah Toha²

¹) Program Studi Teknik Industri, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
Jl. Babarsari 43, Yogyakarta 55281

Email: josef@mail.uajy.ac.id ; josef_nudu@yahoo.com

²) Program Studi Teknik Industri, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa 10, Bandung 40132
Email: isast@lspitb.org

ABSTRAK

Makalah ini memaparkan algoritma *fixturing* untuk penentuan titik pencekaman *fixture* modular jenis *hole* yang dikembangkan dari algoritma Ariastuti *et al.* Algoritma Ariastuti *et al.* dapat digunakan untuk menentukan titik pencekaman *dedicated fixture* dan *modular fixture* jenis *slot*, namun tidak dapat diterapkan secara langsung pada *modular fixture* jenis *hole*. Algoritma usulan menambahkan satu tahapan berupa penyesuaian koordinat lokator dan klem yang bersesuaian dengan posisi lubang pada plat dasar *modular fixture* jenis *hole*. Algoritma yang diusulkan berbeda dalam hal penentuan besar dan titik tangkap gaya potong ekuivalen, serta penentuan titik pencekaman yang dipilih. Penelitian dibatasi pada *fixturing* benda kerja prismatik yang memiliki *feature hole*, *blind hole*, *pocket*, *slot*, *blind slot*, *step*, dan *blind step* untuk pemesinan pada mesin *milling* vertikal. Fisibilitas *fixturing* ditentukan oleh kondisi kesetimbangan gaya selama proses pemesinan. Aplikasi algoritma usulan pada tiga buah benda uji hipotetis memberikan hasil yang setara dengan algoritma Ariastuti *et al.*; berupa kondisi *fixturing* fisibel atau tidak fisibel. Hasil kondisi *fixturing* yang fisibel adalah titik lokator dan klem yang bersesuaian dengan posisi susunan lubang pada plat dasar *fixture* modular untuk pemesinan benda kerja dalam satu kali *setup*. Algoritma yang dikembangkan belum mempertimbangkan kendala dimensi dan kekuatan elemen *fixture* serta deformasi.

Kata kunci: *fixture* modular, *fixturing*, titik pencekaman

ABSTRACT

This article illustrates fixturing algorithm for determining clamping point of hole-based modular fixture. The proposed algorithm is based on the algorithm developed by Ariastuti et al. The previous algorithm could be applied for determining clamping point of dedicated or slot-based modular fixture but it can not be applied directly for hole-based modular fixture. Conversion of locators' coordinate and clamping coordinate into coincident baseplate-coordinates and an approach for modeling the magnitude and action point of equivalent forces are proposed. This algorithm is designed for fixturing prismatic workpart having machining feature(s) being processed on a vertical milling machine. The machining features are hole, blind hole, pocket, slot, blind slot, step, and blind step. Three hypothetical worksamples were analyzed using Ariastuti's algorithm and this new algorithm. The result shows that both algorithms have the same properties in terms of feasible fixturing and unfeasible fixturing on a single setup. The new algorithm gives coordinates that coincide with holes of related baseplate in feasible fixturing. Forces equilibrium during machining is the only aspect being considered for feasibility analysis. Fixture elements' dimension, strength, and deformation have not been considered yet.

Keywords: *modular fixture fixturing, clamping point*

1. PENDAHULUAN

Setiap operasi manufaktur membutuhkan *fixture*. *Fixture* adalah alat bantu yang berfungsi memposisikan, memegang, dan menahan benda kerja selama proses produksi. *Fixture* dikategorikan menjadi *dedicated fixture* dan *flexible fixture*. *Dedicated fixture* digunakan pada suatu komponen atau *setup* tertentu, sedangkan *flexible fixture* digunakan pada beberapa komponen atau beberapa *setup*. *Dedicated fixture* lebih unggul pada aspek laju produksi, waktu *setup*, dan kepresisian pencekaman, sedangkan *flexible fixture* lebih unggul pada aspek biaya *fixturing* jangka panjang dan fleksibilitas sistem karena perancangan-pembuatan *fixture* yang lebih cepat serta biaya simpan-rawat lebih rendah.

Fixture dan *fixturing* menjadi topik yang penting karena pengaruhnya pada biaya dan performansi suatu sistem manufaktur. Biaya *fixturing* menggunakan *dedicated fixture* dapat mencapai 20% dari biaya investasi suatu *Flexible Manufacturing System (FMS)* (Bidanda dan Muralikrishnan, 1992). Biaya *dedicated fixture* yang tinggi pada *FMS* juga disebutkan oleh Nee *et al.* (1995). Menurut Bidanda dan Muralikrishnan (1992), penggunaan *flexible fixture* dapat mengurangi biaya *fixturing* sampai 80% dan menurunkan waktu perancangan-perakitan *fixture* hingga lima kali lebih cepat. Waktu perancangan-perakitan *flexible fixture* yang lebih cepat juga diuraikan oleh Siong *et al.* (1992). Salah satu jenis *flexible fixture* adalah *modular fixture* yang terdiri dari sistem *slot* dan sistem *hole* (Nee, *et al.*, 1995). Fleksibilitas sistem *hole* lebih rendah dibandingkan dengan model *slot*, namun keterulangan perakitannya lebih baik (Bidanda dan Muralikrishnan, 1992, Nee, *et al.*, 1995).

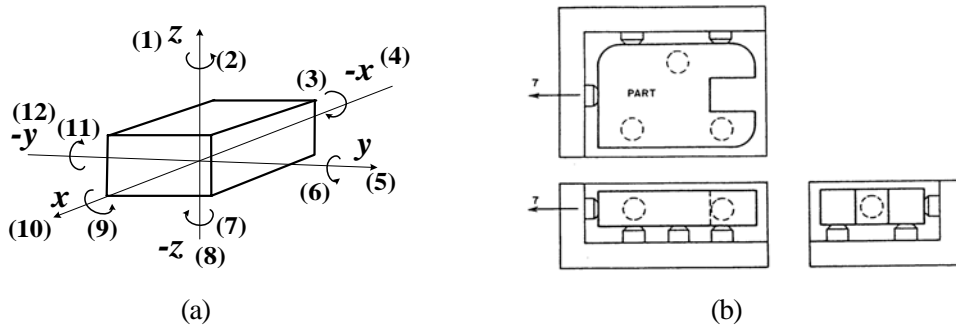
Fixturing adalah proses perancangan *fixture*. Tujuan *fixturing* adalah memperoleh *fixture* yang mampu memposisikan, memegang, dan mempertahankan posisi benda kerja agar proses manufaktur menghasilkan produk yang sesuai dengan spesifikasi. Lama perancangan dan kualitas *fixture* hasil rancangan sangat tergantung pada keahlian disainer *fixture*. *Fixturing* secara manual menjadi proses *trial and error* karena tidak ada metoda terstruktur untuk menganalisis susunan *fixture* pada proses perakitan *fixture* (Siong *et al.*, 1992). *Fixture* dan *fixturing* menjadi salah satu kendala untuk meningkatkan performansi sistem manufaktur terotomasi dan fleksibel (Sinreich dan Nelkenbaum, 2006). Untuk itu diperlukan suatu langkah terstruktur dalam *fixturing*.

Ariastuti *et al.* (1998) merumuskan algoritma penentuan titik-titik peletakan *support*, lokator sisi, dan klem untuk benda kerja prismatik yang diproses pada mesin *milling* vertikal. Model yang dikembangkan tidak mengacu pada suatu jenis *fixture* tertentu dan dapat diterapkan untuk *dedicated fixture* maupun *flexible fixture*. Algoritma ini kemudian dijadikan dasar pengembangan perancangan *fixture* berbantuan computer (Toha *et al.*, 1998). Hasil algoritma Ariastuti *et al.* (1998) yang berupa koordinat peletakan *support*, lokator sisi, dan klem tidak dapat diterapkan secara langsung pada *fixture* modular jenis *hole* karena tidak memperhatikan kendala susunan *hole* yang memiliki jarak tertentu (spasi) pada plat dasar.

Makalah ini membahas hasil penelitian berupa algoritma penentuan titik pencekaman untuk *fixture* modular jenis *hole*. Algoritma dikembangkan dari model Ariastuti *et al.* (1998) dengan menambahkan kendala berupa susunan *hole* pada landasan *fixture*. Algoritma usulan kemudian diuji dengan tiga buah benda kerja hipotetis dan hasilnya dibandingkan dengan algoritma Ariastuti *et al.* (1998).

2. PENGEMBANGAN MODEL

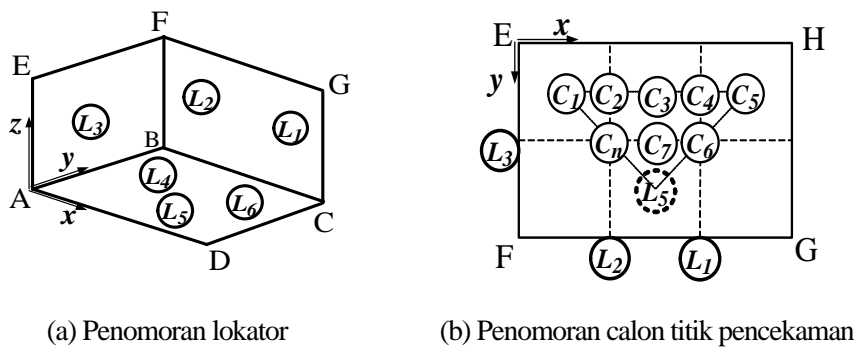
Fungsi *fixture* (memposisikan, memegang, dan menahan benda kerja selama proses produksi) dapat terpenuhi jika *fixture* dapat mengekang pergerakan benda dalam dua belas arah derajat kebebasan dan jumlah gaya-gaya dalam seluruh proses sama dengan nol. Gambar 1(a) menunjukkan dua belas derajat kebebasan benda dalam ruang.



Gambar 1. (a) Dua belas derajat kebebasan (b) Peletakan lokator (Hoffman, 1996)

Komponen *fixture* yang bersentuhan langsung dengan benda kerja adalah lokator dan klem. Klem dapat memberikan gaya aksi berupa gaya pengekaman sehingga dikategorikan sebagai komponen 'aktif', sedangkan lokator hanya mampu menahan gaya reaksi dan dikategorikan sebagai komponen 'pasif'. Peletakan enam buah lokator seperti pada Gambar 1(b) membuat *fixture* dapat menahan sembilan derajat kebebasan. Tiga derajat kebebasan lainnya ditahan dengan klem atas maupun klem samping. Tiga buah lokator yang terletak dalam satu bidang disebut *support*. Fungsi *support* antara lain menahan gaya berat benda saat diletakkan pada *fixture*. Tiga lokator selebihnya disebut lokator sisi; yaitu lokator yang terletak pada dua bidang yang saling tegak lurus dengan bidang *support*. Bidang *support* juga disebut sebagai datum pertama; bidang dengan dengan dua lokator sisi disebut sebagai datum kedua; dan bidang dengan satu lokator sisi disebut sebagai datum ketiga. Posisi tiga-dua-satu lokator disebut sebagai formasi 3-2-1.

Pada makalah ini, lokator sisi diberi nomor $L_1, L_2,$ dan L_3 sedangkan *support* diberi nomor L_4, L_5, L_6 . Penomoran dan posisi lokator ditunjukkan pada Gambar 2(a). Bidang A-B-C-D adalah datum pertama, bidang B-C-G-F adalah datum kedua, dan bidang A-B-F-E adalah datum ketiga. Alternatif calon titik pengekaman diberi simbol $C_1, C_2, C_3 \dots, C_n$ dan terletak pada bidang E-F-G-H (sisi atas benda kerja) seperti pada Gambar 2(b).



Gambar 2. Penomoran dan posisi lokator serta klem

Fokus penelitian yang dilakukan adalah mengembangkan algoritma penentuan titik pengekaman untuk *fixture* modular jenis *hole* dengan menggunakan satu klem (klem atas). Hasil dari algoritma adalah titik-titik peletakan *support*, lokator sisi, dan klem untuk formasi 3-2-1. Kondisi *fixturing* tidak fisibel dapat berarti tidak ada calon titik pengekaman atau dibutuhkan lebih dari satu klem. Penentuan titik calon pengekaman dan input lainnya masih dilakukan secara

manual. Tingkat otomasi yang diperoleh adalah otomasi proses penghitungan untuk analisis fisibilitas alternatif posisi lokator dan klem.

Algoritma awal yang dikembangkan oleh Ariastuti *et al.* (1998) terdiri dari langkah:

1. Menentukan bidang yang akan menjadi datum pertama (*support*), datum kedua (lokator sisi), dan datum ketiga (lokator sisi).
2. Menentukan titik-titik *support* dan lokator sisi pada datum kedua dan datum ketiga.
3. Menentukan alternatif koordinat titik pengecaman.
4. Menghitung gaya pengecaman dan memilih titik pengecaman.
5. Menentukan fisibilitas gaya pengecaman dengan persamaan (Chou *et al.*, 1989):

$$\begin{bmatrix} W_p & W_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_p \\ F_a \end{bmatrix} + w_k f_k = [0] \quad \text{atau} \quad W_p F_p + W_a F_a + w_k f_k = 0, \quad \forall k \quad (1)$$

dengan:

W_p : matriks arah gaya dan momen yang bekerja pada lokator,

W_a : matriks arah gaya dan momen akibat gaya pengecaman,

w_k : matriks arah gaya dan momen pemotongan,

F_p : matriks gaya yang bekerja pada lokator,

F_a : matriks gaya yang pengecaman,

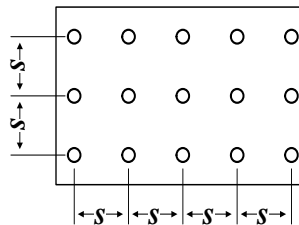
f_k : matriks gaya pemotongan,

p : pasif (komponen gaya-gaya pada lokator)

a : aktif (komponen gaya aksi oleh klem)

Model Chou *et al.* (1989) adalah model matematis untuk analisis gaya-gaya pada proses pemotongan. Komponen gaya dan momen dinyatakan dalam bentuk matriks dan dikelompokkan menjadi gaya pasif p pada lokator, gaya aktif a pada klem, dan gaya-gaya pahat k . Penandaan arah vektor menggunakan sumbu yang bersesuaian serta aturan tangan kanan (*right hand rule*). *Fixturing* tidak fisibel jika terdapat komponen gaya pasif (F_p) yang bernilai negatif.

Fixture modular jenis *hole* memiliki plat dasar berlubang dengan jarak yang seragam sebesar s seperti tampak pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema susunan lubang (*hole*) berjarak s pada plat dasar

Algoritma Ariastuti *et al.* (1998) memberikan hasil koordinat titik pengecaman fisibel berupa bilangan *real* yang tidak selalu bersesuaian dengan koordinat *hole*. Fleksibilitas *modular fixture* jenis *hole* kurang baik, namun keterulangan perakitan *modular fixture* jenis *hole* lebih baik dibandingkan dengan *modular fixture* jenis *slot* sehingga diperlukan cara terstruktur untuk menggeser posisi lokator dan klem serta menghitung ulang fisibilitas titik pengecaman agar algoritma Ariastuti *et al.* (1998) dapat diterapkan pada *modular fixture* jenis *hole*.

Hal-hal pokok yang merupakan hasil penelitian adalah:

1. Penyesuaian koordinat calon titik *support*, lokator sisi, dan pengecaman.
2. Pengujian untuk membuang calon titik pengecaman yang posisinya di luar segitiga *support*.
3. Penggunaan *feature* ekuivalen dan gaya potong ekuivalen dengan menggunakan model gaya ekuivalen dari Chou (1994).

Beberapa prinsip dasar yang digunakan dalam model yang dikembangkan adalah:

1. Titik pusat koordinat (0; 0; 0) pada koordinat (x; y; z) bersesuaian dengan titik pusat salah satu *hole*.
2. Koordinat yang mengalami penyesuaian dengan posisi susunan lubang pada plat dasar adalah koordinat lokator dan klem, sedangkan dimensi benda kerja, titik berat, dan koordinat *feature* tidak memerlukan penyesuaian.

Koordinat titik-titik peletakan lokator dan klem disesuaikan dengan posisi *hole* dengan cara nilai titik-titik koordinat dinyatakan dalam satuan *pixel* (kelipatan *s*). Koordinat awal setiap lokator dan klem dibagi dengan *s* untuk memperoleh suatu bilangan yang merupakan kelipatan *s* (tanpa satuan). Hasil pembagian berupa bilangan *real* dan dibulatkan menjadi bilangan bulat terdekat agar diperoleh koordinat lokator dan klem yang tepat bersesuaian dengan posisi lubang pada plat dasar. Bilangan bulat (kelipatan *s*) yang diperoleh dikalikan kembali dengan *s* sehingga diperoleh koordinat (x' ; y' ; z'). Koordinat (x' ; y' ; z') memudahkan proses perakitan karena bersesuaian dengan dimensi benda kerja dan posisi lubang pada plat dasar. Koordinat (x' ; y' ; z') inilah yang digunakan dalam analisis fisibilitas *fixturing*. Persamaan untuk penyesuaian koordinat adalah:

$$x' = \left[\text{round} \left(\frac{x}{s} \right) \right] \times s \quad y' = \left[\text{round} \left(\frac{y}{s} \right) \right] \times s \quad z' = \left[\text{round} \left(\frac{z}{s} \right) \right] \times s \quad (2)$$

dengan

x' : nilai koordinat *x* yang telah disesuaikan dengan posisi lubang [mm]

y' : nilai koordinat *y* yang telah disesuaikan dengan posisi lubang [mm]

z' : nilai koordinat *z* yang telah disesuaikan dengan posisi lubang [mm]

s : jarak antar lubang pada plat dasar *modular fixture* [mm]

x, y, z : nilai koordinat awal [mm]

Fungsi *round* adalah fungsi pembulatan bilangan *real* (hasil pembagian nilai koordinat (*x; y; z*) dengan *s*) ke bilangan bulat terdekat.

Syarat titik pengecaman, C'_n , harus berada dalam segitiga *support* diuji dengan:

$$\Delta = A_1 - A_2 - A_3 - A_4 = 0 \quad (3)$$

dengan

A_1 : luas segitiga $L_1-L_2-L_3$ pada datum primer,

A_2 : luas segitiga $L_1-L_2-C'_n$ pada datum primer,

A_3 : luas segitiga $L_1-L_3-C'_n$ pada datum primer,

A_4 : luas segitiga $L_2-L_3-C'_n$ pada datum primer.

Elemen *fixture* tidak boleh bertabrakan dengan gerakan pahat sehingga elemen *fixture* tidak boleh terletak pada *feature* pemesinan. Tinjau sebuah balok yang dua buah sisinya sejajar dengan sumbu koordinat dan delapan titik sudutnya memiliki koordinat ($x_1; y_1; z_1$), ($x_2; y_2; z_2$), ..., ($x_8; y_8; z_8$). Jika titik **A** adalah titik sudut dengan *minimum* ($x_n+y_n+z_n$) dan titik **B** adalah titik sudut dengan *maksimum* ($x_n+y_n+z_n$), maka titik **C** ($x_C; y_C; z_C$) berada pada balok (*feature* pemesinan) jika (Toha *et al.*, 1998):

$$(x_A \leq x_C \leq x_B) \text{ AND } (y_A \leq y_C \leq y_B) \text{ AND } (z_A \leq z_C \leq z_B) \quad (4)$$

Titik pengecaman, C'_n , dipilih dari calon titik pengecaman fisibel yang menimbulkan *range* gaya reaksi terkecil pada lokator. *Range* gaya reaksi dihitung dengan persamaan:

$$\text{range} = f_{p \max} - f_{p \min} \quad (5)$$

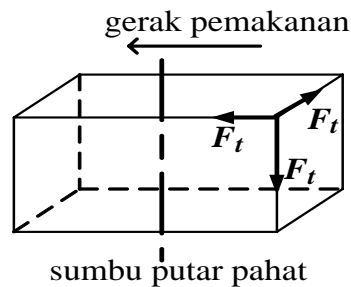
dengan

$f_{p \max}$: gaya terbesar pada Lokator 1-6 pada sebuah C'_n yang fisibel [N]

$f_{p \min}$: gaya terkecil pada Lokator 1-6 pada sebuah C'_n yang fisibel [N]

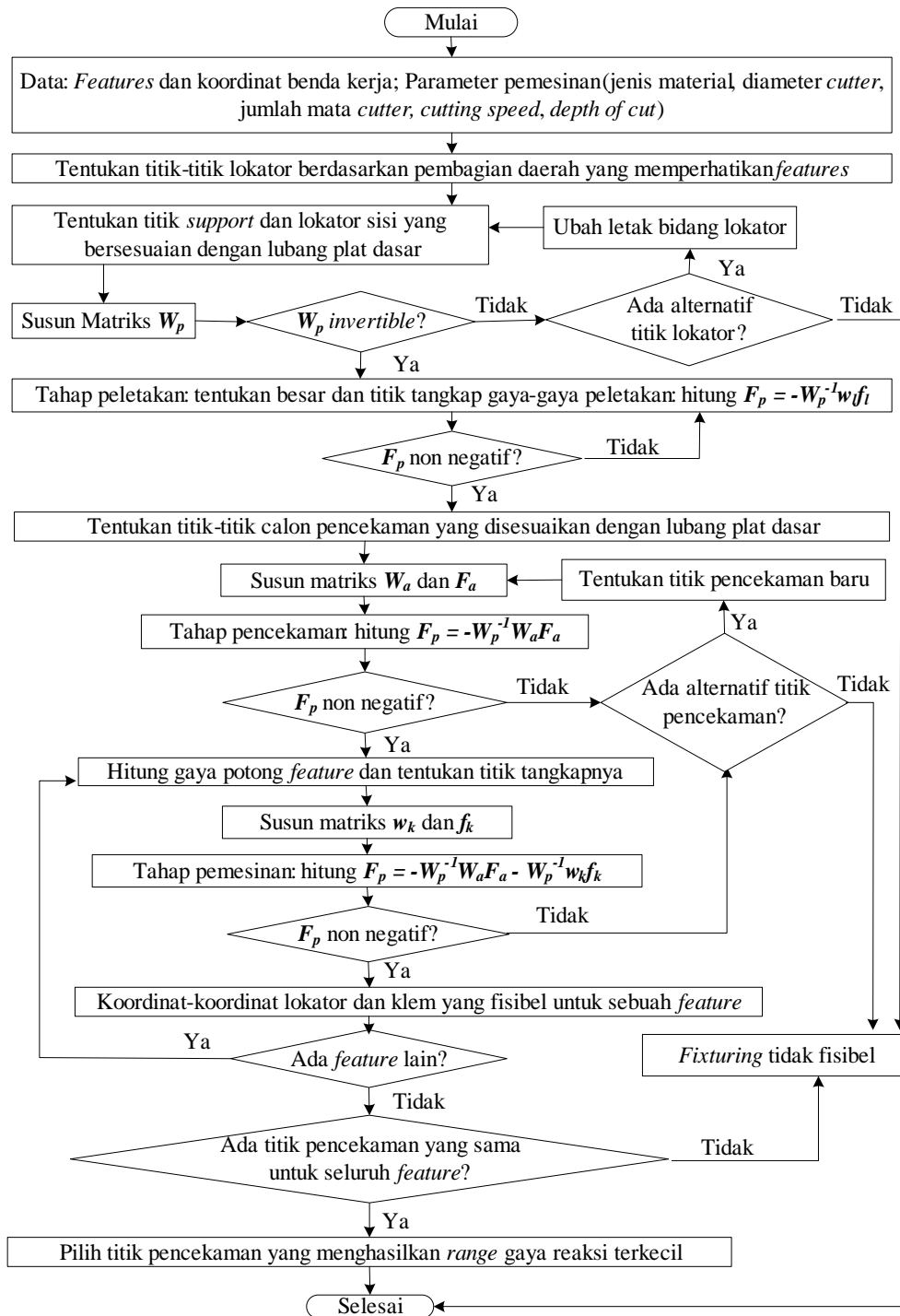
Geometri obyek (material awal dan *feature* pemesinan) dimodelkan sebagai bentuk balok yang membungkus obyek. *Feature hole* dan *blind hole* berdiameter $D[mm]$ dan kedalaman $L[mm]$ dimodelkan sebagai balok berukuran $D[mm] \times D[mm] \times L[mm]$. *Feature pocket, slot, step, blind slot, blind step* berdimensi $L_1[mm] \times L_2[mm] \times L_3[mm]$ direpresentasikan sebagai bentuk balok berdimensi $L_1[mm] \times L_2[mm] \times L_3[mm]$.

Gaya potong berubah-ubah baik besar maupun arahnya selama proses pemotongan yang dipengaruhi oleh arah pemakanan, arah putaran pahat, dan sisi benda kerja yang dipotong. Seluruh gaya potong diganti dengan tiga gaya potong ekuivalen pada sumbu (x), (y), dan (z) yang besarnya sama dengan besar gaya potong maksimum dan bekerja pada titik tangkap yang memberikan efek gaya reaksi terbesar, misalnya pada Gambar 4.



Gambar 4. Pasangan gaya ekuivalen (F_t) pada proses *milling*

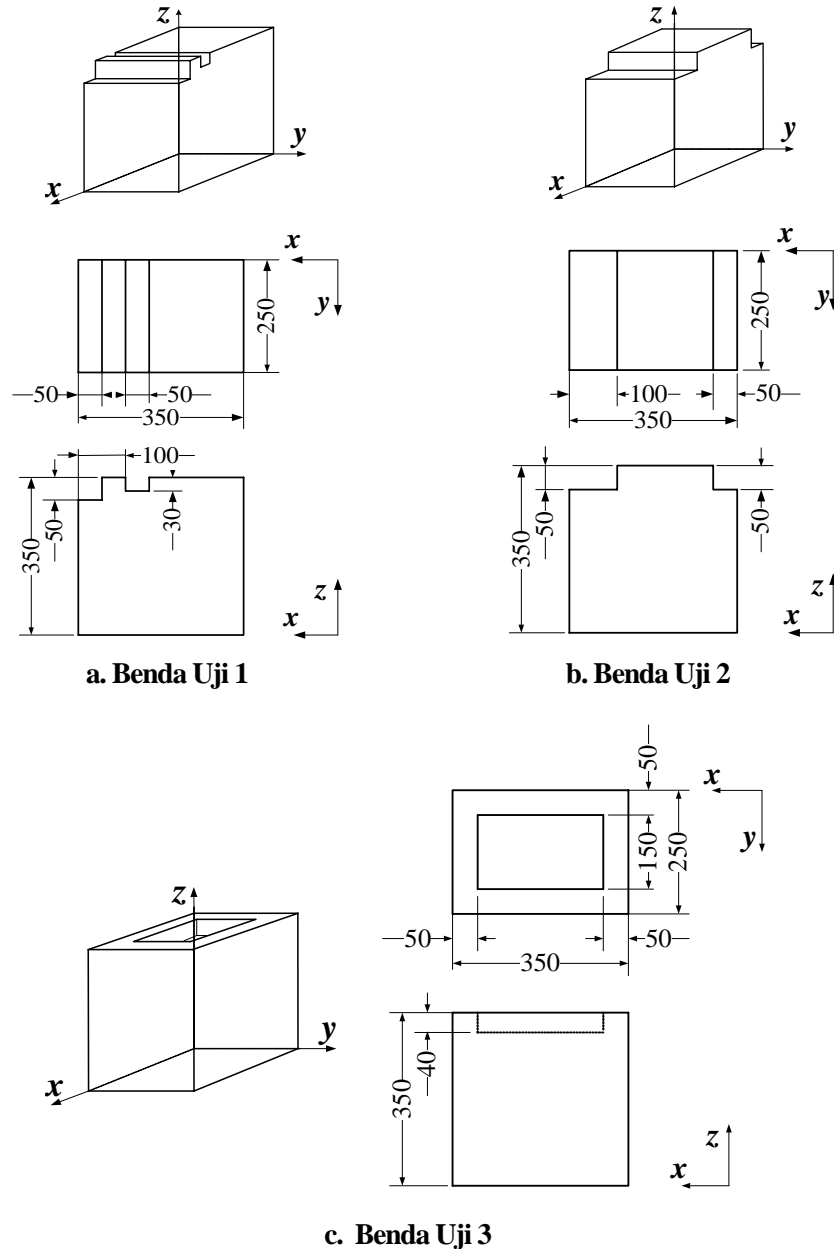
Urutan langkah penentuan titik pengecaman yang dikembangkan digambarkan dengan alur berpikir seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Alur berpikir pada algoritma usulan

3. PENGUJIAN ALGORITMA DAN ANALISIS

Algoritma yang dikembangkan diuji menggunakan tiga benda uji. Bentuk dan dimensi benda uji pertama sampai ketiga dapat dilihat pada Gambar 6.

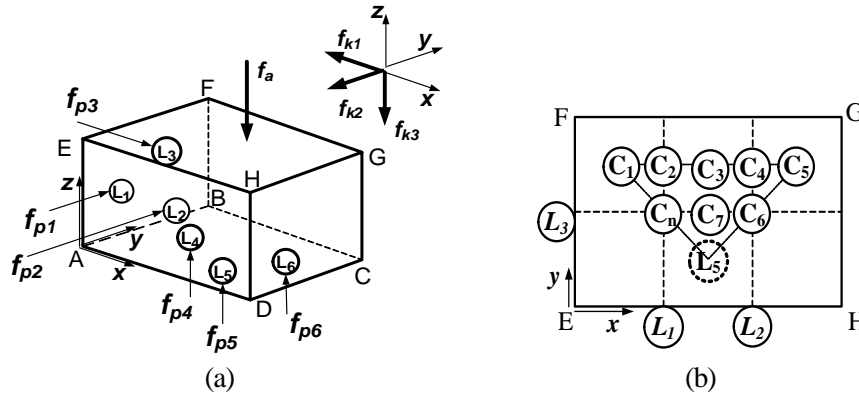


Gambar 6. Benda uji

Seluruh benda uji memiliki dimensi awal berukuran 350mm x 250mm x 350mm. Benda Uji 1 memiliki dua *feature* berupa *slot* dan *step*. Benda Uji 2 memiliki dua buah *feature* berupa *step*.

Benda Uji 3 memiliki *feature* berupa *pocket*. Dimensi masing-masing *feature* pemesinan dapat dilihat pada Gambar 6.

Gaya potong terbesar untuk seluruh *feature* pemesinan adalah 2159N. Gaya pencekaman (f_a) yang diberikan sebesar sepuluh kali gaya potong (21590N). Plat dasar pada *fixture* modular yang digunakan adalah *AMF 6361D-M12* (Andreas Maier GmbH dan Co., 1997) yang memiliki jarak antar lubang, s , sebesar 40 mm. Penamaan lokator, arah gaya, serta posisi dan penamaan calon titik pencekaman ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. (a) Penamaan lokator, arah gaya-gaya; (b) Calon titik pencekaman

Posisi lokator dan calon titik pencekaman yang tidak terletak pada *feature* dan hasil penghitungan gaya reaksi dengan menggunakan algoritma Ariastuti *et al.* (1998) dan algoritma usulan ditampilkan pada Tabel 1.

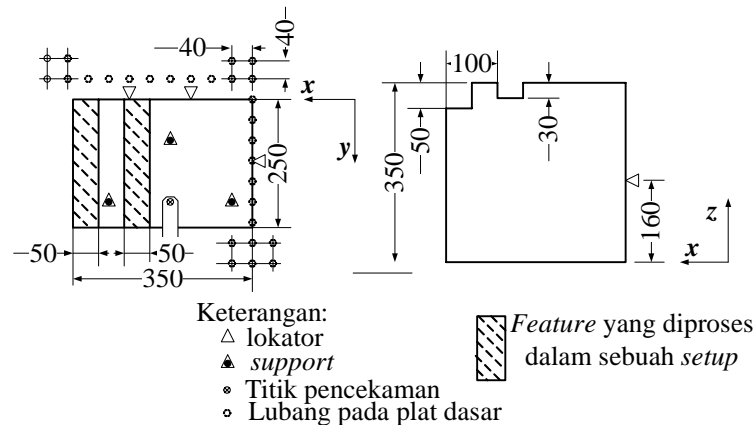
Tabel 1. Koordinat lokator, calon titik pencekaman, dan fisibilitas pencekaman.

Benda uji	Feature yang diproses	Algoritma Ariastuti <i>et al.</i> (1998)		Algoritma Usulan	
		Titik lokator/ titik pencekaman	Besar gaya [N]	Titik lokator/ titik pencekaman	Besar gaya [N]
Benda Uji 1	Slot	L_1 (116,67 ; 0 ; 150)	$f_{p1} = 2005$	L_1 (120 ; 0 ; 160)	$f_{p1} = 2159$
		L_2 (233,33 ; 0 ; 150)	$f_{p2} = 154$	L_2 (240 ; 0 ; 160)	$f_{p2} = 0$
		L_3 (0 ; 125 ; 150)	$f_{p3} = 2159$	L_3 (0 ; 120 ; 160)	$f_{p3} = 2159$
		L_4 (58,33 ; 187,5 ; 0)	$f_{p4} = 11844$	L_4 (40 ; 200 ; 0)	$f_{p4} = 11515$
		L_5 (175 ; 62,5 ; 0)	$f_{p5} = 2375$	L_5 (160 ; 80 ; 0)	$f_{p5} = 2519$
		L_6 (291,67 ; 187,5 ; 0)	$f_{p6} = 9530$	L_6 (280 ; 200 ; 0)	$f_{p6} = 9716$
	Step	C_3 (175 ; 187,5 ; 350)	$f_a = 21590$	C_3 (160 ; 200 ; 350)	$f_a = 21590$
		L_1 (116,67 ; 0 ; 150)	$f_{p1} = 154$	L_1 (120 ; 0 ; 160)	$f_{p1} = 360$
		L_2 (233,33 ; 0 ; 150)	$f_{p2} = 20045$	L_2 (240 ; 0 ; 160)	$f_{p2} = 1800$
		L_3 (0 ; 125 ; 150)	$f_{p3} = 2159$	L_3 (0 ; 120 ; 160)	$f_{p3} = 2159$
		L_4 (58,33 ; 187,5 ; 0)	$f_{p4} = 10918$	L_4 (40 ; 200 ; 0)	$f_{p4} = 10615$
		L_5 (175 ; 62,5 ; 0)	$f_{p5} = 2375$	L_5 (160 ; 80 ; 0)	$f_{p5} = 2519$
		L_6 (291,67 ; 187,5 ; 0)	$f_{p6} = 10456$	L_6 (280 ; 200 ; 0)	$f_{p6} = 10615$
		C_3 (175 ; 187,5 ; 350)	$f_a = 21590$	C_3 (160 ; 200 ; 350)	$f_a = 21590$
Benda Uji 2	Step 1	L_1 (116,67 ; 0 ; 150)	$f_{p1} = 6631$	L_1 (120 ; 0 ; 160)	$f_{p1} = 6657$
		L_2 (233,33 ; 0 ; 150)	$f_{p2} = -4472$	L_2 (240 ; 0 ; 160)	$f_{p2} = -4498$
		L_3 (0 ; 125 ; 150)	$f_{p3} = 2159$	L_3 (0 ; 120 ; 160)	$f_{p3} = 2159$
		L_4 (58,33 ; 187,5 ; 0)	$f_{p4} = 8760$	L_4 (40 ; 200 ; 0)	$f_{p4} = 6567$
		L_5 (175 ; 62,5 ; 0)	$f_{p5} = 2375$	L_5 (160 ; 80 ; 0)	$f_{p5} = 2519$
		L_6 (291,67 ; 187,5 ; 0)	$f_{p6} = 12614$	L_6 (280 ; 200 ; 0)	$f_{p6} = 14663$
		C_4 (233,33 ; 187,5 ; 350)	$f_a = 21590$	C_4 (240 ; 200 ; 350)	$f_a = 21590$

Tabel 1. (Lanjutan)

Benda uji	Feature yang diproses	Algoritma Ariastuti et al. (1998)		Algoritma Usulan	
		Titik lokator/ titik pengeckaman	Besar gaya [N]	Titik lokator/ titik pengeckaman	Besar gaya [N]
Benda Uji 2	Step 2	L_1 (116,67 ; 0 ; 150)	$f_{p1} = 154$	L_1 (120 ; 0 ; 160)	$f_{p1} = 360$
		L_2 (233,33 ; 0 ; 150)	$f_{p2} = 2005$	L_2 (240 ; 0 ; 160)	$f_{p2} = 1799$
		L_3 (0 ; 125 ; 150)	$f_{p3} = 2159$	L_3 (0 ; 120 ; 160)	$f_{p3} = 2159$
		L_4 (58,33 ; 187,5 ; 0)	$f_{p4} = 5521$	L_4 (40 ; 200 ; 0)	$f_{p4} = 3418$
		L_5 (175 ; 62,5 ; 0)	$f_{p5} = 2375$	L_5 (160 ; 80 ; 0)	$f_{p5} = 2519$
		L_6 (291,67 ; 187,5 ; 0)	$f_{p6} = 15853$	L_6 (280 ; 200 ; 0)	$f_{p6} = 17812$
		C_4 (233,33 ; 187,5 ; 350)	$f_a = 21590$	C_4 (240 ; 200 ; 350)	$f_a = 21590$
Benda Uji 3	Pocket	L_1 (116,67 ; 0 ; 175)		L_1 (120 ; 0 ; 160)	$f_{p1} = 360$
		L_2 (233,33 ; 0 ; 175)	---	L_2 (240 ; 0 ; 160)	$f_{p2} = 1799$
		L_3 (0 ; 125 ; 175)		L_3 (0 ; 120 ; 160)	$f_{p3} = 2159$
		L_4 (58,33 ; 187,5 ; 0)		L_4 (40 ; 200 ; 0)	$f_{p4} = 21410$
		L_5 (175 ; 62,5 ; 0)	---	L_5 (160 ; 80 ; 0)	$f_{p5} = 3418$
		L_6 (291,67 ; 187,5 ; 0)		L_6 (280 ; 200 ; 0)	$f_{p6} = -1080$
		Tidak ada calon titik pengeckaman yang tidak berinterferensi dengan feature	---	C_1 (40 ; 200 ; 350)	$f_a = 21590$

Kedua algoritma menunjukkan kondisi fisibel untuk sebuah *setup* pada Benda Uji 1, tidak fisibel untuk sebuah *setup* pada Benda Uji 2, dan tidak ada titik pengeckaman fisibel pada Benda Uji 3. Visualisasi koordinat lokator dan titik pengeckaman fisibel untuk Benda Uji 1 ditampilkan pada Gambar 8.

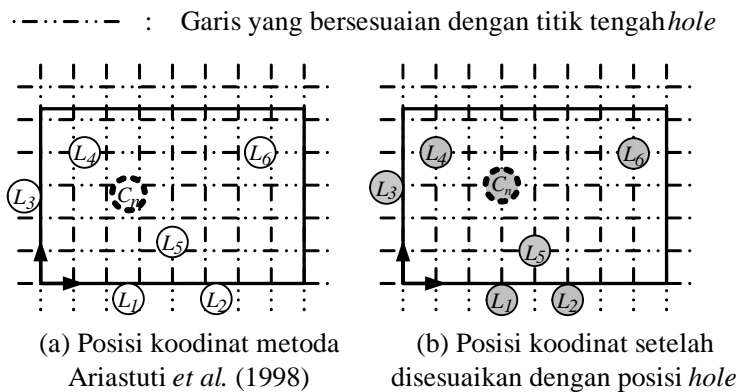


Gambar 8. Konfigurasi kordinat titik pengeckaman fisibel untuk Benda Uji 1

Algoritma yang dikembangkan berbeda dengan algoritma Ariastuti et al. (1998) pada penentuan koordinat lokator dan calon titik pengeckaman dan dapat digunakan pada *fixturing hole-based modular fixture*. Koordinat titik *support*, lokator sisi, dan pengeckaman dikonversikan agar sesuai dengan posisi lubang pada plat dasar dengan cara membulatkan nilai hasil pembagian koordinat yang dibagi dengan *s* ke bilangan bulat terdekat. Hasil pembulatan dikalikan kembali dengan *s* untuk memperoleh koordinat kartesian sehingga tidak diperlukan penyesuaian koordinat dan orientasi elemen *fixture* pada saat perakitan *fixture* dan peletakan benda kerja pada *fixture*.

Ketiga benda uji yang digunakan pada kedua algoritma tidak memiliki seluruh *feature* pemesinan (*hole, blind hole, pocket, slot, blind slot, step, blind step*), namun mampu mewakili kondisi: *feature* tidak terletak pada daerah pencekaman, *feature* menutupi sebagian daerah pencekaman, *feature* menutupi seluruh daerah pencekaman, seluruh *feature* dapat diproses pada satu kali *setup*, dan seluruh *feature* tidak dapat diproses pada satu kali *setup*.

Penyesuaian koordinat mengakibatkan adanya batasan dimensi benda kerja terkecil yang dapat diselesaikan dengan algoritma usulan, pergeseran segitiga *support*, perubahan kestabilan titik berat, dan perubahan jumlah calon titik pencekaman yang fisibel. Gambar 9 menunjukkan contoh pergeseran posisi lokator akibat penyesuaian koordinat. Lokator $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$, dan titik pencekaman, C_n , digeser ke posisi *hole* terdekat. Algoritma yang diusulkan mampu mendeteksi fisibilitas proses *fixturing* setelah pergeseran.



Gambar 9. Perubahan status koordinat lokator dan titik pencekaman

Hasil pengujian dengan menggunakan berbagai dimensi benda uji menunjukkan bahwa dimensi benda kerja (panjang-lebar-tinggi) harus lebih besar dari $3s \times 2s \times s$. Dimensi ini juga menjamin titik berat benda uji selalu berada dalam segitiga *support*.

Besar dan titik tangkap gaya potong ekuivalen selalu lebih besar dari gaya potong sesungguhnya sehingga menambah faktor keamanan benda yang di-*fixture*. Untuk mempermudah proses perhitungan, arah dan putaran pahat diatur sedemikian sehingga gaya ekuivalen memiliki vektor searah dengan sumbu $(-x)$, $(-y)$, dan $(-z)$.

Algoritma yang dikembangkan belum memperhitungkan pencekam samping, aspek gaya gesek dan kekuatan benda kerja. Gaya pencekaman yang besar dapat menyebabkan cacat karena deformasi plastis. Algoritma yang dikembangkan juga belum mampu menentukan jenis, jumlah, dan urutan perakitan komponen modular yang akan digunakan dalam pencekaman benda kerja.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penerapan model pada benda uji dan analisis hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa algoritma yang dikembangkan memiliki performansi yang sama dengan model Ariastuti *et al.* (1998) dalam hal mengenali kondisi fisibel atau tidak fisibelnya suatu *fixturing*. Solusi fisibel berupa: titik-titik peletakan lokator, titik pencekaman, gaya pencekaman dalam satu kali *setup*. Algoritma tidak memberikan solusi terbaik, namun mampu menyelesaikan proses *fixturing* untuk gaya pencekaman yang ditentukan. Algoritma yang dikembangkan menambahkan satu tahapan pada model Ariastuti *et al.* (1998) dalam bentuk penyesuaian koordinat lokator dan klem yang bersesuaian dengan posisi lubang pada plat dasar *modular*

fixture. Algoritma usulan berbeda dalam hal penentuan besar dan titik tangkap gaya pemotongan ekuivalen, dan penentuan titik pencekaman yang dipilih berdasarkan *range* gaya reaksi terkecil.

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan model yang mempertimbangkan: (a) aspek dimensi dan kekuatan elemen *fixture*, (b) alternatif cara menggeser posisi lokator untuk memperoleh calon titik pencekaman yang baru pada kondisi *fixturing* tidak fisibel.

DAFTAR PUSTAKA

- Andreas Maier GmbH & Co., 1997. *Modulares Vorrichtungssystem*, Katalog 97/2, Germany, p. 10-11.
- Ariastuti R., Anastesia, dan Toha, I.S., 1998. "Algoritma Penentuan Titik Pengekaman Benda-kerja untuk Proses Permesinan Komponen Prismatic." *Jurnal Teknik dan Manajemen Industri*, Vol. 18, No. 2, p. 36-47.
- Bidanda, B., and Muralikrishnan, C.K., 1992. "Flexible Fixturing for Intelligent Manufacturing." in *Intelligent Design and Manufacturing*, Kusiak, A. (editor), John Wiley and Sons, Inc., New York, p. 205-231.
- Chou, Y.C, Chandru, V., and Barash, M.M., 1989. "A Mathematical Approach to Automatic Configuration of Machining Fixtures: Analysis and Synthesis." *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, p. 299-306.
- Chou, Y.C., 1994. "Geometric Reasoning for Layout Design of Machining Fixtures." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 7, No. 3, p. 175-185.
- Hoffman, E.G., 1996. *Jig and Fixture Design*, 4th edition, Delmar Publishers, USA.
- Nee, A.Y., Whybrew, K., and Kumar, S.A., 1995. *Advanced Fixture Design for FMS*, Springer Verlag, London.
- Sinreich, D., and Nelkenbaum, B.D., 2006. "Determining Production Sequences for Single-Stage Multifunctional Machining Systems Based on the Tradeoff between Fixture Cost, Re-fixturing and Tool Replenishment." *IIE Transactions*, Vol. 38, p. 813-828.
- Siong, L.B., Imao, T., Yoshida, H., Goto, K., Koh, S.L., Lim, D., Chin, L., and Gan, S.C., 1992. "Integrated Modular Fixture Design, Pricing and Inventory Control Expert System." *International Journal Production Research*, Vol. 30, No. 9, p. 2019-2044.
- Toha, I.S., Husman, J.A., dan Ariastuti, R., 1998. "Penentuan Pengekam Komponen Berbantuan Komputer." *Jurnal Teknik dan Manajemen Industri*, Vol. 18, No. 3, p. 40-52.