

## PENENTUAN URUTAN PERAKITAN PRODUK MULTIAKSIAL ORTOGONAL DENGAN MEMPERTIMBANGKAN TITIK LOKASI *MATING* DAN VOLUME KOMPONEN

Alfadhliani<sup>1</sup>, Isa Setiasyah Toha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) Departemen Teknik Industri, Universitas Andalas

Limau Manis, Padang 25163

Email: alfadhliani@ft.unand.ac.id

<sup>2</sup>) Departemen Teknik Industri, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

Email: isast@lspitb.org

### ABSTRAK

Makalah ini menjelaskan pengembangan metode penentuan urutan perakitan produk mekanik *non sheet metal* dengan orientasi perakitan multiaksial ortogonal. Metode yang dikembangkan pada makalah ini menghilangkan tahapan pembentukan gambar urai, pembentukan diagram *liaison*, analisis preseden secara manual dan pembentukan hubungan preseden. Hal tersebut dilakukan dengan langsung menggunakan informasi utama dari setiap langkah yaitu *mating*, *volume*, dan lokasi titik *mating* komponen yang kontak pada perakitan akhir. Informasi tersebut digunakan sebagai kriteria aturan prioritas pemilihan komponen dan dapat diperoleh langsung dari basis data CAD. Penentuan urutan perakitan dilakukan dengan input gambar solid 3D dalam bentuk gambar tumpuk. Jaminan fisibilitas urutan perakitan yang terbentuk dilakukan dengan mempertimbangkan masalah stabilitas komponen dan sub perakitan selama proses perakitan, pembatas geometri, aksesibilitas dan pengencang. Pengujian algoritma dilakukan pada *Bench Vice* dan menghasilkan urutan perakitan yang fisibel.

**Kata kunci:** urutan perakitan, CAD, *mating*, pembatas preseden, kolisi, interferensi

### ABSTRACT

*This paper proposes the development of assembly sequence generation method for non sheet metal mechanical product which assembled by using orthogonal multi-axial orientation. The proposed method, removes exploded view generation, liaison diagram generation, manually precedence analysis and precedence relation generation step by using the main information from each steps i.e. mating, volume, and mating location point of contacted components on the final assembly. These information are used as component selection priority rule and can be extracted directly from CAD data base. Assembly sequence is generated by using 3D solid model as input in the form of stacked drawing. Feasibility of assembly sequence is performed by considering components and sub-assembly stability in assembly process, geometrical constraint, accessibility and fasteners. The proposed method is examined by using Bench Vice and provides a fisible assembly sequence as a result.*

**Keywords:** assembly sequence, CAD, *mating*, precedence constraint, collision, interference

## 1. PENDAHULUAN

Perakitan merupakan bagian dari proses manufaktur yang perlu dievaluasi sejak tahap perancangan produk. Hal ini diperlukan untuk menghindari kegagalan yang disebabkan oleh kesalahan toleransi, dimensi yang tidak sesuai, dan kesulitan instalasi komponen.

Penggunaan sistem *Computer Aided Design* (CAD) pada perancangan produk mekanik telah mampu memberikan kemungkinan evaluasi perakitan disaat awal rancangan. Evaluasi ini dapat

diupayakan terintegrasi dalam suatu proses yang terotomasi. Otomasi evaluasi perakitan diperlukan karena suatu produk mekanik dapat dirakit dengan sejumlah alternatif urutan perakitan yang fisibel. Gottipolu dan Ghost (2003) menyatakan bahwa alternatif ini akan meningkat secara eksponensial terhadap jumlah komponen penyusunnya. Namun sebagian urutan yang diperoleh mungkin tidak dapat digunakan karena tidak praktis atau karena batasan-batasan tertentu sehingga tidak dapat digunakan. Proses otomasi ini harus pula didukung oleh metode yang sistematis dan efisien untuk merepresentasikan, mengevaluasi seluruh alternatif dan memilih urutan perakitan yang terbaik.

Penentuan urutan perakitan yang fisibel dilakukan dengan sejumlah tahap, yaitu (Whitney, 2004): pembentukan gambar perakitan dan daftar komponen, pembentukan diagram *liaison* (diagram hubungan antar komponen), analisis preseden dengan mengajukan sejumlah pertanyaan, pembentukan hubungan preseden, dan pembentukan diagram urutan perakitan. Untuk melakukan otomasi perencanaan urutan perakitan, diperlukan hal-hal berikut (Delchambre, 1992): pembentukan model geometris dari produk perakitan, pembentukan alternatif urutan perakitan dan pemilihan urutan perakitan produk yang fisibel. Proses otomasi ini dilakukan pada sistem CAD. Informasi yang berkenaan dengan rancangan produk diekstraksi dari basis data CAD, selanjutnya digunakan sebagai input untuk pencarian urutan perakitan. Upaya ekstraksi informasi dan penentuan urutan perakitan membutuhkan suatu algoritma tertentu (Ariastuti, *et al.*, 1998).

Informasi umum yang diperlukan untuk penentuan urutan perakitan, antara lain: informasi geometri, komponen, dan hubungan geometri antar komponen perakitan (*mating*) (Delchambre, 1992; Arie dan Kramer, 1994; Kanai, *et al.*, 1996; Laperriere dan ElMaraghy, 1996; Ariastuti, *et al.*, 1998; Tseng dan Li, 1999; Toha, *et al.*, 2004; Alfadhilani dan Toha, 2005; Alfadhilani dan Toha, 2007). Namun beberapa model yang dikembangkan oleh peneliti ini membutuhkan pula informasi spesifik tambahan, antara lain informasi koordinat lokasi komponen pada perakitan akhir (Delchambre, 1992; Alfadhilani dan Toha, 2005; Alfadhilani dan Toha, 2007), informasi teknologi perakitan (Delchambre, 1992; Arie dan Kramer, 1994), dan informasi pengencang (Tseng dan Li, 1999).

Delchambre (1992), Ariastuti, *et al.*, (1998) dan Toha, *et al.*, (2004) mengusulkan metode otomasi penentuan urutan perakitan produk dari gambar urai produk (*exploded view*) bentuk solid 3D pada sistem CAD. Delchambre (1992) menentukan hubungan antar komponen dengan menggunakan *arc* pada gambar urainya, sementara Ariastuti, *et al.*, (1998) dan Toha, *et al.*, (2004) membuat garis perakitan antar komponen dan menentukan urutan perakitan dengan mempertimbangkan garis ini. Garis perakitan hanya dibuat pada gambar urai produk, sementara gambar rancangan produk biasanya tersedia dalam bentuk gambar tumpuk. Gambar tumpuk adalah gambar yang merepresentasikan bentuk produk yang telah terakit. Untuk keperluan ini maka dibutuhkan satu tahap untuk membentuk gambar urai dari gambar tumpuk dan membentuk *arc* ataupun garis perakitan pada gambar urai tersebut. Langkah pembentukan gambar urai dari gambar tumpuk ini tidak memberikan nilai tambah pada rancangan produk, sehingga akan lebih baik jika proses ini dapat diotomasi atau bahkan dihilangkan.

Kanai, *et al.*, (1996) melakukan otomasi penentuan urutan perakitan berdasarkan analisis lepas rakit model solid suatu produk, lalu melakukan evaluasi pemilihan urutan terbaik berdasarkan konsumsi waktu terkecil aktivitas perakitan produk. Tseng dan Li (1999) membuat urutan perakitan berdasarkan pengencang, yaitu dengan mengidentifikasi pengencang dan elemen yang berhubungan dengannya, lalu dibuat *assembly element graph*, kemudian dilakukan penentuan urutan perakitan yang direpresentasikan dalam *assembly sequence graph* berdasarkan pengencang. Upaya identifikasi pengencang dalam sistem CAD memerlukan sebuah metoda tersendiri, karena CAD biasanya tidak membedakan antara komponen dan pengencang.

Fisibilitas operasi perakitan komponen yang membentuk produk jadi harus dapat dijamin dengan memperhatikan fisibilitas urutan perakitan yang dipilih. Fisibilitas urutan perakitan dapat diperoleh dengan memperhatikan antara lain: 1) Masalah stabilitas komponen dan sub perakitan (Delchambre, 1992; Laperriere dan ElMaraghy, 1996). 2) Masalah pembatas geometri yang dikategorikan sebagai *hard constraint* (Delchambre, 1992; Arie dan Kramer, 1994; Laperriere dan ElMaraghy, 1996; Tseng dan Li, 1999). 3) Masalah aksesibilitas komponen pada posisi akhir ketika dirakit (Laperriere dan ElMaraghy, 1996).

Makalah ini mengusulkan algoritma otomatisasi penentuan urutan perakitan produk, sebagai salah satu tahap dalam perencanaan dan evaluasi perakitan. Metode yang dikembangkan berupaya menghilangkan tahap pembentukan gambar urai yang terdapat pada metode yang diusulkan oleh Delchambre (1992), Ariastuti, *et al.*, (1998) dan Toha, *et al.*, (2004). Selain itu, metode yang dikembangkan menghilangkan tahapan pembentukan diagram *liaison*, analisis preseden secara manual, dan pembentukan hubungan preseden yang diusulkan Whitney (2004), sehingga otomatisasi penuh penentuan urutan perakitan dapat dilakukan.

Makalah ini juga mengusulkan algoritma ekstraksi data geometri dari basis data CAD langsung dari gambar tumpuk model solid 3D. Urutan perakitan ditentukan tanpa analisis dekomposisi sebagaimana usulan Kanai, *et al.*, (1996), namun didasarkan atas informasi lokasi *mating* pasangan komponen (vektor normal dan koordinat titik kontak komponen) dan volume komponen. Fisibilitas urutan diperhatikan dengan mempertimbangkan stabilitas, pembatas geometri, aksesibilitas, dan pengencang secara keseluruhan. Sistem CAD yang digunakan adalah *SolidWorks* 2005. Algoritma dibatasi hanya mempertimbangkan operasi perakitan yang hanya merakit satu komponen dalam setiap operasi dan hanya menghasilkan satu alternatif urutan. Produk yang dipertimbangkan adalah produk mekanik *non sheet metal* dengan orientasi perakitan multi arah (multiaksial) ortogonal, dan berada di sumbu sistem koordinat pada *assembly model space*. Pengencang dianggap sebagai salah satu komponen penyusun produk rakitan.

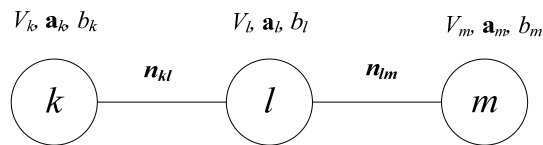
Alfadhilani dan Toha (2005) telah mengembangkan algoritma yang dapat digunakan untuk menentukan urutan perakitan langsung dari gambar tumpuk solid 3D, namun algoritma tersebut hanya ditujukan untuk produk yang dirakit dengan orientasi satu arah (uniaksial). Pengembangan algoritma dasar penentuan urutan perakitan produk yang dirakit dengan orientasi multi arah telah dilakukan oleh Alfadhilani dan Toha (2007). Menggunakan logika pada algoritma dasar tersebut, makalah ini mengembangkan metode penentuan urutan perakitan produk mekanik *non-sheet metal* dengan orientasi multi-arah ortogonal.

## 2. REPRESENTASI MODEL PERAKITAN

Pada penentuan urutan perakitan, biasanya dibutuhkan suatu model yang dapat digunakan untuk merepresentasikan perakitan. Model perakitan ini berisikan semua informasi yang dibutuhkan oleh perencana untuk membentuk rencana urutan perakitan. Terdapat sejumlah model untuk menggambarkan hubungan antar komponen sehingga terbentuk produk akhir, yaitu (Delchambre, 1992):

1. Menggunakan *graph* yang dapat dibentuk berdasarkan analisis geometri dari perakitan akhir.
2. Model representasi khusus yang digunakan dalam bahasa pemrograman tingkat tinggi yang biasanya digunakan untuk mengatur gerakan robot perakitan.
3. Pengelompokan komponen pada perakitan akhir berdasarkan jenis pengencang yang digunakan.
4. Klasifikasi komponen menggunakan teknologi kelompok yang didasarkan pada proses perakitan yang dilakukan.

Makalah ini menggunakan representasi perakitan model *graph* yang diusulkan oleh Alfadhlan dan Toha (2005, 2007). Model *graph* ini berisikan sejumlah informasi yang diperlukan untuk pembentukan urutan perakitan, dimana *node* merepresentasikan komponen penyusun produk rakitan, sementara *arc* merepresentasikan relasi antar komponen. Relasi antar komponen akan terjadi jika terdapat kontak fisik antar komponen tersebut. Kontak ini dinyatakan dengan *mating*, yang ditentukan pada tahap perancangan produk perakitan. Gambar 1 memperlihatkan model *graph* yang dimaksud. Informasi untuk model *graph* tersebut diambil dari model geometris gambar teknik bentuk solid 3D. Model geometris ini berada pada sistem CAD yang pada penelitian ini menggunakan *SolidWorks* 2005.



**Gambar 1. Model *graph* usulan**

dimana:

$k, l, m$  : nomor/nama komponen

$V_k$  : volume komponen ke  $k$

$\mathbf{a}_k$  : vektor normal *face* komponen ke  $k$  yang kontak

$b_k$  : koordinat titik kontak komponen ke  $k$

$n_{kl}$  : jumlah *mating* yang terjadi antar komponen  $k$  dan komponen  $l$

Adapun notasi-notasi yang spesifik dijelaskan pada setiap sub bab yang menjelaskan algoritma tersebut.

Model *graph* digunakan oleh Delchambre (1992) dan Whitney (2004) dalam representasi dan analisis perakitan yang disebut *liaison*, namun pada makalah ini hanya digunakan sebagai representasi perakitan untuk memudahkan penjelasan algoritma. Informasi *mating* selanjutnya digunakan untuk menghilangkan tahapan pembentukan *liaison graph*, karena pembentukan *liaison graph* adalah untuk mendapatkan informasi hubungan antar komponen (*mating*). Pada *SolidWorks* informasi tersebut dapat diperoleh tanpa terlebih dahulu membentuk *liaison*.

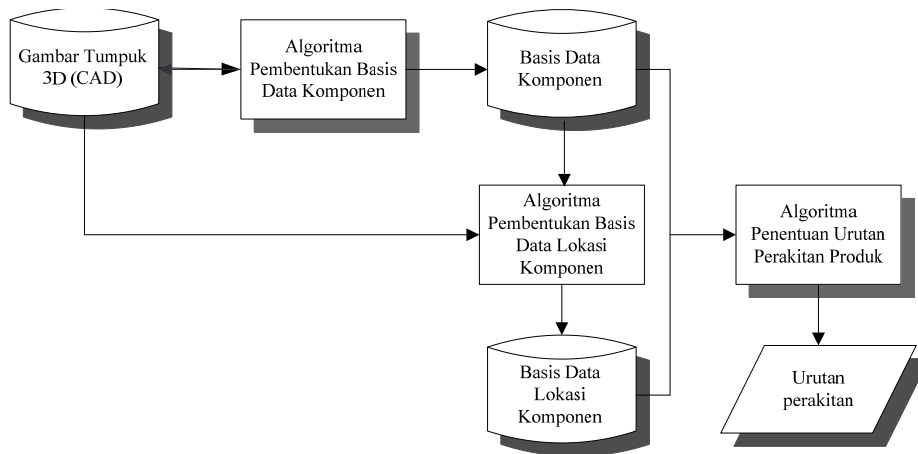
### 3. RANCANGAN ALGORITMA PENENTUAN URUTAN PERAKITAN

Penelitian yang dijelaskan pada makalah ini ditujukan untuk penentuan urutan perakitan secara otomatis suatu produk. Urutan ditentukan langsung dari gambar teknik yang berada dalam sistem CAD *SolidWorks* 2005. Masalah interferensi geometri dan aksesibilitas dipertimbangkan dengan memperhatikan urutan lokasi *face* yang kontak searah sumbu koordinat pada perakitan akhir. Hal ini dipertimbangkan untuk menghindari kolisi (*collision*) pada saat perakitan. Kolisi merupakan kondisi terhalangnya suatu komponen oleh komponen lain ketika dirakit. Urutan lokasi *face* yang kontak ini merupakan batasan preseden perakitan komponen pada suatu sumbu, dengan demikian tahap analisis preseden sebagaimana usulan Whitney (2004) tidak diperlukan lagi.

Stabilitas dipertimbangkan dengan membuat urutan perakitan berdasarkan pada kriteria ukuran volume komponen dan jumlah *mating* perkomponen dengan suatu komponen pasangannya. Pengencang dipertimbangkan dengan kriteria ukuran volume komponen. Kriteria prioritas yang digunakan dalam pengembangan algoritma penentuan urutan perakitan menggunakan kriteria yang diusulkan oleh Alfadhlan dan Toha (2007), yaitu:

- a. Volume setiap komponen ( $V_k$ ).
- b. Jumlah *mating* komponen ke  $l$  dengan komponen ke  $k$  yang baru saja terpasang ( $n_{kl}^*$ ).
- c. Jumlah *mating* komponen ke  $l$  dengan semua komponen ke  $k$  yang telah terpasang ( $\sum_{k=1}^N n_{kl}$ ).
- d. Jumlah *mating* komponen ke  $l$  dengan semua komponen ke  $m$ , ( $\sum_{m=1}^N n_{lm}$ ).
- e. Titik lokasi *face* komponen ke  $k$  yang kontak ( $\mathbf{a}_k, b_k$ ).

Logika dan aturan prioritas menggunakan aturan yang sama dengan algoritma dasar yang telah dikembangkan oleh Alfadhilani dan Toha (2007). Kandidat komponen yang akan dipasang ditentukan berdasarkan urutan titik lokasi *mating* antar komponen pada perakitan akhir. Data yang dibutuhkan sebagai input pada algoritma diambil dari basis data gambar produk dan dibentuk menjadi basis data komponen dan basis data lokasi komponen. Data yang terdapat pada dua basis data ini diolah dengan suatu algoritma untuk mendapatkan urutan perakitan produk yang fisibel (lihat Bagian 6). Ekstraksi data yang terdapat pada basis data gambar menjadi basis data komponen dan basis data lokasi komponen juga dilakukan dengan suatu algoritma tertentu (lihat Bagian 4 dan 5). Gambar 2 memperlihatkan diagram sistem yang dikembangkan.



Gambar 2. Diagram sistem yang dikembangkan

#### 4. ALGORITMA PEMBENTUK BASIS DATA KOMPONEN

Produk multiaksial ortogonal pada penelitian ini didefinisikan sebagai produk yang memiliki lebih dari satu arah perakitan dan bersifat ortogonal. Algoritma pembentuk basis data komponen untuk produk multiaksial ortogonal menggunakan algoritma pembentuk basis data komponen untuk produk uniaksial yang telah diusulkan oleh Alfadhilani dan Toha (2005).

Input basis data komponen adalah gambar teknik produk perakitan 3D yang berada pada *SolidWorks* 2005. Algoritma untuk mengekstraksi data yang disimpan pada basis data komponen adalah sebagai berikut:

1. Ambil semua *mating* yang terjadi dan nama pasangan komponen yang kontak (informasi *mating* diambil dari gambar aktif *SolidWorks* dengan properti *Name* dari objek *Mate2*, nama komponen diambil dengan menggunakan properti *Name* pada objek *Component2*).
2. Kelompokkan *mating* berdasarkan komponen pasangan yang sama dan hitung jumlah *mating* yang terjadi di setiap kelompok pasangan ( $n_{kl}, k = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, N$ ).

3. Hitung total *mating* yang terjadi pada setiap komponen  $(\sum_{l=1}^N n_{kl}, k = 1, 2, \dots, N)$ .
4. Ambil volume setiap komponen ( $V_k, k = 1, 2, \dots, N$ ) (informasi volume diambil dari gambar aktif *SolidWorks* dengan menggunakan *Volume Property* pada objek *MassProperty*).
5. Simpan informasi yang diperoleh dari Langkah 1 sampai dengan Langkah 4 ke dalam basis data komponen  $(k, V_k, n_{kl}, \sum_{l=1}^N n_{kl})$ .

Basis data komponen yang dihasilkan berisi informasi mengenai daftar nama semua pasangan komponen yang kontak beserta jenis *mating*-nya, jumlah *mating* perkomponen pasangan, total *mating* yang terjadi pada setiap komponen dan volume setiap komponen.

## 5. ALGORITMA PEMBENTUK BASIS DATA LOKASI KOMPONEN

Terdapat sejumlah jenis *mating* antar komponen ketika dirakit, antara lain (Ariastuti, et al., 1998): *against*, *fit*, *contact*, *tight fits*, *coplanar*. Jenis *mating against* adalah jika arah normal dari dua *face* (*planar*) saling berlawanan dan kedua *face* bersentuhan. Jenis hubungan *fit* diperoleh dari hubungan dua *face* yang berbentuk silindris. Jenis hubungan *contact* adalah kondisi hubungan yang menyebabkan *mating against* tidak dapat bergerak pada satu arah tertentu atau lebih. Sedangkan *tight fits* adalah kondisi yang menyebabkan *mating fit* tidak dapat bergerak pada satu arah atau lebih (biasanya pergerakan rotational), dan hubungan *coplanar* adalah jika dua *face planar* berada pada satu bidang yang sama dengan kata lain arah normal kedua *face* searah.

Modul perakitan pada *SolidWorks* 2005 memiliki sejumlah *mating* standar yaitu *coincident*, *parallel*, *perpendicular*, *tangent*, *concentric*, *distance*, *angle* (Tickoo, 2004). Jenis *mating coincident*, sama dengan *mating against* atau *coplanar* tergantung arah normal dari kedua *face*, jika arah normal kedua *face* adalah *anti-aligned* (berlawanan) maka *mating coincident* ini sama dengan *mating against*, namun jika arah normalnya *aligned* (searah) maka *mating coincident* ini adalah *coplanar*. Jenis *mating parallel* adalah hubungan dua *face* yang sejajar. Jenis *mating perpendicular* adalah hubungan dua *face* yang saling tegak lurus, sementara jenis *mating tangent* diberikan pada *face* yang bersinggungan pada satu titik, dimana salah satu *face* yang kontak harus berbentuk *cylinder*, *sphere* atau *surface*. Jenis *mating concentric* sama dengan *mating fit*. *Mating* ini berdasarkan kesamaan garis sumbu antar komponen. Jenis *mating distance* dan *angle* hanya memberikan besaran jarak dan sudut antar komponen. Tipe *mating* ini digunakan untuk memudahkan rekayasa geometri pada sistem CAD. Algoritma yang akan dikembangkan pada penelitian ini hanya mempertimbangkan jenis *mating coincident*, *parallel* dan *distance*, hal ini karena dengan jenis *mating* ini kondisi terhalangnya suatu komponen oleh komponen lain dapat diketahui.

Algoritma pembentuk basis data lokasi komponen untuk produk multiaksial ortogonal yang dikembangkan pada penelitian ini berdasarkan pada usulan Alfadhilani dan Toha (2005) dengan penambahan beberapa langkah yang diperlukan. Pada algoritma pembentuk basis data lokasi komponen untuk produk uniaksial belum terdapat pengelompokan urutan komponen pada masing-masing sumbu acuan karena arah perakitan hanya satu arah. Sedangkan pada algoritma pembentuk basis data lokasi komponen untuk produk multiaksial ortogonal harus dilakukan pengelompokan urutan komponen berdasarkan beberapa sumbu acuan. Algoritma pembentuk basis data lokasi komponen ini menggunakan sejumlah notasi tambahan yaitu:

- $u_k$  : nomor urut titik lokasi komponen ke  $k$  pada sumbu acuan.
- $D$  : tipe sumbu acuan.
- $j$  : variabel tipe sumbu acuan

Algoritma untuk mengekstraksi data yang disimpan pada basis data lokasi komponen adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi semua pasangan komponen yang kontak dengan jenis *mating coincident, parallel* dan *distance* (diperoleh dari basis data komponen).
2. Temukan lokasi *mating*-nya pada *assembly model space* ( $b_k$ ) (informasi ini diambil dari gambar aktif *SolidWorks* dengan properti *EntityParams* dari objek *MateEntity2*).
3. Identifikasi arah vektor normal untuk setiap *face* yang kontak ( $\mathbf{a}_k$ ) (informasi ini diambil dengan cara yang sama dengan langkah 2), set sumbu  $j=1$ . Jika vektor normalnya tidak paralel dengan salah satu sumbu  $x$ ,  $y$  atau  $z$ , maka stop, iterasi selesai. Jika tidak maka lanjut ke langkah berikut.
4. Untuk semua pasangan komponen yang kontak, kelompokkan pasangan komponen tersebut berdasarkan sumbu acuan yang paralel dengan vektor normal komponen pasangan yang ditemukan lebih dulu.
5. Set sumbu acuan =  $D$  dimana  $D = 1$  untuk sumbu acuan yang berada pada sumbu  $x$ ,  $D = 2$  untuk sumbu acuan yang berada pada sumbu  $y$ ,  $D = 3$  untuk sumbu acuan yang berada pada sumbu  $z$ .
6. Set  $D = j$ .
7. Urutkan komponen kedua yang ditemukan dari setiap pasangan yang kontak berdasarkan titik lokasi paling kecil sampai titik lokasi paling besar dari pasangan komponen yang pertama ditemukan.
8. Jika terdapat lebih dari satu komponen yang sama dalam urutan, maka pilih urutan pada titik lokasi yang terkecil dan hapus urutan pada titik lokasi yang lain.
9. Berikan nomor urut  $u_k$  komponen ke  $k$  mulai dari titik lokasi terkecil sampai titik lokasi terbesar. Jika terdapat komponen dalam urutan yang memiliki titik lokasi yang sama pada sumbu acuan, maka berikan nomor urut yang sama.
10. Jika  $j = 3$  maka lanjut ke Langkah 11, jika tidak ubah  $j = j+1$  dan kembali ke Langkah 6.
11. Simpan informasi yang diperoleh dari Langkah 1 sampai dengan Langkah 10 pada basis data urutan lokasi komponen ( $\mathbf{a}_k, b_k, u_k$ ).

Basis data lokasi komponen yang dihasilkan berisi informasi mengenai pasangan komponen yang kontak beserta jenis *mating*-nya, titik koordinat lokasi *face* yang kontak dan arah vektor normalnya, nomor urut titik lokasi komponen yang kontak pada perakitan akhir di setiap sumbu koordinat.

## 6. ALGORITMA PENENTUAN URUTAN PERAKITAN PRODUK MULTIAKSIAL ORTOGONAL

Arah perakitan diidentifikasi dengan menemukan arah vektor normal *face* yang kontak. Vektor normal harus paralel pada salah satu sumbu koordinat referensi. Algoritma penentuan urutan perakitan produk ini menggunakan notasi sebagai berikut:

$N$  : jumlah komponen.

$P_i$  : komponen yang dirakit dalam urutan ke  $i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ .

$S$  : kumpulan urutan perakitan komponen  $S = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$ .

$u_k$  : nomor urut titik lokasi komponen ke  $k$  pada sumbu acuan.

$u_L$  : nomor urut titik lokasi terkecil komponen di  $C$  pada sumbu acuan.

$u_U$  : nomor urut titik lokasi terbesar komponen di  $C$  pada sumbu acuan.

$C$  : kumpulan kandidat komponen yang akan dirakit berikutnya.

$D$  : tipe sumbu acuan.

$j$  : variabel tipe sumbu acuan

Algoritmanya adalah sebagai berikut:

1. Set  $i = 1$ , pilih komponen yang memiliki ukuran volume terbesar sebagai *base part* dan tetapkan sebagai  $P_i$ ,  $P_i = \text{maks} \{V_k, k = 1, 2, \dots, N\}$ . Simpan di  $S$ .
2. Identifikasi semua komponen ke  $l$  yaitu semua komponen yang memiliki hubungan *mating* dengan  $P_i$ .
3. Set  $i = i + 1$ , pilih komponen ke  $l$  yang memiliki jumlah *mating* terbanyak dengan  $P_{i-1}$  dan tetapkan sebagai  $P_i$ ,  $P_i = \text{maks} \{n_{kl}, k = P_{i-1}, l = 1, 2, \dots, N\}$ , simpan di  $S$ . Jika diperoleh lebih dari satu komponen maka lanjutkan ke Langkah 4, jika tidak maka masuk ke Langkah 6.
4. Pilih komponen ke  $l$  yang memiliki total *mating* terbanyak dengan semua komponen ke  $m$  dan tetapkan sebagai  $P_i$ ,  $P_i = \text{maks} \{ \sum_{m=1}^N n_{lm}, l = 1, 2, \dots, N \}$ , simpan di  $S$ . Jika diperoleh lebih dari satu komponen maka lanjutkan ke Langkah 5, jika tidak maka masuk ke Langkah 6.
5. Pilih komponen ke  $l$  yang memiliki volume terbesar dan tetapkan sebagai  $P_i$ ,  $P_i = \text{maks} \{V_l, l = 1, 2, \dots, N\}$ , simpan di  $S$ . Jika diperoleh lebih dari satu komponen maka pilih sebarang.
6. Set sumbu acuan =  $D$  dimana  $D = 1$  untuk sumbu acuan yang berada pada sumbu  $x$ ,  $D = 2$  untuk sumbu acuan yang berada pada sumbu  $y$ ,  $D = 3$  untuk sumbu acuan yang berada pada sumbu  $z$ .
7. Set  $j = 1$ .
8. Set  $D = j$ .
9. Identifikasi nomor urut  $u_k$  titik lokasi  $P_i$  pada sumbu acuan  $D$ . Jika terdapat nomor urut  $u_k$  pada sumbu acuan  $D$  maka lanjutkan ke Langkah 10, sebaliknya masuk ke Langkah 11.
10. Set  $u_L = u_k - 1$ , dan  $u_U = u_k + 1$ . Ambil semua komponen yang memiliki titik lokasi pada nomor urut  $u_L, u_k, u_U$ , simpan di  $C$ .
11. Jika  $j \neq 3$  maka ubah  $j = j + 1$  dan kembali ke Langkah 8. Jika  $j = 3$  maka ubah  $j = 1$  dan lanjutkan ke langkah berikut.
12. Periksa  $C$ , jika  $C = \emptyset$  maka iterasi selesai dan tampilkan  $S$ . Selain itu, lanjutkan ke langkah berikut.
13. Set  $i = i+1$ , pilih komponen ke  $l$  yang berada di  $C$  dan memiliki hubungan *mating* terbanyak dengan  $P_{i-1}$ , dan tetapkan sebagai  $P_i$ ,  $P_i = \text{maks} \{n_{kl}, k = P_{i-1}; l = 1, 2, \dots, N\}$ , simpan di  $S$ , hapus dari  $C$ . Jika diperoleh lebih dari satu komponen maka lanjutkan ke Langkah 14, sebaliknya, masuk ke Langkah 16.
14. Pilih komponen ke  $l$  yang berada di  $C$  dan memiliki hubungan *mating* terbanyak dengan semua komponen yang telah terpasang dan tetapkan sebagai  $P_i$ ,  $P_i = \text{maks} \{ \sum_{k=1}^N n_{kl}, k = P_1, \dots, P_{i-1}; l = 1, 2, \dots, N \}$ , simpan di  $S$ , hapus dari  $C$ . Jika diperoleh lebih dari satu komponen maka lanjutkan ke langkah 15, jika tidak maka masuk ke Langkah 16.
15. Pilih komponen ke  $l$  yang berada di  $C$  dan memiliki volume terbesar dan tetapkan sebagai  $P_i$ ,  $P_i = \text{maks} \{V_l, l = 1, 2, \dots, N\}$ , simpan di  $S$ , hapus dari  $C$ . Jika diperoleh lebih dari satu komponen maka pilih sebarang.
16. Set  $j = 1$
17. Set  $D = j$ .
18. Identifikasi nomor urut  $u_k$  titik lokasi  $P_i$  pada sumbu acuan  $D$ , jika  $u_k = u_L$  maka ubah  $u_L = u_L - 1$ , ambil komponen yang berada pada nomor urut  $u_L$ , simpan komponen tersebut di  $C$ . Jika  $j = 3$  maka kembali ke Langkah 12, sebaliknya, ubah  $j = j + 1$  dan kembali ke Langkah 17. Jika  $u_k \neq u_L$  lanjutkan ke langkah berikut.

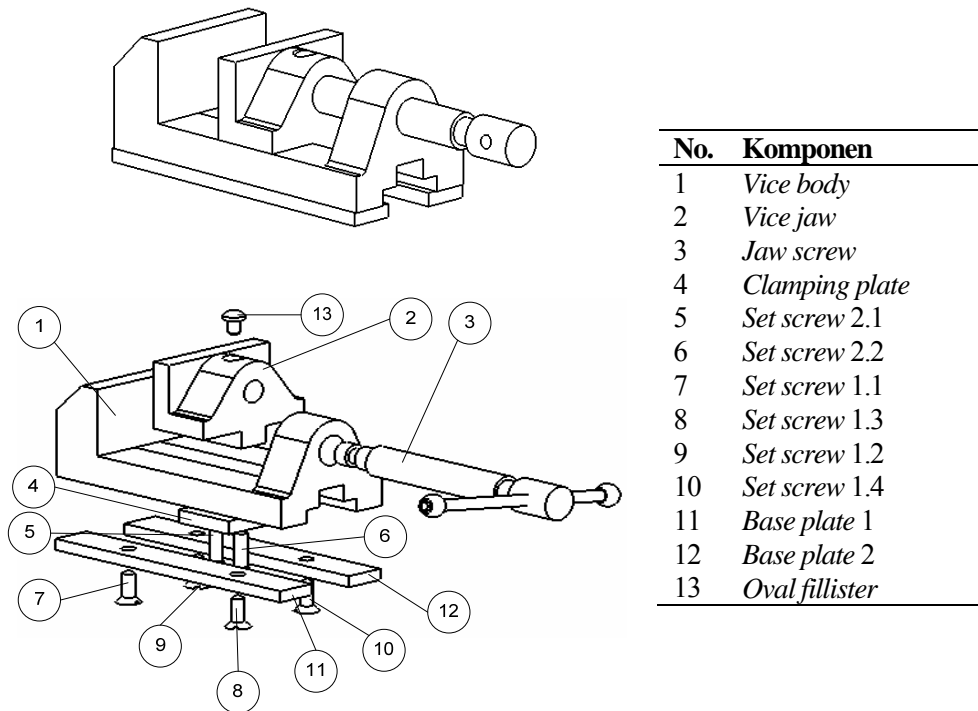


19. Jika  $u_k = u_U$  maka ubah  $u_U = u_U + 1$ , ambil komponen yang berada pada nomor urut  $u_U$ , simpan komponen tersebut di  $C$ . Jika  $j = 3$  maka kembali ke Langkah 12, sebaliknya, ubah  $j = j + 1$  dan kembali ke Langkah 17. Jika  $u_k \neq u_U$  kembali ke Langkah 12.

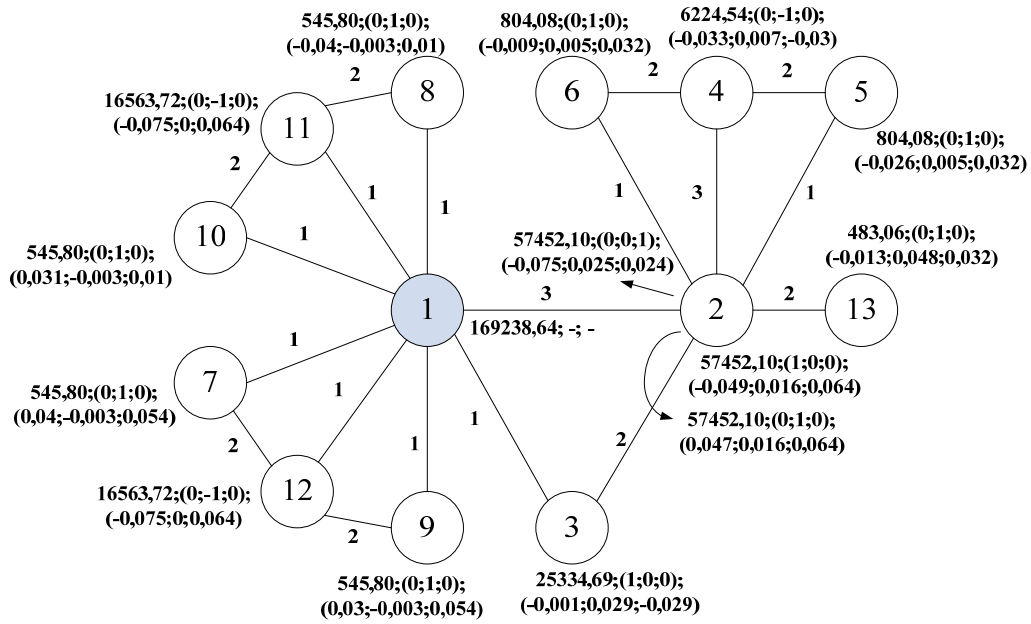
## 7. PENGUJIAN ALGORITMA

Produk yang digunakan untuk pengujian algoritma penentuan urutan perakitan dengan orientasi multiarah ortogonal adalah *Bench Vice*, yang diperlihatkan pada Gambar 3. Terdapat 3 tahap yang harus dilakukan untuk memperoleh urutan perakitan produk. Setiap tahap menggunakan algoritma tertentu. Tahap pertama adalah pembentukan basis data komponen dengan menggunakan algoritma yang diuraikan pada Bagian 4. Tahap kedua adalah pembentukan basis data lokasi komponen dengan menggunakan algoritma yang diuraikan pada Bagian 5. Tahap ketiga adalah pembentukan urutan perakitan komponen dengan menggunakan algoritma yang diuraikan pada Bagian 6.

Basis data komponen untuk produk *Bench Vice*, berisikan nama komponen pasangan yang kontak dan jenis *mating*-nya, jumlah *mating* perkomponen pasangan, total *mating* yang terjadi pada setiap komponen, dan volume setiap komponen. Data ini direpresentasikan dalam bentuk *graph* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 3. *Bench Vice assembly* (Tickoo, 2004)



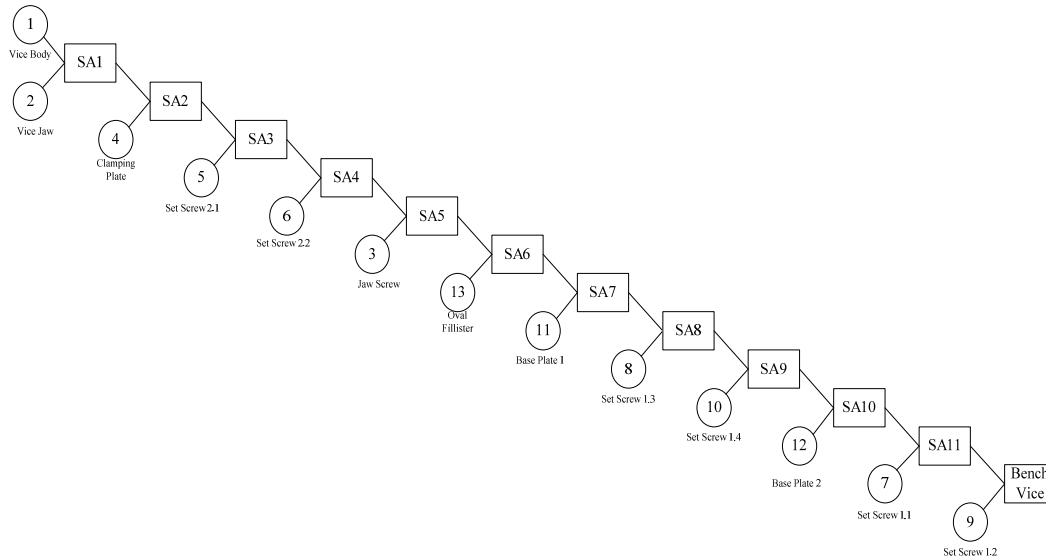
Gambar 4. Model graph untuk Bench Vice assembly

Basis data lokasi komponen untuk Bench Vice, berisikan daftar komponen yang kontak beserta jenis mating-nya, titik koordinat lokasi face yang kontak dan arah vektor normalnya, nomor urut titik lokasi mating antar komponen yang kontak. Titik koordinat lokasi face yang kontak dan arah vektor normalnya melengkapi graph pada Gambar 4. Nomor urut titik lokasi mating antar komponen yang kontak diperlihatkan pada Tabel 1. Titik kontak dibedakan berdasarkan arah normal face komponen yang kontak. Vektor normal harus paralel dengan sumbu sistem koordinat referensi.

Tabel 1. Nomor urut titik lokasi mating komponen pada Bench Vice

Nomor urut	Sumbu x		Nomor urut	Sumbu y		Nomor urut	Sumbu z	
	No	Nama		No	Nama		No	Nama
1	2	Vice jaw	1	10	Set screw 1.4	1	2	Vice jaw
2	3	Jaw jcrew	1	8	Set screw 1.3			
			1	9	Set screw 1.2			
			1	7	Set screw 1.1			
			2	11	Base plate 1			
			2	12	Base plate 2			
			3	5	Set screw 2.1			
			3	6	Set screw 2.2			
			4	4	Clamping plate			
			5	2	Vice jaw			
			6	13	Oval fillister			

Urutan perakitan produk *Bench Vice* diperoleh dengan menggunakan algoritma penentuan urutan perakitan produk, dan input basis data komponen dan lokasi komponen. *Vice body* terpilih sebagai *base part* pada iterasi pertama. Komponen yang akan dirakit berikutnya adalah *vice jaw* karena memiliki hubungan *mating* terbanyak dengan *base part*. Iterasi berikutnya dapat dilihat pada Tabel 2 dan diagram perakitannya diperlihatkan pada Gambar 5.



**Gambar 5. Diagram perakitan *Bench Vice***

Urutan perakitan yang dihasilkan bersifat linier, karena dapat digunakan untuk merakit komponen *Bench Vice* membentuk produk jadi. Tidak terjadi interferensi atau kesulitan instalasi komponen sewaktu dirakit. Gambar 5 memperlihatkan alur urutan perakitan *Bench Vice*. Komponen 1 terpilih sebagai *base part* karena memiliki volume terbesar. Komponen ini menjadi kedudukan awal bagi komponen lain. Komponen yang dirakitkan pertama kali ke komponen 1 adalah komponen 2. Urutan perakitan yang diperoleh dari hasil algoritma adalah nomor komponen 1-2-4-5-6-3-13-11-8-10-12-7-9.

Tabel 2. Iterasi penentuan urutan perakitan untuk bench vice

Komponen sub-assembly	Komponen kandidat		Jml mating dg kompi yg baru terpasang ( $n_{kl}$ )	Total mating dg kompi terpasang ( $\sum_{k=1}^N n_{kl}$ )	Urutan volume	Nomor urut titik lokasi mating ( $u_k$ ) di di.x	Nomor urut titik lokasi mating ( $u_k$ ) di y	Nomor urut titik lokasi mating ( $u_k$ ) di z	Komponen terpilih	
	No	Nama							No	Nama
SA1	13	Oval fillister	2	2	3		6			
	4	Clamping plate	3	3	2		4		3	4
	3	Jaw screw	2	3	1	2				
SA2	13	Oval fillister	0	2	3		6			
	3	Jaw screw	0	3	1	2			4	5
	5	Set screw 2.1	2	3	2		3			
	6	Set screw 2.2	2	3	2		3			
SA3	13	Oval fillister	0	2	3		6			
	3	Jaw screw	0	3	1	2				6
	6	Set screw 2.2	2	3	2		3		5	
SA4	13	Oval fillister	0	2	3		6			
	3	Jaw screw	0	3	1	2			6	3
	11	Base plate 1	0	1	2		2			
SA5	12	Base plate 2	0	1	2		2			
	13	Oval fillister	0	2	1		6		7	13
	11	Base plate 1	0	1	2		2			
SA6	12	Base plate 2	0	1	2		2			
	11	Base plate 1	0	1	1		2		8	11
	12	Base plate 2	0	1	1		2			
SA7	8	Set screw 1.3	2	3	2		1		9	8
	10	Set screw 1.4	2	3	2		1			
SA8	12	Base plate 2	0	1	1		2		10	10
	10	Set screw 1.4	2	3	2		1		11	12
SA9	12	Base plate 2	0	1	1		2		12	7
	7	Set screw 1.1	2	3	1		1			
SA10	9	Set screw 1.2	2	3	1		1		13	9
	9	Set screw 1.2	2	3	1		1			

## 8. KESIMPULAN

Makalah ini mengusulkan algoritma otomatisasi penentuan urutan perakitan produk, sebagai salah satu tahap dalam perencanaan dan evaluasi perakitan. Metode yang dikembangkan telah mampu menghilangkan beberapa tahap yang biasanya dilakukan secara manual. Tahapan tersebut adalah pembentukan gambar urai, pembentukan diagram *liaison*, analisis preseden secara manual dan pembentukan hubungan preseden. Pada makalah ini gambar urai tidak perlu dilakukan karena informasi yang dibutuhkan dapat langsung diperoleh dari gambar tumpuk model solid 3D. Diagram *liaison* tidak perlu dibentuk karena informasi hubungan antar komponen (*mating*) dapat langsung diperoleh. Pembatas preseden diperhatikan dengan menggunakan informasi lokasi *face* komponen yang kontak pada suatu sumbu. Otomasi penuh penentuan urutan perakitan dapat dilakukan dengan menggunakan informasi utama dari setiap langkah yang dihilangkan. Informasi tersebut dapat diperoleh langsung dari basis data CAD (*SolidWorks*) dengan bantuan algoritma yang dikembangkan pada penelitian ini.

Urutan perakitan ditentukan berdasarkan informasi lokasi *mating* pasangan komponen dan volume komponen. Fisibilitas urutan dijamin dengan memperhatikan masalah stabilitas, pembatas geometri, aksesibilitas, dan pengencang secara keseluruhan. Sistem CAD yang digunakan adalah *SolidWorks* 2005. Algoritma telah diuji menggunakan *Bench Vice* dan diperoleh urutan perakitan yang fisibel, dengan demikian otomatisasi penuh penentuan urutan perakitan telah dapat dilakukan.

Model perencanaan urutan perakitan yang dikembangkan masih terbatas pada perakitan produk multiaksial ortogonal, untuk penelitian selanjutnya perlu dikembangkan model pembentukan urutan perakitan multiaksial arah sebarang (tanpa syarat ortogonal). Hal ini dapat dilakukan dengan mengelompokkan komponen berdasarkan kesamaan arah vektor normal *face* yang kontak. Syarat ortogonal dihilangkan dengan mengabaikan keharusan keparalelan arah normal dengan sumbu-sumbu koordinat referensi. Selanjutnya logika algoritma yang dikembangkan pada penelitian ini dapat digunakan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alfadhilani, dan Toha, I. S., 2005. "Pembentukan Urutan Perakitan Produk dengan Input Gambar Solid 3D." *Prosiding Seminar Sistem Produksi VII*, LSP-ITB, p. 1-13.
- Alfadhilani, and Toha, I. S., 2007. "Assembly Sequence Generation for Orthogonal Multi-Axial Product Based on Mating Location Point and Volume of Components." *Proceeding the 1st Asia Pacific Conference on Manufacturing Systems, and the 8th National Conference on Production System*, p. 233-237.
- Ariastuti, R., Taroepratjeka, H., dan Toha, I. S., 1998. "Otomasi Pembentukan Urutan Perakitan Produk." *Jurnal Teknik dan Manajemen Industri*, Vol. 18, No. 1, p. 26-36.
- Arieh, B.D., and Kramer, B., 1994. "Computer-Aided Process Planning for Assembly: Generation of Assembly Operation Sequence." *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 3, p. 643-656.
- Delchambre, A., 1992. *Computer-Aided Assembly Planning*, Chapman & Hall, London.
- Gottipolu, R.B., and Ghosh, K., 2003. "A Simplified and Efficient Representation for Evaluation." *Computers in Industry*, Vol. 50, p. 251-264.

- Kanai, S., Takahashi, H., and Makino, H., 1996. "ASPEN: Computer-Aided Assembly Sequence Planning and Evaluation System Based on Predetermined Time Standard." *Annals of CIRP*, Vol. 45, No. 1, p. 35-39.
- Laperriere, L., and Elmaraghy, H.A., 1996. "GAPP: A Generative Assembly Process Planner." *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No. 4, p. 282-293.
- Tickoo, S., 2004. *SolidWorks for Designers Release 2004*, CADCIM Technologies, Schererville, USA.
- Toha, I.S., Baharuddin, F.R., dan Ma'ruf, A., 2004. "Otomasi Perencanaan Perakitan dengan Memanfaatkan Garis Bantu Perakitan." *Jurnal Teknik dan Manajemen Industri*, Vol. 24, No. 2., p. 15-27.
- Tseng, H.E., and Li, R.K., 1999. "A Novel Means of Generating Assembly Sequences Using the Connector Concept." *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 10, No. 5, p. 423-435.
- Whitney, D.E., 2004. *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*, Oxford University Press.