



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KUANTIFIKASI KOEFISIEN ATRIBUT *INSERTION*  
DENGAN PENDEKATAN GEOMETRI  
PADA PENGUKURAN KOMPLEKSITAS PERAKITAN  
PRODUK MEKANIK**

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister**

**Subkhan**

**0906579342**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2012**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Subkhan

NPM : 0906579342

Tanda tangan : 

Tanggal : Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Subkhan  
NPM : 0906579342  
Departemen : Teknik Mesin  
Judul Tesis : **KUANTIFIKASI KOEFISIEN ATRIBUT INSERTION  
DENGAN PENDEKATAN GEOMETRI PADA  
PENGUKURAN KOMPLEKSITAS PERAKITAN  
PRODUK MEKANIK**

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister pada program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr.Ir.Gandjar Kiswanto, M.Eng

Pembimbing II : Ir. Hendri D.S. Budiono, M.Eng

Penguji :

Jos Istiyanto, S.T, M.T, Ph.D

Ir. Henky Suskito Nugroho , M.T

Dr. Ir. R. Danardono Agus Sumarsono DEA, PE

Ditetapkan di Depok, tanggal Juli 2012

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI**

**TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Subkhan  
NPM : 0906579342  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Tesis

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**“KUANTIFIKASI KOEFISIEN ATRIBUT INSERTION  
DENGAN PENDEKATAN GEOMETRI  
PADA PENGUKURAN KOMPLEKSITAS PERAKITAN  
PRODUK MEKANIK”**

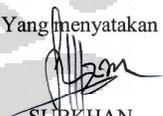
berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmediakan/ memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis.

Demikian pernyataan tertulis ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Depok,

Yang menyatakan,

Pada tanggal Juli 2012

  
SUBKHAN

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kahadirat AllaaHh Yang Maha 'Ilmu, karena atas segala Kuasa-NYA lah sehingga penulisan tesis ini dapat diselesaikan. Saya menyadari sepenuhnya bahwa penulisan dan penelitan ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak baik dalam bentuk materi, moral, dan spiritual. Pada kesempatan ini saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibunda tercinta Djaujah Danial yang dengan kasih-sayangnnya yang luas dan dalam senantiasa memanjatkan do'a bagi kemudahan-kemudahan dalam usaha saya menuntut ilmu sepanjang hayat.
2. Bapak Ir. Hendri D.S. Budiono, M.Eng dan Bapak Dr. Ir. Gandjar Kiswanto, M.Eng selaku pembimbing yang telah dengan sabar menyediakan kesempatan, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan dan membimbing dalam usaha penelitian dan penulisan tesis ini.
3. Istri tersayang Sri Hayati dan anak-anak tercinta Syafiqah, Wafiy dan Aqilfikri yang selalu memberikan doa, perhatian dan nasehat sehingga semangat menyelesaikan penelitian ini tetap terjaga.
4. Teman-teman sesama peneliti, Bu Dede, Bu Aida, Bu Nelce, Pak War, Pak Soleh, Pak Dia, Riky, Azka, Isma'il, Ari dan teman-teman nun jauh di lain tempat yang telah banyak membantu dalam berinspirasi dan berkarya.

Semoga AllaaHh Yang Maha Pengasih berkenan membalas semua kebaikan dan kemurahan hati pihak-pihak yang telah membantu. Besar harapan saya sekiranya tesis ini dapat bermanfaat bagi perkembangan industri dan dunia pendidikan di Indonesia. Semoga semangat menuntut ilmu dan meneliti senantiasa terpatri di hati hingga akhir hayat.

Depok, Juli 2012

Penulis

## ABSTRAK

Usaha kuantifikasi dengan meninjau informasi geometri pada produk terus dikembangkan, agar pengukuran kompleksitas menjadi lebih cermat dan hemat waktu. Penelitian ini menggunakan pendekatan geometri untuk mengidentifikasi keadaan komponen dalam rakitan dan pengangkaan koefisien aspek-aspek *insertion* seperti *alignment*, *insertion direction*, *holding down* dan *insertion resistance*. Koefisien aspek *alignment* didekati dengan meninjau informasi bentuk penampang memanjang dan melintang dari komponen berpasangan. Keadaan *User Coordinate System (UCS)* dimanfaatkan untuk menentukan posisi atas atau bawah produk, sehingga angka koefisien *insertion direction* dan identifikasi kondisi *holding down* dapat didekati. Informasi dimensi luas bidang kontak dari komponen yang berpasangan digunakan untuk menentukan kondisi suaian suatu pasangan komponen, sehingga koefisien aspek *insertion resistance* dapat diperoleh.

Angka koefisien aspek-aspek ini diujikan dengan model pengukuran kompleksitas perakitan Elmaraghy-Samy. Grafik yang diperoleh menunjukkan perilaku nilai faktor kompleksitas *insertion* yang serupa dengan pengukuran yang diterapkan sebelumnya. Di sisi lain, kuantifikasi koefisien *alignment* memberikan ruang identifikasi lebih cermat dengan mampu mendeteksi kondisi bahwa pasangan bentuk *taper* berkoefisien lebih kecil dibanding pasangan prismatic, sehingga mampu memberikan penurunan Nilai Kompleksitas Perakitan(KAI). Pengukuran pada konsep *Truss Foot* yang dimodifikasi dengan *taper* pada komponen *base* memberikan penurunan angka KAI dari 3.998 menjadi 3.986. Penurunan ini tidak terjadi pada pengukuran dengan metode sebelumnya.

Kata kunci: kompleksitas, perakitan, *insertion*, kuantifikasi.

## ABSTRACT

*Quantification with geometry approach is necessary to be developed in measurement complexity, so that it could become objectively, precisely and shorten time to define. This research identifies the state of the part and quantifies the coefficient of insertion difficulty aspects such as alignment, insertion direction, holding down after insertion and insertion resistance, with geometry approach. The information that presented in longitudinal and transverse cross-section of the parts drawing is used to quantify the coefficient of alignment aspect of the part. Axis information in User Coordinate System (UCS) is used to define vertical-horizontal orientation of the part or product, insertion direction difficulty aspect and 'holding down after insertion' aspect could easier to be quantified then. Intersection of surface contact is applied to define tolerances of parts mate, so that coefficient of insertion resistance difficulty is easier to be quantified.*

*These coefficients of insertion aspects are used into the model of assembly complexity measurement that already presented in journal of Assembly Complexity Measurement by Elmaraghy-Samy. The result shows that the graphic pattern of insertion complexity factor of parts is similar to Elmaraghy-Samy's method. On the other hand, quantification for alignment difficulty aspect gives more detail condition for alignment. The quantification is capable to define that parts mate with taper contact and prismatic contact. The taper contact coefficient is smaller than prismatic contact and it could reduce the number of product assembly complexity. Assessment on Truss Foot concept which modified on the base part by taper shape reduced the number of product assembly complexity from 3.998 to 3.986. This reduction will not exist if measured by Elmaraghy-Samy's quantification method.*

*Keywords: complexity, assembly, insertion, quantification.*

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah	2
1.2 Identifikasi Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Penelitian	6
1.6 Sistematika Penulisan	6
<b>BAB II STUDI PUSTAKA</b>	<b>8</b>
2.1 Perancangan Berorientasi Perakitan ( <i>Design For Assembly</i> )	8
2.2 Kompleksitas Perakitan	9
2.3 Model Kompleksitas Perakitan Samy-Elmaraghy	13
2.4 Koefisien Aspek-Aspek <i>Insertion</i>	15
<b>BAB III METODA PENELITIAN</b>	<b>18</b>
3.1 Pengumpulan Data Geometri Komponen Rakitan dan Analisa	18
3.2 Identifikasi Kondisi Aspek dan Penentuan Angka Koefisien Aspek <i>Insertion</i>	18
3.3 Kompleksitas Rakitan Produk dari Koefisien Elmaraghy	19

3.4	Uji Coba Pegukuran Kompleksitas	19
3.5	Analisa Hasil Uji Coba	19
3.6	Kesimpulan	19
BAB IV PENGEMBANGAN MODEL		21
4.1	Aspek <i>Alignment</i>	21
4.1.1	Mengumpulkan informasi-informasi geometri	22
4.1.2	Memilih informasi-informasi geometri yang terkait perakitan	23
4.2	Aspek Arah <i>Insert (Insert Direction)</i>	28
4.3	Aspek <i> Holding Down</i>	31
4.3.1	Batasan-batasan dan Pengenalan Variabel	32
4.3.2	Analisa Statika dan Keputusan Kondisi	32
4.3.3	Koefisien Kesulitan Aspek <i> Holding Down</i>	35
4.4	Aspek <i> Insertion Resistance</i>	35
4.5	Uji Coba Produk Piston	37
4.6	Uji Coba Produk <i> Truss Foot</i>	42
BAB V ANALISA DATA		48
5.1	Tinjauan Umum	48
5.2	Produk Piston	49
5.3	Produk <i> Truss Foot</i>	52
BAB VI KESIMPULAN		55
DAFTAR PUSTAKA		57
LAMPIRAN		

## DAFTAR GAMBAR

Gambar-1.1 Kedudukan Perakitan dalam Suatu Total Produksi	2
Gambar-2.1.1 Penerapan bentuk <i>taper</i> untuk memfasilitasi proses perakitan	9
Gambar-2.1.2 Bentuk pin pengarah dengan <i>chamfer</i>	10
Gambar-2.2.1 Manajemen Kompleksitas dalam Ruang Lingkup Sistem Produksi	11
Gambar-2.4.1 Hirarki model kompleksitas Elmaraghy menunjukkan ilustrasi pengaruh angka koefisien aspek <i>insertion</i> terhadap kompleksitas perakitan produk	17
Gambar-3.1 Diagram alir metode penelitian	20
Gambar-4.1.1 Beberapa komponen dengan bentuk-bentuk dasar	22
Gambar-4.1.2 Keadaan komponen silinder yang di- <i>insert</i> ke lubang dengan data geometri rakitannya	24
Gambar-4.1.3 Kondisi batang segiempat ketika akan di- <i>insert</i> dengan informasi geometri pembatasnya.	25
Gambar-4.1.4 Perakitan komponen prismatic dalam pasangannya dengan serangkaian informasi pembatasnya	26
Gambar-4.1.5 Pemasangan poros <i>taper</i> ke dalam lubang dengan informasi geometri pembatasnya	26
Gambar-4.2.1 <i>Insertion</i> komponen dari atas dan dari samping dengan perbedaan kesesuaian UCS	28
Gambar-4.3.1 Tahapan umum penentuan <i>holding down</i>	31
Gambar-4.3.2 Algoritma penentuan kondisi <i>holding down</i> suatu komponen	34
Gambar-4.4.1 Diagram alir identifikasi suaian ukuran	36
Gambar-4.5.1 Perakitan Produk Piston	38
Gambar-4.5.2. Bentuk penampang <i>compression ring</i> dan <i>oil ring</i> pada piston.	39
Gambar-4.6.1 Konsep <i>Trus Foot</i>	42
Gambar-4.6.2 Gambar Perakitan Konsep <i>Truss foot</i>	44

Gambar-4.6.3 Modifikasi fitur dengan bentuk <i>taper</i> untuk meningkatkan kemudahan <i>alignment</i>	46
Gambar-5.2.1 Grafik perbandingan pola perubahan nilai $C_i$ komponen piston versi sebelumnya dengan versi geometri	50
Gambar-5.2.2 Perbandingan pola perubahan nilai $c_{p, part}$ pada komponen piston versi sebelumnya dengan versi geometri	50
Gambar-5.2.3 Grafik perbandingan pola perubahan nilai $c_{proc.ass.x}$ pada komponen piston versi sebelumnya dengan versi geometri	51
Gambar-5.3.1 Grafik perbandingan nilai Koefisien kompleksitas rakitan produk relatif sebelum dan sesudah modifikasi komponen <i>base</i>	53
Gambar-5.3.2 Grafik pengaruh perubahan nilai koefisien aspek <i>alignment</i> terhadap koefisien kompleksitas rakitan relatif ( $c_{proc.ass.x}$ ) pada <i>Truss Foot</i>	54

## DAFTAR TABEL

Tabel -1.1 Koefisien aspek <i>Handling</i> dan <i>Insertion</i> pada perakitan otomatis	4
Tabel-2.1 Sebagian tabel estimasi biaya <i>work head</i> relatif pada proses <i>insertion</i> perakitan otomatis	16
Tabel-4.1.1 Beberapa komponen-komponen dasar dengan informasi geometri yang dimiliki	23
Tabel-4.1.2 Persentase informasi geometri pembatas pada komponen dengan berbagai bentuk penampang	27
Tabel-4.2.1 Persentase arah <i>insert</i> berdasar kebutuhan usaha	30
Tabel-4.2.2 Persentase arah <i>insert</i> setelah disesuaikan dengan data geometri	31
Tabel-4.3.1 Persentase kebutuhan informasi kondisi kebutuhan <i>holding down</i>	35
Tabel-4.4.1 Derajat kelonggaran ukuran komponen dalam rakitan	37
Tabel-4.5.1. Koefisien aspek <i>alignment</i> dan <i>insertion direction</i> produk piston	39
Tabel-4.5.2 Nilai koefisien aspek <i>alignment</i> dan <i>insertion direction</i> Elmaraghy	40
Tabel-4.5.3 Koefisien atribut <i>insertion</i> produk piston	41
Tabel-4.5.4 Kompleksitas perakitan produk piston ( $KAI_{piston}$ )	41
Tabel-4.6.1 Faktor kompleksitas <i>handling Truss foot</i>	45
Tabel-4.6.2 Faktor kompleksitas <i>insertion Truss foot</i>	45
Tabel-4.6.3 Angka kompleksitas perakitan produk ( $KAI$ ) <i>Truss Foot</i>	46
Tabel-4.6.4 Perubahan angka variabel kompleksitas rakitan <i>Truss Foot</i> pada komponen <i>Base</i> mempengaruhi nilai $KAI_{Trussfoot}$ .	47
Tabel-5.1.1 Koefisien Aspek <i>Alignment</i> pada Perakitan Otomatis	48
Tabel-5.1.2 Koefisien Aspek <i>Insertion Direction</i> pada Perakitan Otomatis	49
Tabel-5.1.3 Angka koefisien aspek <i>holding down</i>	49
Tabel-5.1.4 Angka koefisien aspek <i>insertion resistance</i>	49
Tabel-5.3.1 Perbandingan nilai $C_i$ metoda sebelumnya dan pendekatan geometri	52
Tabel-5.3.2 Angka Kompleksitas Rakitan <i>Truss Foot</i> pada kedua metoda	52

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran-1 : Tabel estimasi biaya *workhead* untuk perakitan otomatis
- Lampiran-2 : Faktor kompleksitas *handling* dan *insertion* produk piston
- Lampiran-3 : Kompleksitas perakitan produk piston
- Lampiran-4 : Faktor kompleksitas *handling* dan *insertion* produk *Truss Foot*
- Lampiran-5 : Kompleksitas perakitan produk *Truss Foot*
- Lampiran-6: Faktor kompleksitas *handling* dan *insertion* produk *Truss Foot* setelah modifikasi komponen *base*.
- Lampiran-7: Kompleksitas perakitan produk *Truss Foot* setelah modifikasi komponen *base*.

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

Industri-industri senantiasa mengembangkan diri dalam rangka memenuhi tuntutan peningkatan kualitas produk, produktifitas yang tinggi, penurunan biaya produksi, ramah lingkungan dan tingkat kesehatan dan keamanan yang tinggi. Dalam rangka memenuhi tuntutan tersebut maka industri harus menerapkan perencanaan proses manufaktur yang baik.

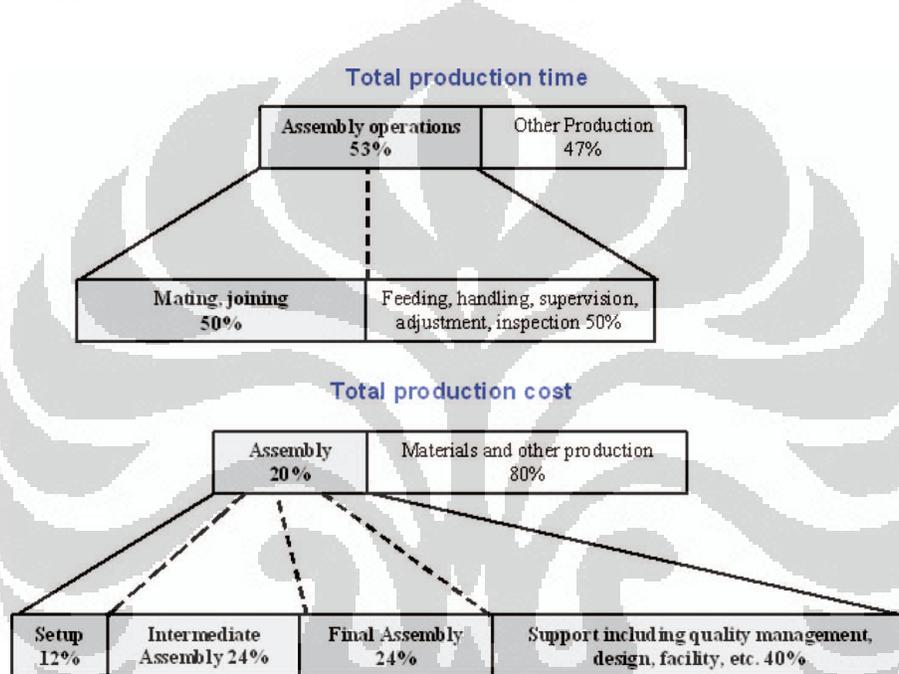
Proses desain dan pengembangan produk dalam suatu rangkaian siklus produksi merupakan hal yang sangat menentukan bagi keberhasilan rangkaian proses berikutnya. Dengan demikian seluruh fase-fase dalam proses desain dan pengembangan produk seyogyanya dilaksanakan dengan teliti, efektif, ekonomis, dan senantiasa dikembangkan demi keberlangsungan produk dan industri. Pengembangan konsep dan desain system level sebagai fase-fase awal dalam rangkaian proses desain dan pengembangan produk merupakan fase penentu dan pedoman bagi fase-fase berikutnya. Sehingga pengembangan terhadap fase-fase ini merupakan hal yang sangat penting.

Isu utama dalam fase desain sistem level adalah tentang bagaimana menentukan atau memutuskan alternatif konsep yang terbaik. Metoda-metoda lazim yang digunakan saat ini dirasakan atau dianggap masih konvensional dan mengkonsumsi waktu yang lama. Salah satu metoda penentuan alternatif konsep terbaik yang sedang dikembangkan saat ini adalah dengan pengukuran secara kuantitatif terhadap kompleksitas alternatif-alternatif konsep produk. Angka kompleksitas suatu rancangan produk diharapkan dapat menjadi salah satu parameter lanjut yang dapat dianalisa dalam suatu software desain di samping penganalisaan parameter lanjut lainnya seperti, simulasi kinematik, kekuatan bahan, proses manufaktur, proses perakitan, dan estimasi biaya.

## 1.1. Latar Belakang Masalah

### 1.1.1 Pentingnya Perancangan Berorientasi Perakitan

Perancangan Berorientasi Perakitan (*Design for assembly*) dimaksudkan sebagai suatu usaha untuk merancang suatu produk dengan orientasi agar produk tersebut lebih mudah untuk dirakit [1]. Hal ini terangkat ketika disadari betapa proses perakitan suatu produk mempunyai pengaruh yang sangat penting terhadap penggunaan waktu dan biaya dalam suatu rangkaian produksi.



Gambar-1.1 Kedudukan Perakitan dalam Suatu Total Produksi [2]

Sebagian besar industri besar seperti alat berat, otomotif, *aerospace* dan peralatan mesin telah menyadari betapa perakitan merupakan sektor vital yang harus diperhatikan secara serius. Gambar 1.1 memperlihatkan bahwa 50% waktu produksi berada pada operasi perakitan dan mempunyai porsi biaya 20 % dari total biaya produksi.

### 1.1.2 Pengembangan Kompleksitas Perakitan

Sedemikian pentingnya kemudahan dan estimasi kecepatan dalam proses perakitan untuk dipertimbangkan dalam mengkonsep suatu produk, maka kompleksitas perakitan menjadi faktor yang penting pula untuk dikembangkan agar usaha penentuan alternatif konsep terbaik berbasis kuantifikasi kompleksitas menjadi lebih efektif.

Model kompleksitas perakitan yang dikembangkan oleh Elmaraghy telah menyentuh segala aspek (*feature*) kesulitan yang mungkin muncul dan sangat mempengaruhi selama *handling*, *insertion* dan *fastening*.

$$KAI_{produk} = \left[ \frac{n_p}{N_p} + c_{proc.ass.x} \right] \left[ \log_2(N_p + 1) \right] + \left[ \frac{n_s}{N_s} \right] \left[ \log_2(N_s + 1) \right] \dots (1.1)$$

Model kompleksitas perakitan Elmaraghy pada persamaan-1.1 memperlihatkan bahwa kompleksitas perakitan suatu produk ( $PAI_{produk}$ ) merupakan fungsi-fungsi dari keragaman produk ( $n_p/N_p$ ), koefisien kompleksitas perakitan produk relative ( $c_{proc.ass.x}$ ), entropi produk ( $\log_2(N_p + 1)$ ), keragaman *fastening* ( $n_s/N_s$ ) dan entropi *fastening* ( $\log_2(N_s + 1)$ ). Koefisien kompleksitas proses perakitan produk relatif sendiri merupakan fungsi dari persentase keragaman komponen ( $x_p$ ) dan koefisien kompleksitas perakitan komponen ( $c_{p,part}$ ). Koefisien kompleksitas perakitan komponen dipengaruhi oleh nilai faktor kompleksitas *handling* ( $Ch$ ) dengan segala fitur atau aspek-aspek dalam *handling* ( $j$ ) dan faktor kompleksitas *insertion* ( $Ci$ ) dengan segala aspek *insertion* ( $k$ ), sebagaimana terlihat pada persamaan-1.2 dan 1.3.

$$c_{proc.ass.x} = \sum_{p=1}^n x_p * c_{p,part} \dots \dots \dots (1.2)$$

$$C_{p,part} = \frac{C_h \sum_1^j C_{h,f} + C_i \sum_1^k C_{i,f}}{\sum_1^j C_{h,f} + \sum_1^k C_{i,f}} \dots\dots\dots(1.3)$$

Besarnya faktor kompleksitas *handling* dan *insertion* ditentukan oleh besarnya koefisien setiap aspek yang dimiliki oleh setiap komponen. Nilai koefisien setiap aspek kesulitan ini diambil dari nilai rata-rata waktu dan biaya berdasar data dari tabel estimasi waktu dan biaya proses perakitan otomatis karya Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst dan Winston A.Knight. Kemudian Elmaraghy mengolah dan merangkumnya sedemikian rupa sehingga diperoleh angka koefisien setiap aspek-aspek *handling* dan *insertion*. Sebagai contoh dapat dilihat nilai koefisien kesulitan setiap aspek *insertion* dalam perakitan otomatis seperti pada Tabel-1.1.

*Tabel-1.1 Koefisien Aspek Handling dan Insertion pada Perakitan Otomatis*[2]

Group	Feature	Feature description	Average Difficulty factor, $C_f$
Handling attributes	Symmetry	<i>Rotational part</i>	
		$\alpha$ symmetric and $\beta$ symmetric	0.45
		$\beta$ symmetric only	0.66
		$\alpha$ symmetric only	0.77
		No symmetry	1
		<i>Non-rotational part</i>	
		180° symmetry about three axes	0.6
		180° symmetry about one axis only	0.77
		No symmetry	1
		Flexibility	Non-flexible
		Flexible	1
	Delicatness	Non-delicate	0.8
		Delicate	1
	Stickiness	Not sticky	0.8
Sticky		1	
Tangling/nesting	Not tangle/nest	0.8	
	Tangle/nest	1	
Insertion attributes	Holding down after insertion	Not required	0.75
		Required	1
	Insertion resistance	Does not exist	0.67
		Exists	1
	Alignment and positioning	Easy	0.67
		Not easy	1
	Mechanical fastening methods	Screwing or other processes	0.5
		Riveting or similar processes	0.56
		Bending or similar processes	1
	Non-mechanical fastening methods	Chemical processes	0.67
		Additional material required	0.92
		No addition of material (friction, ...)	1
Insertion direction	Straight line from above	0.5	
	Straight line not from above	0.54	
	Not straight line insertion	1	

Dari Tabel-1.1 tersirat bahwa seorang perancang produk harus dengan baik memahami pemikiran Boothroyd pada tabel estimasi waktu perakitan terlebih dahulu, baru kemudian dapat menentukan apakah perakitan suatu komponen dalam produk itu:

- membutuhkan *holdingdown* atau tidak
- ada atau tidak *insertion resistance*
- mudah atau tidaknya *alignment*
- bagaimana dan dari manakah arah *insertion*

Keadaan ini dapat dipersingkat jika deskripsi setiap aspek ditinjau langsung kepada kondisi informasi geometri setiap komponen. Informasi geometri yang dimiliki oleh suatu komponen sangat mempengaruhi bagaimana komponen itu digambar, diproses, dirakit, dikemas bahkan dirawat. Parameter geometri dalam suatu desain komponen merupakan parameter sederhana yang dapat dikenali, baik oleh indera manusia maupun oleh rancangan program dalam suatu software desain. Maka seyogyanya aspek geometri selalu terlibat dalam setiap usaha sintesa atau analisa desain suatu komponen atau produk.

Tesis ini disusun dengan berfokus pada pengembangan model kompleksitas perakitan oleh Elmaraghy dengan peninjauan aspek kondisi geometri terhadap aspek-aspek *insertion* pada perhitungan faktor kompleksitas *insertion*. Diharapkan hal ini akan menjadi bahan acuan dalam usaha pengembangan program analisa kompleksitas perakitan produk pada suatu *software* perancangan.

## **1.2. Identifikasi Masalah**

Bagaimana menentukan koefisien aspek-aspek *insertion* dengan memanfaatkan informasi geometri komponen pada perhitungan kompleksitas perakitan produk.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan angka-angka koefisien aspek-aspek *insertion* pada model kompleksitas perakitan otomatis.
2. Mengusulkan angka-angka tersebut sebagai pengganti angka koefisien aspek *insertion* sebelumnya.

#### 1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

##### 1. Bagi Penulis

Menambah pengetahuan dan wawasan penulis terutama dalam hal ilmu dan teknologi perancangan manufaktur.

##### 2. Bagi Perusahaan / Industri

Sebagai bahan rekomendasi terhadap proses pengembangan *software* desain, khususnya program analisa kompleksitas manufaktur produk.

##### 3. Bagi dunia akademik

Dapat menjadi suatu topik yang menarik untuk dikembangkan dalam usaha-usaha penelitian.

#### 1.5. Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada tinjauan informasi geometri pada atribut *insertion* perakitan otomatis, khususnya pada aspek *alignment*, *insert direction*, *insertion resistance* dan *holding down after insertion*. Pengukuran kompleksitas perakitan pada penelitian ini dilakukan tanpa meninjau kepada kemungkinan urutan perakitan.

#### 1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan ini disusun sebagai berikut:

### BAB I : PENDAHULUAN

Terdiri dari latar belakang, identifikasi masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan.

Universitas Indonesia

**BAB II : STUDI PUSTAKA**

Konsep dasar kompleksitas (kompleksitas produk, proses, operasional dan perakitan), faktor-faktor dalam proses *assembly*, dan tulisan-tulisan tentang pentingnya perakitan dalam proses manufaktur.

**BAB III : METODOLOGI PENELITIAN**

Tentang tahapan proses yang dilakukan dalam pencarian pendekatan kuantitatif faktor geometri terhadap indeks kompleksitas perakitan.

**BAB IV : PENGEMBANGAN MODEL**

Pembahasan yang dimaksud adalah melibatkan pendekatan data geometri rakitan komponen dengan model kompleksitas perakitan versi Elmaraghy

**BAB V : ANALISA DATA**

Berisi tentang hasil perhitungan, analisa data yang ada dan keterkaitannya terhadap model sebelumnya.

**BAB VI : KESIMPULAN**

Pada bagian ini menjelaskan tentang kesimpulan dari hasil yang diperoleh dalam penelitian ini.

## BAB II

### STUDI PUSTAKA

#### 2.1 Perancangan Berorientasi Perakitan (*Design For Assembly*)

Usaha untuk meminimasi biaya dan waktu produksi secara total terus dilakukan hingga ke tahap perancangan produk. Setiap aspek dalam perakitan terus dikembangkan agar didapat desain produk optimal. *Design For Assembly (DFA)* dimaksudkan sebagai suatu usaha untuk merancang suatu produk dengan orientasi agar produk tersebut lebih mudah untuk dirakit, sehingga pada akhirnya turut meminimasi waktu dan biaya. Hal ini terangkat ketika disadari betapa perakitan mempunyai pengaruh yang sangat penting terhadap penggunaan waktu dan biaya dalam suatu rangkaian produksi.

Rancangan dengan aspek perakitan yang baik adalah rancangan yang memenuhi tuntutan sebagai berikut:

1. Mampu dirakit dengan satu tangan oleh seorang yang buta yang mengenakan sarung tangan tinju.
2. Setiap komponennya stabil dan mampu menepatkan diri pada posisinya secara mandiri
3. Tidak ada toleransi ukuran
4. Tidak banyak memerlukan pengencangan
5. Tidak banyak memerlukan peralatan dan pemegang
6. Setiap komponen dirakit dalam arah orientasi yang tepat
7. Setiap komponen asimetri agar mudah diperlakukan
8. Setiap komponen mudah di-handle dan di-insert

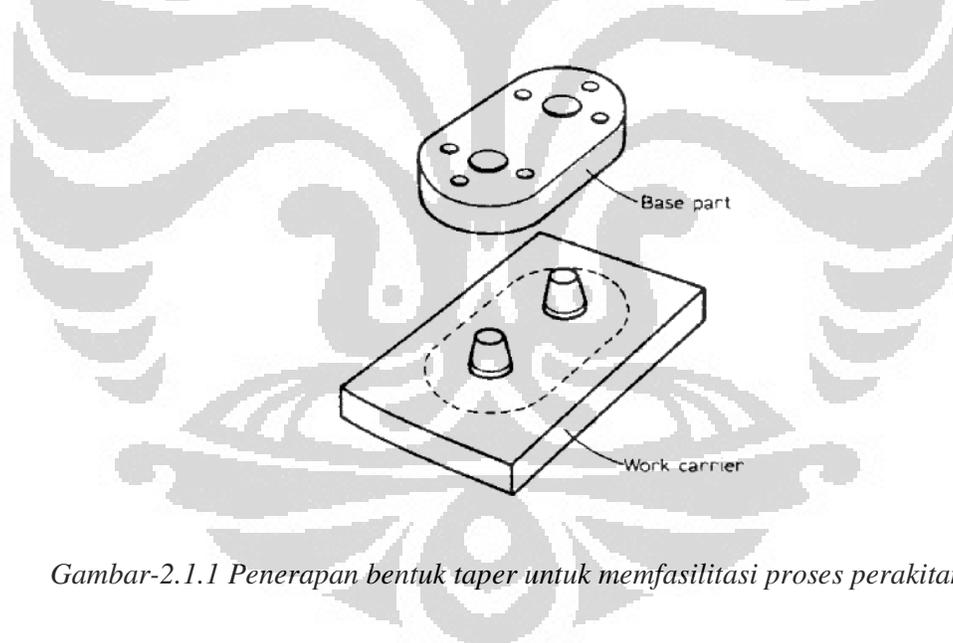
Hal-hal yang dikemukakan di atas merupakan keadaan yang sangat sulit untuk dipenuhi secara keseluruhan. Namun diharapkan setidaknya setiap tuntutan

tersebut dapat dijadikan acuan bagi tujuan perakitan yang ingin dicapai dalam rancangan suatu produk.

Proses perakitan suatu produk dapat dibagi dalam 2(dua) area, yaitu:

1. *Handling* (proses penanganan)
2. *Insertion* dan *fastening* (proses pemasangan dan pengencangan)

*Handling* dimaksudkan sebagai proses usaha mengambil suatu komponen, mengorientasikan dan memindahkannya. *Insertion* dan *fastening* adalah meletakkan atau memasukkan dan melekatkan suatu komponen ke komponen atau group komponen lainnya dalam suatu produk. Dengan demikian suatu produk dinyatakan mudah untuk dirakit adalah jika komponen-komponennya mudah untuk di-*handling*, di-*insert* dan mudah di-*fasten*. Gambar-2.1 memperlihatkan contoh kemudahan perakitan ketika suatu bentuk *taper* diterapkan pada suatu pasangan komponen.



Gambar-2.1.1 Penerapan bentuk taper untuk memfasilitasi proses perakitan[1]

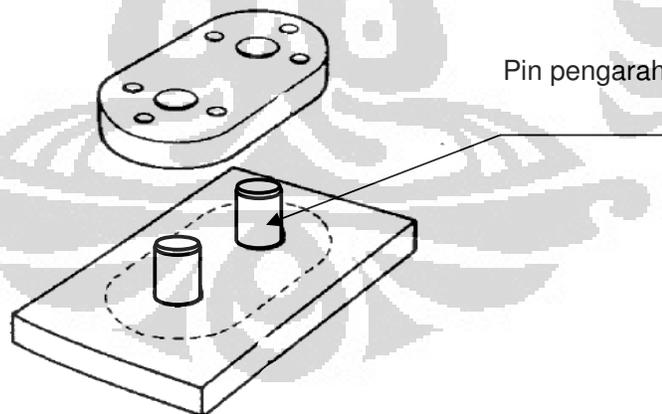
## 2.2 Kompleksitas Perakitan

Perkembangan teknologi perancangan dalam dunia perancangan manufaktur mengantar kepada penggunaan kompleksitas manufaktur sebagai suatu elemen rancangan yang patut ditinjau dalam usaha memutuskan konsep produk yang akan diproduksi. Elemen-elemen utama yang selalu ditinjau dalam

pengembangan model kompleksitas adalah teknologi perancangan, proses manufaktur, dan pengaruh psikologi dan kognitif manusia[3].

Kompleksitas dalam teknologi perancangan memaksa industri untuk turut memberi perhatian kepada kompleksitas perakitan, karena salah satu tolak ukur perancangan yang baik adalah kemudahan dalam perakitan. Kompleksitas perakitan produk dinyatakan sebagai tingkat kesulitan *handling* dan *insertion* yang diakibatkan oleh keadaan fisik geometri setiap komponen dalam produk.

Sebagai contoh perakitan *base part* terhadap *work carrier* seperti pada Gambar.2.1.1. Proses *insertion base part* menjadi lebih mudah dibanding jika kedua pin pengarah pada *work carrier* dirancang prismatik, walaupun difasilitasi bentuk *chamfer*. Rancangan seperti pada Gambar-2.1.2 akan mengkonsumsi waktu *insertion* yang lebih lama. Proses *alignment* komponen *base* akan sangat dipengaruhi oleh bentuk rancangan pin pengarah pada *work carrier*. Hal ini memberi arti bahwa rancangan dengan bentuk *taper* menyumbangkan kompleksitas *insertion* yang lebih rendah dibanding rancangan pin dengan bentuk prismatik ber-*chamfer*. Kompleksitas *insertion* ini berikutnya mempengaruhi perubahan kompleksitas perakitan produk.

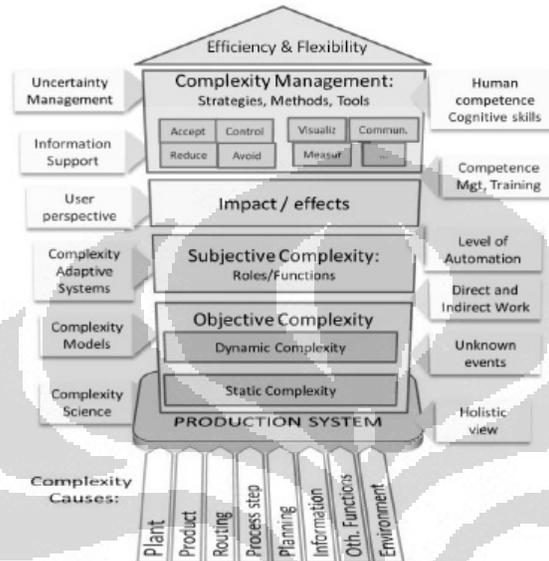


Gambar-2.1.2 Bentuk pin pengarah dengan chamfer

Per Gulander dan kawan-kawan memperkenalkan model kompleksitas produksi yang menggambarkan manajemen kompleksitas dalam bingkai sistem

**Universitas Indonesia**

produksi untuk mencapai fleksibilitas dan efisiensi produksi. Model kompleksitas harus meninjau kepada seluruh aspek yang terlibat, hingga kepada faktor-faktor penyebab baik langsung maupun tak langsung [4].



Gambar-2.2.1 Manajemen Kompleksitas dalam Ruang Lingkup Sistem Produksi[4]

Hal lain yang dinyatakan dalam penelitiannya bahwa kompleksitas harus didekatkan kepada usaha pendekatan subjektif dan objektif. Pendekatan subjektif merupakan cara yang efektif ketika beberapa aspek yang rumit harus ditinjau bersamaan, namun pendekatan objektif tetap menjadi usaha yang prioritas.

Xiaowei Zhu dan kawan-kawan telah mengusung model kompleksitas manufaktur dalam model pencampuran garis urutan perakitan. Model kompleksitas perakitan ini memberi tekanan pada variasi kemungkinan garis urutan perakitan yang dipilih oleh operator[5]. Operator secara subjektif memegang peranan sangat penting dalam menentukan setiap komponen yang harus terlibat dalam suatu proses. Demikian pentingnya peran operator dalam memilih maka hal ini disebut sebagai *Operator Choice Complexity*. Selanjutnya kompleksitas perakitan diturunkan secara lebih detail menjadi kompleksitas

komponen, kompleksitas *tool*, kompleksitas *fixture*, kompleksitas prosedur, kompleksitas *feeding* dan kompleksitas transfer.

Elmaraghy dan kawan-kawan berpendapat bahwa kompleksitas terdiri dari 3(tiga) elemen pokok, yaitu jumlah informasi, keragaman informasi dan isi informasi itu sendiri[6]. Terdapat tiga jenis kompleksitas manufaktur, yaitu kompleksitas produk, kompleksitas proses, kompleksitas operasional.

Model bagi kompleksitas produk ( $CI_{product}$ ) dinyatakan sebagai:

$$CI_{product} = \left( \frac{n}{N} + c_{j,product} \right) * \log_2(N+1) \dots\dots\dots(2.1)$$

Dari persamaan-2.1 diperlihatkan bahwa keragaman informasi direpresentasikan oleh  $n/N$  (rasio keragaman produk) dengan  $n$  adalah jumlah jenis informasi dan  $N$  jumlah seluruh informasi. Variabel  $c_{j,product}$  merepresentasikan isi informasi dan dinyatakan sebagai koefisien kompleksitas relatif produk. Jumlah elemen informasi direpresentasikan dengan entropi informasi oleh  $\log_2(N+1)$ . Berikutnya pada persamaan 2.2 menunjukkan koefisien kompleksitas relatif produk yang merupakan fungsi dari koefisien kompleksitas relatif fitur ( $c_{f,feature}$ ) dan persentase keragaman fitur( $x_f$ ).

$$c_{j,product} = \sum_{f=1}^F x_f * c_{f,feature} \dots\dots\dots(2.2)$$

Seterusnya koefisien kompleksitas fitur relatif juga dipengaruhi oleh jumlah fitur, faktor kompleksitas fitur (dengan segala kategori yang ada di dalamnya), jumlah spesifikasi khusus, dan faktor kompleksitas spesifikasi khusus (dengan segala kategori yang ada di dalamnya).

Kompleksitas proses merupakan jumlah dari indeks kompleksitas proses individual ( $pc_x$ ) dan kompleksitas produk seperti ditunjukkan pada persamaan-2.3.

$$PI_{process} = \sum pc_x + CI_{product} \dots\dots\dots(2.3)$$

Seperti halnya kompleksitas produk, seperti ditunjukkan pada persamaan-2.4, Indeks Kompleksitas Proses merupakan fungsi dari rasio keragaman proses, jumlah informasi (direpresentasikan oleh entropi proses) dan isi informasi proses pada setiap komponen ( $c_{proses,x}$ ).

$$pc_x = (D_{R,process,x} + c_{process,x}) * H_{process,x} \dots\dots\dots(2.4)$$

Demikian pula halnya dengan Kompleksitas Operasional (*OI*), model kompleksitas nya direpresentasikan dengan pola yang relatif sama dengan model kompleksitas proses (Lihat persamaan-2.5). Kompleksitas operasional merupakan jumlah dari kompleksitas operasinal produk dan kompleksitas operasional proses.

$$OI = (D_{Rop,product} + c_{o,product}) * H_{op,product} + (D_{Rop,process} + c_{o,process}) * H_{op,process} \dots\dots\dots(2.5)$$

Ketiga jenis kompleksitas manufaktur (produk, proses dan operasional) telah dikemukakan secara konsisten oleh Elmaraghy dengan model yang senantiasa melibatkan 3(tiga) elemen pokok; jumlah informasi, keragaman informasi dan isi informasi. Kemudian ketiga elemen tersebut menyentuh seluruh aspek yang melekat pada setiap jenis kompleksitas manufaktur hingga kepada bagian terkecil.

### 2.3 Model Kompleksitas Perakitan Samy-Elmaraghy

Elmaraghy dan kawan-kawan memperkenalkan kompleksitas perakitan dengan penekanan yang lebih dalam kepada informasi-informasi yang ada pada produk itu sendiri. Kompleksitas perakitan produk dinyatakan sebagai tingkat kesulitan *handling* dan *insertion* yang diakibatkan oleh keadaan fisik geometrik setiap komponen dalam produk. Faktor-faktor *handling*, *insertion* dan *fastening* dalam proses perakitan selanjutnya ditinjau lebih detail ke dalam aspek-aspek yang muncul dari hal-hal yang mempengaruhi usaha perakitan. Lebih lanjut setiap aspek tersebut diberikan angka koefisien kesulitan yang didapat dari rata-rata waktu atau biaya pada data base perakitan yang telah disusun oleh Boothroyd (Lihat lampiran: Tabel estimasi perakitan produk). Aspek-aspek yang mempengaruhi proses *insertion* dalam perakitan adalah:

1. *Holding down*
2. *Insertion resistance*

### 3. *Alignment*

### 4. *Insert direction*

Dengan analisa proses perakitan dan usaha pengolahan data yang dilakukan terhadap *data base* dari Boothroyd dan Dewhurst, model kompleksitas perakitan yang diunjukkan adalah seperti pada persamaan-1.1. Kompleksitas perakitan produk ( $KAI_{produk}$ ) merupakan fungsi dari keragaman komponen ( $\frac{n_p}{N_p}$ ) dari keseluruhan komponen dalam produk, keragaman elemen pengikat ( $\frac{n_s}{N_s}$ ), koefisien kompleksitas proses perakitan produk ( $c_{proc.ass.x}$ ) serta entropi jumlah informasi komponen ( $\log_2(N_p + 1)$ ) dan elemen pengikat ( $\log_2(N_s + 1)$ ).

Indeks kompleksitas proses perakitan produk merupakan peninjauan koefisien kompleksitas perakitan komponen ( $c_{p,part}$ ) secara keseluruhan dan seberapa persentase kontribusi setiap komponen tersebut di dalam produk ( $x_p$ ). Model  $c_{proc.ass.x}$  selanjutnya disederhanakan sebagai seperti pada persamaan-1.2.

Variabel  $c_{p,part}$  merupakan koefisien kompleksitas komponen yang merepresentasikan tingkat kesulitan bagaimana komponen itu di-*handling*, di-*insert* dan dikencangkan pada komponen pasangannya. Segala aspek yang mempengaruhi peng-*handling*-an, peng-*insert*-an dan pengencangan diangkakan sedemikian rupa berdasar data-data estimasi waktu dan biaya perakitan komponen dari Boothroyd (Lihat lampiran-1: Tabel estimasi biaya *workhead* untuk perakitan otomatis). Aspek-aspek yang mempengaruhi proses *handling* adalah *symmetry*, *Flexibility*, *Delicatness*, *Stickiness* dan *tangling/nesting*. Aspek-aspek yang mempengaruhi kesulitan *insert* dan *fastening* pada perakitan metoda otomatis adalah *Holding down after insertion*, *Insertion resistance*, *Insert direction*, *Alignment*, *Mechanical fastenin* dan *Non-Mechanical fastening*.

Persamaan 1.3 memperlihatkan bahwa kompleksitas komponen ditentukan oleh nilai rata-rata faktor kompleksitas *handling* ( $C_h$ ) dan nilai rata-rata faktor kompleksitas *insertion* ( $C_i$ ). Rata-rata faktor  $C_h$  merupakan nilai rata-rata dari faktor kompleksitas *handling* relatif ( $C_{h,f}$ ) yang didapat dari besarnya nilai koefisien atribut *handling* sebagaimana tertulis pada tabel-1 pada bab sebelumnya.

**Universitas Indonesia**

$$C_h = \frac{\sum_1^j C_{h,f}}{J} \dots \dots \dots (2.6)$$

Variabel  $J$  merupakan jumlah aspek yang dimiliki oleh setiap komponen sesuai dengan kondisi perakitannya.

Demikian pula halnya dengan proses *insertion* yang menunjukkan bahwa besarnya  $C_i$  didapat dari faktor kompleksitas *insertion* relatif ( $C_{i,f}$ ) yang berdasar pada nilai koefisien aspek *insertion* dengan variabel  $k$  adalah jumlah aspek *insertion* yang dimiliki oleh setiap komponen sesuai dengan kondisi perakitannya.

$$C_i = \frac{\sum_1^K C_{i,f}}{K} \dots \dots \dots (2.7)$$

## 2.4 Koefisien Aspek-Aspek *Insertion*

Besarnya angka koefisien aspek *alignment* didapat dari rata-rata tingkat kesulitan *alignment* dari tabel estimasi biaya *work head* relatif perakitan otomatis Boothroyd.

Pada Tabel-2.1 dari sebagian data Boothroyd tentang estimasi biaya *work head* untuk perakitan otomatis. Tabel memperlihatkan bahwa suatu komponen bisa berada pada kondisi mudah di-align (*easy to align and position during assembly*) atau tidak mudah di-align. Estimasi biaya *work head* relatif menunjukkan angka yang berbeda untuk kedua kondisi tersebut.

Tabel-2.1 Sebagian tabel estimasi biaya work head relatif pada proses insert perakitan otomatis[1]

			Estimation of Automatic Insertion for Relative Workhead Cost									
key	Part added but not secured	After assembly no holdingdown required to maintain orientation and location				Holding down required						
		Easy to align and position during assembly		not easy to align and position during assembly		Easy to align and position during assembly		not easy to align and position during assembly				
		No resistance to insertion	resistance to insertion	No resistance to insertion	resistance to insertion	No resistance to insertion	resistance to insertion	No resistance to insertion	resistance to insertion			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
final is securing taking place	Straight line insertion	From vertically above	0	1	2	3			6	7	8	9
		Not From vertically above	1	1.2	1.6	1.6	2.5		1.3	2	2	3
	Insertion not straight line motion	2	2	3	3	4.6		1.6	2.1	2.1	3.3	6.1

Nilai rata-rata untuk kondisi tidak mudah di-align adalah 3 dan persentase tingkat kesulitan untuk keadaan ini adalah 100%. Sehingga besarnya nilai koefisien aspek *alignment* untuk kondisi tidak mudah di-align adalah 1(satu) seperti terlihat pada Tabel-1 pada bab sebelumnya. Besarnya angka koefisien aspek *alignment* pada kondisi mudah di-align adalah 0,67 yang diambil dari persentase rata-rata estimasi biaya *work head* relatif kondisi mudah di-align terhadap kondisi tidak mudah di-align.

Hal serupa pada alinea di atas juga diterapkan pada penentuan angka koefisien aspek *insertion direction*. Besarnya angka koefisien pada kondisi peng-insert-an dengan kesulitan tertinggi (*insertion not straight line motion*) adalah 1(satu), kemudian 0.54 untuk peng-insert-an bukan dari atas dan 0.5 untuk peng-insert-an dari atas sebagai tingkat kesulitan terendah (lihat Tabel-1.1).

Demikian pula aspek *holding down* dan *insertion resistance* yang diambil dari rata-rata dan persentase data serupa. Setiap aspek dalam atribut *insertion* terbagi dalam kondisi-kondisi tertentu sesuai dengan karakter setiap aspek. Berikutnya setiap kondisi (deskripsi fitur) ini mempunyai angka koefisien tertentu seperti yang ditampilkan pada Tabel-1.1 pada bab sebelumnya. Angka-angka koefisien inilah yang mempengaruhi besarnya angka kompleksitas perakitan setiap produk(KAI). Gambar-2.4.1 memperlihatkan ilustrasi pengaruh koefisien aspek insertion dengan model pengukuran kompleksitas perakitan Elmaraghy.

$$KAI = \left[ \frac{n_p}{N_p} + C_{proc.ass.x} \right] \left[ \log_2(N_p + 1) \right] + \left[ \frac{n_s}{N_s} \right] \left[ \log_2(N_s + 1) \right]$$

$$C_{proc.ass.x} = \sum_{p=1}^n x_p * c_{p,part}$$

$$c_{p,part} = \frac{C_h \sum_1^j C_{h,f} + C_i \sum_1^k C_{i,f}}{\sum_1^j C_{h,f} + \sum_1^k C_{i,f}}$$

$$C_i = \frac{\sum_1^k C_{i,f}}{K}$$

Koefisien kesulitan aspek-  
aspek *insertion*

- *Alignment*
- *Insert direction*
- *Insert resistance*

Gambar-2.4.1 Hirarki model kompleksitas perakitan Elmaraghy menunjukkan ilustrasi pengaruh angka koefisien aspek *insertion* terhadap kompleksitas perakitan produk

## BAB-III

### METODE PENELITIAN

Penentuan koefisien aspek-aspek dalam atribut *insertion* dengan pendekatan geometri dilakukan terhadap aspek *alignment*, *insertion direction*, *insertion resistance* dan *holding down after insertion*. Setelah rumusan geometri ditentukan, maka akan diperoleh nilai-nilai koefisien setiap aspek. Nilai koefisien setiap aspek kemudian diuji untuk menghitung faktor kompleksitas *insertion* pada setiap komponen. Produk yang diujicobakan adalah produk piston dari jurnal Elmaraghy dengan menggunakan model kompleksitas perakitan Elmaraghy. Hasil perhitungan kompleksitas perakitan ini kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan Elmaraghy yang telah diuji dengan pendekatan data-data dari Boothroyd. Diagram alir metode penelitian disusun seperti pada Gambar-3.1.

#### **3.2 Pengumpulan Data Geometri Komponen Rakitan dan Analisa**

Hal pertama yang dilakukan adalah mengumpulkan data geometri yang dimiliki oleh komponen-komponen yang berpasangan. Komponen yang berbeda tentunya mengandung informasi geometri yang berbeda pula, sehingga dapat dicari pendekatan geometri seperti apa yang mungkin untuk merelevansikannya dengan suatu kondisi perakitan.

Komponen yang dimaksud di sini berupa gambar komponen yang digambar dengan menggunakan perangkat lunak Delmia V5R21 di Laboratorium Penelitian Teknik Mesin Universitas Indonesia.

#### **3.3 Identifikasi Kondisi Aspek dan Penentuan Angka Koefisien Aspek**

##### ***Insertion***

Identifikasi kondisi aspek yang dimaksud adalah identifikasi terhadap kondisi yang ingin diketahui dari keadaan suatu perakitan terkait aspek-aspek

*insertion*. Data-data identifikasi kemudian digunakan untuk membantu menemukan cara-cara penentuan angka koefisien aspek-aspek *insertion*.

Penentuan angka koefisien aspek-aspek *insertion* dilakukan dengan cara mempersentasikan suatu tingkatan kondisi informasi pada suatu aspek dengan tingkatan kondisi informasi yang maksimal.

### 3.4 Kompleksitas Rakitan Produk dari Koefisien Elmaraghy

Proses ini adalah usaha meninjau dan menghitung kompleksitas perakitan produk piston sesuai jurnal Elmaraghy tentang model pengukuran kompleksitas perakitan produk. Data ini akan digunakan sebagai pembandingan bagi perhitungan kompleksitas yang menggunakan koefisien aspek *insertion* pendekatan geometri.

### 3.5 Uji Coba Pegukuran Kompleksitas

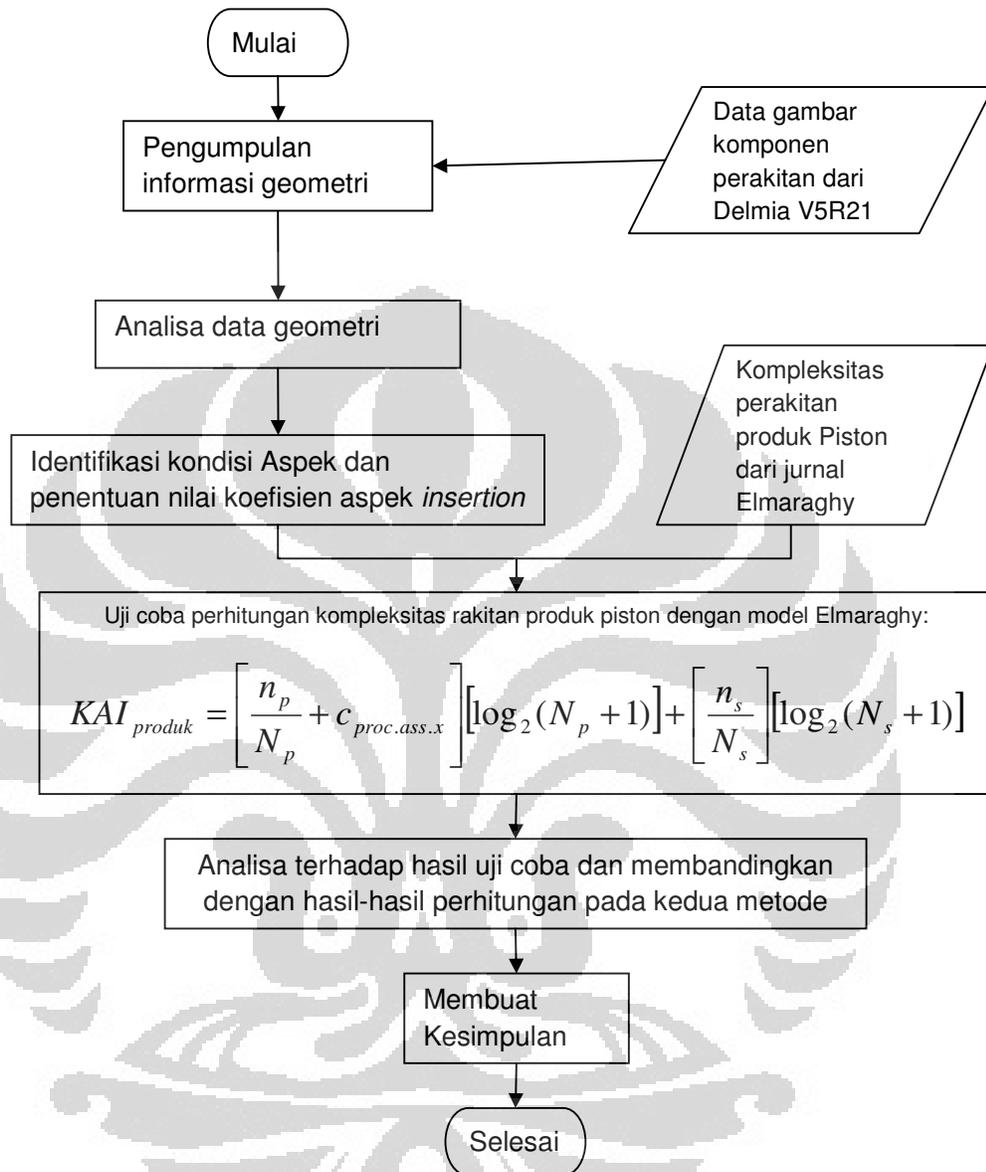
Pada tahapan ini dilakukan proses pengukuran kompleksitas perakitan terhadap produk piston dengan menggunakan nilai koefisien aspek *insertion* yang baru. Pengukuran ini tetap menggunakan model dari Elmaraghy.

### 3.6 Analisa Hasil Uji Coba

Hasil perhitungan pada tahap sebelumnya berikutnya dianalisa dan dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan metoda pendekatan tabel Elmaraghy. Variabel-variabel yang dibandingkan di sini adalah faktor kompleksitas *insertion* ( $C_i$ ), koefisien kompleksitas komponen relatif ( $c_{p, part}$ ), koefisien proses perakitan produk relative ( $c_{proc, ass, x}$ ) dan kompleksitas perakitan produk ( $KAI$ ). Jika pola perubahan angka-angka  $C_i$ ,  $c_{p, part}$ ,  $c_{proc, ass, x}$  dan  $KAI$  dari koefisien yang baru menunjukkan kemiripan dengan pola perubahan dari pengukuran Elmaraghy, maka penggunaan koefisien aspek pendekatan geometri ini dapat dinyatakan layak untuk mengukur kompleksitas perakitan produk dengan model Elmaraghy.

### 3.7 Kesimpulan

Tahapan ini adalah merangkum kesimpulan-kesimpulan yang didapat selama pengembangan model dan analisa hasil uji coba.



Gambar-3.1 Diagram alir metode penelitian

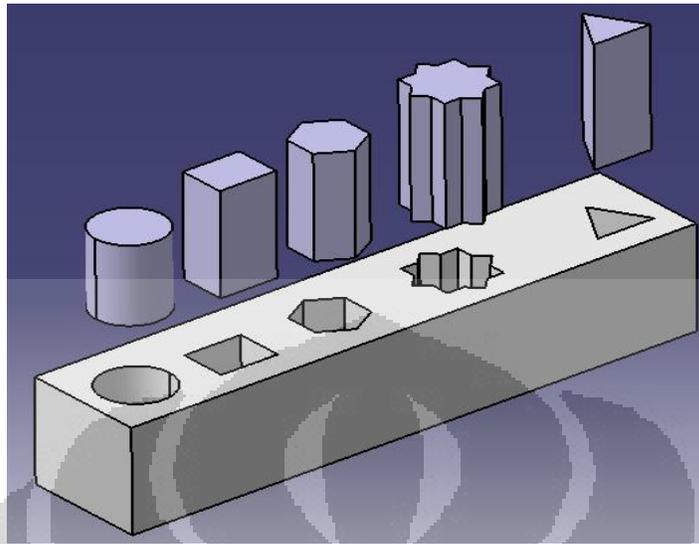
## **BAB IV**

### **PENGEMBANGAN MODEL**

#### **4.1 Aspek *Alignment***

Peninjauan atribut *insertion* pada kompleksitas perakitan produk diarahkan kepada aspek-aspek yang berpengaruh menghambat proses *insertion*. *Alignment* adalah usaha memposisikan garis patokan suatu komponen dengan garis bersesuaian pada pasangannya agar berada pada keadaan segaris. Dalam suatu perakitan ketika sebuah komponen ter-*align* dengan pasangannya maka komponen tersebut dapat dipindahkan/dimasukkan dengan lebih mudah. Untuk dapat mempelajari geometri sebuah komponen dalam usaha untuk di-*align*-kan kepada pasangannya maka perlu terlebih dahulu dilakukan identifikasi terhadap berbagai variasi komponen.

Pengidentifikasian komponen merupakan suatu upaya untuk mengenal setiap komponen rakitan dengan segala informasi yang ada pada komponen tersebut. Hal ini dilakukan untuk mengenal variasi komponen dengan berbagai perbedaannya. Pengembangan variasi komponen ini dilakukan dengan membedakan jenis-jenis penampang melintang dan penampang memanjang. Dengan cara ini diharapkan dapat diketahui sejauh apa pengaruh perubahan penampang komponen rakitan terhadap batasan jumlah informasi pembatas yang diperlukan untuk dipasangkan. Komponen-komponen ini kemudian digambar lengkap dengan lubang pasangannya sehingga seolah-olah siap untuk di-*insert*. Komponen yang dipilih adalah komponen dengan bentuk dasar yang sering dijumpai dalam desain manufaktur hingga kepada bentuk penampang yang tidak beraturan. Gambar-4.1.1 memperlihatkan keadaan komponen yang dimaksud.



Gambar-4.1.1 Beberapa komponen dengan bentuk-bentuk dasar

#### 4.1.1 Mengumpulkan informasi-informasi geometri

Komponen-komponen yang telah di-identifikasi selanjutnya diamati untuk diambil beberapa informasi geometrinya yang dapat digunakan sebagai parameter bagi penentuan koefisien tingkat kesulitan aspek *alignment* dalam perakitan. Setiap komponen memiliki kelengkapan informasi geometri yang berbeda-beda. Sebagian atau seluruh dari informasi ini tentunya merupakan informasi dasar bagi lubang pasangannya untuk diperlakukan seperti apa, agar komponen dapat di-*insert* dengan baik sesuai dengan keadaan yang diinginkan. Dari komponen-komponen yang telah dipilih sebelumnya didapat informasi geometri pokok yang dimiliki oleh komponen seperti terlihat pada Tabel-4.1.1. Pada gambar ini memperlihatkan sebagian informasi yang memiliki potensi menjadi informasi penyambung dengan bentuk pasangannya. Informasi geometri yang ada pada bentuk komponen tentunya akan relatif serupa dengan informasi geometri yang dimiliki oleh bentuk pasangannya. Bentuk penampang segi empat dengan ukuran dimensi tertentu tentunya hanya akan kontak atau berpasangan dengan pasangan yang memiliki bentuk segi empat dengan dimensi yang sama.

Tabel-4.1.1 Beberapa komponen-komponen dasar dengan informasi geometri yang dimiliki

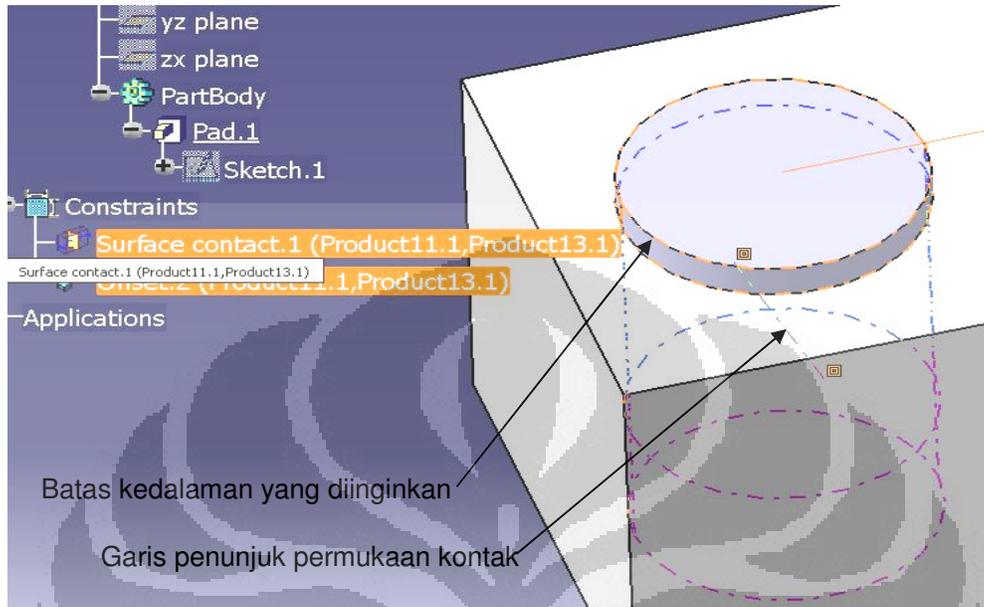
Part	Bentuk penampang	Informasi geometri part	Jumlah entitas penampang	Jumlah segi	Sudut bagi
Poros silinder	Lingkaran	Diameter Panjang	0	0	0
Persegi panjang	segiempat	Panjang Lebar Tinggi	4	4	90
Poros segi enam	segienam	Lebar Kunci Panjang	6	6	60
Poros bintang	bintang segi delapan	Bentuk gigi Jumlah gigi Diameter Panjang	16	8	45
Poros konus	lingkaran	Diameter atas Diameter bawah tinggi	0	0	0
Segi tiga	segi tiga	Jari-jari terluar Panjang sisi panjang	3	3	120

#### 4.1.2 Memilih informasi-informasi geometri yang terkait perakitan

Hal berikut yang dilakukan adalah memasukkan (meng-*insert*) setiap komponen ke dalam lubang pasangannya dengan menggunakan *software* desain pada modus *assembly*. *Software* yang digunakan adalah Delmia V5R20 di Laboratorium Penelitian Teknik Mesin Universitas Indonesia. Pada setiap komponen, dalam proses peng-*insert*-annya *software* meminta informasi-informasi pembatas(*constrain*) yang digunakan. Dalam hal perakitan silinder ke dalam lubang terdapat beberapa alternatif informasi yang dapat digunakan. Beberapa pilihan yang berikan oleh *software* adalah:

1. Pemasangan 'garis-sumbu' kedua komponen
2. Pemasangan permukaan selinder ke permukaan lubang
3. Pemasangan keduanya( 1 dan 2)

Setelah itu baru ditentukan seberapa dalam silinder tersebut harus di-*insert*. Alternatif dengan pemilihan keduanya (pemasangan garis sumbu dan permukaan

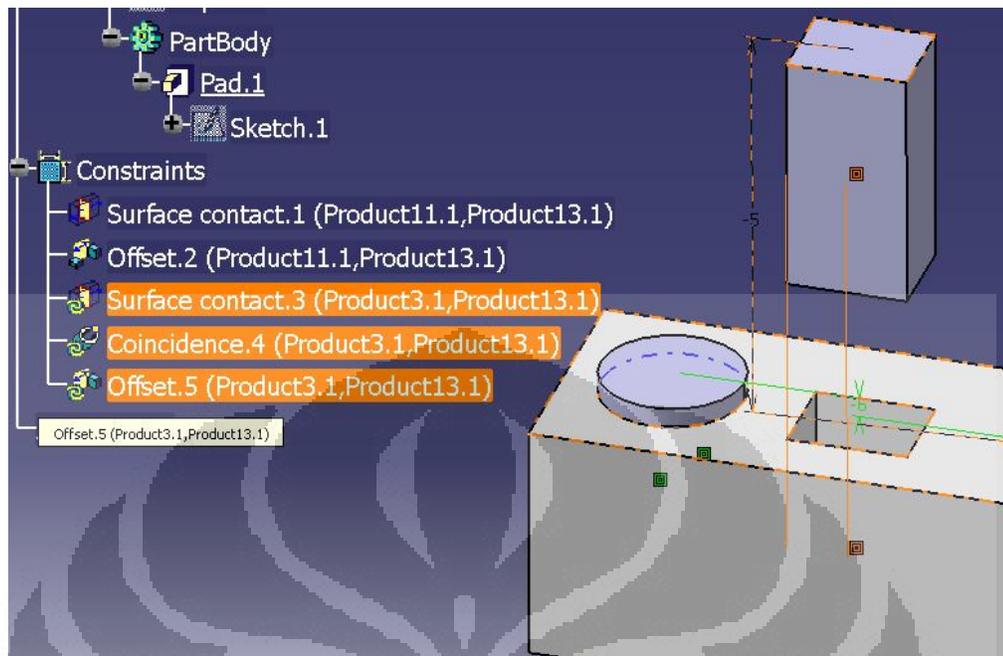


Gambar-4.1.2 Keadaan komponen silinder yang di-*insert* ke lubang dengan data geometri rakitannya

kontak) ternyata memungkinkan/dizinkan untuk dilakukan. *Software* ini tidak menyatakannya sebagai pemberian informasi yang berlebihan ataupun inkonsistensi selama dimensi nominal pada pasangan tersebut similar. Gambar-4.1.2 memperlihatkan kondisi pemasangan silinder terhadap lubangnya. Pada gambar ini informasi pembatas yang diberikan adalah kontak permukaan dan batas kedalaman yang diinginkan.

Pemasangan berikutnya dilakukan pada pemasangan batang segiempat ke dalam lubangnya. Pemasangan ini memberikan lebih banyak alternatif pasangan informasi yang digunakan. Pasangan informasi yang ada adalah:

- 2(dua) Pasangan permukaan kontak, atau
- 2(dua) Pasangan 2 garis/sudut, atau
- Sepasang permukaan kontak dan 1 garis, atau
- Sepasang garis dan 1 permukaan kontak

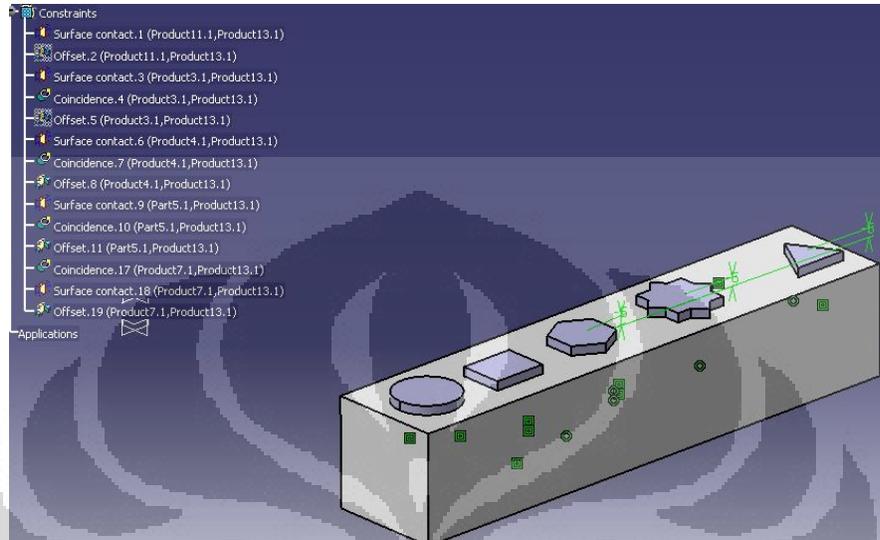


*Gambar-4.1.3 Kondisi batang segiempat ketika akan di-insert dengan informasi geometri pembatasnya.*

Keseluruhan informasi dapat diberikan dalam pemasangannya selama dimensi nominal kedua komponen adalah similar. Gambar-4.1.3 menunjukkan kondisi perakitan sebuah batang segiempat dengan informasi pembatasnya ketika akan di-insert ke dalam pasangannya.

Hal serupa seterusnya dilakukan terhadap terhadap komponen-komponen dengan jumlah entitas penampang yang berbeda (segitiga, segi enam dan segi delapan atau poros bintang). Gambar-4.1.4 menunjukkan seluruh komponen prismatic setelah dimasukkan ke dalam pasangannya. Informasi geometri pembatas yang selalu muncul adalah sedalam apa suatu komponen ingin dimasukkan ke dalam lubangnya.

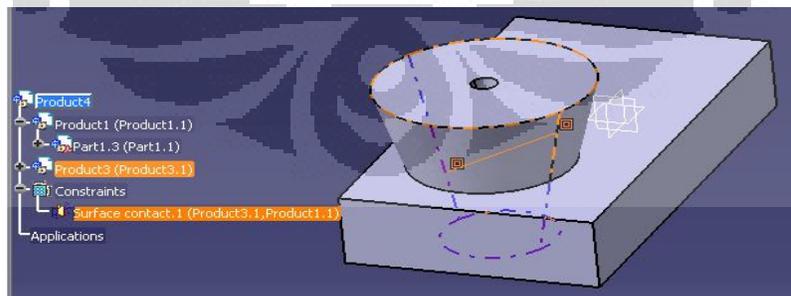
Pemasangan berikutnya dilakukan pada komponen dengan penampang memanjang yang membesar atau *taper* (konus). Hal ini dilakukan untuk melihat perubahan informasi pembatas yang diperlukan ketika dimensi permukaan dinding



Gambar-4.1.4 Perakitan komponen prismatik dalam pasangannya dengan serangkaian informasi pembatasnya

permukaan kontak tidak homogen/non-prismatik.

Pada pemasangan poros silinder *taper* ke dalam lubang pasangannya menunjukkan bahwa informasi pembatas yang dibutuhkan ternyata hanya 1(satu). Pada pemasangan poros silinder *taper* tidak memerlukan informasi kedalaman insert yang diinginkan. Kedalaman insert secara otomatis terjadi akibat kemiringan permukaan kontakannya sendiri. Gambar-4.1.5 memperlihatkan perakitan poros silinder



Gambar-4.1.5 Pemasangan poros taper ke dalam lubang dengan informasi geometri pembatasnya

*taper* ke dalam lubangnya dengan informasi pembatas tunggal.

Perakitan seterusnya dilakukan terhadap komponen dengan jumlah entitas penampang lebih banyak, hingga akhirnya diperoleh sejumlah informasi pembatas yang diperlukan oleh setiap komponen. Data yang diperoleh memberikan bahwa jumlah informasi pembatas yang dibutuhkan dari keseluruhan komponen yang diujicobakan adalah hanya bervariasi pada 3(angka), dengan 1 mewakili jumlah informasi paling sedikit, yaitu pada poros *taper* berpenampang lingkaran.

Tabel-4.1.2 Persentase informasi geometri pembatas pada komponen dengan berbagai bentuk penampang

			Prismatic shape						Tapper							
			○	□	△	⬡	⚙	Irregular shape	○	○	□	△	⬡	⚙	○	Irregular shape
			circle	rectangle	triangle	hexagon	spline	Irregular shape	oval	circle	rectangle	triangle	hexagon	spline	oval	Irregular shape
Pasangan Informasi dasar dari bentuk part yang dibutuhkan untuk dipasangkan(constrain)	line	centre														
		line shape transition line		1	1	1	1	1			1	1	1	1		1
	surface	flat surface		1	1	1	1	1			1	1	1	1		
		radius surface	1						1	1						1
	surface limit/stopper	1	1	1	1	1	1	1								
<i>Total of minimum information</i>			2	3	3	3	3	3	2	1	2	2	2	2	1	2
<i>persentase</i>			0.67	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.67	0.33	0.67	0.67	0.67	0.67	0.33	0.67

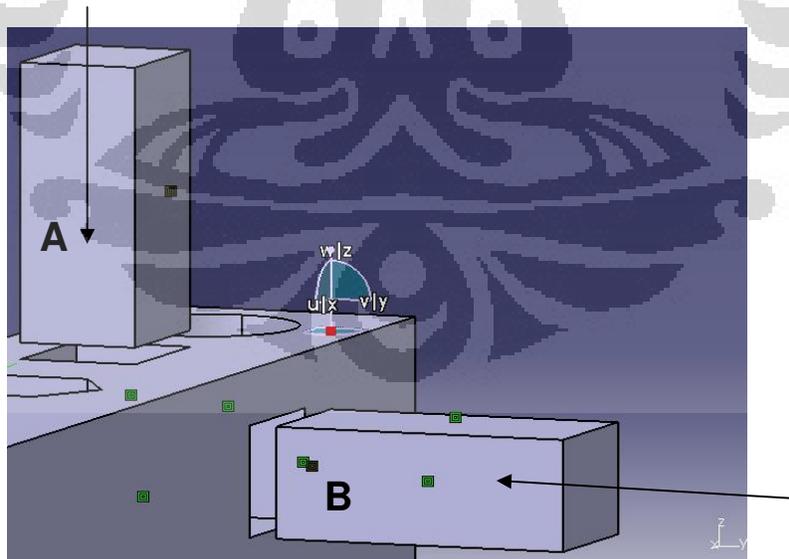
Jumlah informasi pembatas setiap komponen ini selanjutnya dipersentasekan terhadap jumlah informasi pembatas terbanyak. Angka persentase berdasarkan bentuk penampang inilah yang kemudian dinyatakan sebagai koefisien aspek *alignment* pada atribut *insertion* dalam model kompleksitas rakitan.

Terlihat pada Tabel-4.1.2 bahwa koefisien aspek *alignment* bervariasi pada 0.33, 0.66 dan 1. Elmaraghy dalam penelitiannya yang berdasar pada data-data perakitan Boothroyd menyatakan angka koefisien aspek *alignment* bervariasi pada 0.67 dan 1(satu). Sementara pernyataan mudah dan tidak mudah pada *alignment*

yang dimaksud oleh Boothroyd merupakan representasi dari ada atau tidaknya bentuk *chamfer* pada suatu pasangan. Boothroyd belum menyatakan betapa meng-*insert* komponen dengan bentuk penampang *taper* akan lebih mudah dibanding meng-*insert* komponen prismatic yang ber-*chamfer*. Itu sebabnya pendekatan geometri ini memberi ruang bagi keadaan tersebut sehingga berhasil didapat pengelompokan koefisien *alignment* ini dengan lebih teliti, yaitu nilai 1(satu) bagi *alignment* yang ‘susah’, 0.66 bagi *alignment* yang ‘mudah’ dan 0.33 bagi *alignment* yang ‘lebih mudah’.

#### 4.2 Aspek Arah *Insert* (*Insertion Direction*)

Karakter gambar yang terlihat pada sebuah layar computer yang digambar dengan suatu *software* penggambaran merupakan representasi *appearance* (penampilan) suatu objek dalam suatu ruang. Namun ‘seberat’ apapun komponen yang digambar tidak akan menyebabkan benda tersebut ‘terjatuh’ hingga dilibatkan suatu program untuk menampilkan suatu simulasi gravitasi. Dengan demikian untuk melibatkan gravitasi dalam suatu tinjauan geometri pada suatu gambar konsep desain dari suatu *software*, harus dinyatakan suatu asumsi arah gravitasi yang dapat dinyatakan dengan karakter system koordinat pengguna (*UCS, User Coordinate System*). Informasi *UCS* selalu tampil pada suatu gambar.



Gambar-4.2.1 *Insert* komponen dari atas dan dari samping dengan perbedaan kesesuaian *UCS*

onesia

Gambar-4.2.1 memperlihatkan bahwa komponen A di-*insert* dari atas dan B di-*insert* dari samping. Informasi yang membedakan keadaan kedua komponen tersebut adalah bahwa komponen A di-*insert* pada axis yang searah sumbu z pada *UCS* dan komponen B di-*insert* pada axis y pada *UCS*. Untuk membedakan kondisi arah *insert* kedua komponen tersebut secara geometris maka perlu diasumsikan bahwa *insert* pada axis searah sumbu z *UCS* sebagai *insert* dari atas. Sedangkan *insert* dengan axis searah sumbu x atau y pada *UCS* diasumsikan sebagai *insert* dari samping.

Hal lain yang diutarakan dalam arah *insert* adalah arah *insert* yang bukan linear. Ada 2(dua) persepsi terhadap keadaan tersebut, yaitu:

1. Arah *insert* radius
2. Arah *insert* melibatkan dua aksis (z-y atau x-y atau z-x)

Apapun persepsi yang digunakan keduanya menunjukkan bahwa lintasan garis yang digunakan dalam usaha meng-*insert* melibatkan lebih dari 1(satu) axis. Jika terdapat perbedaan tingkat kesulitan antara *insert* dari atas dan *insert* dari samping, maka konsistensinya terdapat perbedaan tingkat kesulitan antara insert 2 axis z-x atau z-y (*insert* dari atas dan samping) dengan insert 2 axis x-y(*insert* dari samping dan depan). Sehingga jika diurutkan berdasar prioritas tingkat kemudahan arah *insert*, maka didapat derajat kesulitan arah *insert* sebagai berikut:

1. Dari atas
2. Dari samping
3. Dari atas dan samping
4. Dari samping dan depan

Perlu diketahui di sini bahawa *insert* radius dapat disetarakan dengan tingkat kesulitan ke-4(empat) karena pada dasarnya gravitasi tidak membantu pada saat sebuah komponen harus di-*insert* pada lintasan radius.

Pada dasarnya dalam usaha meng-*insert* sebuah komponen secara otomatis akan selalu membutuhkan setidaknya 2 hal, yaitu:

- 1. Peralatan pengarah/pembawa (lengan robot atau *jig-fixture*)
- 2. Gaya (*force*)

Hal inilah yang menyebabkan betapa gaya gravitasi sangat membantu ketika sebuah komponen harus di-*insert* secara vertikal. Komponen yang harus diinsert dari samping memerlukan komponen tambahan sebagai fungsi pemberi gaya dorong. Namun tidak berarti bahwa setiap *insert* dari atas tidak memerlukan gaya dorong. Pada banyak kasus menunjukkan bahwa komponen tetap harus diarahkan hingga betul-betul masuk sesuai tempatnya walaupun harus di-*insert* dari atas. Merujuk kepada hal tersebut maka dapat disusun angka kesulitan arah *insert* karena tingkat kesulitan arah *insert* sebanding dengan angka kebutuhan komponen seperti ditunjukkan pada tabel-4.2.1.

Tabel-4.2.1 Persentase arah insert berdasar kebutuhan usaha

Arah insert	Angka Kebutuhan Peralatan						Jumlah	Persentase
	Pengarah			Force				
	x	y	z	x	y	z		
arah z	0	0	1	0	0	0	1	0,25
arah y(x jika pada axisx)	0	1	0	0	1	0	2	0,5
arah z-y (atau z-x)	0	1	1	0	1	0	3	0,75
arah x-y atau radius	1	1	0	1	1	0	4	1

Secara geometris kebutuhan pengarah dapat direpresentasikan sebagai orientasi dan/atau re-orientasi. Variable gaya(*force*) pun dapat direpresentasikan sebagai arah lintasan (*motion line*). Perlu diingat kembali di sini bahwa sejak awal orientasi insert perlu ditentukan dalam perakitan, dalam hal ini orientasi sumbu-z sebagai orientasi utama yang merepresentasikan arah vertikal, sehingga terasumsikan pula bahwa gaya pada arah z terwakili oleh gravitasi. Dengan demikian maka tabel persentase angka kebutuhan peralatan dapat diganti sebagai tabel persentase angka informasi geometri arah insert seperti terlihat pada tabel-4.2.2. Persentase yang ditampilkan pada tabel merepresentasikan koefisien tingkat kesulitan aspek *insertion direction*.

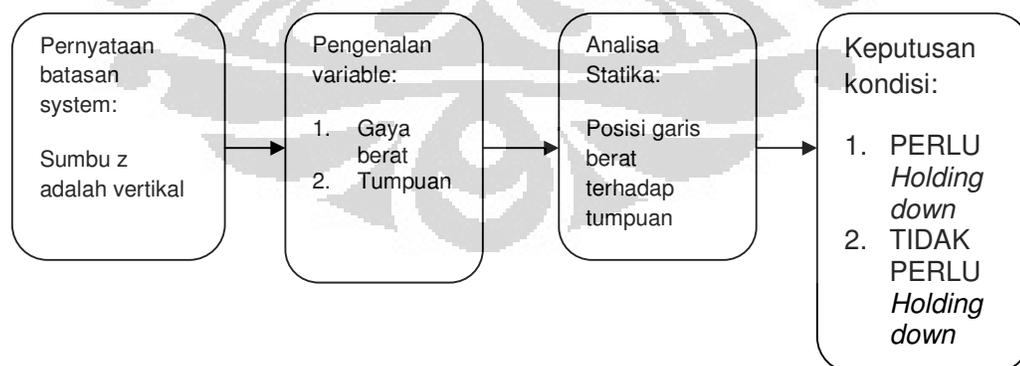
Tabel-4.2.2 Persentase arah insert setelah disesuaikan dengan data geometri

Arah insert	Angka Kebutuhan Informasi						Jumlah	Persentase
	orientasi/re-orientasi			motion				
	x	y	z	x	y	z		
arah z	0	0	1	0	0	0	1	0.25
arah y(x jika pada axis x)	0	1	0	0	1	0	2	0.5
arah z-y (atau z-x)	0	1	1	0	1	0	3	0.75
arah x-y atau radius	1	1	0	1	1	0	4	1

### 4.3 Aspek *Holding down*

Aspek berikutnya yang mempengaruhi atribut *insertion* adalah aspek *holding down*. Keadaan yang dimaksud adalah apakah komponen yang di-insert perlu ditahan beberapa saat atau tidak untuk suatu kepentingan. Kondisi *holding down* diterjemahkan sebagai kedudukan komponen yang tidak stabil ketika berada pada posisi yang diinginkan.

Untuk mengetahui kondisi kestabilan suatu benda tentunya perlu tinjauan analisa statika terhadap komponen yang dimaksud. Ketika statika dibicarakan maka tentunya fungsi-fungsi yang muncul adalah fungsi gaya yang bekerja dan tumpuan yang ada. Kemudian untuk menyatakan suatu benda berada dalam kondisi statis atau tidak sangat bergantung kepada bagaimana kedua variable (gaya dan tumpuan) diposisikan. Secara ringkas proses penentuan kondisi *holding down* ini ditunjukkan pada Gambar-4.3.1.

Gambar-4.3.1 Tahapan umum penentuan *holding down*

#### 4.3.1 Batasan-batasan dan Pengenalan Variabel

Dalam konteks geometri komponen rakitan, maka perlu disepakati di sini bahwa gaya yang bekerja adalah gaya berat komponen yang bekerja melalui titik berat komponen. Gaya berat suatu benda selalu bekerja ke arah bawah, maka dalam hal ini perlu disepakati bahwa arah ke bawah yang dimaksud adalah arah sumbu-z negative. Hal berikutnya yang perlu disepakati adalah bahwa tumpuan yang dimiliki oleh komponen merupakan bagian komponen yang kontak dengan komponen pasangannya. Dengan demikian barulah dapat disusun algoritma penentuan kondisi *holding down* suatu komponen secara geometris.

Langkah pertama yang dilakukan adalah suatu pernyataan bahwa dalam pandangan *UCS* arah sumbu-z adalah vertikal. Hal ini sangat penting sebagai acuan pemahaman bahwa sumbu-z negatif adalah arah bawah, arah menuju pusat gravitasi, arah gaya berat suatu benda.

Berikutnya dilakukan rekognisi terhadap titik berat komponen. Hal ini merupakan langkah penting untuk mengetahui posisi (koordinat) bekerjanya gaya berat komponen.

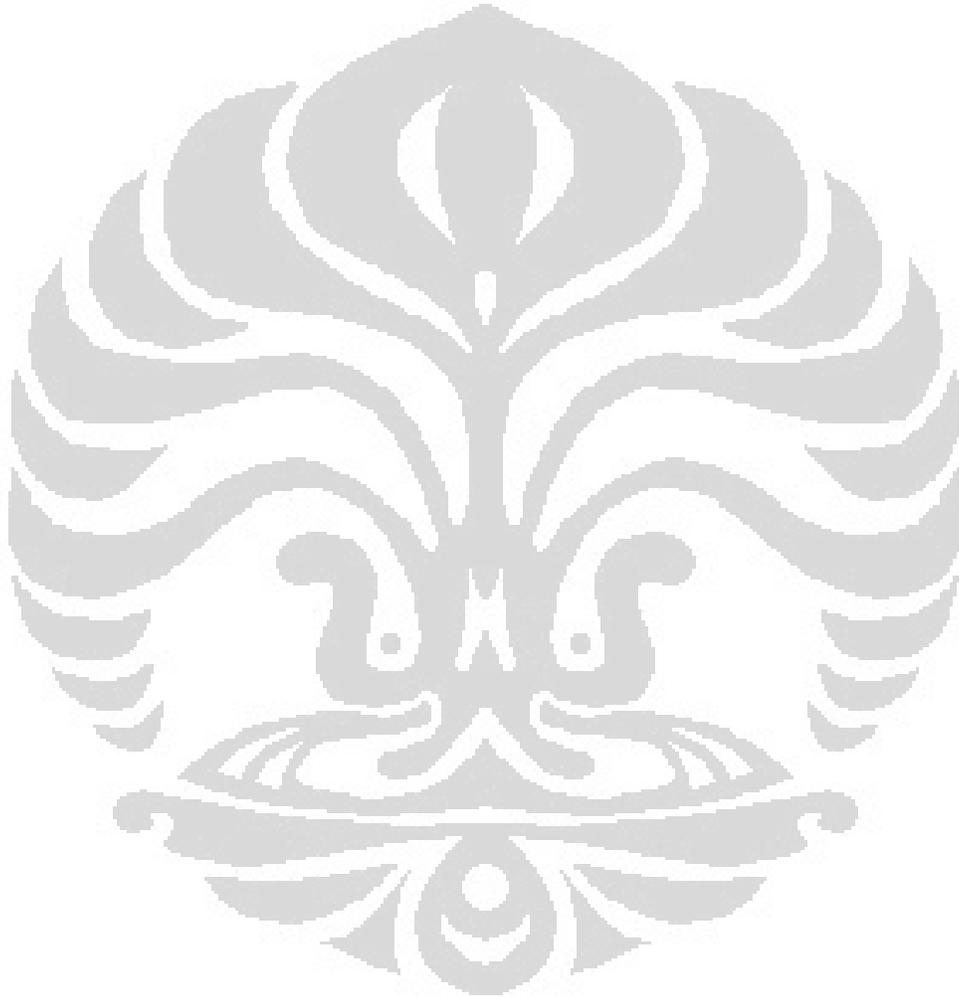
Hal terakhir yang diperlukan adalah rekognisi terhadap bidang kontak komponen terhadap komponen pasangannya. Informasi yang diinginkan di sini adalah posisi gaya berat komponen terhadap tumpuan, atau dalam konteks geometri dikatakan posisi arah garis z negatif pada titik berat terhadap bidang kontak.

#### 4.3.2 Analisa Statika dan Keputusan Kondisi

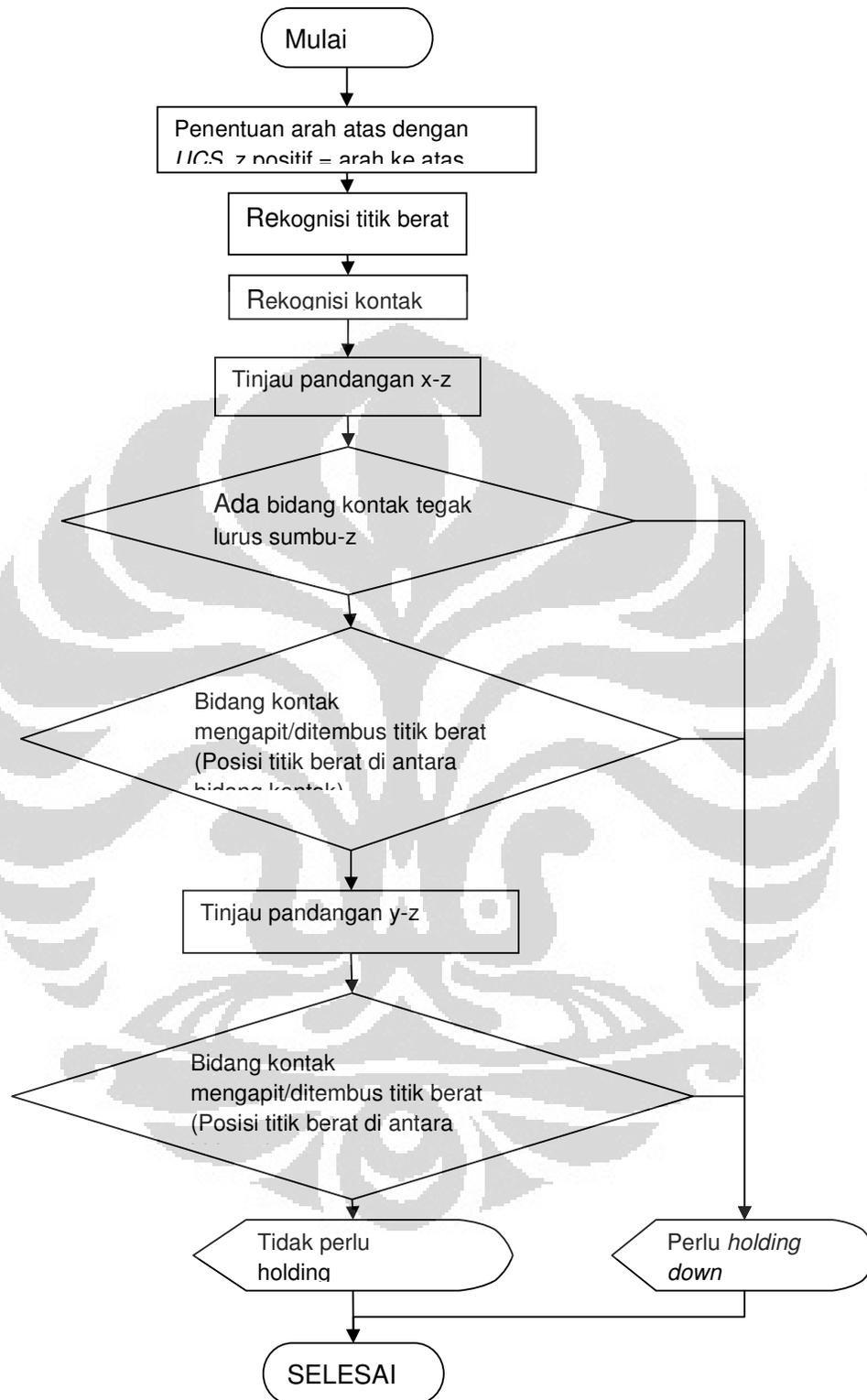
Analisa statika yang dimaksud merupakan analisa sederhana yang menekankan pada posisi suatu garis-z negatif yang melewati titik berat terhadap bidang kontak yang ada. Sebagaimana telah diketahui bahwa tumpuan sesungguhnya dalam suatu konstruksi adalah bidang, bukan titik. Secara mendasar telah difahami bahwa kondisi stabil terbaik yang dicapai oleh suatu konstruksi adalah jika posisi gaya (berat) yang bekerja berada di antara tumpuan. Hal ini tidak sulit ketika konteks yang dimaksud dalam tinjauan bidang (2 dimensi). Untuk menyatakan suatu komponen dalam kondisi stabil atau tidak perlu ditinjau dalam

sistem ruang (3 dimensi). Untuk hal tersebut maka peninjauan posisi garis berat terhadap bidang kontak harus dilakukan 2 kali, pada pandangan  $x-z$  dan pada pandangan  $y-z$ . Baru kemudian dapat diketahui apakah suatu komponen memerlukan *holding down* atau tidak.

Secara ringkas algoritma proses identifikasi *holding down* ini digambarkan pada Gambar-4.3.2.



**Universitas Indonesia**



Gambar-4.3.2 Algoritma penentuan kondisi holding down suatu komponen  
Universitas Indonesia

#### 4.3.3 Koefisien Kesulitan Aspek *Holding down*

Ketika suatu keadaan  *holding down* ditemui maka yang dibutuhkan adalah suatu usaha atau gaya untuk  *holding time*. Hal ini dimaksudkan untuk memfasilitasi perakitan komponen berikutnya untuk dirakit. Baru setelah itu dilakukan  *holding time* kedua untuk dilakukan  *fastening*. Berbeda halnya jika suatu keadaan  *holding down* tidak dibutuhkan,  *holding time* hanya dilakukan untuk memungkinkan proses  *fastening*. Informasi kebutuhan untuk kedua keadaan tersebut dapat diringkas seperti pada Tabel-4.3.1.

Tabel-4.3.1 Persentase kebutuhan informasi kondisi kebutuhan  *holding down*

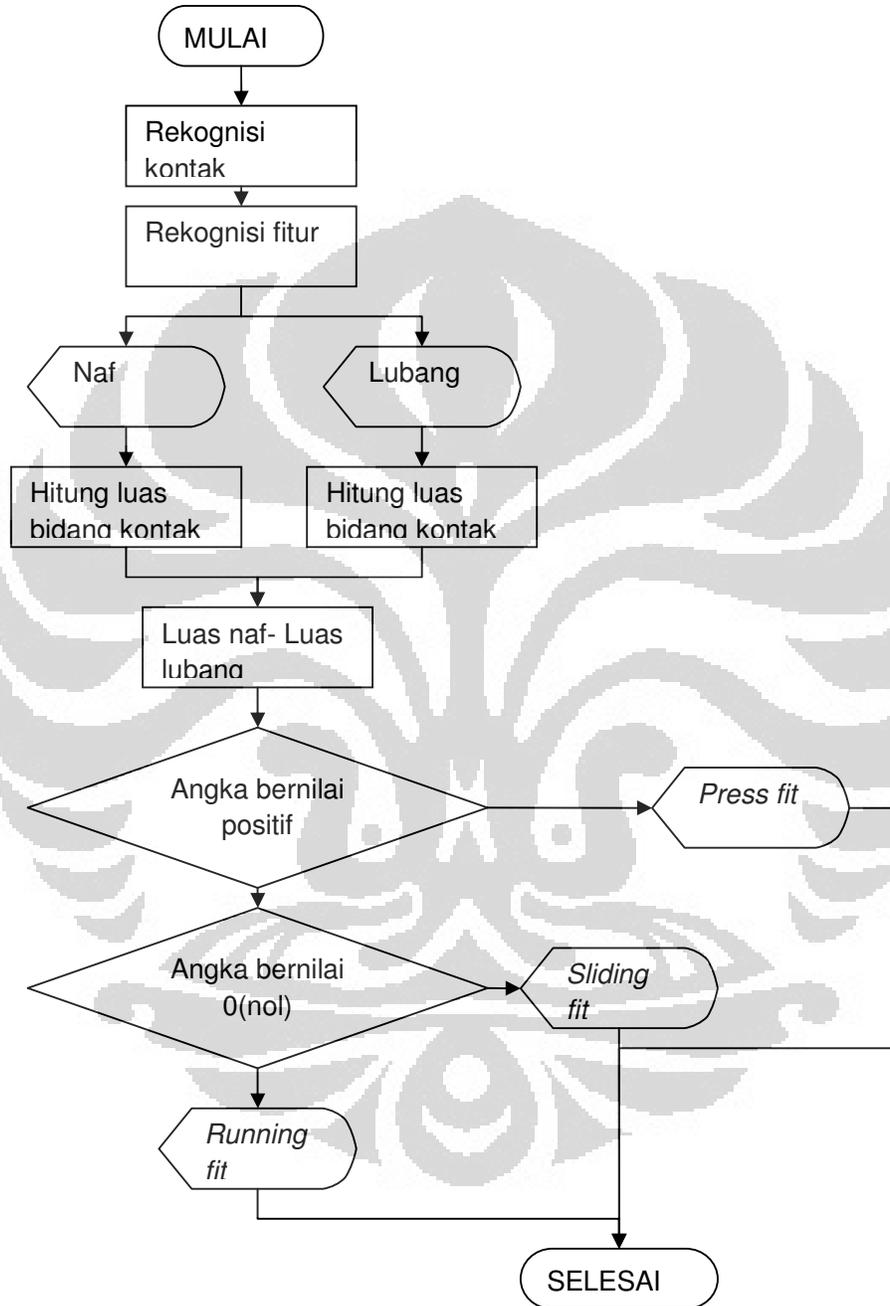
Condition	Information required				Jumlah informasi	Persentasi
	Gaya (melawan berat)	waktu	Komponen lain untuk di- <i>insert</i>	Proses <i>Fastening</i>		
<i> Holding down not required</i>	1	1	0	1	3	0.75
<i> Holding down required</i>	1	1	1	1	4	1

Dengan didapatnya persentasi seperti pada tabel maka dapat dinyatakan kembali bahwa koefisien kesulitan aspek  *holding down* adalah 1(satu) jika dibutuhkan dan 0.75 jika tidak dibutuhkan. Angka ini adalah sama dengan angka yang dirangkumkan oleh Elmaraghy dari perataratan data Boothroyd pada aspek kebutuhan  *holding down*.

#### 4.4 Aspek *Insertion Resistance*

Aspek  *insertion resistance* yang dimaksud di sini dibatasi pada kondisi suaian ukuran pada komponen yang berpasangan.  *Insertion resistance* diartikan sebagai hal yang menghambat ketika di-*insert* sebagai akibat dari perbedaan ukuran penampang. Pada komponen yang bersuaian longgar ( *sliding*) dinyatakan tidak ada halangan ( *resistance*), bersuaian pas ( *Running fit*) dinyatakan sedikit

halangan dan bersuaian sesak (*Press fit*) dinyatakan mempunyai halangan besar. Identifikasi terhadap kondisi ini dijelaskan dengan algoritma seperti pada Gambar-4.4.1.



Gambar-4.4.1 Diagram alir identifikasi suaian ukuran

Kondisi *Press fit* dan *Running fit* secara geometri dilihat sebagai munculnya intersection antar bagian komponen yang berpasangan. Pada saat komponen ini terpasang maka komponen ini tidak dapat digerakkan ke segala arah.

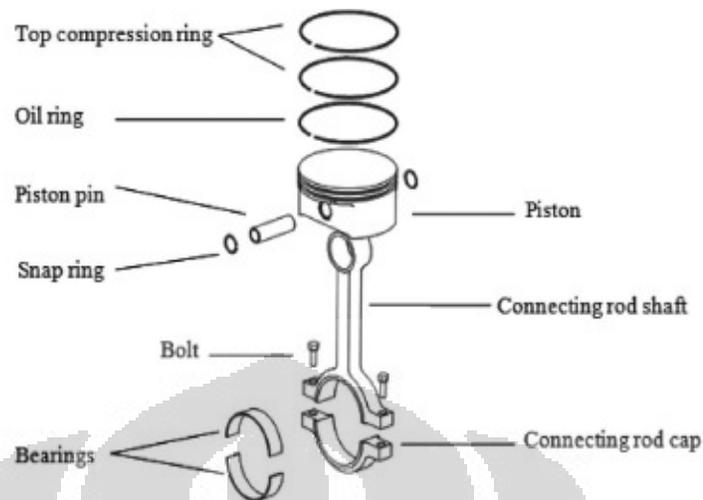
Tabel-4.4.1 Derajat kelonggaran ukuran komponen dalam rakitan

Kondisi suaian ukuran	Kesesakan pada arah x	Kesesakan pada arah y	Kesesakan pada arah z	Jumlah	Persentase
<i>Sliding</i>	1	1	0	2	0.67
<i>Running fit</i>	1	1	1	3	1
<i>Pressfit</i>	1	1	1	3	1

Untuk kondisi yang longgar (*sliding*), kelonggaran ukuran yang dimaksud adalah tersedianya ruang (sedikit) bagi komponen untuk bergerak ke arah x atau y (dianggap z sebagai arah *insert*). Jika komponen yang dimaksud adalah bulat maka komponen ini mempunyai kebebasan untuk diputar. Tabel-4.4.1 memperlihatkan ringkasan tentang informasi kelonggaran yang dimiliki oleh setiap kondisi komponen. Terlihat bahwa *Press fit* dan *Runningfit* memiliki jumlah informasi keterbatasan yang sama. Persentase bagi suaian longgar adalah 0.67 dengan dua arah kelonggaran. Keadaan ini memberikan angka koefisien yang serupa dengan sebelumnya dari tabel Elmaraghy.

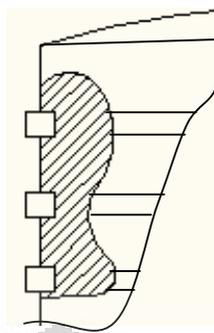
#### 4.5 Uji Coba Produk Piston

Sebagai contoh penggunaan koefisien aspek-aspek dalam atribut *insertion* ini adalah pada produk piston seperti pada Gambar-4.5.1. Dari gambar tersebut dapat ditentukan nilai koefisien setiap aspek terhadap setiap komponen.



Gambar-4.5.1 Perakitan Produk Piston [6]

Koefisien *alignment* bagi *Compression ring* dan *Oil ring* adalah sama karena kedua komponen tersebut mempunyai bentuk yang serupa yaitu lingkaran. Namun komponen ini mempunyai 2 tinjauan bentuk penampang. Pertama komponen ini harus masuk ke piston dengan penampang pada arah insert berbentuk lingkaran prismatic. Mengacu kepada Tabel-4.1.2 maka koefisien *alignment* untuk komponen ini adalah 0.67. Tinjauan ke-dua adalah bentuk pada bidang kontak pada arah melintang dan memanjang. Bidang kontak pada pasangan ring dengan piston ini adalah segi empat prismatic, seperti terlihat pada Gambar-4.5.2. Dengan mengacu kepada Tabel-4.2.1 koefisien *alignment* untuk kondisi ini adalah 1(satu). Dengan meninjau kepada tingkat perhitungan yang lebih 'aman' dan orientasi kepada bentuk penampang bidang kontak maka nilai koefisien *alignment* yang diambil adalah yang lebih tinggi yaitu 1. Keadaan *insert direction* untuk ketiga komponen ini adalah dua tahap. Pertama pada arah sumbu-z atau dari atas, dan yang kedua pada arah sumbu-x dan y atau dari samping. Sehingga mengacu kepada Tabel-4.2.2 koefisien *insert direction* untuk komponen-komponen ini adalah 0.75.



*Gambar-4.5.2. Bentuk penampang compression ring dan oil ring pada piston.*

Piston mempunyai bentuk berpasangan silindris sehingga koefisien *alignment* untuk komponen ini adalah 0.67. Komponen ini di-insert dari atas pula sehingga memberikan nilai koefisien insert *direction* sebesar 0.25.

Piston pin berbentuk silinder prismatik dengan arah insert dari samping, sehingga koefisien *alignment* dan *insert direction* untuk komponen ini adalah 0.67 dan 0.5. Ringkasan hasil penentuan koefisien *alignment* terhadap seluruh komponen dapat dilihat pada Tabel-4.5.1.

*Tabel-4.5.1. Koefisien aspek alignment dan insert direction produk piston*

No	Nama Komponen	Koefisien <i>Alignment</i>	Koefisien <i>Insertion Direction</i>
1	<i>Compression Ring</i>	1	0.75
2	<i>Oil Ring</i>	1	0.75
3	<i>Piston</i>	0.67	0.25
4	<i>Piston Pin</i>	0.67	0.5
5	<i>Snap Ring</i>	1	0.75
6	<i>Connecting Rod Shaft</i>	0.67	0.25
7	<i>Connecting Rod Cap</i>	0.67	0.25
8	<i>Bearing</i>	0.67	0.25

Angka koefisien yang dihasilkan ini sedikit berbeda dengan metoda yang diterapkan sebelumnya seperti terlihat pada Tabel-4.3.2 pada area yang dibatasi dengan dengan garis putus-putus. Uraian lebih lanjut mengenai perbedaan ini dibahas pada bab selanjutnya.

Tabel-4.5.2 Nilai koefisien alignment dan insert direction Elmaraghy[2]

Part name	Number	Insertion complexity factor, $C_{a,f}$					
		Holding down	Insertion resistance	Alignment	Mechanical Fastening	Non-mechanical fastening	Insertion direction
Compression ring	2	0.75	1	1	0	0	0.5
Oil ring	1	0.75	1	1	0	0	0.5
Piston	1	0.75	0.67	0.67	0	0	0.5
Piston pin	1	0.75	1	1	0	0	0.54
Snap ring	2	0.75	1	1	0	0	0.54
Connecting rod shaft	1	1	0.67	1	0	0	0.5
Connecting rod cap	1	1	0.67	1	0.5	0	0.5
Bearing	2	1	1	1	0	0	0.5

Nilai koefisien yang diberikan pada komponen-komponen ini selanjutnya dimasukkan ke dalam persamaan-2.7 untuk menghitung kompleksitas faktor *insertion* ( $C_i$ ). Aspek lainnya pada atribut *handling* masih tetap ditentukan dengan mengacu pada tabel Elmaraghy (Tabel-1.1). Tabel-4.5.3 menunjukkan angka koefisien setiap aspek-aspek *insertion* dan faktor kompleksitas *insertion* setiap komponen. Sebagai contoh, nilai  $C_i$  untuk komponen *compression ring* adalah:

$$C_{i_{comp.ring}} = \frac{(0.75 + 1 + 1 + 0.75) * (0.75 + 1 + 1 + 0.75)}{4} = 3.06$$

Setelah diketahui nilai  $C_i$  setiap komponen, perhitungan berikutnya adalah menghitung  $C_{p,part}$  dengan Persamaan-1.3. Nilai  $C_{p,part}$  yang diperoleh pada setiap komponen kemudian dikalikan dengan persentase setiap komponen dalam produk ( $x_p$ ). Misal jumlah komponen *compression ring* adalah 2 dan jumlah seluruh

komponen adalah 11, maka nilai  $x_p$  untuk *compression ring* adalah  $2/11$ . Hasil perkalian  $c_{p,part}$  dan  $x_p$  inilah yang dinyatakan sebagai koefisien proses perakitan produk ( $c_{proc.ass.x}$ ). Tabel-4.5.4 menunjukkan nilai  $c_{p,part}$ ,  $c_{proc.ass.x}$  dan  $KAI$  untuk produk piston. Lebih lengkap mengenai data perhitungan kompleksitas produk piston dapat dilihat pada Lampiran-2: Faktor kompleksitas *handling* dan *insertion* produk piston, dan Lampiran-3 : Kompleksitas perakitan produk piston.

Tabel-4.5.3 Koefisien atribut insertion produk piston

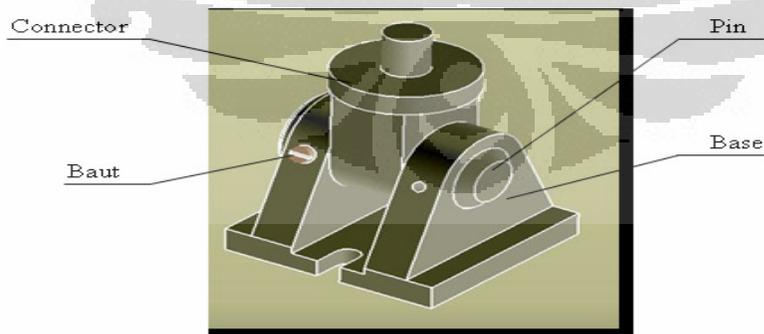
	Part name	Number	Holding down	Insertion resistance	Alignment	Mechanical fastening	mechanical fastening	Insertion direction	K	Sum	$C_i = \text{sum} / K$	Sum X $C_i$
1	Compression Ring	2	0.75	1	1	-	-	0.75	4	3.5	0.88	3.06
2	Oil Ring	1	0.75	1	1	-	-	0.75	4	3.5	0.88	3.06
3	Piston	1	0.75	0.67	0.67	-	-	0.25	4	2.34	0.59	1.37
4	Piston Pin	1	0.75	1	0.67	-	-	0.5	4	2.92	0.73	2.13
5	Snap Ring	2	0.75	1	1	-	-	0.75	4	3.5	0.88	3.06
6	Connecting Rod Shaft	1	1	0.67	0.67	-	-	0.25	4	2.59	0.65	1.68
7	Connecting Rod Cap	1	1	0.67	0.67	0.5	-	0.25	5	3.09	0.62	1.91
8	Bearing	2	1	1	0.67	-	-	0.25	4	2.92	0.73	2.13

Tabel-4.5.4 Kompleksitas perakitan produk piston ( $KAI_{piston}$ )

	Part name	Number	$C_{p,part}$	$x_p$	$C_{I\ part} = \frac{X_p}{C\ part}$	$H_p$ ( $\log_2(11+1)$ )	$H_s$ ( $\log_2(2+1)$ )	$KAI$
1	Compression Ring	2	0.90	0.182	0.163	3.585	1.585	6.365
2	Oil Ring	1	0.90	0.091	0.082			
3	Piston	1	0.92	0.091	0.084			
4	Piston Pin	1	0.74	0.091	0.067			
5	Snap Ring	2	0.84	0.182	0.153			
6	Conneting Rod Shaft	1	0.76	0.091	0.069			
7	Connecting Rod Cap	1	0.74	0.091	0.067			
8	Bearing	2	0.78	0.182	0.142			
		11			0.827			

#### 4.6 Uji Coba Produk *Truss Foot*

*Truss foot* adalah konsep sebuah kaki dudukan bagi batang pembentuk konstruksi rangka. Konsep produk ini terdiri dari 4(Empat) komponen yang dikonsep sedemikian rupa tanpa proses pengikatan dalam perakitannya. Baut yang



Gambar-4.6.1 Konsep Trus Foot

ada pada konsep konstruksi ini lebih berfungsi sebagai *stopper* bagi *Pin* dari pada sebagai pengikat. Gambar-4.6.1 memperlihatkan konsep produk yang dimaksud.

Komponen *Base* merupakan komponen *non-rotational* dengan simetri pada 2(dua) sumbu 180 derajat. Pada bagian bawah komponen ini diberikan *chamfer* untuk memudahkan pemasangannya pada *fixture* perakitan. Lubang baut dirancang sebanyak 4 buah pada bagian muka dan belakang untuk memberikan keleluasaan arah pemasangan sesuai posisi pemasangan *Pin*.

*Connector* merupakan komponen *rotational* yang berfungsi sebagai pengikat batang yang digunakan untuk konstruksi. *Connector* ini memiliki kesimetrian 1 sumbu 180 derajat.

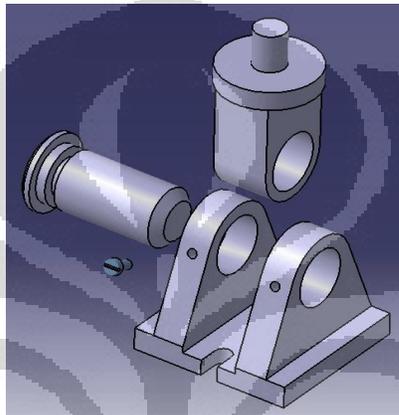
*Pin* merupakan komponen *rotational* simetri beta 0(nol) dan asimetri alfa yang berfungsi sebagai dudukan *connector*. Agar *Pin* tidak bergerak pada arah sumbu memanjang maka pada arah ini ditahan oleh baut.

Kondisi bagaimana konsep rancangan ini dirakit ditunjukkan pada Gambar-4.6.2. Perakitan produk ini terdiri 6 tahap dengan 2 kali re-orientasi. Urutan proses perakitan:

1. *Base*
2. *Connector*
3. Re-orientasi
4. *Pin*
5. Reorientasi
6. Baut

Sebagaimana diketahui bahwa selain bergantung kepada bagaimana komponen-komponen dalam produk dirakit, kompleksitas perakitan produk juga sangat dipengaruhi oleh koefisien kompleksitas perakitan yang dipengaruhi oleh faktor kompleksitas *handling* ( $Ch$ ) dan faktor kompleksitas *insertion* ( $Ci$ ) dan masing-masing faktor ini sangat dipengaruhi pula oleh nilai koefisien setiap aspek dari atribut *handling* dan *insertion*. Nilai koefisien setiap aspek ini seterusnya sangat dipengaruhi oleh keadaan fitur komponen dan informasi geometri lainnya

yang melekat pada setiap komponen (Lihat persamaan 1.1, 1.2 dan 1.3). Nilai koefisien setiap aspek dalam atribut *handling* dalam penelitian ini masih tetap mengacu kepada tabel atribut *handling* dan *insertion* dari jurnal Elmaraghy tentang kompleksitas perakitan yang berbasis pada data-data estimasi perakitan Boothroyd (Lihat Tabel-1.1). Setelah mengacu kepada tabel tersebut maka didapat tabel koefisien aspek-aspek *handling* untuk produk ini sebagaimana tampil pada Tabel-4.6.1.



Gambar-4.6.2 Gambar Perakitan Konsep Truss foot

Koefisien aspek-aspek dalam atribut *insertion* ditentukan dengan pendekatan geometri untuk setiap aspek. Bagi aspek-aspek yang lain tetap ditentukan dengan mengacu pada Tabel-1.1. Setelah mengacu kepada kedua cara tersebut maka didapat nilai koefisien setiap aspek dan faktor kompleksitas *insertion* seperti ditampilkan pada Tabel-4.6.2.

Setelah didapatkan nilai faktor kompleksitas *handling* dan *insertion* kemudian dapat dihitung koefisien kompleksitas perakitan komponen relatif ( $c_{p,part}$ ) dengan mensubstitusikan kedua nilai tersebut ke dalam persamaan-1.3. Sehingga didapat  $c_{p, part}$  untuk setiap komponen. Berikutnya koefisien kompleksitas proses perakitan produk ( $C_{proc.ass.x}$ ) dapat diselesaikan dengan Persamaan-1.2.

Tabel-4.6.1 Faktor kompleksitas handling Truss foot

No	Nama Komponen	Jumlah	Faktor Kompleksitas Handling ( $C_h$ )								
			Symmetry	Flexibility	Delicateness	Stickiness	Nestling/Tangling	J	Sum	$C_{h,f}$	$C_h \times \text{Sum} \times C_{h,f}$
1	Base	1	0.77	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.84	0.768	2.949
2	Connector	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.783
3	Pin	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.783
4	Baut	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.783

Tabel-4.6.2 Faktor kompleksitas insertion Truss foot

No	Nama Komponen	Jumlah	Faktor Kompleksitas Insertion ( $C_i$ )									
			Holding down	Insertion resistance	Alignment	fastening	fastening	Insertion derection	K	Sum	$C_{i,f}$	$C_i = \text{Sum} \times C_{i,f}$
1	Base	1	0.75	0.67	1	-	-	0.25	4	2.67	0.67	1.782
2	Connector	1	1	0.67	1	-	-	0.25	4	2.92	0.73	2.132
3	Pin	1	0.75	0.67	0.67	-	-	0.5	4	2.59	0.65	1.677
4	Baut	1	0.75	0.67	0.67	-	-	0.5	4	2.59	0.65	1.677

Setelah nilai-nilai  $c_{p, part}$  dan  $c_{procc.ass.x}$  setiap komponen didapat maka bersama dengan entropi informasi perakitan ( $H_p$ ), entropi *fastening* ( $H_s$ ), keragaman produk

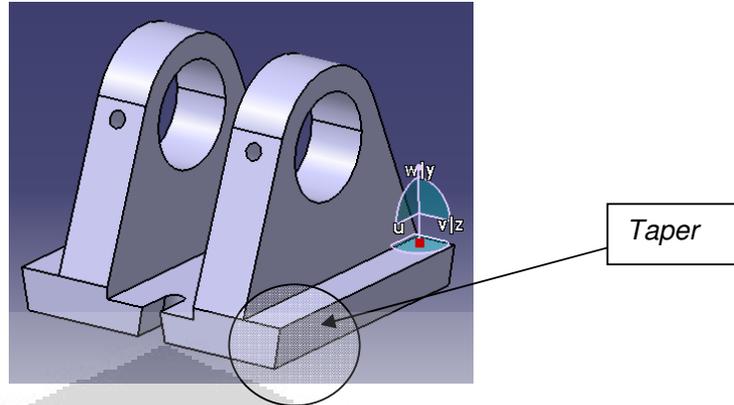
Universitas Indonesia

dan keragaman *fasteners* dapat dihitung nilai kompleksitas perakitan produk (*KAI*) dengan menggunakan Persamaan-1.1. Hasil perhitungan dari persamaan-persamaan tersebut terangkum pada Tabel-4.6.3.

Tabel-4.6.3 Angka kompleksitas perakitan produk (*KAI*) Truss Foot

No	Nama Komponen	Jumlah	Koefisien proses perakitan produk ( $c_{proc.ass.x}$ )		
			$C_{p,part}$	$x_p$	$C_{proc.ass.x} = x_p * C_{p,part}$
1	<i>Base</i>	1	0.73	0.25	0.182
2	<i>Connector</i>	1	0.739	0.25	0.185
3	<i>Pin</i>	1	0.709	0.25	0.177
4	Baut	1	0.709	0.25	0.177
		4			<b>0.722</b>
			<b><math>KAI_{Trussfoot}</math></b>		<b>3.998</b>

Hal berikutnya yang perlu dilakukan adalah meninjau pengaruh perubahan fitur terhadap nilai kompleksitas perakitan produk. Modifikasi bentuk fitur dilakukan terhadap komponen *Base* dengan memberikan bentuk *taper* pada bagian bawah komponen. Modifikasi ini dimaksudkan untuk meningkatkan kemudahan *alignment* komponen ini terhadap *fixture*-nya pada proses perakitan. Gambar-4.6.3 memperlihatkan modifikasi fitur yang dimaksud.



Gambar-4.6.3 Modifikasi fitur dengan bentuk taper untuk meningkatkan kemudahan alignment

Dengan modifikasi ini mengakibatkan berubahnya nilai koefisien aspek alignment bagi komponen base dari 1 (Lihat Tabel-4.4.2) menjadi 0.67. Perubahan ini mengacu pada Tabel-4.1.2. Seterusnya perubahan ini mempengaruhi angka faktor kompleksitas insertion ( $C_i$ ),  $C_{p,part}$ ,  $C_{proc.ass.x}$  dan pada akhirnya menurunkan angka kompleksitas produk ( $KAI_{Trussfoot}$ ).

Tabel-4.6.4 Perubahan angka variabel kompleksitas rakitan Truss Foot pada komponen Base mempengaruhi nilai  $KAI_{Truss Foot}$ .

Variable	Lama	Baru
Koefisien aspek alignment	1	0.67
$C_i$	0.667	0.585
$C_{p,part}$	0.730	0.71
$C_{proc.ass.x}$	0.182	0.177
$KAI_{Truss Foot}$	3.998	3.986

Data lengkap tentang hasil perhitungan kompleksitas produk Truss Foot dengan pendekatan tabel Elmaraghy dan tabel pendekatan geometri dapat dilihat pada Lampiran-4, Lampiran-5, Lampiran-6 dan Lampiran-7.

Perubahan menjadi bentuk *taper* pada komponen *base* pada dasarnya adalah merubah fitur komponen. Persamaan-2.1 dan persamaan -2.2 pada Bab-2 menunjukkan betapa kompleksitas produk sangat dipengaruhi oleh fitur(*feature*) komponen. Fitur suatu komponen menentukan angka koefisien kompleksitas fitur relatif ( $c_{f,feature}$ ) dan secara otomatis mempengaruhi angka koefisien kompleksitas produk ( $c_{j,product}$ ). Dengan demikian maka menambah fitur pada suatu komponen dapat meningkatkan kompleksitas produk( $CI$ ).

Di sisi lain penambahan fitur juga berarti menambah rangkaian proses fabrikasi. Bertambahnya jumlah proses fabrikasi akan menambah angka entropi proses( $H_{process}$ ) sebagaimana ditunjukkan pada persamaan-2.3 dan persamaan-2.4 pada Bab-2. Penambahan ini secara otomatis pula memperbesar nilai keragaman proses( $D_{R,process,x}$ ) dan koefisien kompleksitas proses relative( $c_{process,x}$ ) setiap komponen yang secara langsung meningkatkan nilai indeks kompleksitas proses individual komponen( $pc_x$ ). Dengan demikian penambahan fitur akan mengakibatkan perbesaran angka kompleksitas proses produk( $PI$ ).

## BAB V

### ANALISA DATA

#### 5.1 Tinjauan Umum

Pendekatan data geometri rakitan terhadap aspek *alignment* dalam atribut *insertion* memberikan 3(tiga) level angka tingkat kesulitan, yaitu 0.33, 0.66 dan 1. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan geometri memberikan pengklasifikasian tingkat kesulitan yang lebih cermat bila dibandingkan dengan pendekatan data tabel estimasi perakitan Boothroyd oleh Elmaraghy yang memberikan 2(dua) level angka koefisien kesulitan, 0.67 dan 1. Pendekatan ini mampu mendeteksi bahwa kondisi pasangan dengan bentuk *taper* memberikan angka koefisien *alignment* yang lebih kecil dibanding bentuk pasangan prismatis yang ber-*chamfer*, sehingga dapat memberikan penurunan angka kompleksitas perakitan produk.

Sementara itu pada aspek *insertion direction* memberikan 4(empat) variasi arah insert. Hal ini juga menunjukkan bahwa metode pendekatan data geometri rakitan memberikan pe-rangkingan yang lebih cermat dibanding metode pendekatan sebelumnya yang mengklasifikasikannya dalam 3 tingkatan. Tabel-5.1.1 dan Tabel-5.1.2 menunjukkan pengelompokan dan koefisien aspek *alignment* dan *insertion direction*.

Tabel-5.1.1 Koefisien Aspek Alignment pada Perakitan Otomatis

	Bentuk Penampang Area Perakitan						
							
	cyrcle	rectangel	triangle	hexagon	spline	oval	Irregular shape
Prismatik	0.67	1	1	1	1	0.67	1
Taper	0.33	0.67	0.67	0.67	0.67	0.33	0.67

Tabel-5.1.2 Koefisien Aspek Insertion Direction pada Perakitan Otomatis

Arah insert	Koefisien
arah z (dari atas)	0.25
arah y(x jika pada axisx)	0.5
arah z-y (atau z-x)	0.75
arah x-y atau radius	1

Pendekatan pada aspek *holding down* dan *insertion resistance* memberikan pengelompokan dan angka koefisien yang sama dengan pendekatan yang dilakukan oleh Elmaraghy. Tabel-5.1.3 dan Tabel-5.1.4 menunjukkan hal tersebut.

Tabel-5.1.3 Angka koefisien aspek holding down

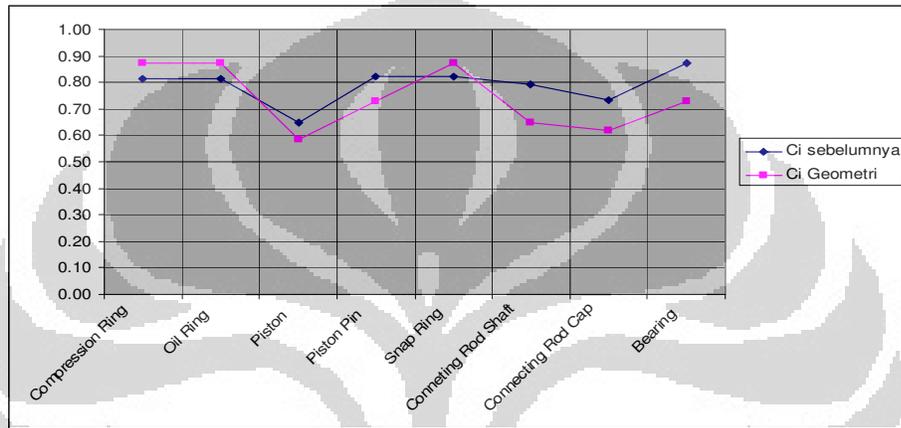
Kondisi	Koefisien
Tidak perlu <i> Holding down</i>	0.75
Perlu <i> Holding Down</i>	1

Tabel-5.1.4 Angka koefisien aspek insertion resistance

Kondisi suaian ukuran	Koefisien
<i>Sliding</i>	0.67
<i>Running fit</i>	1
<i>Press fit</i>	1

## 5.2 Produk Piston

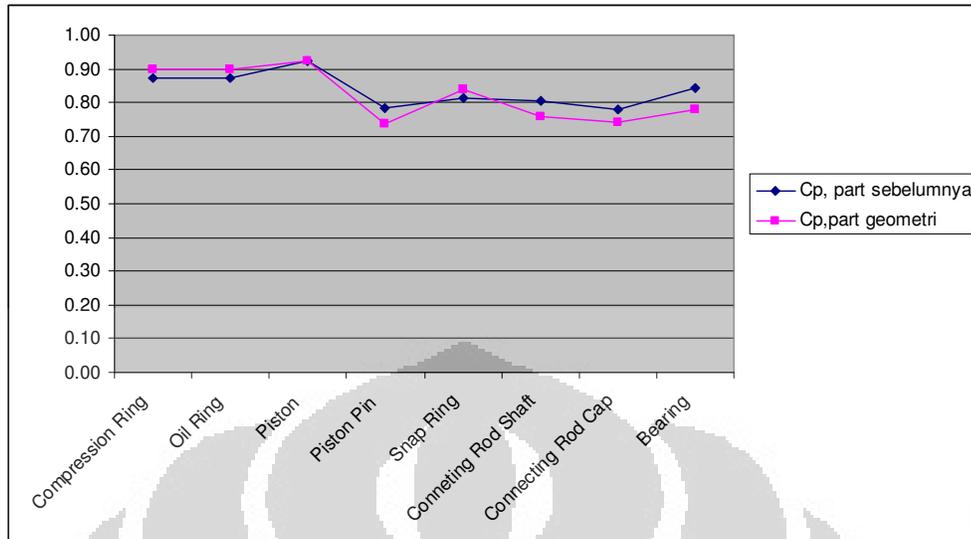
Meskipun tingkat klasifikasi yang diberikan adalah berbeda pada kedua metode namun pengaruhnya terhadap nilai faktor kompleksitas *insertion*( $C_i$ ) pada setiap komponen menunjukkan pola perubahan yang serupa. Gambar-5.2.1 menunjukkan perbandingan pola perubahan nilai  $C_i$  tersebut pada komponen-komponen piston.



Gambar-5.2.1 Grafik perbandingan pola perubahan nilai  $C_i$  komponen piston

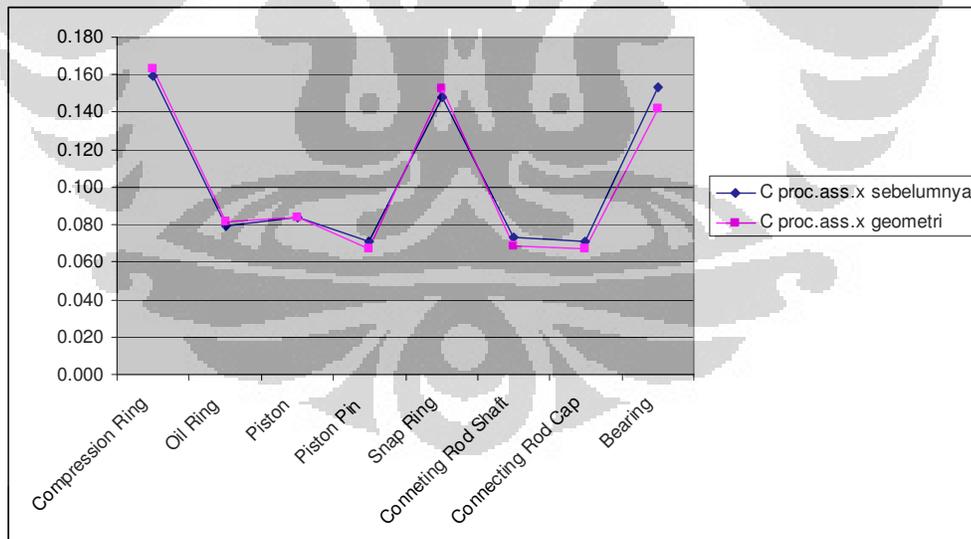
*versi sebelumnya dengan versi geometri*

Pola perubahan nilai  $c_{p, part}$  yang diberikan juga memberikan trend yang serupa dengan pola perubahan  $c_{p, part}$  dengan metode sebelumnya. Gambar-5.2.2 menunjukkan pola perubahan kedua metode tersebut.



Gambar-5.2.2 Perbandingan pola perubahan nilai  $c_{p, part}$  pada komponen piston versi sebelumnya dengan versi geometri

Gambar-5.2.3 memperlihatkan grafik pola perubahan nilai  $c_{proc.ass.x}$  kedua metode. Sama halnya dengan dua grafik sebelumnya, pola perubahan nilai kedua metode menunjukkan perilaku perubahan yang serupa.



Gambar-5.2.3 Grafik perbandingan pola perubahan nilai  $c_{proc.ass.x}$  pada komponen piston versi sebelumnya dengan versi geometri

Jika peninjauan dilakukan terhadap model kompleksitas yang digunakan hingga kepada jumlah aspek-aspek yang dikandung dalam atribut *handling* dan *insertion*, maka dapat dikatakan bahwa atribut *insertion* memiliki kontribusi 55% dari seluruh jumlah koefisien aspek *handling*( $J=5$ ) dan *insertion*( $K=6$ ). Dengan demikian kontribusi aspek *alignment* dan *insertion direction* adalah 30 % terhadap atribut *insertion* dan 18% terhadap keseluruhan aspek *handling* dan *insertion*. Perubahan terbesar yang terjadi pada nilai  $C_i$  adalah pada komponen *Connecting rod shaft* dari 0.70 menjadi 0.65. Sehingga penyimpangan yang terjadi adalah  $0.05/(0.3 \cdot 0.7)$  yaitu sebesar 23% dari penyimpangan nilai  $C_i$  maksimal yang diizinkan (30%).

Pola-pola perubahan nilai variable-variabel kompleksitas perakitan yang ditampilkan pada grafik-grafik di atas menunjukkan bahwa pendekatan geometri yang dilakukan terhadap aspek-aspek pada atribut *insertion* pada produk piston adalah relevan dengan pengukuran kompleksitas perakitan yang menggunakan koefisien dengan metode pendekatan sebelumnya.

### 5.3 Produk *Truss Foot*

Penentuan koefisien yang dilakukan terhadap produk *Truss Foot* menunjukkan hal yang serupa. Tabel-5.3.1 menunjukkan perbedaan nilai  $C_i$  yang diperoleh dengan kedua metode.

Tabel-5.3.1 Perbandingan nilai  $C_i$  metode sebelumnya dan pendekatan geometri

No	Nama Komponen	Jumlah	Metode	Alignment	Insertion direction	$C_i$
1	Base	1	Elm	0.67	0.5	0.65
			Geo	1	0.25	0.67
2	Connector	1	Elm	1	0.5	0.79
			Geo	1	0.25	0.73
3	Pin	1	Elm	0.67	0.54	0.66
			Geo	0.67	0.5	0.65
4	Baut	1	Elm	0.67	0.54	0.66
			Geo	0.67	0.5	0.65

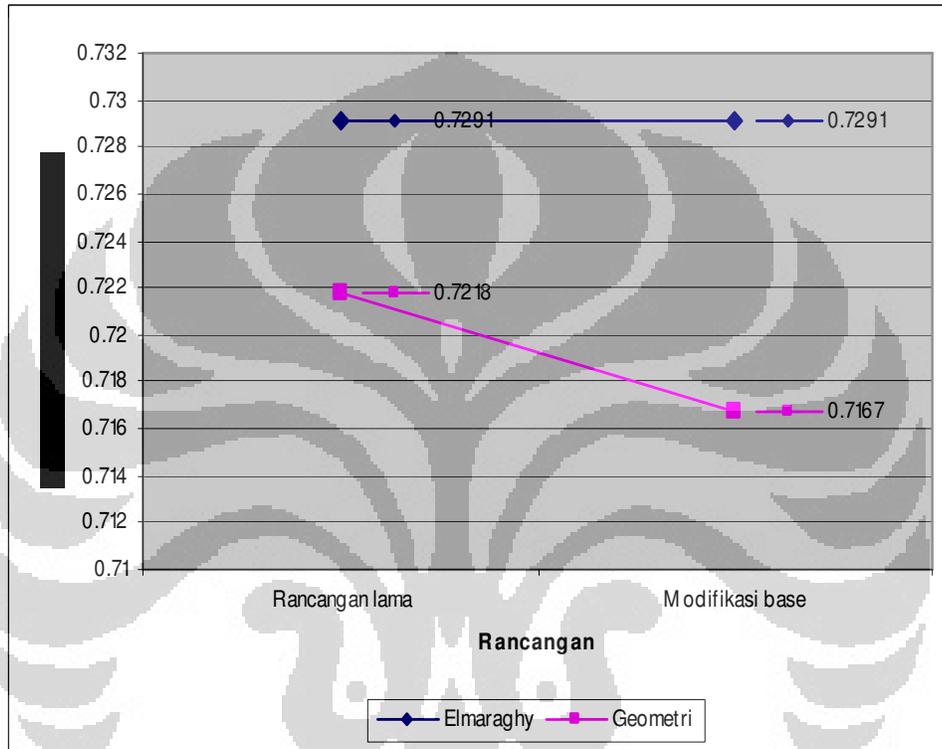
Dari Tabel-5.3.1 dapat dilihat betapa nilai  $C_i$  yang dimiliki setiap komponen adalah cenderung serupa walaupun didekati dengan cara yang berbeda. Sehingga nilai kompleksitas perakitan masing-masing juga tidak jauh berbeda (Lihat Tabel-5.3.2) dengan selisih sebesar 0.017.

Tabel-5.3.2 Angka Kompleksitas Rakitan Truss Foot pada kedua metode

	Elmaraghy	Geometry
$KAI$	4.015	3.998

Modifikasi yang dilakukan terhadap *Base* sebagai mana disampaikan pada bab sebelumnya ternyata memberikan penurunan angka kompleksitas rakitan pada produk. Akan tetapi ternyata modifikasi *base* ini tidak memberi perubahan sama sekali pada nilai koefisien aspek *alignment* ketika menggunakan metode

Elmaraghy dengan pendekatan data Boothroyd. Gambar-5.3.1 memperlihatkan perbandingan nilai kompleksitas perakitan kedua metode. Kondisi *alignment* yang termudah dengan pendekatan data Boothroyd adalah jika komponen ber-*chamfer*. Ketika sebuah komponen rakitan didesain dengan bentuk *taper* maka hal tersebut dianggap sama dengan *chamfer*.



Gambar-5.3.1 Grafik perbandingan nilai Koefisien kompleksitas rakitan produk relatif sebelum dan sesudah modifikasi komponen base

Penentuan koefisien dengan pendekatan geometri memberi ruang kepada pasangan rakitan berbentuk *taper*, karena sesungguhnya terdapat perbedaan usaha *alignment* antara komponen prismatis ber-*chamfer* dengan komponen dengan *taper*. Ketika sebuah komponen prismatik ber-*chamfer* di-*insert* maka masih dibutuhkan usaha untuk menjaga agar lintasan gerak *insert* tetap bergerak pada suatu garis lurus. Namun pada pasangan dengan bentuk *taper* hal tersebut tidak terlalu

dibutuhkan. Bentuk *taper* pada kontak yang diinginkan membuat pasangan dapat meng-*align* secara mandiri (*self alignment*).

Perubahan nilai koefisien aspek *alignment* pada komponen *Base* memberikan pengaruh perubahan nilai-nilai variable kompleksitas pada level di atasnya secara konsisten dan semakin mengecil hingga kepada nilai kompleksitas perakitan produk. Hal ini sangat relevan dengan hirarki model kompleksitas perakitan Elmaraghy seperti yang ditunjukkan pada Gambar-5.3.1. Gambar-5.3.2 memperlihatkan bagaimana perubahan nilai koefisien *alignment* dari 1 menjadi 0.67 dapat menurunkan angka koefisien kompleksitas perakitan produk relatif sebesar 0.005 (dari 0.722- 0.712), dengan perubahan *KAI* 0.012 (dari 3.998-3.986).



Gambar-5.3.2 Grafik pengaruh perubahan nilai koefisien aspek alignment terhadap koefisien kompleksitas rakitan relatif ( $c_{proc.ass.x}$ ) pada Truss Foot.

## BAB VI

### KESIMPULAN

Pendekatan data geometri rakitan dapat dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi aspek-aspek *insertion* setiap pasangan komponen dan dapat menentukan angka koefisien setiap aspek sesuai kondisinya. Koefisien pada aspek *holding down* dan aspek *insertion resistance* memberikan klasifikasi kondisi dan angka koefisien yang serupa dengan metoda pendekatan sebelumnya. Pengklasifikasian angka koefisien aspek *alignment* dengan pendekatan geometri (3 level) memberi ruang yang lebih banyak dibanding klasifikasi pada pendekatan data Boothroyd(2-level). Pendekatan ini mampu mendeteksi bahwa kondisi pasangan dengan bentuk *taper* memberikan angka koefisien *alignment* yang lebih kecil dibanding bentuk pasangan prismatis yang ber-*chamfer*, sehingga dapat memberikan penurunan angka kompleksitas perakitan.

Koefisien aspek-aspek *insertion* dengan pendekatan geometri memberi angka kompleksitas perakitan produk (*KAI*) 0.043 lebih kecil pada produk piston dan 0.017 lebih kecil pada *Truss foot*. Perubahan bentuk dari prismatis ke *taper* pada komponen *base* mampu menurunkan angka kompleksitas perakitan *Truss Foot* dari 3.998 menjadi 3.986. Penurunan ini tidak terjadi jika diukur dengan metode sebelumnya yang menggunakan pendekatan data estimasi waktu dan biaya perakitan dari Boothroyd.

Pengklasifikasian angka koefisien aspek *insertion direction* dengan pendekatan geometri (4 kondisi) juga memberi ruang yang lebih cermat dibanding klasifikasi pada pendekatan sebelumnya (3 kondisi). Pada bentuk lintasan yang berbelok, bentuk lintasan vertikal-horizontal memberikan koefisien yang lebih kecil(0.75) dari pada bentuk lintasan horizontal-horizontal(1).

Dengan model pengukuran kompleksitas perakitan dari Elmaraghy, pola grafik perubahan nilai  $C_b$ ,  $C_{p, part}$  dan  $C_{proc.ass.x}$  yang diberikan akibat koefisien ini menunjukkan perilaku yang serupa dengan pola perubahan dengan metoda pendekatan sebelumnya.

Walaupun modifikasi komponen *base* dengan bentuk *taper* pada produk *Truss Foot* dapat menurunkan angka kompleksitas perakitan, perlu diperhatikan pula bahwa hal

**Universitas Indonesia**

tersebut berarti menambah kerumitan bentuk komponen dan menambah proses permesinan yang harus dilakukan, sehingga mengakibatkan meningkatnya angka Kompleksitas Produk ( $CI$ ) dan Kompleksitas Proses ( $PI$ ). Peninjauan kompleksitas secara komprehensif tetap perlu dilakukan untuk mendapatkan rancangan produk dengan kompleksitas manufaktur yang optimal.

Berhasilnya proses identifikasi dan penentuan angka koefisien aspek-aspek pada atribut *insertion* dengan pendekatan geometri diharapkan dapat menjadi referensi bagi usaha pengukuran kompleksitas perakitan produk. Disamping itu diharapkan hal ini dapat merangsang penelitian-penelitian berikutnya untuk melakukan pendekatan data geometri perakitan dalam usaha menentukan angka koefisien aspek-aspek lainnya dalam ranah faktor kompleksitas *handling* dan *insertion*, baik pada metoda perakitan manual maupun otomatis. Sehingga berikutnya algoritma dan pemrograman bagi model pengukuran kompleksitas perakitan dapat lebih mudah untuk dilakukan. Bila hal ini tercapai maka akan segera dapat dimanfaatkan oleh industri-industri dalam usaha mempercepat proses penentuan *The Best Concept* dari beberapa konsep alternatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- 1) G. Boothroyth, P.Dewhurst, W.A.Knight, (2011), *Product Design for manufacture and assembly,3<sup>rd</sup> edition*, Boothroyd-Dewhurst Inc, Wakefield, Rhode island.
- 2) ElMaraghy & S.N.Samy (2010),*A Model for Measuring Product AssemblyComplexity*, Intelligent Manufacturing Systems (IMS) Centre, Faculty of Engineering University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada.
- 3) ElMaraghy, W. H. & Urbanic, R. Jill (2003). *Modelling of Manufacturing Systems Complexity*, Intelligent Manufacturing Systems (IMS) Centre, Faculty of Engineering University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada,
- 4) Per Gullander, Anna Davidsson, Kerstin Dencker (2011), *Towards a Production Complexity Model that Supports Operation,Re-balancing and Man-hour Planning*, University of Technology, Department of Product and Production Development, Gothenburg, Sweden,
- 5) Xiaowei Zhu, S. Jack Hu, Yoram Koren, Samuel P. Marin (2008), *Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines*, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109 dan Manufacturing Systems Research Lab,General Motors R&D Center, Warren, MI 48090,
- 6) ElMaraghy, W.H, & Urbanic, R. Jill (2006), *Modeling of Manufacturing Process Complexity*, British Library Cataloguing in Publication Data Advances in design, Springer,

Lampiran-1 : Tabel estimasi biaya *workhead* untuk perakitan otomatis[1]

*Estimation of Automatic Insertion for Relative Workhead Cost*

key		After assembly no holdingdown required to maintain orientation and location				Holding down required							
		Easy to align and position during assembly		not easy to align and position during assembly		Easy to align and position during assembly		not easy to align and position during assembly					
		No resistance to insertion	resistance to insertion	No resistance to insertion	resistance to insertion	No resistance to insertion	resistance to insertion	No resistance to insertion	resistance to insertion				
No final securing is taking place	Straight line insertion	From vertically above	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		Not From vertically above	1	1.2	1.6	1.6	2.5			1.3	2	2	3
	Insertion not straight line motion	2	2	3	3	4.6			2.7	4	4	6.1	
key		Part secured Immediately		Plastic bending or torsion		Riveting or similar operation		Screw tightening immediately after					
Additional or any part where final securing is taking place	Straight line insertion	From vertically above	Easy to align and position during assembly	not easy to align and position during assembly	Easy to align and position during assembly	resistance to insert	resistance to insertion	Easy to align and position during assembly	No resistance to insertion	resistance to insertion	Easy to align and position during assembly	not easy to align and position during assembly	
		Not From vertically above	3	1.2	1.9	1.6	2.4	3.6	0.9	1.4	2.1	0.8	1.8
	Insertion not straight line motion	4	1.3	2.1	2.1	3.2	4.8	1	1.5	2.3	1.3	2	
key		Seperated operation		Mechanical fastening process (part(s) already in place but not secured immediately after insertion)				Non mechanical fastening process (part(s) already in place but not secured immediately after insertion)		Non fastening process			
				None or localized plastic deformation		Metalurgy process							
				bending or similar process	riveting or similar	screw tightening or other	bulk plastic deformation	No additional material required	soldering process	weld/brazing process	chemical process	manipulation of parts or sub assembly	other process
Assembly process where all solid or non-solid parts are manipulated		9	1.6	0.9	0.8	1.6	1.2	1.1	1.1	0.8	1.5		

Lampiran-2 : Faktor kompleksitas *handling* dan *insertion* produk piston

Pengukuran Kompleksitas Piston dengan tabel koefisien atribut *handling* dan *insertion* Elmaraghy

Part name	Number	Handling Complexity Factor(Ch)								Insertion Complexity Factor (Ci)											
		Symmetry	Flexibility	Delicateness	Stickiness	Nesting/ Tangling	J	Sum	Ch	Sum X Ch	Holding down	Insertion resistance	Alignment	Mechanical fastening	Non-mechanical fastening	Insertion direction	K	Sum	Ci,f	Ci = Sum X Ci,f	
1 Compression Ring	2	0.77	1	1	0.8	1	5	4.57	0.91	4.18	0.8	1	1	-	-	0.5	4	3.25	0.81	2.64	
2 Oil Ring	1	0.77	1	1	0.8	1	5	4.57	0.91	4.18	0.8	1	1	-	-	0.5	4	3.25	0.81	2.64	
3 Piston	1	1	0.7	1.8	0.8	0.8	5	5.07	1.01	5.14	0.8	0.67	0.67	-	-	0.5	4	2.59	0.65	1.68	
4 Piston Pin	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.75	2.78	0.8	1	1	-	-	0.54	4	3.29	0.82	2.71	
5 Snap Ring	2	0.77	0.7	0.8	0.8	1	5	4.04	0.81	3.26	0.8	1	1	-	-	0.54	4	3.29	0.82	2.71	
6 Conneting Rod Shaft	1	1	0.7	0.8	0.8	0.8	5	4.07	0.81	3.31	1	0.67	1	-	-	0.5	4	3.17	0.79	2.51	
7 Connecting Rod Cap	1	1	0.7	0.8	0.8	0.8	5	4.07	0.81	3.31	1	0.67	1	0.5	-	0.5	5	3.67	0.73	2.69	
8 Bearing	2	1	0.7	0.8	0.8	0.8	5	4.07	0.81	3.31	1	1	1	-	-	0.5	4	3.5	0.88	3.06	
	11																				

Pengukuran Kompleksitas Piston dengan tabel koefisien atribut *insertion* dari pendekatan geometri

Part name	Number	Handling Complexity Factor(Ch)								Insertion Complexity Factor (Ci)											
		Symmetry	Flexibility	Delicateness	Stickiness	Nesting/ Tangling	J	Sum	Ch	Sum X Ch	Holding down	Insertion resistance	Alignment	Mechanical fastening	Non-mechanical fastening	Insertion direction	K	Sum	Ci,f	Ci = Sum X Ci,f	
1 Compression Ring	2	0.77	1	1	0.8	1	5	4.57	0.91	4.18	0.8	1	1	-	-	0.75	4	3.5	0.88	3.06	
2 Oil Ring	1	0.77	1	1	0.8	1	5	4.57	0.91	4.18	0.8	1	1	-	-	0.75	4	3.5	0.88	3.06	
3 Piston	1	1	0.7	1.8	0.8	0.8	5	5.07	1.01	5.14	0.8	0.67	0.67	-	-	0.25	4	2.34	0.59	1.37	
4 Piston Pin	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.75	2.78	0.8	1	0.67	-	-	0.5	4	2.92	0.73	2.13	
5 Snap Ring	2	0.77	0.7	0.8	0.8	1	5	4.04	0.81	3.26	0.8	1	1	-	-	0.75	4	3.5	0.88	3.06	
6 Conneting Rod Shaft	1	1	0.7	0.8	0.8	0.8	5	4.07	0.81	3.31	1	0.67	0.67	-	-	0.25	4	2.59	0.65	1.68	
7 Connecting Rod Cap	1	1	0.7	0.8	0.8	0.8	5	4.07	0.81	3.31	1	0.67	0.67	0.5	-	0.25	5	3.09	0.62	1.91	
8 Bearing	2	1	0.7	0.8	0.8	0.8	5	4.07	0.81	3.31	1	1	0.67	-	-	0.25	4	2.92	0.73	2.13	
	11																				

## Lampiran-3 : Kompleksitas perakitan produk piston

**Pengukuran Kompleksitas Piston dengan tabel koefisien atribut handling dan insertion Elmaraghy**

		Product Assembly Complexity(A <sub>f</sub> )					
Part name	Number	C <sub>p</sub> part	x <sub>p</sub>	c proc. ass. x = X <sub>p</sub> * C part	Entropi of parts (H <sub>p</sub> =log2 * 12)	Entropi of fasteners (H <sub>s</sub> =log2 * 3)	Piston assembly complexity (A <sub>f</sub> piston)
1 Compression Ring	2	0.87	0.182	0.159	3.585	1.585	<b>6.408</b>
2 Oil Ring	1	0.87	0.091	0.080			
3 Piston	1	0.92	0.091	0.084			
4 Piston Pin	1	0.78	0.091	0.071			
5 Snap Ring	2	0.81	0.182	0.148			
6 Conneting Rod Shaft	1	0.80	0.091	0.073			
7 Connecting Rod Cap	1	0.78	0.091	0.071			
8 Bearing	2	0.84	0.182	0.153			
	11			0.839			

**Pengukuran Kompleksitas Piston dengan tabel koefisien atribut insertion dari pendekatan geometri**

		Product Assembly Complexity(A <sub>f</sub> )					
Part name	Number	C <sub>p</sub> part	x <sub>p</sub>	C <sub>f</sub> part = X <sub>p</sub> * C part	Entropi of parts (H <sub>p</sub> =log2 * 12)	Entropi of fasteners (H <sub>s</sub> =log2 * 3)	Piston assembly complexity (A <sub>f</sub> piston)
1 Compression Ring	2	0.90	0.182	0.163	3.585	1.585	<b>6.365</b>
2 Oil Ring	1	0.90	0.091	0.082			
3 Piston	1	0.92	0.091	0.084			
4 Piston Pin	1	0.74	0.091	0.067			
5 Snap Ring	2	0.84	0.182	0.153			
6 Conneting Rod Shaft	1	0.76	0.091	0.069			
7 Connecting Rod Cap	1	0.74	0.091	0.067			
8 Bearing	2	0.78	0.182	0.142			
	11			0.827			

Lampiran-4 : Faktor kompleksitas *handling* dan *insertion* produk *Truss Foot*

**Pengukuran Kompleksitas Truss Foot dengan tabel koefisien atribut *handling* dan *insertion* Elmaraghy**

No	Nama Komponen	Jumlah	Faktor Kompleksitas Handling ( $C_h$ )							Faktor Kompleksitas Insertion ( $C_i$ )											
			Symmetry	Flexibility	Delicatness	Stickiness	Nesting/T angling	J	Sum	Ch	Sum X Ch	Holding down	Insertion resistance	Alignment	Mechanical fastening	Non-mechanical fastening	Insertion direction	K	Sum	$C_i,f$	$C_i = \text{Sum} \times C_i,f$
1	Base	1	0.77	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.84	0.768	2.949	0.75	0.67	0.67	-	-	0.5	4	2.59	0.648	1.677
2	Connector	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.783	1	0.67	1	-	-	0.5	4	3.17	0.793	2.512
3	Pin	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.783	0.75	0.67	0.67	-	-	0.54	4	2.63	0.658	1.729
4	Baut	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.783	0.75	0.67	0.67	-	-	0.54	4	2.63	0.658	1.729
		4																			

**Pengukuran Kompleksitas Truss Foot dengan tabel koefisien atribut *insertion* dengan pendekatan geometri**

No	Nama Komponen	Jumlah	Faktor Kompleksitas Handling ( $C_h$ )							Faktor Kompleksitas Insertion ( $C_i$ )											
			Symmetry	Flexibility	Delicatness	Stickiness	Nesting/T angling	J	Sum	Ch	Sum X Ch	Holding down	Insertion resistance	Alignment	Mechanical fastening	Non-mechanical fastening	Insertion direction	K	Sum	$C_i,f$	$C_i = \text{Sum} \times C_i,f$
1	Base	1	0.77	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.84	0.768	2.949	0.75	0.67	1	-	-	0.25	4	2.67	0.668	1.782
2	Connector	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.783	1	0.67	1	-	-	0.25	4	2.92	0.73	2.132
3	Pin	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.783	0.75	0.67	0.67	-	-	0.5	4	2.59	0.648	1.677
4	Baut	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.783	0.75	0.67	0.67	-	-	0.5	4	2.59	0.648	1.677
		4																			

Lampiran-5 : Kompleksitas perakitan produk *Truss Foot*

**Pengukuran Kompleksitas Truss Foot dengan tabel koefisien atribut handling dan insertion Elmaraghy**

No	Nama Komponen	Jumlah	Kompleksitas Perakitan Produk (A1)					
			$C_{p,part}$	$x_p$	$c_{proc.ass.x} = X_p * C_{part}$	Entropi of parts ( $H_p = \log_2 * 5$ )	Entropi of fasteners ( $H_s = \log_2 * N_s + 1$ , for $N_s > 1$ )	Kompleksitas Perakitan Produk Truss Foot (A1 Truss Foot)
1	Base	1	0.724	0.25	0.1811	2.322	0 (tidak ada fastener)	
2	Connector	1	0.768	0.25	0.1920			
3	Pin	1	0.712	0.25	0.1780			
4	Baut	1	0.712	0.25	0.1780			
		4			<b>0.7291</b>			

**Pengukuran Kompleksitas Truss Foot dengan tabel koefisien atribut insertion dengan pendekatan geometri**

No	Nama Komponen	Jumlah	Kompleksitas Perakitan Produk (A1)					
			$C_{p,part}$	$x_p$	$c_{proc.ass.x} = X_p * C_{part}$	Entropi of parts ( $H_p = \log_2 * 5$ )	Entropi of fasteners ( $H_s = \log_2 * N_s + 1$ , for $N_s > 1$ )	Kompleksitas Perakitan Produk Truss Foot (A1 Truss Foot)
1	Base	1	0.73	0.25	0.1825	2.322	0 (tidak ada fastener)	
2	Connector	1	0.739	0.25	0.1848			
3	Pin	1	0.709	0.25	0.1772			
4	Baut	1	0.709	0.25	0.1772			
		4			<b>0.7218</b>			

Lampiran-6: Faktor kompleksitas *handling* dan *insertion* produk *Truss Foot* setelah modifikasi komponen *base*.

Pengukuran Kompleksitas Truss Foot MODIFIKASI dengan tabel koefisien atribut *handling* dan *insertion* Elmaraghy

No	Nama Komponen	Jumlah	Faktor Kompleksitas Handling ( $Ch$ )							Faktor Kompleksitas Insertion ( $Ci$ )											
			Symmetry	Flexibility	Delicateness	Stickiness	Nesting/Tangling	J	Sum	Ch	Sum X Ch	Holding down	Insertion resistance	Alignment	Mechanical fastening	Non-mechanical fastening	Insertion direction	K	Sum	$Ci/f$	$Ci = \text{Sum} \times Ci/f$
1	Base	1	0.77	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.84	0.768	2.95	0.75	0.67	0.67	-	-	0.5	4	2.59	0.648	1.677
2	Connector	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.78	1	0.67	1	-	-	0.5	4	3.17	0.793	2.512
3	Pin	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.78	0.75	0.67	0.67	-	-	0.54	4	2.63	0.658	1.729
4	Baut	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.78	0.75	0.67	0.67	-	-	0.54	4	2.63	0.658	1.729
		4																			

Pengukuran Kompleksitas Truss Foot MODIFIKASI dengan tabel koefisien atribut *insertion* dengan pendekatan geometri

No	Nama Komponen	Jumlah	Faktor Kompleksitas Handling ( $Ch$ )							Faktor Kompleksitas Insertion ( $Ci$ )											
			Symmetry	Flexibility	Delicateness	Stickiness	Nesting/Tangling	J	Sum	Ch	Sum X Ch	Holding down	Insertion resistance	Alignment	Mechanical fastening	Non-mechanical fastening	Insertion direction	K	Sum	$Ci/f$	$Ci = \text{Sum} \times Ci/f$
1	Base	1	0.77	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.84	0.768	2.95	0.75	0.67	0.67	-	-	0.25	4	2.34	0.585	1.369
2	Connector	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.78	1	0.67	1	-	-	0.25	4	2.92	0.73	2.132
3	Pin	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.78	0.75	0.67	0.67	-	-	0.5	4	2.59	0.648	1.677
4	Baut	1	0.66	0.7	0.8	0.8	0.8	5	3.73	0.746	2.78	0.75	0.67	0.67	-	-	0.5	4	2.59	0.648	1.677
		4																			

Lampiran-7: Kompleksitas perakitan produk *Truss Foot* setelah modifikasi komponen *base*.

**Pengukuran Kompleksitas Truss Foot MODIFIKASI dengan tabel koefisien atribut handling dan insertion Elmaraghy**

No	Nama Komponen	Jumlah	Kompleksitas Perakitan Produk ( <i>A</i> )					
			$C_{p,part}$	$x_p$	$c_{proc,ass.} = x_p \cdot C_{part}$	Entropi of parts ( $H_p = \log_2 \cdot 5$ )	Entropi of fasteners ( $H_s = \log_2 \cdot N_s + 1$ , for $N_s > 1$ )	Kompleksitas Perakitan Produk Truss Foot ( <i>A</i> )
1	Base	1	0.724	0.25	0.1811	2.322	0 (tidak ada fastener)	4.015
2	Connector	1	0.768	0.25	0.1920			
3	Pin	1	0.712	0.25	0.1780			
4	Baut	1	0.712	0.25	0.1780			
		4			0.7291			

**Pengukuran Kompleksitas Truss Foot MODIFIKASI dengan tabel koefisien atribut insertion dengan pendekatan geometri**

No	Nama Komponen	Jumlah	Kompleksitas Perakitan Produk ( <i>A</i> )					
			$C_{p,part}$	$x_p$	$c_{proc,ass.} = x_p \cdot C_{part}$	Entropi of parts ( $H_p = \log_2 \cdot 5$ )	Entropi of fasteners ( $H_s = \log_2 \cdot N_s + 1$ , for $N_s > 1$ )	Kompleksitas Perakitan Produk Truss Foot ( <i>A</i> )
1	Base	1	0.71	0.25	0.1775	2.322	0 (tidak ada fastener)	3.986
2	Connector	1	0.739	0.25	0.1848			
3	Pin	1	0.709	0.25	0.1772			
4	Baut	1	0.709	0.25	0.1772			
		4			0.7167			