



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH MATERIAL TERHADAP  
INDEKS KOMPLEKSITAS PROSES ASSEMBLY  
PADA KOMPONEN OTOMOTIF**

**TESIS**

**Nelce D Muskita**

**0906579292**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH MATERIAL TERHADAP  
INDEKS KOMPLEKSITAS PROSES ASSEMBLY  
PADA KOMPONEN OTOMOTIF**

**TESIS**

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

**Nelce D. Muskita  
0906579292**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JANUARI 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 : Nelce D. Muskita

NPM : 0906579292

Tanda tangan : 

Tanggal : 15 Januari 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Nelce D. Muskita

NPM : 0906579292

Departemen : Teknik Mesin

Judul Tesis : Pengaruh Material terhadap Indeks Kompleksitas  
Proses Assembly pada Komponen Otomotif

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

Penguji : Dr.Ir. Gandjar Kiswanto, M.Eng

Dr. Ario Sunar Baskoro, S.T.,M.T., M.Eng

Ir. Henky Suskito Nugroho, M.T

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 13 Januari 2012

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kahadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-NYA sehingga penulisan tesis ini dapat terselesaikan. Saya menyadari bahwa tanpa adanya bantuan dan bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak, maka sangatlah sulit untuk menyelesaikan penelitian dan penulisan ini. Pada kesempatan ini saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ir. Hendri D.S. Budiono, MEng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan banyak waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan dan membimbing dalam penelitian serta penulisan tesis ini.
2. Suami serta anak-anak tercinta Billy dan Joan yang selalu memberikan dukungan dan perhatian, sehingga saya tetap bersemangat untuk menyelesaikan tesis ini.
3. Teman-teman seangkatan Ricky, Erwanto, Tuparjono, Herwandi, Zulfan, Pak Soleh, Pak Hindra, Pak Riyan, Pak Didi, Ibu Ayie yang telah banyak membantu dalam penyusunan dan penyelesaian tesis ini.
4. Semua pihak yang telah banyak memberikan bantuan dan tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Akhir kata semoga Tuhan Yang Maha Kuasa berkenan membalas semua kebaikan dan kemurahan hati pihak-pihak yang telah membantu. Besar harapan saya kiranya tesis ini dapat bermanfaat bagi pengembangan Ilmu Pengetahuan.

Depok, Januari 2012

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

### TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Nelce D. Muskita

NPM : 0906579292

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Tesis

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

#### **“Pengaruh Material terhadap Indeks Kompleksitas Proses Assembly Pada Komponen Otomotif”**

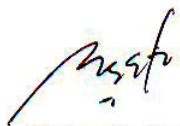
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmediakan/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/ pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 13 Januari 2012

Yang menyatakan ,



(Nelce D. Muskita)

## **ABSTRAK**

Nama : Nelce D. Muskita  
Program Study : Teknik Mesin  
Judul : PENGARUH MATERIAL TERHADAP INDEKS  
KOMPLEKSITAS PROSES ASSEMBLY PADA  
KOMPONEN OTOMOTIF

*Pengembangan metode pemilihan material dalam penentuan indeks kompleksitas proses assembly dari komponen otomotif ditahap awal proses desain merupakan tujuan dari penelitian ini . Indeks kompleksitas proses assembly ( $CI_{proses\ assembly}$ ) dipengaruhi oleh koefisien kompleksitas relatif dari proses assembly ( $CI_{produk}$ ), yang merupakan fungsi dari nilai rata-rata pembobotan faktor kompleksitas bagian perakitan ( $C_{part}$ ) dan presentase dari bagian yang berbeda ( $Xp$ ). Faktor kesulitan dalam perakitan terdiri dari kesulitan proses handling ( $Ch,f$ ) dan kesulitan proses insertion ( $CI,f$ ). Nilai material ( $Cm$ ) yang dimasukkan kedalam perhitungan kompleksitas akan mempengaruhi atribut weight dan insertion rsistance ,material yang berbeda mempengaruhi tingkat kesulitan proses perakitan. Semakin kecil indeks kompleksitas maka tingkat kerumitan untuk proses assembly semakin kecil.*

**Kata kunci** : pemilihan material, kompleksitas ,assembly

## **ABSTRACT**

Name : Nelce D. Muskita  
Study Program : Teknik Mesin  
Title : THE INFLUENCE OF MATERIAL TO COMPLEXITY INDEX OF ASSEMBLY PROCESS FOR AUTOMOTIVE COMPONENTS

*Development methods of material selection in determination of the complexity index of the automotive component assembly process ditahap initial design process is the aim of this study. Assembly process complexity index ( $CI_{proses\ assembly}$ ) is affected by the coefficient of relative complexity of the assembly process ( $CI_{produk}$ ), which is a function of the weighted mean value of the complexity of the assembly factor ( $C_{part}$ ) and percentage of different parts ( $X_p$ ). The difficulty in assembling consists of difficulty handling process ( $Ch, f$ ) and the difficulty of the process of insertion ( $Ci, f$ ). The value of material ( $C_m$ ) is entered into the computation complexity will affect the weight and insertion resistance attributes, different materials affect the difficulty level of the assembly process. The smaller the index level of complexity to the complexity of the assembly process of getting smaller.*

**Key words** : material selection, complexity, assembly



## DAFTAR ISI

Halaman Sampul .....	i
Halaman Judul .....	ii
Halaman Pernyataan Orisinalitas .....	iii
Halaman Pengesahan .....	iv
Kata Pengantar .....	v
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah Untuk Kepentingan Akademis .....	vi
Abstrak .....	vii
Abstract .....	viii
Daftar Isi .....	ix
Daftar Gambar .....	xi
Daftar Tabel .....	xiii
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Identifikasi Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Manfaat Penelitian .....	4
1.5. Batasan Penelitian .....	4
1.6. Sistematika Penelitian .....	5
<b>II. STUDI PUSTAKA</b>	
2.1. Kompleksitas .....	6
2.2. Kompleksitas Produk dan Proses .....	6
2.2.1. Kompleksitas Produk .....	7
2.2.2. Kompleksitas Proses .....	8
2.2.3. Kompleksitas Proses Assembly .....	8
2.3. Parameter Penting dalam Proses Assembly .....	9
2.4. Hubungan antara Kompleksitas dengan DFMA .....	10
2.5. Menghitung Indeks KOMPleksitas Proses Assembly .....	11
2.6. Pemilihan Material .....	14
2.6.1. Konsep dasar pemilihan Material .....	16
2.6.1.1. Grouping of Materials into Process Compatible Classes .....	16
2.6.1.2. Material Selection by Membership Function .....	17
2.6.1.3. Material Selection by dimensionless ranking .....	18
2.6.2. Perhitungan kompleksitas perakitan dengan menyertakan unsur material .....	20
2.7. Kemampuan Proses Manufaktur dari Material .....	21
<b>III. METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1. Obyek Penelitian .....	23

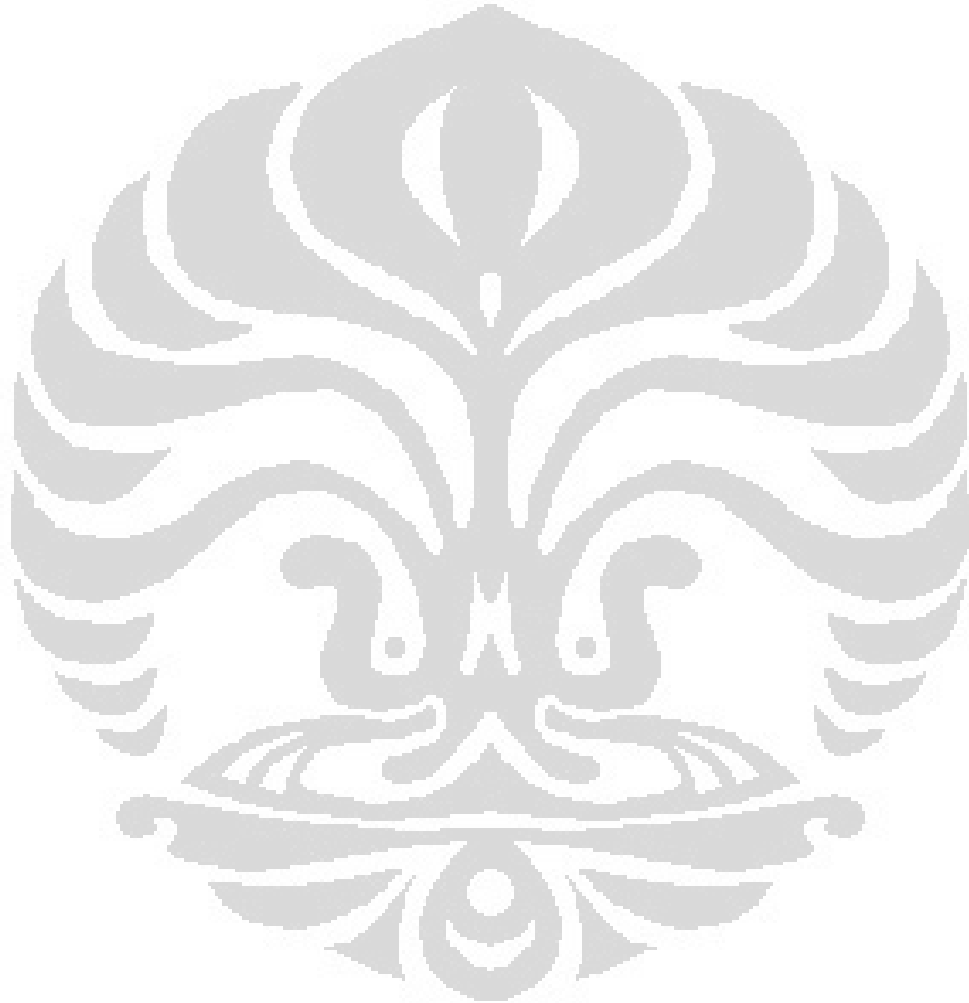
3.2. Metode pengumpulan data .....	23
3.3. Metode Penelitian .....	23
<b>IV. PENGEMBANGAN METODE</b>	
4.1. Pengembangan metode pemilihan material .....	27
4.2. Pengembangan metode penentuan nilai indeks kompleksitas .....	35
4.3. Prosedur dan langkah-langkah pengembangan metode .....	36
4.3.1. Langkah-langkah pengembangan metode pemilihan material .....	36
4.3.2. Langkah pengembangan metode penentuan Indeks Komplksitas .....	37
4.4. Pemilihan Karakter Material yang terkait dengan Proses Perakitan .....	37
4.4.1. Karakter Material yang terkait dengan proses Handling .....	38
4.4.2. Karakter Material yang terkait dengan proses Insertion .....	41
<b>V. HASIL DAN ANALISA</b>	
5.1. Hasil Perhitungan .....	43
5.2. Analisa keseluruhan hasil yang diperoleh .....	49
<b>VI. PENUTUP</b>	
6.1. Kesimpulan .....	51
6.2. Saran .....	51
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>Lampiran</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Elemen dari kompleksitas .....	6
Gambar 2.2.	Uraian Kompleksitas manufaktur .....	7
Gambar 2.3.	Elemen kompleksitas produk .....	8
Gambar 2.4.	Elemen kompleksitas proses .....	8
Gambar 2.5.	Atribut symetri .....	11
Gambar 2.6.	Indeks kompleksitas produk .....	13
Gambar 2.7.	Fungsi keanggotaan untuk material dan pemilihan proses .....	17
Gambar 2.8.	Pemilihan material bubuk disinter dengan modifikasi fungsi keanggotaan .....	18
Gambar 2.9.	Penyebaran modulus elastis untuk material dengan kelas yang berbeda jika disajikan pada skala linier .....	19
Gambar 2.10.	Penyebaran modulus elastis untuk material dengan kelas yang berbeda jika disajikan pada skala logaritmik .....	19
Gambar 2.11	Kompatibilitas antara proses manufaktur dan material .....	22
Gambar 3.1.	flow chart metodologi penelitian .....	24
Gambar 4.1.	Klasifikasi bentuk(shape) .....	27
Gambar 4.2.	Matriks keterkaitan antara bentuk dan proses .....	28
Gambar 4.3.	Matriks keterkaitan antara proses dan material .....	29
Gambar 4.4.	Matriks keterkaitan antara proses manufaktur dan material yang digunakan untuk produk piston .....	33
Gambar 4.5.	Ilustrasi Pengembangan yang dilakukan terkait dengan proses pemilihan material .....	34
Gambar 4.6.	Ilustrasi penggunaan karakter material .....	36
Gambar 4.7.	Pengukuran Density .....	38
Gambar 4.8.	Keterkaitan antara Density dan atribut handling .....	39

Gambar 4.9. Keterkaitan antara karakter material yang mempengaruhi proses handling dengan atribut handling yang diakuratkan nilainya ..... 41

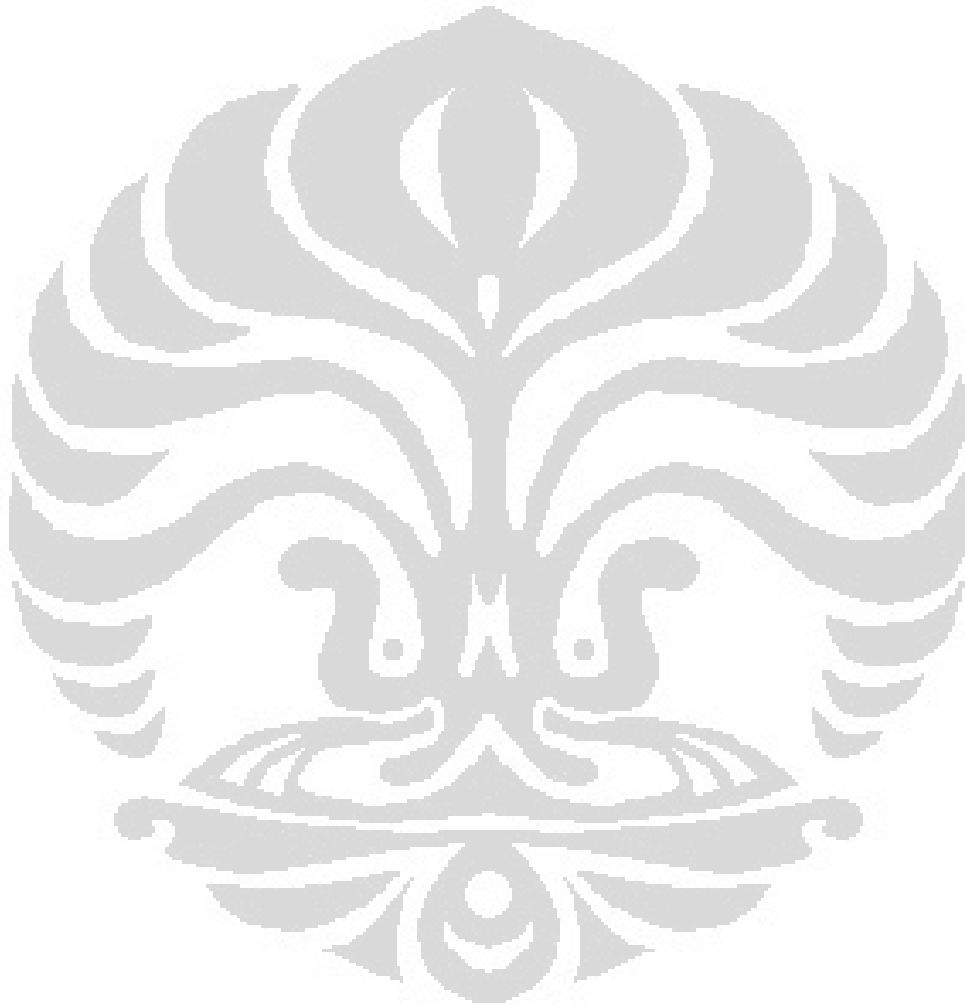
Gambar4.10. Keterkaitan elastisitas dengan DFMA dan kompleksitas ..... 42



## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1.	Bentuk dari komponen pada produk piston .....	27
Tabel 4.2.	Matriks keterkaitan antara Material dengan komponen .....	30
Tabel 4.3.	Jenis material yang dapat digunakan masing-masing komponen untuk produk piston (kandidat material dari produk piston) .....	33
Tabel 5.1.	Rekap nilai <i>density</i> dan hasil perhitungan kompleksitas serta peringkat material .....	43
Tabel 5.2.	Matriks atribut kompleksitas untuk proses <i>handling</i> varian 1 .....	44
Tabel 5.3.	Matriks atribut kompleksitas untuk proses <i>insertion</i> varian 1 .....	44
Tabel 5.4.	Hasil perhitungan CIproduk varian 1 .....	44
Tabel 5.5.	Matriks atribut kompleksitas untuk proses <i>handling</i> varian 2 .....	45
Tabel 5.6.	Matriks atribut kompleksitas untuk proses <i>insertion</i> varian 2 .....	45
Tabel 5.7.	Hasil perhitungan CIproduk varian 2 .....	46
Tabel 5.8.	Matriks atribut kompleksitas untuk proses <i>handling</i> varian 3 .....	46
Tabel 5.9.	Matriks atribut kompleksitas untuk proses <i>insertion</i> varian 3 .....	47
Tabel 5.10.	Hasil perhitungan CIproduk varian 3 .....	47
Tabel 5.11.	Matriks atribut kompleksitas untuk proses <i>handling</i> penelitian sebelumnya .....	48
Tabel 5.12.	Matriks atribut kompleksitas untuk proses <i>insertion</i> penelitian sebelumnya .....	48
Tabel 5.13.	Hasil perhitungan CIproduk penelitian sebelumnya .....	48

Tebel 5.14.	Hasil rekapitulasi perhitungan CIproduk ..... dan CIproduk dari ketiga varian	49
Tebel 5.15.	Perbandingan hasil yang diperoleh dari ..... penelitian sebelumnya dengan pengembangan yang dilakukan	50



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Industri otomotif diperkirakan menjadi faktor pendorong pertumbuhan ekonomi Indonesia tahun 2011. Hal tersebut terlihat dari data pada bulan desember 2010, yang mana peningkatan penjualan mobil yang mencapai 700 ribu unit dan motor sebesar 7 juta unit. Pencapaian fakta tersebut tidak terlepas dari Perpres. No. 28, Tahun 2008, tentang Kebijakan Industri Nasional yang merupakan salah satu regulasi lima tahunan dan mengatur tentang sasaran industri nasional yang harus dikembangkan beserta kriteria yang harus dipenuhi oleh industri tersebut. Salah satu sasaran industri andalan Indonesia sampai dengan tahun 2025 adalah industri otomotif (kendaraan bermotor), perkapalan, kedirgantaraan dan perkeretaapian [1]. Sebagai negara yang industri *assembling* otomotifnya mencapai 20 buah, banyak sekali produk primadona rakyat Indonesia yang kini kandungan lokalnya sudah diatas 60%. Misalnya mobil keluarga, kandungan lokalnya sudah mencapai 75%. Untuk terus meningkatkan kandungan lokal dari industri otomotif maka riset-riset yang berhubungan dengan hal tersebut terus dikembangkan.

Mekanisme *assembling* (perakitan) produk pada bagian yang berlainan merupakan sebuah proses yang sangat penting, sehingga di negara-negara industri yang besar mereka sangat mempertimbangkan proses *assembling* terutama pada industri alat berat, otomotif, kedirgantaraan, peralatan mesin, dan lain-lain sebagai sesuatu yang sangat besar pengaruhnya terhadap produk domestik bruto mereka. Proses perakitan sendiri mengambil bagian sebesar 53% dari total waktu produksi dan 20% dari total biaya produksi. Jika kita lebih mendalami lagi untuk permasalahan biaya produksi, maka total biaya produksi terdistribusi menjadi 20% untuk biaya proses perakitan dan 80% untuk biaya material dan proses lainnya.

Dengan komposisi presentase tersebut diatas maka sangat besar peluang untuk dapat mengurangi waktu produksi maupun biaya produksi dengan melakukan kajian dan analisa terhadap proses perakitan dan pemilihan serta penggunaan material untuk komponen otomotif. Guna mengurangi waktu dan biaya untuk proses perakitan, tentunya akan mempertimbangkan parameter-parameter penting dalam proses tersebut yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas dari satu produk. Peningkatan kualitas produk secara berkesinambungan dapat dilakukan di tahapan konseptual desain, dengan mempertimbangkan tingkat kerumitan proses pembuatan dan proses perakitan antara masing-masing komponen sebagai satu kesatuan dan diukur berdasarkan efisiensi waktu perakitan dengan pendekatan fitur saja. Akan tetapi pada proses ini belum memperhitungkan karakteristik produk jika ditinjau dari kerumitan produk secara fisik maupun ketika proses perakitan untuk menghasilkan suatu produk.

Agar proses perakitan menjadi relatif singkat maka kesulitan-kesulitan dalam proses itu haruslah di kurangi sehingga waktu dan juga biaya akan berkurang. Untuk dapat mengurangi waktu perakitan, maka penentuan karakteristik suatu produk sangatlah perlu dan penting untuk dilakukan. Karakteristik suatu produk digambarkan sebagai kesulitan yang di temui ketika melakukan proses perakitan. Pentingnya mengidentifikasi kesulitan dalam proses perakitan sangat bermanfaat untuk melakukan pengembangan guna peningkatan kualitas serta penerapan aplikasi dari *Design For Manufacturing and Assembly (DFMA)* . Faktor kesulitan yang ada dapat kita wujudkan kedalam bentuk angka, yang lebih dikenal dengan istilah Indeks Kompleksitas (CI).

Dalam lingkungan manufaktur kompleksitas dipengaruhi oleh beberapa unsur antara lain ; material, desain, spesifikasi dan komponen, dimana keempat unsur tersebut saling terkait satu dengan lainnya [2]. Material sendiri dapat mengambil bagian sebesar 80% dari total biaya produksi bersama dengan proses lainnya. Dengan demikian jika kita ingin mengurangi biaya produksi maupun waktu perakitan , maka kita dapat melakukan penelitian yang mendalam terhadap material yang digunakan untuk sebuah komponen ataupun produk.



Mengacu dari keadaan di atas maka sangatlah perlu untuk melakukan sebuah kajian dan analisa guna melihat sejauh mana **“Pengaruh Material Terhadap Indeks Kompleksitas Proses *Assembly* pada Komponen Otomotif”**.

### 1.2. Identifikasi Masalah

Berkaitan dengan latar belakang yang telah diuraikan ,maka masalah yang teridentifikasi antara lain :

1. Sejauh mana keterkaitan antara *Design for Manufacturing and Assembly* dan Kompleksitas.
2. Berapa besar nilai kompleksitas dari proses *assembly* sebuah komponen otomotif.
3. Parameter-parameter apa saja yang sangat mempengaruhi proses *assembly* terutama yang berkaitan dengan proses *handling* dan proses *insertion* serta proses fastening.
4. Sejauh mana pengaruh material terhadap nilai kompleksitas dari proses *assembly* sebuah komponen otomotif

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengidentifikasi parameter-parameter penting dan aspek yang berkaitan dengan proses perakitan
2. Melakukan pemilihan material dan menghitung indeks kompleksitas proses perakitan berdasarkan material yang digunakan untuk masing-masing komponen otomotif.
3. Mengkaji sejauh mana pengaruh material terhadap indeks kompleksitas proses perakitan pada sebuah komponen otomotif.
4. Mengusulkan material-material yang memungkinkan dan ekonomis untuk setiap komponen otomotif.

#### 1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

##### 1. Bagi Penulis

Penelitian ini akan menambah dan memperluas wawasan serta pengetahuan tentang pengaruh material terhadap kompleksitas proses *assembly* pada komponen otomotif.

##### 2. Bagi Perusahaan / Industri

Sebagai bahan masukan maupun rekomendasi kepada industri khususnya yang bergerak di bidang otomotif guna meningkatkan produktifitas dan efisiensi proses perakitan .

##### 3. Bagi Akademisi dan pihak lain

Sebagai informasi tambahan maupun penunjang kepada akademisi serta pihak lain terutama para peneliti untuk melanjutkan penelitian yang berkaitan dengan kompleksitas proses perakitan atau topik lain yang mempunyai keterkaitan dan kesinambungan dengan topik dalam penelitian ini.

#### 1.5. Batasan Penelitian

Begitu luasnya permasalahan yang terkait dengan proses perakitan dan pemilihan material, maka penelitian ini hanya di batasi pada : tahapan pemilihan material dan kemudian mengidentifikasi keterkaitan antara data material dengan faktor *handling*, *insertion* dan *fastening* pada proses perakitan ,serta penghitungan indeks kompleksitas untuk proses *assembly* dengan melakukan pengembangan terhadap model perhitungan yang telah dibuat oleh El-Maraghy dan mengusulkan material-material yang memungkinkan dan ekonomis untuk setiap komponen otomotif dari satu produk. Dalam penelitian ini penentuan/perhitungan indeks kompleksitas proses *assembly* hanya mengacu dari jenis material yang digunakan oleh setiap komponen, tidak membahas atau

menghitung indeks kompleksitas proses assembly berdasarkan urutan proses *assembly* dari setiap komponen.

## **1.6. Sistematika Penulisan**

Adapun sistematika penulisan tesis ini adalah sebagai berikut :

### **BAB I : PENDAHULUAN**

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

### **BAB II : STUDI PUSTAKA**

Pada bab ini dijelaskan tentang konsep dasar kompleksitas (kompleksitas produk, proses dan *assembly*), parameter-parameter penting dalam proses *assembly*, hubungan antara kompleksitas dan *DFMA*, pemodelan untuk menghitung kompleksitas *assembly* serta proses pemilihan material.

### **BAB III : METODOLOGI PENELITIAN**

Bagian ini menjelaskan tentang tahapan dan prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini, serta urutan perhitungan kompleksitas proses *assembly*.

### **BAB IV : PENGEMBANGAN METODE**

Pengembangan metode yang sudah ada serta penggabungan model pemilihan material dan model penentuan indeks kompleksitas dijelaskan dan diuraikan lebih lanjut dibagian ini.

### **BAB V : HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menguraikan tentang hasil perhitungan serta analisa data yang ada dan membandingkan nya dengan yang telah dibuat sebelumnya.

### **BAB VI : PENUTUP**

Pada bagian ini menjelaskan tentang kesimpulan dari hasil yang diperoleh dalam penelitian ini dan memberikan saran yang merupakan masukan untuk penelitian selanjutnya.

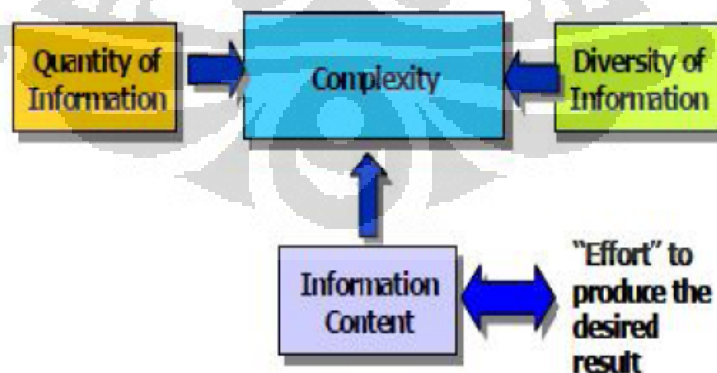
## BAB II STUDI PUSTAKA

### 2.1. Kompleksitas

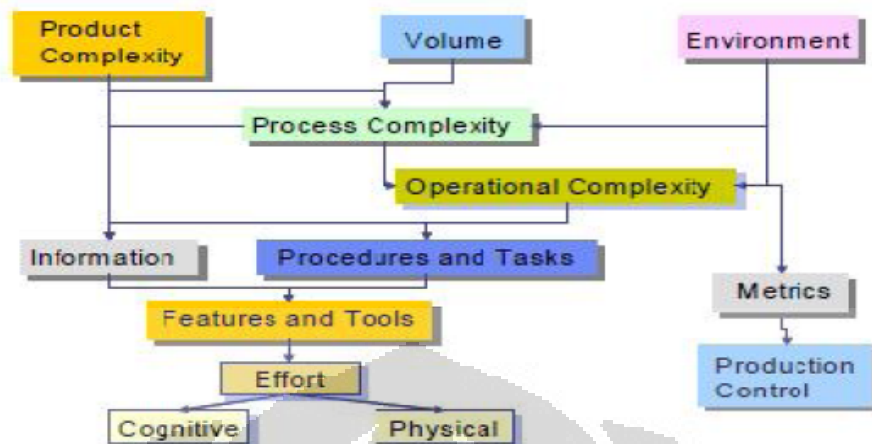
Kompleksitas selalu identik dengan kerumitan atau kesulitan, dan dipandang sebagai tantangan utama untuk saat ini dan masa depan di setiap industri manufaktur. Kompleksitas tidak dapat dibuat sederhana dan tidak akan hilang dalam waktu dekat. Dalam proses manufaktur, biaya perakitan dan kualitas akhir dari sebuah produk sangat diperhatikan, sehingga kompleksitas akan memainkan peran yang sangat penting dalam pencapaian desain produk terbaik yang tidak hanya memperhitungkan perencanaan perakitan, tetapi juga pemilihan proses manufaktur yang paling sesuai. Penelitian yang telah dilakukan untuk mengukur nilai atau indeks kompleksitas ada yang menggunakan pendekatan entropi atau isi dari informasi itu sendiri atau pendekatan heuristik dan indeks [2]. Yang menjadi definisi pendekatan informasi entropi adalah bahwa semakin banyak informasi yang teridentifikasi, maka model atau komponen yang diidentifikasi itu akan lebih kompleks.

### 2.2. Kompleksitas Produk dan Kompleksitas Proses

Kompleksitas merupakan fungsi dari jumlah informasi ( $H$ ), variasi dari informasi ( $DR$ ) dan isi dari informasi yaitu koefisien kompleksitas relatif ( $c_j$ ).



Gambar 2. 1 Elemen dari kompleksitas (Sumber: El-Marghy[2])

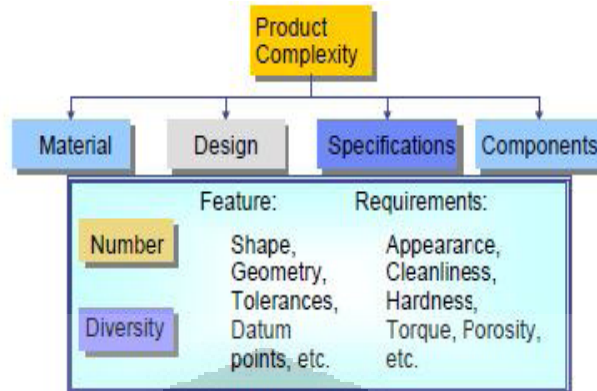


**Gambar 2. 2 Uraian Kompleksitas manufaktur (Sumber:El-Maraghy[2])**

Koefisien kompleksitas relatif ( $c_j$ ) merupakan hasil dari deskripsi fitur-fitur yang diinginkan beserta usaha yang dilakukan untuk menghasilkannya seperti tahapan proses atau tool. Kemudian semua informasi yang diperoleh dibobotkan secara statistik. Terdapat 3 jenis kompleksitas apabila mengacu kepada kompleksitas lingkungan manufaktur yaitu kompleksitas produk, kompleksitas proses dan kompleksitas operasional. Ketiganya saling mempengaruhi dan berhubungan akan tetapi untuk kemudahan analisa diuraikan menjadi komponen yang terpisah.

### 2.2.1. Kompleksitas Produk

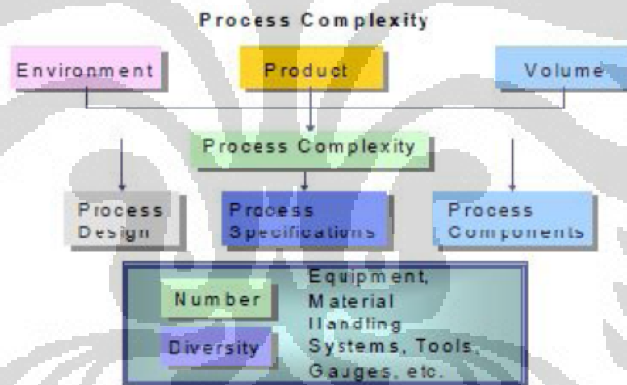
Kompleksitas produk dipengaruhi oleh informasi dan volume. Informasi yang mempengaruhi kompleksitas produk dipengaruhi oleh material dasar yang digunakan untuk membuat produk, desain dari produk, spesifikasi produk, dan komponen atau bagian dari produk, kemudian dipersempit menjadi dua kelompok yaitu: fitur dan spesifikasi. Fitur merupakan bentuk yang ingin dihasilkan. Spesifikasi adalah kualitas yang diinginkan berkaitan dengan fitur yang ingin dihasilkan. Kompleksitas produk dilambangkan sebagai  $CI_{\text{produk}}$ .



**Gambar 2. 3 Elemen kompleksitas produk (Sumber:El-Maraghy[2])**

### 2.2.2. Kompleksitas Proses

Kompleksitas proses merupakan fungsi dari desain produk, volume produksi yang diinginkan, perencanaan alur proses, dan lingkungan kerja. Kompleksitas proses dilambangkan dengan  $PI_{proses}$ .



**Gambar 2. 4 Elemen kompleksitas proses (Sumber:El-Maraghy[3])**

Yang perlu diingat yaitu, untuk menghasilkan kompleksitas proses maka haruslah teridentifikasi setiap komponen dari proses dalam setiap tahapannya.

### 2.2.3. Kompleksitas Proses Assembly

*Assembly* (perakitan) merupakan kesatuan dari sistem produksi secara keseluruhan, yang bertugas untuk menyusun bagian-bagian individu, subperakitan

dan bagian-bagian kecil lainnya. Mengukur kompleksitas dari proses perakitan adalah bagaimana kita menganggarkan kesulitan dalam proses tersebut. Banyak upaya telah dilakukan untuk mengukur kompleksitas perakitan dengan metode yang didasarkan pada kesulitan pemodelan perakitan berdasarkan data yang diambil dari sejumlah pengamatan empiris terhadap orang dan mesin. Namun pada kenyataannya metode ini belum mencerminkan kompleksitas perakitan yang sebenarnya, karena hanya didasarkan pada perkiraan secara kasar untuk waktu perakitan. Jika dikaitkan dengan teori dasar dari *Design for Assembly (DFA)*, maka kompleksitas dapat di kelompokkan atas dua kelompok atas ; kompleksitas komponen dan kompleksitas proses perakitan.

Kompleksitas komponen meliputi aspek-aspek desain yang berhubungan langsung dengan masing-masing komponen (seperti bentuk geometris) dan kompleksitas proses perakitan meliputi semua aspek yang terkait langsung dengan proses *handling, insertion* serta *fastening*.

### **2.3. Parameter Penting dalam Proses Assembly**

Proses perakitan terbagi menjadi 2(dua) bagian yaitu:

1. *Handling* (memegang, orientasi dan memindahkan komponen) Untuk dapat memfasilitasi proses perakitan manual nantinya maka pada desain suatu produk atau komponen harus mempertimbangkan kemudahan dan kesulitan dalam *handling*, dengan mengevaluasi beberapa parameter berikut yang terdapat pada desain produk:
  - a. Simetrisitas produk
  - b. Sudut antara sumbu produk yang tegak lurus dengan sumbu referensi proses perakitan (Alpha)
  - c. Sudut antara sumbu produk yang sejajar dengan sumbu referensi proses perakitan (Beta)
  - d. Ukuran dari produk (ketebalan, lebar, berat)
2. *Insertion* dan *Fastening* (penyatuan sebuah atau sekumpulan komponen) Setelah tahap *handling* dilakukan tahapan *insertion* dan *fastening* dalam proses

perakitan, yaitu usaha menyatukan produk dengan komponen/produk yang lainnya, dengan memperhatikan keberadaan beberapa parameter berikut ini:

- a.  *Holding down*, yaitu diperlukannya usaha tambahan berupa: alat pemegang tambahan, untuk mensejajarkan kembali sumbu produk dengan sumbu referensi, atau jeda waktu sebelum disatukan secara permanen dengan komponen lain. Suatu perakitan dapat dikatakan  *clearance* antara suatu komponen dengan komponen lainnya terlalu kecil yakni dengan melihat perbandingan diameter atau panjang antar dua komponen yang akan dirakit.
- b.  *Easy to align and position*, yaitu adanya  *guide* sewaktu proses perakitan seperti  *chamfer* atau bentuk sejenis lainnya.
- c.  *Obstructed access*, yaitu adanya luas bagian yang terlalu sempit atau kecil dari produk yang menyebabkan perlunya tambahan waktu untuk merakit.
- d.  *Restricted vision*, yaitu adanya kesulitan dalam melihat perakitan antar komponen sehingga operator hanya mengandalkan panca indera saja.

Kedua hal penting diatas berlaku baik untuk proses perakitan secara manual maupun proses perakitan secara otomatis

#### **2.4. Hubungan antara Kompleksitas dengan DFMA**

Dalam pengukuran efisiensi perakitan suatu produk maka produk tersebut harus memenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut :

1. Apakah komponen perlu dipindahkan secara relatif terhadap kelompok produk untuk dan dapat dirakit dengan komponen lain?
2. Apakah harus komponen terbuat dari material yang sama dari keseluruhan kelompok produk yang akan dirakit menjadi satu, untuk penyatuan secara fisik?
3. Apakah komponen perlu dipisahkan dari kelompok produk yang akan dirakit menjadi satu untuk kepentingan perakitan,  *maintenance* atau perbaikan?

Apabila komponen/produk tersebut memenuhi salah satu atau keseluruhan dari pra-syarat diatas, maka produk tersebut ketika dirakit memerlukan integrasi fisik antar satu komponen dengan komponen lainnya dengan mengandalkan



geometri fitur dari produk tersebut. Untuk proses perakitan diperlukan sinkronisasi antar fitur dari masing-masing komponen. Baik *DFA* maupun kompleksitas memperhitungkan fitur dalam melakukan pemodelan, untuk itu parameter *DFA* berupa *handling* dan *insertion* dapat dimasukkan ke dalam model kompleksitas sehingga akan benar-benar terlihat bahwa dalam mengembangkan desain telah dipikirkan sampai dengan kemudahan dalam proses perakitan.

## 2.5. Menghitung Indeks Kompleksitas Proses *Assembly*

Sebelum menghitung indeks kompleksitas dari proses *assembly* (perakitan) terlebih dahulu dihitung kompleksitas produk yang akan dirakit, yang mana bertujuan untuk melihat bagian mana dari komponen individu atau *subassemblies* yang memiliki geometri (atribut fisik) yang menyebabkan kesulitan selama proses *handling* (penanganan) dan *insertion* (penyisipan) baik secara manual maupun perakitan secara otomatis. Berdasarkan analisis *DFA*, atribut perakitan yang berbeda dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok: (1) atribut penanganan perakitan dan (2) atribut penyisipan perakitan.

Atribut perakitan manual akan mempengaruhi orientasi waktu proses perakitan. Dalam perakitan otomatis, atribut tersebut berpengaruh pada orientasi efisiensi dan biaya peralatan yang dibutuhkan. Gambar 2.5 adalah contoh dari bagian yang agak simetris, bagian ini tidak akan menimbulkan masalah yang signifikan dalam penanganan dan penyisipan secara manual, untuk penanganan otomatis, sistem visi akan diperlukan untuk mengenali orientasi yang benar.



Gambar 2.5 Atribut simetri (sumber El-maraghy[4])

Kompleksitas terdiri dari tiga faktor: kuantitas informasi absolut, keragaman informasi dan isi informasi. Kandungan informasi merupakan ukuran relatif dari upaya untuk mencapai hasil yang diperlukan.

Untuk menentukan faktor-faktor kompleksitas relatif, dibuatlah sebuah matriks dan kemudian memasukan semua isi informasi kedalam matriks tersebut. Model Kompleksitas awalnya dinyatakan sebagai:

$$C_{part} = \left( \frac{n}{N} + CI_{part} \right) [\log_2(N + 1)] \quad (1)$$

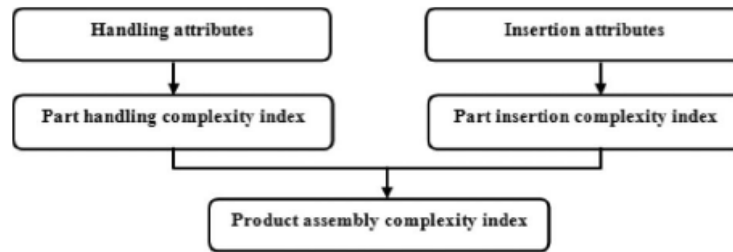
Dimana ;  $C_{part}$  adalah kompleksitas bagian,  
 $N$  adalah jumlah total informasi,  
 $n$  adalah jumlah informasi yang unik  
 $CI_{part}$  adalah indeks kompleksitas *part*.

Model ini telah dimodifikasi untuk perakitan sebagai berikut:

$$CI_{proses\ assembly} = \left[ \frac{n_p}{N_p} + CI_{produk} \right] [\log_2(N_p + 1)] + \left[ \frac{n_s}{N_s} \right] [\log_2(N_s + 1)] \quad (2)$$

Dimana ;  $CI_{proses\ assembly}$  adalah kompleksitas proses assembly dari produk  
 $N_p$  adalah jumlah total komponen yang di *handling* dan *insertion*  
 $N_s$  adalah jumlah komponen yang di *fastening*  
 $n_p$  adalah jumlah keunikan/keragaman dari komponen yang ditangani (*handling*) dan  $n_s$  adalah jumlah keunikan/keragaman dari komponen yang dikencangkan (*fastening*)  
 $CI_{product}$  adalah indeks kompleksitas produk yang dirakit

Setelah melakukan prosedur penghitungan kompleksitas produk yang dirakit kemudian kita dapat menghitung indeks kompleksitas untuk proses perakitan. Ilustrasi tersebut dapat dilihat pada gambar 2.6 dimana untuk menghitung indeks kompleksitas produk yang dirakit, setiap bagian diperiksa secara terpisah untuk mengidentifikasi atribut penanganan dan atribut penyisipan.



**Gambar 2.6 Indeks kompleksitas produk (sumber El-Maraghy[4])**

Indeks kompleksitas perakitan produk secara keseluruhan didasarkan pada indeks kompleksitas perakitan individu dari semua bagian. Prosedur perhitungan digambarkan sebagai berikut:

1. Mengitung kompleksitas rata-rata untuk faktor *handling* ( $C_h$ ) ;

$$C_h = \frac{\sum_1^J C_{h,f}}{J} \quad (3)$$

Dimana:  $C_{hf}$  adalah jumlah faktor kompleksitas relatif proses *handling* untuk setiap bagian

$J$  adalah banyaknya atribut/aspek *handling* untuk setiap bagian.

2. Mengitung kompleksitas rata-rata untuk faktor *insertion* ( $C_i$ ) ;

$$C_i = \frac{\sum_1^K C_{i,f}}{K} \quad (4)$$

Dimana:  $C_{if}$  adalah jumlah faktor kompleksitas relatif proses *insertion*

$K$  adalah banyaknya atribut/aspek *insertion* untuk setiap bagian.

3. Menghitung nilai rata-rata pembobotan faktor kompleksitas bagian perakitan ( $C_{part}$ ) ;

$$C_{part} = \frac{C_h \sum_1^J C_{h,f} + C_i \sum_1^K C_{i,f}}{\sum_1^J C_{h,f} + \sum_1^K C_{i,f}} \quad (5)$$

4. Menghitung kompleksitas produk indeks,  $CI_{product}$ .

$$CI_{product} = \sum_{p=1}^n x_p C_{part} \quad (6)$$

Dimana :  $x_p$  adalah persentase dari bagian-bagian yang berbeda,  
 $n$  adalah jumlah bagian yang unik.

5. Menghitung jumlah dan keunikan dari semua bagian *handling* dan *insertion*.
6. Menghitung jumlah dan keunikan dari semua bagian *fastening*.
7. Menghitung kompleksitas produk total menggunakan Persamaan (2).

## 2.6. Pemilihan Material

Pada umumnya faktor yang paling penting dalam total biaya komponen mesin adalah biaya dari benda kerja yang asli. Presentase biaya material dapat melebihi 50% dari total biaya produksi sehingga untuk memperkirakan hal tersebut harus dengan hati-hati. Desainer dapat menentukan volume material yang dibutuhkan untuk benda asli, serta dapat dengan mudah memprediksi biaya material, meskipun terkadang angka-angka yang ada pada referensi dapat digunakan sebagai panduan kasar, namun desainer akan dapat memperoleh angka yang lebih akurat dari pemasok material [5] .

Kemampuan untuk diproses pada mesin (proses permesian) menjadi salah satu faktor yang paling sulit untuk didefinisikan dan diukur. Pada kenyataannya, adalah mustahil untuk memprediksi kesulitan permesinan untuk material dari komposisi pengetahuan atau sifat mekaniknya, tanpa melakukan pengujian pada mesin. Namun demikian, diperlukan estimasi biaya yang bertujuan untuk menggunakan data yang dipublikasikan pada *machinability*. Mungkin sumber terbaik dari data tersebut, yang disajikan dalam bentuk kondisi pemotongan yang dianjurkan. desain produk dan jumlah bahan dengan laju produksi tinggi dan kurang tenaga kerja, biaya bahan menjadi porsi yang signifikan dari produk yang biaya. Walaupun biaya bahan tidak dapat berkurang di bawah tingkat tertentu, namun dapat dilakukan usaha untuk mengurangi jumlah material yang digunakan dalam komponen yang diproduksi secara massal. Karena bentuk keseluruhan bagian biasanya dioptimalkan selama tahap desain dan *prototipe*, lebih lanjut pengurangan jumlah memerlukan pemilihan material yang memiliki rasio yang tinggi untuk kekuatan terhadap berat atau kekakuan terhadap

berat. Perhatikan juga bahwa rasio yang lebih tinggi dapat diperoleh dengan peningkatan desain dan seleksi silang yang lebih baik.

Industri manufaktur untuk mobil dan pesawat terbang adalah contoh industri besar di mana substitusi bahan adalah kegiatan yang penting. Meskipun produk baru terus muncul di pasaran, sebagian besar kegiatan pada bagian desain manufaktur yang berkaitan dengan peningkatan dan pengembangan produk yang sudah ada terus melakukan perbaikan yang menghasilkan substitusi dari material, serta peningkatan penerapan teknik pengolahan baru atau, memperbaiki parameter kontrol untuk pengolahan, dan otomatisasi pabrik. Ada beberapa alasan untuk mengganti material dalam produk yang ada, antara lain:

- pengurangan biaya material dan pengolahan
- kemudahan manufaktur dan perakitan, instalasi, dan konversi untuk bagian perakitan otomatis
- peningkatan kinerja, seperti penurunan berat material dan lebih tahan terhadap aus, kelelahan, korosi dan karakteristik lain
- peningkatan kekakuan-berat-dan rasio kekuatan-ke-berat
- kemudahan pemeliharaan dan perbaikan
- diandalkan dalam dan luar area pasokan bahan.
- undang-undang dan peraturan yang melarang penggunaan bahan tertentu dalam produk untuk pertimbangan beracun atau lingkungan

untuk substitusi bahan dalam industri otomotif, mobil adalah contoh yang baik dalam penerapan substitusi bahan yang efektif guna pencapaian tujuan yang ada. beberapa contoh konkrit adalah:

- semua atau sebagian dari body yang terbuat dari logam diganti dengan plastik atau bahan plastik yang diperkuat
- bumper logam, roda gigi, pompa, tangki bahan bakar, *housing*, *cover*, klem, dan banyak komponen serupa lainnya diganti dengan plastik
- komponen logam pada mesin digantikan oleh keramik dan plastik bertulang
- bahan komposit *driveshafts* di gunakan di semua bagian logam-*driveshafts*
- Aneka substitusi lain, seperti besi untuk cor-aluminium blok mesin, ditempa untuk *crankshafts*, dan ditempa untuk tuangan, bubuk - metalurgi, atau batang material dihubungkan dengan komposit .

Industri otomotif adalah konsumen utama dari bahan logam dan non logam, sehingga dampak yang di timbulkan yakni adanya persaingan secara konstan antara pemasok, khususnya dalam industri baja, aluminium dan plastik. Perancang industri otomotif dan manajemennya terus menyelidiki keuntungan dan keterbatasan bahan-bahan pokok yang berkaitan dengan aplikasi mereka yang berkaitan dengan biaya benefit, dan daur ulang serta pertimbangan lingkungan lainnya.

### **2.6.1. Konsep dasar pemilihan material**

Pemilihan material dalam proses perakitan mempunyai prosedur yang telah di tentukan dan sangat besar pengaruh serta kontribusinya di tahapan awal desain produk. Prosedur pemilihan material bertujuan untuk mengelompokkan material berdasarkan spesifikasi tertentu atau berdasarkan karakteristik yang dimiliki material. Pemilihan material dianggap independen dari proses manufaktur yang dapat digunakan, sedangkan kompatibilitas antara proses dan bahan sangatlah penting. Beberapa pendekatan dapat digunakan untuk merasionalisasi dan mencari bahan yang cocok untuk aplikasi di tahap awal desain produk [6].

#### **2.6.1.1 *Grouping of Materials into Process Compatible Classes***

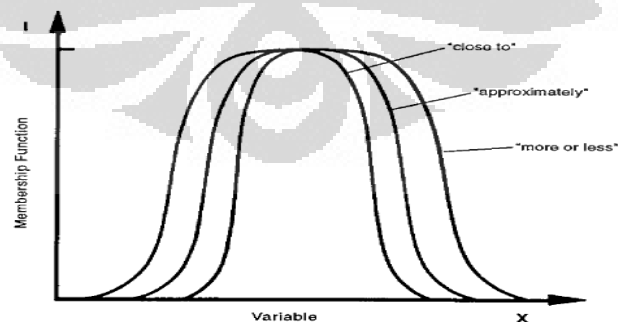
Penggunaan *database* komprehensif dari material tidak begitu baik untuk pengelompokan database ke dalam kelompok yang berkaitan dengan bentuk guna menghasilkan proses utama yang digunakan dalam pembuatan bagian-bagian yang terpisah. Hal ini diperlukan karena ketidakcocokan antara beberapa proses dan bahan. Secara umum pemilihan proses dan material harus dipertimbangkan secara bersama-sama. *Database* material secara terpisah harus mencakup *stockforms* logam standar (kawat, batang, dll), pasir dan cetakan permanen untuk pengecoran paduan, paduan *die-casting*, serbuk logam, butiran termoplastik, lembar termoplastik dan *stockforms* diekstrusi, dan sebagainya. Selama tahap pencarian awal tidak tepat untuk mencari *database* bahan ekstensif untuk

mengidentifikasi paduan logam yang tepat, spesifikasi polimer, bubuk campuran, dan lain-lain.

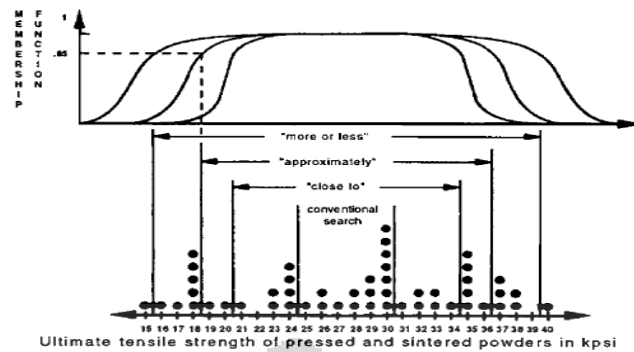
Sebuah prosedur yang lebih efisien harus dimiliki untuk setiap proses, sebuah spesifikasi yang terkait dengan material terbaik terdiri dari keunggulan sifat yang dicapai dari semua bahan dalam kategori yang sesuai. Pendekatan untuk proses seleksi awal melalui spesifikasi material terbaik yang kompatibel dengan pemasaran serta kompromi keputusan yang merupakan bagian dari pekerjaan di tahapan awal desain. Prosedur khusus mungkin melibatkan spesifikasi bentuk atribut, ukuran, dan satu atau lebih parameter produksi serta kinerja. Langkah berikutnya akan mengubah spesifikasi masukan atau menambahkannya ke daftar spesifikasi, atau untuk menyelidiki proses lebih lanjut dalam keterkaitannya dengan material.

#### 2.6.1.2. *Material Selection by Membership Function Modification*

Pencarian *database* konvensional untuk material dapat dilakukan dengan cara mengelompokkan material berdasarkan sifat-sifat yang memiliki nilai berdekatan tetapi tidak dalam kisaran yang ditentukan. Pendekatan alternatif adalah kualifikasi pemodelan yang samar seperti penggunaan aspek logika fuzzy. Logika fuzzy bergantung pada konsep fungsi keanggotaan untuk menentukan seberapa baik sebuah objek cocok untuk menjadi kelompok yang telah ditetapkan. Gambar 2.7. memperlihatkan kemampuan untuk menetapkan berbagai tingkat akurasi atau presisi untuk setiap kendala merupakan keuntungan dari logika fuzzy. Contoh sederhana dari pendekatan ini dapat dilihat pada Gambar 2.8.



**Gambar 2.7. Fungsi keanggotaan untuk material dan pemilihan proses  
( sumber: Boothroyd [6] )**



**Gambar 2.8. Pemilihan material bubuk disinter dengan modifikasi fungsi keanggotaan ( sumber : Boothroyd[6] )**

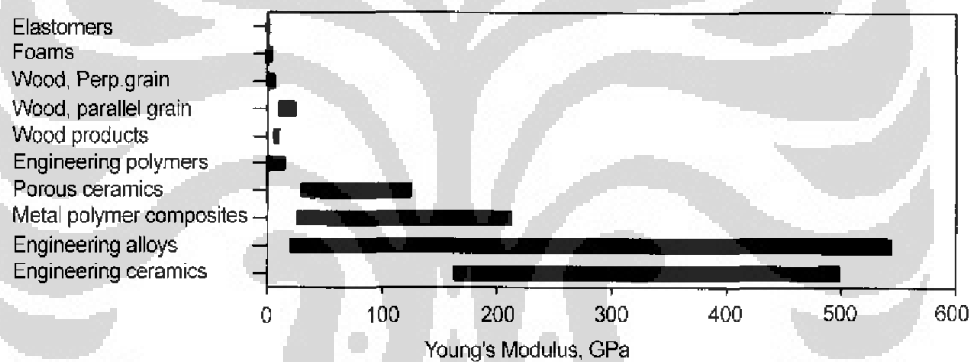
### 2.6.1.3. Material Selection by Dimensionless Ranking

Faktor kesulitan utama dari pemilihan material adalah perbedaan antara sifat dasar dari material yang diberikan dalam *database* dan persyaratan desain yang sebenarnya, yang biasanya didasarkan pada kombinasi dari nilai properti yang berbeda. Untuk kelompok struktural dalam produk kedirgantaraan dan otomotif para desainer mungkin tertarik dalam melihat kekakuan maksimum per unit berat, sedangkan untuk produk konsumen dengan volume yang tinggi, kekakuan maksimum biaya per unit akan lebih penting. Pada awalnya material akan dibandingkan berdasarkan fungsi dari modulus Young yang berbanding terbalik dengan kepadatan, kemudian ada pula kombinasi modulus Young, kepadatan, dan biaya per berat unit yang akan digunakan untuk tujuan perbandingan. Beberapa parameter asal, yang umum digunakan dalam desain mekanik telah dibangun. Membangun prosedur sederhana untuk membandingkan material yang didasarkan pada salah satu sifat dasar tunggal, atau bentuk umum dari parameter asal adalah cirri dari prosedur pemilihan material pada tahapan ini. Perbandingan materi tersebut biasanya dilakukan berdasarkan total kinerja, kinerja terbaik per satuan berat, atau kinerja terbaik per biaya unit. Suatu prosedur akan dibuat di bagian ini untuk membuat perbandingan ini pada skala berdimensi dari 0 hingga 100.

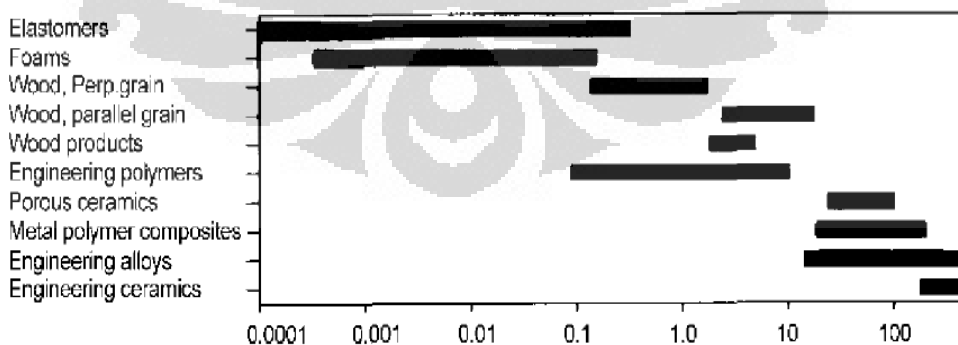
Sifat material akan cenderung terdistribusi disekitar keragamannya ketika disajikan pada skala logaritmik. Fakta ini dapat dilihat dengan jelas dalam kajian



yang dilakukan, di mana sifat material yang dikaitkan pada berbagai kombinasi skala logaritma, seperti keterkaitan kekuatan luluh terhadap kepadatan, koefisien ekspansi terhadap konduktivitas termal, dan sebagainya. Dalam semua kasus, pengelompokan sifat-sifat material direpresentasikan sebagai gelembung yang terlihat dan menyebar keluar secara kurang seragam di seluruh skala logaritmik. Gambar. 2.9 menunjukkan penyebaran modulus elastis untuk material dengan kelas yang berbeda jika disajikan pada skala linier, terlihat bahwa ada berjejal material pada awal skala dengan diskriminasi yang buruk diantara sifat material di wilayah tertentu karena skala yang kasar. Gambar 2.10 menunjukkan data yang sama diwakili pada skala logaritmik, yang menyebar diluar kelompok material di berbagai nilai properti. Penyebaran yang demikian pada skala logaritmik dari properti material ditemukan kemudian diterapkan juga untuk sifat asal material .



**Gambar 2.9. Penyebaran modulus elastis untuk material dengan kelas yang berbeda jika disajikan pada skala linier (sumber : Boothroyd [6] )**



**Gambar 2.10. Penyebaran modulus elastis untuk material dengan kelas yang berbeda jika disajikan pada skala logaritmik (sumber : Boothroyd [6] )**

Sifat-sifat material yang digunakan memiliki satuan yang berbeda-beda, sehingga untuk melakukan pengkajian lebih lanjut terlebih dahulu haruslah di seragamkan. Untuk menyeragamkan satuan dari propertis material yang berbeda, dapat dilakukan dengan :

$$N = 100 \log \frac{(P/P_{\min})}{\log(P_{\max}/P_{\min})} \quad (7)$$

Dimana : P = Data material yang digunakan  
 P<sub>min</sub> = Range/batasan terkecil dari data material  
 P<sub>max</sub> = Range/batasan terbesar dari data material  
 100 = Skala yg di gunakan untuk pembobotan

### 2.6.2. Perhitungan kompleksitas perakitan dengan menyertakan unsur material

Metode untuk menghitung Indeks Kompleksitas proses *assembly* telah dikembangkan dalam sebuah penelitian, hanya saja pada model perhitungan tersebut keterlibatan material dalam atribut *weight* perkirannya masih sangat kasar dan belum spesifik. Untuk lebih mengakurasikan atribut *weight* serta memasukan unsur material ke dalam perhitungan indeks kompleksitas, maka akan terjadi penggabungan metode pemilihan material dan metode penentuan Indeks Kompleksitas proses *Assembly*, yang mana unsur material akan dimasukkan kedalam parameter  $C_{part}$  yang merupakan fungsi dari  $CI_{produk}$  bersama dengan  $X_p$ , sehingga didapat :

$$CI_{proses\ assembly} = [(D_{R(h,i)} + CI_{produk}) * H_{(h,i)}] + [D_{R(f)} * H_{(f)}] \quad (8)$$

Dimana :

$CI_{proses\ assembly}$  = Indeks Kompleksitas proses *assembly* yang sudah menyertakan unsur material ke dalam atribut *handling* dan atribut *insertion*

$D_{R(h,i)}$  = Rasio keragaman untuk *handling* dan *insertion*,

$CI_{produk}$  = Koefisien kompleksitas relatif untuk *assembly*

$H_{(h,i)}$  = Entropi untuk *handling* dan *insertion*

$D_{R(f)}$	= Rasio keragaman untuk <i>fastening</i>
$H_{(f)}$	= Entropi untuk <i>fastening</i> .

## 2.7. Kemampuan Proses Manufaktur dari Material

Pembuatan bagian tertentu dari sebuah produk memerlukan pemilihan proses manufaktur yang tepat dan didasarkan pada pencocokan atribut yang diperlukan dari bagian dan berbagai kemampuan proses. Setelah fungsi keseluruhan bagian ditentukan, dapat dirumuskan daftar fitur dengan geometris yang penting, sifat material, dan atribut lain yang diperlukan. Ini merupakan daftar yang harus dipenuhi oleh sifat material dan kemampuan material untuk diproses. Atribut pada daftar tersebut terkait dengan fungsi akhir dari bagian dan ditentukan oleh kondisi geometrik. Kombinasi banyak proses digunakan dan diperlukan karena proses tunggal tidak dapat memberikan gambaran secara umum tentang semua atribut selama diproses.

Salah satu tujuan dari *DFMA* yakni analisis untuk penyederhanaan struktur produk dan konsolidasi bagian, terbukti bahwa langkah ini secara umum paling ekonomis untuk penggunaan dan kemampuan dari proses manufaktur di tahap awal dalam rangka memberikan informasi yang diperlukan oleh atribut dari setiap bagian komponen. Penyederhanaan masalah seleksi secara keseluruhan dapat dilakukan dengan pertimbangan sebagai berikut:

1. Banyak kombinasi dari proses dan bahan yang tidak mungkin. Gambar 2.11 menunjukkan matriks keterkaitan antara kompatibilitas untuk berbagai proses yang dipilih dengan jenis-jenis material yang digunakan.
2. Banyak kombinasi proses yang tidak mungkin karena bukan merupakan bagian yang sesuai dari atribut yang ada dan juga tidak ada dalam urutan pemrosesan.
3. Beberapa proses hanya mempengaruhi satu atribut dari bagian tersebut, terutama pada bagian permukaan dan proses perlakuan panas.
4. Urutan proses memiliki tatanan secara alam dari susunan bentuk, dan diikuti oleh fitur, material serta perangkat tambahan.

Proses manufaktur juga dapat dikategorikan menurut : proses primer, proses sekunder, proses tersier. Proses primer atau utama yang digunakan untuk memproduksi bahan baku. Proses sekunder dapat menghasilkan bentuk utama dari suatu bagian, bentuk fitur pada bagian, atau memperbaiki fitur pada bagian. Proses ini muncul pada bagian awal dalam urutan proses. Proses tersier tidak mempengaruhi geometri bagian dan selalu muncul setelah proses primer dan sekunder.

	Cast Iron	Carbon Steel	Alloy Steel	Stainless Steel	Aluminum and Alloys	Copper and Alloys	Zinc and Alloys	Magnesium and Alloys	Titanium and Alloys	Nickel and Alloys	Refractory Metals	Thermoplastics	Thermosets	
<b>Solidification Processes</b>														
Sand Casting														
Investment Casting														
Die Casting														
Injection Molding														
Structural Foam Molding														
Blow Molding(ext.)														
Blow Molding(Inj.)														
Rotational Molding														
<b>Bulk Deformation Processes</b>														
Impact Extrusion														
Cold Heading														
Closed Die Forging														
Powder Metal Processing														
Hot Extrusion														
Rotary Swaging														
<b>Material Removal Processes</b>														
Machining (from stock)														
ECM														
EDM														
<b>Profiling</b>														
Wire EDM														
<b>Sheet Forming Processes</b>														
Sheet Metal(stamp/bend)														
Thermoforming														
Metal Spinning														

Gambar 2.11. Kompatibilitas antara proses manufaktur dan material  
(sumber : Boothroyd)

### III. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Obyek Penelitian

Dalam penelitian ini yang menjadi obyek untuk diteliti dan dikaji adalah proses *assembly* komponen otomotif pada bagian *engine*, dan kemudian menganalisa pengaruh material terhadap kompleksitas proses *assembly*.

#### 3.2. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

##### 1. Study Pustaka

Mempelajari teori-teori yang berhubungan dengan pokok permasalahan melalui buku, jurnal, makalah dan literatur lainnya.

##### 2. Observasi

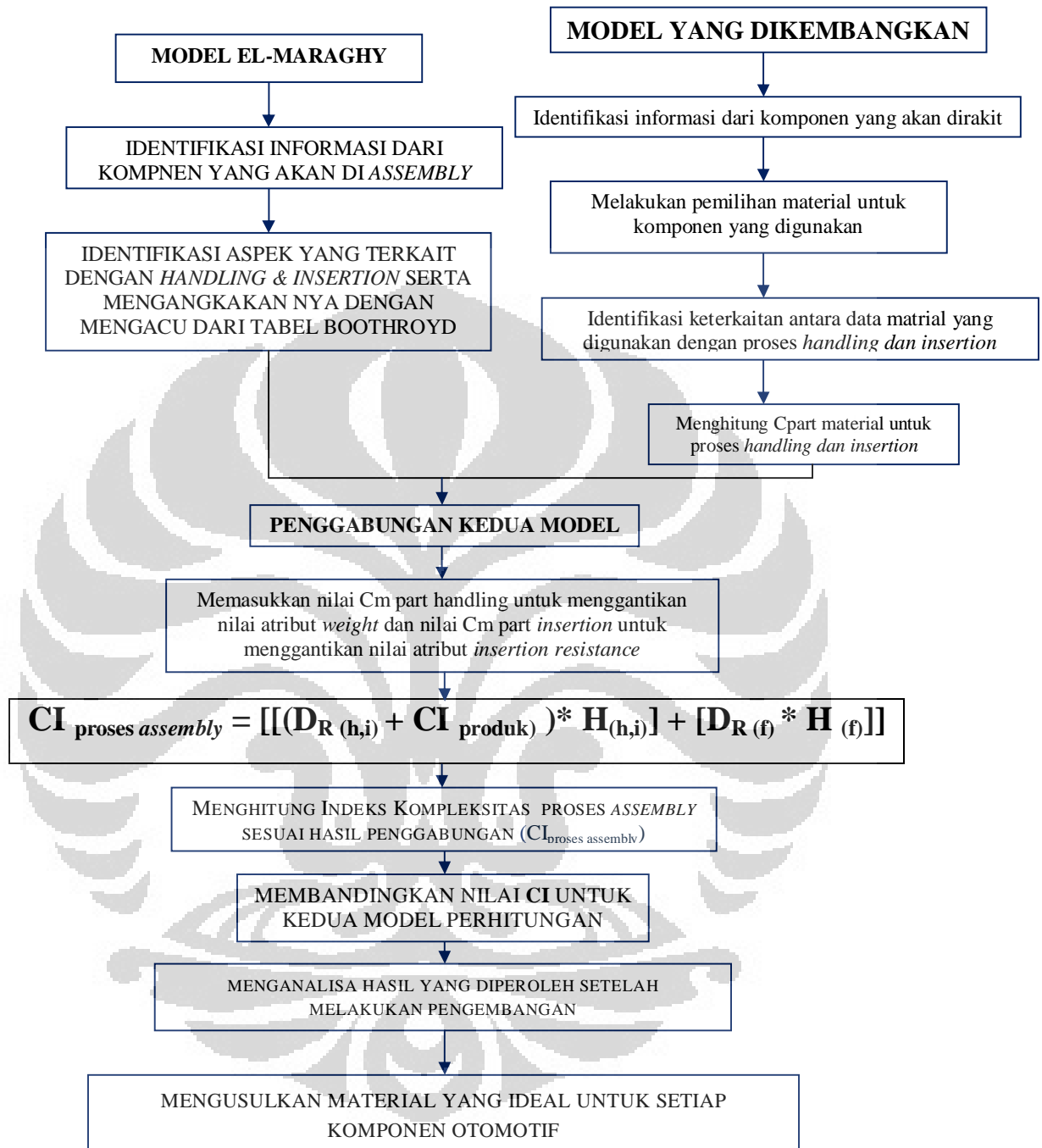
Melakukan pengamatan secara langsung terhadap proses *assembly* dan mengidentifikasi kendala-kendala yang sering terjadi pada proses *assembly*.

##### 3. Wawancara

Melakukan wawancara dengan pihak-pihak yang dianggap perlu dan terkait langsung dalam proses *assembly* dan proses pendukungnya .

#### 3.3. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1. *flow chart* metodologi penelitian

### A. Model El-Maraghy

Dalam model El-Maraghy langkah-langkah yang dilakukan adalah :

1. Mengidentifikasi informasi dari komponen yang akan di *assembly*. Pada tahap ini hasil identifikasi akan menghasilkan ; *part name*, jumlah total informasi (N), jumlah informasi yang unik (n). yang nantinya nilai N dan n akan digunakan untuk menghitung rasio keragaman ( $D_R$ )
2. Mengidentifikasi aspek yang terkait dengan proses *handling* dan *proses insertion* serta mengungkapkannya. Pada tahapan ini identifikasi aspek-aspek yang terkait dengan kedua proses tersebut mengacu dari *DFMA Boothroyd* [lihat lampiran 1 dan lampiran 2], sehingga aspek *handling* yang terkait dengan *DFMA* adalah ; *symetry, size, thickness, weight, grasping and manipulation, assistance, nesting and tangling, optical magnification*. Dan aspek *insertion* yang terkait adalah ; *holding down, insertion resistance, alignment, mechanical fastening processes, non-mechanical fastening processes, insertion direction, non fastening processes*. Selanjutnya aspek-aspek tersebut diangkakan dengan cara membuat rata-rata dari tabel boothroyd dan mengambil nilai rata-rata tertinggi untuk masing-masing aspek [lihat lampiran 3].

### B. Model yang dikembangkan

Untuk model yang dikembangkan, metode yang digunakan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi informasi dari komponen yang akan di *assembly*. Pada tahap ini hasil identifikasi akan menghasilkan ; *part name*, jumlah total informasi (N), jumlah informasi yang unik (n). yang nantinya nilai N dan n akan digunakan untuk menghitung rasio keragaman ( $D_R$ )
2. Melakukan proses pemilihan material terhadap komponen yang di *assembly*, sehingga akan menghasilkan kandidat material atau material-material mana saja yang dapat digunakan untuk masing-masing komponen, serta data dari material-meterial yang terpilih nantinya akan digunakan untuk tahapan berikutnya, proses pemelihan material ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode Boothroyd maupun metode Ashby

3. Mengidentifikasi keterkaitan data material dengan proses *handling* dan *insertion*, serta mengelompokkan data material yang termasuk dalam *handling* (*density, fracture toughness, modulus young*). Dan yang termasuk dalam *insertion* (*elastisitas, strength, stiffness*, keuletan). Kemudian aspek-aspek yang sudah teridentifikasi itu diangkakan dengan metode penggunaan angka real dari *database* material untuk masing-masing aspek.
4. Menghitung koefisien kompleksitas relatif material untuk proses *handling* dan *insertion* dengan menggunakan rumus dasar

$$C_{\text{part}} = \frac{C_h \sum_i^J C_{h,i} + C_i \sum_i^K C_{i,i}}{\sum_i^J C_{h,i} + \sum_i^K C_{i,i}}$$

### C. Penggabungan kedua model perhitungan

Penggabungan kedua model perhitungan dilakukan dengan tahapan:

1. Setelah masing-masing model mendapatkan hasil akhir sesuai prosedur yang telah dibuat, maka kedua model itu akan digabungkan. Adapun penggabungan ini bertujuan untuk lebih menajamkan atau mengakuratkan hasil yang sudah diperoleh terutama untuk nilai dari atribut *weight* (*handling*) dan *insertion resistance* (*insertion*). Setelah memasukan unsur material kedalam atribut perakitan maka kompleksitas proses perakitan dapat dihitung dengan :

$$CI_{\text{process assembly}} = \left[ \frac{N_p}{N_p} + CI_{\text{produk}} \right] [\text{Log}_2(N_p + 1)] + \left[ \frac{N_e}{N_e} \right] [\text{Log}_2(N_e + 1)]$$

2. Setelah digabungkan dan dilakukan perhitungan, selanjutnya hasil perhitungan gabungan dari kedua model dibandingkan dengan hasil perhitungan dari Model-El Maraghy
3. Membuat grafik hubungan antara kompleksitas perakitan dengan karakter material yang terkait.
4. Membuat analisa dan menyimpulkan sejauh mana dan seberapa besar pengaruh material terhadap kompleksitas proses *assembly* serta mengusulkan material yang ekonomis untuk sebuah komponen ataupun produk.



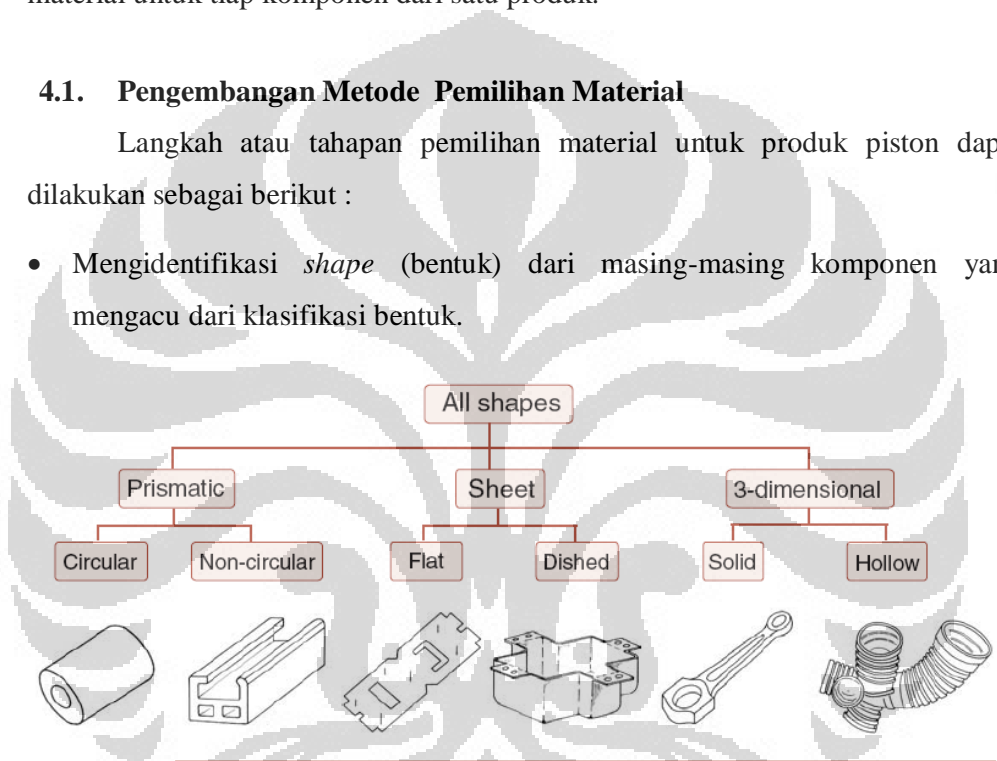
**BAB IV**  
**PENGEMBANGAN METODE**

Penggunaan metode pemilihan material dalam menentukan indeks kompleksitas proses *assembly* merupakan pengembangan yang dilakukan dalam penelitian ini. Dengan melakukan pemilihan material akan diperoleh kandidat material untuk tiap komponen dari satu produk.

**4.1. Pengembangan Metode Pemilihan Material**

Langkah atau tahapan pemilihan material untuk produk piston dapat dilakukan sebagai berikut :

- Mengidentifikasi *shape* (bentuk) dari masing-masing komponen yang mengacu dari klasifikasi bentuk.









Gambar 4.1. Klasifikasi bentuk (sumber: Ashby)

Sehingga diperoleh bentuk untuk masing-masing komponen dari produk piston adalah :

Tabel 4.1. Bentuk dari komponen pada produk piston

<b>Nama komponen</b>	<b>Gambar komponen</b>	<b>Bentuk</b>
<i>Compression ring</i>		<i>Circular prismatic</i>
<i>Oil ring</i>		<i>Circular prismatic</i>

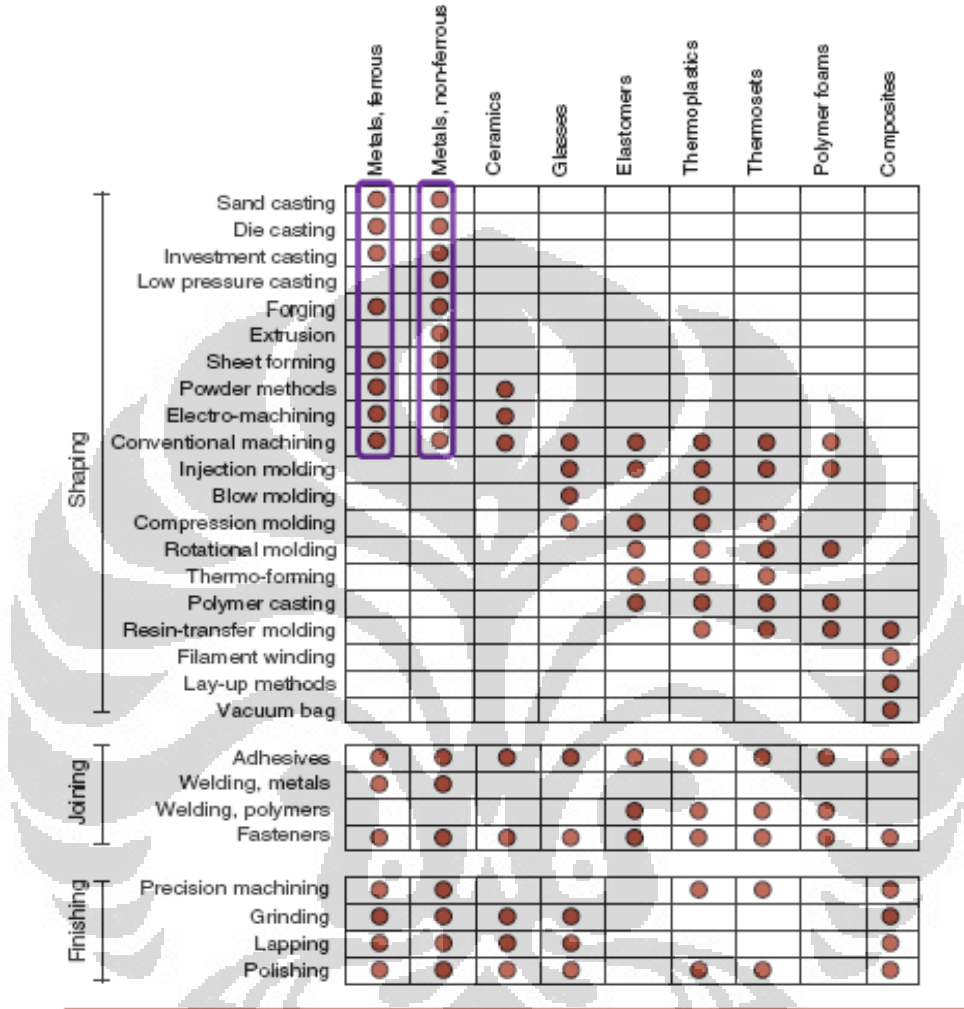
<i>Piston</i>		<i>Circular prismatic</i>
<i>Piston pin</i>		<i>Circular prismatic</i>
<i>Snap ring</i>		<i>Circular prismatic</i>
<i>Connection rod shaft</i>		<i>Solid 3-dimensional</i>
<i>Connection rod cap</i>		<i>Solid 3-dimensional</i>
<i>Bearing</i>		<i>Circular prismatic</i>

- Mengidentifikasi keterkaitan antara bentuk dan proses yang mengacu dari matriks proses – bentuk.

	Circular prismatic	Non-circular prismatic	Flat sheet	Dished sheet	3-D solid	3-D hollow
Metal shaping	Sand casting	•	•		•	•
	Die casting	•	•		•	•
	Investment casting	•	•		•	•
	Low pressure casting	•	•		•	•
	Forging	•	•		•	•
	Extrusion	•	•		•	•
	Sheet forming	•	•	•	•	
	Powder methods	•	•		•	•
	Electro-machining	•	•	•		•
	Conventional machining	•	•	•		•
Ceramic shaping	Injection molding	•			•	•
	Blow molding			•		•
	Compression molding			•	•	
	Rotational molding			•		•
Polymer shaping	Thermo-forming			•		•
	Polymer casting	•	•		•	•
	Resin-transfer molding	•	•	•	•	•
Composite shaping	Filament winding	•	•	•	•	•
	Lay-up methods			•	•	•
	Vacuum bag			•	•	•

Gambar 4.2. Matriks keterkaitan antara bentuk dan proses (sumber: Ashby)

- Mengidentifikasi keterkaitan antara proses dan material yang mengacu dari matriks proses – material.



Gambar 4.3. Matriks keterkaitan antara proses dan material (sumber: Ashby)

- Mengidentifikasi keterkaitan antara material dan komponen secara terperinci dari kelompok *metal ferrous* dan *metal non-ferrous*, yang mengacu pada *typical uses* semua material.

Tabel 4.2. Matriks keterkaitan antara Material dengan komponen

<b>Group of materials</b>	<b>Types of materials</b>	<b>Description</b>	<b>Typical Uses</b>
<b>Metal Ferrous</b>	<i>Cast iron</i>	<i>Ductile or malleable cast irons are used for heavily loaded parts such as gears and automotive suspension components.</i>	<i>Brake discs and drums; bearings; camshafts; cylinder liners; piston rings; machine tool structural parts; engine blocks, gears, crankshafts; heavy-duty gear cases; pipe joints; pump casings; components in rock crushers.</i>
	<i>High carbon steel</i>	<i>High carbon steel, when quenched and tempered, has very high hardness, wear resistance and springiness.</i>	<i>Cutting tools; high performance bearings, cranks and shafts, springs.</i>
	<i>Low alloy steel</i>	<i>Low alloy chrome-molybdenum and chrome-vanadium steels are used for high quality tools, bike frames and automobile engine and transmission components.</i>	<i>Springs, tools, ball bearings, rollers; crankshafts, gears, connecting rods.</i>
	<i>Low carbon steel</i>	<i>Low carbon steel is cheap, ductile, tough and versatile. Its uses are wide -- from paperclips to steel-framed buildings, some 100 stories high.</i>	<i>Low carbon steels are used so widely that no list would be complete. Reinforcement of concrete, steel sections for construction, sheet for roofing, car body panels, cans and pressed sheet products give an idea of the scope.</i>
	<i>Medium carbon steel</i>	<i>Medium carbon steel is the material of cheap tools. Low alloy steels are much superior and only a little more expensive -- quality tools are low alloy.</i>	<i>General construction; general mechanical engineering; automotive; tools; axles; gears; bearings; cranks; shafts; gears; cams.</i>
	<i>Stainless steel</i>	<i>On the left: Siemens toaster in brushed austenitic stainless steel (by Porsche Design). On the right, scissors in ferritic stainless steel; it is magnetic, austenitic stainless is not.</i>	<i>Railway cars, trucks, trailers, food-processing equipment, sinks, stoves, cooking utensils, cutlery, flatware, architectural metalwork, laundry equipment, chemical-processing equipment, jet-engine parts, surgical tools, furnace and boiler components, oil-burner parts, petroleum-processing equipment, dairy equipment, heat-treating equipment, automotive trim. Structural uses in corrosive environments, e.g. nuclear plants, ships, offshore oil installations, underwater cables</i>
<b>Metal non-ferrous</b>	<i>Alluminium alloys</i>	<i>Aluminum can formed both by casting and by deformation.</i>	<i>Aerospace engineering; automotive engineering - pistons, clutch housings, exhaust manifolds; die cast chassis for household and electronic products; siding for buildings; foil for containers and packaging; beverage cans; electrical and thermal conductors.</i>

<i>Metal non-ferrous</i>	<i>Cooper alloys</i>	<i>Copper and brass are exceptionally ductile and able to be worked to complex shapes.</i>	<i>Electrical wiring, cables, bus bars, high strength, high conductivity wires and sections, overheads lines, contact wires, resistance-welding electrodes, terminals, high conductivity items for use at raised temperatures, heat exchangers, coinage, pans, kettles and boilers, plates for etching and engraving, roofing and architecture, cast sculptures, pumps, valves, marine propellers.</i>
	<i>Lead alloys</i>	<i>This sculpture by Oronzio Maldarelli is cast in lead. The durability and attractive patina of lead is one reason that sculptors and architects use it.</i>	<i>Roofs, wall cladding, pipe work, window seals, and flooring in buildings; sculpture and table wear as pewter; solder for electrical circuits and for mechanical joining, bearings, printing type, ammunition, pigments, X-ray shielding, corrosion resistant material in the chemical industry and electrodes for lead acid batteries.</i>
	<i>Magnesium alloys</i>	<i>This monocoque frame of precision-welded from pressed sheet is made both in aluminum alloy and magnesium alloy. The magnesium frame is 30% lighter than the aluminum one.</i>	<i>Aerospace; automotive; sports goods such as bicycles; nuclear fuel cans; vibration damping and shielding of machine tools; engine case castings; crank cases; transmission housings; automotive wheels; ladders; housings for electronic equipment, particularly mobile phone and portable computer chassis; camera bodies; office equipment; marine hardware and lawnmowers.</i>
	<i>Nickel alloys</i>	<i>Nickel used for currency, and is the principal ingredient of superalloys used for high-temperature turbines and chemical engineering equipment (image courtesy of Kawasaki Turbines). Both applications require corrosion resistance, the one at room temperature, the other at up to 1200 C.</i>	<i>As an alloying element in stainless steels, blades, disks, and combustion chambers in turbines and jet engines, rocket engines, bi-metallic strips, thermocouples, springs, food equipment, heating wires, electroplating for corrosion protection, coinage.</i>
	<i>Titanium alloys</i>	<i>The strength of titanium is exploited in eyeglass frames.</i>	<i>Aircraft turbine blades; general aerospace applications; chemical engineering; heat exchangers; bioengineering; medical; missile fuel tanks; heat exchangers, compressors, valve bodies, surgical implants, marine hardware, paper-pulp equipment, casings for mobile phones and portable computers.</i>
	<i>Tungsten alloys</i>	<i>The filament of an incandescent lamp is pure tungsten; photoflood bulbs operate at temperatures as high as 2200 C. The electrodes of the spark plug, too, are tungsten; they have to</i>	<i>Applications are of four types.1. Those using the high-temperature capability of tungsten: spark-plug electrodes, lamp filaments, furnace windings and electrodes for TIG welding.2. Those using the high density: balance</i>

<i>Metal non-ferrous</i>		<i>survive in the combustion chamber and tolerate a spark discharge 100 times per second.</i>	<i>weights; anti-vibration tooling; amour-piercing penetrators and radiation shielding; and X and gamma-ray shielding<sup>3</sup>. Those using the high strength: reinforcement in composites, surface coatings for abrasion resistance<sup>4</sup>. Those using its ability to harden steel: tool steels and armor.</i>
	<i>Zinc alloys</i>	<i>Zinc die-castings can take up very complex shapes, have excellent detail and surface finish, and are relatively cheap.</i>	<i>Die castings; automotive parts and tools; gears; household goods; office equipment; building hardware; padlocks; toys; business machines; sound reproduction equipment; hydraulic valves; pneumatic valves; soldering; roofing, gutters, flashlight reflectors, fruit jar caps, radio shielding, gaskets, photoengraving plates, handles, gears, automotive components, kitchen counter-tops, protective plating.</i>

Sumber : Ces Edu Pack

- Dari hasil identifikasi material untuk setiap komponen, maka material yang dapat digunakan oleh setiap komponen dari produk piston adalah sebagai berikut :

Tabel 4.3. Jenis material yang dapat digunakan masing-masing komponen untuk produk piston (kandidat material dari produk piston)

<b>Part name</b>	<b>Kandidat material</b>							
	<i>Cast iron</i>	<i>high carbon steel</i>	<i>Low alloy steel</i>	<i>Low carbon steel</i>	<i>medium carbon steel</i>	<i>Stainless steel</i>	<i>Aluminium alloy</i>	<i>Titanium alloy</i>
<i>Compression ring</i>								
<i>Oil ring</i>								
<i>Piston</i>								
<i>Piston pin</i>								
<i>Snap ring</i>								
<i>Connection rod shaft</i>								
<i>Connection rod cap</i>								
<i>Bearing</i>								

Sumber : CES Edu Pack 2005

Disamping pemilihan material untuk masing-masing komponen dari produk piston, tahapan pemilihan proses manufaktur yang sesuai untuk material dari



setiap komponen merupakan tahapan yang sama penting nya. Dengan pertimbangan bahwa sebelum dirakit, komponen-komponen tersebut akan diproses terlebih dahulu guna mendapatkan bentuk dan geometri yang dijadikan sebagai referensi untuk proses perakitan (*handling dan insertion*). Pada gambar 4.4 dapat dilihat proses manufaktur yang memungkinkan untuk semua kandidat material dari komponen-komponen pada produk piston.

	Cast Iron	Carbon Steel	Alloy Steel	Stainless Steel	Aluminum and Alloys	Copper and Alloys	Zinc and Alloys	Magnesium and Alloys	Titanium and Alloys	Nickel and Alloys	Refractory Metals	Thermoplastics	Thermosets
<b>Solidification Processes</b>													
Sand Casting	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Investment Casting	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Die Casting	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Injection Molding	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Structural Foam Molding	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Blow Molding(ext.)	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Blow Molding(Inj.)	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Rotational Molding	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
<b>Bulk Deformation Processes</b>													
Impact Extrusion	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Cold Heading	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Closed Die Forging	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Powder Metal Processing	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Hot Extrusion	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Rotary Swaging	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
<b>Material Removal Processes</b>													
Machining (from stock)	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
ECM	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
EDM	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
<b>Profiling</b>													
Wire EDM	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
<b>Sheet Forming Processes</b>													
Sheet Metal(stamp/bend)	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Thermoforming	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice
Metal Spinning	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice	Normal Practice

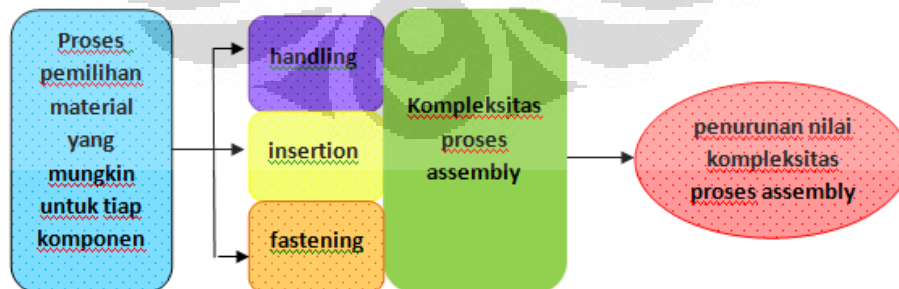
Legend:  
 □ Normal Practice  
 ■ Not Applicable  
 ◻ Less common

Gambar 4.4. Matriks keterkaitan antara proses manufaktur dan material yang digunakan untuk produk piston

- Setelah diperoleh kandidat material, maka langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi data material yang dalam hal ini adalah *mechanical properties* maupun *general properties* dari material bersangkutan yang terkait dengan proses *handling* dan proses *insertion*.

Selanjutnya karakter yang terkait dengan proses perakitan dijadikan sebagai aspek-aspek yang mempengaruhi proses *handling* (Ch,f) dan proses *insertion* (Ci,f). Besar atau nilai dari aspek-aspek yang terkait itu menggunakan data yang ada dari *mechanical properties*, hanya saja untuk melakukan perhitungan selanjutnya perlu dilakukan normalisasi karena semua data memiliki satuan yang berbeda-beda. Hasil normalisasi yang diperoleh digunakan untuk menghitung nilai rata-rata pembobotan faktor kompleksitas untuk bagian yang dirakit ( $C_{part}$ ).  $C_{part}$  sendiri merupakan fungsi dari  $CI_{produk}$  bersama dengan  $X_p$ .

Disamping itu juga kandidat material yang diperoleh digunakan untuk menghitung kompleksitas dari masing-masing komponen [lihat lampiran 4], yang mana bertujuan untuk membuat peringkat dari setiap kandidat material. Dari peringkat material yang dibuat berdasarkan nilai kompleksitas komponen untuk semua kandidat material, maka material yang menempati peringkat pertama diasumsikan memiliki nilai kompleksitas dan densitas yang kecil menjadi prioritas utama untuk digunakan pada komponen dari produk yang bersangkutan. Pada gambar 4.5. terlihat bagian yang mengalami pengembangan dalam penentuan indeks kompleksitas proses *assembly*, dengan memasukkan aspek material kedalam perhitungan.



**Gambar 4.5. Ilustrasi pengembangan yang dilakukan terkait dengan proses pemilihan material**

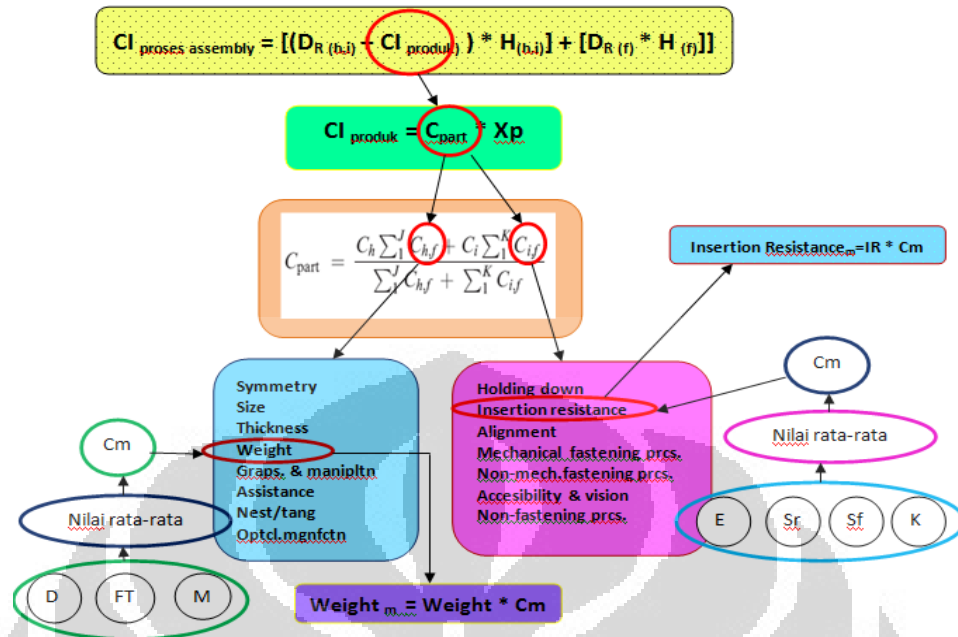


#### 4.2. Pengembangan Metode Penentuan Nilai Indeks Kompleksitas

Dalam penelitian sebelumnya model untuk penentuan indeks kompleksitas proses *assembly* telah dibuat. Atribut untuk perakitan (*handling dan insertion*) telah dibuat dengan sangat rinci dan telah mencerminkan konsep dasar *DFMA*. Hanya saja ada beberapa atribut yang dalam penentuan nilai atau bobot faktor kesulitan baik untuk *handling* maupun *insertion* perkiraannya masih sangat kasar. Dengan demikian maka salah satu tujuan dari penelitian ini yakni lebih menajamkan atau mengakuratkan nilai kesulitan dari atribut *weight (handling)* dan *insertion resistance (insertion)*.

Penajaman yang dilakukan yaitu menjadikan nilai material ( $C_m$ ) sebagai koefisien atau faktor pengali dari atribut yang terkait erat pada proses *handling* maupun proses *insertion*. Dalam hal ini nilai  $C_m$  tidak akan dijadikan sebagai faktor pengali dari nilai  $CI_{\text{proses assembly}}$ , karena dalam pengembangan ini penggunaan koefisien material dalam perhitungan bertujuan agar supaya nilai atau bobot kesulitan yang telah dibuat untuk atribut *weight* dan *insertion resistance* lebih spesifik lagi terkait dengan jenis-jenis material dari setiap komponen. Sehingga terlihat jelas pengaruh material yang merupakan salah satu unsur kompleksitas, jika dilakukan kajian secara spesifik.

Di samping mengakuratkan nilai atau bobot kompleksitas dari kedua atribut diatas, dalam penelitian ini juga akan melihat sejauh mana pengaruh dari material terhadap indeks kompleksitas proses *assembly*, jika nilai material digunakan sebagai koefisien atau faktor pengali dengan atribut *weight* dan *insertion resistance*. Setelah memasukkan unsur material dalam perhitungan maka akan ada perubahan pada nilai Indeks kompleksitas. Gambar 4.6 memperlihatkan ilustrasi penempatan nilai material kedalam perhitungan indeks kompleksitas proses *assembly*.



**Gambar 4.6.** Ilustrasi penggunaan karakter material guna lebih mengakuratkan nilai/bobot kesulitan dari atribut perakitan (handling dan insertion) yang terkait

*Keterangan gambar 4.2 :*

D	= Density	E	= Elastisitas
FT	= Fracture Toughness	Sr	= Strength
M	= Modulus Young	Sf	= Stiffness
Cm	= Koefisien material	K	= Keuletan

### 4.3. Prosedur dan Langkah-langkah Pengembangan Metode

#### 4.3.1. Langkah-langkah pengembangan metode pemilihan material

Dalam melakukan proses pemilihan material untuk menghitung kompleksitas perakitan dapat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- Melakukan pemilihan material untuk komponen yang akan dirakit, tahapan ini akan menghasilkan kandidat material untuk setiap komponen.
- Meranking material berdasarkan nilai densitas ,dengan asumsi bahwa material dengan nilai densitas yang kecil menempati peringkat pertama atau boleh dikatakan mudah dirakit.
- Menghitung  $CI_{part}$  dari semua kandidat material,yang bertujuan untuk memperjelas langkah kedua
- Membuat daftar peringkat setiap material untuk masing-masing komponen.

#### 4.3.2. Langkah-langkah pengembangan metode penentuan Indeks Kompleksitas

Setelah melakukan prosedur pemilihan material selanjutnya dalam menghitung indeks kompleksitas proses *assembly* juga terjadi pengembangan. Adapun prosedur atau langkah – langkah menghitung indeks kompleksitas proses *assembly* adalah sebagai berikut :

- Mengidentifikasi komponen yang akan dirakit terutama menyangkut jumlah komponen (N) dan keunikan dari komponen (n)
- Mengaitkan semua komponen dengan kandidat material yang diperoleh pada proses pemilihan material
- Menghitung  $CI_{\text{produk}}$  dengan menggunakan nilai  $C_{\text{part}}$  yang atribut *weight (handling)* dan *Insertion resistance (insertion)* sudah dikalikan dengan nilai material ( $C_m$ ). Penghitungan  $CI_{\text{produk}}$  dilakukan dengan menggunakan tiga varian ; menggunakan material yang umum, menggunakan material yang menempati peringkat pertama hasil seleksi dan menggunakan material yang ideal atau ekonomis dari segi nilai kompleksitas
- Menghitung kompleksitas perakitan ( $C_{\text{proses assembly}}$ ) dengan menggunakan tiga varian seperti yang dilakukan pada penghitungan  $CI_{\text{produk}}$
- Menganalisa hasil perhitungan dari ketiga varian yang digunakan,serta menyimpulkan hasil dari masing-masing varian
- Mengusulkan material yang ideal atau ekonomis untuk tiap komponen dalam satu produk.

#### 4.4. Pemilihan Karakter Material yang Terkait dengan Proses Perakitan

Dalam melakukan perakitan ada faktor-faktor yang menyulitkan proses tersebut, baik proses *handling* maupun proses *insertion*. Jika menyinggung masalah pengaruh material ketika proses *handling* atau proses *insertion* dari suatu komponen, maka material juga merupakan salah satu faktor yang menyulitkan. Setiap material memiliki karakter yang berbeda-beda,dan juga setiap material memiliki banyak karakter yang mencerminkan sifat dan identitas dari material itu sendiri. Sehingga untuk mengaplikasikan pengaruh material pada proses perakitan tidak semua karakter dari material yang digunakan,hanya karakter yang terkait erat dengan proses tersebut yang dipilih atau digunakan

#### 4.4.1. Karakter Material yang Terkait dengan Proses *Handling*

Ketika komponen ditangani (*handling*) maka sifat atau karakter dari material yang menyulitkan adalah *density*, *fracture toughness*, dan *modulus young*. Pemilihan ketiga sifat tersebut didasari pada sifat yang sangat mendasar dari masing-masing karakter.

##### Density

*Density* (kepadatan) adalah suatu ukuran yang menyatakan berapa berat suatu benda untuk ukuran yang ditentukan, yaitu massa material setiap satuan volume. Massa material secara mudah dan tepat terukur pada suatu timbangan sensitif, tetapi volume lebih sukar untuk diukur. Suatu pendekatan nilai dapat diperoleh untuk bentuk yang teratur dan sederhana dari dimensi itu.



Gambar 4.7. Pengukuran *Density* (kepadatan)  
(sumber : Modul Analisa Pengukuran)

Density juga dapat dinyatakan dengan :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \longrightarrow \quad m = \rho \cdot V$$

Dimana :  $\rho$  = massa jenis ( $\text{Kg/m}^3$ )  
 $m$  = massa ( $\text{Kg}$ )  
 Volume = volume ( $\text{m}^3$ )

Sesuai defenisi yang ada maka dapat diasumsikan bahwa ketika kita menangani material dengan massa yang kecil akan lebih mudah jika dibandingkan dengan kita menangani material dengan massa yang lebih besar. Dengan kata lain bahwa

material dengan *density* yang besar lebih sulit dihandling dibandingkan dengan material dengan *density* yang kecil. Sehingga keterkaitan antara *density* dengan atribut *handling* dapat dilihat pada gambar 4.8.

Table 1. Assembly attributes for manual assembly.

Group	Attribute	Description	Average difficulty factor, $C_f$
Handling attributes	Symmetry ( $\alpha + \beta$ )	$\alpha + \beta < 360$	0.70
		$360 \leq \alpha + \beta < 540$	0.84
		$540 \leq \alpha + \beta < 720$	0.94
		$\alpha + \beta = 720$	1.00
	Size	$> 15$ mm	0.74
		$6$ mm $<$ size $\leq 15$ mm	0.81
	Thickness	$< 6$ mm	1
		$> 2$ mm	0.27
		$0.25$ mm $<$ size $\leq 2$ mm	0.5
	Weight	$< 0.25$ mm	1
$< 10$ lb (light)		0.5	
Grasping and manipulation	$> 10$ lb	1	
	Easy to grasp and manipulate	0.91	
Assistance	Not easy to grasp and manipulate	1	
	Using one hand	0.34	
	Using one hand with grasping aids	1	
Nesting and tangling	Using two hands	0.75	
	Using two hands with assistance	0.57	
Optical magnification	Parts do not severely nest or tangle and are not flexible	0.58	
	Parts severely nest or tangle or are flexible	1	
Insertion attributes	Not necessary	0.8	
	Necessary	1	
Holding down	Necessary	1	
	Not required	0.54	

Gambar 4.8. Keterkaitan antara *Density* dengan atribut *handling*

### Fracture Toughness

*Fracture toughness* adalah kemampuan atau ketangguhan material menahan pembebanan maksimum yang diberikan sampai mengalami retak. Dalam proses *handling*, *fracture toughness* yang dimaksudkan adalah lebih identik dengan kerapuhan, yang mana penilaian kerapuhan dari suatu material terkait dengan kekuatan tarik utama (*UTS*) yang merupakan ketahanan maksimum terhadap fraktur. Hal ini setara dengan beban maksimum yang dapat dibawa/diterima oleh satu inci persegi dari luas penampang saat beban diterapkan karena ketegangan sederhana dan dinyatakan dalam pound per inci persegi.

$$UTS = \frac{\text{maximum load}}{\text{area of original cross section}} = \frac{P_{max}}{A_0}$$

Diasumsikan bahwa material dengan nilai *UTS* yang besar adalah material yang rapuh, sehingga akan lebih sulit menangani material yang rapuh. Dengan demikian maka material dengan nilai *fracture toughness* yang besar adalah material yang rapuh, sementara material dengan nilai *fracture toughness* yang

kecil adalah material yang tidak rapuh (liat). Dengan kata lain semakin kecil nilai *fracture toughness*, maka semakin mudah material tersebut ditangani.

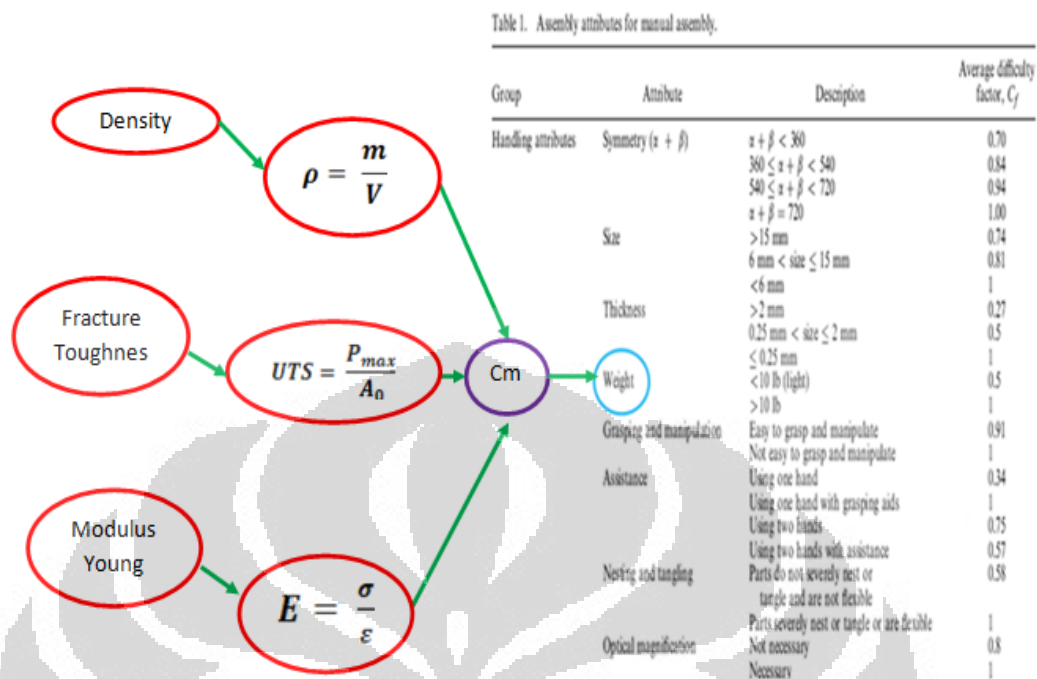
### Modulus Young

*Modulus Young* adalah ukuran besarnya hambatan suatu material terhadap elastisitas atau perubahan bentuk dibawah beban, dan dapat dinyatakan dengan :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad F = m \cdot a$$

Sehingga diasumsikan bahwa material dengan nilai *modulus young* yang besar akan sulit untuk ditangani, dibandingkan dengan material yang memiliki nilai *modulus young* yang kecil. Karena *modulus young* adalah fungsi dari tegangan dan regangan, dimana tegangan terkait dengan gaya yang merupakan fungsi dari massa dan percepatan.

Dengan demikian maka keterkaitan antara ketiga karakter dari material dengan atribut *handling* dapat dilihat pada gambar 4.9. Akan terlihat bahwa karakter material yang terkait selanjutnya akan dinyatakan sebagai faktor kesulitan proses *handling* ( $Ch, f$ ) dan merupakan salah satu atribut *handling*. Dalam penelitian sebelumnya, atribut yang mempertimbangkan unsur berat material sudah ada yakni atribut *weight*, hanya saja pembobotan atau nilai dari atribut *weight* perkiraannya masih sangat kasar. Sehingga nilai dari *density*, *fracture toughness* dan *modulus young* selanjutnya dinyatakan sebagai koefisien material ( $C_m$ ) untuk proses *handling* dan menjadi faktor pengali bagi atribut *weight*, guna lebih mengakuratkan dan lebih spesifik lagi untuk jenis material yang digunakan oleh masing-masing komponen yang akan ditangani.



Gambar 4.9. Keterkaitan antara karakter material yang mempengaruhi proses *handling* dengan atribut *handling* yang dikembangkan atau diakuratkan nilainya. (sumber Tabel 1 : El-Maraghy)

#### 4.4.2. Karakter Material yang Terkait dengan Proses *Insertion*

Dalam melakukan proses *insertion* sifat dari material yang menyulitkan proses tersebut adalah elastisitas, *strength*, *stiffness* dan keuletan dari material. Adapun alasan pemilihan keempat sifat tersebut sebagai faktor kesulitan dalam mengisert dilihat dari definisi dan parameter dasar dari masing-masing sifat material.

##### Elastisitas

Elastisitas dalam proses penyisipan (*insertion*) identik dengan nilai *elastic limit* dalam *mechanical properties*. Yang mana material dengan nilai *elastic limit* yang besar akan mudah disisipkan jika dibandingkan dengan material yang memiliki nilai *elastic limit* yang kecil, hal tersebut dapat dinyatakan dengan:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Dimana : E = Modulus Elastisitas

$\sigma$  = Tegangan

$\epsilon$  = Regangan

Dapat diasumsikan bahwa material dengan nilai elastis yang besar lebih mudah disisipkan jika dibandingkan dengan material yang memiliki nilai *elastic* yang kecil. Tentunya asumsi tersebut terkait dengan prosedur *assembly* yang dibuat oleh boothroyd dalam alokasi waktu untuk proses *insertion*. Gambar 4.10 mengilustrasikan keterkaitan antara elastisitas dengan tabel boothroyd serta atribut *insertion* untuk kompleksitas.

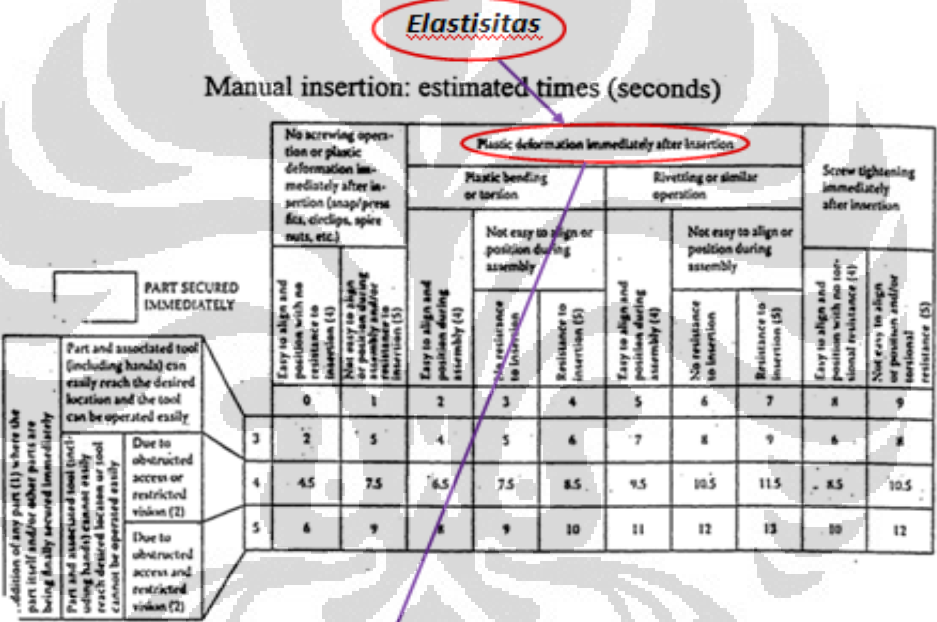


Table 1. Assembly attributes for manual assembly.

Insertion attributes	Holding down	Not required	0.54
	alignment	Required	1
		Easy to align or position	0.86
		Not easy to align or position	1
	Insertion resistance	No resistance	0.87
		Resistance to insertion	1
	Accessibility and vision	No restrictions	0.57
		Obstructed access or restricted vision	0.81
		Obstructed access and restricted vision	1
	Mechanical fastening processes	Bending	0.34
		Riveting	0.58
		Screw tightening	0.42
		Bulk plastic deformation	1
	Non-mechanical fastening processes	No additional material required	0.58
		Soldering processes	0.67
	Non-fastening processes	Chemical processes	1
		Manipulation of parts or sub-assemblies (fitting or adjusting of parts, ...)	0.75
		Other processes (liquid insertion, ...)	1

Gambar 4.10. keterkaitan elastisitas dengan *DFMA* dan kompleksitas (sumber : Boothroyd,ElMaraghy)



## BAB V

### HASIL DAN ANALISA

#### 5.1. Hasil perhitungan

Setelah dilakukan perhitungan kompleksitas untuk tiap komponen, maka pada tabel 5.1 dapat dilihat hasil peringkat material berdasarkan nilai *density* dan kompleksitas dari masing - masing komponen. Adapun nilai *density* serta nilai karakter lainnya dari material seperti ; *fracture toughness*, *modulus young*, elastisitas, *strength*, *stiffness* dan keuletan diambil dari *database* untuk masing-masing material (lihat lampiran 5 - lampiran 12) yang memungkinkan untuk setiap komponen dari produk piston. Namun dalam perhitungan nilai karakter material yang digunakan adalah nilai-nilai yang sudah dinormalisasi.

Tabel 5.1. Rekap nilai *density* dan hasil perhitungan kompleksitas serta peringkat material

material yang digunakan	komponen-komponen untuk produk piston																										
	compression ring			oil ring			piston			piston pin			snap ring			conection rod shaft			conection rod cap			bearing					
	K	D	P	K	D	P	K	D	P	K	D	P	K	D	P	K	D	P	K	D	P	K	D	P			
cast iron	0.10	50.35	2	0.05	50.35	3							50.35	0.10	2										50.35	0.10	1
high carbon steel	0.11	50.16	4	0.05	50.16	4				50.16	0.05	2	50.16	0.11	6	0.05	50.16	3	0.05	50.16	4	0.06	50.16	5	50.16	0.11	2
low alloy steel	0.12	50.16	5	0.06	50.16	5				50.16	0.06	3	50.16	0.12	7	0.06	50.16	4	0.06	50.16	5						
low carbon steel	0.10	50.16	3	0.05	50.16	4				50.16	0.06	3	50.16	0.10	5	0.06	50.16	4	0.06	50.15	6						
medium carbon steel	0.12	50.16	5	0.06	50.16	5				50.16	0.06	3	50.16	0.12	7	0.06	50.16	4	0.06	50.16	5						
stainles steel	0.11	50.80	2	0.06	50.80	2	50.88	0.06	2	50.80	0.06	2	50.80	0.11	2	0.06	50.80	3	0.06	50.80	3						
aluminium alloy	0.11	51.85	1	0.05	51.85	1	51.85	0.05	1	51.85	0.05	1	51.85	0.11	1	0.05	51.85	2	0.05	51.85	2						
titanium alloy																0.05	54.87	1	0.05	54.87	1						

Dari data yang ada pada tabel 5.1. selanjutnya dilakukan perhitungan indeks kompleksitas proses perakitan dengan menggunakan tiga varian .

Varian 1 : perhitungan indeks kompleksitas assembly dengan material yang umum digunakan

Hasil perhitungan dengan menggunakan varian 1(material yang umum digunakan) dapat dilihat pada tabel 5.2, tabel 5.3 dan tabel 5.4 .

Tabel 5.2. Matriks atribut kompleksitas untuk proses *handling*

Part name	jenis material	Number	HANDLING COMP. FACTOR								J	Ch,f	Ch	Ch * Ch,f
			SYM	SIZE	THCKNS	WEIGHT	GRPS & MANF	ASSTNC	NESTITANG	OPTCL MGNFC				
compression ring	medium carbon steel	2	0.7	0.74	0.27	0.28	1	0.34	0.58	0	7	3.91	0.56	2.18
oil ring	cast iron	1	0.7	0.74	0.27	0.26	1	0.34	0.58	0	7	3.885	0.56	2.16
piston	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	0.91	0.34	0.58	0	7	3.755	0.54	2.01
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	0.91	1	0.58	0	7	4.415	0.63	2.78
snap ring	high carbon steel	2	0.7	0.81	0.5	0.28	1	1	0.58	0	7	4.87	0.70	3.39
connection rod sha	low alloy steel	1	0.7	0.74	0.27	0.28	1	0.34	0.58	0	7	3.91	0.56	2.18
connection rod cap	low alloy steel	1	0.7	0.74	0.27	0.28	1	0.34	0.58	0	7	3.91	0.56	2.18
bearing	cast iron	2	0.7	0.74	0.27	0.26	0.91	1	0.58	0	7	4.455	0.64	2.84

Tabel 5.3. Matriks atribut kompleksitas untuk proses *insertion*

Part name	jenis material	Number	INSERT COMP. FACTOR							K	Ci,f	Ci	Ci * Ci,f
			HLD.DWN	INSRT RES	ALIGN	MCH FST	NON MCH FST	ACSBLTY & VIB	NON FSTN.PPR				
compression ring	medium carbon steel	2	0.54	0.73	1	0	0	0	0	3	2.27	0.76	1.72
oil ring	cast iron	1	0.54	0.62	1	0	0	0	0	3	2.16	0.72	1.56
piston	cast aluminium alloy	1	0.54	0.61	0.86	0	0	0	0	3	2.009	0.67	1.35
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.54	0.50	1	0	0	0	0	3	2.04	0.68	1.39
snap ring	high carbon steel	2	0.54	0.64	1	0	0	0	0	3	2.18	0.73	1.58
connection rod sha	low alloy steel	1	1	0.61	1	0	0	0	0	3	2.609	0.87	2.27
connection rod cap	low alloy steel	1	1	0.61	1	0.42	0	0	0	4	3.029	0.76	2.29
bearing	cast iron	2	1	0.62	1	0	0	0	0	3	2.62	0.87	2.29

Tabel 5.4. Hasil perhitungan CI produk

Part name	jenis material	Number	C <sub>part</sub>	hp	CI
compression ring	medium carbon steel	2	0.631	0.182	0.115
oil ring	cast iron	1	0.614	0.091	0.056
piston	cast aluminium alloy	1	0.583	0.091	0.053
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.646	0.091	0.059
snap ring	high carbon steel	2	0.705	0.182	0.128
connection rod sha	low alloy steel	1	0.683	0.091	0.062
connection rod cap	low alloy steel	1	0.645	0.091	0.059
bearing	cast iron	2	0.724	0.182	0.132
<b>CI produk</b>					<b>0.663</b>

dari hasil yang diperoleh maka dapat dihitung kompleksitas proses *assembly* untuk varian 1 adalah :

$$\begin{aligned}
 CI_{\text{proses assembly}} &= [((8/11) + 0,663) * \text{Log}_2(11+1)] + [(1/2) * \text{Log}_2(2+1)] \\
 &= 5,777
 \end{aligned}$$

Varian 2 : perhitungan indeks kompleksitas assembly dengan material yang menempati peringkat pertama dari hasil seleksi material

Hasil perhitungan dengan menggunakan varian 2 (material yang menempati peringkat pertama berdasarkan hasil seleksi material) dapat dilihat pada tabel 5.5, tabel 5.6 dan tabel 5.7 .

Tabel 5.5. Matriks atribut kompleksitas untuk proses *handling*

Part name	jenis material	Number	HANDLING COMP.FACTOR							J	Ch <sub>f</sub>	Ch	Ch * Ch <sub>f</sub>	
			SYM	SIZE	THICKNESS	WEIGHT	GRPS & MANF	ASSTNC	NEST/TANG					OPTCL MGNFC
compression ring	cast aluminium alloy	2	0.7	0.74	0.27	0.22	1	0.34	0.58	0	7	3.845	0.55	2.11
oil ring	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	1	0.34	0.58	0	7	3.845	0.55	2.11
piston	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	0.91	0.34	0.58	0	7	3.755	0.54	2.01
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	0.91	1	0.58	0	7	4.415	0.63	2.78
snap ring	cast aluminium alloy	2	0.7	0.81	0.5	0.22	1	1	0.58	0	7	4.805	0.69	3.30
connection rod shaft	titanium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.27	1	0.34	0.58	0	7	3.895	0.56	2.17
connection rod cap	titanium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.27	1	0.34	0.58	0	7	3.895	0.56	2.17
bearing	high carbon steel	2	0.7	0.74	0.27	0.28	0.91	1	0.58	0	7	4.48	0.64	2.87

Tabel 5.6. Matriks atribut kompleksitas untuk proses *insertion*

Part name	jenis material	Number	INSERT COMP.FACTOR							K	Ch <sub>f</sub>	Ch	Ch * Ch <sub>f</sub>
			HLD.DWN	INSRT REST	ALIGN	MCH FST	NON MCH FST	ACSBELTY & VIS	NON FSTN. PRO				
compression ring	cast aluminium alloy	2	0.54	0.70	1	0	0	0	0	3	2.24	0.75	1.67
oil ring	cast aluminium alloy	1	0.54	0.70	1	0	0	0	0	3	2.24	0.75	1.67
piston	cast aluminium alloy	1	0.54	0.61	0.602	0	0	0	0	3	1.751	0.58	1.02
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.54	0.70	1	0	0	0	0	3	2.24	0.75	1.67
snap ring	cast aluminium alloy	2	0.54	0.70	1	0	0	0	0	3	2.24	0.75	1.67
connection rod shaft	titanium alloy	1	1	0.62	1	0	0	0	0	3	2.6177	0.87	2.28
connection rod cap	titanium alloy	1	1	0.62	1	0.294	0	0	0	4	2.9117	0.73	2.12
bearing	high carbon steel	2	1	0.64	1	0	0	0	0	3	2.64	0.88	2.32

Tabel 5.7. Hasil perhitungan CI produk

Part name	jenis material	Number	C <sub>part</sub>	x <sub>p</sub>	CI
compression ring	cast aluminium alloy	2	0.622	0.182	0.1131
oil ring	cast aluminium alloy	1	0.622	0.091	0.0565
piston	cast aluminium alloy	1	0.551	0.091	0.0501
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.670	0.091	0.0609
snap ring	cast aluminium alloy	2	0.706	0.182	0.1283
connection rod shaft	titanium alloy	1	0.683	0.091	0.0621
connection rod cap	titanium alloy	1	0.630	0.091	0.0573
bearing	high carbon steel	2	0.729	0.182	0.1325
<b>CI produk</b>					<b>0.661</b>

dari hasil yang diperoleh maka dapat dihitung kompleksitas proses *assembly* untuk varian 2 adalah :

$$\begin{aligned}
 CI_{\text{proses assembly}} &= [((8/11) + 0,661) * \text{Log}_2(11+1)] + [(1/2) * \text{Log}_2(2+1)] \\
 &= \mathbf{5,769}
 \end{aligned}$$

*Varian 3: Perhitungan indeks kompleksitas assembly dengan material yang ideal (ada komponen tertentu yang material nya diganti karena material yang digunakan bukan diperuntukan bagi produksi massal)*

Hasil perhitungan dengan menggunakan varian 3 (material yang ideal) dapat dilihat pada tabel 5.8, tabel 5.9 dan tabel 5.10 .

Tabel 5.8. Matriks atribut kompleksitas untuk proses *handling*

Part name	jenis material	Number	HANDLING COMP. FACTOR								J	Ch <sub>f</sub>	Ch	Ch * Ch <sub>f</sub>
			SYM	SIZE	THCKNS	WEIGHT	GRPS & MANF	ASSTNC	NESTITANG	OPTCL MGNFC				
compression ring	cast aluminium alloy	2	0.7	0.74	0.27	0.22	1	0.34	0.58	0	7	3.845	0.55	2.11
oil ring	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	1	0.34	0.58	0	7	3.8465	0.55	2.11
piston	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	0.91	0.34	0.58	0	7	3.755	0.54	2.01
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	0.91	1	0.58	0	7	4.415	0.63	2.78
snap ring	cast aluminium alloy	2	0.7	0.81	0.5	0.22	1	1	0.58	0	7	4.805	0.69	3.30
connection rod shaft	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	1	0.34	0.58	0	7	3.845	0.55	2.11
connection rod cap	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.22	1	0.34	0.58	0	7	3.845	0.55	2.11
bearing	cast iron	2	0.7	0.74	0.27	0.26	0.91	1	0.58	0	7	4.455	0.64	2.84

Tabel 5.9. Matriks atribut kompleksitas untuk proses *insertion*

Part name	jenis material	Number	INSERT COMP.FACTOR							K	C <sub>i</sub> f	C <sub>i</sub>	C <sub>i</sub> * C <sub>i</sub> f
			HLD.DWN	INSRT RES	ALIGN	MCH FST	NON MCH FST	ACSBLTY&VIB	NON FSTN.PRO				
compresion ring	cast alumunium alloy	2	0.54	0.70	1	0	0	0	0	3	2.24	0.75	1.67
oil ring	cast alumunium alloy	1	0.54	0.70	1	0	0	0	0	3	2.24	0.75	1.67
piston	cast alumunium alloy	1	0.54	0.61	0.60	0	0	0	0	3	1.75	0.58	1.02
piston pin	cast alumunium alloy	1	0.54	0.70	1	0	0	0	0	3	2.24	0.75	1.67
snap ring	cast alumunium alloy	2	0.54	0.70	1	0	0	0	0	3	2.24	0.75	1.67
connection rod sha	cast alumunium alloy	1	1	0.61	1	0	0	0	0	3	2.61	0.87	2.27
cennection rod cap	cast alumunium alloy	1	1	0.61	1	0.29	0	0	0	4	2.90	0.73	2.11
bearing	cast iron	2	1	0.63	1	0	0	0	0	3	2.63	0.88	2.31

Tabel 5.10. Hasil perhitungan CI produk

Part name	jenis material	Number	C <sub>part</sub>	x <sub>p</sub>	CI
compresion ring	cast alumunium alloy	2	0.62	0.18	0.11
oil ring	cast alumunium alloy	1	0.62	0.03	0.06
piston	cast alumunium alloy	1	0.55	0.09	0.05
piston pin	cast alumunium alloy	1	0.67	0.09	0.06
snap ring	cast alumunium alloy	2	0.71	0.18	0.13
connection rod sha	cast alumunium alloy	1	0.68	0.09	0.06
cennection rod cap	cast alumunium alloy	1	0.63	0.09	0.06
bearing	cast iron	2	0.73	0.18	0.13
<b>CI produk</b>					<b>0.659</b>

dari hasil yang diperoleh maka dapat dihitung kompleksitas proses *assembly* untuk varian 3 adalah :

$$\begin{aligned}
 CI_{\text{proses assembly}} &= [((8/11) + 0,659) * \text{Log}_2(11+1)] + [(1/2) * \text{Log}_2(2+1)] \\
 &= \mathbf{5,764}
 \end{aligned}$$

#### Hasil perhitungan kompleksitas proses *assembly* dari penelitian sebelumnya

Untuk membandingkan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini dengan hasil yang diperoleh pada penelitian sebelumnya, maka pada tabel 5.11,tabel 5.12,tabel 5.13 dapat dilihat hasil perhitungan kompleksitas proses *assembly* pada penelitian sebelumnya yang mana belum memasukkan unsur atau nilai material ke dalam perhitungan.

Tabel 5.11. Matriks atribut kompleksitas untuk proses *handling*

Part name	jenis material	Number	HANDLING COMP. FACTOR								J	Ch/f	Ch	Ch * Ch/f
			SYM	SIZE	THICKNS	WEIGHT	GRPS & MANF	ASSTNC	NEST/TANG	OPTCL MG/NFC				
compression ring	medium carbon steel	2	0.7	0.74	0.27	0.50	1	0.34	0.58	0.8	8	4.93	0.62	3.04
oil ring	cast iron	1	0.7	0.74	0.27	0.50	1	0.34	0.58	0.8	8	4.93	0.62	3.04
piston	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.50	0.91	0.34	0.58	0.8	8	4.84	0.61	2.93
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.7	0.74	0.27	0.50	0.91	1	0.58	0.8	8	5.5	0.69	3.78
snap ring	high carbon steel	2	0.7	0.81	0.5	0.50	1	1	0.58	0.8	8	5.89	0.74	4.34
connection rod sha	low alloy steel	1	0.7	0.74	0.27	0.50	1	0.34	0.58	0.8	8	4.93	0.62	3.04
connection rod cap	low alloy steel	1	0.7	0.74	0.27	0.50	1	0.34	0.58	0.8	8	4.93	0.62	3.04
bearing	cast iron	2	0.7	0.74	0.27	0.50	0.91	1	0.58	0.8	8	5.5	0.69	3.78

Tabel 5.12. Matriks atribut kompleksitas untuk proses *insertion*

Part name	jenis material	Number	INSERT COMP. FACTOR							K	Ci/f	Ci	Ci * Ci/f
			HLD.DWN	INSRT REST	ALIGN	MCH FST	NON MCH FST	ACSBLTY & VIB	NON FSTN. PRO				
compression ring	cast aluminium alloy	2	0.54	1	1	0	0	0	0	3	2.54	0.85	2.15
oil ring	cast aluminium alloy	1	0.54	1	1	0	0	0	0	3	2.54	0.85	2.15
piston	cast aluminium alloy	1	0.54	0.67	0.86	0	0	0	0	3	2.07	0.69	1.43
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.54	1	1	0	0	0	0	3	2.54	0.85	2.15
snap ring	cast aluminium alloy	2	0.54	1	1	0	0	0	0	3	2.54	0.85	2.15
connection rod sha	titanium alloy	1	1	0.67	1	0	0	0	0	3	2.67	0.89	2.38
connection rod cap	titanium alloy	1	1	0.67	1	0.42	0	0	0	4	3.09	0.77	2.39
bearing	high carbon steel	2	1	1	1	0	0	0	0	3	3	1.00	3.00

Tabel 5.13. Hasil perhitungan Ciproduk

Part name	jenis material	Number	C <sub>part</sub>	x <sub>p</sub>	C <sub>i</sub>
compression ring	cast aluminium alloy	2	0.69	0.18	0.13
oil ring	cast aluminium alloy	1	0.69	0.09	0.06
piston	cast aluminium alloy	1	0.63	0.09	0.06
piston pin	cast aluminium alloy	1	0.74	0.09	0.07
snap ring	cast aluminium alloy	2	0.77	0.18	0.14
connection rod sha	titanium alloy	1	0.71	0.09	0.06
connection rod cap	titanium alloy	1	0.68	0.09	0.06
bearing	high carbon steel	2	0.80	0.18	0.15
<b>C<sub>i</sub> produk</b>					<b>0.73</b>

dari hasil yang diperoleh maka dapat di hitung kompleksitas proses *assembly* untuk penelitian yang sebelumnya adalah :

$$\begin{aligned}
 CI_{\text{proses assembly}} &= [((8/11) + 0,73) * \text{Log}_2 (11+1)] + [(1/2) * \text{Log}_2 (2+1)] \\
 &= 6,02
 \end{aligned}$$

## 5.2. Analisa keseluruhan hasil yang diperoleh

Dari hasil perhiungan ketiga varian yang ada maka terlihat dengan jelas bahwa hasil dari varian ketiga lebih kecil dari varian 1 dan varian 2. Hal tersebut dikarenakan pada varian 1 perhitungan yang dilakukan masih menggunakan material yang umum ditemui. Sementara untuk varian 2, disini telah menggunakan material berdasarkan hasil seleksi yang mana material yang menempati peringkat pertama yang digunakan dalam perhitungan.

Tetapi dalam perhitungan selanjutnya diperoleh bahwa hasil pada varian 3 bahkan lebih kecil dari hasil varian 2. Dimana penyebab nya adalah pada varian 2 ada komponen yang material nya menempati peringkat pertama ,namun kenyataannya material tersebut tidak diperuntukkan bagi produksi masal dengan kata lain material itu dapat digunakan jika ada pesanan khusus. Sehingga untuk komponen yang bersangkutan digunakanlah material yang menempati peringkat kedua dari hasil seleksi. Untuk lebih jelasnya perbedaan tersebut dapat dilihat pada tabel 5.14 yang memuat rekapitulasi perhitungan dari ketiga varian yang digunakan.

Tabel 5.14. Hasil rekapitulasi perhitungan CIproduk dan CIproses dari ketiga varian

	<i>Varian 1</i>	<i>Varian 2</i>	<i>Varian 3</i>
<i>CIproduk</i>	0.663	0.661	0.659
<i>CI proses assembly</i>	5.777	5.769	5.764

Dimana : Varian 1 = material yang umum digunakan atau ditemui di pasaran

Varian 2 = material yang menempati peringkat pertama

Varian 3 = material yang ideal atau ekonomis dan diperuntukkan bagi produksi masal

Perbedaan yang cukup besar juga terlihat pada pengembangan yang dilakukan dalam penelitian ini jika dibandingkan dengan hasil yang diperoleh pada penelitian sebelumnya. Hal tersebut dapat terlihat pada tabl 5.15. Dalam perhitungan akan dapat



dilihat secara rinci bahwa ketika material yang digunakan oleh masing-masing komponen berbeda, maka nilai kompleksitasnya akan berbeda juga.

Adapun penajaman terhadap nilai/bobot kesulitan dari atribut yang terkait dengan acuan bahwa nilai kesulitan yang sudah dibuat adalah; untuk *insertion resistance* yang “no-resistance” tingkat kesulitannya = 0.87. Sementara untuk *insertion resistance* yang “insertion to resistance” tingkat kesulitannya adalah 1. Akan terlihat bahwa pada tingkat kesulitan 0.87, angka tersebut ditentukan tanpa melihat jenis material dari komponen. Tetapi ketika jenis material dimasukkan kedalam perhitungan kompleksitas maka tingkatan 0,87 yang mencerminkan jenis-jenis material yang digunakan nilai /angkanya akan bervariasi pada batasan 0 – 0.87, bobot kesulitannya akan berbeda jika material dari tiap komponen berbeda. Sehingga kelompok “no-resistance” tingkatan kesulitannya akan berada atau menempati range 0 – 0.87. Permasalahan yang sama juga akan berlaku untuk kelompok “insertion to resistance”, yang mana kelompok ini tingkat kesulitannya akan menempati atau berada dirange 0.88 – 1.

Tabel 5.15. Perbandingan hasil yang diperoleh dari penelitian sebelumnya dengan pengembangan yang dilakukan

	<i>Penelitian Sebelumnya</i>	<i>Varian 1</i>	<i>Varian 2</i>	<i>Varian 3</i>
<i>CI produk</i>	0.73	0.663	0.661	0.659
<i>CI proses assembly</i>	6.02	5.777	5.769	5.764

Dimana : Varian 1 = material yang umum digunakan atau ditemui di pasaran

Varian 2 = material yang menempati peringkat pertama

Varian 3 = material yang ideal atau ekonomis dan diperuntukkan bagi produksi masal



## BAB VI

### PENUTUP

#### 6.1. Kesimpulan

Setelah melakukan perhitungan dan analisa terhadap hasil yang diperoleh, maka dapat disimpulkan bahwa ;

1. Dengan melakukan variasi material maka akan mempengaruhi nilai indeks kompleksitas atau tingkat kesulitan pada proses *assembly*.
2. Dengan informasi yang bersifat umum dari masing-masing material, maka dapat ditentukan kandidat material untuk setiap komponen ditahapan konseptual desain.
3. Dengan material yang berbeda dari setiap komponen dalam satu produk, akan mempengaruhi proses *handling* dan *insertion*.
4. Perlunya dilakukan kajian secara mendalam terhadap material-material yang akan digunakan untuk produksi masal.
5. Semakin kecil nilai kompleksitas untuk proses *assembly*, maka semakin kecil tingkat kesulitan untuk merakit setiap komoponen dalam satu produk sehingga proses *assembly* akan menjadi relatif singkat.

#### 6.2. Saran

Setelah menyimpulkan hasil penelitian dan analisa perhitungan yang telah dibuat, maka apabila ada pihak yang ingin melanjutkan penelitian ini disarankan : Proses pemilihan material bagi komponen yang akan diproduksi secara masal, haruslah dilakukan kajian secara mendalam terkait dengan nilai *density* dan indeks kompleksitas proses *assembly*. Dengan pertimbangan bahwa material yang dapat digunakan oleh komponen atau produk untuk produksi masal tidak harus memiliki nilai *density* yang terkecil dari kandidat material yang diperoleh.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Peraturan Presiden Republik Indonesia No.28, Tahun 2008, *Kebijakan Industri Nasional*. <http://depperin.go.id/Regulasi/2008/05/Perpres%20no%2028.pdf>, diakses pada tanggal 25 Januari 2011, Pukul 11:06 pm
2. 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,
3. ElMaraghy, W.H, & Urbanic, R. Jill (2006), *Modeling of Manufacturing Process Complexity*, British Library Cataloguing in Publication Data Advances in design, Springer,
4. ElMaraghy & S.N.Samy (2010), *A Model for Measuring Product Assembly Complexity*, Intelligent Manufacturing Systems (IMS) Centre, Faculty of Engineering University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada,
5. Michael F. Ashby (2005), *Material Selection in Mechanical Design*, Third edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, oxford
6. Boothroyth. (2001), *Product Design for manufacture and assembly*, Boothroyd Dewhurst Inc. and University of Rhode Island, USA,
7. Granata Material Inspiration , CES EDUPACK 2005 software.
8. Kalpakjian, Serope (1995). *Manufacturing Engineering and Technology*, 3rd Edition, Prentice Hall, USA

Lampiran 1 :

Manual handling: estimated times (seconds)

**Key:**  
 ONE HAND  
 ONE HAND with GRASPING AIDS  
 TWO HANDS for MANIPULATION  
 TWO HANDS or assistance required for LARGE SIZE

		Parts are easy to grasp and manipulate					Parts present handling difficulties (1)						
		Thickness >2 mm		Thickness ≤2 mm			Thickness >2 mm		Thickness ≤2 mm				
		Size >15 mm	6 mm ≤ size >15 mm	Size <6 mm	Size >6 mm	Size ≤6 mm	Size >15 mm	6 mm ≤ size ≤15 mm	Size <6 mm	Size >6 mm	Size ≤6 mm		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Parts can be grasped and manipulated by one hand without the aid of grasping tools	$(\alpha + \beta) < 360^\circ$	0	1.13	1.43	1.88	1.69	2.18	1.84	2.17	2.65	2.45	2.98	
	$360^\circ \leq (\alpha + \beta) < 540^\circ$	1	1.5	1.8	2.25	2.06	2.55	2.25	2.57	3.06	3	3.38	
	$540^\circ \leq (\alpha + \beta) < 720^\circ$	2	1.8	2.1	2.55	2.36	2.85	2.57	2.9	3.38	3.18	3.7	
	$(\alpha + \beta) = 720^\circ$	3	1.95	2.25	2.7	2.51	3	2.73	3.06	3.55	3.34	4	
Parts can be grasped and manipulated by one hand but only with the use of grasping tools	$\alpha \leq 180^\circ$	$0 \leq \beta \leq 180^\circ$	4	3.6	6.85	4.35	7.6	5.6	8.35	6.35	8.6	7	7
		$\beta = 360^\circ$	5	4	7.25	4.75	8	6	8.75	6.75	9	8	8
	$\alpha \leq 360^\circ$	$\alpha \leq \beta \leq 180^\circ$	6	4.8	8.05	5.55	8.8	6.8	9.55	7.55	9.8	8	9
		$\beta = 360^\circ$	7	5.1	8.35	5.85	9.1	7.1	9.55	7.85	10.1	9	10
			Parts need tweezers for grasping and manipulation				Parts require optical magnification for manipulation				Parts need standard tools other than tweezers	Parts need special tools for grasping and manipulation	
			Parts can be manipulated without optical magnification		Parts present handling difficulties (1)		Parts are easy to grasp and manipulate		Parts present handling difficulties (1)				
			Thickness >0.25 mm	Thickness ≤0.25 mm	Thickness >0.25 mm	Thickness ≤0.25 mm	Thickness >0.25 mm	Thickness ≤0.25 mm	Thickness >0.25 mm	Thickness ≤0.25 mm			
		0	1	2	3	4	5	6	7				
		Parts present no additional handling difficulties				Parts present additional handling difficulties (e.g. sticky, delicate, slippery, etc.) (1)							
		$\alpha \leq 180^\circ$		$\alpha = 360^\circ$			$\alpha \leq 180^\circ$		$\alpha = 360^\circ$				
		Size >15 mm	6 mm ≤ size ≤ 15 mm	Size <6 mm	Size >6 mm	Size ≤6 mm	Size >15 mm	6 mm ≤ size ≤ 15 mm	Size <6 mm	Size >6 mm	Size ≤6 mm		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Parts severely nest or tangle or are flexible but can be grasped and lifted by one hand (with the use of grasping tools if necessary) (2)		8	4.1	4.5	5.1	5.6	6.75	5	5.25	5.85	6.35	7	
Two hands, two persons or mechanical assistance required for grasping and transporting parts		Parts can be handled by one person without mechanical assistance											
		Parts do not severely nest or tangle and are not flexible											
		Part weight <10 lb					Parts are heavy (>10 lb)						
		Parts are easy to grasp and manipulate		Parts present other handling difficulties (1)			Parts are easy to grasp and manipulate		Parts present other handling difficulties (1)			Parts severely nest or tangle or are flexible (2)	Two persons or mechanical assistance required for parts manipulation
$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 360^\circ$	$\alpha \leq 180^\circ$	$\alpha = 360^\circ$				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
		9	2	3	2	3	3	4	4	5	7	9	

Lampiran 2 :

Manual insertion: estimated times (seconds)

**Key:**

PART ADDED but NOT SECURED

PART SECURED IMMEDIATELY

SEPARATE OPERATION

Assembly processes where all solid parts are in place

		Alter assembly no holding down required to maintain orientation and location (3)				Holding down required during subsequent processes to maintain orientation at location (3)			
		Easy to align and position during assembly (4)		Not easy to align or position during assembly		Easy to align and position during assembly (4)		Not easy to align or position during assembly	
		No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)	No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)	No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)	No resistance to insertion	Resistance to insertion (5)
		0	1	2	3	6	7	8	9
Addition of any part (1) where neither the part itself nor any other part is finally secured immediately	Part and associated tool (including hands) can easily reach the desired location	0	1.5	2.5	3.5	5.5	6.5	6.5	7.5
	Part and associated tool (including hands) cannot easily reach the desired location	1	4	5	6	8	9	9	10
	Due to obstructed access or restricted vision (2)	2	5.5	6.5	7.5	9.5	10.5	10.5	11.5
Addition of any part (1) where the part itself and/or other parts are being finally secured immediately	Part and associated tool (including hands) can easily reach the desired location and the tool can be operated easily	3	2	3	4	5	6	6	8
	Part and associated tool (including hands) cannot easily reach desired location or tool cannot be operated easily	4	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	8.5	10.5
	Due to obstructed access and restricted vision (2)	5	6	7	8	9	10	10	12
Assembly processes where all solid parts are in place	None or localized plastic deformation	9	4	5	12	7	12	9	12
	Bending or similar process								
	Riveting or similar processes								
Mechanical fastening processes (part(s) already in place but not secured immediately after insertion)	Screw tightening or other processes								
	Bulk plastic deformation (large proportion of part is plastically deformed during fastening)								
	No additional material required (e.g. resistance, friction welding etc)								
Non mechanical fastening processes (part(s) already in place but not secured immediately after insertion)	Metallurgical processes								
	Additional material required								
	Soldering processes								
Non fastening processes	Weld/braze processes								
	Chemical processes (e.g. adhesive bonding, etc.)								
	Manipulation of parts or sub-assembly (e.g. orienting, fitting or adjustment of parts), etc.)								
Other processes (e.g. liquid insertion, etc.)									

## Lampiran 3 :

Table 1. Assembly attributes for manual assembly.


Group	Attribute	Description	Average difficulty factor, $C_f$
Handling attributes	Symmetry ( $\alpha + \beta$ )	$\alpha + \beta < 360$	0.70
		$360 \leq \alpha + \beta < 540$	0.84
		$540 \leq \alpha + \beta < 720$	0.94
		$\alpha + \beta = 720$	1.00
	Size	$> 15$ mm	0.74
		$6$ mm $<$ size $\leq 15$ mm	0.81
		$< 6$ mm	1
	Thickness	$> 2$ mm	0.27
		$0.25$ mm $<$ size $\leq 2$ mm	0.5
	Weight	$\leq 0.25$ mm	1
		$< 10$ lb (light)	0.5
	Grasping and manipulation	$> 10$ lb	1
		Easy to grasp and manipulate	0.91
	Assistance	Not easy to grasp and manipulate	1
		Using one hand	0.34
		Using one hand with grasping aids	1
		Using two hands	0.75
	Nesting and tangling	Using two hands with assistance	0.57
		Parts do not severely nest or tangle and are not flexible	0.58
Optical magnification	Parts severely nest or tangle or are flexible	1	
	Not necessary	0.8	
Insertion attributes	Holding down	Necessary	1
		Not required	0.54
	alignment	Required	1
		Easy to align or position	0.86
	Insertion resistance	Not easy to align or position	1
		No resistance	0.87
	Accessibility and vision	Resistance to insertion	1
		No restrictions	0.57
		Obstructed access or restricted vision	0.81
	Mechanical fastening processes	Obstructed access and restricted vision	1
		Bending	0.34
		Riveting	0.58
Screw tightening		0.42	
Non-mechanical fastening processes	Bulk plastic deformation	1	
	No additional material required	0.58	
	Soldering processes	0.67	
Non-fastening processes	Chemical processes	1	
	Manipulation of parts or sub-assemblies (fitting or adjusting of parts, ...)	0.75	
	Other processes (liquid insertion, ...)	1	

## Lampiran 4:

Tabel. Rekap nilai density dan hasil perhitungan kompleksitas semua komponen piston dengan menggunakan semua kandidat material

material yang digunakan	komponen-komponen untuk produk piston																
	compression ring		oil ring		piston		piston pin		snap ring		connection rod shaft		connection rod cap		bearing		
	kompleksity	density	kompleksity	density	kompleksity	density	kompleksity	density	kompleksity	density	kompleksity	density	kompleksity	density	kompleksity	density	
cast iron	0.10	50.35	0.05	50.35					50.35	0.10							
high carbon steel	0.11	50.16	0.05	50.16			50.16	0.05	50.16	0.11			0.05	50.16	0.05	50.16	0.11
low alloy steel	0.12	50.16	0.06	50.16			50.16	0.06	50.16	0.12			0.06	50.16	0.06	50.16	
low carbon steel	0.10	50.16	0.05	50.16			50.16	0.06	50.16	0.10			0.06	50.16	0.06	50.15	
medium carbon steel	0.12	50.16	0.06	50.16			50.16	0.06	50.16	0.12			0.06	50.16	0.06	50.16	
stainles steel	0.11	50.80	0.06	50.80	50.88	0.06	50.80	0.06	50.80	0.11			0.06	50.80	0.06	50.80	
aluminium alloy	0.11	51.85	0.05	51.85	51.85	0.05	51.85	0.05	51.85	0.11			0.05	51.85	0.05	51.85	
titanium alloy													0.05	54.87	0.05	54.87	

## Lampiran 5 :

 Cast iron, ductile (nodular)
**Description****The Material**

The foundations of modern industrial society are set, so to speak, in cast iron: it is the material that made the industrial revolution possible. Today it holds a second honor: that of being the cheapest of all engineering metals. Cast iron contains at least 2% carbon -- most have 3 to 4% -- and from 1-3% silicon. The carbon makes the iron very fluid when molten, allowing it to be cast to intricate shapes. There are five classes of cast iron: gray, white, ductile (or nodular), malleable and alloy; details are given under Design Guidelines, below. The two that are most used are gray and ductile. This record is for ductile cast iron.

**Composition**

Fe/3.2-4.1%C/1.8-2.8%Si/<0.8%Mn/<0.1%P/<0.03%S

**General properties**

Density	440.1	-	452.6	lb/ft <sup>3</sup>
Price	0.171	-	0.342	USD/lb

**Mechanical properties**

Young's Modulus	23.93	-	26.11	10 <sup>6</sup> psi
Elastic Limit	36.26	-	98.63	ksi
Tensile Strength	59.47	-	120.4	ksi
Elongation	3	-	18	%
Hardness - Vickers	115	-	320	HV
Endurance Limit	26.11	-	47.86	ksi
Fracture Toughness	20.02	-	49.14	ksi.in <sup>1/2</sup>

**Thermal properties**

Thermal conductor or insulator?	Good conductor			
Thermal Conductivity	16.76	-	25.42	BTU.ft/h.ft <sup>2</sup> .F
Thermal Expansion	5.556	-	6.944	μstrain/°F
Specific Heat	0.1099	-	0.1182	BTU/lb.F
Melting Point	2066	-	2282	°F
Maximum Service Temperature	662	-	842	°F

**Electrical properties**

Electrical conductor or insulator?	Good conductor			
------------------------------------	----------------	--	--	--

**Optical properties**

Transparency	Opaque			
--------------	--------	--	--	--

**Eco properties**

Production Energy	1777	-	1972	kcal/lb
CO2 creation	0.97	-	1.07	kg/kg
Recycle	✓			

## Lampiran 6:



## High carbon steel

**Description****The Material**

High carbon steels (0.5-1.7% carbon) harden when quenched - a quality that gives great control over properties. High carbon steels achieve hardness sufficient for them to be used as cutting tools, chisels and cables, and "piano wire" - the metal strings of pianos and violins.

**Composition**

Fe/0.7 - 1.7%C

**General properties**

Density	486.9	-	493.2	lb/ft <sup>3</sup>
Price	0.2138	-	0.3848	USD/lb

**Mechanical properties**

Young's Modulus	29.01	-	31.18	10 <sup>6</sup> psi
Elastic Limit	58.02	-	167.5	ksi
Tensile Strength	79.77	-	237.9	ksi
Elongation	7	-	30	%
Hardness - Vickers	160	-	650	HV
Endurance Limit	*40.76	-	87.89	ksi
Fracture Toughness	24.57	-	83.72	ksi.in <sup>1/2</sup>

**Thermal properties**

Thermal conductor or insulator?	Good conductor			
Thermal Conductivity	27.16	-	30.62	BTU.ft/h.ft <sup>2</sup> .F
Thermal Expansion	6.111	-	7.5	μstrain/°F
Specific Heat	0.1051	-	0.1218	BTU/lb.F
Melting Point	2352	-	2692	°F
Maximum Service Temperature	*392	-	662	°F

**Electrical properties**

Electrical conductor or insulator?	Good conductor
------------------------------------	----------------

**Optical properties**

Transparency	Opaque
--------------	--------

**Eco properties**

Production Energy	2633	-	2914	kcal/lb
CO2 creation	2.06	-	2.28	kg/kg
Recycle	✓			



## Lampiran 7:



## Low alloy steel

**Description****The Material**

Pure iron is soft stuff. Add carbon and heat-treat it right, and you can get a material that is almost as hard and brittle as glass, or as ductile and tough as boiler plate. 'Heat treat' means heating the steel to about 800 C to dissolve the carbon, then quenching (rapid cooling, often by dropping into cold water) and tempering - reheating it to a lower temperature and holding it there. Quenching turns the steel into hard, brittle 'martensite'; tempering slowly restores the toughness and brings the hardness down. Control of tempering time and temperature gives control of properties. It's wonderful what 1% of carbon can do. But (the inevitable 'but') the cooling rate in that initial quench has to be fast - more than 200 C/second for plain carbon steels. There is no difficulty in transforming the surface of a component to martensite, but the interior cools more slowly because heat has to be conducted out. If the component is more than a few millimeters thick, there is a problem - the inside doesn't cool fast enough. The problem is overcome by alloying. Add a little manganese (Mn), nickel (Ni), molybdenum (Mo), or chromium (Cr), and the critical cooling rate comes down, allowing thick sections to be hardened and then tempered. Adding some vanadium, V, as well allows a dispersion of carbides giving strength while retaining toughness and ductility. Chrome-molybdenum steels such as AIS 4140 are used for aircraft tubing and other high strength parts. Chrome-vanadium steels are used for crank and propeller shafts and high quality tools. Steels alloyed for this purpose are called low alloy steels, and the property they have is called 'hardenability'.

**Composition**

Fe/<1.0 C/<2.5 Cr/<2.5 Ni/<2.5 Mo/<2.5 V


**General properties**

Density	486.9	-	493.2	lb/ft <sup>3</sup>
Price	0.2138	-	0.5558	USD/lb

**Mechanical properties**

Young's Modulus	29.73	-	31.47	10 <sup>6</sup> psi
Elastic Limit	58.02	-	217.6	ksi
Tensile Strength	79.77	-	255.3	ksi
Elongation	3	-	38	%
Hardness - Vickers	140	-	692.5	HV
Endurance Limit	* 35.97	-	101.5	ksi
Fracture Toughness	12.74	-	182	ksi.in <sup>1/2</sup>

## Lampiran 8:

 Low carbon steel
**Description****The Material**

Think of steel and you think of railroads, oilrigs, tankers, and skyscrapers. And what you are thinking of is not just steel, it is carbon steel. That is the metal that made them possible - nothing else is the same time so strong, so tough, so easily formed - and so cheap. Carbon steels are alloys of iron with carbon and, often a little manganese, nickel, and silicon. Low carbon or "mild" steels have the least carbon - less than 0.25%. They are relatively soft, easily rolled to plate, I-sections or rod (for reinforcing concrete) and are the cheapest of all structural metals - it is these that are used on a huge scale for reinforcement, for steel-framed buildings, ship plate and the like.

**Composition**

Fe/0.02 - 0.3C

**General properties**

Density	486.9	-	493.2	lb/ft <sup>3</sup>
Price	0.2138	-	0.3848	USD/lb

**Mechanical properties**

Young's Modulus	29.01	-	31.18	10 <sup>6</sup> psi
Elastic Limit	36.26	-	57.29	ksi
Tensile Strength	50.04	-	84.12	ksi
Elongation	26	-	47	%
Hardness - Vickers	107.5	-	172.5	HV
Endurance Limit	* 29.44	-	42.5	ksi
Fracture Toughness	* 37.31	-	74.62	ksi.in <sup>1/2</sup>

**Thermal properties**

Thermal conductor or insulator?	Good conductor			
Thermal Conductivity	28.31	-	31.2	BTU.ft/h.ft <sup>2</sup> .F
Thermal Expansion	6.389	-	7.222	μstrain/°F
Specific Heat	0.1099	-	0.1206	BTU/lb.F
Melting Point	2696	-	2779	°F
Maximum Service Temperature	* 392	-	662	°F

**Electrical properties**

Electrical conductor or insulator?	Good conductor
------------------------------------	----------------

**Optical properties**

Transparency	Opaque
--------------	--------

**Eco properties**

Production Energy	2427	-	2687	kcal/lb
CO2 creation	1.9	-	2.1	kg/kg
Recycle	✓			

## Lampiran 9:



## Medium carbon steel

**Description****The Material**

Medium carbon steel (0.25-0.7% carbon) hardens when quenched - a quality that gives great control over properties. "Hardenability" measures the degree to which it can be hardened in thick sections; plain carbon steels have poor hardenability - additional alloying elements are used to increase it (see Low alloy steels). Medium carbon steels are used on an enormous scale for railroad tracks; there are many other lower-volume applications.

**Composition**

Fe/0.3 - 0.7%C

**General properties**

Density	486.9	-	493.2	lb/ft <sup>3</sup>
Price	0.2138	-	0.3848	USD/lb

**Mechanical properties**

Young's Modulus	29.01	-	31.33	10 <sup>6</sup> psi
Elastic Limit	44.24	-	130.5	ksi
Tensile Strength	59.47	-	174	ksi
Elongation	4	-	39	%
Hardness - Vickers	120	-	565	HV
Endurance Limit	* 33.21	-	87.02	ksi
Fracture Toughness	* 10.92	-	83.72	ksi.in <sup>1/2</sup>

**Thermal properties**

Thermal conductor or insulator?	Good conductor			
Thermal Conductivity	26	-	31.78	BTU.ft/h.ft <sup>2</sup> .F
Thermal Expansion	5.556	-	7.778	μstrain/°F
Specific Heat	0.1051	-	0.1242	BTU/lb.F
Melting Point	2516	-	2757	°F
Maximum Service Temperature	* 392	-	662	°F

**Electrical properties**

Electrical conductor or insulator?	Good conductor			
------------------------------------	----------------	--	--	--

**Optical properties**

Transparency	Opaque			
--------------	--------	--	--	--

**Eco properties**

Production Energy	* 2535	-	2795	kcal/lb
CO2 creation	2	-	2.21	kg/kg
Recycle	✓			

## Lampiran 10 :



## Stainless steel

**Description****The Material**

Stainless steels are alloys of iron with chromium, nickel, and - often - four of five other elements. The alloying transmutes plain carbon steel that rusts and is prone to brittleness below room temperature into a material that does neither. Indeed, most stainless steels resist corrosion in most normal environments, and they remain ductile to the lowest of temperatures.

**Composition**

Fe/<0.25C/16 - 30Cr/3.5 - 37Ni/<10Mn + Si,P,S (+N for 200 series)

**General properties**

Density	474.5	-	505.7	lb/ft <sup>3</sup>
Price	1.283	-	5.13	USD/lb

**Mechanical properties**

Young's Modulus	27.41	-	30.46	10 <sup>6</sup> psi
Elastic Limit	24.66	-	145	ksi
Tensile Strength	69.62	-	324.9	ksi
Elongation	5	-	70	%
Hardness - Vickers	130	-	570	HV
Endurance Limit	* 25.38	-	109.2	ksi
Fracture Toughness	56.42	-	136.5	ksi.in <sup>1/2</sup>

**Thermal properties**

Thermal conductor or insulator?	Poor conductor			
Thermal Conductivity	6.933	-	13.87	BTU.ft/h.ft <sup>2</sup> .F
Thermal Expansion	7.222	-	11.11	μstrain/°F
Specific Heat	0.1075	-	0.1266	BTU/lb.F
Melting Point	2507	-	2642	°F
Maximum Service Temperature	1202	-	1652	°F

**Electrical properties**

Electrical conductor or insulator?	Good conductor
------------------------------------	----------------


**Optical properties**

Transparency	Opaque
--------------	--------

**Eco properties**

Production Energy	* 8364	-	9241	kcal/lb
CO2 creation	* 4.86	-	5.37	kg/kg
Recycle	✓			

## Lampiran 11:

 Aluminium alloys
**Description****The Material**

Aluminum was once so rare and precious that the Emperor Napoleon III of France had a set of cutlery made from it that cost him more than silver. But that was 1860; today, nearly 150 years later, aluminum spoons are things you throw away - a testament to our ability to be both technically creative and wasteful. Aluminum, the first of the 'light alloys' (with magnesium and titanium), is the third most abundant metal in the earth's crust (after iron and silicon) but extracting it costs much energy. It has grown to be the second most important metal in the economy (steel comes first), and the mainstay of the aerospace industry.

**Composition**

Al + alloying elements, e.g. Mg, Mn, Cr, Cu, Zn, Zr, Li

**General properties**

Density	156.1	-	181	lb/ft <sup>3</sup>
Price	0.6453	-	1.046	USD/lb

**Mechanical properties**

Young's Modulus	9,863	-	11.89	10 <sup>6</sup> psi
Elastic Limit	4.351	-	72.52	ksi
Tensile Strength	8.412	-	79.77	ksi
Elongation	1	-	44	%
Hardness - Vickers	12	-	150.5	HV
Endurance Limit	3.133	-	22.77	ksi
Fracture Toughness	20.02	-	31.85	ksi.in <sup>1/2</sup>

**Thermal properties**

Thermal conductor or insulator?	Good conductor			
Thermal Conductivity	43.91	-	135.8	BTU.ft/h.ft <sup>2</sup> .F
Thermal Expansion	11.67	-	13.33	µstrain/°F
Specific Heat	0.2047	-	0.2365	BTU/lb.F
Melting Point	886.7	-	1250	°F
Maximum Service Temperature	248	-	410	°F

**Electrical properties**

Electrical conductor or insulator?	Good conductor
------------------------------------	----------------

**Optical properties**

Transparency	Opaque
--------------	--------

**Eco properties**

Production Energy	1.993e4	-	2.199e4	kcal/lb
CO2 creation	11.6	-	12.8	kg/kg
Recycle	✓			

## Lampiran 12 :



## Titanium alloys

**Description****The Material**

Titanium is the seventh most abundant metal in the Earth's crust, but extracting the metal from the oxide in which it occurs naturally is unusually difficult. This makes titanium, third member of the light alloy trio, by far the most expensive of the three (more than ten times the price of aluminum). Despite this, the use of titanium is growing, propelled by its remarkable properties. It has a high melting point (1677 C), it is light, and - although reactive - its resists corrosion in most chemicals, protected by a thin film of oxide on its surface. Titanium alloys are exceptionally strong for their weight, and can be used at temperatures up to 500 C - compressor blades of aircraft turbines are made of them. They have unusually low thermal and electrical conductivity, and low expansion coefficients.

**Composition**

Ti + alloying elements, e.g. Al, Zr, Mo, Si, Sn, Ni, Fe, V

**General properties**

Density	274.7	-	299.7	lb/ft <sup>3</sup>
Price	*12.83	-	34.2	USD/lb

**Mechanical properties**

Young's Modulus	13.05	-	17.4	10 <sup>6</sup> psi
Elastic Limit	36.26	-	180.6	ksi
Tensile Strength	43.51	-	235.7	ksi
Elongation	1	-	40	%
Hardness - Vickers	60	-	380	HV
Endurance Limit	*25.38	-	87.02	ksi
Fracture Toughness	12.74	-	109.2	ksi.in <sup>1/2</sup>

**Thermal properties**

Thermal conductor or insulator?	Poor conductor			
Thermal Conductivity	4.045	-	8.089	BTU.ft/h.ft <sup>2</sup> .F
Thermal Expansion	4.389	-	6.111	μstrain/°F
Specific Heat	0.1242	-	0.1433	BTU/lb.F
Melting Point	2690	-	3059	°F
Maximum Service Temperature	566.3	-	1286	°F

**Electrical properties**

Electrical conductor or insulator?	Good conductor
------------------------------------	----------------

**Optical properties**

Transparency	Opaque
--------------	--------

**Eco properties**

Production Energy	9.263e4	-	1.024e5	kcal/lb
CO2 creation	53.8	-	59.5	kg/kg
Recycle	✓			