Toleransi Dimensi dan Geometri

Analisis rantai variasi dalam proses perakitan produk

Dr. Wahyudin P. Syam

Versi 1.0

Toleransi Dimensi dan Geometri

Analisis rantai variasi dalam proses perakitan produk

Kata pengantar

Bismillaahirrahmaanirrahiim,

Atas berkat rahmat Allah SWT, buku ini dapat terselesaikan. Salawat serta salam tercurahkan kepada Rasulullah SAW.

Semoga buku ini bermanfaat dan bisa menjadi kontribusi untuk keilmuan bidang desain produk industri bagi para pembaca.

Salah satu ciri utama negara-negara yang menguasai teknologi adalah industri-industri manufaktur di negara-negara tersebut sangat maju dan dapat memberikan nilai tambah yang sangat tinggi untuk suatu produk. Produk-produk tersebut mempunyai nilai jual yang tinggi, sehingga keuntungan devisa negara-negara tersebut dari nilai jual produk-produk tersebut menjadi sangat tinggi pula. Industri manufaktur pada intinya adalah industri yang mengolah suatu bahan mentah atau produk setengah jadi, menjadi suatu produk yang mempunyai nilai tambah dari keadaan asalnya. Dengan adanya nilai tambah tersebut, produk tersebut dapat dijual dengan harga tinggi yang menghasilkan nilai keuntungan yang tinggi pula. Maka dari itu, majunya industri-industri manufaktur di suatu negara menandakan semakin tingginya penguasaan teknologi dan keilmuan, dalam berbagai bidang, di negara tersebut.

Salah satu proses penting dalam suatu industri manufaktur adalah proses perakitan (*assembly*). Proses perakitan adalah suatu proses yang menggabungkan dua atau lebih komponen menjadi suatu kesatuan produk yang mempunyai fungsi tertentu, misalnya mobil, pesawat, pompa dan motor bakar. Komponen-komponen tersebut dapat saling dirakit dengan sistem antarmuka (untuk menggabungkan komponen-komponen tersebut) berupa fitur-fitur perakitan (*assembly shift*), misalnya lubang, pin, dan mekanisme *snap-fit*. Proses perakitan sangat mempengaruhi kualitas dari sebuah hasil akhir produk. Walaupun komponen-komponen pembentuk produk tersebut dapat dimanufaktur dengan sempurna (pada kondisi riil hal ini tidak mungkin terjadi karena akan selalu ada kesalahan-kesalahan pada sebuah proses manufaktur yang menyebabkan terdeviasinya dimensi dan geometri dari komponen-komponen tersebut), apabila proses perakitan produk tersebut tidak tepat, maka hasil akhir dari produk tersebut akan tidak berfungsi sesuai dengan yang diinginkan, misalnya rotor dan stator dari sebuah kompresor berputar saling bergesekan setelah dirakit. Terlepas dari pentingnya proses perakitan dalam sebuah industri manufaktur, studi-studi tentang proses perakitan masih sangat kurang, dibandingkan dengan studi-studi mengenai proses-proses manufaktur lainnya, misalnya proses bubut, *miling*, *casting*, *injection moulding*, *forming* dan lain sebagainya. Mungkin, karena proses perakitan sudah dilaksanakan dari zaman dahulu dan hanya berdasarkan intuisi, maka studi-studi tentang proses perakitan masih kurang.

Motivasi dari penulisan buku ini adalah untuk membuka pandangan bagi para pembaca, terutama yang berkecimpung di bidang desain produk, manufaktur dan pengukuran, bahwa proses perakitan harus distudi secara lebih dalam dan sistematis. Karena, proses perakitan adalah suatu proses yang kompleks yang harus didisain dan dipertimbangkan sejak awal mulai dari tahap disain sebuah produk. Buku ini menekankan pada bagaimana menganalisis hasil proses perakitan suatu produk yang dilakukan mulai dari tahap disain produk tersebut. Elemen-elemen dasar yang dibutuhkan untuk menganalisis hasil suatu proses perakitan adalah toleransi dimensional dan toleransi geometri (GD&T). Buku ini akan menjelaskan bagaimana menganalisis suatu produk untuk mengetahui apakah produk tersebut dapat dirakit dan mencapai karakteristik kunci yang diinginkan sesuai dengan desainnya yang dilakukan pada tahap disain sebelum produk tersebut dimanufaktur dan dirakit. Metode analisis yang digunakan adalah analisis variasi rantai toleransi (*tolerance chain analysis/tolerance stack-up analysis/tolerance analysis*).

Buku ini dapat digunakan sebagai panduan praktis untuk para praktisi dan pelajar yang menggeluti (tetapi tidak terbatas pada) bidang desain produk dan manufaktur. Buku ini berisi berbagai macam contoh riil mengenai analisis variasi rantai toleransi untuk berbagai macam produk, termasuk analisis secara 2D dan 3D, dengan

mempertimbangkan nilai-nilai toleransi pada desain suatu produk atau komponen. Selain itu, buku ini dapat digunakan untuk menambah materi mengenai mata kuliah yang berkaitan dengan desain mekanik, desain produk dan proses manufaktur pada tingkat universitas. Referensi-referensi utama mengenai proses manufaktur, sistem toleransi dan analisis variasi rantai toleransi diberikan pada buku ini. Sehingga, bagi para pembaca yang ingin mendalami topik-topik tertentu dalam buku ini dapat merujuk pada referensi-referensi tersebut. Landasan-landasan matematis dari buku ini adalah teori-teori statistika, seperti variable acak dan distribusi normal, dan sistem transformasi matriks pada sistem koordinat *homogenous*.

Proses perakitan merupakan proses yang sangat kompleks dan memerlukan keilmuan interdisiplin untuk mendesain dan mengimplementasikan suatu sistem perakitan, misalnya sebuah sistem perakitan mobil. Proses perakitan mempunyai sebuah aspek yang unik, yaitu proses perakitan sangat berkaitan dengan aspek-aspek teknis (misalnya desain produk, penjadwalan proses, analisis material dan otomasi) dan aspek-aspek non-teknis (misalnya sistem manajemen perusahaan, manajemen suplai dan faktor manusia). Kombinasi dari kedua faktor tersebut menyebabkan proses perakitan harus dipandang secara umum dan luas dalam industri-industri manufaktur karena proses perakitan saling berkaitan dengan seluruh aspek dalam sebuah industri manufaktur.

Buku ini disusun sedemikian rupa, sehingga materi-materi yang diperlukan untuk memahami buku ini dapat ditemukan dalam buku ini. Penjelasan umum mengenai setiap bab pada buku ini dan inter-relasi antara bab-bab tersebut adalah sebagai berikut:

- Bab 1: Introduksi proses perakitan.
Bab ini menjelaskan mengenai pentingnya peran proses perakitan dalam sebuah industri manufaktur dan sejarah singkat mengenai perkembangan keilmuan dan studi proses manufaktur. Hubungan antara toleransi dimensi dan geometri pada sebuah desain produk dengan proses perakitan, dan bagaimana peran dari analisis variasi rantai toleransi, juga dijelaskan. Selain itu, aspek-aspek teknik yang esensial dalam proses perakitan, yaitu sistem *fixture*, dijabarkan mulai dari prinsi kerja, fungsi dan beberapa contoh dari sistem *fixture*, terutama yang sering digunakan di industri-industri otomotif.
- Bab 2: Distribusi normal, matriks transformasi geometri dan kapabilitas proses
Bab ini memberikan landasan untuk metode-metode matematis sebagai alat bantu untuk melakukan analisis variasi rantai toleransi (*tolerance chain analysis/tolerance stack-up analysis/tolerance analysis*). Dasar-dasar statistika, terutama mengenai konsep variable acak (untuk pemodelan *error*) dan distribusi normal dijelaskan dengan detail. Kemudian, sistem transformasi metriks geometri dalam koordinat *homogenous* dijelaskan juga secara lengkap. Karena, sistem transformasi matriks ini merupakan inti dari metode analisis variasi rantai toleransi. Kemudian, introduksi mengenai metode perhitungan untuk mengetahui apakah suatu proses perakitan (dan proses-proses lainnya) kapabel untuk melakukan suatu proses perakitan dengan kriteria tertentu dijelaskan secara singkat.
- Bab 3: Toleransi dimensi dan geometri (GD&T).
Analisis variasi rantai toleransi muncul karena adanya toleransi yang diberikan terhadap dimensi dan geometri suatu fitur pada suatu komponen. Dengan adanya nilai toleransi tersebut, fitur tersebut pasti akan mempunyai deviasi dari nilai nominalnya setelah dimanufaktur. Bab ini fokus menjelaskan prinsip-prinsip dari toleransi dimensi dan geometri dari level dasar sampai menengah. Kekurangan dari metode toleransi dimensional dibahas dan bagaimana toleransi geometri merupakan aspek penting untuk menutupi kekurangan dari metode toleransi dimensi akan dijelaskan. Bagaimana cara menginterpretasikan arti dari toleransi geometri (GD&T) dibahas dengan detail pada bab ini. Bab ini diakhiri dengan penjelasan singkat mengenai cara memverifikasi suatu toleransi dimensi dan geometri (proses pengukuran) untuk mengontrol kualitas suatu produk. Pembahasan detail mengenai proses pengukuran (verifikasi toleransi) dapat dilihat dalam buku "*Metrologi Manufaktur: Pengukuran Geometri dan Analisis Ketidakpastian*" [Syam 2018].
- Bab 4: Contoh pembacaan toleransi dimensi dan geometri (GD&T).
Bab ini fokus memberikan contoh-contoh riil aplikasi toleransi dimensi dan geometri (GD&T) pada gambar-gambar teknik suatu komponen atau beda kerja. Dari setiap contoh tersebut, penjelasan detail mengenai cara pembacaan dan interpretasinya dijelaskan. Karena, toleransi dimensi dan geometri mempunyai "makna yang dalam" yang meng-*encode* maksud dan tujuan dari seorang disainer produk untuk disampaikan kepada orang-

orang yang terlibat dalam suatu proses manufaktur dan pengukuran, karena GD&T merupakan sebuah “Bahasa disain” yang digunakan oleh seorang disainer untuk berkomunikasi dengan orang-orang yang terlibat pada proses manufaktur suatu produk. **Analisis variasi rantai toleransi sangat penting untuk memahami apakah sebuah disain sudah mempunyai nilai-nilai toleransi yang tepat atau tidak. Karena, apabila nilai-nilai toleransi dimensi dan geometri yang diberikan salah atau kurang, maka apabila komponen-komponen suatu produk rakitan dapat dimanufaktur secara sempurna, produk tersebut tetap tidak dapat dirakit!.** Sehingga, pada sebuah industri manufaktur, apabila suatu produk tidak dapat dirakit pada lini perakitan, maka ada kemungkinan kesalahannya bukan pada proses manufaktur komponen-komponennya, tetapi pada nilai-nilai toleransi disainnya yang tidak tepat!.

- Bab 5: Analisis statistik rantai variasi perakitan produk (*tolerance stack-up analysis*). Bab ini menjelaskan prinsip dasar mengenai analisis variasi rantai toleransi berdasarkan metode statistik (yang landasan teorinya dijelaskan pada bab 2). Bagaimana variasi-variasi setiap komponen akan terakumulasi dalam setiap tahapan proses manufakturnya juga dijelaskan untuk lebih memahami kenapa analisis variasi rantai toleransi penting untuk dilakukan. Selain itu, beberapa contoh pengantar analisis variasi rantai toleransi akan diberikan sebagai pengantar untuk contoh-contoh aplikasi analisis variasi rantai toleransi pada bab-bab selanjutnya.
- Bab 6: Contoh aplikasi 1 - Analisis 2D rantai variasi pada perakitan *belt tensioner*. Bab ini menjelaskan analisis variasi rantai toleransi geometri (GD&T) untuk perakitan sebuah *belt tensioner* secara 2D. Penjelasan dimulai dengan memberikan gambaran singkat mengenai apa fungsi dari *belt tensioner*. Kemudian, karakteristik kunci dan detail toleransi setiap komponen akan dijelaskan.
- Bab 7: Contoh aplikasi 2 - Analisis 3D rantai variasi perakitan dua benda rigid. Bab ini menjelaskan analisis variasi rantai toleransi geometri (GD&T) untuk perakitan dua buah benda rigid secara 3D. Karakteristik kunci dan detail toleransi setiap komponen akan dijelaskan. Bab ini menjelaskan sebuah contoh dengan menggunakan komponen-komponen dengan bentuk yang sederhana. Namun demikian, contoh ini sangat penting sebagai pengantar dan untuk memahami analisis variasi rantai toleransi secara 3D.
- Bab 8: Contoh aplikasi 3 - Analisis 3D rantai variasi perakitan kompresor rotasi. Bab ini merupakan salah satu bab yang sangat penting dalam buku ini. Karena, bab ini memberikan contoh analisis variasi rantai toleransi secara 3D dengan sebuah produk riil, yaitu sebuah kompresor berputar. Selain itu, bab ini menjelaskan bagaimana dengan digunakannya metode analisis variasi rantai toleransi kesalahan pada disain kompresor tersebut dapat diketahui sejak dini dan bagaimana cara merevisi disain tersebut untuk menanggulangi kesalahan disain tersebut.
- Bab 9: Keuntungan ekonomi Toleransi Dimensi dan Geometri (GD&T). Bab ini fokus pada penjelasan mengenai keuntungan ekonomi yang akan didapatkan dengan melakukan analisis variasi rantai toleransi pada suatu produk sebelum proses manufaktur dan perakitan produk tersebut dilakukan. Keuntungan-keuntungan tersebut dapat berupa, misalnya, berkurangnya jumlah waktu reparasi komponen, meningkatnya kualitas produk dan memudahkan proses manufaktur dan perakitan sehingga dapat mempersingkat proses manufakturnya (menurunkan biaya produksi).
- Bab 10: Perspektif. Bab ini memberikan status keilmuan terkini mengenai proses perakitan dan metode analisis variasi rantai toleransi. Selain itu, bab ini memberikan gambaran bagaimana metode analisis yang dijelaskan buku ini dapat diaplikasikan untuk benda-benda non-rigid, seperti *sheet-metal*, yang mempunyai aplikasi sangat penting pada industri otomotif dan lainnya. Selain itu, bab ini akan memberikan contoh riil penerapan metode analisis variasi rantai toleransi pada perusahaan-perusahaan terkemuka dunia, seperti BMW, dimana dengan mengimplementasikan disain fitur-fitur perakitan yang tepat dan dengan menerapkan metode analisis variasi rantai toleransi, perusahaan tersebut dapat mempercepat proses perakitan salah satu produknya dan dapat mengurangi penggunaan sistem *fixture* pada proses perakitannya (mengurangi biaya peralatan).

Seluruh bab tersebut, walaupun mempunyai keterkaitan antara satu bab dengan bab lainnya, pembaca juga dapat membaca setiap bab secara terpisah atau tidak berurutan, tergantung dengan latar belakang keilmuan pembaca.

Dalam proses penulisan buku ini, penulis didukung oleh orang-orang yang selalu mendorong dan menyemangati penulis untuk dapat menyelesaikan buku ini. Pertama-tama, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada orang tua yang terus mendukung penulis dan mendoakan penulis. Kemudian, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada istri penulis, Nadiah Hasan Afif, dan anak penulis, Yasmin Wahyudin Syam, yang dapat bersabar dengan berkurangnya waktu penulis untuk mereka karena penulis harus menyisihkan waktunya untuk menyelesaikan buku ini.

Penulis sangat paham apabila masih banyak kekurangan disana-sini dalam buku ini, seperti kesalahan-kesalahan pengetikan, kurang detilnya penjelasan mengenai topik-topik tertentu, dan adanya materi-materi tertentu yang sangat berkaitan dengan proses perakitan yang belum dimasukkan ke dalam buku ini. Maka dari itu, penulis ingin menyampaikan permohonan maaf yang sebesar-besarnya atas kekurangan-kekurangan tersebut. Penulis terus melakukan perbaikan-perbaikan dan revisi-revisi untuk edisi berikutnya buku ini, sehingga buku ini bisa semakin baik memenuhi kebutuhan para pembaca. Seluruh gambar dan ilustrasi 2D dan 3D dalam buku ini dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWork dan CATIA V5 R21 dari Dassault Systemes.

Untuk meningkatkan kualitas buku ini pada edisi-edisi selanjutnya, penulis sangat mengharapkan saran, kritik dan diskusi yang membangun dari para pembaca buku ini. Maka dari itu, penulis membuka seluas-luasnya pintu diskusi apabila para pembaca ingin menyampaikan ide-ide mereka. Para pembaca dapat mengirimkan saran, kritik dan diskusi mereka ke email pribadi penulis: gebe_top@yahoo.com.

Penulis,

Wahyudin P. Syam

Nottingham, UK.

7 Juli 2019

Daftar isi

BAB 1: Introduksi proses perakitan	1
1.1 Pentingnya proses perakitan (<i>assembly</i>)	1
1.2 Sejarah singkat proses perakitan	3
1.3 Hubungan antara toleransi dan proses perakitan	6
1.4 Karakteristik kunci (<i>key characteristic/KC</i>) dan fitur perakitan (<i>assembly feature</i>)	8
1.5 Sistem <i>fixture</i>	18
1.6 Contoh-contoh proses perakitan	23
BAB 2: Distribusi normal, matriks transformasi geometri dan kapabilitas proses	27
2.1 Analisis statistik	27
2.1.1 Variable acak dan distribusi statistik	28
2.2 Distribusi normal (<i>Gaussian distribution</i>)	33
2.2.1 <i>Central limit theorem</i>	37
2.3 Sistem transformasi matriks	38
2.3.1 Matriks <i>homogenous</i> dan matriks roto-translasi	38
2.3.2 Transformasi matriks	40
2.4 Kapabilitas proses (<i>Process capability</i> C_p dan C_{pk})	41
BAB 3: Toleransi dimensi dan geometri (GD&T)	43
3.1 Introduksi toleransi	43
3.1.1 Sumber-sumber variasi	45
3.1.2 Tipe-tipe toleransi	46
3.2 Toleransi dimensional “ <i>Plus/minus</i> ”	47
3.3 Toleransi geometri (<i>Geometric dimensioning and tolerancing/GD&T</i>)	48
3.3.1 Toleransi bentuk (<i>form</i>)	54
3.3.2 Toleransi orientasi (<i>orientation</i>)	55
3.3.3 Toleransi lokasi (<i>location</i>)	57
3.3.4 Toleransi <i>run-out</i>	57
3.3.5 Kondisi material (<i>material condition</i>) dan bonus toleransi	59
3.4 Verifikasi toleransi dimensional dan geometri (GD&T)	63
BAB 4: Contoh pembacaan toleransi dimensi dan geometri (GD&T)	65
4.1 <i>Squareness</i>	65
4.2 <i>Parallelism</i>	66
4.3 Profil garis (<i>Line profile</i>)	69
4.4 Profil permukaan (<i>Surface profile</i>)	69
4.5 Simetri	69
4.6 <i>Concentricity</i>	71
4.7 <i>Angularity</i>	72
4.8 <i>Position/location</i>	73

4.9 <i>Straightness</i>	73
4.10 <i>Run-out</i>	74
4.11 Kombinasi toleransi geometri	77
BAB 5: Analisis statistik rantai variasi perakitan produk (<i>tolerance stack-up analysis</i>)	81
5.1 Alokasi dan analisis <i>stack-up</i> rantai variasi (toleransi)	81
5.1.1 Analisis akumulasi toleransi (<i>tolerance stack-up analysis</i>)	82
5.1.2 Analisis rantai variasi (toleransi): berbasis <i>worst-case</i> dan statistik	82
5.2 Analisis rantai variasi (toleransi) dimensional “plus/minus”	86
5.3 Analisis rantai variasi (toleransi) geometri	95
BAB 6: Contoh aplikasi 1: Analisis 2D rantai variasi pada perakitan <i>belt tensioner</i>	101
6.1 <i>Belt tensioner</i>	101
6.2 Disain	101
6.3 Rantai variasi (toleransi) 2D	106
6.4 Analisis (dan alokasi) rantai variasi (toleransi)	108
6.4.1 Analisis rantai variasi (toleransi): Metode <i>Worst-Case</i>	109
6.4.2 Analisis rantai variasi (toleransi): Metode statistik (<i>statistical tolerancing</i>)	109
BAB 7: Contoh aplikasi 2: Analisis 3D rantai variasi perakitan dua benda rigid	111
7.1 Pendahuluan: Analisis 2D rantai variasi (toleransi) geometri	111
7.2 Analisis 3D rantai variasi (toleransi) geometri	115
BAB 8: Contoh aplikasi 3: Analisis 3D rantai variasi perakitan kompresor rotasi	129
8.1 Kompresor berputar (<i>Rotary compressor</i>)	129
8.2 Disain awal: dimensi dan alokasi toleransi	129
8.3 Disain awal: Rantai transformasi toleransi (<i>tolerance chain</i>)	133
8.3.1 Rantai transformasi nominal	134
8.3.2 Rantai transformasi variasi	135
8.4 Re-alokasi toleransi disain awal (Disain awal)	139
8.5 Disain II: Re-disain total dari kompresor berputar	141
8.6 Disain II: Rantai transformasi toleransi baru	144
8.6.1 Rantai transformasi nominal	145
8.6.2 Rantai transformasi variasi	146
8.7 Re-alokasi toleransi disain baru (Disain II)	148
8.8. Kesimpulan	150
Daftar kode pemrograman MATLAB untuk bab 8	
BAB 9: Keuntungan ekonomi Toleransi Dimensi dan Geometri (GD&T)	163
9.1 Keuntungan apabila model rantai transformasi variasi diketahui	163
9.2 Keuntungan ekonomi dari analisis rantai variasi	166
9.3 “ <i>Good practice guide</i> ” untuk mendisain suatu proses perakitan yang efektif, efisien dan memberikan keuntungan ekonomi	169
BAB 10: Perspektif	171
10.1 Metode “ <i>skin model</i> ” untuk meningkatkan akurasi dari analisis rantai variasi (toleransi) GD&T	171

10.2 Perakitan produk tanpa menggunakan suatu sistem <i>fixture</i>	174
10.3 Analisis rantai variasi dengan mempertimbangkan berbagai macam faktor	177
10.4 Perakitan produk yang terdiri dari komponen-komponen <i>non-rigid</i>	179
10.5 Sistem otomatis untuk mengekstrak data dan analisis GD&T dari sebuah model CAD	181
10.6 GD&T dan analisis rantai variasi dari sebuah produk <i>additive manufacturing</i> (AM)	182
10.7 GD&T dan analisis rantai variasi pada industri penerbangan (<i>aerospace</i>)	183
Daftar pustaka	189
Biografi penulis	193

BAB 1

Introduksi proses perakitan

Industri manufaktur adalah sebuah industri yang mengolah suatu input, yang pada umumnya berupa bahan baku material atau suatu produk setengah jadi, menjadi suatu output produk yang mempunyai nilai tambah atau mempunyai fungsi-fungsi baru yang mempunyai suatu nilai ekonomi. Dengan industri manufaktur, lapangan kerja dan penguasaan teknologi akan didapatkan. Industri manufaktur bernilai tinggi (*high-value manufacturing*) merupakan suatu jenis industri manufaktur yang mempunyai ciri-ciri sebagai berikut: menggunakan suatu proses berteknologi tinggi, melibatkan orang-orang dengan keahlian khusus serta menghasilkan suatu produk yang mempunyai fungsi (*competitive advantage*) dan nilai ekonomi yang sangat tinggi.

Penguasaan industri manufaktur bernilai tinggi adalah sangat penting untuk suatu bangsa. Hal ini disebabkan karena, dengan penguasaan industri tersebut, maka sumber daya manusia suatu bangsa akan menjadi tinggi. Selain itu, industri manufaktur bernilai tinggi dapat menghasilkan suatu produk yang mempunyai fungsi yang unik dan mempunyai daya saing tinggi, sehingga, nilai keuntungan ekonomi dari produk-produk yang dihasilkannya adalah sangat besar. Akibatnya, industri tersebut dapat menjadi sumber pendapatan besar dari suatu negara.

Tahap akhir suatu proses manufaktur untuk mejadikan suatu produk yang mempunyai fungsi tertentu, pada umumnya, adalah proses perakitan (*assembly*) yang mengabungkan berbagai jenis komponen menjadi suatu kesatuan sehingga mempunyai suatu fungsi tertentu, misalnya barang-barang elektronik, otomotif sampai dengan pesawat terbang.

1.1 Pentingnya proses perakitan (*Assembly*)

Proses perakitan adalah suatu proses, dari serangkaian proses dalam suatu lini produksi, yang menggabungkan komponen-komponen (baik komponen-komponen *rigid* (solid) maupun yang *non-rigid*/komponen yang dapat terdeformasi) secara bertahap dengan suatu urutan tertentu sampai suatu produk akhir (dengan suatu fungsi tertentu) dapat dihasilkan. Namun demikian, proses perakitan (*assembly*) bukan sekedar hanya menggabungkan komponen-komponen menjadi satu bagian, tetapi proses tersebut juga mempertimbangkan aspek-aspek lain, misalnya faktor manusia, rencana produksi sampai dengan tatanan suatu organisasi manufaktur. Maka dari itu, proses perakitan merupakan kombinasi dari aspek-aspek teknik (seperti desain komponen, proses manufaktur komponen, dan lain-lain) dan non-teknik (seperti organisasi, rantai suplai, dan lain-lain). Desain suatu proses perakitan yang efektif dan efisien harus mempertimbangkan seluruh aspek-aspek tersebut yang saling berkaitan satu dengan lainnya. Secara umum, proses perakitan mempunyai urutan-urutan sebagai berikut [Whitney 2004]:

- Mensuplai komponen-komponen dengan jenis dan jumlah yang tepat. Untuk sistem suplai, terdapat dua jenis sistem, yaitu sistem *push* dan sistem *pull* (Kanban).
- Mensuplai *sub-assembly*, yaitu suatu komponen yang sudah berupa setengah terakit dari komponen-komponen yang lebih kecil, misalnya *sub-assembly* dari *gearbox* sebuah mobil.
- Menempatkan komponen-komponen yang disuplai (baik yang masih berupa unit komponen atau *sub-assembly* komponen) pada suatu sistem *fixture*.
- Merakit dua buah atau lebih komponen-komponen menjadi suatu unit komponen baru yang lebih kompleks.
- Inspeksi untuk mengecek bahwa suatu proses perakitan sudah benar dan komponen yang dirakit dapat berfungsi sesuai desainya.
- Mengetes hasil perakitan tersebut apakah dapat berfungsi sesuai dengan yang didisain (diharapkan), misalnya

suatu sistem perakitan suatu mesin mobil, setelah dirakit, mesin tersebut harus dites disebuah wahana khusus untuk mengetahui apakah mesin yang terakit tersebut dapat berfungsi sengan baik, misalnya dapat menghasilkan daya sesuai yang diharapkan atau tidak.

- Dokumentasi dari proses dan hasil perakitan tersebut serta *feedback* untuk perbaikan proses perakitannya selanjutnya.

Pada prinsipnya, sebuah komponen, seakurat apapun itu, tidak akan memberikan suatu fungsi yang berarti apabila komponen itu hanya berdiri sendiri (tidak dirakit dengan komponen-komponen lainnya). Suatu produk akan dapat memberikan suatu fungsi jika dan hanya jika produk tersebut sudah dirakit menjadi suatu kesatuan produk dengan mengikuti suatu urutan proses perakitan. Maka dari itu, proses perakitan merupakan suatu proses yang sangat penting untuk memberikan nilai tambah dan fungsi dari suatu produk.

Namun demikian, walaupun proses perakitan sangat penting, banyak studi atau riset di bidang manufaktur kurang fokus untuk mendalami proses perakitan. Banyak studi atau riset fokus mengenai proses-proses manufaktur secara individu, seperti proses *turning*, *milling*, *laser cutting*, *wire-EDM*, *injection moulding* dan lain-lain. Tetapi, studi dan riset untuk memahami lebih dalam (baik aspek teknis dan non-teknis) mengenai proses perakitan suatu produk masih jarang atau sangat sedikit. Padahal, proses perakitanlah yang membuat suatu produk dapat menjadi suatu kesatuan unit yang mempunyai fungsi sesuai dengan desain yang telah ditetapkan dan mempunyai nilai jual atau ekonomi untuk mendatangkan keuntungan bagi suatu perusahaan. Salah satu sebab mengapa proses perakitan masih kurang didalami adalah karena proses perakitan dianggap sebuah proses yang natural, yaitu hanya sebagai menggabungkan dua buah atau lebih komponen menjadi satu kesatuan yang sudah dilakukan orang-orang sejak ribuan tahun lalu.

Proses perakitan merupakan suatu proses yang mencakup keseluruhan suatu perusahaan manufaktur, baik faktor-faktor teknis dari proses itu sendiri (misalnya desain *fixture*, desain produk dan sistem otomasi perakitan), tetapi juga melibatkan faktor-faktor nonteknis, seperti sistem organisasi, struktur organisasi, aspek ergonomis dan aspek manusia sebagai operator yang melakukan perakitan tersebut.

Proses perakitan merupakan “jembatan” yang menghubungkan unit-unit proses manufaktur (seperti proses *turning*, *milling* dan *grinding*) dan proses bisnis dari suatu organisasi (perusahaan). Hal ini menjelaskan bahwa desain atau struktur suatu sistem perakitan dalam sebuah perusahaan sangat berkaitan erat dengan kebijakan bisnis perusahaan tersebut. Sebagai contoh bagaimana suatu proses perakitan dapat mempengaruhi pengambilan kebijakan bisnis suatu perusahaan adalah:

- Dalam pengambilan kebijakan untuk menentukan kapan suatu produk dapat mulai dipasarkan atau dijual, perusahaan harus mengetahui kemampuan sistem perakitan mereka untuk menghasilkan suatu produk jadi dalam jumlah secara singkat sebagai kemampuan *ramp-up* produksi suatu barang. Sistem perakitan yang baik, tidak akan menghambat suatu perusahaan untuk memproduksi banyak barang untuk dapat dijual.
- Dalam pengambilan kebijakan untuk menentukan apakah suatu perusahaan dapat melakukan suatu proses perakitan sendiri atau harus di-*outsource* ke perusahaan lainnya, perusahaan tersebut harus mempertimbangkan apakah proses perakitan mereka sanggup atau tidak, misalnya apakah sistem perakitan mereka dapat dikonfigurasi ulang dengan cepat atau tidak bisa sama sekali untuk mengakomodasi produk baru dengan bentuk atau fitur yang berbeda.
- Berhubungan dengan poin sebelumnya, dalam pengambilan kebijakan apakah suatu perusahaan dapat menerapkan sistem produksi *mix*, dimana dalam satu sistem perakitan, berbagai jenis produk dengan komposisi komponen-komponen yang berbeda atau satu jenis barang dengan varian yang berbeda-beda, dapat diterapkan oleh perusahaan tersebut atau tidak.

Sebuah sistem perakitan (*assembly system*) yang efisien mempunyai minimal tiga ciri-ciri sebagai berikut: meminimalkan (atau bahkan mengeliminasi) penggunaan *fixture* untuk membantu secara akurat memposisikan dan memegang komponen-komponen yang akan dirakit dalam sebuah proses perakitan sehingga sistem perakitan tersebut memiliki waktu *changeover*/konfigurasi ulang yang singkat, memungkinkan untuk melakukan proses perakitan dengan sistem *mix-production* yang memungkinkan perakitan suatu produk dengan varian yang berbeda-beda, dan meminimalkan atau tidak menggunakan operator perakitan yang memiliki pengalaman dan keahlian yang tinggi.

1.2 Sejarah singkat proses perakitan

Setelah periode Revolusi industri I pada awal abad ke-18 yang ditandai dengan lahirnya sistem mekanisasi dan mesin uap, Revolusi industri II muncul pada awal abad ke-20 yang ditandai dengan ditemukannya sumber tenaga listrik dan sistem produksi massal dengan sistem lini perakitan (*assembly line*).

Studi-studi keilmuan tentang proses perakitan dimulai sekitar tahun 1940-an. Pada tahun inilah dimulai era perakitan massal yang dicetuskan oleh **Henry Ford** dengan membuat sistem *line* untuk sebuah proses perakitan. Henry Ford yang pertama kali mengusulkan sebuah sistem perakitan dimana para operator tetap pada posisi ditempat yang sama dan produk-produk yang akan dirakit akan datang dalam bentuk sistem *line* (yang selalu dipakai sampai saat ini untuk perakitan massal sebuah produk otomotif dan lainnya). Gambar 1 memperlihatkan beberapa contoh dari sistem lini perakitan massal pada masa-masa awal diimplementasikan. Pada Gambar 1, dengan menempatkan operator dan teknisi dalam suatu jalur yang bergerak membawa produk-produk (dalam hal ini mobil-mobil), kuantitas hasil proses perakitan tersebut menjadi besar, sehingga produksi massal suatu produk dapat dilakukan.

Gambar 1: (kiri atas) <http://beyondplm.com/2014/04/06/plm-best-practices-and-henry-ford-mass-production-system/>, (kanan atas) <http://www.bookofdaystales.com/tag/assembly-line/>, (bawah tengah) <https://www.catalyst.net.nz/blog/agile-and-test-driven-development>. Tautan tersebut diakses pada 11 Januari 2019.

Pada periode ini, studi-studi keilmuan tersebut fokus pada aspek faktor ergonomis manusia dalam melakukan suatu proses perakitan, studi waktu yang dibutuhkan untuk suatu unit perakitan dan studi organisasi perakitan. Namun demikian, studi-studi keilmuan tersebut masih kurang untuk aspek-aspek teknik, model analitis dan numerik, dari proses perakitan, misalnya studi mengenai sistem mekanik sebuah *fixture*, analisis statistik sebuah lini perakitan, dan lain-lain.

Pada tahun 1950-an, Revolusi industri III (*Digital Revolution*) muncul dengan adanya sistem otomatisasi tetap (*fixed-automation*), yaitu suatu sistem perakitan otomatis yang sangat spesifik untuk suatu produk dengan jenis tertentu, dan sistem otomatisasi fleksibel dan munculnya sistem-sistem elektronik, termasuk mikroprosessor, yang sangat mendukung sistem otomatisasi tersebut. Sistem ini dapat meningkatkan kecepatan dari suatu proses perakitan secara signifikan, namun demikian, sistem ini hanya bisa diterapkan untuk suatu produk tertentu dan sangat susah untuk diterapkan atau digunakan untuk suatu proses perakitan produk lain yang berbeda jenis. Merubah atau mengkonfigurasi ulang suatu sistem otomatis tetap (*fix* atau *special-purpose*) membutuhkan waktu yang lama dan biaya investasi yang besar (karena harus merubah sensor-sensor dan sistem instrumentasi dan elektronik).

Pada tahun 1970-an sistem otomatisasi fleksibel dengan menggunakan robot (pada umumnya *robot arm*) memungkinkan untuk merancang sebuah sistem perakitan untuk berbagai jenis produk dan varian dengan meminimalkan waktu konfigurasi ulang sistem perakitan tersebut [Craig 2005]. Robot-robot *arm* tersebut dapat diprogram untuk menyesuaikan dengan berbagai jenis bentuk untuk proses-proses perakitan produk yang berbeda. Pada awalnya, aplikasi utama untuk robot-robot tersebut adalah untuk proses pengelasan titik (*spot welding*) untuk badan (*body*) sebuah mobil yang terbuat dari lembaran metal (*sheet-metal*). Gambar 2 memperlihatkan beberapa contoh dari robot bertipe *articulated arm* yang paling sering digunakan pada industri-industri otomotif. Gambar 3 memperlihatkan beberapa contoh dari proses penggabungan lembaran-lembaran metal untuk merakit *body* sebuah mobil pada suatu industri otomotif.

Sistem otomatisasi fleksibel lainnya yang umum digunakan pada era Revolusi industri III adalah sistem *programmable logic controller* (PLC) [Bolton 2015]. PLC adalah sebuah sistem otomatisasi industri yang menggantikan *relay-relay* mekanik (*hard-wired relay*), *timer* dan *sequencers* dengan sebuah relay virtual (*software*) sehingga dapat diprogram ulang untuk berbagai jenis otomatisasi proses. Sistem PLC dapat digunakan untuk proses otomatisasi pada lingkungan yang bersifat keras, maka dari itu, PLC sangat cocok digunakan untuk otomatisasi pada level industri.

Pada era Revolusi industri III inilah, aspek-aspek teknis mengenai proses perakitan mulai dialami. Selain itu, ilmu-ilmu mengenai toleransi dimensi dan geometri sudah mulai muncul. Hal tersebut didorong oleh kebutuhan suatu produk untuk dapat menggunakan berbagai komponen yang diproduksi oleh berbagai perusahaan yang berbeda (*interchangeability*).

Gambar 2: Sebuah contoh dari robot berjenis *articulated arm* yang paling umum digunakan di industri-industri otomotif (dan berbagai jenis industri lainnya) untuk suatu sistem proses perakitan.

Gambar 3: Beberapa contoh proses pengelasan titik (*spot welding*) untuk menggabungkan lembaran-lembaran metal untuk merakit *body* mobil pada suatu industri otomotif.

Revolusi industry IV (*Industry 4.0* atau *smart manufacturing*) muncul sekitar tahun 2013. Industry 4.0 ditandai dengan munculnya sistem fisik-siber (*cyber-physical system*), yaitu sebuah sistem yang menggabungkan aspek-aspek fisik, digital dan manusia dalam sebuah industri. Sistem ini muncul didorong oleh berkembangnya berbagai macam teknologi, seperti kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), robot kolaborasi (*collaborative robot*), teknologi quantum, teknologi nano, *Internet of Things* (IoT), *additive manufacturing* dan sistem komunikasi 5G [Lasi et. al. 2015].

Dalam mendesain suatu sistem perakitan, beberapa pro dan kontra (*trade-off*) untuk menentukan jenis suatu sistem perakitan yang paling tepat untuk suatu produk adalah [Whitney 2004]:

- Fleksibel versus non-fleksibel (*fix*)
Suatu sistem perakitan yang fleksibel memungkinkan proses tersebut untuk dikonfigurasi ulang untuk mengakomodasi berbagai macam jenis produk dengan varian yang berbeda-beda. Namun demikian, kekurangan dari sistem perakitan tersebut adalah produktivitas sistem perakitan tersebut tidak setinggi produktivitas dari suatu sistem perakitan yang non-fleksibel (*fix*). Karena, suatu sistem perakitan yang tidak fleksibel sudah dioptimisasi untuk mengakomodasi proses perakitan dari suatu produk tertentu, misalnya sistem *fixture* yang sudah didesain hanya untuk mengakomodasi produk tersebut.
- General versus spesifik
Sebuah sistem perakitan yang general dapat digunakan ulang (*re-use*) untuk merakit produk-produk jenis baru. Namun demikian, pada kasus-kasus tertentu, sebuah sistem perakitan yang spesifik (*fit-for-purpose*) kadang-kadang menjadi solusi lebih baik, karena walaupun sistem *fixture* dari sistem perakitan yang spesifik tersebut harus dibuat ulang untuk suatu produk yang baru, sistem tersebut dapat memberikan suatu solusi yang spesifik (*fit-for-purpose*) dan sangat efisien untuk kasus-kasus spesifik tersebut.
- Adaptasi versus desain ulang
Dalam situasi riil, untuk memproduksi suatu jenis produk tertentu, sering suatu industri harus menentukan apakah industri tersebut harus mendesain ulang sistem perakitan mereka untuk dapat mengakomodasi dan mengoptimisasi proses perakitan dari produk baru tersebut. Pilihan lainnya adalah, untuk hanya merekonfigurasi (adaptasi) ulang sistem perakitan industri tersebut untuk dapat mengakomodasi produk tersebut, tetapi sistem perakitannya tidak dapat optimal untuk produk tersebut. Untuk mengatasi hal ini, analisis ekonomi dari kedua alternatif tersebut harus dilakukan. Misalnya, apabila produk baru tersebut tidak terlalu banyak volume produksinya, mungkin, merekonfigurasi ulang sistem perakitan industri tersebut merupakan solusi ekonomi yang lebih baik dibandingkan daripada harus mendesain ulang seluruh sistem perakitan mereka.

- Struktur verus tak-terstruktur

Istilah struktur maksudnya adalah suatu sistem perakitan yang selalu sama dan berulang-ulang untuk setiap proses. Dalam kata lain, proses perakitan yang terstruktur adalah suatu proses yang mempunyai prosedur dengan urutan-urutan tersebut yang sudah terstandarisasi untuk suatu proses, sehingga prosedur tersebut akan dilakukan berulang-ulang. Sistem perakitan tak-terstruktur maksudnya adalah suatu sistem perakitan yang selalu beradaptasi atau tidak mempunyai prosedur yang baku untuk suatu proses perakitan tertentu, misalnya perakitan manual sebuah jam tangan.

Dengan umumnya sistem otomatisasi yang diadaptasi untuk suatu sistem perakitan, namun demikian, bukan berarti suatu sistem perakitan yang terbaik adalah suatu sistem yang menerapkan otomatisasi. Sistem perakitan yang terbaik untuk suatu produk sangat tergantung berbagai macam factor, misalnya volume produksi suatu produk, harga dari suatu produk, biaya operator, biaya otomatisasi, dan lain sebagainya. Masih banyak kasus proses perakitan yang masih manual, misalnya proses perakitan jam tangan, mesin-mesin dan *dashboard* mobil. Sistem perakitan manual, masal, *fix-automation* maupun *flexible-automation* dengan robot atau PLC masih digunakan sampai saat ini. Masing-masing metode perakitan tersebut bisa jadi sangat efisien untuk suatu situasi tertentu (sesuai dengan kebutuhan teknis dan ekonomis suatu produk yang akan dirakit).

1.3 Hubungan antara toleransi dan proses perakitan

Proses perakitan tidak hanya bergantung dari geometri komponen-komponen hasil suatu proses manufaktur. Tetapi, proses perakitan juga bergantung pada desain dari komponen-komponen tersebut. Maka dari itu, dari mulai tahapan desain suatu komponen, proses perakitan untuk komponen tersebut harus sudah dipertimbangkan dan direncanakan dengan baik.

Hal yang paling penting dari suatu desain komponen atau produk yang langsung mempengaruhi suatu proses perakitan adalah toleransi-toleransi (baik dimensional maupun geometri) yang diberikan pada desain nominal komponen tersebut. Dengan kata lain, suatu proses perakitan juga harus didesain dan direncanakan dengan matang dari tahap awal desain tersebut, tidak hanya mengikuti hasil produksi komponen-komponen pembentuknya. Karena, toleransi dimensi dan geometri suatu desain komponen atau produk sangat mempengaruhi suatu sistem atau proses perakitannya, maka dari itu, **buku ini fokus membahas mengenai toleransi dimensi dan geometri dan analisis rantai variasi (*tolerance stack-up analysis*) yang dapat terjadi pada proses perakitan tersebut berdasarkan nilai-nilai toleransi yang terdapat pada desain komponen atau produk tersebut.** Sistem atau proses perakitan tidak dapat dipisahkan dengan toleransi dimensi dan geometri pada desain suatu komponen atau produk. Analisis rantai toleransi tersebut berbasis metode statistik dan metode *datum flow chain* (DFC) [Mantripragada dan Whitney 1998].

Pada prinsipnya, untuk mendesain dan mengimplementasikan sebuah proses perakitan yang baik, seorang desainer dan orang yang ahli dalam proses-proses manufaktur harus dapat mengerti fungsi teknik dari suatu produk yang akan diproduksi dan aspek ekonomi dari produk tersebut (berapa biaya produksi yang ditargetkan atau berapa harga jual produk tersebut). Pada prinsipnya, proses perakitan yang baik adalah suatu proses perakitan yang dapat menghasilkan suatu produk dengan nilai variasi yang sangat kecil (tingkat presisi yang tinggi), mengurangi penggunaan dari mesin-mesin perakitan khusus (yang mempunyai sensor-sesor dan aktuator-aktuator yang spesifik untuk suatu perakitan tertentu), mengurangi penggunaan *fixture* dan mengurangi penggunaan tenaga kerja yang ber-skill tinggi untuk melakukan proses perakitan tersebut. Maka dari itu, suatu produk harus mempunyai desain yang mempertimbangkan dan memudahkan proses perakitan dari produk tersebut.

Pada umumnya, apabila ada suatu masalah yang dialami dalam suatu proses perakitan (misalnya lubang baut dan mur dari dua buah komponen yang tidak saling bertemu atau tidak *centre*, jarak gap dua buah komponen yang terlalu besar setelah dirait, seorang operator tidak dapat menggabungkan dua buah komponen menjadi satu atau hasil suatu perakitan yang tidak berfungsi sesuai yang diharapkan), biasanya komponen yang paling akhir-lah yang selalu “disalahkan”, padahal, bisa saja (dan pada umumnya), kesalahan-kesalahan yang ditemukan pada sebuah produk akhir setelah dirakit berasal dari komponen-komponen sebelumnya atau *sub-assembly* yang dirakit sebelumnya atau **dari pemberian nilai-nilai toleransi yang salah pada desain komponen-komponen tersebut!**

Untuk mengetahui apakah nilai-nilai toleransi, baik dimensi dan geometri, yang diberikan pada suatu desain komponen-komponen adalah tepat dan akan menjamin suatu produk akan dapat dirakit dari komponen-komponen tersebut (dengan syarat semua komponen dapat dimanufaktur dalam batas toleransinya), **analisis rantai toleransi (tolerance stack-up analysis) harus dilakukan** [Fischer 2011, Whitney 2004]. Analisis rantai toleransi adalah sebuah metode untuk menganalisis dan memverifikasi apakah sekumpulan komponen (yang dimanufaktur sesuai dengan batasan toleransinya) akan dapat dirakit dan akan berfungsi setelah dirakit sebelum komponen-komponen tersebut dimanufaktur. Proses analisis rantai toleransi dilakukan pada tahapan desain. Sehingga, pada tahapan desain tersebut, alokasi nilai toleransi yang tepat dapat dilakukan. **Alokasi nilai-nilai toleransi yang tidak tepat akan mengakibatkan komponen-komponen tersebut tidak dapat dirakit dengan benar walaupun komponen-komponen tersebut dimanufaktur dalam batasan nilai toleransinya.**

Orang yang paling mengetahui fungsi dari suatu produk adalah seorang desainer dari produk tersebut, maka dari itu, seorang desainer mempunyai kewajiban untuk menentukan atau mengalokasikan, mengkalkulasi dan menyampaikan nilai-nilai toleransi, baik dimensi dan geometri, dari komponen-komponen yang dia disain. Nilai-nilai toleransi tersebut berada pada gambar-gambar teknik dari komponen-komponen tersebut. Desainer tersebut harus memperhitungkan bahwa nilai-nilai toleransi tersebut sudah efektif dan efisien. **Efektif** disini berarti bahwa apabila komponen-komponen tersebut dimanufaktur sesuai dengan nilai-nilai batasan toleransinya, maka komponen-komponen tersebut harus dapat dirakit bersama dan memberikan fungsi sesuai dengan desainnya. **Effisien** disini berarti bahwa, nilai-nilai toleransi yang diberikan tidak melebihi spesifikasi yang diinginkan, karena nilai toleransi yang terlalu kecil akan mengakibatkan biaya produksi yang semakin mahal (membutuhkan mesin-mesin produksi yang lebih mahal, sistem *fixture* yang khusus dan membutuhkan instrumen pengukuran yang lebih mahal pula dengan presisi yang tinggi [Syam 2015, Syam 2018]).

Analisis rantai toleransi yang dilakukan pada tahapan desain dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan sebagai berikut, misalnya:

- Apakah nilai-nilai toleransi, misalnya suatu diameter, *flatness*, dan lain-lain, sudah tepat?
- Seberapa tipis suatu fitur komponen dapat dimanufaktur tetapi tetap dalam batasan toleransinya?
- Apakah dengan nilai-nilai toleransi yang diberikan, apabila sekumpulan komponen saling dirakit, maka karakteristik kunci (*key characteristic*) dari suatu produk rakitan akan sesuai dengan desainnya?
- Seberapa besar sebuah lubang dapat terdeviasi dari nilai nominalnya atau dari lokasi nominalnya sehingga komponen tersebut masih dapat dirakit?
- Kenapa komponen-komponen yang dimanufaktur sesuai dengan toleransi pada gambar teknik mereka tidak dapat dirakit atau, kalau dapat dirakit, tetapi tidak memenuhi fungsi-fungsi atau karakteristik perakitan yang diinginkan?
- Bagaimana caranya seorang desainer suatu produk yakin bahwa apabila komponen-komponen pembentuk produk tersebut dapat dimanufaktur sesuai dengan toleransinya, maka komponen-komponen tersebut dapat saling dirakit?
- Seberapa besar deviasi dimensi dan geometri setiap komponen pembentuk suatu produk masih dapat diterima?
- Apakah efek terhadap produk perakitan secara keseluruhan dari setiap deviasi geometri komponen-komponen pembentuknya?
- Variasi *size* atau posisi-kah yang paling berpengaruh dalam suatu proses perakitan?

Hal-hal yang mendorong semakin pentingnya analisis rantai toleransi suatu produk pada tahap desain sebelum komponen-komponennya dimanufaktur dan dirakit adalah: kebutuhan untuk menjamin setiap komponen dapat dirakit menjadi suatu produk sesuai desainnya, kebutuhan untuk mendesain komponen-komponen yang sangat rumit geometrinya dan kebutuhan untuk menjamin *interchangeability* setiap komponen pembentuk suatu produk hasil suatu perakitan (apabila komponen-komponen pembentuk produk tersebut diambil secara acak dari tempat penyimpanannya atau dari supplier yang berbeda untuk saling dirakit).

Proses perakitan perlu distudi dan diteliti lebih dalam lagi. Pada zaman dahulu, pada umumnya suatu produk dimanufaktur oleh sebuah pabrik atau *workshop* yang sama. Apabila ditemukan komponen-komponen yang bermasalah yang tidak dapat dirakit, maka biasanya ada seorang pekerja ahli yang langsung memperbaiki komponen tersebut (misalnya: memperbesar suatu fitur lubang dengan melakukan suatu proses pengeboran tambahan, memotong bagian-bagian tertentu dari komponen tersebut sehingga bisa saling dirakit, memberikan gaya tambahan dalam proses perakitan tersebut agar sebuah komponen dapat digabungkan dengan komponen lainnya, dan lain-lain). Metode ini, sering disebut dengan metode *custom fit* yang sangat lambat dan tidak dapat diterapkan untuk produksi massal (*mass production*). Selain itu, metode ini membutuhkan seorang pekerja dengan tingkat keahlian yang didapatkan dari pengalaman-pengalaman dalam kurun waktu yang lama (pada umumnya dalam waktu tahunan). Selain itu, apabila membutuhkan suatu komponen pengganti pada suatu tahapan perakitan, komponen-komponen yang berada di inventori tidak dapat langsung dipasang karena harus disesuaikan dengan suatu produk yang membutuhkannya.

Namun demikian, zaman sekarang menuntut semua perusahaan untuk dapat memproduksi barang dengan cepat, mereduksi biaya produksi, mengurangi ketergantungan pada pekerja dengan keahlian yang tinggi, komponen-komponen pembentuk suatu produk berasal dari perusahaan-perusahaan lainnya (globalisasi), kebutuhan *interchangeability* dan lain-lain. Maka dari itu, metode *custom fit* tersebut tidak dapat diterapkan karena sangat lambat dan menambah biaya produksi yang tinggi.

Terakhir mengenai toleransi, baik dimensi maupun geometri, verifikasi toleransi harus dilakukan untuk semua komponen secara individual atau semua produk yang terakit dari komponen-komponen individual. Verifikasi toleransi adalah sebuah proses pengukuran untuk mengetahui (memverifikasi) apakah suatu komponen yang dimanufaktur atau suatu produk yang dirakit telah memenuhi atau masih dalam limit toleransinya. Untuk pembahasan detail mengenai verifikasi toleransi atau proses pengukuran, pembaca dapat merujuk pada buku [Syam 2018].

1.4 Karakteristik kunci (*key characteristic/KC*) perakitan dan fitur perakitan (*Assembly feature*)

Dalam suatu proses perakitan, ada sebuah fitur yang harus didapatkan sesuai dengan toleransinya, misalnya jarak antara *engine hood* and *side panel* dari sebuah badan mobil, dua buah lubang dari dua komponen yang berbeda harus saling koaksial, jarak atau *clearance* antara rotor dan stator dari sebuah kompresor berputar (*rotating compressor*) harus berada antara 0-0.2 mm, dan coaxiality dari sumbu dua buah poros yang berputar. Fitur yang ingin didapatkan setelah proses perakitan tersebut adalah karakteristik kunci (*key characteristic/KC*) yang selanjutnya dalam buku ini akan disingkat menjadi KC. KC adalah suatu karakteristik yang diinginkan untuk sebuah produk yang sudah terakit. Gambar 4 dan gambar 5 memperlihatkan beberapa contoh riil dari KC untuk perakitan benda non-rigid (*misalnya sheet metal*) dan perakitan benda rigid (benda pejal).

Pada Gambar 4, beberapa KC untuk sebuah perakitan badan mobil yang bersifat non-rigid diperlihatkan. Pada Gambar 4 sebelah kiri, KC yang ingin dicapai pada proses perakitan tersebut adalah jarak atau *gap/clearance* antara *engine hood* dan *side panel* (*fender*) dari badan mobil tersebut. Karena adanya tumpukan (*stack-up*) dari berbagai variasi yang berasal dari banyak sumber, misalnya, variasi dari komponen lembaran metal yang dimanufaktur dari *engine hood* dan *fender* tersebut, variasi yang berasal dari kesalahan prosedur pemasangan oleh seorang operator dan variasi yang bersumber dari kesalahan *fixturing* dan efek material (*spring-back effect*), maka jarak tersebut akan selalu berbeda (bervariasi) dari satu proses perakitan ke proses perakitan yang lainnya, dan seterusnya. Pada Gambar 4 sebelah kanan, KC yang ingin dicapai adalah agar dua buah lubang dari *roof* dan *top-back panel* agar saling koaksial sehingga sebuah baut dapat dimasukkan kedalamnya. Sama seperti sebelumnya, lokasi kedua lubang dari kedua komponen *sheet-metal* tersebut akan selalu berubah-ubah dari satu proses perakitan ke proses perakitan selanjutnya.

Pada Gambar 5, beberapa KC untuk sebuah perakitan benda pejal (rigid) yaitu sebuah perakitan kompresor sentrifugal diperlihatkan, yaitu: jarak antara poros berputar dengan *casing* kompresor tersebut, *coaxiality* dari setiap aksis dari dua poros yang berputar dan *coaxiality* aksis dari dua lubang untuk pemasangan baut pengencang (lihat Gambar 5). Seperti pada benda-benda non-rigid, semua KC tersebut selalu mempunyai nilai berubah-ubah karena berbagai variasi dari berbagai sumber seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada kasus variasi pada perakitan benda non-rigid. Maka dari itu, tidak ada dua jenis benda yang sama walaupun benda tersebut memiliki desain, proses manufaktur dan prosedur perakitan yang persis sama karena banyaknya sumber-sumber variasi yang terjadi mulai dari variasi proses manufakturnya sampai dengan variasi dari proses perakitannya.

Gambar 4: Beberapa contoh karakteristik kunci (KC) untuk perakitan benda-benda non-rigid (*sheet-metal*) pada sebuah badan mobil.

Gambar 5: Beberapa contoh karakteristik kunci (KC) untuk sebuah perakitan benda rigid pada sebuah pompa sentrifugal.

Sebuah **fitur** didefinisikan (menurut ASME Y14.5-2009) sebagai sebuah bagian dari sebuah komponen yang mempunyai fungsi tertentu, misalnya sebuah lubang, sebuah slot, sebuah pin, sebuah permukaan benda yang mempunyai bentuk kompleks dan/atau mempunyai fungsi tertentu. Sedangkan **fitur perakitan** (*assembly feature*) adalah fitur-fitur pada sebuah komponen yang mempunyai fungsi atau terlibat dalam suatu proses perakitan komponen tersebut dengan komponen lainnya. Ada dua klasifikasi utama dari sebuah fitur [Whitney 2004]:

- **Fitur pasangan (*Mate*).**

Fitur yang berfungsi sebagai penentu lokasi dua buah komponen yang saling dirakit. Fitur ini harus mempunyai tingkat akurasi dan presisi yang tinggi, karena fitur inilah yang langsung menentukan kualitas KC yang diinginkan dalam suatu proses perakitan suatu komponen dengan komponen lainnya. Fitur ini berfungsi untuk dapat memposisikan dan mengorientasikan komponen-komponen secara akurat dan presisi dalam sebuah proses perakitan. Selain itu, fitur ini memberikan batasan (constraint) pergerakan rakitannya.

- **Fitur kontak (*Contact*).**

Fitur yang berfungsi untuk memperkuat dua benda yang dirakit dan tidak mempengaruhi kualitas KC yang diinginkan. Fitur ini tidak perlu mempunyai akurasi yang tinggi dalam proses manufakturnya (mengurangi biaya produksi), karena fungsi utamanya adalah untuk menahan agar suatu hasil rakitan dua buah komponen atau lebih tidak bergerak dan kokoh setelah dirakit. Fitur pasangan dan kontak akan dijelaskan dengan lebih detail dibagian selanjutnya.

Desain sebuah komponen dan produk yang baik harus mempunyai kedua fitur pasangan dan kontak. Selain itu, kedua fitur tersebut harus seragam (dalam artian mempunyai bentuk dan ukuran yang serupa) untuk berbagai macam varian komponen-komponennya, sehingga memudahkan untuk proses perakitan. Desain suatu komponen atau produk yang memiliki kedua fitur tersebut, terutama fitur pasangan, mempunyai sebuah keuntungan yang sangat signifikan (essensial), yaitu komponen-komponen atau produk tersebut akan dapat saling memposisikan antara komponen-komponen tersebut dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi, dengan kata lain dapat dipasang atau saling “snap” tanpa atau dengan minimal sebuah sistem *fixture*.

Dalam situasi tertentu, merubah desain suatu produk sehingga membutuhkan proses perakitan yang mudah atau dapat dirakit dengan sebuah mesin perakitan, atau bahkan tidak membutuhkan sebuah mesin perakitan sama sekali, merupakan strategi yang paling ekonomis untuk menekan biaya suatu proses perakitan, dibandingkan, misalnya menambah robot-robot atau mesin-mesin khusus (dengan sensor-sensor, dan *fixture* yang khusus pula) untuk mempercepat proses perakitan tersebut (sehingga meningkatkan jumlah *output* unit persatuan waktu).

Sebuah proses perakitan yang baik haruslah mengurangi penggunaan *fixture* dan sensor-sensor khusus untuk membantu proses tersebut, mengakomodasi suatu proses sub-perakitan (*sub-assembly*), mengakomodasi suatu pos untuk dapat mengetes sub-perakitan tersebut sudah berfungsi dengan baik atau tidak sebelum digabungkan dengan komponen lainnya, fleksibel dalam hal dapat disesuaikan dengan berbagai jenis bentuk komponen-komponen, membutuhkan waktu konfigurasi dan *change-over* yang singkat, mempunyai diagram alur lengkap mengenai urutan-urutan proses perakitan termasuk daftar perusahaan tempat suatu komponen disuplai untuk keperluan proses perakitan tersebut, membutuhkan gaya (*force*) yang kecil dalam merakit dan menggabungkan komponen-komponennya, tidak atau meminimalkan kebutuhan operator ber-*skill* tinggi untuk melakukan proses perakitan tersebut.

Suatu proses perakitan produk yang efisien dan efektif harus sudah direncanakan mulai dari tahap desain produk tersebut. Suatu desain produk yang baik, desain tersebut akan mengintegrasikan dan mengoptimalkan fitur-fitur pasangan dan kontak pada setiap desain komponen-komponen yang membentuk produk tersebut. Dengan desain yang tepat, penggunaan sistem *fixture* dalam proses perakitannya dapat diminimalkan atau dapat dihilangkan sama sekali. Hal ini mengakibatkan proses perakitan tersebut menjadi fleksibel dan mudah untuk mengganti-ganti jenis komponen yang akan dirakit. Dengan desain fitur-fitur pasangan yang baik, maka komponen-komponen akan dapat saling memposisikan dan mengorientasikan, sehingga dapat mengurangi atau menghilangkan kebutuhan *fixture* (yang berfungsi untuk dapat memposisikan dan mengorientasikan suatu komponen secara akurat dan presisi relatif terhadap komponen pasangannya) pada proses perakitan produk tersebut. Dengan desain yang baik, proses perakitan suatu produk akan semakin mudah, sehingga biaya produksi akan berkurang dan jumlah produksinya akan meningkat.

Fitur pasangan (*mate*) dan fitur kontak (*contact*)

Untuk lebih memahami mengenai fungsi penting dari fitur pasangan dan kontak, penjelasan dengan beberapa contoh yang paling sederhana diperlihatkan, yaitu: **Contoh 1** - contoh perakitan dua buah komponen yang hanya memiliki fitur kontak dan tidak memiliki fitur pasangan sama sekali, **Contoh 2** - contoh perakitan dua buah komponen yang memiliki fitur pasangan dan kontak tetapi mengalami *over-constraint*, dan **Contoh 3** - contoh perakitan dua buah komponen yang memiliki fitur pasangan dan kontak dan memenuhi kondisi *kinematic-constraint*.

Ketiga contoh tersebut berupa dua komponen balok yang akan digabungkan menjadi satu kesatuan. Komponen balok yang satu hanya memiliki lubang dan komponen balok yang lainnya hanya memiliki pin. Lubang dan pin pada komponen-komponen tersebut merupakan fitur perakitan (*assembly feature*). Karena, fitur lubang dan pin tersebutlah yang akan saling berinteraksi atau berpasangan untuk dapat merakit kedua komponen balok tersebut.

Hal penting yang perlu diingat adalah pada kondisi riil, bentuk-bentuk komponen yang akan dirakit memiliki kompleksitas yang jauh lebih tinggi. Namun demikian, seberapapun rumitnya komponen-komponen yang akan dirakit, konsep dasarnya tetap sama, yaitu kembali kepada fitur pasangan dan kontak yang akan dibahas. Seberapa kompleksnya suatu komponen, untuk analisis proses perakitannya, kita hanya butuh untuk melihat fitur perakitan yang ada dikomponen tersebut (fitur pasangan dan kontak).

Contoh 1, yaitu perakitan dua buah komponen yang hanya memiliki fitur kontak dan tidak memiliki fitur pasangan sama sekali, diperlihatkan pada gambar 6. Pada gambar 6, salah satu komponen tersebut mempunyai fitur perakitan berupa empat lubang (kolom bagian kiri) dan komponen lainnya memiliki fitur perakitan berupa empat pin (kolom bagian kanan). Dalam proses perakitan kedua komponen tersebut, tujuan utama perakitan tersebut adalah agar fitur pin dapat masuk ke dalam fitur lubang tersebut sehingga kedua komponen tersebut dapat menyatu secara tepat. Maka dari itu, hanya fitur lubang dan pin tersebutlah yang mempengaruhi kualitas perakitan tersebut. Gambar 6a memperlihatkan tampak 2D dari kedua komponen tersebut. Diameter pin, yaitu 15 mm, dibuat lebih kecil daripada diameter lubang, yaitu 20 mm, untuk memudahkan pin tersebut masuk ke lubang pasangannya ketika dirakit. Sedangkan, gambar 6b memperlihatkan tampak isometri dari kedua komponen tersebut. Proses perakitan dan hasil idealnya, yaitu kedua komponen tersebut saling sejajar dan seluruh sisinya saling sama rata, diperlihatkan pada gambar 6c.

Pada contoh ini, karena kedua komponen tersebut tidak memiliki fitur pasangan (hanya memiliki fitur kontak). Maka, dalam proses perakitannya, kedua komponen tersebut masih dapat bergerak ke arah 360°, yaitu masih dapat bergerak translasi dan rotasi, dalam sebuah bidang planar. Pergerakan kedua komponen tersebut dalam bidang planar diperlihatkan pada gambar 7. Hal ini disebabkan karena dengan tidak adanya fitur pasangan, fitur kontak kedua komponen tersebut tidak dapat saling diposisikan dan diorientasikan secara akurat dan presisi. Apabila perakitannya diulang, maka hasil rakitan kedua komponen tersebut akan selalu berbeda secara signifikan. Fungsi fitur-fitur kontak dari lubang dan pin tersebut hanya sebagai penguat untuk kedua komponen tersebut yang saling dirakit.

Jenis proses perakitan pada contoh 1 tersebut membutuhkan suatu sistem *fixture* untuk dapat memposisikan dan mengorientasikan kedua komponen tersebut agar bisa dirakit secara benar, yaitu semua sisi dari komponen tersebut yang sejajar saling sama rata. Gambar 8 memperlihatkan contoh *fixture* sederhana yang digunakan untuk dapat memposisikan dan mengorientasikan kedua komponen tersebut pada saat proses perakitannya agar mencapai hasil yang diinginkan. Selain itu, *fixture* tersebut membatasi (*constraint*) pergerakan translasi dan rotasi dari kedua komponen tersebut (karena fitur kontak yang dimilikinya tidak dapat memenuhi fungsi tersebut), sehingga proses perakitannya dapat dilakukan dengan benar dan apabila proses perakitan tersebut diulang-ulang, maka posisi dan orientasi kedua komponen tersebut akan menjadi akurat dan hasil proses rakitannya akan menjadi akurat juga.

Dari contoh 1 tersebut, dapat diperlihatkan bahwa desain yang kurang tepat dari kedua komponen tersebut akan membuat proses perakitannya menjadi lebih rumit dan membutuhkan alat bantu sebuah *fixture*. Kesalahan pada desain komponen tersebut adalah, kedua komponen tersebut tidak mempunyai fitur pasangan (*mate*) sehingga proses perakitannya harus menggunakan alat bantu *fixture*. Selain proses perakitan yang lebih rumit, biaya proses perakitannya menjadi lebih tinggi pula. Karena, biaya tambahan muncul untuk mendesain dan memanufaktur *fixture* tersebut. Contoh 1 memberikan contoh yang paling sederhana untuk menjelaskan bagaimana suatu desain dapat mempengaruhi suatu proses perakitan dan untuk menjelaskan fungsi dasar suatu *fixture* dalam proses perakitan, yaitu sebagai alat bantu penempatan komponen secara akurat dan untuk menahan komponen agar tidak bergerak.

Gambar 6: Contoh 1. (a) Tampak 2D dari dua buah komponen yang akan dirakit dimana kedua komponen tersebut tidak mempunyai fitur pasangan dan hanya mempunyai empat fitur kontak, (b) Tampak isometri dari kedua komponen tersebut, (c) proses dan hasil perakitan dari kedua komponen tersebut.

Gambar 7: Posisi rakitan dari dua komponen yang bisa bergeser pada sebuah bidang planar karena kedua komponen tersebut tidak mempunyai fitur pasangan yang berfungsi sebagai “*mate*”. Hasil perakitannya mengalami *under-constraint* yaitu hasil rakitannya masih mempunyai gerak relative antara satu komponen dengan komponen lainnya.

Gambar 8: Proses perakitan kedua komponen tersebut membutuhkan bantuan *fixture* untuk dapat memposisikan dan mengorientasikan kedua komponen tersebut dalam proses perakitannya. Catatan: *Fixture* yang ditampilkan hanya sebagai *locator*, tetapi tidak menggunakan *clamping*.

Contoh 2 memperlihatkan sebuah contoh perakitan dua buah komponen yang memiliki fitur pasangan (*mate*), tetapi mengalami *over-constraint*. Pembaca dapat merujuk pada [Syam 2018, Bab 4.4.8] untuk penjelasan lebih detail mengenai *over-constraint*, *kinematic constraint* dan *under-constraint*. Gambar 9 memperlihatkan gambar 2D, isometri dan proses perakitan untuk contoh 2 tersebut. fitur-fitur pasangan pada kedua komponen tersebut adalah dua fitur lubang dan fitur pin yang masing-masing mempunyai ukuran diameter sebesar 10 mm (*perlu dicatat bahwa contoh 1, contoh 2 dan contoh 3 diasumsikan pada kondisi ideal, yaitu komponen-komponen tersebut dapat dimanufaktur secara sempurna sesuai dengan dimensi desainnya. Sehingga toleransi pada dimensi-dimensi tersebut tidak diberikan atau dianggap bernilai nol*). Fitur-fitur lubang dan pin lainnya adalah fitur kontak yang masing-masing mempunyai diameter 20 mm. Fitur-fitur pasangan tersebutlah yang memberikan atau membatasi pergerakan kedua komponen tersebut setelah dirakit dan fitur-fitur kontak hanya untuk memperkuat rakitan kedua komponen tersebut (pada umumnya hanya untuk memasukkan baut untuk penguatan). Gambar 9c memperlihatkan proses perakitan dan hasil perakitan dari kedua komponen tersebut. Karena kedua komponen tersebut memiliki jumlah yang cukup fitur-fitur pasangan yang dapat memposisikan dan mengorientasikan kedua komponen tersebut, maka sebuah sistem *fixture* tidak dibutuhkan dalam proses perakitannya.

Gambar 10 memperlihatkan secara detail fitur-fitur pasangan dan kontak pada kedua komponen tersebut dan bagaimana hasil rakitannya. Pada gambar 10, terdapat *over-constraint* pada hasil proses perakitan tersebut. Hal ini disebabkan karena batasan pergerakan translasi planar dibatasi oleh lebih dari satu fitur pasangan, sehingga batasan pergerakan tersebut menjadi berlebihan. Efek negatif dari *over-constraint* adalah apabila terdapat deviasi sekecil apapun pada dimensi dari diameter dan lokasi lubang dan pin (fitur-fitur pasangan), maka proses perakitannya akan menjadi susah untuk dilakukan dan proses perakitan kedua komponen tersebut (pada umumnya) menggunakan gaya tambahan untuk dapat menggabungkan kedua komponen tersebut. Hal ini mengakibatkan akan terjadinya deformasi pin-pin tersebut dan adanya *residual stress* pada kedua komponen tersebut setelah dirakit.

Contoh 3 memperlihatkan sebuah contoh perakitan dua buah komponen yang memiliki fitur pasangan yang tepat sehingga sebuah rakitan yang mempunyai *kinematic-constraint* didapatkan. Gambar 11 memperlihatkan gambar 2D, isometri dan proses perakitan untuk contoh 3 tersebut. Pada gambar 11a, terdapat dua buah fitur pasangan pada masing-masing komponen. Komponen yang berfitur lubang, mempunyai dua fitur pasangan dengan bentuk yang berbeda: yang pertama berbentuk lingkaran dengan diameter 15 mm dan yang kedua berbentuk slot dengan dimensi lebar 15 mm dan panjang 20 mm (> 15 mm). Proses perakitan kedua komponen tersebut tidak membutuhkan sebuah sistem *fixture* karena posisi dan orientasi kedua komponen tersebut didapatkan dari fitur-fitur pasangan tersebut dan fitur-fitur pasangannya dapat membatasi pergerakan relatif, baik pergerakan translasi maupun rotasi, kedua komponen tersebut setelah dirakit.

Gambar 12 memperlihatkan detail dari bentuk kedua fitur pasangan dari komponen-komponen tersebut. Pada Contoh 3 ini, kedua fitur pasangan yang berbeda bentuk tersebut dan fungsinya diperlihatkan. Hasil proses perakitan contoh 3 pada gambar 12 mempunyai batasan gerak secara kinematik (*kinematic-constraint*). **Batasan gerak tersebut didapatkan dari:**

- Fitur pasangan yang berbentuk lingkaran dengan diameter 15 mm memberikan batasan **gerak translasi** relatif dari kedua komponen tersebut pada bidang planar.
- Fitur pasangan yang berbentuk slot dengan lebar 15 mm dan panjang 20 mm memberikan batasan **gerak rotasi** relatif dari kedua komponen tersebut.

Sehingga, batasan gerak pada contoh 3 setelah dirakit didapatkan hanya dari salah satu fitur pasangan kedua komponen tersebut. Tidak ada batasan gerakan relatif yang berlebihan atau lebih dari satu.

Dari contoh 1, contoh 2 dan contoh 3 tersebut, diperlihatkan bahwa dengan melakukan desain komponen-komponen secara tepat, proses perakitan yang lebih mudah dan dengan biaya lebih rendah akan didapatkan. Ketiga contoh perakitan tersebut hanyalah sebuah ilustrasi yang paling sederhana untuk menjelaskan bahwa suatu proses perakitan suatu produk harus didisain dengan tepat mulai dari tahap proses desain komponen-komponen produk tersebut. Pada kondisi riil, desain komponen-komponen akan jauh lebih kompleks dari ketiga contoh tersebut, namun demikian komponen-komponen kompleks tersebut mempunyai konsep fitur-fitur perakitan yang serupa dengan yang dimiliki oleh komponen-komponen pada ketiga contoh tersebut dan analisis proses perakitannya juga fokus pada fitur-fitur perakitan tersebut.

Gambar 9: Contoh 2. (a) Tampak 2D dari dua buah komponen yang akan dirakit yang mempunyai dua fitur pasangan pada setiap komponennya ada dua fitur kontak, (b) Tampak isometri dari kedua komponen tersebut, (c) proses dan hasil perakitan dari kedua komponen tersebut yang memiliki *over-constraint*.

Gambar 10: Rakitan dari dua buah komponen yang *over-constraint* karena mempunyai fitur pasangan secara berlebihan, yaitu baasan (*constraint*) pergerakan planar dari salah satu komponennya dibatasi oleh lebih dari satu fitur pasangan.

Studi teoritis mengenai *under-constraint*, *kinematic-constraint* dan *over-constraint* dari fitur-fitur perakitan yang menggabungkan dua atau lebih komponen berlandaskan pada **teori screw** [Adams dan Whitney 2001]. Teori screw tersebut memberikan metodologi bagaimana secara numerik menghitung hubungan atau relasi fitur-fitur perakitan satu komponen dengan komponen lainnya untuk mengetahui apakah suatu proses perakitan dari komponen-komponen tersebut mengalami *under-constraint*, *kinematic-constraint* dan *over-constraint*. Desain yang tepat untuk fitur-fitur perakitan suatu komponen adalah sedemikian rupa sehingga fitur-fitur tersebut dapat dirakit secara kinematik atau mempunyai *kinematic-constraint* (seperti contoh pada Gambar 12). Desain fitur-fitur perakitan yang tidak tepat akan mengakibatkan hasil rakitannya mengalami *under-constraint* atau *over-constraint*. *Under-constraint* adalah suatu kondisi dimana suatu produk hasil dari suatu perakitan masih mengalami gerak relatif terhadap komponen-komponen pembentuknya (seperti contoh pada Gambar 7). Sedangkan, *over-constraint* adalah suatu kondisi dimana suatu produk hasil dari suatu proses perakitan mempunyai tegangan struktur tersisa (*residual stress*) seperti contoh pada Gambar 10. Karena *over-constraint*, tegangan struktur tersisa tersebut dapat mengakibatkan suatu produk yang terkait mengalami deformasi (yang paling sering ditemukan pada suatu proses perakitan lembaran metal untuk badan mobil misalnya) atau permukaan produk tersebut menjadi lebih reaktif terhadap lingkungannya yang dapat menyebabkan, misalnya, cepatnya proses korosi permukaan produk tersebut.

Dari ketiga contoh yang paling sederhana tersebut, proses perakitan merupakan proses yang harus didesain (tidak hanya berlandaskan dari pengalaman atau intuisi saja). Salah satu alat pemodelan suatu proses perakitan adalah metode datum flow chain (DFC) [Mantripragada dan Whitney 1998, Whitney 1999]. Pada buku ini, analisis dari rantai toleransi akan menggunakan metode DFC tersebut. Metode desain proses perakitan dan analisis rantai toleransi dapat memberikan keuntungan yang signifikan dalam industri, misalnya, contoh yang paling nyata adalah pabrikan mobil BMW menerapkan metode desain perakitan dan analisis rantai toleransi untuk dapat mendesain suatu proses perakitan yang dapat mengeliminasi kebutuhan suatu sistem *fixture* yang sangat berdampak besar pada pengurangan biaya produksi dan makin fleksibelnya sistem perakitannya untuk mengakomodasi berbagai perakitan badan mobil dengan berbagai bentuk [Schlather 2018].

(a)

(b)

(c)

Gambar 11: Contoh 3. (a) Tampak 2D dari dua buah komponen yang akan dirakit yang mempunyai dua fitur pasangan pada setiap komponennya ada dua fitur kontak, (b) Tampak isometri dari kedua komponen tersebut, (c) proses dan hasil perakitan dari kedua komponen tersebut yang memiliki *kinematic-constraint*.

Gambar 12: Rakitan dari dua buah komponen yang mempunyai *kinematic-constraint* karena mempunyai fitur pasangan yang jumlahnya tepat, yaitu batasan (*constraint*) pergerakan planar dari salah satu komponennya dibatasi secara tepat dari kedua fitur pasangan tersebut dengan bentuk yang berbeda.

1.5 Sistem *fixture*

Sebuah proses perakitan membutuhkan sebuah sistem *fixture*. **Sistem *fixture*** adalah sebuah sistem yang digunakan untuk menahan, memegang dan merekonstruksi antarmuka antara sebuah komponen relatif terhadap komponen lainnya atau *end-effector* sebuah robot (untuk proses perakitan) atau antara sebuah komponen relatif terhadap sebuah *tool* atau mata pahat (untuk proses permesinan) [Gameros et al 2017]:

Sistem *fixture* mempunyai fungsi yang fundamental, yaitu:

- **Fungsi *locator***, yaitu untuk secara akurat dan presisi memposisikan dan mengorientasikan suatu komponen pada bidang Euclidean (dengan menghilangkan gerak relatif atau DoF pada tiga arah translasi dan tiga arah rotasi). Dengan adanya fungsi *locator*, maka suatu komponen dapat diposisikan secara deterministik yang artinya apabila suatu komponen secara berulang-ulang diambil dan ditempatkan kembali, maka komponen tersebut akan berada pada posisi yang sama. Penjelasan lebih dalam mengenai *fixture* kinematik dan “3-2-1 rule” dapat dilihat di [Syam 2018 bab 4.4.8].
- **Fungsi *clamping***, yaitu fungsi untuk menahan suatu komponen atau benda kerja agar tetap berada diposisinya ketika mendapat gaya dari luar, misalnya pada saat proses pemessinan atau saat proses perakitan. Fungsi *clamping* mengandalkan adanya gaya gesekan antara *clamp* dengan benda kerja atau komponen. Secara praktis, *clamping* berusaha untuk mendorong sebuah benda kerja atau komponen kearah *locator*-nya.

Adapun fungsi tambahan dari sistem *fixture* adalah:

- **Fungsi *support (base)***, yaitu fungsi untuk meminimalkan deformasi suatu komponen atau benda kerja pada saat proses perakitan atau permesinan, yang disebabkan, misalnya karena gaya gravitasi yang terjadi pada komponen tersebut.

- **Fungsi guide**, yaitu sebagai alat bantu suatu *actuator* atau mata pahat (*tool*) agar dapat mencapai suatu posisi yang diinginkan pada suatu komponen pada saat proses perakitan atau permesinan. Dengan kata lain, fungsi *guide* menandakan suatu sistem *fixture* yang berinteraksi dengan suatu *tool* atau aktuator (misalnya lengan robot). Nama lain dari *fixture* yang memiliki fungsi *guide* (dan berinteraksi dengan *tool* atau aktuator) disebut dengan **jig**. *jig* sangat umum ditemukan, misalnya, pada proses pengeboran (*drilling*) untuk mendapatkan lokasi pengeboran yang akurat dan pada proses sebuah perakitan badan mobil. Selain itu, sistem *fixture* juga sangat dibutuhkan untuk proses pengukuran suatu komponen sehingga suatu komponen tidak bergerak dan dapat diposisikan secara akurat sebelum suatu proses pengukuran dapat dilakukan, misalnya pengukuran dengan *coordinate measuring machine* (CMM) [Syam 2015, Syam 2018]. Di Industri, istilah “*fixture*” dan “*jig*” sering tertukar satu sama lainnya. Selain itu banyak yang memberikan nama sebagai “*fixture* dan *jig*”.

Keuntungan-keuntungan yang didapatkan dengan sistem *fixture* adalah: meningkatnya kualitas produk rakitan, meningkatnya tingkat presisi dari suatu proses perakitan dan dapat menurunkan total biaya perakitan (dan juga produksi). Namun demikian, desain suatu produk yang baik harus dapat mengurangi penggunaan sistem *fixture* dalam proses perakitannya namun tetap memudahkan proses perakitan tersebut. Karena, biaya-biaya dari sistem *fixture* dalam suatu proses perakitan dapat mencapai 20 % dari total biaya sistem perakitannya [Bi et al 2001].

Gambar 13 memperlihatkan sebuah contoh ideal sebuah sistem *fixture* yang terdiri dari *locator*, *locator-support* (*base*) dan *clamping* dan menggambarkan sistem *fixture* ideal “3-2-1”. Sistem *fixture* tersebut untuk suatu benda kerja yang berbentuk balok. Perlu diingat bahwa pada kondisi riil, sistem-sistem *fixture* yang digunakan akan jauh berbeda dari kondisi ideal tersebut karena kompleksnya bentuk benda kerja atau komponen yang akan dirakit atau dimanufaktur (untuk proses permesinan) atau diukur (untuk proses inspeksi kualitas). Pada Gambar 13, terdapat tiga buah *locator-support* (*base*), dua buah *locator* pada sisi panjang, satu buah *locator* pada sisi pendek dan tiga buah *clamping* yang saling berlawanan secara simetri terhadap ketiga *locator* tersebut (untuk keseimbangan gaya dan meminimalkan momen).

Gambar 13: Sebuah contoh ideal sistem *fixture* yang terdiri dari *locator* dan *clamping*. Pada contoh ini, *locator* (warna hijau dan kuning) berfungsi untuk membatasi pergerakan sebuah benda kerja (membatasi *degree of freedom* /DoF) dan *clamping* (warna biru) untuk memperkuat benda kerja untuk melawan gaya yang berkerja pada benda kerja tersebut (dengan menggandakan gaya gesek antara *clamping* dengan benda kerja).

Fungsi dari ketiga *locator-support (base)* tersebut adalah untuk membatasi gerak (DoF) secara vertikal yang diakibatkan oleh gaya gravitasi terhadap benda kerja tersebut. Dua buah *locator* pada sisi panjang untuk membatasi gerak (DoF) benda tersebut pada arah horizontal x . Sedangkan, satu buah *locator* pada sisi pendek berfungsi untuk membatasi gerak pada arah horizontal y . Konfigurasi merupakan konfigurasi “3-2-1”. Untuk *clamping*, terdapat tiga buah *clamping* yang masing-masing berlawanan arah terhadap ketiga *locator*-nya untuk menjaga agar benda kerja tersebut tetap berada pada posisinya ketiga diberi gaya dari luar (misalnya gaya dari proses perakitan atau gaya dari mata pahat suatu proses permesinan). Sistem *fixture* “3-2-1” tersebut mempunyai atribut *kinematic-constraint*.

Gambar 14 memperlihatkan dua buah contoh riil dari sistem *fixture* untuk benda rigid (pejal) dan benda non-rigid (lembaran metal/*sheet-metal*). Dari Gambar 14, dapat dilihat bahwa bentuk-bentuk sistem *fixture* yang terdapat di industri mempunyai bentuk yang kompleks untuk dapat mengakomodasi bentuk-bentuk benda kerja yang kompleks pula. Pada gambar 14 kiri, sistem *fixture* tersebut bersifat modular, yaitu sistem *fixture* tersebut dapat dikonfigurasi ulang bentuknya untuk mengakomodasi bentuk-bentuk benda kerja yang berbeda-beda.

Sistem *fixture-jig* (atau sering disebut sebagai *jig* saja) diperlihatkan pada Gambar 15. Pada Gambar 15, sistem *fixture* juga terdiri dari *locator (support/base)* and *clamping* dengan tambahan suatu alat bantu yang dapat memandu sebuah mata bor untuk dapat melakukan pengeboran dengan lokasi yang akurat (contoh untuk sebuah proses permesinan). Alat bantu inilah yang membedakan antara sistem *fixture* dan sistem *jig*. Sehingga, ciri-ciri sebuah sistem *jig* adalah sistem tersebut “berinteraksi” dengan sebuah *actuator* atau *end-effector* sebuah robot (untuk proses perakitan atau pengukuran) atau sebuah mata pahat/*tool* (untuk proses permesinan).

Gambar 14: (kiri) sebuah contoh riil sebuah sistem *fixture* untuk benda pejal atau rigid [<https://www.halder.com/de/Produkte/Werkstueckspannung>], (kanan) sebuah contoh riil sebuah sistem *fixture* untuk lembaran metal atau benda non-rigid [<https://www.witte-barskamp.com/products/modular-fixturing-systems/fixtures-jigs.php>]. Contoh pada gambar sebelah kanan merupakan *fixture* modular yang dapat dikonfigurasi ulang untuk disesuaikan dengan bentuk sebuah benda karya yang kompleks.

Gambar 15: (kiri) sebuah contoh dari *fixture-jig* dimana terdapat alat bantu atau *guide* untuk mengarahkan mata bor atau *tool* [Gameros et al 2017] dan contoh riil dari sebuah *fixture-jig* pada sebuah proses pengeboran metal (kanan) [<http://www.adroitenggrs.com/Product/jigs>].

Sistem *fixture* yang umum untuk perakitan lembaran metal badan mobil diperlihatkan pada Gambar 16. Pada Gambar 16, sistem tersebut diperlihatkan pada kondisi terbuka dan tertutup. Gambar 17 memperlihatkan contoh riil dari proses perakitan sebuah badan mobil menggunakan sebuah sistem *fixture* yang umumnya dipakai pada proses perakitan badan mobil di industri-industri otomotif. Gambar 18 memperlihatkan dua jenis locator dari suatu sistem *fixture* untuk proses perakitan badan mobil, yaitu **locator kontak** dan **locator non-kontak**. *Locator* kontak pada umumnya berbentuk sebuah pin dan *locator* non-kontak umumnya menggunakan *proximity sensor* untuk mendeteksi adanya lubang atau tidak pada sebuah lembaran metal badan mobil.

Suatu sistem *fixture* yang jauh lebih kompleks untuk seluruh *side panel* dari sebuah mobil diperlihatkan pada Gambar 19. Pada Gambar 19, sebuah sistem *fixture* yang kompleks terdiri dari ratusan *locator* dan *clamping*. Gambar 20 memperlihatkan beberapa contoh riil dari suatu proses perakitan badan mobil, yaitu untuk proses perakitan *side-back panel*, *side-panel* dan *roof-panel* dari sebuah mobil. Sebuah desain *fixture* yang tepat sangat mempengaruhi tingkat akurasi dari proses perakitan tersebut.

Namun demikian, hal penting yang perlu diingat adalah sebarangpun kompleksnya suatu sistem *fixture*, semuanya kembali kepada konsep dasarnya, yaitu fungsi *locator* dan fungsi *clamping* atau dengan tambahan fungsi *guide* (pemandu).

Gambar 16: Contoh dari sistem *fixture* yang terdiri dari *clamping* dan *locator* yang sangat umum digunakan untuk sebuah proses perakitan lembaran metal (*sheet-metal*) dari badan mobil. *Locator* pada *fixture* ini berupa *base* untuk meletakkan dan meletakkan sebuah lembaran metal.

Gambar 17: Contoh riil dari system *fixture* untuk sebuah proses perakitan badan mobil.

Gambar 18: Contoh riil dari jenis-jenis *locator* dari sebuah sistem *fixture* untuk sebuah proses perakitan badan mobil. Jenis-jenis *locator* tersebut dapat dengan kontak maupun dengan non-kontak.

Gambar 19: Contoh riil dari sebuah sistem *fixture* untuk *side panel* dari sebuah badan mobil. Sistem *fixture* tersebut sangat kompleks dan terdiri dari banyak *locator* and *clamping*.

1.6 Contoh-contoh proses perakitan

Pada bagian ini, beberapa contoh riil proses perakitan di sebuah industri otomotif diperlihatkan, yaitu berupa proses perakitan otomatis (menggunakan robot *spot-welding*) dan manual. Hal penting yang perlu diingat bahwa proses perakitan manual tidak berarti adalah suatu proses yang harus dieliminasi. Penentuan untuk memilih apakah suatu proses perakitan secara otomatis, semi-otomatis atau manual harus mempertimbangkan aspek-aspek menyeluruh menyangkut biaya, peralatan, kompleksitas benda kerja, dan lain sebagainya. Untuk proses perakitan yang sangat kompleks, misalnya perakitan *dashboard* atau alat-alat yang banyak berkaitan dengan kabel, mungkin proses perakitan manual adalah pilihan yang tepat karena investasi otomatisasi proses perakitan yang kompleks tersebut akan sangat mahal, tetapi, dengan kompensasi bahwa proses perakitan manual tersebut tidak akan secepat apabila dilakukan secara otomatis.

Gambar 21 dan Gambar 22 memperlihatkan contoh dari perakitan otomatis dengan robot *spot welding* untuk sebuah proses perakitan *back-panel* dan *tail-floor* sebuah mobil. Sedangkan, Gambar 23 memperlihatkan proses perakitan manual pada final *assembly line* sebuah industri otomotif. Gambar 23 memperlihatkan contoh dari perakitan untuk pemasangan mesin ke mobil, gardan mobil dan pemasangan sistem suspensi. Sampai saat ini, untuk final *assembly line* suatu industri otomotif, proses perakitan manual masih banyak diterapkan. Selain yang diperlihatkan pada Gambar 23, contoh-contoh proses perakitan manual lainnya pada final *assembly line* otomotif adalah, misalnya, perakitan *dash-board* dan sistem pelengkap.

Gambar 20: Contoh riil dari beberapa sistem *fixture* yang kompleks pada sebuah proses perakitan badan mobil. (kanan atas) proses perakitan *side-back panel* dan *back-pilar*, (kiri atas) proses perakitan *side-panel* dan (bawah) proses perakitan atap (*roof*) ke *front* dan *side-panel* sebuah mobil.

Gambar 21: Contoh riil dari sebuah proses perakitan badan mobil dengan menggunakan *robot-arm* untuk *spot welding*.

Gambar 22: Contoh riil dari sebuah proses *spot welding*.

Gambar 23: Contoh riil dari proses perakitan secara manual yang masih diterapkan pada *assembly line* di industri-industri otomotif. (kanan atas) proses perakitan sebuah mesin dan *gearbox*, (kiri atas) proses perakitan sebuah poros garden dan (bawah) proses perakitan dari sebuah sistem suspensi.

BAB 2

Distribusi normal, matriks transformasi dan kapabilitas proses

Bab ini memberikan dasar-dasar matematis untuk seluruh analisis yang berkaitan dengan analisis rantai variasi (toleransi) dalam buku ini. Tujuan bab ini adalah agar pembaca yang ingin merujuk lagi dasar matematis dari setiap perhitungan dalam buku ini dapat langsung merujuk ke bab 2 ini. Namun demikian, referensi-referensi utama juga diberikan bagi para pembaca yang ingin mengetahui dasar-dasar matematis tersebut dengan lebih dalam dan komprehensif. Bagi pembaca yang sudah paham mengenai dasar-dasar tersebut dapat segera melanjutkan ke bab 3. Dasar-dasar matematis tersebut pada umumnya didapatkan pada mata kuliah matematik dan statistika di semester 1,2 atau 3 pada tingkat universitas.

Bab ini dibagi menjadi empat bagian utama, yaitu analisis statistik, distribusi normal (*Gaussian distribution*), sistem transformasi matrik pada sistem koordinat homogen (*homogenous coordinate*) dan analisis kapabilitas proses. Analisis statistik adalah sangat essensial dalam metode analisis rantai variasi (toleransi) yang diperlihatkan dalam buku ini. Selain itu, analisis statistik mempunyai peran yang sangat signifikan dalam setiap ilmu-ilmu rekayasa (*engineering*). Analisis statistik pada buku ini akan menitik beratkan pada konsep-konsep variabel acak (*random variable*) yang akan sangat digunakan pada metode analisis toleransi dalam buku ini untuk pemodelan *error* dari dimensi dan geometri fitur-fitur pada sebuah komponen.

Distribusi normal merupakan suatu distribusi variabel acak kontinu (*continuous random variable*) yang paling penting dalam bidang statistik. Distribusi normal mempunyai atribut-atribut yang sangat khusus, seperti paling banyak merepresentasikan kejadian-kejadian riil (berdasarkan *central limit theorem*) dan persamaan-persamaan matematis yang melibatkan distribusi normal dapat diselesaikan secara analitik. Distribusi normal juga akan digunakan dalam buku ini untuk memodelkan variasi-variasi dimensi dan geometri dalam buku ini.

Sistem transformasi dalam koordinat homogen merupakan inti dari metode analisis rantai variasi (toleransi) untuk memodelkan perambatan *error-error* karena suatu nilai toleransi yang diberikan yang terdapat dalam buku ini. Sistem transformasi tersebut digunakan untuk memodelkan pergerakan translasi dan rotasi, yang disebabkan oleh variasi-variasi dari toleransi dimensi dan geometrinya, dari komponen-komponen pembentuk suatu produk rakitan.

Analisis kapabilitas proses merupakan sebuah metode yang umum digunakan untuk menganalisis apakah suatu proses, dalam hal ini proses perakitan dalam industri manufaktur, mempunyai kapabilitas untuk melakukan proses-proses perakitan untuk suatu produk dengan suatu karakteristik kunci dan toleransi yang telah ditentukan. Dengan analisis tersebut, suatu proses perakitan dapat diputuskan apakah sudah kapabel atau suatu proses peningkatan atau rekonfigurasi ulang harus dilakukan untuk meningkatkan kapabilitas proses tersebut untuk merakit suatu produk.

2.1 Analisis statistik

Statistika adalah ilmu yang meliputi pengumpulan, presentasi dan pengolahan data yang digunakan untuk mencari solusi permasalahan (baik permasalahan teknis maupun non-teknis) dengan memperhitungkan variabilitas yang terkandung dalam data tersebut (Hines et al 2003). Teori-teori statistika mempunyai peran yang sangat penting terhadap metode analisis rantai toleransi yang dibahas dalam buku ini dan juga teori ini mempunyai peran yang essensial dalam bidang-bidang sains, teknik bahkan ilmu sosial secara umum. Dalam buku ini, teori statistika, khususnya mengenai variabel acak dan distribusi normal, digunakan untuk memodelkan properti dari *error-error* yang

berasal dari nilai-nilai toleransi dimensi dan geometri yang diberikan pada gambar teknik suatu komponen yang akan dimanufaktur dan dirakit.

Teori probabilitas dapat dipelajari dengan lebih detil di Hines et al 2003 dan Montgomery dan Runger 2003. Statistika berbasis teori probabilitas yaitu teori yang digunakan untuk mengkuantifikasi derajat kepercayaan pada suatu kejadian atau suatu observasi yang mempunyai sifat acak (variabilitas). Variabilitas dari suatu data observasi, misalnya dimensi dan geometri suatu fitur hasil dari suatu proses permesinan, menunjukkan derajat ketidaktauan kita dalam proses observasi (dalam hal ini) proses permesinan tersebut. Semakin tinggi tingkat pemahaman kita terhadap suatu observasi atau proses permesinan tersebut, maka hal-hal yang menyebabkan variabilitas pada dimensi fitur-fitur tersebut dapat dikurangi, misalnya dengan melakukan optimisasi dari parameter-parameter proses permesinan tersebut.

Konsep variabilitas selalu ditemui dalam kehidupan sehari-hari. Contoh yang paling relevan yang dibahas dalam buku ini suatu proses manufaktur. Suatu proses manufaktur, misalnya proses permesinan *drilling*, adalah suatu proses yang sangat kompleks yang melibatkan, misalnya, interaksi material dengan *tool*, variasi dari properti material ke material lainnya (dengan jenis material yang sama), interaksi material dengan lingkungannya (temperatur, tekanan dan kelembapan) dan respon struktur dari sebuah mesin terhadap proses permesinan tersebut. Sehingga, apabila sebuah fitur, misalnya lubang, akan dibuat dengan suatu proses *drilling*, apabila lubang tersebut dibuat secara berulang-ulang, maka lubang tersebut akan mempunyai diameter yang berubah-ubah. Dengan kata lain, diameter dari lubang tersebut akan berbeda-beda dari satu lubang dengan lubang lainnya. Misalnya, lubang 1 mempunyai diameter 5.005 mm, lubang 2 mempunyai diameter 5.001 mm, lubang 3 mempunyai diameter 5.009, dan seterusnya. Variasi tersebut mengakibatkan variasi dari suatu produk yang dirakit dari komponen-komponen yang mempunyai fitur-fitur lubang tersebut.

2.1.1 Variabel acak dan distribusi statistik

Variabel acak

Variabel acak (*random variable*) didefinisikan sebagai suatu variabel X yang diasosiasikan dengan suatu hasil dari sebuah eksperimen acak e (dalam hal ini bisa diartikan dengan suatu proses manufaktur, baik proses permesinan maupun proses perakitan) (Montgomery dan Runger 2003). Variabel X tersebut diasosiasikan dengan setiap hasil proses e (suatu nilai riil) dalam ruang sampel S ($e \in S$). Karena hasil suatu proses e belum diketahui, maka nilai variabel acak X juga belum bisa diketahui secara pasti. Dengan kata lain, variabel acak X adalah suatu fungsi yang menyematkan sebuah nilai riil e pada setiap nilai dalam ruang sampel S hasil dari sebuah proses permesinan atau proses perakitan yang mempunyai sifat acak (yaitu, hasil proses akan selalu berubah-ubah apabila proses tersebut diulang-ulang).

Variabel acak pada umumnya direpresentasikan dengan huruf besar X dengan suatu distribusi tertentu, misalnya, Normal (Gaussian). Nilai yang berasal dari distribusi X tersebut (misalnya diameter lubang pada sebuah komponen) direpresentasikan dengan huruf kecil x . Sebagai contoh, misalnya X adalah suatu variabel acak dari lebar dari fitur slot pada sebuah balok, maka nilai variabel acak lebar tersebut dituliskan, misalnya sebagai $x = 10.5$ mm.

Variabel acak dibagi menjadi dua jenis, yaitu variabel acak kontinu (*continuous random variable*) dan variabel acak diskrit (*discrete random variable*). Variabel acak kontinu adalah variabel acak yang mempunyai interval bilangan riil, baik terbatas (*finite*) maupun tak terbatas (*inifinite*), misalnya panjang, lebar, diameter, *flatness*, tekanan dan massa. Sedangkan, variabel acak diskrit adalah variabel acak yang mempunyai batas jarak yang terbatas, misalnya banyaknya cacat pada permukaan sebuah benda, proporsi dari komponen yang cacat per 1000 komponen dan banyaknya komponen dalam gudang. Pada buku ini, variabel acak kontinu akan digunakan untuk memodelkan *error-error* dari toleransi-toleransi dimensi dan geometri.

Fungsi distribusi

Distribusi probabilitas dari sebuah variabel acak X adalah sebuah fungsi yang menggambarkan atau merepresentasikan probabilitas atau kemungkinan variabel X didapatkan (Montgomery dan Runger 2003). Gambar 1 memperlihatkan distribusi probabilitas kontinu untuk variabel acak kontinu dan gambar 2 memperlihatkan distribusi probabilitas diskrit untuk variabel acak diskrit. Perlu diingat bahwa Distribusi probabilitas kontinu dinamakan fungsi kepadatan probabilitas (*probability density function*/PDF) dan distribusi probabilitas diskrit dinamakan fungsi massa probabilitas (*probability mass function*/PMF). Dari gambar 1, dapat terlihat bahwa untuk distribusi kontinu, interval variabelnya merupakan bilangan riil (kontinu). Sedangkan pada gambar 2, terlihat bahwa distribusi diskrit, interval variabelnya merupakan bilangan bulat (*integer*). **Pada proses manufaktur dan perakitan, nilai-nilai dimensi dan geometri merupakan variabel kontinu, sehingga distribusi probabilitas kontinu yang akan digunakan pada buku ini.**

Gambar 1: Distribusi probabilitas kontinu.

Gambar 2: Distribusi probabilitas diskrit.

Untuk variable acak kontinu, **fungsi densitas probabilitas (probability density function/PDF) $f(x)$** adalah sebuah fungsi dimana:

- $f(x) \geq 0$ (1)

- $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$ (2)

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx = \text{area dibawah kurva } f(x) \text{ dari } a \text{ sampai } b. \quad (3)$$

Untuk probabilitas kontinu, pada umumnya dikatakan probabilitas suatu nilai $X < a$ muncul (dapat diambil) dari suatu ruang sampel S atau probabilitas suatu nilai $a < X < b$ muncul (dapat diambil) dari suatu ruang sampel S .

$$(X \leq a) = \int_{-\infty}^a f(x)dx \quad (4)$$

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (5)$$

Sebagai contoh, misalkan probabilitas suatu variabel acak kontinu X muncul dengan nilai antara 1 dan 2 $P(1 < x < 2)$, dimana variabel acak tersebut mempunyai fungsi probabilitas seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.

Gambar 3: Contoh presentasi probabilitas $1 < x < 2$ dari suatu variabel acak kontinu X yang mempunyai fungsi probabilitas seperti pada gambar 1.

Untuk variabel acak diskrit, **fungsi massa probabilitas (probability mass function/PMF)** $P_X(x_i)$ diformulasikan sebagai:

$$f(x_i) = P_X(x_i) = P_X(X = x_i) = \sum_{j \in \phi_i} P_X(x_{ij}) \quad (6)$$

dimana X adalah suatu variabel acak diskrit, nilai $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$ merepresentasikan nilai X sedemikian rupa sehingga $H(x_{ij}) = x_i$ untuk suatu set nilai indeks $\phi_i = \{j: j = 1, 2, \dots, s_i\}$. Gambar 4 memperlihatkan contoh suatu fungsi massa probabilitas. properti PMF adalah sebagai berikut:

- $f(x_i) \geq 0$ (7)

- $\sum_{i=1}^n f(x_i) = 1$ (8)

- $f(x_i) = P(X = x_i)$ (9)

Untuk probabilitas diskrit, pada umumnya dikatakan probabilitas suatu nilai $X = a$ muncul (dapat diambil) dari suatu ruang sampel S .

$$f(x = a) = P_X(x = a) = \sum_{m=1}^n (x_m = a) / N \quad (10)$$

dimana a adalah suatu nilai variabel acak diskrit yang muncul dari ruang sampel S dan n banyaknya jumlah kemunculan nilai a tersebut dari ruang sampel S . Sebagai contoh, misalkan probabilitas nilai 2 muncul dari suatu distribusi diskrit X (seperti pada gambar 2), yaitu probabilitas $x = 2$ atau $P(x = 2)$, diperlihatkan pada gambar 4.

Gambar 4: Contoh presentasi probabilitas $x = 2$ dari suatu variabel acak diskrit X yang mempunyai fungsi probabilitas seperti pada gambar 2.

Probabilitas dan fungsi distribusi kumulatif

Untuk variable acak kontinu, **fungsi distribusi kumulatif (cumulative distribution function)** dari fungsi densitas probabilitas (PDF), dinotasikan dengan $F(x)$, didefinisikan sebagai:

$$F(x) = P(X \leq a) = \int_{-\infty}^a f(x) d(x) \text{ untuk } -\infty < a < \infty \quad (11)$$

Untuk variable acak diskrit, **fungsi distribusi kumulatif (cumulative distribution function)** dari fungsi massa probabilitas (PMF), dinotasikan dengan $F(x)$, didefinisikan sebagai:

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} f(x_i) \quad (12)$$

dimana, $F(x)$ mempunyai properti sebagai:

$$\bullet \quad F(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} f(x_i) \quad (13)$$

$$\bullet \quad 0 \leq F(x) \leq 1$$

$$\bullet \quad \text{Jika } x \leq y, \text{ maka } F(x) \leq F(y) \quad (14)$$

Mean (nilai rata-rata) dan varian

Mean (nilai rata-rata atau *average*) μ adalah suatu nilai yang menggambarkan atau mengkuantifikasikan kecenderungan dari lokasi tengah (*central tendency*) dari suatu distribusi probabilitas. Seringkali *mean* μ diekspresikan sebagai nilai ekspektasi (*expected value*) $E(x)$ yaitu nilai rata-rata (*average*) suatu sampel dengan pengulangan yang banyak (*long-run*) dari suatu variabel acak (Montgomery 2001). μ atau $E(x)$ diformulasikan sebagai:

$$\mu = E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx; \text{ untuk variabel acak kontinu} \quad (15)$$

$$\mu = E(x) = \sum_x xP(x); \text{ untuk variabel acak diskrit} \quad (16)$$

Varian $\sigma^2 = Var(x)$ adalah suatu nilai yang menggambarkan atau mengkuantifikasi sebaran (variabilitas) dari suatu distribusi statistik. Varian σ^2 diformulasikan sebagai:

$$\sigma^2 = Var(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)f(x)dx; \text{ untuk variabel acak kontinu} \quad (17)$$

$$\sigma^2 = Var(x) = \sum_x (x - \mu)p(x); \text{ untuk variabel acak diskrit} \quad (18)$$

Varian σ^2 dapat diekspresikan dalam bentuk sebuah nilai ekspektasi, yaitu:

$$\sigma^2 = Var(x) = E[(y - \mu)^2] \quad (19)$$

Istilah lain untuk menyebutkan *mean* atau nilai ekspektasi adalah momen pertama (*first moment*) dan istilah lain untuk menyebutkan varian adalah momen kedua (*second moment*) dari suatu distribusi probabilitas. Akar kuadrat dari σ^2 , yaitu σ , disebut sebagai deviasi standar. Beberapa properti yang penting dari nilai ekspektasi $E(x)$ dan varian $Var(x)$ adalah:

- $E(C) = C$; c adalah suatu nilai konstanta (20)

- $E(x) = \mu$; x adalah suatu variabel acak (21)

- $E(Cx) = CE(x) = C\mu$ (22)

- $Var(C) = 0$ (23)

- $Var(x) = \sigma^2$ (24)

- $Var(Cx) = C^2 var(x) = C^2 \sigma^2$ (25)

Jika ada dua varianbel acak x_1 dan x_2 , maka:

- $E(x_1 + x_2) = E(x_1) + E(x_2) = \mu_1 + \mu_2$ (26)

- $Var(x_1 + x_2) = Var(x_1) + Var(x_2) + 2Cov(x_1, x_2)$ (27)

dimana:

$$Cov(x_1, x_2) = E[(x_1 - \mu_1)(x_2 - \mu_2)] \quad (28)$$

Properti-properti dari nilai ekspektasi $E(x)$ dan varian $Var(x)$ sangat penting untuk diketahui.

2.2 Distribusi Normal (*Gaussian distribution*)

Distribusi statistik yang paling utama adalah distribusi normal (Gaussian). Distribusi normal pertama kali dipelajari pada abad ke-18 dimana pola dari kesalahan pengukuran diketahui mengikuti sebuah pola yang simetri. Distribusi normal memiliki bentuk kurva seperti lonceng (*bell curve*) yang mempunyai pola yang simetri. Distribusi jenis ini memiliki peran penting dalam berbagai analisis lainnya yang berhubungan dengan data eksperimen, seperti analisis regresi dan analisis varian (ANOVA). Gauss adalah orang yang pertama kali mempublikasikan distribusi normal pada tahun 1809, sehingga distribusi normal juga disebut sebagai distribusi Gaussian. Distribusi normal merupakan basis dari semua distribusi kontinu.

Fungsi kepadatan probabilitas dari distribusi Normal (*Gaussian*) untuk satu variable acak diformulasikan sebagai:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (29)$$

dimana $-\infty \leq x \leq \infty$, $-\infty \leq \mu \leq \infty$ dan $\sigma > 0$. Adalah μ mean dari distribusi tersebut dan σ^2 adalah varian dari distribusi tersebut. Notasi singkat distribusi normal pada umumnya ditulis $X \sim N(\mu, \sigma^2)$. Fungsi kepadatan probabilitas dari distribusi Normal diperlihatkan pada gambar 5. Sedangkan, Gambar 6 memperlihatkan fungsi kepadatan probabilitas distribusi Normal dengan berbagai macam nilai *mean* dan varian.

Distribusi Normal mempunyai properti-properti yang sangat penting sebagai berikut:

1. $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$
2. $f(x) \geq 0$, untuk semua x
Properti nomor 1 dan 2 merupakan properti yang dimiliki oleh semua fungsi kepadatan probabilitas.
3. $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$ dan $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 0$
4. $f(\mu + x) = f(\mu - x)$. Fungsi tersebut simetri terhadap μ
5. Nilai maksimum $f(x)$ adalah di $x = \mu$
6. Poin infleksi, yaitu point dimana perubahan arah terjadi, dari $f(x)$ adalah di $x = \mu \pm \sigma$

Untuk distribusi normal, probabilitas sebuah variable acak yang berada diantara $\mu - \sigma < x < \mu + \sigma$ adalah 68.2 %, diantara $\mu - 2\sigma < x < \mu + 2\sigma$ adalah 95.4 % dan diantara $\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma$ adalah 99.6 %. **Hal ini merupakan suatu properti dari distribusi normal yang sangat penting dan akan sangat dipakai konsepnya dalam analisis rantai variasi dalam sebuah proses perakitan.**

Gambar 5: Fungsi kepadatan probabilitas dari distribusi Normal dengan mean $\mu = 0$ dan varian σ^2 .

Gambar 6: Fungsi kepadatan probabilitas distribusi normal dengan berbagai nilai *mean* dan varian.

Mean μ dari distribusi Normal, sesuai dengan definisi pada persamaan (15) adalah:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (30)$$

Dengan menggunakan variabel $z = \frac{(x-\mu)}{\sigma}$, maka didapatkan:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (\mu + \sigma z) e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \mu \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz + \sigma \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (31)$$

Karena $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ adalah sebuah fungsi kepadatan probabilitas distribusi normal dengan $\mu = 0$ dan $\sigma^2 = 1$, maka sesuai dengan properti $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$, nilai $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 1$. Kemudian, $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} z e^{-\frac{z^2}{2}} dz = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} z e^{-\frac{z^2}{2}} \Big|_{-\infty}^{\infty} = 0$, maka:

$$\mu = \mu[1] + \sigma[0] = \mu \quad (32)$$

varian σ^2 dari distribusi Normal adalah

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu) f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (33)$$

Dengan menggunakan variabel $z = \frac{(x-\mu)}{\sigma}$, maka didapatkan:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^2 z^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \sigma^2 \int_{-\infty}^{\infty} z^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \sigma^2 \left[\frac{-ze^{-\frac{z^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} \Big|_{-\infty}^{\infty} + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \right] \quad (34)$$

$$\sigma^2 = \sigma^2 [0 + 1] = \sigma^2. \quad (35)$$

Fungsi komulatif dari distribusi Normal adalah:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (36)$$

Fungsi komulatif dari distribusi Normal diperlihatkan pada gambar 7. Sedangkan, Gambar 8 memperlihatkan fungsi komulatif dari distribusi Normal dengan berbagai macam nilai *mean* dan varian.

Gambar 7: Fungsi komulatif dari distribusi Normal.

Gambar 8: Fungsi komulatif dari distribusi Normal dengan berbagai nilai *mean* dan varian.

2.2.1 Central limit theorem

Central limit theorem menyatakan bahwa apabila berbagai macam variabel acak dengan distribusi probabilitas yang berbeda-beda, apabila variabel-variabel acak tersebut saling dijumlahkan, maka jumlah dari variabel-variabel tersebut cenderung mengikuti distribusi normal. Selain itu, teori tersebut mengatakan bahwa rata-rata aritmatik dari sebuah variabel acak, dengan pengulangan yang banyak, akan terdistribusi secara normal. *Central limit theorem* dapat dirangkum sebagai berikut (Montgomery 2001):

- Apabila $y_1, y_2, \dots, y_n$ adalah sebuah seri dari n percobaan dan merupakan variabel acak bebas dengan $E(y_i) = \mu$ dan $V(y_i) = \sigma^2$ (keduanya merupakan bilangan hingga) dan $x = y_1 + y_2 + \dots + y_n$, maka: $z_n = \frac{x - n\mu}{\sqrt{n\sigma^2}}$ mempunyai sebuah aproksimasi distribusi $N(0,1)$ sedemikian rupa sehingga jika $F_n(z)$ adalah fungsi distribusi dari z_n dan $\phi(z)$ adalah fungsi distribusi dari variabel acak $N(0,1)$, maka $\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(z)/\phi(z) = 1$.

Ilustrasi dari *central limit theorem* diperlihatkan pada gambar 9. Gambar 9 memperlihatkan apabila ada tiga variabel acak yang mempunyai distribusi *Uniform* dengan parameter yang berbeda, ketika rata-rata aritmatik dikalkulasi dari ketiga variabel acak tersebut, maka rata-rata artimatik tersebut akan mengikuti distribusi Normal.

Gambar 9: Ilustrasi dari *central limit theorem*.

Aplikasi *central limit theorem* pada analisis rantai variasi (toleransi) pada suatu proses perakitan adalah walaupun distribusi *error* akibat dari nilai suatu toleransi tidak mengikuti distribusi normal, namun demikian, karena prosesnya melibatkan penjumlahan dari berbagai macam distribusi *error*, **maka hasil akhir dari analisis rantai toleransi tersebut dapat dimodelkan dengan distribusi normal**. Hal ini akan lebih jelas pada bab-bab selanjutnya yang menjelaskan contoh aplikasi analisis rantai variasi (toleransi) pada sebuah produk.

Untuk mengetahui berbagai macam teknik-teknik analisis statistik secara lebih detil, referensi utama yang dapat dijadikan rujukan adalah Montgomery 2001, Montgomery dan Runger 2003, dan Hines et al 2003.

2.3 Sistem transformasi matriks

Bagian ini akan menjelaskan konsep dasar mengenai sistem matriks dan matriks untuk merepresentasikan roto-translasi dari satu sistem koordinat ke sistem koordinat lainnya. Proses kalkulasi roto-translasi tersebut merupakan inti dari metode analisis rantai variasi (toleransi). Proses kalkulasi tersebut menggambarkan perambatan *error-error* (dari nilai-nilai toleransi yang diberikan) dari satu fitur pada sebuah komponen ke fitur lainnya pada komponen yang berbeda sampai dengan karakteristik kunci yang akan dianalisis.

2.3.1 Matriks *homogenous* dan matriks roto-translasi

Untuk menganalisis akumulasi toleransi secara 3D dengan menggunakan metode matriks, pemahaman mengenai dasar-dasar matriks harus dimiliki. Maka dari itu, sebelum metode matriks untuk analisis toleransi secara 3D dilakukan, penjelasan mengenai matriks *homogenous* berukuran 4×4 dan matriks roto-translasi, akan dijelaskan terlebih dahulu. Manfaat utama dari matriks *homogenous* adalah dua operasi transformasi matriks berupa translasi dan rotasi koordinat titik pada suatu sistem koordinat dapat direpresentasikan dengan sebuah matriks *homogenous* berukuran 4×4 .

Matriks *homogenous*.

Jika matriks **M** adalah sebuah matriks *homogenous* (Folley et al 1994), maka:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & k \end{bmatrix} \quad (37)$$

dimana c_{ij} adalah element matriks ke $-i, j$ dan k adalah sebuah konstanta yang merupakan skala dari elemen-elemen matriks tersebut. Pada umumnya, seluruh nilai elemen matriks **M** dibagi dengan nilai k tersebut (dinormalisasi), sehingga nilai k pada element terakhir matriks **M** tersebut menjadi 1.

Dalam sistem kalkulasi transformasi koordinat suatu titik P dengan menggunakan matriks *homogenous*, titik P tersebut juga harus direpresentasikan dalam bentuk koordinat *homogenous*, yaitu:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Matriks rotasi dan translasi

Matriks transformasi translasi **Tr** dari sebuah koordinat titik diformulasikan sebagai berikut:

$$\mathbf{Tr} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

dimana t_x adalah translasi searah sumbu - x , t_y adalah translasi searah sumbu - y dan t_z adalah translasi searah sumbu - z .

Matriks transformasi rotasi terhadap sumbu x , y dan z direpresentasikan dengan simbol R_x untuk rotasi terhadap sumbu x , R_y untuk rotasi terhadap sumbu y dan R_z untuk rotasi terhadap sumbu z . Matriks rotasi R_x , R_y dan R_z dari sebuah titik adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

dimana θ_i adalah besar sudut putaran terhadap sumbu ke $-i$.

Matriks roto-translasi

Matriks roto-translasi adalah sebuah matriks yang merepresentasikan transformasi translasi dan rotasi dari sebuah titik terhadap suatu sumbu putaran. Matriks roto-translasi tersebut digunakan untuk merepresentasikan variasi atau *error* geometrik suatu fitur karena nilai toleransinya (Whitney 2004). Sering kali, matriks roto-translasi tersebut disebut sebagai matriks *error*.

Matriks *error* berupa matriks roto-translasi dari kordinat i ke koordinat j disimbolkan sebagai **T_{ij}**. Matriks berisi *error* karena rotasi dan translasi pada suatu fitur karena suatu nilai toleransi yang dialokasikan kepada fitur tersebut. Matriks **T_{ij}** adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{T}_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{Rot} & \mathbf{Trans} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d\theta_z & d\theta_y & d_x \\ d\theta_z & 1 & d\theta_x & d_y \\ -d\theta_y & d\theta_x & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

dimana **Rot** adalah dan **Trans** adalah elemen-elemen rotasi dan tranlasi. d_i adalah komponen translasi searah axis i pada matriks **Trans**. $d\theta_i$ adalah komponen rotasi terhadap sumbu i (**dalam radian**) pada matriks **Rot**.

Matriks **error** $\mathbf{T}_{ij}$ pada persamaan (43) tidak mempunyai elemen $\sin$ dan $\cos$. Hal ini disebabkan karena elemen-elemen pada matriks $\mathbf{T}_{ij}$ merepresentasikan **error** yang secara umum diasumsikan mempunyai nilai yang sangat kecil. Sehingga, untuk sudut yang sangat kecil (< 0.3 radian) nilai $\sin$ -nya mendekati nilai sudutnya (**dalam radian**) dan nilai $\cos$ -nya mendekati 1. Hal ini dapat dijelaskan dengan proses limit dalam matematik, yaitu:

$$\lim_{d\theta \rightarrow 0} \sin d\theta = d\theta \quad (44)$$

$$\lim_{d\theta \rightarrow 0} \cos d\theta = 1 \quad (45)$$

Matriks roto-translasi yang memiliki dua komponen transformasi (translasi dan rotasi) beroperasi sebagai berikut. **Matriks roto-translasi tersebut pertama-tama melakukan translasi suatu koordinat P terlebih dahulu, kemudian melakukan rotasi pada koordinat P tersebut.**

2.3.2 Transformasi matriks

Selain konsep matrik *homogenous*, konsep transformasi matriks juga harus dipahami untuk mengimplementasikan metode matriks untuk analisis rantai variasi (toleransi) dalam bidang 3D. Dengan merujuk pada matriks roto-translasi $\mathbf{T}_{ij}$ sebelumnya yang merepresentasikan transformasi dari suatu koordinat i ke koordinat j , maka konvensi simbol untuk merepresentasikan suatu titik P dan proses transformasinya adalah sebagai berikut:

- P_i merepresentasikan suatu titik P yang merujuk pada sistem koordinat i .
- P_j merepresentasikan suatu titik P tersebut yang merujuk pada sistem koordinat j .
- $\mathbf{T}_{ij}$ adalah transformasi koordinat dari sistem koordinat i ke sistem koordinat j .
- Representasi matematik yang memodelkan sebuah transformasi adalah:

$$P_i = \mathbf{T}_{ij} \cdot P_j \quad (46)$$

Persamaan (46) tersebut diartikan sebagai berikut: suatu titik P yang merujuk pada koordinat i adalah hasil transformasi titik P yang merujuk pada koordinat j oleh suatu matriks transformasi $\mathbf{T}_{ij}$ dari koordinat i ke j . Untuk mendapatkan titik P yang merujuk pada koordinat j , P_j , maka:

$$P_j = \mathbf{T}_{ij}^{-1} \cdot P_i \quad (47)$$

dimana $\mathbf{T}_{ij}^{-1} = \mathbf{T}_{ji}$. Untuk memudahkan penghitungan transformasi koordinat, maka indeks dari titik P dan matriks tersebut dapat digunakan sebagai pedoman. Matriks transformasi yang menggambarkan variasi suatu fitur ke- i adalah:

$$\mathbf{T}_{ii'} \quad (48)$$

Gambar 10: Ilustrasi dari sebuah transformasi koordinat dari sistem koordinat 1 ke 2.

Gambar 10 memperlihatkan penjelasan mengenai transformasi koordinat suatu titik. Pada gambar 10, titik P_1 adalah suatu titik yang merujuk atau mempunyai asal pada pusat koordinat 1. Sedangkan, P_2 adalah suatu titik yang merujuk pada pusat koordinat 2. Representasi matematik dari transformasi titik P tersebut adalah $P_1 = T_{12} \cdot P_2$. Dan sebaliknya, apabila titik P yang merujuk ke sistem koordinat 2, maka titik P_2 didapatkan dengan mengalikan *inverse* matriks T_{12} dengan P_1 , yaitu $P_2 = T_{12}^{-1} \cdot P_1$.

2.4 Kapabilitas proses (*Process capability C_p dan C_{pk}*)

Dalam suatu proses manufaktur, baik proses permesinan maupun proses perakitan, sebelum proses tersebut dijalankan, maka ada uji kapabilitas untuk menentukan apakah suatu proses manufaktur, dengan suatu mesin tertentu atau dengan suatu sistem dan prosedur perakitan tertentu, kapabel untuk membuat suatu produk dengan tingkat toleransi tertentu. Proses tersebut dinamakan sebagai analisis kapabilitas proses.

Definisi kapabilitas proses adalah sebuah ukuran apakah suatu proses manufaktur dapat secara efisien memproduksi atau merakit sebuah komponen atau tidak. Arti efisien dalam definisi kapabilitas proses adalah karena suatu proses bisa saja menghasilkan suatu produk dengan bentuk tertentu, namun karena kurangnya tingkat akurasi mesin atau kurang efektifnya sistem perakitan tersebut, maka dibutuhkan banyak proses perbaikan atau pengerjaan ulang, sehingga meningkatkan biaya produksi secara signifikan yang berasal dari *scrap* atau tambahan waktu untuk melakukan reparasi. **Kapabilitas suatu proses sangat bergantung secara langsung dari seberapa besar toleransi yang dimiliki oleh suatu komponen.**

Ada dua indeks utama dan yang paling umum digunakan untuk mengukur suatu kapabilitas proses, yaitu C_p dan C_{pk} . Penjelasan dari kedua indeks proses kapabilitas tersebut adalah:

- Indeks C_p

C_p adalah sebuah ukuran seberapa besar dispersi dari suatu proses manufaktur atau perakitan dibandingkan dengan limit bawah dan limit atas dari spesifikasi toleransi yang dimiliki oleh suatu komponen yang dibuat dengan proses manufaktur atau perakitan tersebut. C_p diformulasikan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (49)$$

dimana USL adalah batas atas toleransi dan LSL adalah batas bawah toleransi. σ adalah deviasi standard dari ukuran suatu produk yang dibuat dengan proses manufaktur tersebut. Gambar 11a memperlihatkan representasi visual dari C_p .

- Indeks C_{pk}

C_{pk} adalah sebuah ukuran pergeseran (*shift*) dari nilai tengah (*centre*) dari suatu proses manufaktur. C_{pk} diformulasikan sebagai:

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right] \quad (50)$$

dimana μ adalah nilai rata-rata dari dimensi produk yang dibuat dengan proses manufaktur tersebut. Gambar 11b memperlihatkan representasi visual dari C_{pk} .

Gambar 11: (a) Representasi visual dari C_p dan (b) representasi visual dari C_{pk} .

Untuk lebih jelasnya, gambar 12 memperlihatkan representasi visual dari berbagai macam nilai C_p dan C_{pk} . Pada umumnya, semakin besar nilai C_p dan C_{pk} , maka kapabilitas suatu proses semakin tinggi. Pada umumnya rekomendasi nilai tersebut adalah $C_p \geq 1.3$ dan $C_{pk} \geq 1.3$. Indeks C_p dan C_{pk} dan harus selalu digunakan secara bersamaan.

Gambar 12: Representasi visual dari berbagai macam nilai C_p dan C_{pk} .

BAB 3

Toleransi dimensi dan geometri (GD&T)

Toleransi dimensi dan geometri (GD&T) merupakan hal yang sangat esensial dalam sebuah desain komponen dan produk (produk disini merujuk kepada suatu benda yang dirakit dari beberapa komponen). Toleransi tersebut memberikan nilai seberapa besar deviasi dimensi dan geometri sebuah fitur pada sebuah komponen yang dimanufaktur yang dibolehkan sehingga komponen tersebut masih dapat dirakit dan memberikan suatu fungsi sesuai dengan desainnya. Pada prinsipnya, seakurat apapun suatu proses manufaktur, pasti terdapat sejumlah *error* pada prosesnya dan variasi pada material mentahnya yang mengakibatkan deviasi-deviasi dimensi dan geometri pada fitur-fitur komponen yang diproses. Selain itu, toleransi sangat berkaitan langsung dengan proses pengukuran (verifikasi toleransi). Jenis dan nilai dari suatu toleransi sangat menentukan metode dan sistem pengukuran yang dibutuhkan untuk memverifikasi nilai toleransi tersebut [Syam 2018]

Pada bab ini, definisi toleransi dan jenis-jenis toleransi akan dibahas. Toleransi dimensional dan geometri dibahas mulai dari tingkat dasar sampai dengan tingkat menengah. Toleransi dimensional dan geometri merupakan suatu subjek bahasan yang kompleks tersendiri dan meliputi area yang sangat luas, sehingga seluruh aspek dari toleransi tidak dapat dibahas hanya dalam satu bab saja.

3.1 Introduksi toleransi

Toleransi adalah suatu nilai yang merepresentasikan seberapa besar dimensi dan geometri sebuah fitur pada sebuah komponen boleh terdeviasi atau berbeda dengan nilai nominal yang diinginkan. Fitur-fitur tersebut dapat berupa ukuran (*size*) dan geometri (*form*). Contoh untuk fitur ukuran (*size*) adalah diameter suatu silinder, tebal sebuah pelat besi, dan panjang sebuah balok. Sedangkan, contoh untuk fitur geometri (*form*) adalah *flatness*, *straightness*, lokasi, orientasi dan *run-out*. Toleransi berfungsi untuk mempertimbangkan kesalahan-kesalahan (*errors*) yang berasal dari suatu proses manufaktur, termasuk proses perakitan (*assembly*). Untuk kedua jenis utama toleransi tersebut, toleransi dimensi dan geometri, masing-masing jenisnya membutuhkan metode, prosedur dan instrumen pengukuran yang berbeda pula [Syam 2018].

Terdapat dua komponen yang esensial dalam sebuah desain komponen atau produk. Kedua komponen tersebut adalah deskripsi dari keadaan nominal (dimensi nominal) dan deskripsi dari deviasi yang diperbolehkan dari nilai nominal tersebut (toleransi). Sehingga, toleransi merupakan satu dari dua parameter penting yang mendefinisikan geometri dari suatu komponen atau produk. Proses dimensi (*dimensioning process*) adalah suatu proses untuk memberikan nilai nominal dari suatu fitur yang menggambarkan suatu kondisi yang sempurna tanpa deviasi apapun dan proses toleransi adalah suatu proses untuk mendefinisikan deviasi yang diperbolehkan pada suatu fitur dalam satu produk, misalnya panjang dan lebar, atau suatu fitur antara dua atau lebih produk, misalnya jarak (*gap*) antara dua bidang dari dua produk yang berbeda.

Besarnya nilai toleransi merupakan tugas setiap disainer suatu produk. Maka dari itu, untuk menentukan jenis dan nilai toleransi yang tepat, seorang disainer produk harus memiliki pengetahuan yang luas mengenai fungsi dari produk yang didisainnya, efek dari setiap variasi komponen-komponen dari produk tersebut, berbagai macam proses manufaktur dan kemampuan komunikasi dengan berbagai orang atau perekraya pada setiap tingkat proses produksi. Dengan demikian, menentukan nilai suatu toleransi bukanlah suatu pekerjaan yang mudah. Apabila jenis dan nilai toleransi yang diberikan pada sebuah komponen atau produk salah, maka walaupun komponen atau produk tersebut dapat dimanufaktur secara sempurna, komponen atau produk tersebut tidak dapat dirakit. Proses untuk menentukan

seberapa besar nilai suatu toleransi disebut sebagai **alokasi toleransi** (*tolerance allocation*). Proses alokasi toleransi akan dibahas lebih jelas pada bagian contoh aplikasi di bab-bab selanjutnya.

Standar internasional yang paling umum mengenai **toleransi dimensi** adalah seri standard ISO 14405 (ISO 14405-1 2016, ISO 14405-2 2011, ISO 14405-3 2016). Sedangkan, untuk **toleransi geometri** (*form*), standar internasional yang umum adalah ASME Y14.5 (ASME Y14.5 2009) dan ISO 1101 (ISO 1101 2017). Untuk toleransi dimensi, toleransi tersebut sangat mudah dipahami secara intuitif karena mempunyai bentuk ' $\pm$ ' yang dapat diinterpretasikan secara langsung, misalnya suatu dimensi $x = 50 \pm 0.1 \text{ mm}$ mempunyai arti bahwa dimensi tersebut boleh bervariasi selama nilainya $49.99 \text{ mm} \leq x \leq 50.01 \text{ mm}$. Sedangkan, untuk toleransi geometri, dibutuhkan pemahaman mendalam dan khusus untuk meninterpretasikan arti dari toleransi tersebut. Pembahasan toleransi geometri akan berbasis pada standar ASME Y14.5 dan ISO 1101 tersebut. Bab ini akan membahas arti, interpretasi dan analisis (termasuk alokasi) dari toleransi geometri. Selain itu, toleransi dimensional akan dibahas juga, terutama pada bagian analisis rantai variasi toleransi (*tolerance stack-up analysis*).

Studi mengenai toleransi sebuah desain (baik alokasi dan analisis toleransi) sangat penting untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan pada kondisi riil sebelum suatu proses manufaktur dan perakitan dilakukan (mempunyai implikasi yang sangat penting untuk mengurangi biaya-biaya apabila terjadi kesalahan desain), seperti:

- Apakah komponen-komponen yang didesain apabila dimanufaktur sesuai dengan batas-batas toleransinya akan dapat dirakit bersama menjadi suatu produk?
- Apakah komponen-komponen yang mempunyai deviasi dari nilai nominalnya masih bisa dirakit menjadi sebuah produk?
- Apakah apabila suatu komponen dibuat lebih kecil atau lebih besar dari nilai nominalnya masih bisa dirakit untuk menjadi suatu produk?
- Seberapa besar deviasi suatu fitur dari nilai nominalnya masih diperbolehkan?
- Seberapa tipis dinding suatu fitur (*thin-walled features*) pada suatu komponen dapat dimanufaktur?
- Dan lain sebagainya.

Dari sebagian kecil pertanyaan-pertanyaan tersebut, pentingnya studi mengenai toleransi adalah sesuatu yang sangat penting.

Contoh riil dari toleransi dimensional (*size*), geometri (*form*) dan tekstur permukaan pada sebuah desain komponen diperlihatkan pada gambar 1. Pada gambar 1, diperlihatkan sebuah komponen berupa balok solid yang diproses dengan sebuah proses *slot milling* dan pengeboran. Nilai-nilai dimensi pada gambar 1 diperlihatkan dengan nilai toleransi untuk masing-masing dimensi tersebut. Untuk menentukan nilai-nilai toleransi tersebut tidaklah mudah, karena untuk menentukan nilai toleransi tersebut dibutuhkan kombinasi dari pengetahuan yang mendalam mengenai keilmuan teknik dan pengalaman praktis dalam bidang manufaktur serta pengukuran. Kesalahan dalam menentukan nilai toleransi pada sebuah produk akan sangat berakibat fatal, bukan hanya pada produk tersebut, tetapi juga pada proses manufaktur dan pengukuran dari produk tersebut. Hal ini akan dijelaskan kemudian pada bagian alokasi dan analisis toleransi.

Gambar 1: Beberapa contoh untuk jenis-jenis toleransi: toleransi dimensi, geometrik (GD&T) dan texture permukaan.

3.1.1 Sumber-sumber variasi

Setiap komponen atau produk yang dimanufaktur pasti mempunyai variasi dimensi dan geometri atau dengan kata lain tidak akan mempunyai dimensi yang sama persis dengan nilai nominal disainnya. Misalnya, apabila kita mendisain sebuah silinder dengan panjang $l = 100 \text{ mm}$ dan diameter $d = 25 \text{ mm}$, maka pada kenyataannya, hasil silinder yang dimanufaktur (dengan proses bubut misalnya) tidaklah sempurna dengan ukuran panjang $l = 100 \text{ mm}$ dan diameter $d = 25 \text{ mm}$. Melainkan, silinder tersebut akan mempunyai dimensi yang berbeda dari nominalnya (terdeviasi), walaupun sangat dekat dengan nilai nominalnya tergantung dengan tingkat keakuratan proses produksi (termasuk proses perakitan) dan pengukuran yang dilaluinya. Misalnya, dimensi hasil dari proses manufakturnya adalah $l = 100.02 \text{ mm}$ dan diameter $d = 24.98 \text{ mm}$. **Dengan demikian, apabila ada dua komponen yang dibuat dengan suatu proses manufaktur dengan kondisi parameter proses yang identik, kedua komponen tersebut tidaklah identik, selalu ada perbedaan (variasi) dimensi dan geometri tergantung dengan keakuratan proses manufaktur tersebut.**

Sumber-sumber variasi yang menyebabkan terdeviasinya dimensi dan geometri suatu komponen setelah dimanufaktur adalah sebagai berikut:

- Variasi dari toleransi yang diberikan pada gambar teknik suatu disain
Sumber pertama variasi dari suatu komponen adalah dari toleransi yang diberikan kepada komponen tersebut. Hal ini memperlihatkan bahwa sebelum suatu komponen dibuat, sudah ada potensi variasi untuk komponen tersebut.
- Variasi dari error suatu proses manufaktur
Semua proses manufaktur memiliki level *error* (kesalahan) tertentu, tergantung pada seberapa besar tingkat akurasi proses manufaktur tersebut. Hal ini menyebabkan komponen-komponen yang dibuat dari suatu proses manufaktur akan terdeviasi dari nilai nominalnya karena *error* dari proses manufaktur tersebut, misalnya *repeatability* dari suatu mesin perkakas dan vibrasi yang diakibatkan karena interaksi material-tool dari suatu mesin perkakas. Pada umumnya untuk mengecek apabila suatu proses manufaktur dapat digunakan untuk membuat suatu komponen dengan tingkat toleransi tertentu, sebuah tes kapabilitas proses (lihat bab 2) dilakukan.
- Variasi dari suatu proses perakitan
Pada saat suatu komponen dirakit dengan komponen lainnya untuk membentuk suatu produk dengan fungsi

tertentu, maka ada faktor-faktor lain yang mempengaruhi variasi dari hasil perakitan tersebut yang berasal bukan dari variasi komponen tersebut. Faktor-faktor tersebut antara lain efek gaya gravitasi pada suatu komponen dengan massa tertentu, sehingga menimbulkan efek *assembly shift* (akan dibahas kemudian). Contoh lainnya adalah efek yang berasal dari seorang operator yang melakukan proses perakitan tersebut, misalnya operator memberi gaya impact yang terlalu besar untuk merakit suatu komponen sehingga menyebabkan deformasi pada komponen tersebut.

- Variasi dari suatu proses pengukuran
Variasi yang berasal dari pengukuran sangat relevan (lihat buku [Syam 2018]). Variasi-variasi tersebut adalah misalnya variasi dari suatu instrumen pengukuran dan variasi dari prosedur untuk melakukan suatu pengukuran.
- Variasi dari lingkungan
Variasi lingkungan seperti efek variasi temperatur tempat dilakukannya suatu proses perakitan, efek variasi tekanan dan efek variasi kelembapan lingkungan tempat suatu proses perakitan dilakukan. Misalnya, proses perakitan suatu produk yang mempunyai bahan polimer, apabila dilakukan di suatu tempat yang memiliki suhu 35° , polimer tersebut akan memberikan *error* diameter yang signifikan karena proses pemuaihan material polimer tersebut.

Gambar 2 memperlihatkan beberapa sumber variasi dari proses manufaktur suatu produk, proses assembly dan proses pengukuran produk tersebut.

Gambar 2: Ilustrasi berbagai sumber variasi: (kiri) variasi dari suatu komponen hasil manufaktur karena *error* dari sebuah mesin produksi, (tengah) variasi dari proses perakitan komponen tersebut dan (kanan) variasi dari proses pengukuran komponen tersebut.

3.1.2 Tipe-tipe toleransi

Berdasarkan jenis-jenis variasi yang ingin dikontrol oleh suatu toleransi, maka toleransi dibagi menjadi tiga kelas, yaitu toleransi untuk mengontrol:

- Fitur individual dari *size*, misalnya: panjang, lebar, diameter, kedalaman dan *gap*.
- Fitur geometri individu dan fitur geometri berelasi antara komponen-komponen dan antara fitur-fitur perakitan (*assembly feature*). Contoh dari fitur geometri individu, misalnya: *flatness*, *roundness* dan *cylindricity*. Sedangkan contoh dari fitur geometri berelasi, misalnya: *perpendicularity*, *location*, *concentricity* dan orientasi.
- Fitur dari tekstur permukaan suatu komponen, misalnya: R_a , R_z , S_a , S_q , dan S_z .

Bab ini hanya membahas mengenai toleransi yang mengontrol variasi dari fitur *size* dan geometri (tidak membahas fitur tekstur permukaan). Dengan demikian, bab ini membahas dua metode untuk menentukan suatu toleransi pada komponen atau produk. Dua metode toleransi tersebut adalah:

1. Toleransi dimensional “*plus/minus*”

Toleransi dimensial adalah metode toleransi yang digunakan untuk mengontrol fitur *size* dari suatu komponen atau produk.

2. Toleransi geometri (*geometric tolerancing and dimensioning*/GD&T)

Toleransi geometri (GD&T) adalah metode toleransi yang digunakan untuk mengontrol baik fitur geometri individual dan fitur geometri berrelasi antara komponen-komponen dan antara fitur-fitur perakitan.

Pertama-tama, metode toleransi dimensional akan dibahas. Metode toleransi dimensional adalah suatu metode toleransi yang bersifat konservatif dan sangat berdasarkan pada intuisi. Toleransi jenis ini mempunyai banyak aspek-aspek inkonsistensi sehingga banyak menimbulkan ambiguitas, yang sangat menimbulkan masalah pada saat suatu proses kontrol kualitas dilakukan, pada suatu kondisi riil. Sehingga, metode toleransi dimensional saja tidak cukup untuk dapat merepresentasikan sebuah kontrol variasi dari suatu komponen atau produk yang semakin kompleks seperti sekarang ini. Untuk menyempurnakan metode toleransi dimensional, maka metode toleransi geometri (GD&T) dikembangkan. Toleransi geometri dapat merepresentasikan apa yang diinginkan oleh seorang disainer agar produk yang didisainnya dapat berfungsi seperti yang diinginkan. Toleransi geometri (GD&T) ini disebut juga sebagai *design language* oleh seorang desainer untuk berkomunikasi dengan seorang perekayasa proses manufaktur dan seorang yang melakukan suatu proses pengukuran.

3.2 Toleransi dimensional “*Plus/minus*”

Toleransi dimensional “*plus/minus*” adalah cara tradisional yang berdasarkan intuisi untuk menentukan nilai toleransi suatu fitur dengan cara menentukan batas minimum dan maximum yang diperbolehkan untuk nilai nominal suatu fitur. Toleransi “*plus/minus*” dapat langsung dipahami secara intuitif, yaitu nilai dimensi suatu fitur dapat bervariasi di antara batas minimum dan maksimum yang diberikan. Bentuk dari toleransi “*plus/minus*” adalah $X \pm T$, dimana X adalah dimensi nominal dari suatu fitur dan T adalah nilai toleransi dari fitur tersebut. Contoh dari toleransi “*plus/minus*” adalah, misalnya:

- Panjang suatu balok adalah $(3 \pm 0.2) \text{ mm}$.
- Diameter sebuah silinder adalah $(\varnothing 5 \pm 0.01) \text{ mm}$.
- Jarak antara dua lubang adalah $(15 \pm 0.5) \text{ mm}$.
- Diameter sebuah bola adalah $(\varnothing 50 \pm 0.2) \text{ mm}$.
- Dan lain sebagainya.

Toleransi dimensional sangat mudah dipahami dengan intuisi. Namun demikian, toleransi dimensional mempunyai kelemahan untuk “menterjemahkan” maksud dari disainer suatu produk pada gambar teknik, yang kemudian gambar teknik inilah yang digunakan sebagai landasan seorang perekayasa manufaktur untuk membuat produk yang telah didesain tersebut. **Kelemahan tersebut adalah adanya ambiguitas pada toleransi dimensional.**

Gambar 5 memperlihatkan contoh paling sederhana untuk ambiguitas yang terdapat pada toleransi dimensional. Pada gambar 5, diperlihatkan sebuah bentuk lingkaran ideal dengan dimensi dan toleransinya: $(\varnothing 5 \pm 0.01) \text{ mm}$. Kemudian, pada gambar 5 juga, diperlihatkan dua bentuk lingkaran yang mempunyai hasil pengukuran diameter yang sama, yaitu $\varnothing 5.008 \text{ mm}$, tetapi mempunyai bentuk yang berbeda. Hasil kedua diameter yang terukur tersebut masih dalam batas toleransi, namun hanya salah satu yang bisa diterima (gambar 5 tengah) dan yang lainnya tidak dapat diterima karena mempunyai bentuk yang terlalu oval (gambar 5 kanan). Toleransi dimensional tidak dapat menangkap dan merepresentasikan bentuk lingkaran tersebut secara keseluruhan, sehingga ketika lingkaran tersebut diukur dengan suatu alat ukur yang sama namun dengan orientasi yang berbeda, maka hasil pengukuran yang sama didapatkan padahal bentuk riil lingkarannya berbeda!. Hal ini menimbulkan sebuah ambiguitas!. Ambiguitas tersebut sering menyebabkan dihentikannya lini produksi karena ada perbedaan pendapat antara departemen manufaktur dan departemen kontrol kualitas atau komponen-komponen yang mempunyai dimensi diluar toleransinya akan lolos ke pelanggan!

Gambar 5: Ambiguitas yang sering terjadi pada toleransi dimensional. Ambiguitas tersebut sering menyebabkan produksi dihentikan sementara karena ada perbedaan pendapat antara departemen manufaktur dan departemen kontrol kualitas.

3.3 Toleransi geometri (*Geometric dimensioning and tolerancing/GD&T*)

Toleransi geometri (GD&T) adalah sebuah “bahasa” desain yang digunakan oleh seorang disainer produk/perekayasa produk/penggambar teknik untuk merepresentasikan keinginan disainer/perekayasa/penggambar tersebut bagaimana fungsi produk yang didisainnya, bagaimana cara proses manufakturnya, dan bagaimana cara proses perakitannya agar setelah produk tersebut selesai dibuat, maka produk tersebut akan berfungsi sesuai dengan yang diinginkan. Referensi utama yang mengatur toleransi geometri (GD&T) adalah standard ASME Y14.5 (ASME Y14.5 2009) and ISO 1101 (ISO 1101 2012). Standard ASME Y14.5 pada umumnya digunakan di Amerika Serikat dan standar ISO 1101 pada umumnya digunakan di Eropa dan negara lainnya. Pada prinsipnya, kedua standar tersebut memberikan informasi yang sama tentang GD&T. Selanjutnya, toleransi geometri akan disebut sebagai GD&T, karena istilah GD&T lebih umum digunakan.

Kelebihan utama GD&T adalah GD&T dapat merepresentasikan bentuk sebuah produk secara keseluruhan (komprehensif) dan dapat merepresentasikan relasi antar-fitur. Hal ini tidak dapat dilakukan dengan toleransi dimensional. Namun demikian, GD&T tidak menggantikan toleransi dimensional, melainkan GD&T melengkapi toleransi dimensional, sehingga pada penggunaannya, GD&T juga mengikutsertakan toleransi dimensionaonal. Gambar 6 memperlihatkan contoh elemen-elemen dari GD&T pada sebuah gambar teknik. Pada gambar 6, elemen-elemen GD&T yang diperlihatkan adalah datum A, B, dan C, *perpendicularity*, *flatness*, *parallelism* dan toleransi dimensional pada kedua lingkaran (dalam 3D adalah sebuah lubang).

Ada dua macam tipe GD&T, yaitu:

- Fitur tidak berelasi (fitur independen).
Yaitu toleransi bentuk (*form*), seperti: *straightness*, *flatness*, *roundness*, *cylindricity*, profil. Fitur-fitur ini pada umumnya digunakan sebagai datum untuk fitur-fitur dengan relasi (fitur dependen).
- Fitur dengan relasi (fitur dependen).
Yaitu toleransi orientasi, lokasi dan *run-out*. Toleransi orientasi contohnya: *parallelisme*, *perpendicularity*, *angularity*, *oriented-profile*. Toleransi lokasi contohnya: posisi, *concentricity*, *coaxiality*, *symmetry* dan *location-profile*. Toleransi *run-out* misalnya *circular run-out* dan *total run-out*.

Untuk GD&T fitur dengan relasi (orientasi, lokasi dan *run-out*), sebuah sistem datum, yang berupa datum A, B dan C, dan datum referensi (*datum reference frame*), dibutuhkan untuk mendefinisikan koordinat asal (*origin of the*

coordinate system) untuk verifikasi toleransi-toleransi tersebut. Tabel 1 memperlihatkan seluruh tipe-tipe dari GD&T tersebut. Hal penting yang perlu diingat adalah toleransi geometri (GD&T) selalu mempunyai nilai yang positif (*One-sided*) tidak seperti toleransi dimensional yang dapat mempunyai nilai negatif.

Gambar 6: Beberapa contoh elemen-elemen GD&T beserta dengan toleransi dimensional.

Tabel 1: Jenis-jenis dari toleransi geometri (GD&T).

No.	Toleransi	Karakteristik	Simbol	Datum dibutuhkan	
1	Bentuk (<i>form</i>)	<i>Straightness</i>	—	tidak	Toleransi tidak berelasi (<i>unrelated tolerance</i>)
		<i>Flatness</i>	▭	tidak	
		<i>Roundness</i>	○	tidak	
		<i>Cylindricity</i>	⊘	tidak	
		Profil garis (<i>profile line</i>)	⌒	tidak	
		Profil permukaan (<i>profile surface</i>)	⌒	tidak	
2	Orientasi (<i>orientation</i>)	<i>Parallelism</i>	//	ya	Toleransi dengan relasi (<i>related tolerance</i>)
		<i>Perpendicularity</i>	⊥	ya	
		<i>Angularity</i>	∠	ya	
		<i>Profile line (oriented)</i>	⌒	ya	
		<i>profile surface (oriented)</i>	⌒	ya	

3	Lokasi (<i>location</i>)	Posisi		ya
		<i>Concentricity (for centre points)</i>		ya
		<i>Coaxiality (for axes)</i>		ya
		<i>Symetry</i>		ya
		<i>Profile line (located)</i>		ya
		<i>Profile surface (located)</i>		ya
4	<i>Run-out</i>	<i>Circular run-out</i>		ya
		<i>Total run-out</i>		ya

Datum dan datum referensi (*datum reference frame*)

GD&T untuk fitur yang mempunyai relasi, dibutuhkan suatu sistem datum yang menjadi referensi dari suatu GD&T yang diberikan. Sistem datum tersebut pada umumnya datum A, B dan C (datum juga bisa dengan simbol-simbol alfabet lainnya, misalnya D dan E). Datum-datum tersebut akan beririsan dan membentuk sebuah datum referensi (*datum reference frame*). Datum referensi tersebut adalah referensi acuan dari suatu GD&T yang terdapat pada suatu komponen. Gambar 7 memperlihatkan sistem datum dan datum referensi.

Gambar 7: (Kiri) Sistem datum dan (kanan) datum referensi (*datum reference frame*).

Pada gambar 7 sebelah kiri, diperlihatkan sistem datum yang terdiri dari tiga jenis datum, yaitu datum A, datum B dan datum C. Sebuah datum bisa berupa permukaan dan aksis dari suatu fitur yang simetri. Datum A merupakan datum pertama yang menjadi acuan utama sebuah GD&T dan juga menjadi acuan datum-datum lainnya pada suatu komponen. Datum A pada umumnya harus diterapkan pada fitur yang paling stabil diantara fitur-fitur lainnya pada suatu produk, misalnya sebuah permukaan yang paling besar pada produk tersebut (contohnya: *base* dari suatu komponen). Pada gambar 7 (kiri), datum A diterapkan pada bagian belakang balok tersebut karena mempunyai permukaan yang paling luas dan paling stabil. Jenis GD&T yang diterapkan pada datum A adalah selalu jenis GD&T untuk fitur tidak berelasi, misalnya *flatness* dan *cylindricity*, karena datum A adalah datum pertama dan tidak mengacu pada fitur lainnya melainkan hanya mengacu pada fiturnya sendiri. Kemudian, untuk proses verifikasi toleransi datum A, permukaan atau fitur lainnya yang digunakan sebagai datum A harus ditempatkan terlebih dahulu pada permukaan meja pengukuran, karena datum A akan menjadi referensi utama dari datum dan fitur lainnya.

Pada gambar 7 (kanan), datum referensi (*datum reference frame*) diperlihatkan. Datum referensi adalah titik hasil dari irisan seluruh datum yang direpresentasikan dengan datum simulator (lihat gambar 7 sebelah kanan). Datum simulator adalah permukaan yang langsung bertemu dengan suatu datum, sehingga permukaan tersebut seperti mensimulasi datum suatu komponen yang menempel pada permukaan tersebut. Datum referensi merupakan acuan koordinat untuk memverifikasi suatu GD&T untuk fitur yang berelasi. Pada kondisi riil, simulator datum pada umumnya berupa: meja pengukuran untuk datum A dan peralatan *fixturing* untuk datum lainnya.

Gambar 8: Fungsi dari datum pada GD&T.

Penjelasan lebih jelas mengenai sistem datum diperlihatkan pada gambar 8. Pada gambar 8, datum A adalah datum utama sehingga toleransi yang diberikan kepadanya adalah toleransi untuk fitur tidak berelasi, dalam hal ini *flatness*. Hal penting yang harus diingat adalah karena datum A adalah datum yang paling penting, maka fitur yang merepresentasikan datum A tersebut haruslah mempunyai akurasi yang paling tinggi diantara fitur-fitur lainnya, sehingga nilai toleransi geometri untuk datum A haruslah paling kecil dibandingkan dengan nilai toleransi lainnya. Kemudian untuk datum B dan C, datum-datum tersebut mempunyai toleransi untuk fitur yang berelasi, karena datum A sudah ada sehingga bisa dijadikan sebagai referensi. Datum B adalah datum kedua, sehingga hanya mempunyai referensi ke datum A. Datum C adalah datum ketiga sehingga mempunyai dua referensi, yaitu terhadap datum B dan datum A. Sedangkan pada fitur silinder kecil (gambar 8), sumbu silinder tersebut mempunyai referensi toleransi pada datum C, B dan A.

Hal lain yang perlu diketahui adalah urutan referensi datum dan urutan penempatan produknya adalah sebagai berikut. Untuk referensi datum, referensi dibaca dari kiri-ke-kanan. Untuk proses verifikasi toleransinya dan untuk penempatan produknya pada meja pengukuran, dilakukan dari kanan-ke-kiri menurut penulisan datum pada gambar

tekniknya. Misalnya: penulisan datum adalah $/// \phi 0.1 \text{ (M)} \text{ C B A}$, maka referensi untuk fitur tersebut dibaca terhadap datum C, datum C terhadap datum B dan datum B terhadap datum A. kemudian, untuk penempatan produk tersebut di meja pengukuran, dilakukan sebagai berikut: produk tersebut ditempatkan pada meja pengukuran dimulai dengan permukaan datum A, kemudian permukaan datum B dan terakhir permukaan datum C.

Dari penjelasan-penjelasan di atas, dapat dilihat bahwa GD&T mempunyai arti yang sangat mendalam dibalik simbol-simbol yang dimilikinya. Hal ini adalah untuk mengakomodasi keinginan seorang disainer produk agar sampai kepada seseorang yang melakukan proses manufaktur dan seseorang yang melakukan pengukuran tanpa menimbulkan ambiguitas (bermakna ganda).

Zona toleransi (tolerance zone)

Zona toleransi (*tolerance zone*) adalah zona dimana permukaan suatu fitur yang ditoleransi berada di dalamnya. Zona toleransi dapat berbentuk:

- Bidang planar.
Zona yang dibatasi antara dua bidang planar (datar) yang saling sejajar satu dengan lainnya.
- *Circular* atau *cylindrical* (nilai toleransi didahului dengan simbol “ $\varnothing$ ”).
Zona yang dibatasi antara dua lingkaran atau dua silinder yang konsentrik antara satu dengan lainnya.
- *Spherical* (nilai toleransi didahului dengan simbol “ $S\varnothing$ ”).

Selama permukaan suatu fitur masih berada pada salah satu zona toleransi tersebut (terlepas dari bentuk permukaan fitur tersebut), maka fitur tersebut dianggap masih berada pada batas toleransinya. Misalnya, suatu lingkaran dengan bentuk yang acak asalkan masih dalam zona toleransi yang didefinisikan, maka bentuk lingkaran tersebut masih dapat diterima (gambar 9). Pada gambar 9, contoh toleransi geometri *roundness* pada sebuah lingkaran diperlihatkan. Pada gambar 9, walaupun lingkaran tersebut mempunyai bentuk yang acak, tetapi lingkaran tersebut masih berada di dalam zona toleransinya, sehingga lingkaran tersebut dapat diterima. Oleh karena itu, GD&T merepresentasikan suatu fitur secara keseluruhan (tidak seperti toleransi dimensional).

Gambar 9: (a) lingkaran dengan toleransi dimensional dan geometrik *roundness* dan (b) zona toleransi dan bentuk aktual lingkaran tersebut.

Gambar 10 memperlihatkan contoh zona toleransi berbentuk silinder untuk toleransi geometri *parallelism*. Pada gambar 10, sebuah komponen yang memiliki dua buah lubang dengan diameter 85 mm dan 44 mm. Lubang dengan diameter 85 mm dipilih sebagai datum A. GD&T yang diberikan adalah lubang yang kecil dengan diameter 44 mm harus parallel terhadap lubang yang besar dengan diameter 85 mm dengan nilai zona toleransinya berbentuk silinder dengan diameter 0.1 mm. Representasi dari GD&T tersebut diperlihatkan pada gambar 10 (kanan), yaitu selama aksis dari lubang yang kecil tersebut berada dalam sebuah silinder dengan diameter 0.1 mm dan aksis dari silinder tersebut parallel terhadap aksis dari datum A, maka lubang kecil tersebut dianggap parallel terhadap lubang yang besar tersebut dan sebaliknya.

Gambar 10: Contoh toleransi geometri *parallelism* dan zona toleransi (*tolerance zone*) berbentuk silinder.

Beberapa penjelasan dengan menggunakan contoh untuk toleransi bentuk (*form*), orientasi (*orientation*), lokasi (*location*) dan *run-out* akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

3.3.1 Toleransi bentuk (*form*)

Contoh pertama dan yang paling umum untuk toleransi geometri (*form*) adalah *flatness*. Gambar 11 memperlihatkan contoh dari sebuah komponen yang mempunyai toleransi *flatness* dan arti dari toleransi tersebut. Pada gambar 11 bagian kiri, diperlihatkan sebuah balok yang sisi atasnya mempunyai toleransi *flatness* sebesar 0.5 mm. Arti dari *flatness* tersebut diperlihatkan pada gambar 11 bagian kanan. Arti dari toleransi *flatness* tersebut adalah apapun bentuk dari permukaan sisi atas dari balok tersebut, asalkan permukaannya masih berada di antara dua bidang datar yang saling sejajar yang berjarak 0.5 mm antara satu dengan lainnya, maka permukaan sisi atas balok tersebut masih dianggap datar sesuai dengan toleransi *flatness* yang diberikan.

Gambar 11: Toleransi geometri *flatness*.

Contoh kedua adalah toleransi *roundness*. Gambar 12 memperlihatkan contoh dari toleransi *roundness* dari sebuah silinder. Pada gambar 12 sebelah kiri, sebuah silinder dengan toleransi *roundness* sebesar 0.3 mm diperlihatkan. Pada gambar 12 sebelah kanan, arti dari toleransi *roundness* tersebut adalah bahwa silinder tersebut akan dianggap masih dalam batas toleransi terlepas bagaimanapun bentuk permukaan silinder tersebut, asalkan permukaan silinder tersebut seluruhnya masih berada diantara zona yang dibatasi oleh dua buah silinder yang mempunyai aksis yang sama (aksis kedua silinder tersebut saling berhimpit) dan kedua silinder tersebut perbedaan jari-jarinya antara silinder yang kecil dan yang besar adalah sebesar 0.3 mm.

Gambar 12: Toleransi geometri *roundness*.

3.3.2 Toleransi orientasi (*orientation*)

Mulai dari toleransi orientasi dan seterusnya, toleransi-toleransi geometri tersebut adalah toleransi yang berelasi. Dengan kata lain, dalam pendefinisian toleransi-toleransi tersebut, selalu membutuhkan datum (fitur referensi).

Contoh pertama yang dipresentasikan untuk toleransi orientasi adalah toleransi *parallelism* yang diperlihatkan pada gambar 13. Contoh tersebut dipresentasikan oleh sebuah komponen yang memiliki dua buah fitur silinder yang terdiri dari sebuah silinder yang kecil dan yang besar (gambar 13 sebelah kanan). Kedua silinder tersebut mempunyai toleransi *parallelism*. Namun demikian, yang akan dijelaskan lebih rinci adalah toleransi *parallelism* silinder dengan diameter yang lebih kecil. Toleransi *parallelism* pada silinder yang kecil tersebut adalah sebesar 0.1 mm relatif terhadap datum B dan datum A. Datum B adalah aksis dari silinder yang lebih besar dan datum A adalah bidang planar (datar) pada sisi bawah komponen tersebut.

Arti dari toleransi *parallelism* pada silinder yang kecil adalah bahwa silinder kecil tersebut dianggap masih sejajar dengan silinder yang besar (datum B), dimana, datum B tersebut sejajar dengan datum A, apabila seluruh aksis dari silinder tersebut masih berada pada zona yang dibatasi oleh dua buah bidang datar yang sejajar yang terpisah dengan jarak 0.1 mm. Kedua bidang datar tersebut sejajar (dengan sempurna) terhadap aksis dari silinder yang besar (datum B) dan axis dari datum B tersebut sejajar (dengan sempurna) terhadap bidang datar datum A.

Gambar 13: Toleransi geometri *parallelism*.

Contoh kedua adalah toleransi *perpendicularity* yang diperlihatkan pada gambar 14. Pada gambar 14 sebelah kiri, diperlihatkan toleransi *perpendicularity* untuk sebuah lubang vertikal pada suatu komponen. Lubang vertikal tersebut mempunyai toleransi *perpendicularity* sebesar 0.01 mm terhadap datum A yang merupakan aksis dari silinder horisontal. Gambar 14 sebelah kanan memperlihatkan arti dari toleransi tersebut, yaitu lubang tersebut dianggap masih tegak lurus terhadap datum A (silinder horisontal) apabila seluruh aksis atau sumbu dari silinder vertikal tersebut kesemuanya berada diantara dua bidang datar yang saling sejajar dan terpisah dengan jarak 0.01 mm dan kedua bidang datar tersebut tegak lurus (secara sempurna) terhadap sumbu silinder horisontal tersebut, yaitu datum A.

Gambar 14: Toleransi geometri *perpendicularity* (ketegaklurusan).

3.3.3 Toleransi lokasi (*location*)

Toleransi lokasi merupakan toleransi yang sangat berkaitan dengan proses perakitan. Karena, toleransi tersebut pada umumnya diberikan pada fitur-fitur lubang dan pin yang merupakan fitur-fitur perakitan (*assembly features*). Toleransi lokasi merupakan salah satu toleransi geometri yang paling sering digunakan. Toleransi lokasi pada umumnya digunakan untuk mengoptimalisasi posisi lubang-lubang baut untuk menggabungkan dua buah komponen atau untuk mengoptimalisasi dan mengontrol komponen berporos (*shaft*). Toleransi lokasi selalu menggabungkan antara toleransi dimensional yang mengontrol jarak sumbu suatu lubang terhadap sisi-sisi suatu komponen. Gambar 15 memperlihatkan contoh dari toleransi lokasi. Pada gambar 15, diperlihatkan sebuah komponen yang memiliki sebuah fitur lubang. Lubang tersebut mempunyai jarak $L1$ dan $L2$ dari sisi kanan (datum A) dan sisi kiri (datum B). lubang tersebut mempunyai toleransi lokasi sebesar 0.08 mm.

Gambar 15 sebelah kanan memperlihatkan arti dari toleransi lokasi pada lubang tersebut. Lubang tersebut dapat disimpulkan mempunyai lokasi sumbu sesuai dengan toleransi apabila seluruh sumbu lubang tersebut berada dalam zona toleransi yang berbentuk silinder dengan diameter 0.08 mm (gambar 15 kanan). Zona toleransi tersebut harus sejajar (secara sempurna) dengan datum B dan datum A.

pada kondisi riilnya, untuk memverifikasi toleransi lokasi lubang tersebut, pertama-tama, lokasi sumbu lubang tersebut harus diukur terlebih dahulu, yaitu jarak lubang tersebut dari datum A (sisi kiri) dan datum (B) sisi kanan dari komponen tersebut. Setelah jarak sumbu lubang tersebut diketahui, kemudian toleransi lokasi lubang tersebut dapat diverifikasi. Untuk verifikasi toleransi geometri, akan dibahas pada akhir bab ini.

Gambar 15: Toleransi geometri lokasi.

3.3.4 Toleransi *run-out*

Jenis toleransi geometri (GD&T) lainnya adalah toleransi *run-out*. Toleransi jenis ini sangat berguna untuk mengontrol fitur-fitur yang berotasi pada saat beroperasi, seperti poros yang berputar. Toleransi *run-out* mengontrol agar suatu fitur yang berotasi pada saat fitur tersebut beroperasi masih mempunyai deviasi sesuai dengan yang ditentukan. Gambar 16 dan 17 memperlihatkan contoh dari aplikasi toleransi *run-out*.

Pada gambar 16, toleransi *run-out* mengontrol agar permukaan suatu poros yang berputar ketika beroperasi mempunyai deviasi maksimal sebesar 0.5 mm terhadap suatu datum A-B yang merupakan sumbu putar dari poros tersebut. Poros tersebut dianggap masih dalam batas toleransi apabila seluruh permukaan poros tersebut masih berada pada zona toleransi yaitu diantara dua buah lingkaran sesumbu dengan perbedaan jari-jari sebesar 0.5 mm (gambar 16). Kedua lingkaran tersebut mempunyai titik pusat yang berhimpitan pada garis sumbu datum A-B. Pada umumnya, toleransi tersebut menjaga agar tidak ada gesekan antara poros dengan *housing*-nya ketika berputar saat beroperasi.

Gambar 16: Toleransi geometri *run-out* sebuah axis. Gambar 17: Toleransi geometri *run-out* sebuah bidang datar.

Gambar 17 memperlihatkan contoh toleransi *run-out* untuk sebuah bidang datar yang berputar. Pada gambar 17, sebuah komponen mempunyai toleransi *run-out* pada permukaan atasnya yang lebar. Toleransi tersebut mengontrol permukaan datar tersebut agar tetap datar sesuai dengan nilai toleransinya ketika komponen tersebut berputar saat beroperasi. Nilai toleransi *run-out* dari permukaan datar tersebut adalah 0.1 mm terhadap datum D, yaitu aksis dari komponen tersebut. Arti dari definisi toleransi tersebut adalah permukaan tersebut akan dianggap datar apabila selama komponen tersebut berputar, seluruh permukaan datar tersebut masih berada dalam zona toleransi yang berupa dua buah bidang datar yang saling sejajar dan terpisah dengan jarak 0.1 mm. Kedua bidang datar tersebut tegak lurus (secara sempurna) terhadap sumbu putar dari komponen tersebut yang merupakan datum D (gambar 17 kanan).

Untuk mengetahui berbagai contoh variasi dari toleransi-toleransi bentuk, orientasi, lokasi dan *run-out*, pembaca dapat merujuk ke standar ASME Y14.5 dan ISO 1101.

3.3.5 Kondisi material (*material condition*) dan bonus toleransi

Pada toleransi geometri, terdapat dua konsep penting yang perlu diketahui, yaitu **kondisi material (*material condition*)** dan **bonus toleransi**. Kedua konsep tersebut sangat penting dan sangat besar perannya pada suatu proses perakitan (*assembly*), dimana dengan adanya bonus sesuai dengan kondisi material pada saat diinspeksi, maka jumlah komponen yang gagal uji inspeksi dapat berkurang, karena dengan adanya bonus, sebuah komponen masih boleh mempunyai deviasi dengan besar tertentu melebihi batas toleransinya (yang tertulis di gambar tekniknya).

Kondisi material (*material condition*)

Kondisi material hanya dimiliki oleh fitur-fitur *size*, seperti silinder dan bola. Fitur yang paling sering diterapkan kondisi material pada saat fitur tersebut diberikan toleransi adalah silinder. Kondisi material adalah kondisi dimana sebuah fitur-fitur *size* tersebut diproduksi lebih besar atau lebih kecil dari ukuran atau dimensi nominalnya, misalnya sebuah silinder dibuat lebih kecil atau sebuah lubang dibor lebih besar dari nilai nominalnya (nilai pada gambar tekniknya).

Gambar 18: Kondisi material pada sebuah pin atau poros (silinder) dan lubang.

Dua macam kondisi material yang akan dibahas adalah:

- Kondisi material maksimum (*maximum material condition/MMC*).
- Kondisi material minimum (*least material condition/LMC*).

Pengertian dari kondisi material maksimum (MMC) adalah misalnya, ketika pin atau poros yang berbentuk silinder diproduksi dengan ukuran diameter terbesarnya (*the largest shaft*) atau ketika sebuah lubang dibor dengan ukuran diameter terkecilnya (*the smallest hole*) sesuai dengan nilai dimensi yang diberikan. Pengertian kondisi material minimum (LMC) adalah misalnya, ketika pin atau poros yang berbentuk silinder diproduksi dengan ukuran diameter terkecilnya (*the smallest shaft*) atau ketika sebuah lubang dibor dengan ukuran diameter terbesarnya (*the largest hole*) sesuai dengan nilai dimensi yang diberikan. Gambar 18 memperlihatkan contoh dari MMC dan LMC pada sebuah pin atau poros (yang berbentuk silinder) dan sebuah fitur lubang. Untuk pin tersebut, MMC adalah ketika diameternya 30 mm dan LMC adalah ketika diameternya 29.8 mm (gambar 18 kiri). Untuk lubang tersebut, MMC adalah ketika diameternya 19.9 mm dan LMC adalah ketika diameternya 20.1 mm (lihat gambar 18 kanan).

Gambar 19: Ilustrasi dari kondisi material maksimum (MMC).

Ilustrasi dari kondisi material maksimum (MMC) sebuah pin silinder dan implikasi dari MMC tersebut pada kondisi riil silinder tersebut diperlihatkan pada gambar 19. Pada gambar 19 atas diperlihatkan sebuah disain silinder dengan nilai diameter nominalnya beserta toleransinya sebesar $100 \pm 0.5 \text{ mm}$. Secara fisik, MMC pin silinder tersebut adalah sebuah lubang dimana pin tersebut harus bisa masuk sehingga mempunyai fungsi yang diinginkan, seperti menggabungkan dua pelat yang berbeda. Dengan nominal dimensi tersebut, kondisi maksimum material (MMC) silinder tersebut adalah sebesar $100 + 0.5 = 100.5 \text{ mm}$. Pada gambar 19 tengah, ketika silinder tersebut diproduksi lebih kecil dari nilai MMC-nya dan masih lebih besar dari nilai minimum toleransinya, maka sejumlah deviasi dari bentuk silinder tersebut diperbolehkan, dengan kata lain “bonus”. Misalnya, apabila silinder tersebut diproduksi dengan diameter 99.9 mm , maka silinder tersebut diperbolehkan mempunyai deviasi sebesar $100.5 - 99.9 = 0.6 \text{ mm}$. Selama pin silinder tersebut mempunyai deviasi tidak melebihi 0.6 mm , maka pin silinder tersebut masih bisa masuk kedalam lubang tersebut. Pada gambar 19 bawah, ketika pin silinder tersebut diproduksi pada kondisi MMC-nya, yaitu mempunyai diameter 100.5 mm , maka silinder tersebut harus mempunyai bentuk yang sempurna agar bisa berfungsi sesuai dengan yang diinginkan. Hal ini mempunyai dampak ekonomi yang sangat besar dalam suatu proses manufaktur.

Bonus toleransi

Sebelum bonus toleransi dibahas, ada dua hal penting yang harus dipahami yaitu kita harus membedakan arti dari “MMC” dan “Simbol MMC”:

- MMC (kondisi maksimum material) artinya adalah lubang terkecil atau poros/pin terbesar.
- Simbol MMC pada gambar teknik artinya adalah sebuah bonus toleransi akan didapatkan apabila sebuah fitur *size* terdeviasi dari nilai MMC-nya (misalnya sebuah lubang dibuat lebih besar dari diameter minimumnya atau sebuah pin/poros dibuat lebih kecil dari diameter maksimumnya).

Hal ini berlaku juga untuk simbol “LMC” dan “Simbol LMC”, yaitu:

- LMC (kondisi maksimum material) artinya adalah lubang terbesar atau poros/pin terkecil.
- Simbol LMC pada gambar teknik artinya adalah sebuah bonus toleransi akan didapatkan apabila sebuah fitur *size* terdeviasi dari nilai LMC-nya (misalnya sebuah lubang dibuat lebih kecil dari diameter maksimumnya atau sebuah pin/poros dibuat lebih besar dari diameter minimumnya).

Gambar 20: Contoh dari bonus toleransi pada sebuah fitur lubang (*hole*) karena MMC. Bonus memberikan zona toleransi yang lebih besar dari zona toleransi awal yang diberikan.

Gambar 21: Contoh dari bonus toleransi pada sebuah fitur lubang (*hole*) karena LMC.

Contoh MMC untuk toleransi lokasi dengan simbol $\varnothing 0.5 \text{ (M) } \text{A B}$ diperlihatkan pada gambar 20. Pada gambar 20, sebuah lubang mempunyai toleransi lokasi sebesar 0.5 mm terhadap datum B dan datum A. toleransi lokasi tersebut mempunyai simbol MMC “M” yang berarti apabila lubang tersebut dibuat lebih besar dari nilai diameter minimumnya (terdeviasi dari nilai MMC-nya), yaitu misalnya sebesar 60 mm (nilai terukur) > 59 mm (nilai MMC – nya), maka lokasi sumbu dari lubang tersebut bisa bergeser lebih dari 0.5 mm karena adanya bonus toleransi. Dalam hal ini, bonus toleransi adalah sebesar: nilai diameter terukur – MMC, yaitu $60 - 59 = 1 \text{ mm}$. Sehingga total zona toleransi dari sumbu lubang tersebut adalah sebesar $0.5 \text{ mm} + 1 \text{ mm} = 1.5 \text{ mm}$. Hal ini disebabkan karena apabila lubang tersebut dibuat lebih besar dari nilai diameter minimumnya, maka apabila lubang tersebut bergeser lebih dari nilai toleransi lokasinya, maka pin yang didisain untuk masuk ke lubang tersebut masih dapat masuk karena ukuran lubang yang lebih besar tersebut.

Sedangkan, contoh LMC untuk toleransi lokasi dengan simbol $\varnothing 0.5 \text{ (L) } \text{A B}$ diperlihatkan pada gambar 21. Pada gambar 21, sebuah lubang mempunyai toleransi lokasi sebesar 0.5 mm terhadap datum B dan datum A. toleransi lokasi tersebut mempunyai simbol LMC “L” yang berarti apabila lubang tersebut dibuat lebih kecil dari nilai diameter maksimumnya (terdeviasi dari nilai LMC-nya), yaitu misalnya sebesar 60 mm (nilai terukur) < 61 mm (nilai LMC – nya), maka lokasi sumbu dari lubang tersebut bisa bergeser lebih dari 0.5 mm karena adanya bonus toleransi. Dalam hal ini, bonus toleransi adalah sebesar: LMC - nilai diameter terukur, yaitu $61 - 60 = 1 \text{ mm}$. Sehingga, total zona toleransi dari sumbu lubang tersebut adalah sebesar $0.5 \text{ mm} + 1 \text{ mm} = 1.5 \text{ mm}$. Hal ini disebabkan karena apabila lubang tersebut dibuat lebih besar dari nilai diameter minimumnya, maka apabila lubang tersebut bergeser lebih dari nilai toleransi lokasinya, maka ada material lebih pada lubang tersebut untuk bisa dibor untuk proses *finishing* lubang tersebut (ada material lebih untuk proses permesinan/pengeboran selanjutnya).

Contoh riil manfaat mengaplikasikan MMC dan LMC pada fitur size (misalnya: sebuah lubang) adalah:

- Manfaat menggunakan simbol MMC.

Simbol MMC digunakan untuk menginformasikan bahwa lubang tersebut berfungsi untuk, misalnya, sebagai lubang untuk memasukkan sebuah baut untuk mengikat dua pelat. Apabila lubang tersebut dibuat lebih besar, maka artinya, kemungkinan baut pengencang tersebut bisa masuk kelubang tersebut akan bertambah besar. Karena hal inilah terdapat bonus toleransi pada kondisi tersebut. Hal ini sangat berguna pada proses perakitan dan inspeksi kualitas. Dengan adanya bonus toleransi, maka toleransi yang diinspeksi akan semakin besar yang artinya, kemungkinan komponen tersebut ditolak akan semakin kecil sehingga bisa menurunkan biaya

perbaikan atau *scrap*. Dan akhirnya, biaya dari proses manufakturnya akan berkurang.

- Manfaat menggunakan simbol LMC.

Simbol LMC digunakan untuk menginformasikan bahwa sejumlah material harus disisakan pada sebuah fitur, misalnya sebuah lubang, agar fitur tersebut dapat dilakukan proses permesinan selanjutnya, misalnya pengeboran. Hal ini menjelaskan bahwa apabila, misalnya, sebuah lubang dibuat lebih kecil diameternya, maka artinya lubang tersebut mempunyai material lebih untuk proses pengeboran selanjutnya, sehingga apabila lubang tersebut terdeviasi lebih dari nilai toleransi lokaisnya, karena adanya bonus toleransi, maka lubang tersebut masih menyisakan material untuk dibor pada proses selanjutnya.

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, kondisi material pada kondisi riilnya pada saat proses inspeksi sebuah fitur dapat memberikan sebuah bonus toleransi, sehingga toleransi yang dimiliki lebih besar dari pada toleransi yang didefinisikan dari awalnya. Hal ini akan mengurangi biaya proses manufaktur dan inspeksi kualitas karena akan menurunkan jumlah komponen yang tidak lolos tes pengukuran. Namun demikian, bonus toleransi akan meningkatkan variasi dari sebuah fitur perakitan pada proses analisis akumulasi rantai variasi (*stack-up*) toleransi.

3.4 Verifikasi toleransi dimensional dan toleransi geometri (GD&T)

Pada tahap disain, baik toleransi dimensional maupun toleransi geometri (GD&T), nilai dimensi nominal dan toleransinya ditentukan dan diberikan untuk setiap fitur pada sebuah komponen. Setelah komponen tersebut dimanufaktur, setiap fitur pada komponen tersebut harus diverifikasi (diinspeksi) apakah masih masuk dalam nilai-nilai toleransinya atau tidak. Proses ini pada umumnya berada pada pos inspeksi kualitas dalam suatu lini produksi. Karena, tidak ada sebuah proses manufaktur yang sempurna, setiap komponen yang diproduksi pasti memiliki deviasi dari nilai nominal desainnya. Proses verifikasi dimensi dan geometri disebut metrologi manufaktur (pengukuran) [Syam 2018].

Verifikasi toleransi dimensional, seperti panjang dan diameter, dapat dilakukan dengan alat-alat ukur yang sudah umum diketahui, seperti jangka sorong, mikrometer dan *gauge block*. Ketiga alat ukur tersebut diperlihatkan pada gambar 22.

Gambar 22: Contoh alat yang digunakan untuk memverifikasi dimensi suatu fitur. (a) *Gauge block*, (b) jangka sorong/*vernier caliper* dan (c) mikrometer.

Verifikasi toleransi geometri (GD&T), seperti untuk toleransi *flatness*, *perpendicularity* dan *position*, membutuhkan suatu sistem pengukuran yang lebih rumit dibandingkan dengan verifikasi toleransi dimensional. Alat ukur konvensional yang umum digunakan di rantai produksi untuk memverifikasi toleransi geometri adalah *dial-gauge* dan alat ukur modern dan universal (bisa digunakan untuk memverifikasi baik toleransi geometri maupun dimensional) adalah alat pengukur koordinat (CMM). Gambar 23 memperlihatkan contoh dari sistem *dial-gauge* dan CMM untuk memverifikasi toleransi geometri (GD&T).

Gambar 23: Penggunaan dial-gauge untuk menverifikasi berbagai macam toleransi geometri. (a) *flatness*, (b) *perpendicularity*, (c) *run-out* dan (d) Contoh CMM untuk memverifikasi berbagai macam toleransi geometri dan dimensional (3D and 2D).

Untuk lebih memahamai mengenai verifikasi dimensi dan geometri, pembaca bisa merujuk pada buku “Metrologi manufaktur: Pengukuran geometri dan analisis ketidakpastian” [Syam 2018].

BAB 4

Contoh pembacaan toleransi dimensi dan geometri (GD&T)

Bab ini memperlihatkan dan membahas beberapa contoh dari pembacaan toleransi geometri (GD&T) yang terdapat pada gambar kerja. Diharapkan dengan diberikannya beberapa contoh tersebut, pembaca akan lebih paham mengenai arti dari GD&T. Karena, pemahaman dari GD&T merupakan hal mutlak untuk memahami analisis variasi rantai toleransi (*tolerance stack-up analysis*) yang merupakan inti dari buku ini. Pada hakikatnya, analisis variasi rantai toleransi merupakan translasi dari GD&T pada gambar teknik menjadi sebuah rantai dari suatu transformasi matriks yang kemudian dihitung untuk menganalisis kemungkinan kesalahan-kesalahan (*errors*) yang akan didapatkan pada sebuah produk yang dirakit dari beberapa komponen sebelum komponen-komponen tersebut dimanufaktur dan dirakit satu dengan lainnya. **Bab ini merupakan pelengkap dari Bab 3** untuk memahami lebih dalam mengenai makna dari sebuah GD&T pada suatu gambar teknik atau gambar kerja.

4.1 Squareness

Gambar 1 dan Gambar 2 memperlihatkan dua contoh toleransi geometri untuk *squareness*. Gambar 1 memperlihatkan contoh dari *squareness* sebuah aksis (garis) terhadap sebuah datum aksis dan Gambar 2 memperlihatkan contoh dari *squareness* sebuah permukaan terhadap sebuah datum aksis.

Gambar 1: Contoh dari *squareness* sebuah aksis (garis) terhadap sebuah datum aksis.

Gambar 2: Contoh dari *squareness* sebuah permukaan terhadap sebuah datum aksis.

Pembacaan toleransi geometri pada Gambar 1 adalah sebagai berikut aksis dari lubang vertikal, yang ditunjuk, harus berada di antara zona toleransi dua bidang datar yang saling parallel, yang terpisah sejauh 0.03 dan yang tegak lurus terhadap aksis datum A. Pada Gambar 2, pembacaan toleransi geometrinya adalah sebagai berikut: permukaan silinder yang ditunjuk harus berada di antara zona toleransi dua bidang datar yang saling parallel, yang terpisah sejauh 0.02 dan yang tegak lurus terhadap aksis datum B.

4.2 Parallelism

Gambar 3 memperlihatkan sebuah contoh *parallelism* dari sebuah permukaan benda terhadap sebuah permukaan datum. Pembacaan toleransi geometri pada Gambar 3 adalah sebagai berikut: permukaan yang ditunjuk harus berada pada zona toleransi berupa dua bidang datar yang parallel, yang terpisah sejauh 0.02 dan yang parallel terhadap permukaan datum A. Gambar 4 memperlihatkan contoh *parallelism* sebuah aksis (garis) terhadap sebuah aksis datum. Pembacaan toleransi geometri pada gambar 4 adalah sebagai berikut: aksi dari lubang yang ditunjuk harus berada pada sebuah zona toleransi yang berbentuk silinder dengan diameter 0.03. Dimana, silinder, yang merupakan zona toleransi tersebut, harus parallel terhadap aksis datum A. Dari kedua contoh tersebut, *parallelism* dari suatu fitur dapat mempunyai bentuk yang berbeda-beda, misalnya antara suatu aksis dengan suatu permukaan, antara suatu permukaan dan permukaan lainnya dan antara suatu aksis dengan aksis lainnya. Hal ini juga berlaku untuk kebanyakan toleransi geometri lainnya.

Gambar 3: Contoh *parallelism* dari sebuah permukaan benda terhadap sebuah permukaan datum.

Gambar 4: Contoh *parallelism* sebuah aksis (garis) terhadap sebuah aksis datum.

Gambar 5: Contoh profil garis dari sebuah kurva dari suatu komponen berbentuk kompleks.

4.3 Profil garis (*Line profile*)

Gambar 5 memperlihatkan sebuah contoh dari toleransi geometri profil garis. Pembacaan arti toleransi geometri pada Gambar 5 adalah sebagai berikut: garis profil yang ditunjuk pada gambar teknik tersebut harus berada pada zona toleransi yang berupa dua buah garis profil yang terpisah sebesar 0.1. Toleransi ini merupakan **toleransi tidak ber-relasi**. Sehingga, toleransi jenis ini tidak memerlukan atau tidak mendefinisikan sebuah datum pada simbol toleransinya.

4.4 Profil permukaan (*Surface profile*)

Gambar 6 memperlihatkan sebuah contoh dari toleransi geometri profil permukaan. Pada Gambar 6, pembacaan toleransi geometri profil permukaan tersebut adalah sebagai berikut: permukaan yang ditunjuk harus berada pada zona toleransi berbentuk dua permukaan lengkung yang terpisah sejauh 0.02. Toleransi jenis ini tidak memerlukan atau tidak mendefinisikan sebuah datum pada simbol toleransinya. Hal penting yang perlu diingat adalah, karena bentuk permukaan yang ditoleransi berupa lengkungan, maka jumlah titik sampel yang diukur pada proses verifikasi, misalnya dengan menggunakan sebuah mesin CMM, akan sangat mempengaruhi hasil proses verifikasinya.

Gambar 6: Contoh toleransi profil permukaan sebuah permukaan yang berbentuk kurva pada sebuah komponen.

4.5 Simetri

Pembacaan toleransi *symetry* pada Gambar 7 adalah aksis yang ditunjuk harus berada di antara dua buah garis yang parallel yang terpisah sejauh 0.08 dan yang terpisah dengan jarak yang sama dari garis rata-rata dari datum B dan C. Sedangkan, pembacaan toleransi *symetry* pada Gambar 8 adalah aksis yang ditunjuk harus berada di antara dua buah garis yang parallel yang terpisah sejauh 0.03. Dimana, zona toleransi tersebut terpisah dengan jarak yang sama dari garis rata-rata dari datum A dan B.

Gambar 7: Contoh toleransi geometri *symetry* sebuah aksis terhadap sebuah aksis datum.

Gambar 8: Contoh toleransi geometri *symetry* sebuah aksis terhadap sebuah aksis datum yang merupakan rata-rata dari dua buah aksis.

4.6 Concentricity

Pembacaan toleransi geometri pada Gambar 9 adalah sebagai berikut: aksis dari silinder yang ditunjuk harus berada di dalam zona toleransi berbentuk silinder dengan diameter 0.03 dan koaksis dengan aksis silinder datum A. Sedangkan, Pembacaan toleransi geometri pada Gambar 10 adalah sebagai berikut aksis dari silinder yang ditunjuk harus berada di dalam zona toleransi berbentuk silinder dengan diameter 0.05 dan koaksis dengan aksis rata-rata aksis dari datum A dan B.

Gambar 9: Contoh toleransi geometri *concentricity* sebuah aksis dengan sebuah datum aksis.

Gambar 10: Contoh toleransi geometri *concentricity* sebuah aksis dengan sebuah datum aksis yang merupakan rata-rata dari dua buah datum aksis A-B.

4.7 Angularity

Pembacaan toleransi geometri pada Gambar 11 adalah sebagai berikut aksis dari lubang yang ditunjuk harus berada di dalam zona toleransi silinder dengan diameter 0.06 dan aksisnya bersudut 60° terhadap permukaan datum A. Sedangkan, pembacaan toleransi geometri pada Gambar 12 adalah sebagai berikut: permukaan yang ditunjuk harus berada di dalam zona toleransi berupa dua bidang datar yang parallel dan terpisah sejauh 0.08. Dimana, kedua bidang parallel tersebut bersudut 30° terhadap permukaan datum A.

Gambar 11: Contoh toleransi geometri *angularity* sebuah aksis yang ditunjuk dengan sebuah aksis datum A.

Gambar 12: Contoh toleransi geometry *angularity* sebuah permukaan yang ditunjuk dengan sebuah permukaan datum A.

4.8 Position/location

Gambar 13 dan gambar 14 memperlihatkan dua contoh dari toleransi geometri *position/location*. Pembacaan toleransi geometri untuk Gambar 13 adalah sebagai berikut: aksis dari lubang yang ditunjuk harus berada dalam zona toleransi berupa silinder dengan diameter 0.01 dan aksis dari zona toleransi silinder tersebut harus berada pada jarak 30 dari aksis silinder pertama dan 45 dari aksis silinder ke dua dan parallel dengan aksis kedua lubang lainnya. Pembacaan toleransi pada gambar 14 adalah sebagai berikut: aksis dari lubang yang ditunjuk harus berada dalam zona toleransi berupa silinder dengan diameter 0.05 dan aksis dari silinder zona toleransi tersebut harus berjarak $50/2 = 25$ dan parallel dari aksis silinder utama. Khusus untuk toleransi geometri jenis *position/location*, walaupun pada simbol toleransinya tidak merujuk pada suatu datum, tetapi pada dasarnya, toleransi jenis ini merujuk pada suatu datum. **Pada umumnya, penulisan toleransi *position/location* selalu mencantumkan datum yang akan dirujuk.**

Gambar 13: Contoh sebuah toleransi geometri *position/location* dari sebuah aksis lubang yang ditunjuk terhadap dua aksis lubang lainnya.

4.9 Straightness

Gambar 15 memperlihatkan contoh dari toleransi geometri *straightness* pada sebuah benda yang sama, namun dengan situasi yang berbeda-beda. Pada gambar 15a, diperlihatkan sebuah contoh *straightness* sebuah permukaan yang ditunjuk dan toleransinya bukan merujuk pada suatu aksis. Pembacaan toleransi pada gambar 15a adalah sebagai berikut: profil permukaan yang ditunjuk harus berada pada zona toleransi berupa dua buah garis yang saling parallel yang terpisah sejauh 0.03. Pada gambar 15b, diperlihatkan sebuah contoh *straightness* pada sebuah aksis yang ditunjuk dan toleransinya merujuk kepada aksis dari silinder yang kecil. Pembacaan toleransi pada gambar 15b adalah sebagai berikut: aksis dari silinder kecil yang ditunjuk harus berada pada zona toleransi berupa dua buah garis yang saling parallel dan terpisah sejauh 0.03 dan zona toleransi tersebut sepanjang aksis silinder kecil. Gambar 15c memperlihatkan sebuah contoh dari toleransi geometri *straightness* sebuah aksis yang toleransinya terhadap seluruh aksis dari kedua silinder besar dan kecil. Pembacaan toleransi pada gambar 15c adalah sebagai berikut: seluruh aksis dari kedua silinder yang ditunjuk harus berada pada zona toleransi berupa dua buah garis yang saling parallel dan terpisah sejauh 0.03 dan zona toleransi tersebut sepanjang seluruh silinder besar dan kecil tersebut.

Gambar 14: Contoh sebuah toleransi geometri *position/location* dari sebuah aksis lubang yang ditunjuk terhadap aksis silinder terbesarnya.

4.10 Run-out

Gambar 16 dan 17 memperlihatkan dua contoh toleransi geometri *run-out* yang berbeda. Pada gambar 16, toleransi *run-out* mengharuskan seluruh silinder tersebut harus memenuhi toleransi *roundness*, *concentricity* dan *parallelism*-nya. Pembacaan toleransi pada gambar 16 adalah sebagai berikut: pada setiap potongan dari silinder yang ditunjuk, total pergerakan jarum (indikasi) dari *dial-gauge* tersebut harus kurang dari 0.05 ketika silinder tersebut diputar satu putaran penuh. Pada gambar 17, toleransi *run-out* mengharuskan seluruh silinder tersebut harus memenuhi toleransi *squareness*, *flatness* pada sisi permukaan yang ditunjuk. Pembacaan toleransi pada gambar 17 adalah sebagai berikut: pada setiap titik pada radius berapapun pada permukaan yang ditunjuk, total pergerakan jarum (indikasi) dari *dial-gauge* tersebut harus kurang dari 0.1 ketika silinder tersebut diputar satu putaran penuh. Dari kedua contoh toleransi *run-out* ini, dapat dilihat bahwa toleransi *run-out* juga secara tidak langsung meliputi beberapa toleransi geometri lainnya (tergantung pada fitur mana toleransi *run-out* tersebut diberikan).

Gambar 15: (a) Contoh *straightness* sebuah permukaan silinder yang kecil, (b) Contoh *straightness* sebuah aksis silinder yang kecil dan (c) Contoh *straightness* sebuah aksis silinder keseluruhan.

Gambar 16: Contoh sebuah toleransi geometri *run-out* dari sebuah permukaan silinder yang besar terhadap dua buah silinder yang kecil.

Gambar 17: Contoh sebuah toleransi geometri *run-out* dari sebuah permukaan silinder yang besar terhadap silinder yang kecil.

4.11 Kombinasi toleransi geometri

Pada bagian ini, sebuah contoh kombinasi dari berbagai macam toleransi geometri (GD&T) pada sebuah poros yang memiliki berbagai macam fitur diperlihatkan. Pada kondisi riil, sebuah komponen akan mempunyai berbagai macam fitur, dan setiap fitur dapat mempunyai satu atau bahkan lebih toleransi geometri. Contoh ini memperlihatkan salah satu kasus riil untuk sebuah benda yang mempunyai banyak toleransi geometri.

Gambar 18 memperlihatkan gambar 3D dari komponen tersebut. Pada gambar 18, terlihat bahwa poros tersebut terdiri dari berbagai macam silinder dengan berbagai macam ukuran diameter, terdapat beberapa lubang pada sebuah permukaan silinder komponen tersebut dan terdapat sebuah slot (*keyway*) pada salah satu ujung poros tersebut yang mempunyai diameter terkecil. Setiap silinder dengan diameter tertentu pada poros tersebut mempunyai fungsi yang penting. Demikian juga untuk lubang-lubang pada salah satu sisi silindernya, lokasi dari lubang-lubang tersebut mempunyai suatu fungsi yang penting. Geometri dari fitur-fitur pada poros tersebut saling berelasi antara satu dengan lainnya. Untuk merepresentasikan relasi dari berbagai fitur tersebut, hanya toleransi geometri yang dapat diterapkan.

Gambar 18: Model 3D dari sebuah poros dengan berbagai macam fitur.

Gambar 19: Gambar 2D dari poros pada gambar 18 dengan berbagai macam jenis dan nilai toleransi geometri (GD&T). Pada gambar ini, toleransi dimensi yang ditampilkan hanya yang berhubungan dengan GD&T tersebut (diameter untuk toleransi *location/position*).

Gambar 19 memperlihatkan gambar 2D dari poros tersebut (yang gambar 3D nya diperlihatkan pada gambar 18). Pada gambar 2D inilah (sering disebut juga dengan gambar kerja) seluruh nilai dimensi dan toleransi (baik dimensional maupun geometri) dipresentasikan. Pada gambar 19, hanya toleransi geometri dari fitur-fitur poros tersebut dan toleransi dimensional yang berhubungan untuk definisi toleransi-toleransi geometri tersebut yang diperlihatkan (untuk memperjelas toleransi geometrinya).

Penjelasan arti dari jenis-jenis dan nilai-nilai toleransi geometri pada Gambar 19 diperlihatkan dan dijelaskan pada Tabel 1. Dari penjelasan Tabel 1, dapat dilihat bahwa toleransi geometri (GD&T) mempunyai arti yang mendalam dan dapat merepresentasikan keinginan dari seorang disainer yang mendisain komponen tersebut agar komponen tersebut dapat dirakit dengan komponen-komponen lainnya dan dapat berfungsi sesuai dengan yang diinginkan.

Tabel 1: Penjelasan arti dari simbol-simbol dan nilai-nilai toleransi geometri pada Gambar 19. Penjelasan mengenai **MMC** (*Maximum Material Condition*) dapat dilihat di **Bab 3**.

No.	Jenis toleransi	Penjelasan arti
1	<i>Symetry- Garis median</i>	Bidang datar yang terletak di tengah-tengah slot (<i>keyway</i>) adalah harus terletak diantara dua bidang paralel yang berjarak 0.05. Dimana, dua bidang paralel tersebut simetri terhadap aksis dari datum D ketika poros dan slot (<i>keyway</i>) dimanufaktur pada kondisi material maksimum (MMC). Toleransi ini termasuk dalam kategori toleransi location/position .
2	<i>Concentricity</i>	Aksis dari datum silinder yang ditunjuk harus berada dalam sebuah zona toleransi berbentuk silinder yang berdiamater 0.01. Dimana, zona toleransi silinder tersebut <i>coaxial</i> (ko-aksis) dengan aksis dari datum B
3	<i>Concentricity</i>	Aksis dari datum silinder yang ditunjuk harus berada dalam sebuah zona toleransi berbentuk silinder yang berdiamater 0.02. Dimana, zona toleransi silinder tersebut <i>cocentric</i> dengan aksis dari datum A-B
4	<i>Parallelism</i>	Permukaan <i>flange</i> yang ditunjuk harus berada di antara zona toleransi dua bidang datar yang saling sejajar (<i>parallel</i>) yang terpisah sejauh 0.1. Dimana, zona toleransi tersebut sejajar terhadap permukaan datum C
5	<i>Perpendicularity</i> dan <i>flatness</i>	Permukaan yang ditunjuk harus berada di antara zona toleransi dua bidang datar yang terpisah sejauh 0.02 yang tegak lurus (<i>perpendicular</i>) terhadap aksis datum A-B. Dan, permukaan tersebut juga harus berada diantara zona toleransi dua bidang datar yang terpisah sejauh 0.01
6	<i>Location</i>	Titik tengah (<i>centre</i>) dari setiap lubang harus berada dalam zona toleransi silinder berdiamater 0.5. Diameter dari zona toleransi tersebut dapat bertambah apabila ada variasi dari kondisi material maksimum (MMC) dari lubang tersebut dan dari diameter silinder yang merupakan datum B
7	<i>Circular run-out</i>	ketika dicek menggunakan sebuah <i>dial gauge</i> , maksimum pergerakan dari jarum penunjuk <i>dial gauge</i> tersebut disemua titik pada permukaan yang ditunjuk tidak melebihi 0.01 untuk satu putaran penuh terhadap aksis A-B
8	<i>Perpendicularity</i> dan <i>flatness</i>	Permukaan yang ditunjuk harus berada di antara zona toleransi dua bidang datar yang terpisah sejauh 0.02 yang tegak lurus (<i>perpendicular</i>) terhadap aksis datum A-B. Dan, permukaan tersebut juga harus berada diantara zona toleransi dua bidang datar yang terpisah sejauh 0.01

9	<i>Roundness (circularity)</i>	Permukaan <i>bearing</i> yang ditunjuk harus berada di antara zona toleransi dua lingkaran yang saling <i>cocentric</i> yang terpisah sejauh 0.08 secara radial pada setiap bidang datar dari gambar potongan (<i>section</i>) yang tegak lurus pada aksis silinder permukaan <i>bearing</i> tersebut
10	<i>Roundness (circularity)</i>	Permukaan yang ditunjuk harus berada di antara zona toleransi berupa dua buah lingkaran yang <i>cocentric</i> yang terpisah sejauh 0.02 dan yang berada pada semua bidang dari potongan tegak lurus terhadap silinder yang ditunjuk
11	<i>Angularity</i>	permukaan yang ditunjuk harus berada di antara zona toleransi dua bidang datar yang saling parallel dan terpisah sejauh 0.1 dan mempunyai sudut 45° terhadap aksis datum A-B
12	<i>Roundness (circularity)</i>	Permukaan <i>bearing</i> yang ditunjuk harus berada di antara zona toleransi dua lingkaran yang saling <i>cocentric</i> yang terpisah sejauh 0.08 secara radial pada setiap bidang datar dari gambar potongan (<i>section</i>) yang tegak lurus pada aksis silinder permukaan <i>bearing</i> tersebut

BAB 5

Analisis statistik rantai variasi perakitan produk (*tolerance stack-up analysis*)

Bab ini menjelaskan mengenai metode analisis rantai variasi (toleransi) perakitan produk. Secara umum, metode analisis rantai variasi terbagi menjadi **dua macam**: analisis rantai variasi berbasis **worst-case** dan berbasis **statistik**. Analisis rantai toleransi tidak dapat dipisahkan dengan proses alokasi toleransi. Sehingga, istilah alokasi dan analisis rantai variasi (toleransi) sering digunakan secara bersamaan. Alokasi dan analisis toleransi tidak dapat dipisahkan karena untuk melakukan sebuah analisis toleransi, setiap toleransi pada suatu fitur harus didefinisikan (dialokasikan) dulu. Setelah toleransi tersebut dialokasikan, analisis toleransi tersebut dapat dilakukan. Apabila analisis tersebut menghasilkan suatu hasil yang tidak diinginkan, misalnya nilai-nilai toleransi yang diberikan terlalu besar (sehingga komponen-komponen suatu produk tidak dapat dirakit) atau terlalu kecil (sehingga proses manufakturnya semakain mahal), alokasi toleransi tersebut dapat diulang sehingga nilai-nilainya didefinisikan ulang untuk mencapai karakteristik kunci dari produk tersebut. Maka dari itu, proses alokasi dan analisis rantai variasi (toleransi) merupakan **sebuah proses yang berulang** (bersifat iteratif).

Tipe dari analisis rantai variasi (toleransi) sangat berkaitan langsung dengan teknik *sampling* yang dipakai untuk memilih komponen-komponen mana saja atau berapa jumlah komponen yang harus dicek pada suatu pos inspeksi kualitas. Secara umum, analisis rantai variasi berbasis *worst-case* mengharuskan setiap komponen hasil suatu proses manufaktur harus **dicek semuanya** (total *sampling*). Berbeda dengan analisis rantai variasi berbasis statistik, metode analisis ini hanya mengharuskan **pengecekan untuk sebagian komponen** saja dari seluruh komponen yang diproduksi oleh suatu proses manufaktur. Namun demikian, analisis rantai variasi berbasis statistik mempunyai tambahan syarat dalam implementasinya, yaitu suatu proses manufaktur **harus berada dalam kondisi optimalnya** (proses tersebut selalu terkontrol) ketika memproduksi komponen-komponennya. Penjelasan lebih detail mengenai kedua jenis analisis rantai variasi tersebut dan implikasinya terhadap suatu proses produksi akan dibahas lebih detail dalam bab ini.

Dalam bab ini (dan buku ini secara umum), analisis rantai variasi perakitan sering disebutkan sebagai analisis toleransi, analisis akumulasi (*stack-up*) toleransi atau analisis rantai toleransi. Namun demikian, **nama-nama tersebut merujuk pada hal yang sama**.

5.1 Alokasi dan analisis *stack-up* rantai variasi (toleransi)

Alokasi dan analisis toleransi (analisis rantai variasi) merupakan satu kesatuan yang tidak dapat dipisahkan. Alokasi dan analisis toleransi adalah suatu proses yang ber-ulang (*repetitive*) sampai alokasi toleransi yang optimal didapatkan, yaitu nilai-nilai toleransi yang diberikan (dialokasikan) pada sebuah fitur pada suatu komponen, **tidak** mengakibatkan karakteristik kunci suatu produk diluar toleransinya. Untuk mengurangi jumlah pengulangan pada suatu proses alokasi dan analisis toleransi, maka dibutuhkan suatu pendekatan sistematis untuk proses alokasi dan analisis tersebut.

Alokasi toleransi bukanlah suatu proses yang mudah. Pengalaman dari seorang disainer dan proses manufaktur sangat mempengaruhi proses alokasi awal suatu nilai toleransi. Sebagai contoh, apabila nilai suatu toleransi pada suatu fitur terlalu kecil, maka biaya produksi fitur tersebut akan semakin tinggi. Biaya produksi yang semakin tinggi

disebabkan karena semakin kecil nilai toleransi suatu fitur pada suatu komponen atau produk, maka tingkat presisi fitur tersebut akan semakin tinggi. Sehingga, dibutuhkan suatu proses permesinan yang mahal untuk membuatnya karena mesin-mesin dengan tingkat akurasi dan presisi yang tinggi akan dibutuhkan. Dan sebaliknya, apabila nilai toleransi pada suatu fitur terlalu besar, walaupun biaya manufaktur fitur tersebut akan berkurang, tetapi fitur tersebut akan mempunyai variasi yang terlalu besar. Sehingga, komponen yang mempunyai fitur tersebut tidak bisa dirakit (Moroni et al 2011).

Alokasi dan analisis toleransi adalah suatu proses yang dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan lebih detil. Yaitu, akibat dari apabila suatu fitur yang terdeviasi dari nilai nominalnya sebelum suatu proses manufaktur dikerjakan untuk membuat fitur tersebut. Beberapa contoh pertanyaan yang dapat dijawab dengan melakukan alokasi dan analisis toleransi adalah misalnya:

- Apa efek yang ditimbulkan pada suatu produk yang dirakit apabila posisi suatu lubang sebuah *bracket* yang dibuat bergeser beberapa milimeter dari posisi nominalnya?
- Berapa banyak material yang harus disisakan dalam proses permesinan agar cukup untuk dilakukan *post-processing*, misalnya: *boring*, agar surface yang dimiliki suatu fitur lubang menjadi sangat mulus atau dimensi lubang tersebut menjadi sangat akurat?
- Apa efek apabila lubang yang dibuat lebih besar dari nilai nominalnya?
- Apa efek apabila jumlah komponen pada suatu assembly ditambah?
- Apakah suatu rotor dan stator akan bersentuhan satu sama lainnya selama beroperasi?
- Berapa variasi *gap* atau clearance antar dua buah bidang setelah proses perakitan dilakukan?
- Berapa suhu optimal suatu proses perakitan produk mikro agar *gap* dari produk tersebut dapat mengikuti toleransinya?

5.1.1 Analisis akumulasi toleransi (*tolerance stack-up analysis*)

Definisi formal analisis rantai variasi (*tolerance stack-up analysis*) adalah sebuah metode yang digunakan untuk mengetahui efek kumulatif dari toleransi-toleransi yang dialokasikan kepada fitur-fitur pada suatu komponen dan untuk memastikan bahwa efek kumulatif tersebut dapat diterima untuk menjamin fungsionalitas dari suatu produk setelah dilakukan suatu proses perakitan. Secara singkat, analisis rantai variasi adalah sebuah metode untuk mengetahui efek dari variasi dari setiap fitur terhadap produk yang dirakit.

Dengan demikian, analisis akumulasi toleransi adalah suatu proses untuk mengalokasikan toleransi pada suatu fitur, baik toleransi dimensional maupun toleransi geometri (GD&T) dan mengkalkulasi akumulasi toleransi terhadap suatu fitur perakitan (misalnya: *gap* atau jarak antara dua pelat dan jarak antara *rotor* dan *stator*) berdasarkan toleransi yang telah dialokasikan tersebut. Tujuan dari analisis toleransi adalah untuk mengecek suatu dimensi dan toleransi yang diberikan pada suatu komponen, sehingga ketika komponen tersebut dirakit, maka total produk yang dirakit akan berfungsi sesuai dengan yang didisain. Analisis toleransi merupakan hal yang unik karena analisis toleransi adalah setengah ilmu pengetahuan dan setengah seni (*half-science* dan *half-art*).

Analisis toleransi dapat diaplikasikan untuk semua jenis komponen, dari skala besar sampai dengan skala kecil. Hal pertama yang harus dimiliki untuk menganalisis suatu toleransi (rantai variasi) adalah model dari akumulasi toleransi harus direkonstruksi terlebih dahulu.

Ada dua jenis metode untuk analisis akumulasi toleransi, yaitu:

- **Metode analisis 1D/2D**, yaitu dengan menggunakan metode *sprayed-sheet*.
- **Metode analisis matriks**, yaitu metode general secara 3D dengan memperhitungkan efek rotasi.

Metode analisis matriks adalah metode yang lebih komprehensif karena dapat menganalisis efek rotasi yang diakibatkan ketidaksempurnaan sebuah fitur yang dirakit.

Secara umum, langkah-langkah atau prosedur yang dapat dijadikan petunjuk untuk melakukan analisis (rantai variasi) akumulasi toleransi adalah sebagai berikut:

1. Definisikan dimensi (fitur) kritikal yang akan dianalisis, yaitu fitur-fitur perakitan (*assembly features*), seperti *gap/clearance* antar dua pelat setelah perakitan.
2. Rekonstruksi rantai variasi toleransi (*tolerance chain*). Dari fitur kritikal tersebut yang ingin dianalisis.

3. Definisikan atau rekonstruksi model akumulasi toleransi.
4. Pertimbangkan semua sumber-sumber variasi pada model akumulasi toleransi tersebut.
5. Jumlahkan seluruh komponen variasi, baik dengan **metode worst-case** atau **metode statistik**.

5.1.2 Analisis rantai variasi (toleransi): berbasis *worst-case* dan berbasis statistik

Analisis rantai variasi (toleransi) secara umum dapat dibagi menjadi dua jenis: **analisis toleransi berbasis *worst-case*** dan **analisis toleransi berbasis statistik**.

Analisis berbasis *worst-case*

Analisis berbasis *worst-case* adalah sebuah metode analisis toleransi yang menjumlahkan seluruh nilai maximum dari toleransi yang dialokasikan. Total toleransi (variasi) yang dikalkulasi dengan menggunakan metode *worst-case* diformulasikan sebagai berikut:

$$\text{Toleransi total} = Tol_1 + Tol_2 + \dots + Tol_n = \sum_{i=1}^n Tol_i \quad (1)$$

dimana Tol_i adalah nilai toleransi pada dimensi ke- i dalam format *equally-bilateral* ($\pm tol_i$).

Analisis berbasis *worst-case* mempunyai karakteristik sebagai berikut:

- Metode kalkulasi *worst-case* merepresentasikan kemungkinan variasi terbesar pada suatu fitur berdasarkan nilai-nilai toleransi yang diberikan.
- Metode *worst-case* mengasumsikan bahwa semua komponen berada pada kondisi terdeviasi ekstrim pada nilai maksimum toleransinya pada saat bersamaan pada saat kondisi inspeksi kualitas (dalam kenyataannya, kondisi seperti ini akan sangat jarang terjadi).
- Metode *worst-case* mengimplikasikan bahwa semua komponen yang diproduksi **harus diinspeksi satu-per-satu** untuk menjamin bahwa tidak ada satu komponen pun yang berada di luar toleransi yang diberikan.
- Metode *worst-case* diaplikasikan untuk suatu produksi dengan jumlah sedikit (*low-volume*) dan untuk komponen-komponen yang sangat mahal dan penting, misalnya untuk komponen mesin jet pesawat.

Analisis berbasis statistik

Analisis berbasis statistik adalah sebuah metode analisis rantai variasi (toleransi) yang menjumlahkan seluruh nilai-nilai toleransi secara akar kuadrat dari jumlah kuadrat seluruh nilai toleransi tersebut (*sum-of-squared*). Metode ini menentukan kemungkinan variasi yang paling memungkinkan (95 % untuk analisis berbasis 2σ dan 99.7 % untuk analisis berbasis 3σ) untuk suatu dimensi dan fitur perakitan. Total variasi (toleransi) yang dikalkulasi dengan menggunakan metode statistik adalah sebagai berikut:

$$\text{Toleransi total} = k\sqrt{Tol_1^2 + Tol_2^2 + \dots + Tol_n^2} = k\sqrt{\sum_{i=1}^n Tol_i^2} \quad (2)$$

dimana Tol_i adalah nilai toleransi yang diberikan pada dimensi ke- i dalam format *equally-bilateral* ($\pm tol_i$). k adalah faktor keamanan (*safety factor*) untuk memperhitungkan variasi dari komponen-komponen yang disuplai dari tempat atau perusahaan lain. Pada umumnya, nilai $k = 1.5$. Tetapi, apabila semua komponen dibuat pada suatu tempat yang sama, maka nilai $k = 1$, yang menandakan bahwa kemungkinan variasi yang akan muncul dapat dikontrol karena proses produksi suatu komponen dilakukan pada tempat produksi yang sama.

Gambar 1: Pentingnya mengontrol proses agar tidak terjadi *shift*. (a) Ilustrasi apabila suatu fitur komponen mempunyai variasi yang terkontrol namun demikian proses produksinya terjadi pergesra atau tidak terkontrol. Pada situasi ini, walaupun variasi komponen masih terkontrol, cacat produksi akan didapatkan karena bergesernya *mean* dari proses produksinya (menimbulkan bias), (b) Ilustrasi apabila proses produksi suatu komponen terkontrol, namun demikian variasi dari suatu fitur yang diproduksi tidak terkontrol (diluar batas toleransinya). Pada situasi ini, cacat produksi juga akan didapatkan dan (c) Ilustrasi dimana proses produksi suatu fitur dan variasi dari fitur tersebut terkontrol sehingga tidak menghasilkan cacat produksi.

Analisis berbasis statistik mempunyai karakteristik sebagai berikut:

- Metode kalkulasi statistik berbasiskan pada asumsi bahwa semua dimensi sebuah fitur yang diukur akan cenderung pada nilai nominal mereka (dengan berasumsi variasi-variasi dari fitur tersebut terdistribusi normal). Dengan demikian, proses produksi fitur tersebut harus terkontrol (Gambar 1).
- Metode kalkulasi statistik akan mempunyai nilai toleransi total lebih kecil dari *worst-case*. Hal ini merupakan hasil yang sangat berguna karena nilai toleransi pada setiap fitur menjadi lebih besar sehingga biaya produksi fitur tersebut dapat dikurangi.
- Metode kalkulasi statistik meingimplikasikan bahwa tidak perlu untuk menginspeksi semua komponen. Melainkan, proses inspeksi cukup dilakukan hanya pada sejumlah sampel dari seluruh total sampel (komponen), yang diambil dari seluruh komponen, untuk dilakukan suatu proses inspeksi kualitas.
- Metode kalkulasi statistik berbasis pada beberapa batasan tertentu, yaitu:
 1. Semua proses manufaktur suatu komponen harus dalam kondisi terkontrol. Maka dari itu, sebelum melakukan produksi, studi kapabilitas proses (*process capability study*) harus dilakukan terlebih dahulu (C_p). Studi kapabilitas proses akan menunjukkan kondisi riil dari suatu proses manufaktur. (**Liha Bab 2**)
 2. Semua proses manufaktur harus “centered” atau berada pada nilai nominalnya (tidak ada *mean-shift*). Hal ini menunjukkan bahwa proses tersebut tidak mempunyai pergeseran dari proses rata-ratanya (C_{pk}). Apabila terjadi pergeseran proses, maka proses manufaktur tersebut harus diset ulang (Gambar 1a).
 3. Sampel komponen-komponen yang akan diinspeksi haruslah diambil secara acak (*random*). Sampel acak ini berbasis pada ide untuk kemampuan-tukar/*interchangeability* (dari sudut pandang mekanik) dan berbasis pada ide dari variabel independen (dari sudut pandang statistik).
 4. Hal penting yang harus dipahami adalah dengan metode statistik untuk menghitung nilai toleransi total, maka akan ada kemungkinan beberapa komponen atau produk akan ditolak (di luar batas toleransinya). Hal ini tergantung dari seberapa besar nilai keamana k diterapkan untuk menghitung nilai toleransi total.

Dapat dilihat bahwa, dari persamaan (1) dan (2), analisis toleransi berbasis statistik akan mempunyai nilai toleransi total yang lebih kecil dari analisis toleransi berbasis *worst-case*. Hal ini menyebabkan, dengan menggunakan metode statistik, maka setiap fitur dapat diberikan nilai toleransi yang lebih besar sehingga mempermudah proses dan menurunkan biaya proses manufaktur dan inspeksi fitur tersebut.

Gambar 2 memperlihatkan sebuah ilustrasi efek negatif dari bergesernya suatu proses produksi dari kondisi nominalnya, yaitu suatu kondisi yang terkontrol untuk menghasilkan suatu komponen. Pada Gambar 2, terdapat dua skenario situasi. Kedua skenario tersebut mempunyai variasi dari fitur-fitur pada suatu komponen yang saling dirakit untuk menjadi suatu kesatuan produk. Aksis vertikal pada Gambar 2 merepresentasikan besarnya *error* geometri dan dimensi pada suatu fitur dan aksis horisontalnya merepresentasikan jumlah komponen yang saling dirakit (variasi yang terakumulasi seiring makin banyaknya jumlah komponen yang saling dirakit). Walaupun kedua skenario tersebut mempunyai variasi yang sama, kedua skenario tersebut mempunyai kondisi proses yang berbeda, yaitu: skenario 1 (garis hijau) mempunyai proses yang terkontrol dan skenario 2 (garis merah) mempunyai proses yang tidak terkontrol (bergeser dari nilai nominalnya). Dapat dilihat (Gambar 2) pada skenario 2 bahwa dengan bergesernya proses produksinya, walaupun variasi dari komponen-komponen yang dibuatnya masih terkontrol, *error* dimensi dan geometri, pada saat proses perakitannya dilakukan, akan terakumulasi dan melibihi batas toleransinya. Hal ini akan menyebabkan cacat produksi.

Gambar 2: Ilustrasi dari efek bergesernya suatu proses dari nilai nominalnya menyebabkan komponen-komponen yang diproduksinya keluar batas toleransinya (USL=*upper specification limit*/batas atas dan LSL = *lower specification limit* atau batas bawah) walaupun variasi dari komponen-komponen yang dihasilkannya masih terkontrol.

5.2 Analisis rantai variasi (toleransi) dimensional “plus/minus”

Untuk analisis rantai variasi (toleransi) dimensional “plus/minus” pada umumnya menggunakan metode 1D/2D yang sederhana. Penjelasan mengenai analisis toleransi tersebut diperlihatkan dengan menggunakan beberapa contoh kasus sebagai berikut.

Contoh 1: Analisis akumulasi toleransi dimensional “plus/minus” dengan metode 1D/2D untuk komponen tunggal

Untuk contoh 1, terdapat sebuah disain baut dengan dimensi serta toleransinya yang diperlihatkan pada gambar 3. Gambar 3 memperlihatkan model 3D dan gambar teknik (2D) serta dimensi dan toleransi dari disain baut tersebut. Pada contoh ini, fitur yang ingin dianalisis dimensinya dengan metode analisis akumulasi toleransi adalah jarak (*gap*) antara titik A dan B (gambar 3 bawah). Untuk menganalisis akumulasi toleransi pada fitur tersebut, rantai toleransi (*tolerance chain*) dari fitur tersebut harus direkonstruksi. Rantai toleransi merepresentasikan perambatan toleransi dan dimensi pada suatu fitur yang dimulai dari fitur tersebut, melewati seluruh dimensi fitur-fitur lain yang berpengaruh terhadap fitur yang sedang dianalisis tersebut, dan kembali ke fitur tersebut.

Oleh karena itu, rantai toleransi untuk baut tersebut harus direkonstruksi. Gambar 4 memperlihatkan rantai toleransi dari fitur jarak A dan B pada baut tersebut. Pada gambar 4, kepala baut tersebut tidak mempengaruhi fitur jarak antara A dan B, sehingga kepala baut tersebut dapat diabaikan untuk menyederhanakan rantai toleransi. Pada gambar 4, rantai toleransi tersebut direpresentasikan dengan panah merah. Rantai toleransi tersebut dimulai dari titik

B, kemudian mengikuti seluruh dimensi fitur pada baut tersebut yang berpengaruh, kemudian kembali ke titik A. Untuk kasus ini, dan secara umum untuk kasus analisis dengan metode 1D/2D, model akumulasi toleransi dengan mudah dapat direkonstruksi, yaitu:

$$\text{Toleransi total} = Tol_1 - Tol_2 - Tol_3 + Tol_4 + Tol_5, \text{ untuk analisis } worst\text{-}case \quad (3)$$

$$\text{Toleransi total} = k\sqrt{Tol_1^2 + Tol_2^2 + Tol_3^2 + Tol_4^2 + Tol_5^2}, \text{ untuk analisis statistik} \quad (4)$$

Dimana secara konvensi umum, arah kanan dan atas adalah “positif”, dan arah kiri dan bawah adalah “negatif”. Nilai diasumsikan sebagai $k = 1$ karena semua komponen dibuat pada suatu sistem produksi di tempat yang sama.

Gambar 3: Model 3D sebuah baut dan gambar teknik (2D)-nya. Hanya toleransi dimensional (*plus/minus*) yang ditampilkan.

Rantai toleransi (*tolerance chain*)

Gambar 4: Rantai toleransi dari contoh baut.

Pada umumnya, untuk analisis akumulasi toleransi berbasis 1D/2D, model persamaan seperti pada persamaan (3) dan (4) tidak diperlihatkan, melainkan langsung direpresentasikan dalam suatu tabel. Hanya dengan metode analisis matriks model persamaan (persamaan 3 dan 4) analisis akumulasi toleransi diperlihatkan. Untuk contoh kasus baut ini, perhitungan akumulasi toleransinya diperlihatkan pada tabel 1 untuk analisis *worst-case* dan tabel 2 untuk analisis statistik.

Pada tabel 2, total akumulasi toleransi jarak A dan B dijumlahkan langsung dari nilai maksimum toleransinya (dimana nilai toleransi tersebut harus dalam format *equally-bilateral*). Total akumulasi toleransi (yang merepresentasikan total variasi dari jarak A dan B) dengan metode *worst-case* adalah 1.2 mm .

Pada tabel 3, total akumulasi toleransi jarak A dan B di-*sum-squared*-kan dari nilai maksimum toleransinya (dimana nilai toleransi tersebut harus dalam format *equally-bilateral*). Total akumulasi toleransi untuk jarak A dan B tersebut dengan metode statistik adalah 0.73 mm .

Dari kedua hasil akumulasi toleransi tersebut, total akumulasi toleransi dengan metode statistik adalah lebih kecil sebesar 39 %. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan akumulasi toleransi dengan metode statistik memungkinkan untuk memberikan nilai toleransi yang lebih besar pada setiap fitur dibandingkan dengan metode *worst-case*. Dengan nilai toleransi yang lebih besar, maka biaya produksi dan biaya inspeksi kualitas akan semakin berkurang.

Sebagai contoh adalah sebagai berikut. dengan metode *worst-case*, nilai toleransi baut tersebut (pada rantai toleransi pada gambar 4) adalah $50 \pm 0.2 \text{ mm}$, $20 \pm 0.5 \text{ mm}$ dan $73 \pm 0.5 \text{ mm}$. Perhitungan akumulasi toleransi dengan metode statistik menghasilkan total toleransi sebesar 0.73 mm . Untuk mencapai total akumulasi sebesar 1.2 mm (seperti hasil perhitungan dengan metode *worst-case*), maka toleransi baut tersebut dapat direalokasikan lagi sebagai berikut: $50 \pm 0.5 \text{ mm}$, $20 \pm 0.5 \text{ mm}$ dan $73 \pm 0.7 \text{ mm}$. Dari nilai toleransi yang baru tersebut, maka persyaratan proses manufaktur dan proses inspeksi kualitas dari baut tersebut akan semakin mudah. Dengan demikian, biaya produksi dan biaya inspeksi baut tersebut akan semakin murah.

Tabel 1: Analisis akumulasi toleransi berbasis *worst-case* untuk contoh baut.

No	Deskripsi	Dims /mm	Tol /mm	Sumber Dim/Tol & kalkulasi	% Kontribusi
1	Dimensi (arah kanan)	20	0.5	Dari gambar teknik	41.67
2	Dimensi (vertikal)	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan	0
3	Dimensi (arah kiri)	-73	0.5	Dari gambar teknik	41.67
4	Dimensi (vertikal)	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan	0
5	Dimensi (arah kanan)	50	0.2	Dari gambar teknik	16.67
	Total jarak A dan B	3	1.2		

Tabel 2: Analisis akumulasi toleransi berbasis statistik untuk contoh baut.

No	Deskripsi	Dims	Tol	Squared Tol.	Sumber Dim/Tol & kalkulasi
1	Dimensi (arah kanan)	20	0.5	0.25	Dari gambar teknik
2	Dimensi (vertikal)	0	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan
3	Dimensi (arah kiri)	-73	0.5	0.25	Dari gambar teknik
4	Dimensi (vertikal)	0	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan
5	Dimensi (arah kanan)	50	0.2	0.04	Dari gambar teknik
	Total jarak A dan B	3		0.73	

Contoh 2: Analisis akumulasi toleransi dimensionaal “plus/minus” dengan metode 1D/2D untuk komponen tunggal (konversi dari *unequal bilateral* menjadi *equal bilateral*)

Contoh berikutnya adalah analisis akumulasi toleransi untuk sebuah fitur slot pada sebuah komponen yang dibuat dengan suatu proses perkakas (*milling*). Gambar 5 memperlihatkan dimensi dan toleransi dari fitur-fitur komponen tersebut dalam dua bentuk format presentasi, yaitu format *unequal bilateral* dan *equal bilateral*. Analisis akumulasi toleransi dengan metode 1D/2D dan metode matriks, baik berbasis *worst-case* maupun statistik, menggunakan format toleransi *equal bilateral*. Maka dari itu, toleransi yang berformat *unequal bilateral* harus dikonversi menjadi format *equal bilateral*. Format dimensi dan toleransi *equal bilateral* ($\pm$) adalah sebagai berikut:

$$X \pm T \quad (5)$$

dimana X adalah dimensi nominal suatu fitur dan T adalah toleransi dari dimensi X fitur tersebut.

Gambar 5: (kiri) toleransi dengan format *unequal bilateral* dan (kanan) toleransi dengan format *equal bilaterally*.

Untuk mengkonversi suatu dimensi dan toleransi dari *unequal bilateral* ke *equal bilaterally* sebagai berikut:

$$X = \frac{\min + \max}{2} \quad (6)$$

$$T = \frac{\max - \min}{2} \quad (7)$$

dimana *min* adalah dimensi minimum dan *max* adalah dimensi maksimum dari suatu fitur pada suatu komponen. Pada gambar 5 (kiri), fitur-fitur komponen tersebut mempunyai dimensi dalam format *unequal bilateral*. Pada gambar 5 (kanan), fitur-fitur tersebut memiliki format toleransi *equal bilaterally* setelah dilakukan konversi menggunakan persamaan (6) dan (7).

Langkah selanjutnya, adalah menentukan rantai toleransi yang menggambarkan perambatan akumulasi toleransi untuk jarak A dan B (lihat gambar 6). Gambar 6 memperlihatkan rantai toleransi pada komponen yang di-milling tersebut. Berdasarkan rantai toleransi tersebut, analisis akumulasi toleransi 1D/2D berbasis *worst-case* dan statistik dapat dilakukan.

Tabel 3 memperlihatkan analisis akumulasi toleransi berbasis *worst-case*. Arah perambatan toleransi yang berpengaruh hanyalah arah horisontal. Hasil dari analisis akumulasi toleransi berbasis *worst-case* adalah jarak A ke B mempunyai akumulasi toleransi, yang merupakan variasi dari jarak tersebut, sebesar 5.325 mm dengan nominal dimensi sebesar 50.33 mm.

Sedangkan hasil analisis akumulasi toleransi berbasis statistik diperlihatkan pada tabel 4. Pada tabel 4, total dimensi nominal jarak A ke B adalah 50.33 mm dan total akumulasi toleransinya adalah sebesar 2.82 mm. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, bahwa total akumulasi toleransi yang dikalkulasi berdasarkan metode statistik akan mempunyai nilai yang lebih rendah dari hasil kalkulasi *worst-case*. Untuk kasus ini, total akumulasi toleransi berbasis statistik mempunyai nilai lebih rendah 47 % dari nilai yang dikalkulasi dengan berbasis *worst-case*. Syarat dapat diaplikasikan metode statistik adalah proses yang membuat komponen tersebut harus dalam kondisi nominalnya atau terkontrol (tidak ada *process-shift*).

Rantai toleransi (*tolerance chain*)

Gambar 6: Rantai toleransi untuk jarak A-B.

Tabel 3: Analisis akumulasi toleransi berbasis *worst-case* untuk contoh 2.

No	Deskripsi	Dims /mm	Tol /mm	Sumber Dim/Tol & kalkulasi	% Kontribusi
1	Dimensi (vertikal)	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan	0
2	Dimensi (arah kanan)	44	1	Dari gambar teknik	18.78
3	Dimensi (vertikal)	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan	0
4	Dimensi (arah kiri)	-165	2	Dari gambar teknik	37.56
5	Dimensi (vertikal)	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan	0
6	Dimensi (arah kanan)	30.5	1.5	Dari gambar teknik	28.17
7	Dimensi (vertikal)	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan	0
8	Dimensi (arah kanan)	40.17	0.825	Dari gambar teknik	15.49
9	Dimensi (vertikal)	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan	0
	Total jarak A dan B	50.33	5.325		

Tabel 4: Analisis akumulasi toleransi berbasis statistik untuk contoh 2.

No	Deskripsi	Dims	Tol	Squared Tol.	Sumber Dim/Tol & kalkulasi
1	Dimensi (vertikal)	0	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan
2	Dimensi (arah kanan)	44	1	1	Dari gambar teknik
3	Dimensi (vertikal)	0	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan
4	Dimensi (arah kiri)	-165	2	4	Dari gambar teknik
5	Dimensi (vertikal)	0	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan
6	Dimensi (arah kanan)	30.5	1.5	2.25	Dari gambar teknik
7	Dimensi (vertikal)	0	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan
8	Dimensi (arah kanan)	40.17	0.825	0.68	Dari gambar teknik
9	Dimensi (vertikal)	0	0	0	Arah vertikal tidak diperhitungkan
	Total jarak A dan B	50.33	2.82		

Contoh 3: Analisis akumulasi toleransi dimensionaal “plus/minus” dengan metode 1D/2D untuk sebuah assembly (komponen multipel)

Contoh ini memperlihatkan kasus berbeda dengan contoh-contoh sebelumnya. Pada contoh ini, kasus analisis akumulasi toleransi pada sebuah produk yang merupakan hasil perakitan dari lebih dari satu komponen diperlihatkan. Kasus tersebut lebih merepresentasikan kondisi riil karena pada prinsipnya tidak ada produk yang dapat berfungsi hanya dengan satu komponen saja, melainkan produk tersebut dirakit dari beberapa komponen yang berbeda.

Gambar 7: Contoh kasus dengan dua buah komponen.

Gambar 7 memperlihatkan sebuah produk yang terdiri dari dua buah komponen yang dirakit bersama. Kedua komponen tersebut dapat dirakit melalui dua buah fitur perakitan dalam bentuk pin dan lubang. Gambar teknik beserta dimensi dan toleransi dimensionalnya diperlihatkan pada gambar 8 dan 9. Pada gambar 8, dimensi nominal dan toleransi dimensionalnya diperlihatkan untuk komponen 1, sedangkan untuk komponen 2 diperlihatkan pada gambar 9. Nilai toleransi dimensional seluruh dimensi pada kedua komponen tersebut adalah sebesar $\pm 0.2 \text{ mm}$.

Gambar 8: Dimensi nominal dan toleransinya untuk komponen 1.

Gambar 9: Dimensi nominal dan toleransinya untuk komponen 2.

Hal yang sangat penting yang ingin diperlihatkan pada contoh ini adalah suatu konsep yang bernama ***assembly-shift***. *Assembly-shift* adalah suatu variasi berupa sebuah pergeseran yang muncul dari fitur-fitur sambungan pin/poros dan lubang. Pergeseran tersebut dapat disebabkan oleh beberapa hal, seperti gaya gravitasi dan gaya impact yang diberikan oleh seorang operator ketika merakit komponen-komponen.

Gambar 10: *Assembly-shift* pada sebuah fitur pin dan lubang.

Gambar 11: Rantai toleransi untuk contoh kasus sebuah perakitan produk dengan dua komponen.

Konsep *assembly-shift* adalah sebagai berikut. ketika dua buah komponen disambung dengan fitur-fitur pin dan lubang, maka ketika lubang tersebut dibuat lebih besar atau pin tersebut dibuat lebih kecil dari nilai nominalnya, maka ketika kedua komponen tersebut dirakit, akan ada pergeseran yang diakibatkan dari terdeviasinya fitur pin dan lubang tersebut dari nilai nominalnya. Pergeseran tersebut disebabkan, misalnya, oleh gaya gravitasi karena komponen tersebut dirakit dengan posisi vertikal atau gaya yang diberikan untuk mengeset atau mengepaskan kedua komponen tersebut pada saat kedua komponen tersebut dirakit. Hal yang penting untuk diingat adalah *assembly-shift* selalu mempunyai nilai dimensi nominal sebesar 0, karena pada prinsipnya dalam keadaan ideal atau sempurna (yaitu suatu pin atau lubang mempunyai diameter yang sama persis), *assembly-shift* tidak muncul. Gambar 10 memperlihatkan konsep *assembly-shift* dari yang disebabkan oleh gaya gravitasi yang bekerja pada komponen-komponen tersebut.

Langkah berikutnya adalah menentukan rantai toleransi dari contoh kasus tersebut. fitur yang ingin dianalisis akumulasi toleransinya pada contoh kasus ini adalah tinggi (jarak) titik A dari dasar komponen 2, yaitu titik B. Rantai toleransi tersebut diperlihatkan pada gambar 11. Pada gambar 11, diperlihatkan toleransi tambahan, nomor 2, yang disebabkan karena *assembly-shift*. Sumber toleransi lain berasal dari fitur-fitur yang mempunyai dimensi dan toleransi yang telah ditentukan pada gambar teknik komponen-komponen tersebut (gambar 8 dan gambar 9).

Hasil analisis akumulasi toleransi pada contoh kasus ini diperlihatkan pada tabel 5 untuk perhitungan berbasis *worst-case* dan tabel 6 untuk perhitungan berbasis statistik. Hasil akumulasi toleransi yang dikalkulasi berdasarkan metode *worst-case* (tabel 6) adalah jarak A-B akan mempunyai dimensi dan toleransi total yaitu $(70 \pm 1.4)mm$.

Sedangkan, hasil dari kalkulasi berdasarkan metode statistik, jarak A-B mempunyai dimensi dan toleransi total sebesar $(70 \pm 1.04)mm$. Untuk contoh kasus ini, total akumulasi toleransi yang dikalkulasi berdasarkan statistik adalah 25.7 % lebih kecil dari hasil kalkulasi berdasarkan metode *worst-case*.

Tabel 5: Analisis akumulasi toleransi berbasis *worst-case* untuk contoh 3: *assembly*.

No	Deskripsi	Dims /mm	Tol /mm	Sumber Dim/Tol & kalkulasi	% Kontribusi
1	Dimensi vertikal (arah atas)	35	0.2	Dari gambar teknik	14.28
2	Assembly-shift	0	1	<i>Assembly-shift</i> karena gaya gravitasi, lubang terbesar – pin/silinder terkecil = $10.5 - 9.5 = 1$ mm	71.43
3	Dimensi vertikal (arah atas)	35	0.2	Dari gambar teknik	14.28
	Total jarak A dan B	70	1.4		

Tabel 6: Analisis akumulasi toleransi berbasis statistik untuk contoh 3: *assembly*.

No	Deskripsi	Dims	Tol	Squared Tol.	Sumber Dim/Tol & kalkulasi
1	Dimensi vertikal (arah atas)	35	0.2	0.04	Dari gambar teknik
2	Assembly-shift	0	1	1	<i>Assembly-shift</i> karena gaya gravitasi, lubang terbesar – pin/silinder terkecil = $10.5 - 9.5 = 1$ mm
3	Dimensi vertikal (arah atas)	35	0.2	0.04	Dari gambar teknik
	Total jarak A dan B	70		1.04	

5.3 Analisis rantai variasi (toleransi) geometri

Analisis akumulasi toleransi dengan memperhitungkan toleransi geometri (GD&T) lebih tepat dianalisis dengan metode matriks secara 3D dimana *error* rotasi juga dapat dikalkulasi dengan metode matriks tersebut (metode matriks akan dijelaskan pada bab-bab selanjutnya dan lihat Bab 2 untuk dasar teorinya). Namun demikian pada bagian ini, analisis akumulasi toleransi geometri (GD&T) akan dipresentasikan dengan metode 1D/2D.

Dengan memperhitungkan toleransi geometri (GD&T), maka akumulasi toleransi akhir akan menjadi lebih besar. Hal ini disebabkan karena adanya tambahan toleransi yang diakibatkan dari toleransi geometri, seperti adanya bonus toleransi. Namun demikian, analisis akumulasi toleransi dengan memperhitungkan toleransi geometri lebih merepresentasikan kondisi riil suatu proses manufaktur, sehingga hasil analisis akumulasi toleransi dengan memperhitungkan toleransi geometri akan lebih akurat.

Hal penting yang perlu diingat adalah toleransi geometri adalah toleransi satu sisi, dalam artian nilainya dari 0 sampai dengan nilai toleransi yang diberikan (selalu merupakan nilai positif). Pada tabel akumulasi toleransi, dimensi dari toleransi geometri selalu 0 (seperti *assembly-shift*). Hal ini disebabkan karena, pada kondisi ideal atau sempurna ketika geometri semua komponen sempurna, maka nilai toleransi geometri komponen-komponen tersebut akan menjadi 0.

Gambar 12: Contoh kasus dengan dua buah komponen dengan memperhitungkan toleransi geometri (GD&T).

Gambar 12 memperlihatkan dua buah komponen yang sama dengan contoh sebelumnya, namun pada kasus ini toleransi geometri (GD&T) juga diperhitungkan. Detil dan nilai dimensi nominal, toleransi dimensional dan toleransi geometri kedua komponen tersebut diperlihatkan pada gambar 13 untuk komponen 1 dan pada gambar 14 untuk komponen 2. Dapat dilihat dari gambar 13 dan 14, karena toleransi geometri berelasi juga digunakan, maka datum-datum sebagai referensi yang akan membentuk *datum reference frame* harus didefinisikan terlebih dahulu.

Datum A merupakan datum pertama dan utama sehingga pada umumnya permukaan yang dipilih untuk sebagai datum A adalah permukaan yang paling stabil, yang bisa sebagai permukaan yang paling luas atau permukaan yang paling mudah diakses atau yang bisa dijadikan landasan suatu komponen. Pada komponen 1 (gambar 13), Datum A dipilih yaitu permukaan paling atas dari komponen tersebut dan diberikan toleransi *flatness*, yaitu toleransi yang tidak berelasi. Datum B dan C dialokasikan pada permukaan-permukaan disamping permukaan datum A. Datum B dan C mempunyai toleransi *perpendicularity*, yaitu toleransi yang berelasi, yaitu datum B tegak lurus terhadap datum A, dan datum C tegak lurus terhadap datum B dan tegak lurus terhadap datum A. Semua toleransi geometri berelasi pada komponen ini akan mempunyai referensi pada datum C, B dan A.

Gambar 13: Dimensi nominal dan toleransi dimensional dan geometri untuk komponen 1.

Toleransi lokasi juga mengikutsertakan *cylindricity error*. Hal inilah yang menyebabkan toleransi lokasi sering digunakan untuk fitur lubang atau pin/poros.

Gambar 14: Dimensi nominal dan toleransi dimensional dan geometri untuk komponen 2.

Pada komponen 2, datum A dialokasikan pada permukaan bawah komponen tersebut karena permukaan tersebut merupakan permukaan yang paling luas dan paling stabil. Kemudian, datum B dan C dialokasikan pada permukaan-permukaan disamping permukaan datum A tersebut. Pengalokasian toleransi untuk datum A, B dan C tersebut sama seperti pengalokasian toleransi geometri untuk datum A, B dan C pada komponen 1. Hal yang perlu diperhatikan adalah datum A, pada komponen 1 dan 2, memiliki nilai toleransi yang paling kecil, karena datum A harus dibuat seakurat mungkin (lebih akurat dari fitur-fitur lainnya).

Gambar 15: Rantai toleransi untuk contoh kasus sebuah perakitan produk dengan dua komponen dengan memperhitungkan toleransi geometri (GD&T).

Untuk toleransi geometri sebuah fitur lubang atau pin, toleransi lokasi (*location tolerance*) pada umumnya digunakan dari pada menggunakan toleransi *cilindricity*. Hal ini disebabkan bahwa toleransi lokasi juga mengontrol bentuk silinder (*cilindricity*) dari suatu lubang atau pin atau poros, selain juga mengontrol lokasi titik tengah lubang atau pin atau poros tersebut. Sehingga, dengan menggunakan toleransi lokasi, toleransi ini mengontrol posisi dan bentuk silinder secara bersamaan.

Gambar 15 memperlihatkan rantai toleransi untuk contoh kasus dua buah komponen dengan memperhitungkan toleransi geometri tersebut. Dari gambar 15, dapat dilihat bahwa dengan memperhitungkan toleransi geometri, sumber-sumber variasi akan semakin banyak. Hal ini dapat dilihat pada komponen-komponen variasi pada gambar 15, yaitu nomor 1,3,4,5,6 dan 7. Pada contoh ini, fitur perakitan yang ingin dianalisis adalah jarak vertikal A-B (lihat gambar 15).

Tabel 7 memperlihatkan hasil analisis akumulasi toleransi berbasis *worst-case* dan tabel 8 memperlihatkan hasil analisis berbasis statistik untuk contoh kasus tersebut. Dari tabel 7 dan tabel 8 tersebut, dapat dilihat, selain *assembly shift*, bonus toleransi juga didapatkan yang diakibatkan suatu fitur lubang atau pin terdeviasi dari nilai MMC-nya. Hasil dari analisis akumulasi toleransi untuk dimensi dan toleransi akhir jarak A-B tersebut (lihat gambar 15) adalah $(70 \pm 2.485) \text{ mm}$ dengan kalkulasi berdasarkan metode *worst-case*. Sedangkan, Hasil dari analisis akumulasi toleransi untuk dimensi dan toleransi akhir jarak A-B tersebut dengan kalkulasi berdasarkan metode statistik adalah $(70 \pm 1.26) \text{ mm}$.

Pada contoh kasus ini, dengan kalkulasi *worst-case*, hasil akhir akumulasi toleransi dengan memperhitungkan toleransi geometri adalah lebih besar 43.6 % daripada hasil kalkulasi *worst-case* dengan hanya memperhitungkan toleransi dimensional “*plus/minus*” saja. Sedangkan, dengan kalkulasi statistik, hasil akhir akumulasi toleransi dengan memperhitungkan toleransi geometri adalah lebih besar 17.5 % daripada hasil kalkulasi statistik dengan hanya memperhitungkan toleransi dimensional “*plus/minus*” saja.

Tabel 7: Analisis akumulasi toleransi berbasis *worst-case* untuk contoh toleransi geometri.

No	Deskripsi	Dims /mm	Tol /mm	Sumber Dim/Tol & kalkulasi	% Kontribusi
1	<i>Flatness</i>	0	0.005	<i>Error</i> dari <i>flatness</i> = $0.01/2 = 0.005$	0.2
2	Dimensi	35	0.2	Dari gambar teknik	8
3	Toleransi lokasi (pada komponen 2)	0	0.04	<i>Error</i> dari lokasi = $0.08/2 = 0.04$	1.6
4	Bonus toleransi karena MMC (pada komponen 2)	0	0.5	$(\text{max. diameter-MMC})/2 = (10.5-9.5)/2 = 0.5$	20.1
5	<i>Assembly-shift</i>	0	1	<i>Assembly-shift</i> karena gaya gravitasi, lubang terbesar – silinder terkecil = $10.5 - 9.5$	40.2
6	Toleransi lokasi (pada komponen 1)	0	0.04	<i>Error</i> dari lokasi = $0.08/2 = 0.04$	1.6
7	Bonus toleransi karena MMC (pada komponen 1)	0	0.5	$(\text{max. diameter-MMC})/2 = (10.5-9.5)/2 = 0.5$	20.1
8	Dimensi	35	0.2	Dari gambar teknik	8
	Total jarak A dan B	70	2.485		

Tabel 8: Analisis akumulasi toleransi berbasis statistik untuk contoh toleransi geometri.

No	Deskripsi	Dims	Tol	Squared Tol.	Sumber Dim/Tol & kalkulasi
1	<i>Flatness</i>	0	0.005	0.000025	<i>Error</i> dari <i>flatness</i> = $0.01/2 = 0.005$
2	Dimensi	35	0.2	0.04	Dari gambar teknik
3	Toleransi lokasi (pada komponen 2)	0	0.04	0.0016	<i>Error</i> dari lokasi = $0.08/2 = 0.04$
4	Bonus toleransi karena MMC (pada komponen 2)	0	0.5	0.25	$(\text{max. diameter-MMC})/2 = (10.5 - 9.5)/2 = 0.5$
5	<i>Assembly-shift</i>	0	1	1	<i>Assembly-shift</i> karena gaya gravitasi, lubang terbesar – silinder terkecil = $10.5 - 9.5$
6	Toleransi lokasi (pada komponen 1)	0	0.04	0.0016	<i>Error</i> dari lokasi = $0.08/2 = 0.04$
7	Bonus toleransi karena MMC (pada komponen 1)	0	0.5	0.25	$(\text{max. diameter-MMC})/2 = (10.5 - 9.5)/2 = 0.5$
8	Dimensi	35	0.2	0.04	Dari gambar teknik
	Total jarak A dan B	70		1.26	

BAB 6

Contoh aplikasi 1: Analisis 2D rantai variasi pada perakitan belt tensioner

Bab ini mempresentasikan contoh aplikasi analisis rantai variasi (termasuk alokasi) dari sebuah produk rakitan yang bernama *belt tensioner*. Produk ini berfungsi untuk memberikan gaya pada sebuah *belt* untuk membuat atau mempertahankan level tensi pada *belt* tersebut untuk tetap berada ada level tertentu. Contoh aplikasi ini merupakan contoh alokasi dan analisis rantai variasi secara 2D, baik dengan metode *worst-case* maupun metode statistik. Pada contoh ini, sistem toleransi geometri GD&T digunakan untuk memberikan sebuah contoh riil yang sering ditemukan di lapangan atau industri.

Analisis 2D rantai variasi pada contoh aplikasi ini merupakan sebuah cara yang efektif untuk menganalisis sistem toleransi GD&T pada suatu produk secara singkat. Dengan demikian, metode ini dapat dilakukan untuk melakukan screening apakah nilai-nilai toleransi yang diberikan pada fitur-fitur sudah benar atau ada kesalahan mayor yang harus segera diselesaikan. Analisis 2D ini hanya menganalisis variasi toleransi pada suatu bidang, sehingga variasi rotasi yang diakibatkan oleh nilai-nilai GD&T yang diberikan tidak dapat dianalisis.

6.1 Belt tensioner

Belt tensioner merupakan sebuah alat yang digunakan untuk menjaga agar tensi suatu *belt* selalu pada level yang diinginkan. *Belt tensioner* banyak ditemukan diberbagai macam aplikasi, seperti: sistem *timing belt* di mesin-mesin mobil, *chain tensioner* di sepeda-sepeda dan *conveyor belt* di pabrik-pabrik. Komponen utama dari sebuah *belt tensioner* secara umum adalah sebuah *pulley* yang berfungsi sebagai tempat untuk meletakkan sebuah *belt* sehingga tensi pada *belt* tersebut dapat diberikan (Gambar 1). Supaya *pulley* pada sebuah *belt tensioner* dapat berputar dan beroperasi sesuai dengan fungsinya, sejumlah jarak antara *pulley* tersebut dengan *base*-nya dibutuhkan agar tidak terjadi gesekan antara *pulley* dan *base* tersebut ketika *pulley* tersebut berputar.

6.2 Disain

Disain dari *belt tensioner* yang dibahas dalam bab ini diperlihatkan pada Gambar 1. Pada gambar 1, diperlihatkan bentuk akhir dari sebuah proses perakitan *belt tensioner* tersebut. Disain dari *belt tensioner* tersebut menggunakan kedua jenis toleransi dimensional dan geometri (GD&T). Tujuan utama dari contoh ini adalah untuk mengimplementasikan analisis rantai variasi 1D yang memperhitungkan kedua jenis toleransi tersebut. Gambar-gambar 2D dan proyeksi perspektif dari *belt tensioner* tersebut diperlihatkan pada Gambar 2. *Belt tensioner* (Gambar 1 dan Gambar 2) tersebut terdiri dari enam komponen, yaitu *base*, *support*, rotor, roda (*pulley*) dan baut. Namun demikian, komponen-komponen yang mempengaruhi rantai variasinya hanya empat komponen, yaitu: *base*, *support*, rotor dan roda (*pulley*).

Pada Gambar 1, bentuk dari *belt tensioner* tersebut tidak memperlihatkan fitur-fitur detail lainnya, karena tidak mempengaruhi rantai variasi dari karakteristik kunci *belt tensioner* tersebut. **Karakteristik kunci dari *belt tensioner*** tersebut yang ingin dikontrol adalah gap atau *clearance* antara roda (*pulley*) dengan *base*-nya agar tidak terjadi gesekan antara roda dengan *base* pada saat *belt tensioner* tersebut berfungsi.

Gambar 1: Sebuah produk rakitan *belt tensioner*.

Figure 2: Gambar teknik 2D dan proyeksi perspektif dari *belt tensioner* tersebut.

Nilai-nilai dari toleransi dimensi dan geometri (GD&T) dari komponen-komponen yang mempengaruhi karakteristik kunci tersebut (*base*, *support*, rotor dan roda) diperlihatkan pada Gambar 3, Gambar 4, Gambar 5 dan Gambar 6. Gambar 3 memperlihatkan detail dari nilai-nilai toleransi untuk komponen *base*. Untuk komponen *base* tersebut, terdapat tiga datum referensi, yaitu Datum A, B dan C. Datum A adalah datum referensi utama dan mempunyai toleransi flatness sebesar 0.01 mm yang merupakan toleransi terkecil karena fitur Datum A sangat penting sebagai referensi fitur-fitur dan datum-datum lainnya. Fitur permukaan atas dari *base* dipilih sebagai Datum A karena fitur tersebut mempunyai permukaan yang paling luas dan paling stabil. Toleransi lainnya untuk komponen *base* tersebut (Gambar 3) adalah toleransi profil dan toleransi *location* atau *position* yang mengontrol lokasi dan geometri dari lubang-lubang baut untuk menempatkan *support* di atas *base* tersebut.

Support

Gambar 4: Dimensi dan nilai-nilai toleransi geometri untuk komponen *support*.

Rotor

Gambar 5: Dimensi dan nilai-nilai toleransi geometri untuk komponen *rotor*.

yang diperlihatkan dengan anak panah hijau di gambar 7. “2D” disini disebabkan karena arah propagasi variasi (toleransi) hanya terjadi pada satu bidang datar (secara virtual). Analisis ini memperitungkan toleransi dimensi dan geometri (GD&T) dan detil dari nilai-nilai toleransinya dapat dilihat pada gambar 3 sampai gambar 6.

Gambar 7: Rantai propagasi variasi (toleransi) untuk rakitan dari *belt tensioner* tersebut.

Pada gambar 7, rantai variasi bermula dari titik dibelakang anak panah hijau (karakteristik kunci), merambat melalui semua komponen-komponen melwetai fitur-fitur yang mempengaruhi rakitannya dan berakhir di titik ujung anak panah hijau (karakteristik kunci). Hal penting yang perlu diingat adalah dalam memilih jalur rantai variasi, kita harus mempertimbangkan semua fitur yang berpengaruh pada suatu karakteristik kunci yang ingin kita analisis, hal ini untuk mendapatkan analisis rantai variasi yang akurat yang merepresentasikan keadaan suatu rakitan produk yang riil.

6.4 Analisis (dan alokasi) rantai variasi (toleransi)

Jalur rantai variasi untuk produk *belt tensioner* pada gambar 7 adalah: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow J \rightarrow K \rightarrow L \rightarrow M \rightarrow N \rightarrow O$. Dimana, **B, C, E, H** adalah dimensi nominal (karena itu nilai variasinya = 0) dan **A, D, F, G, I, J, K, L, M, N** adalah toleransi baik geometri maupun dimensional (karena itu nilai *mean*-nya = 0). Detil perhitungan *mean* (**Xn**) dan variasinya (**Tx**) untuk setiap titik pada rantai variasi diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1: Detil dari variasi pada setiap fitur pada rantai variasi *belt tensioner* tersebut.

Item	Xn±Tx	Description
A	0 ± 0.05	Tmax=0.1 (toleransi profil)
		Tx= ± 0.05
B	6 ± 0.00	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">6</div> (Dimensi nominal)
C	15 ± 0.00	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">155</div> (Dimensi nominal)
D	0 ± 0.05	Tmax=0.1 (toleransi profil)
		Tx= ± 0.05
E	15 ± 0.00	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">155</div> (Dimensi nominal)
F	0 ± 0.00	Datum A pada <i>base</i>
G	0 ± 0.00	Datum A pada <i>support</i>
H	80 ± 0.00	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px 5px;">80</div> (Dimensi nominal)
I	0 ± 0.075	Tmax=Tp+Bonus (toleransi posisi)
		Tmax= 0.05+0.1= 0.15
		Tx= ± 0.05
J	0 ± 0.1	Tmax=lubang_LMC-poros_LMC (<i>Assembly Shift</i>)
		Tmax=(17.1+0.05)-(16.95-0.05)
		Tx= ± 0.1
K	0 ± 0.00	Datum A pada rotor
L	0 ± 0.1	Tmax=Tp+Bonus (toleransi posisi)
		Tmax= 0.1+0.1= 0.2
		Tx= ± 0.1
M	0 ± 0.00	Datum A pada roda (<i>pulley</i>)
N	0 ± 0.35	Tmax=Tp+Bonus+ DF Shift A (toleransi posisi)
		=0.1+0.4+(0.1+0.1)
		Tmax= 0.5+0.3= 0.7
O	66.5 ± 0.2	Tx= ± 0.35
		Tmax=0.4 (toleransi dimensional)
		Tx= ± 0.2

Tabel 1 memperlihatkan dan menjelaskan satu per satu variasi pada setiap fitur pada rantai variasi (toleransi) tersebut. Pada tabel 1, pada setiap rantai variasinya, dimensi nominal X_n dan variasinya T_x dikalkulasi (lihat tabel 1).

Hal penting yang perlu diingat adalah, nilai variasi dimensi nominalnya harus dalam format *equal-bilateral*. Dapat dilihat bahwa, nilai nominal untuk setiap rantai variasi yang berupa toleransi geometri (yaitu **A, D, F, G, I, J, K, L, M, N**) selalu bernilai 0, karena dalam kondisi sempurna, nilai variasi geometri adalah nol (tidak ada variasi sama sekali). Hal lain yang perlu diperhatikan adalah, penentuan rantai variasi dapat berbeda-beda tergantung asumsi-asumsi yang pakai.

Nilai nominal dari *clearance* atau jarak antara roda dengan base (sebagai karakteristik kunci yang ingin dianalisis) dapat dikalkulasi dengan menjumlahkan atau mengurangi (sesuai dengan arah perambatan) nilai nominal pada setiap fitur-fitur yang dilewatinya. Sehingga, nilai nominal *clearance* tersebut adalah:

$$\begin{aligned} X_n &= A - B - C + D + E + F + G + H + I + J + K + L + M + N - O \\ &= 0 - 6 - 15 + 0 + 15 + 0 + 0 + 80 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 - 66.5 \\ &= 7.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Setelah nilai nominal *clearance* tersebut diketahui, langkah selanjutnya adalah mengestimasi berapa variasi dari *clearance* tersebut apabila *belt tensioner* tersebut telah dirakit dari komponen-komponennya.

6.4.1. Analisis rantai variasi (toleransi): Metode *Worst-Case*

Untuk kalkulasi total variasi dengan metode *worst-case*, nilai absolut $|T_x|$ dari seluruh variasi pada titik-titik rantai variasi **dijumlahkan**. Dengan menggunakan analisis ini, untuk menjamin bahwa ketika *belt tensioner* tersebut dirakit jarak *clearance*-nya masih dalam batas toleransinya, setiap komponen yang diproduksi harus diinspeksi untuk menjamin tidak ada komponen satu pun yang diproduksi diluar batas toleransinya

$$\begin{aligned} T_x(WC) &= T_{x_A} + T_{x_B} + T_{x_C} + T_{x_D} + T_{x_E} + T_{x_F} + T_{x_G} + T_{x_H} + T_{x_I} + T_{x_J} + \dots + T_{x_O} \\ &= 0.05 + 0 + 0 + 0.05 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0.075 + 0.1 + 0 + 0.1 + 0 + 0.35 + 0.2 = 0.925 \end{aligned}$$

Sehingga: $X_n \pm T_x = 7.5 \pm 0.925 \rightarrow 6.575 \text{ mm} - 8.425 \text{ mm}$.

6.4.2. Analisis rantai variasi (toleransi): Metode statistik (*statistical tolerancing*)

Untuk kalkulasi dengan metode statistik (atau sering disebut juga dengan *statistical tolerance analysis*), semua nilai variasinya T_x di-root-sum-squared-kan dan dikali dengan sebuah nilai *safety factor* (untuk mempertimbangkan variasi tambahan dari komponen-komponen apabila ada komponen-komponen tersebut diproduksi di tempat lain) dan bukan di *workshop* yang sama tempat perakitan *belt tensioner* tersebut dilakukan. Nilai *safety factor* yang dipilih adalah 1.5. Dengan demikian, total nilai variasi *clearance* pada rakitan *belt tensioner* tersebut adalah:

$$\begin{aligned}
 Tx(ST) &= 1.5\sqrt{Tx_A^2 + Tx_B^2 + Tx_C^2 + Tx_D^2 + Tx_E^2 + Tx_F^2 + Tx_G^2 + Tx_H^2 + Tx_I^2 + Tx_J^2 + + Tx_O^2} \\
 &= 1.5\sqrt{0.05^2 + 0^2 + 0^2 + 0.05^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2 + 0.075^2 + 0.1^2 + 0^2 + 0.1^2 + 0^2 + 0.35^2 + 0.2^2} \\
 &= 1.5\sqrt{0.1931} = 0.659 \sim 0.66
 \end{aligned}$$

Sehingga: $Xn \pm Tx = 7.5 \pm 0.66 \rightarrow 6.84 \text{ mm} - 8.16 \text{ mm}$.

Yang perlu diingat adalah dengan menerapkan metode statistik untuk analisis rantai variasi dari *belt tensioner* tersebut, pada kondisi riilnya, tidak semua komponen-komponen yang diproduksi harus diinspeksi dan dijaga agar selalu berada di dalam batas toleransinya. Melainkan, cukup dengan mengambil sampel beberapa komponen dari total komponen-komponen yang diproduksi. Hal ini dapat menghemat waktu inspeksi. Namun demikian, dengan menerapkan metode statistik, kita paham bahwa akan ada kemungkinan *clearance* dari beberapa *belt tensioner* yang dirakit akan diluar batas toleransinya walaupun semua komponen yang diinspeksi masuk dalam batas toleransinya. Seberapa besar jumlah *belt tensioner* dengan *clearance* yang berada di luar batas toleransinya harus diperhitungkan sesuai dengan perhitungan “ekonomi” dari seluruh produksinya.

BAB 7

Contoh aplikasi 2: Analisis 3D rantai variasi perakitan dua benda rigid

Bab ini memaparkan contoh aplikasi analisis rantai variasi secara 3D untuk perakitan dua benda rigid. Ada dua hal utama yang ingin diperlihatkan pada bab ini, yaitu: metode analisis rantai variasi 3D dapat menangkap *error* rotasi dan translasi, dan adanya efek *assembly shift* yang menyebabkan total variasi menjadi lebih besar. Untuk dapat menerapkan metode analisis 3D ini, diperlukan pemahaman mendalam tentang arti-arti dari setiap simbol GD&T pada fitur sebuah komponen. Bab ini akan memaparkan secara detail bagaimana simbol-simbol GD&T diinterpretasikan dan dikonversi menjadi nilai-nilai *error* yang digunakan untuk melakukan analisis rantai variasi secara 3D. Karena perhitungan analisis rantai variasi 3D jauh lebih kompleks dibandingkan dengan perhitungan untuk analisis 2D, sebuah program perhitungan dibutuhkan. Dalam hal ini program MATLAB digunakan untuk menerapkan analisis rantai variasi 3D.

Bab ini dimulai dengan analisis rantai variasi (toleransi) geometri (GD&T) dua benda rigid secara 2D. Kemudian, analisis versi 3D-nya dibahas. Hal ini dilakukan agar pembaca bisa langsung mengkomparasi perbedaan antara metode analisis rantai variasi 2D dan 3D.

7.1 Pendahuluan: Analisis 2D rantai variasi (toleransi) geometri

Analisis rantai variasi (toleransi) dengan memperhitungkan toleransi geometri (GD&T) lebih tepat dianalisis dengan metode analisis 3D dimana *error* rotasi juga dapat dikalkulasi dan diprediksi dengan metode matriks (metode matriks dijelaskan pada Bab 2). Namun demikian pada bagian ini, analisis rantai variasi (toleransi) geometri (GD&T) akan dipresentasikan dengan metode 1D/2D terlebih dahulu agar pembaca bisa langsung memahami perbedaan antara analisis 2D dan 3D.

Dengan memperhitungkan toleransi geometri (GD&T), maka akumulasi toleransi akhir akan menjadi lebih besar. Hal ini disebabkan karena adanya tambahan toleransi yang diakibatkan dari toleransi geometri, seperti adanya **bonus toleransi**. Namun demikian, analisis toleransi dengan memperhitungkan toleransi geometri lebih merepresentasikan kondisi riil suatu proses perakitan manufaktur, sehingga hasil analisisnya akan menjadi lebih akurat dibandingkan dengan analisis yang hanya memperhatikan toleransi dimensional.

Hal penting yang perlu diingat adalah toleransi geometri merupakan toleransi satu sisi, dalam artian nilainya dari 0 sampai dengan nilai toleransi yang diberikan (selalu merupakan nilai positif). Pada tabel akumulasi toleransi, nilai dari toleransi geometri selalu 0 (seperti *assembly-shift*). Hal ini disebabkan karena, pada kondisi ideal atau sempurna ketika geometri semua komponen sempurna, maka nilai *error* geometri komponen-komponen tersebut adalah nol.

Gambar 1: Contoh kasus dengan dua buah komponen dengan memperhitungkan toleransi geometri (GD&T).

Gambar 1 memperlihatkan dua buah komponen dimana toleransi geometri (GD&T) juga diperhitungkan. Detil dan nilai dimensi nominal, toleransi dimensional dan toleransi geometri kedua komponen tersebut diperlihatkan pada gambar 2 untuk komponen 1 dan pada gambar 3 untuk komponen 2. Dapat dilihat dari gambar 2 dan 3, karena toleransi geometri berelasi juga digunakan, maka datum-datum sebagai referensi yang akan membentuk *datum reference frame* harus didefinisikan terlebih dahulu.

Datum A merupakan datum pertama dan utama sehingga pada umumnya permukaan yang dipilih untuk dijadikan datum A adalah permukaan yang paling stabil, yang merupakan permukaan yang paling luas atau permukaan yang paling mudah diakses atau yang bisa dijadikan landasan suatu komponen. Pada komponen 1 (gambar 2), Datum A dipilih yaitu permukaan paling atas dari komponen tersebut dan diberikan toleransi *flatness*, yaitu toleransi yang tidak berelasi dengan nilai toleransi yang paling kecil karena fitur ini harus sesempurna mungkin karena akan dijadikan referensi untuk fitur-fitur lainnya. Datum B dan C dialokasikan pada permukaan-permukaan disamping permukaan datum A. Datum B dan C mempunyai toleransi *perpendicularity*, yaitu toleransi yang berelasi, yaitu datum B tegak lurus terhadap datum A, dan datum C tegak lurus terhadap datum B dan tegak lurus terhadap datum A. Semua toleransi geometri berelasi pada komponen ini akan mempunyai referensi pada datum C, B dan A.

Gambar 2: Dimensi nominal dan toleransi dimensional dan geometri untuk komponen 1.

Toleransi lokasi juga mengikutsertakan *cylindricity error*. Hal inilah yang menyebabkan toleransi lokasi sering digunakan untuk fitur lubang atau pin/poros.

Gambar 3: Dimensi nominal dan toleransi dimensional dan geometri untuk komponen 2.

Pada komponen 2, datum A dialokasikan pada permukaan bawah komponen tersebut karena permukaan tersebut merupakan permukaan yang paling luas dan paling stabil. Kemudian, datum B dan C dialokasikan pada permukaan-permukaan disamping permukaan datum A tersebut. Pengalokasian toleransi untuk datum A, B dan C tersebut sama seperti pengalokasian toleransi geometri untuk datum A, B dan C pada komponen 1. Hal yang perlu diperhatikan adalah datum A, pada komponen 1 dan 2, memiliki nilai toleransi yang paling kecil, karena datum A harus dibuat seakurat mungkin (lebih akurat dari fitur-fitur lainnya).

Gambar 4: Rantai toleransi untuk contoh kasus sebuah perakitan produk dengan dua komponen dengan memperhitungkan toleransi geometri (GD&T).

Untuk toleransi geometri sebuah fitur lubang atau pin, toleransi lokasi (*location tolerance*) pada umumnya digunakan dari pada menggunakan toleransi *cylindricity*. Hal ini disebabkan karena toleransi lokasi juga mengontrol bentuk silinder (*cylindricity*) dari suatu lubang atau pin atau poros, selain juga mengontrol lokasi titik tengah lubang atau pin atau poros tersebut. Sehingga, dengan menggunakan toleransi lokasi, toleransi ini juga mengontrol posisi dan bentuk silinder secara bersamaan.

Gambar 4 memperlihatkan rantai toleransi untuk contoh kasus dua buah komponen tersebut dengan memperhitungkan toleransi geometri. Dari gambar 4, dapat dilihat bahwa dengan memperhitungkan toleransi geometri, sumber-sumber variasi akan semakin banyak. Hal ini dapat dilihat pada komponen-komponen variasi pada gambar 4, yaitu nomor 1,3,4,5,6 dan 7. Pada contoh ini, fitur perakitan yang ingin dianalisis adalah jarak vertikal A-B (lihat gambar 4).

Tabel 1 memperlihatkan hasil analisis toleransi berbasis *worst-case* dan tabel 2 memperlihatkan hasil analisis berbasis statistik untuk contoh kasus tersebut. Dari tabel 1 dan tabel 2 tersebut, dapat dilihat, selain *assembly shift*, bonus toleransi juga didapatkan yang diakibatkan suatu fitur lubang atau pin terdeviasi dari nilai MMC-nya. Hasil dari analisis akumulasi toleransi untuk dimensi dan toleransi akhir jarak A-B tersebut (lihat gambar 4) adalah $(70 \pm 2.485) \text{ mm}$ dengan kalkulasi berdasarkan metode *worst-case*. Sedangkan, Hasil dari analisis akumulasi toleransi untuk dimensi dan toleransi akhir jarak A-B tersebut dengan kalkulasi berdasarkan metode statistik adalah $(70 \pm 1.26) \text{ mm}$.

Pada contoh kasus ini, dengan kalkulasi *worst-case*, hasil akhir akumulasi toleransi dengan memperhitungkan toleransi geometri adalah lebih besar 43.6 % daripada hasil kalkulasi *worst-case* dengan hanya memperhitungkan toleransi dimensional “*plus/minus*” saja. Sedangkan, dengan kalkulasi statistik, hasil akhir akumulasi toleransi dengan memperhitungkan toleransi geometri adalah lebih besar 17.5 % daripada hasil kalkulasi statistik dengan hanya memperhitungkan toleransi dimensional “*plus/minus*” saja.

Tabel 1: Analisis akumulasi toleransi berbasis *worst-case* untuk contoh toleransi geometri.

No	Deskripsi	Dims /mm	Tol /mm	Sumber Dim/Tol & kalkulasi	% Kontribusi
1	<i>Flatness</i>	0	0.005	<i>Error</i> dari <i>flatness</i> = $0.01/2 = 0.005$	0.2
2	Dimensi	35	0.2	Dari gambar teknik	8
3	Toleransi lokasi (pada komponen 2)	0	0.04	<i>Error</i> dari lokasi = $0.08/2 = 0.04$	1.6
4	Bonus toleransi karena MMC (pada komponen 2)	0	0.5	$(\text{max. diameter-MMC})/2 = (10.5-9.5)/2 = 0.5$	20.1
5	<i>Assembly-shift</i>	0	1	<i>Assembly-shift</i> karena gaya gravitasi, lubang terbesar – silinder terkecil = $10.5 - 9.5$	40.2
6	Toleransi lokasi (pada komponen 1)	0	0.04	<i>Error</i> dari lokasi = $0.08/2 = 0.04$	1.6
7	Bonus toleransi karena MMC (pada komponen 1)	0	0.5	$(\text{max. diameter-MMC})/2 = (10.5-9.5)/2 = 0.5$	20.1
8	Dimensi	35	0.2	Dari gambar teknik	8
	Total jarak A dan B	70	2.485		

Tabel 2: Analisis akumulasi toleransi berbasis statistik untuk contoh toleransi geometri.

No	Deskripsi	Dims	Tol	Squared Tol.	Sumber Dim/Tol & kalkulasi
1	<i>Flatness</i>	0	0.005	0.000025	<i>Error dari flatness</i> = $0.01/2 = 0.005$
2	Dimensi	35	0.2	0.04	Dari gambar teknik
3	Toleransi lokasi (pada komponen 2)	0	0.04	0.0016	<i>Error dari lokasi</i> = $0.08/2 = 0.04$
4	Bonus toleransi karena MMC (pada komponen 2)	0	0.5	0.25	$(\text{max. diameter-MMC})/2 = (10.5 - 9.5)/2 = 0.5$
5	<i>Assembly-shift</i>	0	1	1	<i>Assembly-shift</i> karena gaya gravitasi, lubang terbesar – silinder terkecil = $10.5 - 9.5$
6	Toleransi lokasi (pada komponen 1)	0	0.04	0.0016	<i>Error dari lokasi</i> = $0.08/2 = 0.04$
7	Bonus toleransi karena MMC (pada komponen 1)	0	0.5	0.25	$(\text{max. diameter-MMC})/2 = (10.5 - 9.5)/2 = 0.5$
8	Dimensi	35	0.2	0.04	Dari gambar teknik
	Total jarak A dan B	70		1.26	

7.2 Analisis 3D rantai variasi (toleransi) geometri

Metode analisis rantai variasi (toleransi) atau *tolerance stack-up analysis* dengan metode matriks merupakan sebuah metode yang sangat berguna dan sangat kuat. Dengan metode matriks ini, analisis toleransi dapat dilakukan secara 3D dan seluruh tipe *error*, yaitu *error* linier dan rotasional, dapat diikutsertakan dan dianalisis.

Metode matriks untuk analisis toleransi 3D adalah sebagai berikut (Lihat Bab 2):

- Sebuah metode analisis toleransi yang digunakan untuk merepresentasikan akumulasi toleransi dengan *rantai transformasi koordinat*.
- Koordinat transformasi tersebut, yang merepresentasikan perambatan toleransi untuk nilai nominal dan nilai variasinya, direpresentasikan sebagai sebuah matriks *homogenous* 4×4 . Matriks tersebut adalah sebuah matriks roto-translasi.
- Dengan metode matriks, analisis akumulasi toleransi akan lebih akurat karena metode tersebut memperhitungkan juga variasi rotasioanal setiap fiturnya (analisis 3D).

Ilustrasi rantai toleransi nominal dan variasi yang dipresentasikan dengan transformasi koordinatnya diperlihatkan pada gambar 5. Pada gambar 5 (kiri), rantai toleransi nominal mengikuti dimensi nominal setiap fitur yang dilalui oleh rantai toleransinya. Sedangkan pada gambar 3 (kanan), karena ada variasi pada setiap fiturnya sesuai dengan nilai toleransinya, maka ketika suatu koordinat transformasi mencapai suatu fitur, maka koordinat tersebut memiliki tambahan transformasi yang menggambarkan variasi pada fitur tersebut.

Penjelasan lebih detail mengenai transformasi variasi tersebut adalah sebagai berikut. Pada gambar 5 (kanan), matriks T_{12} mengtransformasikan sistem koordinat 1 (pada fitur 1) ke sistem koordinat 2 (pada fitur 2). Karena ada variasi dalam fitur 2 (direpresentasikan dengan nilai dan jenis toleransi yang dialokasikan kepadanya), maka ada transformasi tambahan yang menggambarkan variasi pada fitur 2, yaitu T_{22}' . Dan seterusnya, yaitu ketika transformasi T_{23} mencapai fitur 3, maka karena ada toleransi pada fitur tersebut, maka ada tambahan transformasi yaitu T_{33}' . Dan seterusnya sampai pada transformasi ke fitur yang terakhir pada rantai toleransi tersebut. Hal penting yang perlu diingat adalah pergeseran karena transformasi T_{ii}' yang merepresentasikan variasi adalah sangat kecil.

Gambar 5: Ilustrasi perbedaan antara rantai transformasi nominal (kiri) dan rantai transformasi variasi (kanan).

Untuk contoh kasus analisis toleransi 3D dengan metode matriks, produk dengan dua buah komponen tersebut, yang dirakit bersamaan, digunakan lagi. Detil produk tersebut dan gambar tekniknya yang digunakan untuk contoh kasus ini dapat dilihat pada gambar 1 (untuk gambar produk tersebut), dan gambar 2 dan gambar 3 (untuk gambar tekniknya). Fitur perakitan yang akan dianalisis adalah jarak vertikal dari A ke B yang dapat dilihat pada gambar 6.

Rantai toleransi 3D untuk analisis akumulasi toleransi kasus ini diperlihatkan pada gambar 6. Pada gambar 6, rantai toleransinya mempunyai representasi yang lebih kompleks karena rantai toleransi tersebut menjelaskan perambatan toleransi secara 3D. Hal penting yang perlu diingat adalah dalam menentukan suatu rantai toleransi sebuah produk, yang memiliki dua buah atau lebih komponen, rantai toleransi tersebut harus melewati seluruh fitur yang berfungsi untuk menyambungkan komponen-komponen tersebut (*assembly feature*). Proses untuk menentukan rantai toleransi adalah suatu proses yang bersifat sains dan juga bersifat seni. Karena, akan ada berbagai macam pilihan rantai toleransi. Sehingga, penentuan rantai toleransi yang paling tepat harus mengikuti bagaimana produk itu akan berfungsi pada prakteknya atau kondisi riil nantinya.

Setelah rantai toleransi ditentukan, maka ada dua model transformasi matriks yang harus direkonstruksi berdasarkan rantai toleransi yang telah ditentukan tersebut, yaitu rantai **toleransi nominal** dan **rantai toleransi variasi**.

Rantai transformasi nominal (*nominal transformation chain*) untuk kasus ini adalah:

$$\mathbf{T}_{1.12} = \mathbf{T}_{1.2} \cdot \mathbf{T}_{2.3} \cdot \mathbf{T}_{3.4} \cdot \mathbf{T}_{4.5} \cdot \mathbf{T}_{5.6} \cdot \mathbf{T}_{6.7} \cdot \mathbf{T}_{7.8} \cdot \mathbf{T}_{8.9} \cdot \mathbf{T}_{9.10} \cdot \mathbf{T}_{10.11} \cdot \mathbf{T}_{11.12} \quad (1)$$

dimana elemen-elemen dari matriks-matriks *homogenous* tersebut terdiri dari d_x , d_y , d_z , $d\theta_x$, $d\theta_y$, $d\theta_z$. Untuk lebih jelasnya bagaimana menentukan nilai-nilai variabel tersebut pada setiap matriksnya, representasi dengan menggunakan sebuah tabel digunakan.

Gambar 6: Rantai toleransi untuk contoh kasus dengan dua buah komponen.

Tabel 3 memperlihatkan dengan detail bagaimana cara untuk menentukan nilai elemen-elemen matriks transformasi untuk rantai toleransi nominal tersebut. Pada tabel 3, setiap barisnya menggambarkan jenis transformasi dari satu sistem koordinat (suatu fitur) ke sistem koordinat lainnya (fitur lainnya) dan menjelaskan juga nilai setiap elemen d_x , d_y , d_z , $d\theta_x$, $d\theta_y$, $d\theta_z$ untuk setiap matriks transformasinya.

Setelah seluruh nilai elemen matriks transformasi pada rantai toleransi nominal tersebut telah ditentukan, maka seluruh matriks transformasi tersebut dikalikan sehingga menghasilkan suatu matriks yang mempunyai nilai-nilai elemen matriksnya yang merupakan hasil perkalian tersebut. Hasil dari perkalian matriks pada rantai transformasi nominal tersebut diperlihatkan pada gambar 7. Pada gambar 7, dari hasil kalkulasi rantai transformasi nominal tersebut, dihasilkan sebuah matriks $T_{1,12}$ hasil juga merupakan matriks berukuran 4×4 dimana, pada matriks ini kita mempunyai semua informasi mengenai jarak A ke B dan orientasi A terhadap B.

Pada gambar 7, jarak nominal A ke B adalah 70 mm , yang merupakan elemen ke (3,4) dari matriks $T_{1,12}$. elemen ke (1,4) dan (2,4) merupakan informasi jarak searah sumbu X dan Y . Dan, elemen ke (1,2), (1,3), (2,1), (2,3), (3,1) dan (3,2) dari matriks tersebut merupakan nilai rotasi A terhadap B, dalam hal ini orientasi dari jarak tersebut.

$T_{112} =$

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	70
0	0	0	1

Jarak A dan B pada arah Z

Gambar 7: Matriks akhir hasil dari perkalian matriks transformasi untuk rantai toleransi nominal.

Tabel 3: Rantai transformasi nominal.

Urutan perambatan toleransi	Deskripsi	matriks Roto-translation						Sumber dan kalkulasi Dim/Tol
		Translasi (nilai max)			Rotasi (nilai max.)			
		d_x	d_y	d_z	$d\theta_x$	$d\theta_y$	$d\theta_z$	
12	Dimensi nominal	30	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik
23	Dimensi nominal	70	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik
34	Dimensi nominal	0	0	10	0	0	0	Dari gambar teknik
45	Dimensi nominal	-60	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik
56	Dimensi nominal	0	10	0	0	0	0	Dari gambar teknik
67	Dimensi nominal	0	0	25	0	0	0	Dari gambar teknik
78	Dimensi nominal	-10	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik
89	Dimensi nominal	0	0	15	0	0	0	Dari gambar teknik
910	Dimensi nominal	0	-10	0	0	0	0	Dari gambar teknik
1011	Dimensi nominal	0	0	20	0	0	0	Dari gambar teknik
1112	Dimensi nominal	-30	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik

Perhitungan rantai toleransi nominal adalah untuk memverifikasi apakah desain dari rantai toleransi yang kita disain sudah benar atau tidak. Apabila hasil dari perhitungan rantai toleransi nominal memberikan hasil yang sesuai dengan yang kita harapkan pada suatu fitur yang ingin dianalisis, maka disain dari rantai toleransi yang kita buat sudah benar.

Langkah selanjutnya adalah merekonstruksi model transformasi dari rantai toleransi yang telah ditentukan sebelumnya. Rantai transformasi variasi (*variance transformation chain*) adalah:

$$\mathbf{T}_{1.12} = \mathbf{T}_{1.2} \cdot \mathbf{T}_{2.2'} \cdot \mathbf{T}_{2.3} \cdot \mathbf{T}_{3.3'} \cdot \mathbf{T}_{3.4} \cdot \mathbf{T}_{4.4'} \cdot \mathbf{T}_{4.5} \cdot \mathbf{T}_{5.5'} \cdot \mathbf{T}_{5.6} \cdot \mathbf{T}_{6.6'} \cdot \mathbf{T}_{6.7} \cdot \mathbf{T}_{7.7'} \cdot \mathbf{T}_{7.8} \cdot \mathbf{T}_{8.8'} \cdot \mathbf{T}_{8.9} \cdot \mathbf{T}_{9.9'} \cdot \mathbf{T}_{9.10} \cdot \mathbf{T}_{10.10'} \cdot \mathbf{T}_{10.11} \cdot \mathbf{T}_{11.11} \cdot \mathbf{T}_{11.12} \cdot \mathbf{T}_{12.12'} \quad (2)$$

dimana elemen-elemen dari matriks-matriks *homogenous* tersebut terdiri dari d_x , d_y , d_z , $d\theta_x$, $d\theta_y$, $d\theta_z$. Representasi dengan menggunakan sebuah tabel digunakan untuk menjelaskan nilai setiap elemen matriks transformasi tersebut.

Tabel 4 memperlihatkan detail bagaimana cara menentukan elemen-elemen matriks transformasi untuk rantai toleransi variasi. Setiap baris pada tabel 4 memperlihatkan jenis transformasi (nominal atau variasi), elemen-elemen matriks transformasi tersebut dan penjelasannya. Setiap baris yang menunjukkan transformasi nominal diikuti baris yang menunjukkan transformasi variasinya. Hal yang perlu diperhatikan adalah nilai elemen-elemen matriks nominal

jauh lebih besar dari nilai variasinya dan elemen-elemen $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$ (dalam satuan radian).

Untuk matriks-matriks transformasi variasi (tabel 4), misalnya 22', 33', ... , dan 1212', elemen-elemen d_x, d_y, d_z pada umumnya berasal dari nilai toleransi dimensional fitur-fitur tersebut atau bonus toleransi. Sedangkan, elemen-elemen $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$ membutuhkan suatu kalkulasi yang berhubungan dengan ukuran dimensi fitur-fitur tersebut. Pada umumnya, nilai $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$ adalah 0 untuk matriks transformasi nominal.

Penjelasan detail mengenai cara menentukan nilai dari elemen-elemen $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$ adalah sebagai berikut. Pada prinsipnya, penentuan dari nilai $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$ adalah dengan menentukan zona toleransi geometri terbesar suatu toleransi geometri pada suatu fitur (zona toleransi tersebut dapat berupa silinder atau dua bidang datar sejajar). Untuk lebih jelasnya, perhatikan gambar 8. Untuk zona toleransi berupa dua bidang sejajar, nilai $d\theta_i$ adalah besarnya zona toleransi dibagi dengan panjang atau lebar permukaan suatu fitur. Sedangkan untuk zona toleransi berupa silinder, nilai $d\theta_i$ adalah besarnya zona toleransi dibagi dengan tinggi suatu fitur silinder. Untuk mengikuti format equal bilateral, maka nilai $d\theta_i$ yang terkalkulasi dibagi 2.

Gambar 8: Cara menentukan besarnya nilai $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$ dari suatu toleransi geometri.

Tabel 4: Rantai transformasi variasi.

Urutan perambatan toleransi	Deskripsi	Translasi (nilai max)			Rotasi (nilai max.) dalam radian			Sumber dan kalkulasi Dim/Tol
		d_x	d_y	d_z	$d\theta_x$	$d\theta_y$	$d\theta_z$	
12	Dimensi nominal	30	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik
22'	Toleransi dimensional + <i>perpendicularity</i>	0.2	0	0	0	0.0002	0.0003	dx dari toleransi di gambar ± 0.2 , $d\theta_y = (0.02/50)/2 = 2 \times 10^{-4}$, $d\theta_z = (0.02/40)/2 = 2.5 \times 10^{-4}$. dibagi 2 untuk mendapatkan $\pm$ (toleransi equal-bilateral).
23	Dimensi nominal	70	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik
33'	Toleransi dimensional + <i>perpendicularity</i>	0.2	0	0	0	0.001	0.0003	Lihat 22' (kecuali perubahan pada denominator)
34	Dimensi nominal	0	0	10	0	0	0	Dari gambar teknik
44'	Toleransi dimensional	0	0	0.2	0	0	0	dz dari gambar teknik. Tidak ada toleransi geometri.
45	Dimensi nominal	-60	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik
55'	Toleransi dimensional	0.2	0	0	0	0	0	dx dari gambar teknik. Tidak ada toleransi geometri.
56	Dimensi nominal	0	10	0	0	0	0	Dari gambar teknik
66'	Tidak ada toleransi	0	0	0	0	0	0	-
67	Dimensi nominal	0	0	25	0	0	0	Dari gambar teknik

77'	Toleransi lokasi + bonus toleransi (karena MMC)	0	0.54	0.54	0	0.054	0.054	<p>Toleransi lokasi+bonus: $(0.08+10.5-9.5[\text{bonus}])/2$ [equal-bilaterally]= 0.54 untuk dy dan dz. $d\theta_y = d\theta_z = (0.08+10.5-9.5/10)/2 = 0.054$.</p> <p>Catatan: MMC memberikan “bonus” toleransi, tetapi menyebabkan “sumber error” tambahan pada akumulasi toleransi. (pada komponen 2)</p>
78	Dimensi nominal	-10	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik
88'	Assembly shift+ location tolerance + bonus	0	1.04	1.04	0	0.104	0.104	<p>location+bonus+ assembly shift: $(0.08+10.5-9.5[\text{bonus}]+10.5-9.5[\text{shift}])/2=1.04$ for dz and dy. $d\theta_y = d\theta_z = ((0.08+10.5-9.5+10.5-9.5)/10)/2 = 0.104$. (pada komponen 1)</p>
89	Dimensi nominal	0	0	15	0	0	0	Dari gambar teknik
99'	Tidak ada toleransi	0	0	0	0	0	0	-
910	Dimensi nominal	0	-10	0	0	0	0	Dari gambar teknik
1010'	Tolernasi perpendicularity	0	0.01	0	0.0002	0	0.0003	<p>$dy=0.02/2=0.01$. <i>Flatness error</i> dari datum C pada komponen 1. $d\theta_x = (0.02/50)/2=0.0002$. $d\theta_z = (0.02/30)/2=0.000333$</p>
1011	Dimensi nominal	0	0	20	0	0	0	Dari gambar teknik

1111'	Toleransi <i>flatness</i>	0	0	0.005	0.00013	0.00017	0	$dz=0.01/2 = 0.005$. $d\theta_x=(0.01/40)/2=0.00125$. $d\theta_y=(0.01/30)/2=0.00167$
1112	Dimensi nominal	-30	0	0	0	0	0	Dari gambar teknik
1212'	Toleransi dimensional	0.2	0	0	0	0	0	dx dari gambar teknik. Tidak ada toleransi geometri.

Pada gambar 8 mengenai cara penentuan nilai $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$, **hal penting yang harus dipahami adalah *error* rotasi akan mempunyai nilai yang besar apabila suatu fitur lubang, yang digunakan untuk memasukkan pin, dibuat terlalu pendek atau fitur permukaan datar, yang biasanya digunakan untuk kontak antar dua permukaan komponen yang berbeda, dibuat terlalu kecil.** Hal ini disebabkan karena pembagi untuk menentukan nilai *error* sudut menjadi kecil, sehingga nilai *error* sudut tersebut menjadi besar.

Pada tabel 11, elemen-elemen matriks variasi 77', yaitu $T_{77'}$, mempunyai *error* sudut yang paling besar karena efek dari panjang lubang yang terlalu pendek. Begitu juga dengan elemen-elemen matriks 88', yaitu $T_{88'}$, matriks variasi tersebut mempunyai *error* sudut yang besar yang disebabkan oleh hal yang sama pada matriks variasi 77', yaitu $T_{77'}$. Hal penting yang bisa diambil pelajaran dari kasus ini adalah, apabila sebuah lubang atau pin (fitur silinder) mempunyai bentuk yang pendek, maka toleransi geometri yang dialokasikan kepada fitur tersebut haruslah kecil.

Langkah selanjutnya adalah menganalisis rantai toleransi 3D dengan mengalikan seluruh rangkaian matriks yang merepresentasikan perambatan toleransi pada produk contoh kasus ini, baik matriks transformasi nominal (persamaan (1)) maupun matriks transformasi variasi seperti yang terdapat pada persamaan (2). Analisis tersebut dilakukan dengan cara simulasi **Monte-Carlo**, yaitu, dengan cara *sample* elemen-elemen *error* $d_x, d_y, d_z, d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$ pada matriks-matriks variasi dari suatu distribusi Normal dengan nilai rata-rata 0 dan deviasi standar dengan nilai besarnya elemen-elemen *error* di bagi dengan 3 (untuk mendapatkan 1σ), yaitu $N(0, \sigma^2)$, $\sigma = \frac{d_i}{3}$ atau $\frac{d\theta_i}{3}$. Pembaca bisa mereferensi bab 2 untuk mengingat kembali aspek-aspek statistik, terutama mengenai distribusi statistik.

Untuk mengaplikasikan analisis toleransi 3D ini, dengan simulasi Monte-Carlo, maka perhitungan untuk mendapatkan matriks $T_{1.12}$ pada persamaan (2), dilakukan berulang-ulang dengan jumlah yang banyak. Setiap pengulangan, elemen-elemen *error* disampel dan mempunyai nilai yang baru. Pada setiap pengulangan, hasil kalkulasi matriks $T_{1.12}$ disimpan. Dari seluruh hasil kalkulasi $T_{1.12}$ yang disimpan tersebut, parameter statistik, berupa rata-rata, deviasi standar, dan nilai maksimum dan minimum dimensi totalnya dapat diketahui. Pemrograman MATLAB digunakan untuk mengaplikasikan analisis toleransi 3D tersebut. Tabel 5 memperlihatkan kode pemrograman MATLAB tersebut.

Hasil dari 10000 pengulangan kalkulasi analisis akumulasi toleransi dengan metode matriks (analisis 3D) tersebut diperlihatkan pada gambar 9. Pada gambar 9, rotasi searah sumbu Z tidak dikalkulasi karena *error* orientasi cukup dipresetasikan dengan dua jenis rotasi saja, dalam hal ini rotasi searah sumbu X dan Y. Lagi pula, *error* rotasi pada sumbu Z untuk jarak A-B tersebut tidak mempunyai pengaruh. Histogram setiap data $d_x, d_y, d_z, d\theta_x, d\theta_y$ yang dikumpulkan pada setiap pengulangan kalkulasi $T_{1.12}$ direkonstruksi untuk mengkarakterisasi parameter statistik dari setiap *error* tersebut, yaitu: nilai rata-rata, deviasi standar, dan batas minimum dan maksimum variasi dari setiap dimensi searah sumbu X, Y dan Z, dan variasi dari setiap rotasi pada sumbu X dan Y. Dari hasil tersebut, variasi jarak A ke B yang merupakan jarak vertikal searah sumbu Z adalah $(69.99 \pm 3.82) \text{ mm}$, yaitu $66.18 \text{ mm} - 73.81 \text{ mm}$.

Gambar 9: Hasil simulasi analisis akumulasi toleransi 3D dengan metode matriks. Jarak X, Y dan Z adalah dalam satuan mm dan rotasi terhadap sumbu X dan Y adalah dalam bentuk derajat.

Tabel 5: Kode pemrograman MATLAB untuk simulasi analisis akumulasi toleransi 3D dengan metode matriks.

Kode pemrograman MATLAB
Fungsi Utama: clear all; close all; clc; %RANTAI TRANSFORMASI NOMINAL T12=transmat('x',[30]); T23=transmat('x',[70]); T34=transmat('z',[10]); T45=transmat('x',[-60]); T56=transmat('y',[10]); T67=transmat('z',[25]); T78=transmat('x',[-10]); T89=transmat('z',[15]); T910=transmat('y',[-10]); T1011=transmat('z',[20]); T1112=transmat('x',[-30]); T112_nominal=T12*T23*T34*T45*T56*T67*T78*T89*T910*T1011*T1112 %RANTAI TRANSFORMASI VARIASI ns= 10000; %number of simulation run for i=1:ns %variance components T22b=Dtransmat([0 0],[0 0],[0 0.95*0.2/3],[0 0],[0 0.95*0.0002/3],[0 0.95*0.0003/3]); T33b=Dtransmat([0 0],[0 0],[0 0.95*0.2/3],[0 0],[0 0.95*0.001/3],[0 0.95*0.0003/3]); T44b=Dtransmat([0 0],[0 0],[0 0.95*0.2/3],[0 0],[0 0],[0 0]); T55b=Dtransmat([0 0.95*0.2/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]); T66b=Dtransmat([0 0],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]); T77b=Dtransmat([0 0],[0 0.95*0.54/3],[0 0.95*0.54/3],[0 0],[0 0.95*0.054/3],[0 0.95*0.054/3]); T88b=Dtransmat([0 0],[0 0.95*1.04/3],[0 0.95*1.04/3],[0 0],[0 0.95*0.104/3],[0 0.95*0.104/3]); T99b=Dtransmat([0 0],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]); T1010b=Dtransmat([0 0],[0 0.95*0.01/3],[0 0],[0 0.95*0.0002/3],[0 0],[0 0.95*0.0003/3]); T1111b=Dtransmat([0 0],[0 0],[0 0.95*0.005],[0 0.95*0.00013/3],[0 0.95*0.00017],[0 0]); T1212b=Dtransmat([0 0.95*0.2/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]); T112_with_variation=T12*T22b*T23*T33b*T34*T44b*T45*T55b*T56*T66b*T67*T77b*T78*T88b*T89*T99b*T910*T1010b*T1011*T1111b*T1112*T1212b;

```

kc1(i)=T112_with_variation(1,4); %X-distance clearance
kc2(i)=T112_with_variation(2,4); %Y-distance clearance
kc3(i)=T112_with_variation(3,4); %Z-distance clearance
kc4(i)=asin(T112_with_variation(1,3))*180/pi; %Rotation Angle from X-axis
kc5(i)=asin(T112_with_variation(1,2))*180/pi; %Rotation Angle from Y-axis
kc6(i)=asin(T112_with_variation(1,1))*180/pi; %Rotation Angle from Z-axis
end

%PLOT HASIL
[muhat,sigmahat]=normfit(kc1);
kcmin=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf('(%s,%s)',kcmin,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(3,2,1);
histfit(kc1,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('X-distance');

[muhat,sigmahat]=normfit(kc2);
kcmin=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf('(%s,%s)',kcmin,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(3,2,2);
histfit(kc2,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('Y-distance');

[muhat,sigmahat]=normfit(kc3);
kcmin=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf('(%s,%s)',kcmin,kcmax);

```

```

textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(3,2,3);
histfit(kc3,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('Z-distance');

[muhat,sigmahat]=normfit(kc4);
kcmin=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf('(%s,%s)',kcmin,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(3,2,4);
histfit(kc4,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('X-rotation');

[muhat,sigmahat]=normfit(kc5);
kcmin=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf('(%s,%s)',kcmin,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(3,2,5);
histfit(kc5,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('Y-rotation');

```

Fungsi “transmat”

```

function T=transmat(which, values) %Fungsi untuk merekonstruksi matriks transformasi
    %which="xyzabc"
    %values=vector berisi nilai
    T=[1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1]; %initialisation T as identity matrix
    for h=1:length(which)
        if which(h)=='x'

```

```

        T(1,4)=values(h);
    elseif which(h)=='y'
        T(2,4)=values(h);
    elseif which(h)=='z'
        T(3,4)=values(h);
    elseif which(h)=='a'
        T(2,2)=cos(degtorad(values(h)));
        T(2,3)=-sin(degtorad(values(h)));
        T(3,2)=sin(degtorad(values(h)));
        T(3,3)=cos(degtorad(values(h)));
    elseif which(h)=='b'
        T(1,1)=cos(degtorad(values(h)));
        T(1,3)=sin(degtorad(values(h)));
        T(3,1)=-sin(degtorad(values(h)));
        T(3,3)=cos(degtorad(values(h)));
    elseif which(h)=='c'
        T(1,1)=cos(degtorad(values(h)));
        T(1,2)=-sin(degtorad(values(h)));
        T(2,1)=sin(degtorad(values(h)));
        T(2,2)=cos(degtorad(values(h)));
    end
end
end

```

Fungsi Dtransmat

```

function DT=Dtransmat(dTx,dTy,dTz, dx,dy,dz) %Fungsi untuk merekonstruksi matriks variasi
% input element adalah sebagai 2-elements vector, ex: dx=[mu,sigma]
Dx=normrnd(dx(1),dx(2));
Dy=normrnd(dy(1),dy(2));
Dz=normrnd(dz(1),dz(2));
DTx=normrnd(dTx(1),dTx(2));
DTy=normrnd(dTy(1),dTy(2));
DTz=normrnd(dTz(1),dTz(2));
DT=[1 -Dz Dy DTx; Dz 1 -Dx Dty; -Dy Dx 1 DTz; 0 0 0 1];
end

```


BAB 8

Contoh aplikasi 3: Analisis 3D rantai variasi perakitan kompresor rotasi

Bab ini membahas contoh aplikasi analisis rantai variasi (toleransi) secara 3D untuk sebuah produk yang riil, yaitu sebuah kompresor berputar/rotasi (*rotary compressor*). Produk tersebut terdiri dari lima komponen utama yang mempengaruhi sebuah karakteristik kunci yang akan dibahas. Desain dari produk tersebut tidak memperlihatkan detail desain fitur-fitur yang tidak mempengaruhi karakteristik kunci yang akan dibahas sehingga memudahkan pembaca untuk fokus hanya pada fitur-fitur yang mempengaruhi karakteristik kunci tersebut.

Bab ini juga memperlihatkan bagaimana sebuah proses riil alokasi toleransi, yang merupakan suatu proses iteratif atau berulang, dilakukan pada suatu fitur. Efek dari pemilihan metode kalkulasi perhitungan total akumulasi variasi (*stack-up*) antara metode *worst-case* dan metode statistik diperlihatkan dan dibahas dengan jelas dan detail. Selain itu, proses merubah dan merevisi sebuah desain produk (termasuk dimensi nominal dan toleransinya) berdasarkan hasil dari analisis rantai variasi tersebut diperlihatkan. Mungkin, bab ini merupakan contoh paling penting dalam buku ini karena memberikan contoh riil bagaimana **proses analisis rantai variasi, proses alokasi nilai-nilai toleransi suatu fitur dan proses merevisi desain dilakukan pada suatu produk**. Seluruh kode pemrograman MATLAB yang digunakan untuk mengkalkulasi rantai variasi pada bab ini diperlihatkan pada akhir bab ini. Materi pada bab ini didapatkan penulis ketika menyelesaikan sebuah proyek analisis toleransi sebuah kompresor berputar.

8.1 Kompresor berputar (*Rotary compressor*)

Kompresor berputar adalah salah satu jenis kompresor yang berkerja secara *cycle* (berputar pada porosnya dalam sebuah *cavity*). Nama lain dari kompresor jenis ini adalah *rotary vane pump*. Prinsip kerja dari kompresor berputar adalah sebuah rotor silinder berputar di dalam sebuah silinder *cavity* yang berukuran lebih besar dari rotor tersebut dimana titik pusat dari rotor dan silinder *cavity* tersebut terdapat sebuah *offset* (tidak ko-aksis). Dengan adanya offset tersebut, dua buah ruangan asimetri terbentuk ketika kompresor tersebut berputar yang menghasilkan sebuah kerja pompa. Pada sisi *in-take*, volume ruangnya bertambah ketika pompa tersebut beroperasi. Sedangkan, pada sisi *out-take*, volume ruangnya berkurang. Aplikasi kompresor berputar banyak berupa pompa hidrolik bertekanan tinggi, seperti pompa transmisi mobil, pompa power-steering dan pompa vakum.

8.2 Disain awal: dimensi dan alokasi toleransi

Produk rakitan akhir dari sebuah pompa kompresor (dengan menghilangkan fitur-fitur detail untuk penyederhanaan dan fokus pada fitur-fitur yang mempengaruhi karakteristik kunci yang akan dibahas) dapat dilihat pada gambar 1. Gambar 2 memperlihatkan *multiple view* dari kompresor berputar tersebut. Gambar 3 memperlihatkan rakitan kompresor tersebut dalam bentuk *exploded view* yang memperlihatkan bagaimana setiap komponen diposisikan untuk melakukan perakitan kompresor tersebut.

Gambar 1: Produk rakitan akhir dari sebuah kompresor berputar.

Gambar 2: *Multiple-view* dari produk rakitan akhir dari sebuah kompresor berputar tersebut.

Gambar 3: *Exploded view* dari produk rakitan kompresor pada gambar 1.

Detil dimensi dan alokasi toleransi (**dalam format *equal-bilateral***), baik dimensional maupun geometri, diperlihatkan pada gambar 4. Pada gambar 4, dimensi dan alokasi toleransinya diperlihatkan secara detil untuk setiap komponen. Hanya dimensi dan toleransi yang berhubungan dengan rantai variasi yang mempengaruhi karakteristik kunci yang diperlihatkan. Pada gambar 4, datum utama untuk setiap komponen dari kompresor berputar tersebut diberikan pada fitur yang paling stabil pada setiap komponen-komponennya.

Datum A, yang merupakan datum utama yang merupakan referensi seluruh toleransi pada setiap komponennya, mempunyai nilai toleransi yang paling kecil. Karena, datum A merupakan fitur yang paling penting, sehingga apabila variasi geometri dan dimensi pada fitur datum A besar, variasi tersebut akan mengakibatkan variasi yang lebih besar lagi pada fitur-fitur lainnya pada komponen-komponen tersebut. Datum A untuk komponen poros diberikan pada fitur aksis utama dari komponen poros tersebut, karena fitur yang paling stabil dan dapat dijadikan referensi (pada saat pengukuran) dari komponen poros tersebut adalah aksis dari poros tersebut (bukan fitur permukaan datar seperti yang diberikan pada komponen-komponen lainnya).

Gambar 5 memperlihatkan model dari rantai transformasi untuk toleransi-toleransi yang diperlihatkan pada gambar 4. Karakteristik kunci atau *key characteristic* (KC) yang ingin dicapai dalam analisis rantai transformasi tersebut adalah **jarak *gap* atau *clearance* antara titik 1 dan titik 2** (pada gambar 5). Nilai dari KC tersebut yang ingin dikontrol adalah **0.0 – 0.5 mm**.

Gambar 4: Detil dimensi dan alokasi toleransi pada setiap komponen kompresor pada gambar 1-3 dan berkontribusi terhadap rantai variasi toleransi.

Gambar 5: Rantai transformasi yang merepresentasikan propagasi rantai variasi (toleransi) dari kompresor berputar yang diperlihatkan pada gambar 4.

8.3 Disain awal: Rantai transformasi toleransi (*tolerance chain*)

Pada bagian ini, detail dari perhitungan rantai transformasi, baik **transformasi nominal** maupun **transformasi variasi**, diperlihatkan secara detail. Pertama-tama, rantai transformasi nominal, dimana semua geometri komponen-

komponen dari kompresor pada gambar 4 diasumsikan sempurna tidak ada cacat sama sekali, diperlihatkan. Kemudian, rantai transformasi variasi, yang mengandung variasi-variasi karena nilai-nilai toleransi yang diberikan, diperlihatkan

8.3.1 Rantai transformasi nominal

Rantai transformasi nominal dari KC, dari titik 1 ke titik 2 melewati semua fitur-fitur yang saling terhubung ketika komponen-komponen pada gambar 4 saling dirakit, adalah sebagai berikut (catatan: semua dimensi dan toleransi harus sudah dalam bentuk *equal-bilateral*):

$$T_{12} = T_{1A} \cdot T_{AB} \cdot T_{BC} \cdot T_{CD} \cdot T_{DE} \cdot T_{EF} \cdot T_{FG} \cdot T_{GH} \cdot T_{H2}$$

Dimana, rincian dari setiap nilai T_{xx} adalah (**catatan:** nama-nama variabel, serta fungsi-fungsi *eye*, *transmat*, dll, pada matriks-matriks rantai transformasi akan digunakan sebagai nama variabel pada **program-program MATLAB** untuk menghitung hasil dari perambatan toleransi dari rantai-rantai transformasi yang diperlihatkan pada seluruh bab ini, **pembaca harus selalu merujuk pada gambar 4 dan gambar 5 untuk kasus disain awal ini**):

- T_{1A} : Transformasi dari titik 1 ke titik A (Gambar 5). Sn_Rotor_Outer adalah diameter luar dari rotor tersebut.

$$T_{1A} = \begin{bmatrix} I & P_{1A} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, P_{1A} = \begin{bmatrix} Sn_Rotor_Outer/2 \\ 0 \\ -15 \end{bmatrix}, \text{Then } T_{1A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 24.975 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{1A} = \text{transmat}('xz', [24.975 \ -15])$$

- T_{AB} : Transformasi dari titik A ke titik B (Gambar 5). Titik A dan titik B saling berhimpit, sehingga tidak ada translasi dan rotasi dari titik A ke titik B.

$$T_{1A} = I_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{AB} = \text{eye}(4)$$

- T_{BC} : Transformasi dari titik B ke titik C (Gambar 5). Sn_Rotor_Hole adalah diameter dalam dari rotor 40.05 mm dan Sn_Shaft_Rot adalah diameter terluar dari poros 39.95 mm.

$$T_{BC} = \begin{bmatrix} I & P_{BC} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, P_{BC} = \begin{bmatrix} -(Sn_Rotor_Hole - Sn_Shaft_Rot)/2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ then } T_{BC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.05 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{BC} = \text{transmat}('x', [0.05])$$

- T_{CD} : Transformasi dari titik C ke titik D (Gambar 5). P_{CD} adalah jarak *shift* antara aksis yang melalui titik C ke aksis yang melalui titik D (aksis utama).

$$T_{CD} = \begin{bmatrix} I & P_{CD} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}; P_{CD} = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ then } T_{CD} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{CD} = \text{transmat}('x', [5])$$

- $T_{DE}, T_{EF}, T_{FG}, T_{GH}$: Titik D, E, F, G dan H saling berhimpit (Gambar 5). Sehingga, tidak ada perpindahan secara translasi dan rotasi.

$$T_{DE} = T_{EF} = T_{FG} = T_{GH} = I_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{DE} = T_{EF} = T_{FG} = T_{GH} = \text{eye}(4)$$

- T_{H2} : Transformasi dari titik H ke titik 2 (Gambar 5). Sn_Hole_Corpo adalah diameter bagian dalam dari komponen *body*.

$$T_{H2} = \begin{bmatrix} I & P_{H2} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}; P_{H2} = \begin{bmatrix} -Sn_Hole_Corpo/2 \\ 0 \\ 15 \end{bmatrix}, \text{ then } T_{H2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -30.025 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{H2} = \text{transmat}('xz', [-30.025 \ 15])$$

Hasil kalkulasi dari $T_{12} = T_{1A} \cdot T_{AB} \cdot T_{BC} \cdot T_{CD} \cdot T_{DE} \cdot T_{EF} \cdot T_{FG} \cdot T_{GH} \cdot T_{H2} = 0 \text{ mm}$ (jarak nominal).

Sehingga, pada kondisi sempurna, jarak antara titik 1 dan titik 2 adalah **0 mm** (dengan melihat komponen translasi dari matrix T_{12} setelah proses kalkulasi dilakukan).

8.3.2 Rantai transformasi variasi

Rantai transformasi variasi dari KC, dari titik 1 ke titik 2, adalah sebagai berikut (**Catatan:** *error yang timbul dari setiap variasi yang berasal dari toleransi diasumsikan mempunyai distribusi probabilitas normal atau Gaussian – lihat Bab 2 untuk pembahasan detail mengenai distribusi probabilitas*):

$$T'_{12} = T_{1'2'} = DT_{1'1} \cdot T_{1A} \cdot DT_{A'A} \cdot T_{AB} \cdot T_{BC} \cdot DT_{cc'} \cdot T_{CD} \cdot T_{DE} \cdot DT_{EE'} \cdot T_{EF} \cdot DT_{FF'} \cdot T_{FG} \cdot DT_{GG'} \cdot T_{GH} \cdot T_{H2} \cdot DT_{22'}$$

Dimana $DT_{xx'}$ adalah matrix yang memodelkan variasi pada suatu fitur karena toleransinya.

- $DT_{1'1} \rightarrow$ variasi dimensional dari radius (jari-jari) internal rotor ($\phi 50_{-0.1}^0$) (lihat gambar 4 dan 5).

$$\phi 50_{-0.1}^0 = Sn \pm Ts = \phi 49.95 \pm 0.05$$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = 0.5 \times Ts = 0.025$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi DT adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, \frac{0.025}{3}) \rightarrow \text{nilai ini digunakan untuk meng-sampling angka acak dari distribusi Normal (penjelasan yang sama untuk seterusnya).}$$
- $DT_{AA'} \rightarrow$ Variasi dari toleransi posisi (Tp) dari aksis rotor external (lihat gambar 4 dan 5). Terdapat Bonus pada toleransi ini.

$$\phi 50_{-0.1}^0 = Sn \pm Ts = \phi 49.95 \pm 0.05 ; \quad \phi 40_0^{+0.1} = Sn \pm Ts = \phi 40.05 \pm 0.05 ; \quad \text{Bonus} = 2Ts$$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = \frac{Tp + 0.5 \text{ Bonus} = Ts + DF \text{ Shift } B}{2} = \frac{0 + 0.05 + 0 + 0.05}{2} = 0.05$$

$$|\delta \theta x|_{\max} = |\delta \theta y|_{\max} = \frac{Tp + 0.5 \text{ Bonus} = Ts + DF \text{ Shift } B}{\text{Rotor_Cylinder_Length}} = \frac{0 + 0.05 + 0 + 0.05}{30} = \frac{0.1}{30}$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi DT adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.05}{3}) ; \quad \delta \theta x = \delta \theta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.1/30}{3})$$
- $DT_{CC'} \rightarrow$ variasi dari toleransi posisi pada poros dengan *shift* (lihat gambar 4 dan 5). Terdapat bonus pada toleransi ini.

$$\phi 40_{-0.1}^0 = \phi 39.95 \pm 0.05 ; \quad \phi 24_{-0.1}^0 = \phi 23.95 \pm 0.05 \rightarrow \text{Datum A dan datum B}$$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = \frac{Tp + 0.5 \text{ Bonus} = Ts + DF \text{ Shift } B + DF \text{ Shift } A}{2} = \frac{0 + 0.05 + [0 + 0.05] + [0 + 0.05]}{2} = 0.075$$

$$|\delta \theta x|_{\max} = |\delta \theta y|_{\max} = \frac{Tp + 0.5 \text{ Bonus} = Ts + DF \text{ Shift } B + DF \text{ Shift } A}{24} = \frac{0 + 0.05 + [0 + 0.05] + [0 + 0.05]}{24} = \frac{0.015}{24}$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi DT adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.075}{3}) ; \quad \delta \theta x = \delta \theta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.015/24}{3})$$
- $DT_{EE'} \rightarrow$ Assembly shift antara poros dan lubang dari cover (lihat gambar 4 dan 5).

Pada poros: $\phi 24_{-0.1}^0 = \phi 23.95 \pm 0.05$

Pada lubang cover: $\phi 24_0^{+0.1} = \phi 24.05 \pm 0.05$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = \frac{Hole_Coperchio_LMC - Albero_LMC}{2} = \frac{(24.05 + 0.05) - (23.95 - 0.05)}{2} = 0.1$$

$$|\delta \theta x|_{\max} = |\delta \theta y|_{\max} = \frac{Hole_Coperchio_LMC - Albero_LMC}{Coperchio_Cylinder_Length} = \frac{(24.05 + 0.05) - (23.95 - 0.05)}{30} = \frac{0.2}{30}$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi *DT* adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.1}{3}); \quad \delta \theta x = \delta \theta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.2/30}{3})$$

- $DT_{F'}$ → *Assembly shift* + variasi dari toleransi posisi (*Tp*) antara *clearance* lubang *cover* dan *fastener* terhadap *base* (lihat gambar 4 dan 5).

Datum B: $\phi 24^{+0.1}_0 = \phi 24.05 \pm 0.05$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = \frac{Hole_LMC - Shaft_LMC}{2} + \frac{Tp + DF\ shift\ B}{2}$$

$$= \frac{(8.4 + 0.1) - 8}{2} + \frac{0.1 + 0 + 0.05}{2} = \frac{0.65}{2} = 0.325$$

$$|\delta \theta x|_{\max} = |\delta \theta y|_{\max} = \frac{(0.5/2 + 0.15)/2}{Coperchio_Cylinder_Diameter} = \frac{0.2}{100}$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi *DT* adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.325}{3}); \quad \delta \theta x = \delta \theta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.2/100}{3})$$

- $DT_{GG'}$ → *Assembly Shift* antara *Body* dan *Base* + variasi dari toleransi posisi (*Tp*) *Body-hole* (Catatan: terdapat hanya satu *assembly shift* karena pada *Base* terdapat *threaded holes*) (lihat gambar 4 dan 5).

$\phi 60^{+0.1}_0 = \phi 60.05 \pm 0.05$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = TolerancePosition + Assembly\ Shift$$

$$= \frac{Tp + 0.5\ Bonus = Ts + DF\ Shift\ B}{2} + \frac{Hole_LMC - Fastener}{2}$$

$$= \frac{0.1 + 0.1 + (0 + 0.05)}{2} + \frac{(8.4 + 0.1) - 8}{2} = 0.375$$

$$|\delta \theta x|_{\max} = |\delta \theta y|_{\max} = \frac{Tp + 0.5\ Bonus = Ts + DF\ Shift\ B}{Rotor_Cylinder_Length} + \frac{T0}{Corpo_Diameter} = 0.127$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi *DT* adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.375}{3}); \quad \delta \theta x = \delta \theta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.127}{3})$$

- $DT_{22'} \rightarrow T_s$ dari radius internal *Corpo Hole* (lihat gambar 4 dan 5).

$$\phi 60_0^{+0.1} = \phi 60.05 \pm 0.05$$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = 0.5 \times T_s = 0.025$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi DT adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, \frac{0.025}{3})$$

Kalkulasi untuk analisis rantai variasi kompresor berputar tersebut dilakukan dengan **metode simulasi Monte-Carlo** (selanjutnya untuk mempermudah, kata “simulasi” dalam buku ini merujuk pada simulasi Monte-Carlo). Simulasi Monte-Carlo adalah suatu metode kalkulasi secara berulang dimana nilai-nilai *input* atau masukan yang dipakai dalam setiap pengulangan simulasi tersebut di-*sampling* dari suatu fungsi kepadatan (untuk variable kontinu) atau fungsi massa (untuk variabel diskrit) dari suatu distribusi probabilitas (dalam hal ini, kita akan selalu menggunakan distribusi Normal atau Gaussian). Karena nilai-nilai input merupakan hasil *sampling*, maka nilai output dari setiap pengulangan simulasi tersebut akan berubah-ubah. Maka dari itu, setiap *output* hasil dari simulasi disimpan. **Setelah simulasi diulang sebanyak jumlah pengulangan yang telah ditentukan, semua hasil atau output-nya yang disimpan, dianalisis secara statistik. Yang paling umum adalah, nilai rata-rata dan variasi dari output tersebut dikalkulasi.** Semua simulasi dilakukan dengan menggunakan pemrograman MATLAB.

Untuk simulasi disain awal tersebut, pemrograman MATLAB-nya dapat dilihat di daftar kode MATLAB “**ROTARYCOMPRESSOR.m**”. Simulasi untuk disain awal tersebut dilakukan/diulang sebanyak 20000 kali (*number of run* = 20000). Dalam setiap pengulangan, nilai-nilai error di-*sampling* dari distribusi normal dengan paramater distribusi $\mu = 0$ dan $\sigma = |\delta|/3$. Setiap output atau hasil kalkulasi perambatan variasi pada setiap simulasi (*run*) disimpan dan kemudian dihitung nilai rata-rata dan deviasai standarnya.

Hasil dari simulai tersebut diperlihatkan pada gambar 6. Dari hasil simulasi tersebut, jarak *gap* atau *clearance* antara titik 1 dan titik 2 (KC) berkisar pada -0.63 mm – 0.53 mm (dengan tingkat kepercayaan 99.7 % = 3σ). Sedangkan, error rotasi antara titik 1 dan titik 2 berkisar -0.78°-0.78°. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa KC yang diinginkan tidak dapat terpenuhi, yaitu jarak *gap* antara titik 1 dan titik 2 harus berkisar 0 mm – 0.5 mm. Maka dari itu, nilai-nilai toleransi dari komponen-komponen pada disain awal dari kompresor tersebut harus diulang dan direalokasikan sedemikian hingga nilai KC yang diinginkan dapat tercapai.

Figure 6: Hasil simulasi untuk analisis rantai variasi dari disain awal kompresor berputar tersebut.

8.4 Re-alokasi toleransi disain awal (Disain awal)

Tujuan utama dari analisis rantai variasi ini adalah untuk mengkalkulasi apakah KC (jarak *gap* atau *clearance* antara titik 1 dan titik 2 pada gambar 5) dari rakitan kompresor tersebut dapat mencapai nilai antara 0 – 0.5 mm. Nilai ini dapat dikonversi ke dalam format “*equal bilateral*” dengan mengasumsikan distribusi Normal (Gaussian) sebagai berikut: $\mu \pm 3\sigma = 0.25 \pm 0.25$, dimana μ adalah nilai rata-rata dan σ adalah deviasi standard dari KC tersebut.

Arti dari $\mu \pm 3\sigma = 0.25 \pm 0.25$ adalah:

1. Jarak *gap* atau *clearance* nominal adalah 0.25 mm.
2. Maksimal variasi dari jarak *gap* tersebut adalah $3\sigma = 0.25 \Leftrightarrow \sigma = 0.25 / 3 = 0.0833$ (dengan tingkat kepercayaan 99.7 %)

Ada dua tahap untuk mengalokasikan ulang (re-alokasi) nilai-nilai dimensi dan toleransi dari komponen-komponen kompresor tersebut (pada gambar 4). Tahapan-tahapan tersebut adalah:

1. Untuk memenuhi jarak *gap* nominal KC, kita mengganti dimensi nominal dari
 - Sn_Rotor_Outer = 50.125 mm.
 - Sn_Corpo_Hole = 59.525 mm.
2. Untuk memenuhi maksimal variasi dari jarak nominal tersebut, kita harus mengalokasikan ulang nilai-nilai toleransi setiap fitur yang berkontribusi pada rantai variasi (toleransi) dari KC tersebut. Karena kita menggunakan **metode analisis toleransi statistik**, maka:

$$T_x = \sqrt{\sum T_i^2} = \sqrt{T_1 + T_2 + \dots + T_n}$$

$$T_x = \sqrt{n T_i^2} = \sqrt{n} T_i$$

$$T_i = \frac{T_x}{\sqrt{n}}$$

Dimana, n adalah jumlah elemen toleransi yang berkontribusi pada rantai transformasi variasi (lihat sub-bab 8.3.2), yaitu T_p dan T_s . Jumlah total T_p dan T_s pada rantai transformasi variasi, yaitu simbol $DT_{ij} = 4+19=23$. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat 23 elemen sumber variasi dari propagasi variasi dari titik 1 ke titik 2 (KC). Sehingga:

$$T_i = \frac{T_x}{\sqrt{n}} = \frac{0.0833}{\sqrt{23}} = 0.017$$

Dengan menggunakan metode analisis statistik dan mengasumsikan bahwa proses produksi dan perakitan untuk kompresor tersebut terkontrol berada dalam kisaran 3σ dari nilai rata-rata proses tersebut, maka:

$$T_i = \frac{0.017}{3} = 0.0056 \sim 0.005$$

Kode pemrograman MATLAB untuk analisis disain awal dengan re-alokasi nilai-nilai dimensi dan toleransi dapat dilihat pada daftar kode MATLAB **ROTARYCOMPRESSOR_Modified.m** dengan menggunakan nilai variasi dari setiap fitur-fitur yang relevan sebesar 0.005 mm. Hasil dari simulasi ini dapat dilihat pada gambar 7. Pada gambar 7, terlihat jelas bahwa walaupun nilai-nilai dimensi nominal dan toleransinya sudah direalokasikan ulang, nilai KC tersebut masih tidak dapat dipenuhi. Hal ini menandakan bahwa, walaupun proses produksi permesinan dan perakitan komponen-komponen tersebut menjadi sebuah kompresor sempurna (tidak ada kesalahan sama sekali, nilai KC, yaitu jarak *gap* antara titik 1 dan titik 2 harus berada dalam kisaran 0.0 mm - 0.5 mm, tidak akan terpenuhi. **Hal ini menandakan terdapat kesalahan fundamental dari disain awal kompresor tersebut yang hanya bisa terungkap dengan menggunakan analisis rantai variasi (toleransi) ini.** Pada umumnya, kesalahan jenis ini ditemukan pada saat proses *final assembly* kompresor tersebut (atau produk lain secara umum) dan pada umumnya bagian produksi atau bagian perakitan yang disalahkan. Padahal, sumber kesalahannya adalah dari disain itu sendiri!.

Gambar 7: Hasil simulasi dari re-alokasi dimensi dan toleransi untuk disain awal kompresor tersebut.

8.5 Disain II: Re-disain total dari kompresor berputar

Solusi untuk masalah kompresor tersebut adalah dengan mendisain ulang komponen-komponennya dan merealokasikan ulang dimensi dan toleransi dari komponen-komponen tersebut. Dengan mengaplikasikan solusi pada tahap disain, biaya yang dikeluarkan akan jauh lebih rendah dibandingkan apabila solusi diterapkan pada tahap proses produksi atau pada tahap perakitan dari kompresor tersebut. Disain baru kompresor tersebut adalah dengan menggabungkan komponen poros dan rotor (pada gambar 4) menjadi satu komponen yang bernama poros+rotor dan menggabungkan juga komponen *cover* dan *body* (pada gambar 4) menjadi satu komponen yang bernama cover+body. Gambar 8 memperlihatkan penggabungan komponen-komponen tersebut dan gambar 9 memperlihatkan *exploded view* dari keseluruhan disain baru komponen-komponen pembentuk kompressor tersebut. Pada gambar 9, dapat dilihat bahwa disain baru mengurangi kompleksitas produk rakitan kompoessor dan mengurangi jumlah komponen variasi dalam rantai variasi perakitannya.

Gambar 8: Proses disain ulang kompresor tersebut. Beberapa komponen digabungkan menjadi satu kesatuan sehingga mengurangi jumlah komponen dan jumlah rantai variasi.

Gambar 9: Disain baru dari kompresor tersebut dengan jumlah komponen yang lebih sedikit.

Gambar 10: Dimensi dan toleransi komponen-komponen pembentuk KC pada disain baru.

Detil dimensi nominal dan toleransi-toleransi, baik dimensional maupun geometri, dari disain baru komponen-komponen pembentuk kompresor tersebut dapat dilihat pada gambar 10. Pada gambar 10, dapat terlihat bahwa komponen-komponen pembentuk rakitan dari kompresor tersebut menjadi lebih sederhana. Hal ini dapat mengurangi biaya produksi dan mengurangi sumber-sumber variasi yang berkontribusi pada variasi untuk KC tersebut.

8.6 Disain II: Rantai transformasi toleransi baru

Rantai transformasi variasi dari disain baru tersebut diperlihatkan pada gambar 11. Pada gambar 11, panjang dari rantai transformasi variasi dapat dikurangi secara signifikan sehingga total variasi pada KC akan sangat berkurang.

Gambar 11: Rantai transformasi variasi untuk disain baru kompresor tersebut.

8.6.1 Rantai transformasi nominal

Rantai transformasi nominal dari KC pada disain baru, dari titik 1 ke titik 2 melewati semua fitur-fitur yang saling terhubung ketika komponen-komponen pada gambar 10 saling dirakit, adalah sebagai berikut (catatan: semua dimensi dan toleransi harus sudah dalam bentuk *equal-bilateral*):

$$T_{12} = T_{1A} \cdot T_{AB} \cdot T_{BC} \cdot T_{CD} \cdot T_{DE} \cdot T_{E2}$$

- T_{1A} : Transformasi dari titik 1 ke titik A (Gambar 11). $Sn_RotorAlbero$ adalah diameter bagian luar dari komponen poros+rotor (gambar 10).

$$T_{1A} = \begin{bmatrix} I & P_{1A} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad P_{1A} = \begin{bmatrix} Sn_RotorAlbero/2 \\ 0 \\ -15 \end{bmatrix}$$

$$T_{1A} = transmat('xz', [Sn_RotorAlbero/2 \ -15])$$

- T_{AB} : Transformasi dari titik A ke titik B (Gambar 11). P_{AB} adalah jarak shifting dari aksis rotor ke aksis utama dari komponen poros+rotor (gambar 10).

$$T_{AB} = \begin{bmatrix} I & P_{AB} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad P_{AB} = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{1A} = transmat('x', [5])$$

- T_{BC}, T_{CD}, T_{DE} : Titik B, C, D dan E saling berhimpit. Sehingga, pada kondisi nominalnya (sempurna) tidak ada translasi ataupun rotasi pada perpindahan dari titik B ke E (gambar 11).

$$T_{BC} = T_{CD} = T_{DE} = I_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{BC} = T_{CD} = T_{DE} = eye(4)$$

- T_{E2} : Transformasi dari titik E ke titik 2 (Gambar 11). $Sn_CoperchioCorpo$ adalah diameter bagian dalam dari komponen cober+body (gambar 10).

$$T_{E2} = \begin{bmatrix} I & P_{E2} \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}, \quad P_{E2} = \begin{bmatrix} -Sn_CoperchioCorpo_Hole/2 \\ 0 \\ 15 \end{bmatrix}$$

$$T_{E2} = transmat('xz', [-Sn_CoperchioCorpo_Hole/2 \ 15])$$

Hasil kalkulasi dari $T_{12} = T_{1A} \cdot T_{AB} \cdot T_{BC} \cdot T_{CD} \cdot T_{DE} \cdot T_{E2} = 0$ mm (jarak nominal).

Sehingga, pada kondisi sempurna, jarak antara titik 1 dan titik 2 adalah **0 mm** (dengan melihat komponen translasi dari matrix T_{12} setelah proses kalkulasi dilakukan).

8.6.2 Rantai transformasi variasi

Rantai transformasi variasi dari KC, dari titik 1 ke titik 2, adalah sebagai berikut (detil nilai-nilainya dapat dilihat di kode pemrograman MATLAB **NEW_DESIGN_ROTARYCOMPRESSOR.m**):

$$T'_{12} = T_{12'} = DT_{1'1} \cdot T_{1A} \cdot DT_{AA'} \cdot T_{AB} \cdot T_{BC} \cdot DT_{CC'} \cdot T_{CD} \cdot DT_{DD'} \cdot T_{DE} \cdot T_{E2} \cdot DT_{22'}$$

- $DT_{1'1} \rightarrow$ Variasi dimensional dari radius internal pada komponen poros+rotor (lihat gambar 10 dan 11).

$$\phi 50_{-0.1}^0 = Sn \pm Ts = \phi 49.95 \pm 0.05$$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = 0.5 \times Ts \text{ _RotoreAlbero}$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi DT adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, \frac{\delta i}{3})$$

- $DT_{AA'} \rightarrow$ Variasi karena toleransi posisi (Tp) dari aksis eksternal komponen poros+rotor (lihat gambar 10 dan 11).

$$\phi 50_{-0.1}^0 = Sn \pm Ts = \phi 49.95 \pm 0.05$$

$$B: \phi 24_{-0.1}^0 = Sn \pm Ts = \phi 23.95 \pm 0.05 ; \text{ dimana Bonus} = 2Ts$$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = \frac{Tp + 0.5 \text{ Bonus} = Ts + DF \text{ Shift } B}{2} = \frac{0 + 0.05 + 0 + 0.05}{2} = 0.05$$

$$|\delta \theta x|_{\max} = |\delta \theta y|_{\max} = \frac{Tp + 0.5 \text{ Bonus} = Ts + DF \text{ Shift } B}{\text{Rotor_Cylinder_Length}} = \frac{0 + 0.05 + 0 + 0.05}{30} = \frac{0.1}{30}$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi DT adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.05}{3}); \quad \delta \theta x = \delta \theta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{0.1/30}{3})$$

- $DT_{CC'} \rightarrow$ Assembly shift antara poros+rotor dan lubang dari cover+body (lihat gambar 10 dan 11).

$$\text{Pada poros+rotor: } \phi 24_{-0.1}^0 = \phi 23.95 \pm 0.05 ;$$

$$\text{Pada lubang cover+body: } \phi 24_0^{+0.1} = \phi 24.05 \pm 0.05$$

Dimana:

- LMC = *least material condition*
- Hole_CoperchioCorpo = lubang cover+body
- RotoreAlbero = diameter poros+rotor
- CoperchioCorpo_CylinderLength = tinggi dari silinder cover+body

$$\begin{aligned}
|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} &= \frac{Hole_CoperchioCorpo_LMC - RotoreAlbero_LMC}{2} \\
&= \frac{[(Sn_CoperchioCorpo_DatumB) + (Ts_CoperchioCorpo_DatumB)] - [(Sn_RotoreAlbero_DatumB) - (Ts_RotoreAlbero_DatumB)]}{2} \\
|\delta \theta x|_{\max} = |\delta \theta y|_{\max} &= \frac{Hole_CoperchioCorpo_LMC - RotoreAlbero_LMC}{2} \\
&= \frac{[(Sn_CoperchioCorpo_DatumB) + (Ts_CoperchioCorpo_DatumB)] - [(Sn_RotoreAlbero_DatumB) - (Ts_RotoreAlbero_DatumB)]}{CoperchioCorpo_Cylinder_Length}
\end{aligned}$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi *DT* adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{\delta i}{3}); \quad \delta \theta x = \delta \theta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{\delta \theta i}{3})$$

- $DT_{DD'} \rightarrow$ Assembly shift antara lubang clearance cover+body dan baut terhadap base + toleransi posisi (Tp) (lihat gambar 10 dan 11).

$$\phi 60_0^{+0.1} = \phi 60.05 \pm 0.05$$

$$\begin{aligned}
|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} &= \frac{Tp + 0.5 Bonus = Ts + DF Shift B}{2} \\
&+ \frac{CoperchioCorpo_Clearance_Hole_LMC - Fastener_LMC}{2} \\
&= \frac{Tp + Ts + [(Tp)_B + (TS)_B]}{2} \\
&\quad (Sn_CoperchioCorpo_Clearance_Hole - Ts_CoperchioCorpo_Clearance_Hole) \\
&\quad - Fastener \\
&+ \frac{}{2}
\end{aligned}$$

$$|\delta \theta x|_{\max} = |\delta \theta y|_{\max} = \frac{Tp + Ts + [(Tp)_B + (TS)_B]}{30} + \frac{To}{100}$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi *DT* adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{\delta i}{3}); \quad \delta \theta x = \delta \theta y \sim N(0, 0.95 \times \frac{\delta \theta i}{3})$$

- $DT_{22'} \rightarrow$ Variasi dimensional karena toleransi dari radius internal lubang cover+body (lihat gambar 10 dan 11).

$$\phi 60_0^{+0.1} = \phi 60.05 \pm 0.05$$

$$|\delta x|_{\max} = |\delta y|_{\max} = 0.5 \times Ts_Coperchioc\ Corpo_Hole$$

Sehingga, elemen *error* pada matrix transformasi variasi DT adalah:

$$\delta x = \delta y \sim N(0, \frac{\delta i}{3})$$

Hasil dari simulasi rantai transformasi variasi dari disain baru tersebut diperlihatkan pada Gambar 12. Pada gambar 12, hasil variasi tersebut didapatkan dari total jumlah simulasi sebanyak 20000. Kode pemrograman MATLAB analisis ini dapat dilihat pada daftar kode pemrograman MATLAB **NEW_DESIGN_ROTARYCOMPRESSOR.m**.

Dari gambar 12, dapat dilihat bahwa dengan menggunakan nilai-nilai dimensi dan toleransi yang sama dengan disain awal, dengan berkurangnya jumlah komponen pada disain baru ini, total akumulasi (*stack-up*) variasi pada KC berkurang. Namun demikian, nilai KC yang diinginkan belum dapat tercapai. Sehingga, realokasi dimensi dan toleransi harus dilakukan untuk mencapai nilai KC yang diinginkan tersebut.

Gambar 12: Hasil dari simulasi Monte-Carlo dari rantai transformasi variasi untuk disain baru kompresor (sebelum realokasi dimensi dan toleransi).

8.7 Re-alokasi toleransi disain baru (Disain II)

Langkah-langkah yang sama seperti pada disain awal dilakukan untuk re-alokasi dimensi dan toleransi pada disain baru ini. Hal ini dilakukan untuk mencapai nilai KC, jarak *gap* antara titik 1 dan titik 2 (gambar 11), berkisar antara 0.0 mm – 0.5 mm. Seperti pada kasus disain awal sebelumnya, nilai ini dapat dikonversi ke dalam format “equal

bilateral” dengan mengasumsikan distribusi Normal (Gaussian) sebagai berikut: $\mu \pm 3\sigma = 0.25 \pm 0.25$, dimana μ adalah nilai rata-rata dan σ adalah deviasi standard dari KC tersebut. Arti dari $\mu \pm 3\sigma = 0.25 \pm 0.25$ adalah:

1. Jarak *gap* atau *clearance* nominal adalah 0.25 mm.
2. Maksimal variasi dari jarak *gap* tersebut adalah $3\sigma = 0.25 \Leftrightarrow \sigma = 0.25 / 3 = 0.0833$ (dengan tingkat kepercayaan 99.7 %)

Ada dua tahap untuk mengalokasikan ulang (re-alokasi) nilai-nilai dimensi dan toleransi dari komponen-komponen kompresor tersebut (pada gambar 4). Tahapan-tahapan tersebut adalah:

1. Untuk memenuhi jarak *gap* nominal KC, kita mengganti dimensi nominal dari
 - Sn_RotoreAlbero = 50.2 mm.
 - Sn_CoperchioCorpo = 59.7 mm.
2. Untuk memenuhi maksimal variasi dari jarak nominal tersebut, kita harus mengalokasikan ulang nilai-nilai toleransi setiap fitur yang berkontribusi pada rantai variasi (toleransi) dari KC tersebut. Karena kita menggunakan **metode analisis toleransi statistik**, maka:

$$T_x = \sqrt{\sum T_i^2} = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + \dots + T_n^2}$$

$$T_x = \sqrt{n T_i^2} = \sqrt{n} T_i$$

$$T_i = \frac{T_x}{\sqrt{n}}$$

Dimana, n adalah jumlah elemen toleransi yang berkontribusi pada rantai transformasi variasi (lihat sub-bab 8.3.2), yaitu T_p dan T_s . Jumlah total T_p dan T_s pada rantai transformasi variasi, yaitu simbol $DT_{ij} = 2+10=12$.

Hal ini menunjukkan bahwa sumber variasi dari propagasi variasi dari titik 1 ke titik 2 (KC) berkurang dari yang sebelumnya berjumlah 23 menjadi hanya berjumlah 12. Sehingga:

$$T_i = \frac{T_x}{\sqrt{n}} = \frac{0.0833}{\sqrt{12}} = 0.024$$

Dengan menggunakan metode analisis statistik dan mengasumsikan bahwa proses produksi dan perakitan untuk kompresor tersebut terkontrol berada dalam kisaran 3σ dari nilai rata-rata proses tersebut, maka:

$$T_i = \frac{0.024}{3} = 0.008 \sim 0.01$$

Simulasi untuk kalkulasi rantai transformasi variasi disain baru dengan nilai-nilai dimensi dan toleransi yang baru, setelah mengeset semua nilai elemen toleransi = 0.01 mm, variasi nilai KC nya sebesar 0.23 mm dimana lebih kecil batas variasi yang dibolehkan, yaitu 0.25 mm. Maka dari itu, nilai-nilai toleransi pada beberapa komponen dapat direlaksasi (diperbesar sehingga mengurangi biaya produksi dan biaya pengukurannya pada pos inspeksi kualitas). Akhirnya, kisaran nilai KC yang diperbolehkan yaitu berkisar antara 0.0 mm – 0.5 mm didapatkan. Gambar 11 memperlihatkan hasil simulasi kalkulasi akumulasi variasi pada KC untuk disain baru setelah re-alokasi dimensi dan toleransi. Kode pemrograman MATLAB simulasi ini dapat dilihat pada daftar kode **NEW_DESIGN_ROTARYCOMPRESSOR_Modified.m**.

Gambar 13: Nilai KC yang masuk dalam toleransi yang diinginkan didapatkan dengan re-alokasi dimensi dan toleransi pada disain baru kompresor tersebut.

8.8. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan penting yang dapat diambil dari contoh kasus pada bab ini (dan dapat digeneralisir untuk analisis rantai variasi untuk produk-produk rakitan lainnya) adalah:

- Dari dua jenis disain yang diperlihatkan pada kasus ini, yaitu Disain awal (I) dan Disain baru (II), dapat dilihat bahwa semakin panjang rantai transformasi variasi suatu KC, semakin besar akumulasi variasi (*stack-up*) pada KC tersebut setelah komponen-komponen pembentuknya saling dirakit. Hal ini disebabkan karena akumulasi variasi (*tolerance stack-up*) pada prinsipnya merupakan penjumlahan dari komponen-komponen variasi yang berasal dari setiap toleransi fitur-fitur pada rantai transformasinya. Pada disain baru (disain II), jumlah komponen-komponen pembentuk kompresor tersebut lebih sedikit. Sehingga, panjang rantai transformasi variasinya semakin pendek juga. Hasilnya, akumulasi variasi pada KC untuk disain baru lebih kecil dibandingkan pada disain awal (Disain I).
- Berkurangnya jumlah komponen-komponen pembentuk suatu produk rakitan akan mengurangi kompleksitas produk tersebut. Sehingga, biaya proses produksi dan proses perakitan produk tersebut berkurang.
- Pada disain baru (Disain II), nilai-nilai toleransi yang dialokasikan pada fitur-fitur komponennya mempunyai nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai-nilai toleransi fitur-fitur pada disain awal (Disain I). Nilai-nilai toleransi yang lebih besar pada disain baru (Disain II) tersebut menyebabkan biaya produksi dan inspeksi untuk membuat kompresor tersebut menjadi lebih kecil.

Daftar kode pemrograman MATLAB untuk bab 8:**1. transmat.m (Untuk kalkulasi matrix transformasi T)**

```
function T=transmat(which, values)
%Fungsi untuk merkonstruksi matriks transformasi
    %which="xyzabc"
    %values=Vektor berisi nilai-nilai untuk elemen matriks
    T=[1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1]; %Inisialisasi T: Matriks identitas
    for h=1:length(which)
        if which(h)=='x'
            T(1,4)=values(h);
        elseif which(h)=='y'
            T(2,4)=values(h);
        elseif which(h)=='z'
            T(3,4)=values(h);
        elseif which(h)=='a'
            T(2,2)=cos(degtorad(values(h)));
            T(2,3)=-sin(degtorad(values(h)));
            T(3,2)=sin(degtorad(values(h)));
            T(3,3)=cos(degtorad(values(h)));
        elseif which(h)=='b'
            T(1,1)=cos(degtorad(values(h)));
            T(1,3)=sin(degtorad(values(h)));
            T(3,1)=-sin(degtorad(values(h)));
            T(3,3)=cos(degtorad(values(h)));
        elseif which(h)=='c'
            T(1,1)=cos(degtorad(values(h)));
            T(1,2)=-sin(degtorad(values(h)));
            T(2,1)=sin(degtorad(values(h)));
            T(2,2)=cos(degtorad(values(h)));
        end
    end
end
```

2. Dtransmat.m (Untuk kalkulasi matriks variasi)

```
function DT=Dtransmat(dTx,dTy,dTz, dx,dy,dz)
%Fungsi untuk merekonstruksi matriks variasi
    % Elemen input berupa vektor dengan 2-elemen, e.g.: dx=[mu,sigma]
    Dx=normrnd(dx(1),dx(2));
    Dy=normrnd(dy(1),dy(2));
    Dz=normrnd(dz(1),dz(2));
    DTx=normrnd(dTx(1),dTx(2));
    DTy=normrnd(dTy(1),dTy(2));
    DTz=normrnd(dTz(1),dTz(2));
    DT=[1 -Dz Dy DTx; Dz 1 -Dx DTy; -Dy Dx 1 DTz; 0 0 0 1];
end
```

3. ROTARYCOMPRESSOR.m (Disain awal)

```
clear all;
close all;
```

```

clc;

%Analisis toleransi dan re-alokasi toleransi untuk kompresor berputar
menggunakan system matriks untuk merepresentasikan variasi geometri
%CATATAN:
%transmat(): Fungsi transformasi Tx
%Dtransmat(): Fungsi transformasi variasi DTx

%Dimensi nominal setiap komponen
%=====
Sn_Rotor_Outer=49.95;
Ts_Rotor_Outer=0.05;
Tp_Rotor_Outer=0;
Sn_Rotor_Hole=40.05;
Tp_Rotor_Hole=0;
Ts_Rotor_Hole=0.05;
Rotor_Length=30;
Sn_Shaft_Rot=39.95;
Tp_Shaft_Rot=0;
Ts_Shaft_Rot=0.05;
Tp_Shaft_DatumB=0;
Ts_Shaft_DatumB=0.05;
Tp_Shaft_DatumA=0;
Ts_Shaft_DatumA=0.05;
Sn_Shaft_DatumB=23.95;
Shaft_DatumB_LMC=Sn_Shaft_DatumB-Ts_Shaft_DatumB;
Shaft_Rot_Length=24;
Sn_Coperchio_Hole=24.05;
Ts_Coperchio_Hole=0.05;
Coperchio_Hole_LMC=Sn_Coperchio_Hole+Ts_Coperchio_Hole;
Tp_Coperchio_Hole=0;
Sn_Coperchio_Outer=100;
Ts=0.2;
Sn_Clearance_Hole_Coperchio=8.4;
Ts_Clearance_Hole_Coperchio=0.1;
Tp_Clearance_Hole_Coperchio=0.1;
Clearance_Hole_Coperchio_LMC=Sn_Clearance_Hole_Coperchio+Ts_Clearance_Hole_Co
perchio;
fastener_LMC=8;
Coperchio_Cylinder_Length=30;
Sn_Corpo_Hole=60.05;
Tp_Clearance_Hole_Corpo=0.1;
Ts_Clearance_Hole_Corpo=0.1;
Tp_Corpo_Hole=0;
Ts_Corpo_Hole=0.05;
Sn_Clearance_Hole_Corpo=8.4;
Clearance_Hole_Corpo_LMC=Sn_Clearance_Hole_Corpo+Ts_Clearance_Hole_Corpo;
Corpo_Cylinder_Length=30;
T0=0.2;
Sn_Corpo_Outer=100;

```

```

p1aX=Sn_Rotor_Outer/2;
p1aZ=-15;
pbcX=-(Sn_Rotor_Hole-Sn_Shaft_Rot)/2;
pcdX=5;
ph2X=-Sn_Corpo_Hole/2;
ph2Z=15;

%Rantai toleransi NOMINAL
%=====
T1a=transmat('xz',[p1aX p1aZ]);
Tab=eye(4);
Tbc=transmat('x',[pbcX]);
Tcd=transmat('x',[pcdX]);
Tde=eye(4);
Tef=eye(4);
Tfg=eye(4);
Tgh=eye(4);
Th2=transmat('xz',[ph2X ph2Z]);

T12=T1a*Tab*Tbc*Tcd*Tde*Tef*Tfg*Tgh*Th2

%Rantai toleransi VARIASI
%=====
d11Xmax=0.5*Ts_Rotor_Outer;
daaXmax=(Tp_Rotor_Outer+Ts_Rotor_Outer+Tp_Rotor_Hole+Ts_Rotor_Hole)/2;
daaYmax=daaXmax;
daaYmax=daaXmax;
daaThXmax=(Tp_Rotor_Outer+Ts_Rotor_Outer+Tp_Rotor_Hole+Ts_Rotor_Hole)/Rotor_L
ength;
daaThYmax=daaThXmax;
dccXmax=(Tp_Shaft_Rot+Ts_Shaft_Rot+Tp_Shaft_DatumB+Ts_Shaft_DatumB+Tp_Shaft_D
atumA+Ts_Shaft_DatumA)/2;
dccYmax=dccXmax;
dccThXmax=(Tp_Shaft_Rot+Ts_Shaft_Rot+Tp_Shaft_DatumB+Ts_Shaft_DatumB+Tp_Shaft
_DatumA+Ts_Shaft_DatumA)/Shaft_Rot_Length;
dccThYmax=dccThXmax;
deeXmax=(Coperchio_Hole_LMC-Shaft_DatumB_LMC)/2;
deeYmax=deeXmax;
deeThXmax=(Coperchio_Hole_LMC-Shaft_DatumB_LMC)/Coperchio_Cylinder_Length;
deeThYmax=deeThXmax;
dffXmax=(Clearance_Hole_Coperchio_LMC-
fastener_LMC)/2+(Tp_Clearance_Hole_Coperchio+Tp_Coperchio_Hole+Ts_Coperchio_H
ole)/2;
dffYmax=dffXmax;
dffThXmax=Ts/Sn_Coperchio_Outer;
dffThYmax=dffThXmax;
dggXmax=(Tp_Clearance_Hole_Corpo+Ts_Clearance_Hole_Corpo+Tp_Corpo_Hole+Ts_Cor
po_Hole)/2+(Clearance_Hole_Corpo_LMC-fastener_LMC)/2;
dggYmax=dggXmax;
dggThXmax=(Tp_Clearance_Hole_Corpo+Ts_Clearance_Hole_Corpo+Tp_Corpo_Hole+Ts_C
orpo_Hole)/Corpo_Cylinder_Length+T0/Sn_Corpo_Outer;

```



```

dggThYmax=dggThXmax;
d22Xmax=Ts_Corpo_Hole/2;
d22Ymax=d22Xmax;

ns= 20000; %Jumlah simulasi (sampling)
for i=1:ns
    DT11=Dtransmat([0 d11Xmax/3],[0 daaYmax/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]);
    DTaa=Dtransmat([0 0.95*daaXmax/3],[0 0.95*daaYmax/3],[0 0],[0
0.95*daaThXmax/3],[0 0.95*daaThYmax/3],[0 0]);
    DTcc=Dtransmat([0 0.95*dccXmax/3],[0 0.95*dccYmax/3],[0 0],[0
0.95*dccThXmax/3],[0 0.95*dccThYmax/3],[0 0]);
    DTee=Dtransmat([0 0.95*deeXmax/3],[0 0.95*deeYmax/3],[0 0],[0
0.95*deeThXmax/3],[0 0.95*deeThYmax/3],[0 0]);
    DT22=Dtransmat([0 d22Xmax/3],[0 d22Ymax/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]);
    DTff=Dtransmat([0 0.95*dffXmax/3],[0 0.95*dffYmax/3],[0 0],[0
0.95*dffThXmax/3],[0 0.95*dffThYmax/3],[0 0]);
    DTgg=Dtransmat([0 0.95*dggXmax/3],[0 0.95*dggYmax/3],[0 0],[0
0.95*dggThXmax/3],[0 0.95*dggThYmax/3],[0 0]);

T12Prime=DT11*T1a*DTaa*Tab*Tbc*DTcc*Tcd*Tde*DTee*Tef*DTff*Tfg*DTgg*Tgh*Th2*DT
22;
    kc1(i)=T12Prime(1,4); %Jarak clearance X
    kc2(i)=asin(T12Prime(1,3))*180/pi; %derajat rotasi terhadap aksis-Z
end

%PLOTING hasil kalkulasi
%=====
[muhat,sigmahat]=normfit(kc1);
kmin=muhat-3*sigmahat;
kmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf(' (%.2f,%.2f) ',kmin,kmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(2,1,1);
histfit(kc1,20)
text(kmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('clearance [mm]');

[muhat,sigmahat]=normfit(kc2);
kmin=muhat-3*sigmahat;
kmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf(' (%.2f,%.2f) ',kmin,kmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(2,1,2);
histfit(kc2,20)
text(kmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('Rotation angle [degree]');

```

4. ROTARYCOMPRESSOR_Modified.m (Disain awal dengan re-alokasi nilai toleransi)

```

clear all;
close all;
clc;

%Analisis toleransi dan re-alokasi toleransi untuk kompresor berputar
menggunakan system matriks untuk merepresentasikan variasi geometri
%CATATAN:
%transmat(): Fungsi transformasi Tx
%Dtransmat(): Fungsi transformasi variasi DTx

%Dimensi komponen
%=====
Sn_Rotor_Outer=50.125;%49.95;
Ts_Rotor_Outer=0.005 %0.05;
Tp_Rotor_Outer=0;
Sn_Rotor_Hole=40.05 %40.05;
Tp_Rotor_Hole=0;
Ts_Rotor_Hole=0.005 %0.05;
Rotor_Length=30;
Sn_Shaft_Rot=39.95 %39.95;
Tp_Shaft_Rot=0;
Ts_Shaft_Rot=0.005 %0.05;
Tp_Shaft_DatumB=0;
Ts_Shaft_DatumB=0.005 %0.05;
Tp_Shaft_DatumA=0;
Ts_Shaft_DatumA=0.005 %0.05;
Sn_Shaft_DatumB=23.95;
Shaft_DatumB_LMC=Sn_Shaft_DatumB-Ts_Shaft_DatumB;
Shaft_Rot_Length=24;
Sn_Coperchio_Hole=23.945 %24.05;
Ts_Coperchio_Hole=0.005 %0.05;
Coperchio_Hole_LMC=Sn_Coperchio_Hole+Ts_Coperchio_Hole;
Tp_Coperchio_Hole=0;
Sn_Coperchio_Outer=100;
Ts=0.2;
Sn_Clearance_Hole_Coperchio=8.4;
Ts_Clearance_Hole_Coperchio=0.005 %0.1;
Tp_Clearance_Hole_Coperchio=0.005 %0.1;
Clearance_Hole_Coperchio_LMC=Sn_Clearance_Hole_Coperchio+Ts_Clearance_Hole_Co
perchio;
fastener_LMC=8;
Coperchio_Cylinder_Length=30;
Sn_Corpo_Hole=59.525;%60.05;
Tp_Clearance_Hole_Corpo=0.005 %0.1;
Ts_Clearance_Hole_Corpo=0.005 %0.1;
Tp_Corpo_Hole=0;
Ts_Corpo_Hole=0.005 %0.05;
Sn_Clearance_Hole_Corpo=8.4;
Clearance_Hole_Corpo_LMC=Sn_Clearance_Hole_Corpo+Ts_Clearance_Hole_Corpo;

```

```

Corpo_Cylinder_Length=30;
T0=0.2;
Sn_Corpo_Outer=100;

plaX=Sn_Rotor_Outer/2;
plaZ=-15;
pbcX=-(Sn_Rotor_Hole-Sn_Shift_Rot)/2;
pcdX=5;
ph2X=-Sn_Corpo_Hole/2;
ph2Z=15;

%Rantai toleransi NOMINAL
%=====
T1a=transmat('xz',[plaX plaZ]);
Tab=eye(4);
Tbc=transmat('x',[pbcX]);
Tcd=transmat('x',[pcdX]);
Tde=eye(4);
Tef=eye(4);
Tfg=eye(4);
Tgh=eye(4);
Th2=transmat('xz',[ph2X ph2Z]);

T12=T1a*Tab*Tbc*Tcd*Tde*Tef*Tfg*Tgh*Th2

%Rantai toleransi VARIASI
%=====
d11Xmax=0.5*Ts_Rotor_Outer;
d11Ymax=d11Xmax;
daaXmax=(Tp_Rotor_Outer+Ts_Rotor_Outer+Tp_Rotor_Hole+Ts_Rotor_Hole)/2;
daaYmax=daaXmax;
daaYmax=daaXmax;
daaThXmax=(Tp_Rotor_Outer+Ts_Rotor_Outer+Tp_Rotor_Hole+Ts_Rotor_Hole)/Rotor_L
length;
daaThYmax=daaThXmax;
dccXmax=(Tp_Shift_Rot+Ts_Shift_Rot+Tp_Shift_DatumB+Ts_Shift_DatumB+Tp_Shift_D
atumA+Ts_Shift_DatumA)/2;
dccYmax=dccXmax;
dccThXmax=(Tp_Shift_Rot+Ts_Shift_Rot+Tp_Shift_DatumB+Ts_Shift_DatumB+Tp_Shift
_DatumA+Ts_Shift_DatumA)/Shift_Rot_Length;
dccThYmax=dccThXmax;
deeXmax=(Coperchio_Hole_LMC-Shift_DatumB_LMC)/2;
deeYmax=deeXmax;
deeThXmax=(Coperchio_Hole_LMC-Shift_DatumB_LMC)/Coperchio_Cylinder_Length;
deeThYmax=deeThXmax;
dffXmax=(Clearance_Hole_Coperchio_LMC-
fastener_LMC)/2+(Tp_Clearance_Hole_Coperchio+Tp_Coperchio_Hole+Ts_Coperchio_H
ole)/2;
dffYmax=dffXmax;
dffThXmax=Ts/Sn_Coperchio_Outer;
dffThYmax=dffThXmax;

```

```

dggXmax=(Tp_Clearance_Hole_Corpo+Ts_Clearance_Hole_Corpo+Tp_Corpo_Hole+Ts_Corpo_Hole)/2+(Clearance_Hole_Corpo_LMC-fastener_LMC)/2;
dggYmax=dggXmax;
dggThXmax=(Tp_Clearance_Hole_Corpo+Ts_Clearance_Hole_Corpo+Tp_Corpo_Hole+Ts_Corpo_Hole)/Corpo_Cylinder_Length+T0/Sn_Corpo_Outer;
dggThYmax=dggThXmax;
d22Xmax=Ts_Corpo_Hole/2;
d22Ymax=d22Xmax;

ns= 20000; %Jumlah simulasi (sampling)
for i=1:ns
    DT11=Dtransmat([0 d11Xmax/3],[0 d11Ymax/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]);
    DTaa=Dtransmat([0 0.95*daaXmax/3],[0 0.95*daaYmax/3],[0 0],[0 0.95*daaThXmax/3],[0 0.95*daaThYmax/3],[0 0]);
    DTcc=Dtransmat([0 0.95*dccXmax/3],[0 0.95*dccYmax/3],[0 0],[0 0.95*dccThXmax/3],[0 0.95*dccThYmax/3],[0 0]);
    DTee=Dtransmat([0 0.95*deeXmax/3],[0 0.95*deeYmax/3],[0 0],[0 0.95*deeThXmax/3],[0 0.95*deeThYmax/3],[0 0]);
    DTff=Dtransmat([0 0.95*dffXmax/3],[0 0.95*dffYmax/3],[0 0],[0 0.95*dffThXmax/3],[0 0.95*dffThYmax/3],[0 0]);
    DTgg=Dtransmat([0 0.95*dggXmax/3],[0 0.95*dggYmax/3],[0 0],[0 0.95*dggThXmax/3],[0 0.95*dggThYmax/3],[0 0]);
    DT22=Dtransmat([0 d22Xmax/3],[0 d22Ymax/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]);

    T12Prime=DT11*T1a*DTaa*Tab*Tbc*DTcc*Tcd*Tde*DTee*Tef*DTff*Tfg*DTgg*Tgh*Th2*DT22;
    kc1(i)=T12Prime(1,4); %Jarak clearance X
    kc2(i)=asin(T12Prime(1,3))*180/pi; %Sudut rotasi terhadap aksis Z
end

%PLOTTING hasil kalkulasi
%=====
[muhat,sigmahat]=normfit(kc1);
kcmin=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf(' (%.2f,%.2f) ',kcmin,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(2,1,1);
histfit(kc1,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('clearance [mm]');

[muhat,sigmahat]=normfit(kc2);
kcmin=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf(' (%.2f,%.2f) ',kcmin,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

```

```
subplot(2,1,2);
histfit(kc2,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('Rotation angle [degree]');
```

5. NEW_DESIGN_ROTARYCOMPRESSOR.m (Disain baru)

```
clear all;
close all;
clc;

%Analisis toleransi dan re-alokasi toleransi untuk kompresor berputar
menggunakan system matriks untuk merepresentasikan variasi geometri
%CATATAN:
%transmat(): Fungsi transformasi Tx
%Dtransmat(): Fungsi transformasi variasi DTx

%Dimensi komponen
%=====

Sn_RotoreAlbero=49.95;
Ts_RotoreAlbero=0.05;
Tp_RotoreAlbero=0;
Tp_RotoreAlbero_DatumB=0;
Ts_RotoreAlbero_DatumB=0.05;
Sn_CoperchioCorpo_Hole=60.05;
Ts_CoperchioCorpo_Hole=0.05;
Rotore_Length=30;
Sn_CoperchioCorpo_DatumB=24.05;
Ts_CoperchioCorpo_DatumB=0.05;
CoperchioCorpo_DatumB_LMC=Sn_CoperchioCorpo_DatumB+Ts_CoperchioCorpo_DatumB;
Sn_AlberoRotore_DatumB=23.95;
Ts_AlberoRotore_DatumB=0.05;
RotoreAlbero_DatumB_LMC=Sn_AlberoRotore_DatumB-Ts_AlberoRotore_DatumB;
CoperchioCorpo_Cylinder_Length=24;
Sn_CoperchioCorpo_Clearance_Hole=8.4;
Tp_CoperchioCorpo_Clearance_Hole=0.1;
Ts_CoperchioCorpo_Clearance_Hole=0.05;
Tp_CoperchioCorpo_DatumB=0;
CoperchioCorpo_Clearance_Hole_LMC=Sn_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+Ts_CoperchioCorpo_Clearance_Hole;
fastener_LMC=8;
Corpo_Cylinder_Length=30;
To=0.2;

plaX=Sn_RotoreAlbero/2;
plaZ=-15;
pabX=5;
pe2X=-Sn_CoperchioCorpo_Hole/2;
pe2Z=15;

%Rantai toleransi NOMINAL
```

```

%=====
T1a=transmat('xz',[plaX plaZ]);
Tab=transmat('x',[pabX]);
Tbc=eye(4);
Tcd=eye(4);
Tde=eye(4);
Te2=transmat('xz',[pe2X pe2Z]);

T12=T1a*Tab*Tbc*Tcd*Tde*Te2

%Rantai toleransi VARIASI
%=====
d11Xmax= 0.5*Ts_RotoreAlbero;
d11Ymax=d11Xmax;
daaXmax=(Tp_RotoreAlbero+Ts_RotoreAlbero+Tp_RotoreAlbero_DatumB+Ts_RotoreAlbe
ro_DatumB)/2;
daaYmax=daaXmax;
daaThXmax=(Tp_RotoreAlbero+Ts_RotoreAlbero+Tp_RotoreAlbero_DatumB+Ts_RotoreAl
bero_DatumB)/Rotore_Length;
daaThYmax=daaThXmax;
dccXmax=(CoperchioCorpo_DatumB_LMC-RotoreAlbero_DatumB_LMC)/2;
dccYmax=dccXmax;
dccThXmax=(CoperchioCorpo_DatumB_LMC-
RotoreAlbero_DatumB_LMC)/CoperchioCorpo_Cylinder_Length;
dccThYmax=dccThXmax;
dddXmax=(Tp_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+Ts_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+Tp
_CoperchioCorpo_DatumB+Ts_CoperchioCorpo_DatumB)/2+(CoperchioCorpo_Clearance
Hole_LMC-fastener_LMC)/2;
dddYmax=dddXmax;
dddThXmax=(Tp_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+Ts_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+
Tp_CoperchioCorpo_DatumB+Ts_CoperchioCorpo_DatumB)/Corpo_Cylinder_Length+To/1
00;
dddThYmax=dddThXmax;
d22Xmax=0.5*Ts_CoperchioCorpo_Hole;
d22Ymax=d22Xmax;

ns= 20000; %Jumlah simulasi (sampling)
for i=1:ns
    DT11=Dtransmat([0 d11Xmax/3],[0 d11Ymax/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]);
    DTaa=Dtransmat([0 0.95*daaXmax/3],[0 0.95*daaYmax/3],[0 0],[0 0.95*daaThXmax/3],[0 0.95*daaThYmax/3],[0 0]);
    DTcc=Dtransmat([0 0.95*dccXmax/3],[0 0.95*dccYmax/3],[0 0],[0 0.95*dccThXmax/3],[0 0.95*dccThYmax/3],[0 0]);
    DTdd=Dtransmat([0 0.95*dddXmax/3],[0 0.95*dddYmax/3],[0 0],[0 0.95*dddThXmax/3],[0 0.95*dddThYmax/3],[0 0]);
    DT22=Dtransmat([0 d22Xmax/3],[0 d22Ymax/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]);
    T12Prime=DT11*T1a*DTaa*Tab*Tbc*DTcc*Tcd*DTdd*Tde*Te2*DT22;
    kc1(i)=T12Prime(1,4); %X-distance clearance
    kc2(i)=asin(T12Prime(1,3))*180/pi; %Rotation Angle from Z-axis
end

```

```
%PLOTING hasil kalkulasi
%=====
[muhat,sigmahat]=normfit(kc1);
kcmín=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf(' (%.2f,%.2f) ',kcmín,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(2,1,1);
histfit(kc1,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('clearance [mm]');

[muhat,sigmahat]=normfit(kc2);
kcmín=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf(' (%.2f,%.2f) ',kcmín,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(2,1,2);
histfit(kc2,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('Rotation angle [degree]');
```

6. NEW_DESIGN_ROTARYCOMPRESSOR_Modified.m (Disain baru dengan re-alokasi toleransi)

```
clear all;
close all;
clc;

%Analisis toleransi dan re-alokasi toleransi untuk kompresor berputar
menggunakan system matriks untuk merepresentasikan variasi geometri
%CATATAN:
%transmat(): Fungsi transformasi Tx
%Dtransmat(): Fungsi transformasi variasi DTx

%Dimensi komponen
%=====

Sn_RotoreAlbero=50.2%49.95;
Ts_RotoreAlbero=0.01%0.05;
Tp_RotoreAlbero=0;
Tp_RotoreAlbero_DatumB=0;
Ts_RotoreAlbero_DatumB=0.025 %0.05;
Sn_CoperchioCorpo_Hole=59.7%60.05;
Ts_CoperchioCorpo_Hole=0.01 %0.05;
Rotore_Length=30;
```

```

Sn_CoperchioCorpo_DatumB=24.05;
Ts_CoperchioCorpo_DatumB=0.025 %0.05;
CoperchioCorpo_DatumB_LMC=Sn_CoperchioCorpo_DatumB+Ts_CoperchioCorpo_DatumB;
Sn_AlberoRotore_DatumB=23.95;
Ts_AlberoRotore_DatumB=0.025 %0.05;
RotoreAlbero_DatumB_LMC=Sn_AlberoRotore_DatumB-Ts_AlberoRotore_DatumB;
CoperchioCorpo_Cylinder_Length=24;
Sn_CoperchioCorpo_Clearance_Hole=8.4;
Tp_CoperchioCorpo_Clearance_Hole=0.01%0.1;
Ts_CoperchioCorpo_Clearance_Hole=0.01%0.05;
Tp_CoperchioCorpo_DatumB=0;
CoperchioCorpo_Clearance_Hole_LMC=Sn_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+Ts_CoperchioCorpo_Clearance_Hole;
fastener_LMC=8;
Corpo_Cylinder_Length=30;
To=0.2;

plaX=Sn_RotoreAlbero/2;
plaZ=-15;
pabX=5;
pe2X=-Sn_CoperchioCorpo_Hole/2;
pe2Z=15;

%Rantai toleransi NOMINAL
%=====
T1a=transmat('xz',[plaX plaZ]);
Tab=transmat('x',[pabX]);
Tbc=eye(4);
Tcd=eye(4);
Tde=eye(4);
Te2=transmat('xz',[pe2X pe2Z]);

T12=T1a*Tab*Tbc*Tcd*Tde*Te2

%Rantai toleransi VARIASI
%=====
d11Xmax= 0.5*Ts_RotoreAlbero;
d11Ymax=d11Xmax;
daaXmax=(Tp_RotoreAlbero+Ts_RotoreAlbero+Tp_RotoreAlbero_DatumB+Ts_RotoreAlbero_DatumB)/2;
daaYmax=daaXmax;
daaThXmax=(Tp_RotoreAlbero+Ts_RotoreAlbero+Tp_RotoreAlbero_DatumB+Ts_RotoreAlbero_DatumB)/Rotore_Length;
daaThYmax=daaThXmax;
dccXmax=(CoperchioCorpo_DatumB_LMC-RotoreAlbero_DatumB_LMC)/2;
dccYmax=dccXmax;
dccThXmax=(CoperchioCorpo_DatumB_LMC-RotoreAlbero_DatumB_LMC)/CoperchioCorpo_Cylinder_Length;
dccThYmax=dccThXmax;
dddXmax=(Tp_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+Ts_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+Tp_CoperchioCorpo_DatumB+Ts_CoperchioCorpo_DatumB)/2+(CoperchioCorpo_Clearance_

```



```

Hole_LMC-fastener_LMC)/2;
dddYmax=dddXmax;
dddThXmax=(Tp_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+Ts_CoperchioCorpo_Clearance_Hole+
Tp_CoperchioCorpo_DatumB+Ts_CoperchioCorpo_DatumB)/Corpo_Cylinder_Length+To/1
00;
dddThYmax=dddThXmax;
d22Xmax=0.5*Ts_CoperchioCorpo_Hole;
d22Ymax=d22Xmax;

ns= 20000; %Jumlah simulasi (sampling)
for i=1:ns
    DT11=Dtransmat([0 d11Xmax/3],[0 d11Ymax/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]);
    DTaa=Dtransmat([0 0.95*daaXmax/3],[0 0.95*daaYmax/3],[0 0],[0 0.95*daaThXmax/3],[0 0.95*daaThYmax/3],[0 0]);
    DTcc=Dtransmat([0 0.95*dccXmax/3],[0 0.95*dccYmax/3],[0 0],[0 0.95*dccThXmax/3],[0 0.95*dccThYmax/3],[0 0]);
    DTdd=Dtransmat([0 0.95*dddXmax/3],[0 0.95*dddYmax/3],[0 0],[0 0.95*dddThXmax/3],[0 0.95*dddThYmax/3],[0 0]);
    DT22=Dtransmat([0 d22Xmax/3],[0 d22Ymax/3],[0 0],[0 0],[0 0],[0 0]);
    T12Prime=DT11*T1a*DTaa*Tab*Tbc*DTcc*Tcd*DTdd*Tde*Te2*DT22;
    kc1(i)=T12Prime(1,4); %X-distance clearance
    kc2(i)=asin(T12Prime(1,3))*180/pi; %Rotation Angle from Z-axis
end

%PLOTING hasil kalkulasi
%=====
[muhat,sigmahat]=normfit(kc1);
kcmin=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf(' (%.2f,%.2f) ',kcmin,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(2,1,1);
histfit(kc1,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('clearance [mm]');

[muhat,sigmahat]=normfit(kc2);
kcmin=muhat-3*sigmahat;
kcmax=muhat+3*sigmahat;
text1=sprintf('%.2f +- %.2f\n',muhat,3*sigmahat);
text2=sprintf(' (%.2f,%.2f) ',kcmin,kcmax);
textTotal=sprintf('%s%s',text1,text2);

subplot(2,1,2);
histfit(kc2,20)
text(kcmax,ns/15,textTotal,'HorizontalAlignment','center')
xlabel('Rotation angle [degree]');

```

BAB 9

Keuntungan ekonomi Toleransi Dimensi dan Geometri (GD&T)

Bab ini menjelaskan mengenai keuntungan-keuntungan dari penggunaan dan penerapan analisis rantai variasi toleransi dimensi dan geometri (GD&T), termasuk keuntungan dalam aspek-aspek ekonomi. Keuntungan dari penerapan atau aplikasi analisis rantai variasi (toleransi) suatu produk rakitan dapat dikuantifikasi secara langsung dan tidak langsung. Selain itu, bab ini memberikan gambaran hal-hal apa saja yang harus diperhatikan untuk mendisain sebuah sistem perakitan agar sistem tersebut dapat merakit suatu produk secara efektif dan efisien, yang kemudian akan mempunyai dampak ekonomi secara langsung. Diharapkan, bab ini dapat memberikan gambaran riil terutama untuk kalangan industri tentang pentingnya analisis rantai variasi dan proses perakitan dalam suatu siklus disain dan produksi suatu produk.

9.1 Keuntungan apabila model rantai transformasi variasi (*tolerance stack-up*) diketahui

Secara umum, sangat banyak keuntungan yang didapatkan apabila model dari rantai transformasi, baik nominal maupun variasi, suatu produk rakitan dapat dikonstruksi dan dianalisis. Keuntungan-keuntungan apabila kita merekonstruksi rantai transformasi variasi dari model atau disain sebuah produk rakitan adalah:

- Analisis rantai variasi (toleransi) dapat dilakukan.
Analisis ini merupakan inti dari seluruh buku ini. Seperti yang sudah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya, untuk mengkalkulasi hasil akhir dan variasi dari sebuah karakteristik kunci (KC), model dari rantai transformasi (baik nominal maupun variasi) harus dikonstruksi terlebih dahulu. Setelah analisis rantai variasi tersebut dilakukan, sumber-sumber masalah pada suatu produk rakitan dapat terdeteksi pada tahap disain produk tersebut. Solusi untuk masalah-masalah tersebut dapat berupa disain ulang suatu produk rakitan sehingga menggunakan komponen-komponen dengan jumlah yang lebih sedikit, re-alokasi nilai-nilai toleransi komponen-komponen pembentuk suatu produk rakitan atau melakukan keduanya, yaitu disain ulang dan re-alokasi (dan re-analisis) rantai variasi dari produk rakitan tersebut.
- Analisis efek lingkungan (temperatur, tekanan, dan lain-lain) terhadap keakuratan proses perakitan dapat dilakukan.

Informasi mengenai properti dari komponen-komponen pembentuk suatu produk dapat dimasukkan ke dalam model rantai variasi (toleransi) suatu produk untuk juga mengikutsertakan efek lingkungan terhadap perakitan produk tersebut. Efek-efek lingkungan tersebut adalah seperti: efek dari suhu ruangan tempat suatu proses perakitan berlangsung (yang akan sangat berpengaruh untuk suatu proses perakitan dengan tingkat presisi tinggi, misalnya perakitan jam tangan atau perakitan komponen sebuah pesawat terbang). Contoh lainnya adalah informasi mengenai, misalnya, deformasi suatu komponen yang disebabkan oleh temperatur atau beban yang ditanggung komponen tersebut. Dengan melakukan pemodelan ini, maka kondisi perakitan untuk suatu komponen yang sangat sensitif, misalnya perakitan mesin jet pesawat, badan pesawat, jam tangan, dan *gearbox* sebuah mobil, akan diketahui, misalnya: pada temperatur berapa perakitan mesin jet tersebut akan optimal. Temperatur lingkungan untuk suatu proses perakitan produk sangat penting terutama untuk produk-produk berskala mikro.

- Analisis kemampuan atau kapabilitas suatu proses manufaktur atau perakitan. Sumber-sumber variasi dari produk yang dirakit dapat dikorelasikan dengan kemampuan suatu proses manufaktur yang dimiliki. Dengan demikian, kita dapat mengalokasikan toleransi sesuai dengan mesin manufaktur yang kita miliki. Misalnya, kita dapat mengalokasikan toleransi yang lebih besar untuk suatu proses yang memiliki tingkat presisi yang tidak tinggi dan mengurangi nilai toleransi suatu fitur lain dalam suatu produk yang sama untuk diproses dengan suatu mesin manufaktur yang lebih presisi (sedemikian rupa sehingga total akumulasi variasi suatu KC dapat dipenuhi).
- Analisis jenis alat ukur yang paling tepat untuk digunakan. Apabila variasi suatu perakitan dapat diprediksi, hal ini berguna untuk memilih jenis instrumen pengukuran apa yang paling sesuai untuk mengukur karakteristik kunci (KC) suatu produk dan komponen-komponen pembentuk produk tersebut, misalnya: mesin pengukur koordinat (CMM) apa yang paling tepat untuk menginspeksi atau mengukur suatu produk yang telah dirakit.
- *Error budgetting*. *Error budgetting* pada suatu disain produk dapat dilakukan pada tahap disain sebelum proses-proses manufaktur dilakukan. Karena, pada esensinya, model akumulasi rantai variasi (toleransi) adalah suatu proses *error budgetting*. Dengan adanya *error budgetting* ini, kesalahan-kesalahan fundamental suatu disain dapat diketahui sejak dini dari tahap disain (seperti yang sudah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya mengenai contoh aplikasi analisis rantai variasi).

Untuk analisis efek lingkungan (temperatur, tekanan, dan lain-lain) terhadap keakuratan proses perakitan, akan dibahas secara detil sebagai berikut. Efek lingkungan, seperti variasi temperatur, tekanan, gravitasi dan kelembapan pada ruangan tempat suatu perakitan dilakukan dapat mempunyai pengaruh yang signifikan. Misalnya dalam perakitan sebuah produk yang membutuhkan tingkat presisi dalam skala mikron atau sub-mikron, efek temperatur sangat berpengaruh. Hal ini disebabkan karena semua material akan membesar apabila perakitan dilakukan pada ruangan dengan suhu di atas 20 °C (nilai pembesarnya tergantung dari koefisien ekspansi termal (CTE) suatu material). Misalnya nilai toleransi suatu KC sebesar 1 μm . Apabila salah satu komponennya terbuat dari alumunium dengan CTE sebesar 22.3 $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$, maka apabila panjang komponen tersebut sebesar 10 mm dan proses perakitannya dilakukan pada suhu ruangan 25 °C, maka pertambahan panjang komponen tersebut sebesar 1.12 μm . Nilai variasi karena temperatur tersebut sudah melebihi nilai toleransi KC-nya, padahal, variasi dari geometri komponen tersebut belum diperhitungkan!. Contoh lainnya adalah pada perakitan sayap pesawat terbang, efek dari massa sayap tersebut karena adanya gaya gravitasi akan mengakibatkan lendutan sayap tersebut sangat signifikan (yang pada umumnya diatasi dengan disain *fixture* yang sesuai).

Gambar 1: Ilustrasi bagaimana lingkungan mempunyai efek yang signifikan terhadap suatu proses perakitan.

Dalam siklus analisis rantai variasi (toleransi), efek lingkungan tersebut dapat diperhitungkan ketika rantai transformasi variasi dari sebuah produk rakitan dibangun. Gambar 1 memperlihatkan fase dimana efek lingkungan

dapat diperhitungkan untuk dianalisis ketika analisis rantai variasi (toleransi) dilakukan. Pada gambar 1, karena adanya efek lingkungan, variasi dari KC akan bertambah tergantung dari keadaan tempat suatu proses perakitan berlangsung.

Gambar 2: Ilustrasi sebuah *operating window* yang dibolehkan sedemikian rupa sehingga variasi komponen-komponen karena efek dari variasi kondisi lingkungan masih mempengaruhi KC dan sebaliknya.

Gambar 3: Contoh ilustrasi sebuah KC yang sangat dipengaruhi oleh variasi lingkungan tempat perakitan produk tersebut dilakukan [Armillotta and Semeraro 2013].

Gambar 2 memperlihatkan ilustrasi dari *operating window* dari sebuah proses perakitan produk. Pada gambar 2, proses perakitan tersebut sangat dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan dari ruangan tempat proses perakitan tersebut dilakukan. Karena proses perakitan tersebut kompleks, kombinasi efek dari variasi tekanan dan temperatur pada suatu KC yang diinginkan bersifat non-linear. Sehingga, area *operating window*-nya berbentuk kompleks. Apabila nilai temperatur dan tekanan ruangan tempat perakitan tersebut berada dalam area yang kompleks tersebut, maka variasi KC produk rakitannya masih masuk dalam toleransi yang diinginkan. Namun demikian, pada umumnya, *operating window* perakitan tersebut pada umumnya dianggap linear dan area *window*-nya berbentuk kotak (dengan garis putus-putus). Namun demikian, dari gambar 2, ada area (yang berbentuk kotak tersebut) dimana kombinasi

tekanan dan temperatur ruang tempat perakitan tersebut mengakibatkan variasi KC produknya di luar nilai toleransi yang dibolehkan.

Gambar 3 memperlihatkan contoh sederhana yang riil mengenai efek dari lingkungan terhadap variasi KC suatu produk rakitan [Armilotta and Semeraro 2013]. Pada gambar 3, contoh yang diberikan adalah satu dari efek lingkungan yang dapat mempengaruhi variasi suatu KC secara signifikan, yaitu temperatur. Produk rakitan pada gambar 3 terdiri dari tiga komponen. Ketiga komponen tersebut berbentuk “U”, “I” dan “T”. KC dari produk rakitannya adalah jarak *gap* antara komponen “I” dan komponen “T” ketika dirakit ke dalam komponen “U” (lihat gambar 3). Pada gambar 3, KC nya adalah X_1 - X_2 - X_3 . Dimensi dari ketiga variabel X (unit mm) tersebut dipengaruhi oleh temperatur T (°C) ruangan tempat perakitannya, yaitu:

$$X_1 = 40^{+0.2}_{+0.1} + 0.0001.T$$

$$X_2 = 30^{0}_{-0.1} + 0.0005.T$$

$$X_3 = 10^{0}_{-0.05} + 0.0001.T$$

Nilai KC, yaitu jarak *gap* antara komponen “I” dan komponen “T”, dibolehkan bervariasi dengan nilai antara 0 sampai 0.4 mm. Nilai toleransi dari KC ini hanya bisa diperoleh apabila temperatur ruangan tempat perakitannya berada pada kisaran suhu 0 °C, yang bisa dikalkulasi sebagai:

$$KC_{max} = (40 + 0.2) - (30 - 0.1) - (10 - 0.05) = 0.35 \text{ mm}$$

$$KC_{min} = (40 + 0.1) - (30 + 0) - (10 + 0) = 0.1 \text{ mm}$$

Dari kalkulasi diatas, dapat terlihat bahwa temperatur ruangan dimana proses perakitannya dilakukan sangatlah berpengaruh terhadap variasi KC!. Contoh pada gambar 3 hanyalah contoh yang paling sederhana untuk menjelaskan pentingnya mempertimbangkan efek lingkungan (dalam hal ini temperatur) pada suatu proses perakitan. Pada kondisi riil, area *operating window* suatu proses perakitan pada umumnya dibatasi oleh area dengan bentuk yang sangat kompleks pada ruang multidimensional (lebih dari tiga efek lingkungan yang berpengaruh).

9.2 Keuntungan ekonomi dari analisis rantai variasi

Sebelum membahas keuntungan ekonomi yang didapatkan dari menerapkan analisis rantai variasi dalam sebuah proses perakitan pada khususnya (dan pada proses manufaktur pada umumnya), tipe-tipe biaya (*cost*) dari sebuah proses perakitan adalah sebagai berikut:

- **Biaya tetap**
Biaya tetap adalah biaya yang realtif tetap selama suatu proses perakitan berlangsung walaupun kecepatan laju produksinya berubah-ubah, misalnya alat-alat *fixture*, permesinan dan *conveyor*.
- **Biaya variabel**
Biaya variabel adalah biaya yang muncul bervariasi (berubah-ubah) sesuai dengan perubahan yang berkaitan dengan aktifitas suatu proses perakitan, misalnya pengingkatan laju proses perakitan akan menambah biaya operator dan biaya listrik.
- **Biaya material**
Biaya material dalam suatu proses perakitan agak berbeda dengan definisi biaya material pada suatu proses produksi. Pada suatu proses produksi. Biaya material diartikan sebagai biaya dari barang yang dioleh oleh proses produksi tersebut. Lain halnya dengan proses perakitan, pada proses ini, biaya material adalah biaya yang timbul karena adanya proses *scrap* suatu produk. Selain itu, contoh lain dari biaya material pada proses perakitan adalah biaya pelumasan untuk mendukung suatu proses perakitan.
- **Biaya administratif**
Biaya administratif adalah biaya yang muncul dari suatu aktifitas pendukung suatu proses perakitan. Misalnya, biaya untuk staf departemen disain, biaya upah manajer dan supervisor, dan lain sebagainya.
- **Biaya langsung**

Biaya langsung adalah biaya yang langsung dapat dialokasikan untuk suatu proses perakitan, yaitu Biaya material, Biaya tetap, Biaya variable dan biaya operator (termasuk supervisornya).

- Biaya tidak langsung

Biaya tidak langsung adalah misalnya biaya yang berkaitan dengan manajemen secara umum, biaya *human resource*, biaya percetakan dokumen dan brosur dan lain sebagainya. Biaya tidak langsung agak sulit untuk ditentukan secara pasti, karena harus mempertimbangkan banyak faktor yang tidak terlibat langsung dengan biaya suatu proses perakitan. Biaya tidak langsung juga bisa disebut sebagai biaya *overhead*.

Gambar 4: Contoh distribusi biaya untuk sebuah mesin pada sebuah perusahaan manufaktur otomotif. Biaya dengan kategori mesin adalah termasuk biaya membeli mesin-mesin dan pembangunan fasilitas-fasilitas. Biaya dengan kategori lain-lain adalah termasuk *scrap*, reparasi, *consumable*, pelumasan dan energi [Peschard and Whitney 2019].

Gambar 4 memperlihatkan salah satu contoh riil dari distribusi biaya-biaya untuk sebuah proses produksi mesin mobil pada suatu industri otomotif dalam volume yang sangat besar. Dari gambar 4, sumber biaya utama adalah material untuk pembentuk mesin tersebut, seperti berbagai macam metal. Sedangkan, biaya paling kecil adalah pembelian mesin.

Distribusi biaya-biaya dari *final assembly* suatu pabrik sampai dengan biaya-biaya suplier tier 5 diperlihatkan pada gambar 5. Pada gambar 5, biaya pada level *final assembly* paling besar bersumber dari biaya pembelian komponen-komponen dari suplier tier 2 dan proses perakitannya. Sedangkan, pada level suplier tier 5, sumber biaya terbesar adalah biaya logistik dari suatu material (seperti: biaya distribusi dan penyimpanan).

Gambar 6 mengilustrasikan bagaimana perubahan arus kas selama berjalannya waktu pada suatu proses produksi. Pada tahap awal, pengeluaran terbesar muncul dari pembelian mesin-mesin untuk proses produksi, termasuk sistem *fixture* untuk proses perakitannya. Kemudian, besarnya pengeluaran menjadi lebih kecil dan jumlahnya stabil untuk suatu periode tertentu yang muncul karena biaya operasional produksi. Kemudian, pendapatan kas mulai muncul ketika produknya sudah mulai terjual. Perlu diingat, pengeluaran juga akan muncul setelah fase penjualan produk yang bersumber dari, misalnya, biaya promosi dan biaya *after sale support*.

Gambar 5: Ilustrasi distribusi biaya-biaya sebuah produksi mobil dari tahap tertinggi (perusahaan dimana *final assembly*-nya dilakukan) sampai dengan biaya pada supplier tier 5 (level 5) [Whitney 2004].

Gambar 6: Ilustrasi pola umum dari biaya-biaya produksi (termasuk perakitan) pada sebuah industri manufaktur. Yang termasuk pengeluaran adalah biaya investasi, material, operator, dan lain-lain. Yang termasuk pendapatan adalah penjualan dari produk tersebut.

Dari berbagai tipe biaya perakitan tersebut, peran dari analisis rantai variasi (toleransi) untuk mendapatkan keuntungan ekonomi, seperti penurunan suatu biaya dan lain sebagainya, dapat berupa:

- Mengurangi secara signifikan jumlah *line-stop* pada proses perakitan.
Dengan melakukan analisis rantai variasi (toleransi) pada tahap disain. Maka, kesalahan suatu disain dapat dideteksi sejak dini. Karena, apabila disain suatu produk salah, maka, walaupun semua komponennya dapat diproduksi secara sempurna, akumulasi variasi pada suatu KC berada di luar batas toleransinya. Apabila kesalahan disain tersebut ditemukan pada saat proses perakitannya, maka akan mengakibatkan *line-stop* yang lama untuk mencari-cari kesalahan suatu proses dan untuk melakukan perbaikan pada produk tersebut. Apabila kesalahan suatu disain ditemukan sejak dini pada saat disain itu dibuat, maka biaya untuk memperbaiki disain tersebut sangat rendah dan kesalahan tersebut dapat dengan cepat diatasi.
- Mengurangi jumlah *scrap* produk rakitan.
Dengan melakukan analisis rantai variasi, jumlah *scrap* pada *final assembly* dapat dikurangi secara signifikan. Karena, pada umumnya, apabila ada kesalahan disain yang terdeteksi pada suatu proses perakitan final, akan sangat sulit untuk memperbaiki kesalahan tersebut yang ditemukan pada suatu produk pada proses perakitan tersebut. Sehingga, produk tersebut cenderung untuk di-*scrap*.
- Mengurangi biaya perbaikan produk.
Seperti pada poin sebelumnya, suatu produk yang memiliki cacat disain akan membutuhkan waktu perbaikan (apabila memungkinkan) yang lama dan jumlah operator yang banyak. Hal ini akan meningkatkan baik biaya material maupun biaya upah operator (karena biasanya karena *over-time*).
- Mengurangi biaya *fixture*.
Dengan analisis rantai variasi (toleransi), selain kesalahan pada disain dapat ditemukan, revisi dan peningkatan disain suatu produk rakitan dapat dilakukan. Revisi dan peningkatan tersebut dapat berupa pengurangan jumlah komponen-komponen yang menyusun produk rakitan tersebut (lihat contoh aplikasi 3 pada Bab 8). Hal ini tentu saja akan menurunkan biaya material secara langsung dan mengurangi biaya proses produksi secara tidak langsung. Selain itu, analisis fitur-fitur perakitan dapat dilakukan sedemikian rupa sehingga jumlah penggunaan fitur untuk proses perakitan produk tersebut dapat dikurangi.
- Mengurangi biaya produksi dan inspeksi kualitas.
Dengan analisis rantai variasi, nilai-nilai toleransi fitur-fitur pada komponen-komponen suatu produk rakitan dapat dialokasikan dengan tepat. Yang dimaksud dengan “tepat” adalah nilai-nilai toleransi fitur-fitur tersebut tidak terlalu kecil (*over-specification*) dan variasi KC masih masuk dalam toleransinya. Dengan nilai toleransi yang besar pada fitur-fitur suatu komponen, maka biaya produksi dan inspeksi kualitas komponen tersebut dapat dikurangi secara signifikan. Karena, dibutuhkan mesin produksi dan mesin inspeksi kualitas (alat ukur) dengan tingkat akurasi dan presisi apabila nilai toleransi suatu fitur terlalu kecil. Mesin dan alat pengukuran tersebut akan mempunyai biaya atau harga yang sangat mahal.
- Mengurangi jumlah penggunaan material.
Dengan adanya pengurangan *scrap* dan jumlah *fixture* (jika memungkinkan), maka jumlah penggunaan material untuk suatu produk rakitan akan dapat dikurangi.
- Meningkatkan kualitas produk.
Dengan menggunakan disain yang baik dan sudah terverifikasi kevalidannya, maka produk rakitan yang dihasilkan dapat memenuhi suatu KC yang diinginkan dari produk tersebut. Sehingga, produk tersebut dapat berfungsi sesuai dengan yang diinginkan. Hal ini menyebabkan tingkat kepuasan konsumen tinggi. Dengan tingginya tingkat kepuasan konsumen, produk tersebut akan semakin dibeli dan mendatangkan keuntungan.

9.3 “Good practice guide” untuk mendisain suatu proses perakitan yang efektif, efisien dan memberikan keuntungan ekonomi

Untuk mendisain sebuah proses perakitan yang efektif dan efisien sehingga memberikan suatu nilai ekonomi yang tinggi, sebuah perusahaan harus memperhatikan beberapa aspek, yaitu [Edwards 2002]:

- Komponen-komponen yang terlibat dalam sebuah proses perakitan harus sudah terstandarisasi.
- Proses produksi dan material yang digunakan harus semurah mungkin tetapi sesuai dengan kebutuhan atau aplikasi dari suatu produk yang akan dirakit.
- Proses manual harus diminimalisasi.
- Kemampuan *interchangeability* antar komponen harus diutamakan.
- Disain suatu produk rakitan harus sudah mempertimbangkan proses produksi dan bagaimana produk tersebut diinspeksi (salah satunya dengan melakukan analisis rantai variasi/toleransi).
- Komponen-komponen yang terlibat dalam suatu proses perakitan harus sebisa mungkin simetri untuk menghindari kebutuhan lebih untuk mengorientasikan sebuah komponen pada saat proses perakitan.
- Disain sebuah komponen *base* sehingga mengurangi penggunaan *jig* dan *fixure*.
- Disain sebuah produk secara modular untuk mempermudah proses perakitan yang kompleks dengan melakukan proses-proses sub-perakitan.
- Komponen-komponen yang akan dirakit secara otomatis harus juga mudah dilakukan secara manual.
- Besarkan nilai-nilai toleransi dan *surface finish* suatu komponen (dengan tetap mempertahankan fungsinya) untuk menekan biaya produksi dan biaya inspeksi kualitas.
- Jumlah komponen-komponen yang terlibat dalam sebuah proses perakitan harus seminimal mungkin.
- Disain sebuah sistem *handling* komponen yang sederhana tetapi efektif.
- Jangan memberikan nilai toleransi terlalu kecil melebihi kebutuhan.
- Hindari penggunaan komponen-komponen khusus yang harus melalui order atau proses produksi yang sangat khusus (jika memungkinkan).
- Gunakan sistem perakitan yang meminimalkan *buffer*.
- Minimalkan jumlah *buffer* atau komponen *work-in-progress* dalam suatu proses perakitan.
- Gunakan metode dan disain sesederhana mungkin tetapi tidak mengurangi fungsi utama yang diinginkan dari suatu produk.
- Disain atau pilih suatu proses produksi dengan mengutamakan bahwa proses perakitannya akan mudah.
- Disain suatu proses perakitan yang simpel.
- Disain komponen yang mempunyai multi-fungsi (sehingga bisa mengurangi jumlah komponen yang dibutuhkan dalam suatu produk rakitan).
- Hindari *fitting* yang membutuhkan presisi yang tinggi sebisa mungkin.
- Hal utama untuk mengurangi biaya sebuah proses perakitan adalah dengan mengurangi jumlah komponen-komponen yang membentuk suatu produk yang akan dirakit.
- Hindari menggunakan komponen-komponen yang terlalu berbeda jenisnya.
- Hindari otomatisasi yang berlebihan karena akan mengurangi fleksibilitas suatu proses perakitan.
- Hindari mendisain sebuah komponen dengan sudut yang tajam, harus dengan sudut yang tumpul.
- Gunakan fitur-fitur *locating* dan *mate* pada komponen-komponen yang akan dirakit.
- Hindari penggunaan komponen yang mempunyai struktur *nesting*.
- Hindari proses *fastening* yang terlalu kompleks dan lama.
- Gunakan material yang umum dan sudah teruji dipasaran.
- Gunakan jenis mur dan baut dengan jenis yang sama untuk mempermudah proses *fastening*.
- Disain suatu produk harus memperitmbangkan kemudahan proses pengemasannya (*packing*).
- Pastikan proses pembongkaran (*de-assembly*) suatu produk harus sama mudahnya dengan proses perakitannya (*assembly*).

BAB 10

Perspektif

Bab ini bertujuan untuk memberikan perspektif mengenai aplikasi-aplikasi dan riset-riset mengenai analisis rantai variasi (toleransi) pada masa sekarang dan masa depan. Hal-hal yang sudah dipaparkan pada bab-bab sebelumnya dalam buku ini hanyalah sebagian kecil dari ruang lingkup luas toleransi dimensi dan geometri (GD&T) dan analisis rantai variasi (toleransi) suatu produk rakitan.

GD&T dan analisis rantai variasi (toleransi) merupakan hal yang sangat penting dalam siklus disain dan manufaktur sebuah produk. Hal ini juga sudah mulai diterapkan pada industri-industri manufaktur di negara-negara maju, misalnya pada industri pesawat terbang Airbus dan Boeing, pabrikan mobil BMW dan Jaguar Land Rover. Di dunia riset, topik analisis rantai variasi dan aplikasinya dalam disain juga merupakan salah satu topik yang sedang marak dikembangkan. Namun demikian, belum banyak yang benar-benar paham mengenai GD&T dan analisis rantai variasi.

Diharapkan, bab ini dapat memberikan gambaran dan motivasi untuk merumuskan ide-ide baru untuk aplikasi toleransi dimensi dan geometri (GD&T) dan analisis rantai variasi (toleransi) yang inovatif. Sehingga, efisiensi biaya proses perakitan dan kualitas sebuah produk rakitan dapat semakin ditingkatkan. Dengan dihasilkannya suatu produk rakitan yang berkualitas tinggi, daya saing perusahaan pembuat produk tersebut akan semakin tinggi.

10.1 Metode “*skin model*” untuk meningkatkan akurasi dari analisis rantai variasi (toleransi) GD&T

Untuk menghasilkan suatu produk yang berkualitas tinggi, produk tersebut harus mempunyai sebuah disain yang bagus ditambah dengan proses-proses produksi dan inspeksi kualitas yang bagus pula. Yang dimaksud disain yang bagus adalah sebuah disain yang **robust**, yaitu suatu disain dimana apabila terjadi variasi geometri dari komponen-komponen pembentuknya, maka output atau karakteristik kunci (KC) dari produk tersebut tetap mempunyai variasi yang kecil dan masih dalam batas-batas toleransinya [Soderberg & Lindkvist 1999]. Setiap variasi mulai dari disain sampai dengan proses inspeksi kualitas akan merambat dan terakumulasi pada setiap tahapan dari disain sampai inspeksi sebuah produk rakitan [Morse et al 208]. Gambar 1 memperlihatkan ilustrasi antara disain yang sensitif dan disain yang bagus. Dari gambar 1, dapat terlihat bahwa variasi dari sebuah komponen akan mengakibatkan akumulasi variasi pada KC produk rakitannya. Untuk suatu disain **robust**, akumulasi variasi KC nya jauh lebih kecil dari variasi komponen-komponennya. Analisis akumulasi variasi KC ini dilakukan dengan analisis rantai variasi (toleransi) yang sudah dibahas pada bab-bab sebelumnya buku ini.

Analisis rantai variasi yang sudah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya mengasumsikan permukaan-permukaan dimana terdapat toleransi-toleransi, baik dimensi maupun geometri, berbentuk suatu permukaan yang ideal (permukaan bidang datar atau permukaan sebuah fungsi kuadartik tertentu, misalnya bola atau silinder). Namun demikian, pada kondisi riil, permukaan fitur suatu komponen yang membentuk suatu produk rakitan tidaklah “datar”, melainkan berbentuk tak beraturan karena adanya kekasaran permukaan dan deformasi-deformasi pada permukaan tersebut yang disebabkan oleh “jejak (*fingerprint*)” dari suatu proses manufaktur yang memproses permukaan tersebut. Hal ini tentu saja mengurangi tingkat akurasi hasil dari analisis rantai variasi produk rakitan tersebut.

Gambar 1: Perbedaan antara (a) disain yang sensitif (variasi KC sangat rentan terhadap *error* dari sebuah fitur) dan (b) disain yang *robust* [Soderberg & Lindkvist 1999].

Saat ini, muncul suatu metode yang dapat meningkatkan akurasi hasil dari analisis rantai variasi (toleransi) yang sudah dijelaskan sebelumnya. Metode tersebut dinamakan “*skin model*” [Yan & Ballu 2018, Zhu et al 2016]. Metode “*skin model*” merepresentasikan sebuah komponen dan permukaannya dengan *point cloud* yang tidak beraturan (non-ideal) berdasarkan suatu *framework* geometri untuk merepresentasikan komponen tersebut dengan mempertimbangkan deviasi dari suatu proses manufaktur, proses perakitan dan proses pengukuran komponen tersebut. Tahap-tahap pembentukan *skin model* adalah sebagai berikut:

- Tahap prediksi: Tahap ini diaplikasikan pada tahap disain suatu komponen. Pada tahap ini, deviasi diasumsikan dari deviasi sistematis dan acak (*random*) dari sebuah proses manufaktur untuk memprediksi kemungkinan cacat permukaan yang dapat dihasilkan dari proses manufaktur tersebut. Pada umumnya, deviasi sistematis dimodelkan dengan model “*second order shape*” yang merepresentasikan jejak proses manufaktur tersebut dan deviasi acak dimodelkan dengan metode “*random field theory*” dengan nilai parameter-parameter yang merepresentasikan properti dari proses manufaktur tersebut. Deviasi sistematis dan acak tersebut kemudian ditambahkan pada *point cloud* nominal permukaan tersebut pada arah normal vektornya untuk menghasilkan sebuah *skin model* dari permukaan tersebut.
- Tahap observasi: Tahap ini diaplikasikan setelah tahap disain dimana simulasi dari suatu proses manufaktur atau data hasil pengukuran dari permukaan suatu benda sudah didapatkan. Pada proses ini, sebuah set data dari beberapa sampel permukaan benda tersebut dikumpulkan. Kemudian, metode statistik seperti “*statistical shape analysis*” dan “*kernel density estimate*” digunakan untuk menghasilkan data sintetis dari permukaan tersebut yang merepresentasikan variabilitas dari set data sampel tersebut.

Hasil dari *skin model* pada kedua tahap di atas harus dievaluasi untuk mengetahui apakah permukaan tersebut masuk dalam toleransi yang sudah ditetapkan atau tidak. Metode *skin model* merupakan topik riset yang sedang ramai pada saat ini. Salah satu kekurangan metode ini adalah metode ini membutuhkan suatu proses komputasi yang sangat besar untuk mensimulasikan suatu bentuk riil permukaan suatu benda.

Gambar 2 dan gambar 3 memperlihatkan contoh perbedaan antara model permukaan datar dan model *skin model* untuk sebuah komponen dan multi-komponen. Pada gambar 2 dan gambar 3, terlihat jelas bahwa metode *skin model* dapat merepresentasikan deviasi sebuah permukaan dengan lebih riil. Hal ini menyebabkan hasil dari analisis rantai variasi akan semakin akurat karena analisis tersebut juga mempertimbangkan cacat-cacat yang dapat dihasilkan oleh suatu proses manufaktur dan pengukuran. Gambar 4 memberikan contoh hasil estimasi dua buah permukaan sebuah benda dengan metode *skin model*. Pada gambar 4 tersebut, dapat terlihat bahwa permukaan tersebut mempunyai bentuk yang kompleks. Bentuk kompleks tersebut merepresentasikan, misalnya, deviasi permukaan sebuah komponen yang diproses dengan sebuah proses *milling* yang terdampak oleh gangguan-gangguan seperti getaran atau vibrasi.

Gambar 2: Ilustrasi perbedaan antara metode *flat/ideal surface* dan *skin model*. (a) model nominal 3D, (b) model nominal 2D, (c) model deviasi dengan *ideal surface* dan (d) model deviasi dengan *skin model* [Yan & Ballu 2018].

Gambar 3: Ilustrasi perbedaan antara metode *flat/ideal surface* dan *skin model* untuk multi komponen. (a) model nominal 2D, (b) model deviasi dengan *ideal surface* dan (c) model deviasi dengan *skin model* [Yan & Ballu 2018].

Gambar 4: Model *skin model* dua buah permukaan datar dengan merepresentasikan cacat dari proses manufakturnya [Yan & Ballu 2018].

Gambar 5: Contoh aplikasi analisis variasi dengan metode *skin model* untuk sebuah produk rakitan gergaji manual. (kiri) *Section view* dari rakitan gergaji manual tersebut: 1. *Solid frame*, 2. *Eccentric wheel*, 3. *Rod*, 4. *Slider*, 5. Material kayu dan (kanan) Hasil simulasi variasi pada rakitan gergaji tersebut dan daerah dimana terjadinya kontak antar-material (zona merah) [Yan & Ballu 2018].

Gambar 5 memperlihatkan salah satu contoh riil analisis rantai variasi pada sebuah gergaji manual dengan metode *skin model*. Pada gambar 5, KC yang ingin dianalisis adalah jarak *gap* antara komponen-komponen yang bergerak. Pada Gambar 5 kanan, hasil analisis rantai variasi yang menggunakan sistem metode elemen hingga dapat melakukan analisis variasi dengan merepresentasikan bentuk permukaan yang sebenarnya. Hasil dari analisis KC yang diluar batas toleransi (terjadi kontak antara dua permukaan yang bergerak) diperlihatkan dengan area berwarna merah yang menunjukkan dimana lokasi jarak *gap* yang diinginkan diluar batas toleransinya (gambar 5).

10.2 Perakitan produk tanpa menggunakan suatu sistem *fixture*

Sistem *fixture* merupakan suatu sistem yang esensial dalam sebuah proses perakitan karena fungsi pentingnya untuk memposisikan (dan mengorientasikan) suatu komponen relatif dengan komponen lainnya dan untuk mempertahankan posisi tersebut ketika komponen-komponen tersebut diberi gaya luaran, seperti gaya yang berasal dari suatu proses *spot welding*. Sistem *fixture* akan semakin kompleks dan penting pada proses perakitan komponen-komponen *sheet-metal* sebuah badan mobil.

Gambar 6: Konfigurasi umum sebuah sistem *fixture* konvensional pada sebuah proses perakitan *sheet-metal* [Shlatter et al 2018].

Suatu sistem *fixture* untuk perakitan sebuah badan mobil yang terdiri dari komponen-komponen *sheet-metal* diperlihatkan pada gambar 6. Pada gambar 6, alur proses perakitan sebuah badan mobil secara umum adalah: proses memposisikan suatu komponen dengan komponen lainnya menggunakan suatu sistem *fixture*, meng-*clamp* komponen-komponen tersebut, melakukan proses penggabungan yang pada umumnya menggunakan sebuah proses *spot welding*, dan proses melepaskan komponen-komponen tersebut dari *fixture*-nya dengan diikuti oleh efek *spring back*. Pada gambar 6, terdapat lubang slot yang berfungsi untuk memberikan sedikit *degree-of-freedom* untuk mengatur posisi dari komponen-komponen *sheet-metal* untuk mencapai suatu posisi perakitan yang diinginkan dan untuk mengkompensasi beberapa *error* geometri yang terdapat pada komponen-komponen tersebut.

Namun demikian, penggunaan sistem *fixture* untuk proses perakitan suatu produk dapat dihilangkan atau

dikurangi secara signifikan dengan mengaplikasikan disain yang tepat dan *robust*. Disain yang tepat adalah disain dimana fitur-fitur perakitan pada sebuah komponen mencakup fitur *mate* dan fitur *contact* (lihat bab 1). Dengan adanya kedua fitur tersebut, maka komponen-komponen dapat saling memposisikan dirinya masing-masing terhadap komponen lainnya. Pada umumnya, proses perakitan suatu produk yang menggunakan banyak *fixture* pada umumnya produk tersebut terdiri dari komponen-komponen yang kurang memiliki fitur *mate* dan hanya mengutamakan fitur *contact*.

Gambar 7: Model 3D serit dimensi dan toleransinya untuk sebuah studi kasus perakitan *sheet-metal* yang terdiri dari tiga komponen (benda) (a) dimensi dan toleransi setiap komponennya dan (b) model 3D nominal hasil dari perakitan ketiga komponen tersebut [Shlatter et al 2018].

Untuk menjelaskan lebih detail bagaimana disain fitur-fitur yang tepat pada komponen-komponen pembentuk suatu produk rakitan dapat mengurangi secara signifikan jumlah *fixture* akan dijabarkan sebagai berikut. Gambar 7 memperlihatkan contoh kasus yang digunakan untuk penjelasan tersebut. Kasus ini merupakan kasus dari perusahaan otomotif BMW. Pada gambar 7a, diperlihatkan tiga buah komponen *sheet-metal* dengan dimensi dan toleransinya. Gambar 7b memperlihatkan hasil akhir (nominal) apabila ketiga komponen tersebut dirakit.

Gambar 8 memperlihatkan sebuah sistem *fixture* konvensional yang digunakan untuk merakit ketiga komponen tersebut (gambar 7a) sehingga menjadi satu-kesatuan (gambar 7b). Pada gambar 8, *fixture* tersebut sangat rumit dan memakan biaya yang besar. Hal ini disebabkan disain fitur-fitur perakitan pada ketiga komponen tersebut tidak mempunyai fitur *mate*. Sehingga, dibutuhkan *fixture* tersebut untuk memposisikan komponen-komponen tersebut.

Gambar 8: (kiri) Sistem *fixture* konvensional untuk merakit komponen-komponen pada gambar 7 dan (kanan) skema *locating* (*positioning*) pada setiap komponennya [Shlatter et al 2018].

	Loose bearing	Fixed bearing
Posisi	 pin + lubang-slot	 lubang
Posisi + clamping	 Bola + slot collar	 circular collar

Gambar 9: (atas) Contoh-contoh fitur-fitur pasangan *fastener* (pengencang/penguat/penghubung) dan fungsinya, (bawah kiri) proses memposisikan dua buah komponen dengan metode *fixture* konvensional dan (bawah kanan) proses memposisikan dua buah komponen dengan metode disain dengan berbasis fitur-fitur perakitan (*assembly features*), yaitu fitur *mate* dan *contact* (lihat bab 1), sehingga proses perakitannya tidak menggunakan *fixture* (atau dengan minimal *fixture*) [Shlatter et al 2018].

Gambar 9 (atas) memperlihatkan jenis-jenis dari pasangan fitur-fitur *mate* yang dapat diaplikasikan pada fitur-fitur perakitan dari ketiga komponen tersebut. Dengan menggunakan fitur-fitur *mate* pada gambar 9 (atas) tersebut, sistem *fixture* konvensional tidak diperlukan pada proses perakitan ketiga komponen tersebut. Gambar 9 (bawah) memperlihatkan perbedaan antara sistem perakitan dengan menggunakan sebuah *fixture* konvensional dan sistem perakitan berbasis-fitur yang tidak menggunakan bantuan sebuah *fixture* untuk menggabungkan komponen-komponen.

Gambar 10: Proses perakitan ketiga komponen pada gambar 7 dengan desain berbasis fitur-fitur perakitan dan skema *locating* ketiga komponen tersebut. *Fixture* hanya digunakan pada benda 1 karena digunakan sebagai *base* untuk benda-benda lainnya [Shlatter et al 2018].

Gambar 10 memperlihatkan proses perakitan ketiga produk tersebut dengan jumlah *fixture* yang sangat sedikit, yaitu hanya untuk memegang benda 1 yang merupakan *base* dari produk rakitan tersebut (gambar 7). Desain ketiga komponen tersebut yang dilengkapi dengan fitur-fitur *mate* dapat mengurangi secara signifikan jumlah kebutuhan *fixture*. Pada gambar 10, posisi dan orientasi (yang *repeatable*) benda 1 terhadap benda 2 dan benda 3 terhadap benda 2 dapat dilakukan tanpa menggunakan *fixture*. Hal ini disebabkan karena fungsi posisi dan orientasi secara deterministik ketiga komponen tersebut dapat terpenuhi dengan adanya fitur-fitur *mate* pada komponen-komponen tersebut.

10.3 Analisis rantai variasi dengan mempertimbangkan berbagai macam faktor

Analisis rantai variasi juga mempertimbangkan hal-hal lainnya sehingga analisisnya semakin komprehensif. Misalnya, ada dua kasus untuk contoh ini, yaitu analisis rantai variasi yang mempertimbangkan efek lingkungan dan ekonomi, dan analisis rantai variasi yang juga mempertimbangkan konfigurasi sistem *fixture*.

Untuk contoh analisis yang mempertimbangkan efek lingkungan dan ekonomi, Hoffenson et al 2014 telah membahas mengenai hal ini untuk contoh perakitan dua buah komponen *sheet-metal* badan mobil (gambar 11). Pada gambar 11 (kiri), dua buah komponen tersebut diperlihatkan dalam bentuk produk rakitannya. Gambar 11 (kanan) memperlihatkan efek dari nilai toleransi yang diberikan pada KC-KC nya (lihat gambar 11 kiri) terhadap biaya ekonomi dan dampak lingkungan. Dari gambar 11 (kanan), semakin besar nilai toleransinya, maka biaya ekonominya semakin kecil (karena biaya produksi, perakitan dan inspeksi kualitasnya semakin rendah). Namun demikian, dampak terhadap lingkungan akan semakin besar. Hal ini disebabkan karena semakin besar nilai toleransinya, maka akan semakin besar kemungkinan suatu produk tidak akan memberikan fungsi yang diinginkan. Sehingga, ada kemungkinan produk tersebut akan dibuang atau tidak digunakan dan mengakibatkan bertambahnya limbah terhadap lingkungan. Hal sebaliknya akan terjadi apabila nilai toleransi yang diberikan semakin kecil. Namun demikian, ada titik minimum dimana nilai toleransi yang diberikan dapat menghasilkan suatu kompromi antara efek lingkungan dan biaya ekonomi yang didapatkan (gambar 11 kanan).

Gambar 11: (kiri) contoh perakitan dua buah komponen *sheet-metal* dan (kanan) analisis rantai variasi yang mempertimbangkan faktor ekonomi dan lingkungan (*sustainability*) [Hoffenson et al 2014].

Kasus lainnya adalah analisis rantai variasi yang mempertimbangkan konfigurasi sebuah sistem *fixture* yang digunakan [Armilotta et al 2010]. Metode mereka merupakan ekstensi dari metode *screw theory* [Adams & Whitney 2001] yang digunakan untuk menganalisis fitur-fitur perakitan. Landasan dari pertimbangan ini adalah karena geometri dari suatu sistem *fixture* pun tidak sempurna dan mempunyai kontribusi pada total variasi-variasi pada suatu proses perakitan. Gambar 12 (kiri) memperlihatkan model 3D sebuah komponen yang akan ditempatkan pada sebuah *fixture* dan gambar 12 (kanan) memperlihatkan dimensi dan toleransi fitur-fitur komponen tersebut.

Gambar 12: (kiri) Model 3D dari sebuah komponen solid dan (kanan) dimensi dan toleransi dari komponen tersebut [Armilotta et al 2010].

Gambar 13 memperlihatkan hasil dari analisis variasi posisi (lokasi) dari fitur-fitur lubang pada komponen tersebut (gambar 12) dengan menggunakan dua jenis konfigurasi sistem *fixture* yang berbeda. Pada gambar 12a, konfigurasi dari *fixture* tersebut menggunakan kombinasi tiga pin konvensional. Hal ini menyebabkan deviasi posisi atau lokasi yang besar pada fitur-fitur lubangnya. Gambar 12b memperlihatkan konfigurasi fitur yang berbeda dengan menggunakan *v-groove* dan satu pin. Dengan menggunakan konfigurasi ini, deviasi posisi dari lubang-lubang tersebut dapat dikurangi secara signifikan.

Gambar 13: Analisis rantai variasi yang **mengintegrasikan efek dari konfigurasi *fixture***. (kiri) Konfigurasi *fixture* yang akan berkontribusi terhadap kesalahan posisi (angka menunjukkan deviasi posisi fitur tersebut dari lokasi nominalnya) dan (kanan) konfigurasi *fixture* yang dapat meminimalkan kesalahan posisi dari komponen tersebut.

Catatan: angka yang mengikuti anak panah merepresentasikan besarnya deviasi posisi pada lokasi tersebut
[Armiliotta et al 2010].

10.4 Perakitan produk yang terdiri dari komponen-komponen *non-rigid*

Komponen-komponen *non-rigid* adalah komponen yang sangat mudah terdeformasi. Contoh-contoh komponen jenis ini adalah, misalnya, *body* mobil, kabel dan komponen-komponen berbentuk lembaran-lembaran. Pada umumnya, perakitan jenis ini lebih sulit dibandingkan perakitan komponen *rigid* karena dalam perakitan komponen *non-rigid*, efek *spring-back* harus sangat diperhatikan.

Gambar 14: (a) Fixture berbasis 6 titik kontak dan (b) contoh fixture perakitan dua buah komponen *body* sebuah mobil [Warmefjord et al 2016].

Kasus yang paling umum untuk perakitan komponen jenis ini adalah perakitan *body* mobil. Untuk perakitan *body* mobil, jenis *fixture* yang paling umum digunakan adalah jenis *fixture* dengan 6 titik kontak pin [Soderberg & Landkvist 2002]. Gambar 7 memperlihatkan konsep dari *fixture* dengan 6 pin tersebut (gambar 14a) dan contoh dari *fixture* untuk menggabungkan dua buah lembaran *body* sebuah mobil (gambar 14b). Pada gambar 14b, dapat terlihat bahwa *fixture* yang digunakan untuk merakit *body* sebuah mobil sangat kompleks. Analisis rantai variasi untuk perakitan *body* sebuah mobil sangatlah dibutuhkan untuk dapat mendisain sebuah *fixture* (apabila dibutuhkan) dengan tepat. [Warmefjord et al 2016] telah mengusulkan sebuah metode kontrol chart berbasis statistik yang memungkinkan memonitor variasi-variasi yang berasal dari *fixture* dan berasal dari proses-proses manufaktur. Dengan adanya

pemisahan sumber-sumber variasi pada suatu perakitan *body* sebuah mobil, analisis penyebab masalah yang terdapat pada suatu KC akan menjadi lebih mudah dan solusi yang tepat akan dengan mudah didapatkan.

Contoh lain perakitan benda *non-rigid* adalah perakitan sebuah kabel yang fleksibel [Hermansson et al 2013]. Gambar 15 memperlihatkan bagaimana proses analisis variasi kabel tersebut dilakukan untuk memperbaiki desain kabel tersebut. Pada gambar 15, pada desain awal, kabel tersebut mempunyai variasi yang terlalu besar sehingga memungkinkan bersentuhan dengan komponen lainnya (gambar 15a). Dengan memperbaiki desain kabel tersebut, masalah kemungkinan kabel tersebut menyentuh komponen lainnya dapat diatasi (gambar 15c).

Gambar 15: (a) simulasi zona variasi sebuah kabel dimana ada resiko tinggi untuk menyentuh batang vertikal sebelah kiri, (b) besarnya zona variasi pada kabel tersebut dengan representasi warna dan (c) simulasi zona variasi dengan desain kabel yang baru [Hermansson et al 2013].

[Soderberg et al 2015] telah mempresentasikan metode analisis variasi perakitan komponen-komponen komposit yang sering dipakai pada sebuah pesawat terbang dan mobil dengan alasan bahwa material komposit mempunyai *strength-to-weight ratio* besar. Tantangan dari perakitan komponen komposit adalah *stress* yang dihasilkan dari penggabungan komponen-komponen tersebut harus dibawah batas tertentu karena apabila melebihi batas tersebut akan mengakibatkan *fracture* pada komponen-komponen tersebut (diakibatkan karena komponen komposit tersebut tidak terlalu *ductile*). Gambar 16 memperlihatkan metode analisis variasi tersebut. Gambar 16a memperlihatkan komponen dan produk rakitan dari komponen komposit tersebut. gambar 16b memperlihatkan titik-titik dimana *stress* hasil dari perakitan tersebut sangat besar. Dan gambar 16c, memperlihatkan contoh distribusi *stress* pada titik-titik tersebut setelah dilakukan sejumlah simulasi analisis variasi pada komponen-komponen tersebut.

Gambar 16: Analisis variasi yang mempertimbangkan *stress* dari perakitan komponen-komponennya [Soderberg et al 2015].

Terkait dengan material komposit, [Bellini et al 2017] telah melakukan studi untuk mengetahui besarnya efek *spring-back* dari komponen tersebut. Pada studi mereka, mereka mencoba menganalisis besarnya deviasi sudut *flange-to-flange* (siku) dari komponen tersebut. Gambar 17 memperlihatkan proses dari studi untuk mengetahui besarnya deviasi sudut tersebut pada sebuah material komposit CFRP. Studi tersebut menggunakan instrumen pengukuran CMM untuk mengetahui besarnya deviasi sudut tersebut ditambah dengan hasil simulasi dengan sebuah software FEM. Hasil dari studi mereka adalah, deviasi sudut karena efek *spring-back* pada sebuah material komposit dapat

mencapai $0.58^\circ - 2^\circ$. Nilai ini tentu saja sangat berguna untuk melakukan analisis rantai variasi untuk perakitan komponen-komponen berbahan dasar komposit.

Gambar 17: (kiri) contoh sebuah material komposit yang ditekuk, (tengah) proses pengukuran deviasi *spring-back* dari komponen tersebut, (kanan) hasil simulasi deviasi *spring-back* dari komponen tersebut [Bellini et al 2017].

10.5 Sistem otomatis untuk mengekstrak data dan analisis GD&T dari sebuah model CAD

Tantangan untuk melakukan analisis rantai variasi yang kompleks adalah bagaimana **secara otomatis** fitur-fitur dari komponen-komponen yang terlibat dalam sebuah proses perakitan dapat diidentifikasi, KC-KC dari perakitan tersebut dapat diidentifikasi, dan alokasi dan analisis rantai variasi (toleransi) pada produk *rigid* dapat dilakukan. [Armillotta 2013] telah mengusulkan sebuah metode komprehensif yang dapat melakukan hal-hal tersebut secara otomatis (gambar 18). Metode yang digunakan adalah dengan membaca data-data dari geometri dan proses perakitan komponen-komponen yang terlibat pada suatu proses perakitan. Metode ini diaplikasikan pada tahap disain suatu produk rakitan.

Gambar 18: Proses otomatisasi analisis rantai variasi dari tahapan spesifikasi, alokasi sampai tahap analisis rantai variasi (toleransi) [Armillotta 2013].

Selain itu, visualisasi dari variasi-variasi KC yang dianalisis sangat penting dan berguna untuk memberikan informasi yang cepat dan tepat pada seorang disainer untuk dapat mengetahui apakah disain, dimensi dan toleransi dari komponen-komponen yang dibuatnya sudah tepat atau tidak. [Soderberg et al 2016] telah mengembangkan sebuah software yang dapat melakukan analisis rantai variasi *body* sebuah mobil dan dapat memvisualisasikan variasi-variasi pada KC-KC yang ingin dianalisis (gambar 19).

Gambar 19: Sebuah software untuk mensimulasikan dan mengvisualisasikan variasi dari komponen-komponen *non-rigid body* sebuah mobil [Soderberg et al 2016].

10.6 GD&T dan analisis rantai variasi dari sebuah produk *additive manufacturing* (AM)

Tatangan lain dari GD&T adalah bagaimana GD&T dapat juga memberikan spesifikasi toleransi yang tepat dan dapat dengan tidak ambigu merepresentasikan keinginan seorang disainer produk untuk komponen-komponen yang dimanufaktur dengan proses *additive manufacturing* (AM). Hal ini disebabkan karena proses AM merupakan proses yang sangat berbeda dengan proses manufaktur konvensional sebelumnya, seperti *casting*, *milling* dan *forming*.

Tantangan tersebut adalah misalnya, bagaimana spesifikasi GD&T dapat merepresentasikan bagaimana sebuah komponen yang akan dibuat dengan metode AM harus diorientasikan pada saat proses “*printing*” nya. Proses orientasi ini sangat mempengaruhi bagaimana struktur *support* komponen tersebut akan dibuat dan akan sangat mempengaruhi hasil kekasaran permukaan komponen tersebut (lihat gambar 20).

Gambar 20: Tantangan spesifikasi GD&T untuk dapat mengakomodasi informasi bagaimana orientasi sebuah komponen akan di-*print* [Ameta et al 2015].

Tantangan lainnya adalah bagaimana GD&T dapat memberikan spesifikasi toleransi yang jelas untuk komponen-komponen yang tidak beraturan atau kompleks seperti yang diperlihatkan pada gambar 21. Pada gambar 21, dengan menggunakan metode AM, hampir semua benda dengan bentuk yang sangat kompleks dapat dibuat. Pada gambar 21, karena benda tersebut kompleks, maka hampir tidak ada sebuah permukaan datar atau fitur yang dapat dijadikan sebagai datum. Contoh lainnya adalah bagaimana GD&T dapat diaplikasikan untuk sebuah struktur *lattice* dan sebuah struktur dengan bentuk struktur internal yang kompleks.

Gambar 21: Bagaimana spesifikasi GD&T untuk produk-produk yang kompleks dan tidak beraturan [Witherell 2016].

Tantangan lain yang tidak kalah penting adalah bagaimana merepresentasikan variasi geometri pada sebuah komponen AM dengan bentuk yang sangat kompleks. [Moroni et al 2017] telah melakukan studi dan mengusulkan sebuah metode untuk dapat merepresentasikan variasi dan untuk memverifikasi geometri dari sebuah toleransi komponen yang berbentuk kompleks. Metode tersebut adalah dengan merepresentasikan komponen-komponen yang berbentuk kompleks dengan *voxel*, yaitu pixel dalam bentuk 3D (gambar 22). *Voxel* tersebut adalah elemen yang sangat kecil yang dapat merepresnetasikan sebuah bentuk yang kompleks. Nilai dari variasi-variasi geometri dapat dikuantifikasi dengan menghitung jumlah dan ukuran *voxel-voxel* tersebut.

Gambar 22: (kiri) Sebuah disain komponen yang akan dibuat dengan proses AM dan (kanan) representasi variasi berbasis *voxel* [Moroni et al 2017].

10.7 GD&T dan analisis rantai variasi pada industri penerbangan (*aerospace*)

Disain fitur perakitan dan analisis rantai variasi (toleransi) untuk komponen pesawat terbang sangatlah penting. Setiap komponen pesawat terbang, misalnya sebuah komponen sayap dan mesin jet, deviasi geometri dari komponen tersebut akan sangat mempengaruhi performansi dari sebuah pesawat terbang. Bukan hanya performansi, variasi

geometri akan sangat mempengaruhi reliabilitas komponen tersebut pada khususnya dan reliabilitas pesawat tersebut secara keseluruhan. Maka dari itu, setiap disain, proses manufaktur dan proses perakitan sebuah komponen pesawat terbang harus direncanakan dengan benar dan matang.

Seperti pada disain komponen-komponen sebuah *body* mobil dan komponen *rigid* lainnya, fitur-fitur *mate* harus didisain secara benar untuk mengurangi penggunaan *fixture* pada proses perakitan komponen-komponen pesawat terbang yang akan mengurangi secara signifikan kompleksitas dari proses perakitan tersebut dan juga untuk mengurangi variasi yang muncul dari proses perakitan tersebut [Bacharoudis et al 2018]. Gambar 23 memberikan sebuah contoh bagaimana fitur-fitur *mate* berupa *slot* dan *hole* digunakan secara tepat untuk mendisain komponen-komponen pesawat terbang untuk menjamin nilai KC: jarak *gap* antara *skin* bagian atas dan bawah (lihat gambar 23) tetap dalam toleransi yang diinginkan.

Selain itu, analisis rantai variasi yang digunakan juga harus mempertimbangkan jejak atau “signature/fingerprint” yang dihasilkan dari suatu proses manufaktur yang membuat komponen-komponen tersebut [Ascione & Polini 2017]. Sebagai contoh, aplikasi yang paling sering ditemukan adalah bagaimana suatu proses *drilling* dan permesinan dapat mempengaruhi variasi lokasi dari fitur-fitur lubang yang sering digunakan sebagai fitur *mate* dan sangat vital untuk menjaga variasi dari suatu proses perakitan [Polini & Moroni 2015, Ascione et al 2010].

Gambar 23: Contoh pentingnya penggunaan fitur *mate* untuk perakitan sebuah komponen pesawat terbang [Bacharoudis et al 2018].

Contoh lainnya pentingnya penggunaan fitur *mate* pada sebuah disain produk komponen adalah disain ekor sebuah helikopter (gambar 24). Gambar 24a memperlihatkan secara utuh hasil rakitan dari ekor helikopter tersebut dan gambar 24b memperlihatkan setiap komponen pembentuk produk ekor helikopter tersebut. Gambar 24c dan gambar 24d memperlihatkan definisi dari KC 1 dan KC 2 yang ingin dikontrol dari proses perakitan ekor helikopter tersebut. KC 1 adalah paralelisme antara *rib* dan *spar* dan KC 2 adalah *perpendicularity* aksis ekor helikopter tersebut dengan permukaan datar pada *bulkhead*. Dari kedua KC tersebut, dapat dilihat bahwa komponen *rib* tersebut merupakan komponen yang paling vital pembentuk dari rakitan ekor helikopter tersebut.

Gambar 24e memperlihatkan perbedaan antara disain awal dan disain baru dari komponen *rib* tersebut. Pada disain awal, fitur *mate* dari komponen *rib* tersebut hanya berjumlah dua buah di salah satu bagian ujung *rib* tersebut. hal ini menyebabkan, penempatan dan orientasi *rib* terhadap komponen-komponen lainnya tidak akurat dan mengakibatkan variasi yang besar terhadap kedua KC tersebut. Solusinya adalah, dengan menambahkan dua buah fitur *mate* yang salah satunya ditempatkan di ujung lainnya dari *rib* tersebut (gambar 24e). Dengan adanya fitur *mate* tambahan tersebut, penempatan dari *rib* tersebut dalam proses perakitannya (*assembly*) dapat lebih deterministik dan dapat mengurangi secara signifikan variasi dari kedua KC tersebut.

Gambar 24: (a) Bentuk rakitan sebuah ekor helikopter, (b) komponen-komponen pembentuk rakitan tersebut, (c) KC 1 dari rakitan tersebut: *Paralellisme*, (d) KC 2 dari rakitan tersebut: *Perpendicularity*, (e) modifikasi disain untuk memenuhi kC1 dan KC 2 tersebut [Corrado & Polini 2016].

Contoh kasus berikutnya memperlihatkan dengan lebih jelas efek signifikan dari variasi-variasi geometri komponen-komponen pesawat terbang terhadap fungsi dan reliabilitas komponen-komponen tersebut. Gambar 25 memperlihatkan contoh kasus dari sebuah komponen *rear turbine* dari sebuah mesin jet *turbo-fan* [Forslund et al 2016, Forslund et al 2018]. Gambar 25a dan gambar 25b memperlihatkan posisi dari *rear turbine* tersebut pada keseluruhan rangkain mesin jet tersebut (berwarna merah). Gambar 25c memperlihatkan analisis detil salah satu bagian dari *rear turbine* tersebut. Gambar 25d dan gambar 25e memperlihatkan efek dari variasi geometri *rear turbine* tersebut terhadap aliran udara yang melewatinya dan terhadap distribusi *stress* pada komponen tersebut. Pada gambar 25d, dapat dilihat bahwa variasi kecil dari geometri sudu *rear turbine* tersebut mengakibatkan berubahnya bentuk aliran udara yang melewatinya. Demikian pula pada gambar 25e, dapat dilihat bahwa variasi *stress* pada komponen tersebut sangat sensitif terhadap variasi geometri dari *rear turbine* tersebut.

Gambar 25: (a) Skema sebuah mesin jet turbo-fan pesawat dan posisi dari komponen yang dianalisis (warna merah), (b) Komponen yang dianalisis pada berbagai macam ukuran mesin jet, (c) *cross-section* dari komponen yang dianalisis, (d) efek dari variasi geometri pada aliran udara yang melewatinya (perbedaan aliran antara komponen tanpa dan dengan deviasi geometri ditunjukkan dengan warna biru muda), (e) Efek dari distribusi *stress* karena deviasi geometri [Forslund et al 2016, Forslund et al 2018].

Gambar 26: Skema produk rakitan *flaperon* sebuah sayap pesawat terbang dan dimensi dan toleransi dari komponen *rib* (atas) dan *skin* (bawah) dari *flaperon* tersebut [Polini et al 2007].

Gambar 26 memperlihatkan contoh lain dari disain dan perakitan sebuah komponen sayap pesawat terbang [Polini et al 2007]. Pada gambar 26, diperlihatkan disain dari rakitan sayap tersebut beserta nilai-nilai dimensi dan toleransi komponen-komponen pembentuk sayap tersebut, yaitu *skin* dan *rib*. Pada rakitan sayap tersebut, hal yang penting adalah mengontrol bentuk profil dari *skin* sayap tersebut. Hal ini sangatlah mempengaruhi bentuk aliran udara melewati sayap tersebut. Gambar 27 memperlihatkan efek dari variasi profil dari *skin* tersebut terhadap bentuk aliran udara yang melewati sayap tersebut. Pada gambar 27, dapat dilihat bahwa apabila deviasi profil dari *skin* tersebut terlalu besar, aliran udara pada sayap tersebut menjadi turbulen dan mengurangi daya angkat pesawat tersebut yang akan menyebabkan *stall* pada pesawat tersebut.

Gambar 27: Efek yang diakibatkan karena variasi geometri dari flaperon tersebut [Polini et al 2007].

Dari berbagai macam contoh dalam bab ini, dapat terlihat bahwa proses perakitan merupakan hal yang sangat kompleks dan vital untuk menghasilkan suatu produk yang berkualitas. Untuk mendapatkan produk yang berkualitas tersebut, disain dari komponen-komponen produk, proses manufakturnya, proses perakitannya sampai dengan proses inspeksinya haruslah tepat dan efisien. Analisis rantai variasi (toleransi) adalah salah satu alat yang sangat penting yang dapat digunakan untuk memverifikasi disain sebuah komponen dan proses perakitannya serta menganalisis efek dari proses manufaktur dan inspeksi kualitas komponen tersebut. Bab ini diharapkan dapat memberikan motivasi ide-ide baru dan membuka wawasan mengenai luasnya bidang pengetahuan tentang hal ini.

Daftar pustaka

- Adams JD, Whitney DE 2001 Application of screw theory to constraint analysis of mechanical assemblies joined by features *ASME J. Mech. Des.* **123** 26-32.
- Ameta G, Lipman R, Moylan S, Witherell P 2015 Investigating the role of geometric dimensioning and tolerancing in additive manufacturing *ASME J. Mech. Des.* **137** 111401.
- Armillotta A 2013 A method for computer-aided specification of geometric tolerances *Comp. Aided. Des (CAD)* **45** 1604-1616.
- Armillotta A, Moroni G, Polini W, Semeraro Q 2010 A unified approach to kinematic and tolerance analysis of locating fixtures *ASME J. Comp. Inf. Sci. Eng* **10** 021009.
- Armillotta A, Semeraro Q 2013 Critical operating conditions for assemblies with parameter-dependent dimensions *Proc. IMechE Part B: J Engineering Manufacture* **227** 735-744.
- Ascione R, Polini W, Semeraro Q 2010 Process signature modelling for tolerance analysis *ASME J. Comp. Inf. Sci. Eng.* **10** 021006.
- Ascione R, Polini W 2018 Tolerance analysis of assemblies with sculptured components in composites materials: comparison between an analytical method and a simulation approach *Ass. Auto.* **38** 142-157.
- Bacharoudis K, Bakker OJ, Popov A, Ratchev S 2018 Trade-off study of a variation aware determinate wing assembly against a traditional assembly strategy *MATEC Web. Conf.* **233** 00008.
- Bellini C, Sorrentino L, Polini W, Corrado A 2017 Spring-in analysis of CFRP thin laminates: numerical and experimental results *Comp. Struct.* **173** 17-24.
- Bi ZM, Zhang WJ 2001 Flexible fixture design and automation: review, issues and future directions *Int. J. Prod. Res.* **39** 2867-2894
- ASME Y14.5 2009 Dimensioning and tolerancing *American Society of Mechanical Engineering*.
- ASME Y14.5-1 1994 Mathematical definition of dimensioning and tolerancing principles *American Society of Mechanical Engineering*.
- Bolton W 2015 *Programmable Logic Controllers* (Newnes: UK)
- Craig JJ 2005 *Introduction to robotics: mechanics and control* (Prentice Hall: USA).
- Corrado A, Polini W 2016 Assembly design in aeronautic field: From assembly jigs to tolerance analysis *Proc. IMech Part B: J. Eng. Manuf.* **231** 2652-2663.
- Edwards KL 2002 Towards more strategic product design for manufacture and assembly: priorities for concurrent engineering *Materials and Design* **23** 651-656.
- Fischer BR 2011 *Mechanical tolerance stackup and analysis* (CRC Press: Boca Raton, Florida).
- Folley JD, Dam AV, Feiner SK, Hughes JF, Phillips RL 1994 *Introduction to computer graphics* (Addison-Wesley: New York).
- Forslund A, Madrid J, Loof J, Soderberg R 2016 Robust design of aero engine structures: Transferring from error data

when mapping out design spaces for new turbine components *Procedia CIRP* **43** 47-51.

Forslund A, Madrid J, Soderberg R, Isaksson O 2018 Evaluating how functional performance in aerospace components is affected by geometric variation *SAE Int. J. Aerosp.* **11** 5-26.

Gameros A, Lowth S, Axinte D, Nagy-Sochacki A, Craig O, Siller HR 2017 State-of-the-art systems for the manufacture and assembly of rigid components: A review *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **123** 1-21.

Hermansson T, Carlson JS, Bjorkenstam S, Soderberg R 2013 Geometric variation simulation and robust design for flexible cables and hoses *Proc. IMech. Part B: J. Eng. Manuf.* **227** 681-689.

Hines WW, Montgomery DC, Goldsman DM, Borror CM 2003 *Probability and statistics in engineering 4th edition* (John Wiley & Sons: New York).

Hoffenson S, Dagman A, Soderberg R 2014 Tolerance optimisation considering economic and environmental sustainability *J. Eng. Des.* **25** 367-390.

ISO 1101 2017 Geometrical product specification (GPS) – Geometric tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out *International Organization for Standardization*.

ISO 14405-1 2016 Geometrical product specification (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 1: Linear sizes *International Organization for Standardization*.

ISO 14405-2 2011 Geometrical product specification (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 2: Dimensions other than linear sizes *International Organization for Standardization*.

ISO 14405-3 2016 Geometrical product specification (GPS) – Dimensional tolerancing – Part 3: Angular sizes *International Organization for Standardization*.

Lasi H, Fettke P, Kemper H, Feld T, Hoffmann M 2015 Industry 4.0 *Buss. Infor. Sys. Eng.* **64** 239-242.

Mantripragada R, Whitney D 1998 The datum flow chain: a systematic approach to assembly design and modeling *Res. Eng. Des.* **10** 150-165.

Mantripragada R, Whitney D 1999 Modeling and controlling variation propagation in mechanical assemblies using state transition models *IEEE Trans. Robot. Auto.* **15** 124-140.

Montgomery DC 2001 *Design and analysis of experiments 5th edition* (John Wiley & Sons: New York).

Montgomery DC, Runger GC 2003 *Applied statistics and probability for engineers 3rd edition* (John Wiley & Sons: New York).

Morse E, Dantan JY, Anwer N, Soderberg R, Moroni G, Qureshi A, Jiang X, Mathieu L 2018 Tolerancing: managing uncertainty from conceptual design to final product *Ann. CIRP* **67** 695-717.

Moroni G, Petro S, Polini W 2017 Geometrical product specification and verification in additive manufacturing *Ann. CIRP* **66** 157-160.

Peschard G, Whitney DE Cost and Efficiency Performance of Automobile Engine Plants *Sumber* https://www.researchgate.net/publication/228818488_Cost_and_Efficiency_Performance_of_Automobile_Engine_Plants (diakses: 20 Juni 2019).

Polini W, Giovanni M 2015 Manufacturing signature for tolerance analysis *ASME J. Comp. Inf. Sci. Eng.* **15** 021005.

Polini W, Marrocu M, D'Ambrosio L 2007 Tolerance analysis of free-form surfaces in composite material *ASME J. Comp. Inf. Sci. Eng.* **7** 31-43

Schlather F, Hoesl V, Oefele F, Zaeh MF 2018 Tolerance analysis of compliant, feature-based sheet metal structures for fixtureless assembly *J. Manuf. Sys.* **49** 25-35.

- Syam WP 2015 *Uncertainty evaluation and performance verification of a 3D geometric focus-variation measurement* PhD Thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy.
Link: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/100382> (free download).
- Syam WP 2018 *Metrologi Manufaktur: Pengukuran geometri dan analisis ketidakpastian* INA-Rxiv DOI: 10.17605/OSF.IO/ZDFXM .
Link: <https://osf.io/preprints/inarxiv/zdfxm/> (free download)
- Soderberg R, Lindkvist L 1999 Computer aided assembly robustness evaluation *J. Eng. Des.* **10** 165-181.
- Soderberg R, Lindkvist L 2002 Stability and seam variation analysis for automotive body design *J. Eng. Des.* **13** 173-187.
- Soderberg R, Warmefjord K, Lindkvist L 2015 Variation simulation of stress during assembly of composite parts *Ann. CIRP* **64** 17-20.
- Soderberg R, Lindkvist L, Warmefjord K, Carlson JS 2016 Virtual geometry assurance process and toolbox *Procedia CIRP* **43** 3-12.
- Warmefjord K, Carlson JS, Soderberg R 2016 Controlling geometrical variation caused by assembly fixtures *ASME J. Comp. Inf. Sci. Eng.* **16** 011007.
- Whiterell P, Herron J, Ameta G 2016 Towards annotations and product definitions for additive manufacturing *Procedia CIRP* **43** 339-344.
- Whitney DE, Mantripragada R, Adams JD, Rhee SJ 1999 Designing assemblies *Res. Eng. Des.* **11** 229-253.
- Whitney DE 2004 *Mechanical assemblies: Their design, manufacture, and role in product development* (Oxford University Press: New York).
- Yan X, Ballu A 2018 Tolerance analysis using skin model shapes and linear complementarity conditions *J. Manuf. Sys.* **48** 140-156.
- Zhu Z, Qiao L, Anwer N 2016 An improved tolerance analysis method based on skin model shapes of planar parts *Procedia CIRP* **56** 237-242.

Biografi penulis

Wahyudin P. Syam dilahirkan di Patani-Gebe, Maluku, Indonesia, pada tahun 1984. Beliau mendapatkan gelar Ph.D. dalam bidang metrologi manufaktur di Politecnico di Milano, Milan, Italia, pada Januari 2015 dan melanjutkan riset *post-doctoral* di tempat yang sama sampai Juni 2015. Disertasi Ph.D. beliau adalah mengenai verifikasi performansi dan analisis ketidakpastian pada mesin pengukur koordinat (CMM) berbasis optik. Beliau menyelesaikan Ph.D di bawah supervisi Prof. Giovanni Moroni dan Prof. Stefano Petro. Selama menyelesaikan Ph.D., beliau mendalami berbagai macam standar internasional yang berhubungan dengan pengukuran dimensi dan geometri, seperti ISO 10360, ISO 15530, ISO 1101 dan ASME Y14.5. Selain metrologi, beliau juga meneliti dan mendalami bidang *probabilistic machine learning*, *additive manufacturing* dan desain inovatif.

Sejak Juli 2015, beliau bekerja sebagai peneliti di *Manufacturing Metrology Team* (MMT) dan *Nottingham Advanced Robotic Laboratory* (NARLy) di University of Nottingham, United Kingdom. Beliau bekerja dibawah supervisi Prof. Richard Leach dan Prof. David Branson III. Beliau sekarang sedang mendesain, mengembangkan serta memproduksi sebuah CMM untuk pengukuran berskala mikro berbasis prinsip *Information-Rich Metrology* (IRM) untuk pengukuran geometri dan tekstur permukaan. Sebagai tambahan, beliau juga meneliti tentang desain inovatif sebuah struktur berbasis *lattice* untuk digunakan sebagai struktur metrologi untuk mengisoasi atau mengurangi gangguan vibrasi. Di grup NARLy, topik riset beliau adalah *probabilistic machine learning*. Secara umum, topik riset beliau adalah pengukuran geometri dan tekstur permukaan, *machine learning*, desain instrumen presisi dan *additive manufacturing*.

Wahyudin P. Syam adalah anggota EUSPEN (*European Society for Precision Engineering and nanotechnology*) dan sebagai peneliti terafiliasi CIRP (*College International Pour la Recherche en Productique*) periode 2016-2019.

Toleransi Dimensi dan Geometri

Analisis rantai variasi dalam proses perakitan produk