

PENGEMBANGAN MODEL OPTIMISASI PERENCANAAN PROSES BERBASIS FITUR PADA PRODUK ASSEMBLY

Nilda Tri Putri^{*)}

ABSTRACT

Tolerance design affects the quality and the robustness of the product. Tolerance design is mostly aimed at selecting best tolerance limit that minimizes total cost. This can be done by balancing the quality loss caused by variance on product performance and cost to control variances.

This paper is aimed at selecting tolerance limits for assembly components by minimizing manufacturing and quality loss costs simultaneously. This paper explores all alternatives of machining processes of all features on the components. To find solution of this problem, zero-one programming with LINGO 8.0 software is used. The result shows that a stringent limit implies to the use of machine with a highest process capability, which also results in higher total production cost. The result of this tolerance synthesis will be used as a recommendation for manufacturing process.

Key Words: tolerance, quality loss, optimization

PENDAHULUAN

Pada proses manufaktur, material akan mengalami perubahan fisik dan geometri menjadi produk atau komponen yang siap untuk dirakit. Karakteristik fungsional komponen baru dapat diketahui setelah komponen tersebut dirakit. Oleh karena adanya variasi yang terjadi pada proses produksi dan material, tidak ada proses manufaktur yang dapat menghasilkan suatu komponen dengan geometri yang sempurna. Artinya, variasi merupakan sifat umum bagi produk atau komponen yang dihasilkan oleh suatu proses produksi. Hal ini menuntut kesadaran perancang produk bahwa suatu toleransi harus diperhitungkan/dirancang pada waktu spesifikasi produk ditetapkan.

Tujuan desain toleransi adalah untuk menentukan batas-batas maksimum dan minimum penyimpangan karakteristik produk yang disebabkan oleh ketidaksempurnaan proses produksi. Permasalahan penetapan toleransi akan

^{*)} Dosen Jurusan Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Andalas

menjadi kompleks apabila ditinjau dari segi biaya dan kemampuan proses produksi. Toleransi mempengaruhi kemampuan untuk merakit produk akhir, dan dipengaruhi oleh biaya produksi, pemilihan proses, *tooling*, biaya *set up*, keterampilan operator, inspeksi dan pengukuran, *scrap* dan *rework*. Selain itu toleransi juga secara langsung mempengaruhi performansi *engineering* dan kekokohan desain (*robustness of design*).

Zhang dan Wang (1998) menetapkan dua jenis toleransi, yaitu toleransi desain dan toleransi proses manufaktur. Toleransi desain memiliki dua domain pengertian yang berbeda yaitu toleransi desain dari sisi perancang produk (*designer*) dan toleransi desain dari sisi perancang proses. Dari sisi perancang produk, toleransi desain merupakan variabel yang berhubungan dengan fungsional produk. Sedangkan dari sisi perencana proses, toleransi desain merupakan informasi yang mendasari pemilihan proses pemesinan (beserta parameter pemesinan) yang berhubungan langsung dengan biaya manufaktur. Toleransi proses manufaktur ini ditetapkan dalam suatu rencana proses untuk fabrikasi komponen (*part*).

Di satu sisi, proses penentuan toleransi pada suatu produk dilakukan saat perancangan produk, yaitu di mana informasi toleransi tersebut akan disertakan dengan informasi dimensi pada gambar kerja yang kemudian akan ditindaklanjuti pada perencanaan proses dan proses manufaktur. Penetapan toleransi merupakan suatu prosedur yang mendistribusikan toleransi *assembly*, atau mendistribusikan toleransi desain komponen akhir pada toleransi proses yang berhubungan. Toleransi *assembly* diketahui dari kebutuhan rancangan dan didistribusikan pada semua komponen dengan beberapa cara. Pemodelan analitik dari *assembly* menyediakan suatu basis kuantitatif untuk mengevaluasi variasi rancangan. Toleransi *assembly* biasanya telah ditetapkan berdasarkan kepada kebutuhan performansi, sementara toleransi komponen sangat erat hubungannya dengan kemampuan proses produksi. Kebanyakan permasalahan spesifikasi toleransi yang umumnya dihadapi oleh perancang adalah bagaimana mendistribusikan toleransi *assembly* yang ditetapkan pada komponen-komponen *assembly*.

Di sisi lain, penentuan nilai toleransi kualitas produk seringkali dilakukan melalui *trade-off* antara biaya kerugian kualitas (*quality loss*) dan biaya

manufaktur. Fungsi *loss* menggambarkan biaya yang timbul di antara produsen dan konsumen akibat penetapan karakteristik kualitas tertentu pada produk. Penetapan toleransi yang longgar mengakibatkan variabilitas yang besar pada karakteristik produk (kualitas rendah) dan biaya manufaktur pun akan rendah (*quality loss* yang tinggi). Sebaliknya penetapan toleransi yang ketat mengakibatkan variabilitas yang rendah pada karakteristik produk (kualitas baik), namun biaya manufaktur menjadi tinggi (*quality loss* yang rendah). Optimisasi dapat dilakukan untuk menentukan toleransi yang optimal dengan mempertimbangkan kerugian konsumen (*consumer loss*) dan biaya manufaktur. Keputusan mengenai toleransi seharusnya juga mempertimbangkan keterbatasan kemampuan dari proses manufaktur yang dibutuhkan, selain permasalahan fungsional dan *assemblability constraint* (Hong, 2002).

Penelitian terdahulu tentang penetapan toleransi hanya mempertimbangkan salah satu fungsi tujuan saja yaitu biaya manufaktur atau biaya kerugian kualitas. Oleh karenanya toleransi optimal yang diperoleh hanya dari salah satu komponen biaya tersebut. Pada makalah ini dilakukan pengembangan algoritma optimalisasi penetapan toleransi dengan mempertimbangkan biaya manufaktur dan biaya kerugian kualitas agar didapatkan total biaya produksi yang minimum, khususnya untuk produk *assembly*. Algoritma yang dikembangkan digunakan untuk menentukan batas toleransi *assembly* yang akan meminimasi total biaya yang dikeluarkan dengan cara menyeimbangkan *quality loss* yang disebabkan oleh variasi pada performansi produk dengan biaya yang dikeluarkan untuk pengendalian variasi ini.

Makalah ini bertujuan untuk menentukan batas-batas toleransi untuk komponen-komponen *assembly* dengan meminimasi biaya manufaktur dan biaya *quality loss* secara simultan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan atas beberapa tahapan yang harus dilalui yaitu pengembangan formulasi model perencanaan proses dan tahapan pengimplementasian model dengan menggunakan contoh numerik. Model yang dikembangkan pada makalah ini bertujuan untuk memilih alternatif proses yang

mampu memberikan nilai toleransi yang dapat meminimalkan kedua biaya yaitu biaya manufaktur dan biaya kerugian kualitas. Model dasar yang dijadikan acuan dalam pengembangan formulasi model adalah model Ye dan Salustri (2000).

1. Pengembangan Model

Jika sebuah rancangan proses dapat dianggap sebagai sebuah produk yang terdiri dari Nr komponen maka skenario rancangan proses yang dihasilkan merupakan fungsi dari komponen rancangan proses yang dipilih. Suatu komponen dipandang sebagai kumpulan beberapa fitur (p_i) yang memiliki ketergantungan satu dengan yang lain, dan setiap fitur dapat dikerjakan dengan sejumlah Mij alternatif proses pemesinan.

Skenario rancangan proses yang dipilih adalah skenario yang dapat memenuhi nilai toleransi proses yang mampu meminimalkan total biaya produksi yang terdiri dari biaya manufaktur dan biaya kerugian kualitas, dengan batasan toleransi adalah toleransi produk *assembly*. Skenario rancangan proses yang optimum adalah kombinasi alternatif proses yang dipilih pada setiap komponen rancangan proses atau dinotasikan dengan $R = [x_{1jk^*}, x_{2jk^*}, \dots, x_{Njk^*}]$, di mana x_{ijk^*} menunjukkan indeks alternatif proses ke- k yang dipilih untuk memproses komponen ke- i untuk fitur ke- j . Komponen rancangan proses memiliki sejumlah Mij alternatif proses atau $x_i \in \{x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijMij}\}$. x_{ijk} merupakan variabel keputusan yang menunjukkan alternatif proses ke- k yang dapat dipilih dari sejumlah alternatif proses untuk memproses komponen ke- i untuk fitur ke- j .

Setiap alternatif proses memiliki nilai karakteristik berupa nilai biaya, kualitas, dan waktu proses pemesinan atau $[c_{ijk}, t_{ijk}, w_{ijk}]$. Nilai karakteristik tersebut akan membentuk kriteria performansi skenario rancangan proses yang dihasilkan. Karakteristik kualitas produk akhir (y) skenario rancangan proses merupakan fungsi karakteristik kualitas dari tiap komponen rancangan proses R , atau $y = f(R)$.

Tujuan pengembangan model adalah memilih satu alternatif proses dari sejumlah alternatif proses yang dimiliki oleh setiap komponen ke- i untuk fitur ke- j (x_{ijk^*}), sehingga dihasilkan skenario rancangan proses yang optimum. x_{ijk} bernilai 1 untuk indeks alternatif proses ke- k yang dipilih dan lainnya bernilai 0. Kriteria

biaya digunakan dalam mencapai tujuan optimalisasi perancangan proses (optimalisasi penetapan nilai toleransi) yaitu biaya produksi yang minimum. Spesifikasi produk akhir berupa spesifikasi kualitas toleransi desain/toleransi *assembly* ($\tau_d \pm t_d$), di mana τ_d dan t_d masing-masing secara berurutan adalah nilai target kualitas dan nilai toleransi kualitas desain (toleransi fungsional). Spesifikasi tersebut berfungsi sebagai batasan dalam model ini.

1.1 Kriteria Fungsi Tujuan

Biaya produksi untuk komponen mencakup biaya-biaya yang berkaitan dengan proses manufaktur dan biaya kerugian kualitas. Biaya manufaktur dihitung dengan mengalikan waktu proses pemesinan setiap alternatif proses dengan biaya pemesinan (Rp/jam atau Rp/menit). Untuk menghitung waktu proses pemesinan terlebih dahulu ditentukan parameter pemesinan di antaranya: kecepatan *spindle*, kecepatan makan, kedalaman potong, dan kecepatan potong. Data-data ini bisa didapatkan dari *machining data handbook*. Perhitungan keseluruhan biaya manufaktur proses dari skenario rancangan proses yang dipilih (*MR*) dapat ditulis:

$$MR = \sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{Mij} c_{ijk} w_{ijk} (x_{ijk}) \dots\dots\dots(1)$$

Biaya kualitas merupakan ukuran biaya kerugian kualitas yang akan dibebankan ke konsumen akibat variansi kualitas. Kerugian kualitas didefinisikan sebagai kerugian karena karakteristik kualitas menyimpang dari nilai target (Jeang, 1997). Perhitungan biaya kerugian kualitas dilakukan dengan menggunakan metode pendekatan fungsi kerugian kuadratik Taguchi. Kerugian kualitas Taguchi ditetapkan sebagai suatu ekspresi kuadratik yang terkait dengan kerugian terhadap variasi dari suatu karakteristik produk. Perhitungan besar biaya kerugian kualitas komponen ke-*i* untuk fitur ke-*j* dapat ditulis:

$$L(x_{ij}) = A_{ij} (\mu_{ij} - \tau_{ij})^2 \dots\dots\dots(2)$$

Persamaan 2 menunjukkan persamaan kerugian kualitas komponen ke-*i*, fitur ke-*j* secara individu, dan nilai ekspektasi hasil pengukuran karakteristik kualitas komponen ke-*i*, fitur ke-*j* adalah (μ_{ij}), maka nilai ekspektasi *loss* untuk setiap komponen ke-*i*, fitur ke-*j* dapat dituliskan menjadi:

$$E[L(x_{ij})] = A_{ij} [(\mu_{ij} - \tau_{ij})^2 + \sigma_{ij}^2] \dots\dots\dots(3)$$

Jika diasumsikan bahwa nilai ekspektasi hasil pengukuran karakteristik kualitas komponen ke- i untuk fitur ke- j atau nilai rata-rata komponen ke- i untuk fitur ke- j (μ_{ij}) adalah nilai target kualitas yang diinginkan dari komponen ke- i , fitur ke- j (τ_{ij}) maka perhitungan ekspektasi biaya kerugian kualitas komponen ke- i untuk fitur ke- j dapat ditulis:

$$E[L(x_{ij})] = A_{ij} \sigma_{ij}^2 \dots\dots\dots(4)$$

Persamaan 4 adalah untuk kasus *nominal is the best* di mana nilai tengah proses = nilai target. Jika ditetapkan $C_p = 1$, akan didapat hubungan antara variansi dengan toleransi $\sigma_{ij} = t_{ij} / 3$, sehingga ekspektasi biaya kerugian kualitas dapat ditulis kembali dengan:

$$E [L (x_{ij})] = \frac{A_{ij}}{9} t_{ij}^2 \dots\dots\dots(5)$$

Dengan cara yang sama, besar ekspektasi biaya kerugian kualitas produk akhir $E[L(y)]$ dapat dihitung. $L(y)$ dapat dinyatakan dengan $L(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Nj})$. Jika QR digunakan untuk menyatakan nilai ekspektasi keseluruhan biaya kerugian kualitas produk akhir, maka QR dapat ditulis:

$$QR = E[L(y)] = A_p \sigma_p^2 \dots\dots\dots(6)$$

di mana σ_p^2 adalah akumulasi nilai variansi tiap-tiap karakteristik kualitas komponen rancangan proses. σ_p^2 dapat dihitung dengan menggunakan model statistik. Asumsi yang digunakan pada model ini adalah karakteristik kualitas hasil pengukuran berdistribusi normal dan masing-masing karakteristik kualitas dari komponen rancangan bersifat independen satu sama lain dan menggunakan ekspansi Taylor untuk pendekatan fungsi karakteristik kualitas non-linear (Zhang, 1997).

Perhitungan σ_p^2 sebagai fungsi dari variansi dari komponen rancangan dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\sigma_p^2 = \sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{P_i} \left(\frac{\partial y}{\partial x_{ij}} \Big|_{\tau_{x_{ij}}} \right)^2 \sigma_{ij}^2 \dots\dots\dots(7)$$

dimana variansi dari karakteristik kualitas produk akhir dipengaruhi oleh variansi dari masing-masing komponen produk. Hal ini diperlihatkan dengan fungsi

turunan parsial terhadap masing-masing komponen rancangan proses x_{ij} yaitu $\frac{\partial y}{\partial x_{ij}}|_{\tau_{x_{ij}}}$. Nilai $\frac{\partial y}{\partial x_{ij}}|_{\tau_{x_{ij}}}$ bernilai konstan yang diperoleh dengan memasukkan nilai nominal target kualitas masing-masing komponen rancangan proses. $\frac{\partial y}{\partial x_{ij}}|_{\tau_{x_{ij}}}$ dapat juga diartikan sebagai sensitivitas karakteristik kualitas produk akhir terhadap karakteristik kualitas setiap komponen ke- i untuk fitur ke- j .

Karena setiap komponen ke- i untuk fitur ke- j memiliki sejumlah M_{ij} alternatif proses yang salah satunya dapat dipilih dan dengan ditetapkannya $C_p = 1$ maka persamaan 7 dapat ditulis kembali menjadi:

$$\sigma_p^2 = \sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{M_{ij}} \left(\frac{\partial y}{\partial x_{ij}} |_{\tau_{x_{ij}}} \right)^2 \left(\frac{t_{ijk}}{3} \right)^2 x_{ijk} \dots\dots\dots(8)$$

Kemudian dapat dihitung biaya kerugian kualitas QR dengan menggunakan:

$$QR = A_p \left(\sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{M_{ij}} \left(\frac{\partial y}{\partial x_{ij}} |_{\tau_{x_{ij}}} \right)^2 \left(\frac{t_{ijk}}{3} \right)^2 \right) x_{ijk} \dots\dots\dots(9)$$

Biaya produksi TCR dihitung dengan menjumlahkan biaya manufaktur (MR) dan biaya kerugian kualitas (QR).

Biaya produksi yang digunakan sebagai kriteria fungsi tujuan diformulasikan dengan $\min TCR = MR + QR$

$$\min TCR = \sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{M_{ij}} c_{ijk} w_{ijk} (x_{ijk}) + A_p \left(\sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{M_{ij}} \left(\frac{\partial y}{\partial x_{ij}} |_{\tau_{x_{ij}}} \right)^2 \left(\frac{t_{ijk}}{3} \right)^2 \right) x_{ijk} \dots\dots\dots(10)$$

1.2 Pembatas (Constraint)

Batasan Spesifikasi Produk

Nilai toleransi kualitas produk akhir dari skenario rancangan proses yang dipilih dapat ditulis:

$$t_p^2 = \sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{M_{ij}} \left(\frac{\partial y}{\partial x_{ij}} |_{\tau_{x_{ij}}} \right)^2 t_{ijk}^2 x_{ijk} \dots\dots\dots(11)$$

Kualitas produk akhir dapat dikatakan memenuhi spesifikasi produk jika nilai toleransi kualitas produk akhir (t_p) lebih kecil dari nilai toleransi kualitas desain

(toleransi fungsional/ t_d) atau $t_p \leq t_d$ atau $t_p^2 \leq t_d^2$. Kondisi ini menjadi fungsi pembatas dalam model ini. Persamaan fungsi pembatas dapat ditulis:

$$\sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{Mij} \left(\frac{\partial y}{\partial x_{ij}} \Big|_{\tau_{xij}} \right)^2 t_{ijk}^2 x_{ijk} \leq t_d^2 \dots\dots\dots(12)$$

Batasan Koefisien Biner

Batasan ini untuk menjamin hanya satu alternatif proses per komponen:

$$\sum_{k=1}^{Mij} x_{ijk} = 1, \forall_{i,j} \dots\dots\dots(13)$$

$$x_{ijk} \in [0,1], \forall_{i,j,k} \dots\dots\dots(14)$$

Batasan Kapabilitas Proses (*Process Capability Constraint*)

Setiap operasi proses mempunyai akurasi sendiri dan harus dilaksanakan dalam kapabilitas prosesnya, dengan demikian:

$$t_{cp\,ijk}^{\min} \leq t_{ijk} \leq t_{cp\,ijk}^{\max} \dots\dots\dots(15)$$

Dari persamaan kriteria fungsi tujuan dan fungsi pembatas, diperoleh perumusan model optimisasi perencanaan proses dengan program *zero-one* yang dikembangkan seperti diperlihatkan dalam persamaan:

Fungsi tujuan:

$$\text{MinTCR} = \sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{Mij} c_{ijk} w_{ijk} (x_{ijk}) + A_p \left(\sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{Mij} \left(\frac{\partial y}{\partial x_{ij}} \Big|_{\tau_{xij}} \right)^2 \left(\frac{t_{ijk}}{3} \right)^2 \right) x_{ijk} \dots\dots\dots(16)$$

Pembatas:

(i) $\sum_{i=1}^{Nr} \sum_{j=1}^{p_i} \sum_{k=1}^{Mij} \left(\frac{\partial y}{\partial x_{ij}} \Big|_{\tau_{xij}} \right)^2 t_{ijk}^2 x_{ijk} \leq t_d^2,$

(ii) $\sum_{k=1}^{Mij} x_{ijk} = 1, \forall_{i,j},$

(iii) $x_{ijk} \in [0,1], \forall_{i,j,k}$

2. Tahap-tahap Implementasi Model

Tahap-tahap Implementasi Model Optimisasi Perencanaan Proses adalah sebagai berikut:

1. Tentukan/identifikasi karakteristik kualitas (*key characteristic*).
Penentuan karakteristik kualitas ini didasarkan kepada spesifikasi produk. Berdasarkan informasi mengenai spesifikasi produk ini maka akan diperoleh karakteristik kualitas dari produk tersebut (*product key characteristic*).
Tahapan ini dilakukan dengan terlebih dahulu mengumpulkan informasi-informasi mengenai kebutuhan/keinginan konsumen terhadap produk, sehingga melalui informasi ini dapat diperinci lagi menjadi spesifikasi produk. Pada tahap 1 ini akan diperoleh variabel kritis y atau karakteristik kualitas y .
2. Tentukan komponen rancangan proses dari variabel kritis y . Komponen rancangan proses ini merupakan komponen-komponen penyusun (x_1, x_2, \dots, x_n) agar didapatkan fungsi dari y (karakteristik kualitas) yang terpilih pada tahap 1. Pada tahap ini dimensi komponen rancangan proses sudah lebih spesifik, $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Dimensi ini diperlukan untuk mendapatkan persamaan fungsi *assembly*/persamaan fungsional. Tahap ini dilakukan dengan cara pembacaan gambar *assembly*.
3. Rumuskan persamaan fungsional dari karakteristik kualitas yang telah ditetapkan pada tahap 2.
4. Tentukan fitur-fitur yang berhubungan dengan komponen-komponen rancangan proses. Tahap ini dilakukan dengan cara pembacaan gambar *assembly*. Langkah-langkah yang harus dilakukan pada tahap ini adalah:
 - 4.a. Identifikasi komponen fungsional, yaitu komponen mana dari gambar *assembly* yang membentuk rantai toleransi dan tentukan jenis fitur dari toleransi tersebut.
 - 4.b. Tentukan jenis toleransi. Pada makalah ini jenis toleransi dibatasi hanya untuk toleransi dimensi atau toleransi linear.
 - 4.c. Pemilihan proses. Tentukan alternatif proses apa saja yang dapat memproses fitur tersebut.

Tahap 4 ini bertujuan untuk mengelompokkan dimensi komponen yang membentuk rantai toleransi ke dalam jenis fitur dan jenis toleransi. Dengan demikian lebih memudahkan dalam menentukan alternatif proses pemesinan untuk setiap fitur tersebut. *Tools* yang digunakan adalah hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Ikhsan (1998) dan Nainggolan (2004) untuk mendapatkan

alternatif proses untuk setiap fitur. *Database* yang dibutuhkan adalah: data jenis fitur dan data kapabilitas proses/mesin. Hitung waktu dan biaya pemesinan untuk masing-masing alternatif mesin tersebut. Perhitungan waktu pemesinan dan biaya pemesinan diperlukan untuk mendapatkan biaya manufaktur.

Dari masing-masing alternatif mesin dipilih toleransi proses yang optimal (diambil dari tabel kapabilitas proses/toleransi kapabilitas dari masing-masing mesin).

5. Buat rantai toleransi untuk membentuk persamaan pemesinan untuk fitur (persamaan *error propagation* untuk fitur). Persamaan *error propagation* untuk fitur ini didapatkan dari alternatif proses yang terpilih untuk memproses fitur tersebut dengan kriteria: waktu, biaya, dan toleransi. Lakukan perhitungan waktu pemesinan dengan menggunakan *software Master CAM*. *Database* yang dibutuhkan adalah data jenis fitur, data kapabilitas proses/mesin, data parameter pemesinan yang meliputi: kecepatan potong, kecepatan makan, kedalaman potong, jenis pahat, jenis material, diameter pahat, lebar potongan (untuk mesin *Milling*), dan jumlah gigi pada pahat (untuk mesin *Milling*).
6. Buat persamaan fungsional untuk komponen, sehingga nantinya didapatkan persamaan fungsi *assembly (variation model)*.
7. Buat formulasi toleransi proses.

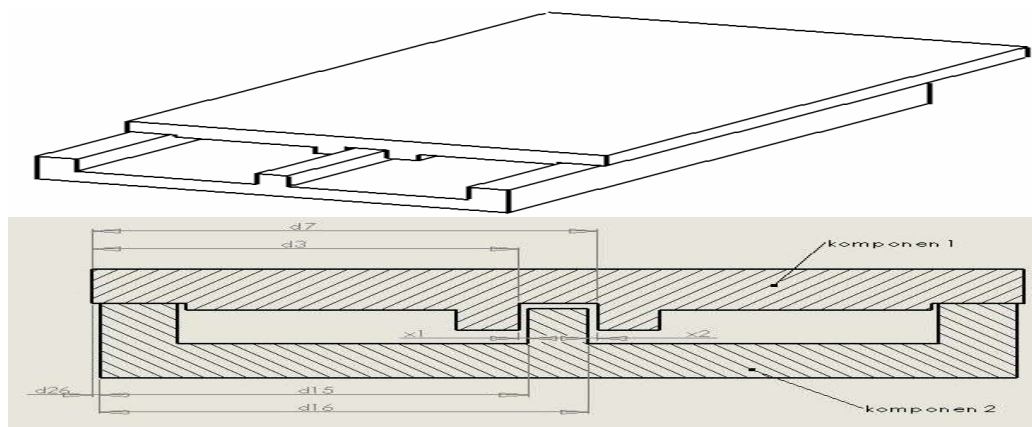
Persamaan *assembly* yang sudah didapatkan kemudian dimasukkan ke dalam model matematis perancangan proses. Batasan dalam model ini adalah batasan toleransi desain/spesifikasi produk, batasan kapabilitas proses, dan batasan koefisien biner.

8. Selesaikan solusi permasalahan optimisasi. Hasil optimisasi berupa perencanaan proses yang selanjutnya merupakan rekomendasi untuk proses manufaktur komponen-komponen produk.
9. Lakukan proses manufaktur komponen-komponen produk dengan rekomendasi perencanaan proses yang telah didapatkan pada tahap 8. Jika toleransi desain yang ditetapkan sangat ketat, maka mesin yang dipilih merupakan mesin dengan kemampuan proses yang paling presisi. Toleransi proses yang ketat ini mengakibatkan biaya manufaktur menjadi tinggi. Jika toleransi desain yang

ditetapkan longgar, maka mesin yang terpilih untuk memproses setiap fitur komponen tidak semuanya mesin yang paling presisi. Hanya sebagian dimensi fitur komponen yang diproses dengan mesin dengan kapabilitas proses yang paling presisi, sedangkan dimensi fitur komponen yang lain mampu diproses oleh mesin yang kurang presisi. Toleransi proses yang longgar mengakibatkan penurunan biaya manufaktur, namun fungsionalitas produk tetap terjamin. Dengan artian bahwa toleransi kualitas produk akhir mampu memenuhi toleransi desain yang disyaratkan dari produk tersebut.

3. Contoh Numerik

Contoh numerik pada makalah ini menggunakan produk *Slideway*. *Slideway* memiliki dua *subassembly* yaitu *slider subassembly* (komponen 1) dan *saddle subassembly* (komponen 2). Bentuk produk dan dimensi komponen-komponennya dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Produk *Slideway* dengan clearance x_1 dan x_2

Pada Gambar 3 terlihat *clearance* x_1 dan x_2 . *Clearance* ini dibutuhkan untuk tempat pengaliran minyak pelumas apabila kedua *subassembly* dirakit bersama. *Clearance* x_1 dan x_2 merupakan karakteristik kualitas dari produk yang digunakan dalam contoh numerik ini. *Clearance* ini secara langsung menentukan stabilitas dan *assemblability* dari produk. Dimensi nominal dari fitur *rectangular slot* pada *slider subassembly* adalah 1,000 in (25,4 mm), dan dimensi nominal dari fitur *slab* pada *saddle subassembly* adalah 0,999 in (25,3746 mm). Sehingga *total nominal clearance* antara kedua *subassembly* ini adalah 0,001 in (0,0254 mm). Dari sudut pandang fungsi produk, *clearance* antara 0,0005 in (0,0127 mm) dan 0,0015 in (0,0381 mm) akan memenuhi persyaratan fungsi dengan sangat baik.

Karakteristik kualitas (y) produk *Slideway* adalah *clearance* antara *slot* dan *slab* pada Gambar 3 adalah $y = x_1 + x_2$. Spesifikasi kualitas dapat ditentukan oleh spesifikasi produk (fungsi produk). Dalam perhitungan spesifikasi produk, diperoleh nilai-nilai target kualitas produk akhir (τ_d) dan masing-masing komponen rancangan proses yang dinotasikan dengan τ_{d3} , τ_{d7} , τ_{d15} , τ_{d16} , dan τ_{d26} . Karakteristik kualitas produk akhir dituliskan dalam bentuk $(\tau_d \pm t_d)$, di mana τ_d dan t_d secara berurutan adalah nilai target dan toleransi kualitas produk akhir (*clearance* antara *slot* dan *slab*).

Pada tahapan kedua implementasi model ditentukan komponen rancangan proses yang mempengaruhi variabel kritis dari karakteristik kualitas y . Dimensi kritis yang mempengaruhi *clearance* x_1 dan x_2 adalah $d3$, $d7$, $d15$, $d16$, dan $d26$. Jika ditetapkan $d3$ adalah x_{11} yang berarti dimensi pada komponen 1 dan fitur 1, $d7$ adalah x_{12} yang berarti dimensi pada komponen 1 dan fitur 2, $d15$ adalah x_{21} yang berarti dimensi pada komponen 2 dan fitur 1, $d16$ adalah x_{22} yang berarti dimensi pada komponen 2 dan fitur 2. Karakteristik kualitas dari komponen rancangan proses $d3$, $d7$, $d15$, dan $d16$ masing-masing secara berurutan dapat dituliskan $\tau_{d3} \pm t_{11k}$, $\tau_{d7} \pm t_{12k}$, $\tau_{d15} \pm t_{21k}$, dan $\tau_{d16} \pm t_{22k}$ di mana ijk menunjukkan indeks dari alternatif proses ke- k untuk memproses komponen ke- i , fitur ke- j , ($i = 1,2$), dan ($j = 1,2$). Setiap alternatif proses ke- k untuk memproses komponen ke- i , fitur ke- j memiliki karakteristik nilai biaya pemesanan (c_{ijk}), waktu pemesanan (w_{ijk}), dan toleransi kualitas (t_{ijk}) yang tidak sama. Toleransi kualitas (t_{ijk}) ditentukan dari kapabilitas yang dimiliki oleh mesin, di sini diambil nilai yang minimum atau dengan kata lain nilai kapabilitas yang paling presisi.

Jika digunakan persamaan 1, maka karakteristik kualitas *Slideway* (*clearance* antara *slot* dan *slab*/ y) merupakan fungsi dari karakteristik komponen rancangan proses $d3$, $d7$, $d15$, $d16$, dan $d26$ yang dapat diperlihatkan:

$$y=f(d3,d7,d15,d16,d26) \dots\dots\dots(17)$$

Diketahui spesifikasi kualitas *clearance* x_1 dan x_2 atau karakteristik kualitas produk akhir adalah $0,001 \pm 0,0005$ in ($0,0254 \pm 0,0127$ mm) atau $0,001 \pm 0,0015$ in ($0,0254 \pm 0,0381$ mm). Berdasarkan gambar *assembly* dari produk *Slideway* diperoleh nilai target kualitas (nominal) dari komponen rancangan proses $d3$, $d7$,

$d15$, dan $d16$ masing-masing secara berurutan adalah $\tau_{d3} = 5,41$ in (137,414 mm), $\tau_{d7} = 6,41$ in (162,814 mm), $\tau_{d15} = 5,39$ in (136,906 mm), dan $\tau_{d16} = 6,39$ in (162,306 mm).

Pada tahapan ketiga implementasi model dirumuskan persamaan fungsional dari karakteristik kualitas yang telah ditetapkan pada tahap sebelumnya. Karakteristik kualitas yang ditetapkan tersebut adalah *clearance* antara *slot* pada komponen *slider* dan *slab* pada komponen *saddle*.

Berdasarkan persamaan 17 dapat diketahui karakteristik kualitas *Slideway* adalah fungsi dari komponen rancangan proses $d3$, $d7$, $d15$, $d16$, dan $d26$ yang dapat diperlihatkan pada persamaan:

$$y=f(d3,d7,d15,d16,d26)=x_1+x_2 \dots\dots\dots(18)$$

Dengan membaca gambar *assembly* dapat diperoleh persamaan $x_1 = - d3 + d15 + d26$ dan $x_2 = - d16 + d7 - d26$. Berdasarkan persamaan x_1 dan x_2 dapat dirumuskan persamaan fungsional dari karakteristik kualitas yang ditetapkan, $y = f(R)$, di mana R adalah komponen rancangan proses $d3$, $d7$, $d15$, $d16$, dan $d26$ adalah seperti yang diperlihatkan dalam persamaan:

$$y = - d3 + d15 + d26 - d16 + d7 - d26$$

$$y = - d3 + d15 - d16 + d7 \dots\dots\dots(19)$$

dimana: $y = clearance$ antara kedua *subassembly*; $d3 = x_{11}$: komponen 1, fitur 1; $d7 = x_{12}$: komponen 1, fitur 2; $d15 = x_{21}$: komponen 2, fitur 1; $d16 = x_{22}$: komponen 2, fitur 2.

Hasil penurunan parsial dan nilai nominal dari masing-masing komponen rancangan proses dapat disimpulkan seperti yang diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Penurunan Parsial x_1 dan x_2

Relevant constraint untuk x_1		
Dimensi	Nominal (in/mm)	Sensitivitas
$d3$	5,41(137,414 mm)	-1,0
$d15$	5,39 (136,906 mm)	1,0
$d26$	0,015 (0,381 mm)	1,0
Relevant constraint untuk x_2		
Dimensi	Nominal (in/mm)	Sensitivitas
$d16$	6,39 (162,306 mm)	-1,0
$d7$	6,41 (162,814 mm)	1,0
$d26$	0,015 (0,381 mm)	-1,0

Pada tahapan keempat implementasi model ditentukan fitur yang berhubungan dengan komponen rancangan proses. Tahap ini dilakukan dengan cara pembacaan gambar *assembly*. Data yang dibutuhkan pada tahapan ini adalah:

- Data jenis fitur dan berbagai alternatif proses yang dapat memproses setiap jenis fitur tersebut didasarkan kepada hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Ikhsan (1998) dan Naingolan (2004).
- Data kapabilitas proses (mesin) dan parameter-parameter pemesinan diperoleh dari *Machining Data Handbooks*. Data-data ini dibutuhkan untuk menghitung waktu pemesinan untuk masing-masing alternatif mesin yang dapat memproses fitur pada suatu komponen. Simulasi proses pemesinan dilakukan dengan *software Master CAM* agar diperoleh waktu pemesinan untuk masing-masing dimensi komponen.

Data yang dikumpulkan terbagi menjadi empat kelompok data komponen rancangan proses yaitu:

1. Dimensi $d3$ (x_{11} : komponen 1, fitur 1)

Pada gambar *assembly* terlihat bahwa jenis toleransi dari dimensi $d3$ adalah toleransi dimensi. Menurut hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Ikhsan (1998) dan Naingolan (2004), jenis fitur yang berhubungan dengan dimensi $d3$ adalah fitur *step*. Alternatif proses yang dapat memproses fitur *step* pada $d3$ adalah mesin *milling* konvensional (*face milling*), mesin *milling* NC, dan mesin sekrap (*shaping machine*). Data mengenai biaya pemesinan, waktu pemesinan, dan toleransi dari masing-masing alternatif proses pemesinan dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Data dimensi $d3$

Nilai Nominal karakteristik $\tau_{d3} = 137,414mm$			
Alt.proses [k]	Biaya mesin [c_{ijk}] (Rp/jam)	Toleransi [t_{ijk}] (mm)	Waktu pemesinan [w_{ijk}] (jam)
Milling manual (x_{111})	11000	$0,025 < tol < 0,05$	0,94
Milling NC (x_{112})	62550	0,001	0,75
Shaping (x_{113})	8000	$0,025 < tol < 0,05$	1,17

2. Dimensi $d7$ (x_{12} : komponen 1, fitur 2)

Pada gambar *assembly* terlihat bahwa jenis toleransi dari dimensi $d7$ adalah toleransi dimensi. Menurut hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Ikhsan

(1998) dan Nainggolan (2004), jenis fitur yang berhubungan dengan dimensi $d7$ adalah fitur *slot*. Alternatif proses yang dapat memproses fitur *slot* pada $d7$ adalah mesin *milling* konvensional (*face milling*), mesin *milling* NC, dan mesin sekrup (*shaping machine*). Data mengenai biaya pemesinan, waktu pemesinan, dan toleransi dari masing-masing alternatif proses pemesinan dapat dilihat dalam Tabel 3.

Tabel 3. Data dimensi $d7$

Nilai Nominal karakteristik $\tau_{d7} = 162,814mm$			
Alt.proses [k]	Biaya mesin [c_{ijk}] (Rp/jam)	Toleransi [t_{ijk}] (mm)	Waktu pemesinan [w_{ijk}] (jam)
Milling manual (x_{121})	11000	0,025<tol<0,05	1,25
Milling NC (x_{122})	62550	0,001	1
Shaping (x_{123})	8000	0,025<tol<0,05	1,56

3. Dimensi $d15$ (x_{21} : komponen 2, fitur 1)

Pada gambar *assembly* terlihat bahwa jenis toleransi dari dimensi $d15$ adalah toleransi dimensi. Menurut hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Ikhsan (1998) dan Nainggolan (2004), jenis fitur yang berhubungan dengan dimensi $d15$ adalah fitur *slot*. Alternatif proses yang dapat memproses fitur slot pada $d15$ adalah mesin *milling* konvensional (*face milling*), mesin *milling* NC, dan mesin sekrup (*shaping machine*). Data mengenai biaya pemesinan, waktu pemesinan, dan toleransi dari masing-masing alternatif proses pemesinan dapat dilihat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Data dimensi $d15$

Nilai Nominal karakteristik $\tau_{d15} = 136,906mm$			
Alt.proses [k]	Biaya mesin [c_{ijk}] (Rp/jam)	Toleransi [t_{ijk}] (mm)	Waktu pemesinan [w_{ijk}] (jam)
Milling manual (x_{211})	11000	0,025<tol<0,05	1,19
Milling NC (x_{212})	62550	0,001	0,95
Shaping (x_{213})	8000	0,025<tol<0,05	1,48

4. Dimensi $d16$ (x_{22} : komponen 2, fitur 2)

Pada gambar *assembly* terlihat bahwa jenis toleransi dari dimensi $d16$ adalah toleransi dimensi. Menurut hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Ikhsan (1998) dan Nainggolan (2004), jenis fitur yang berhubungan dengan dimensi $d16$ adalah fitur *slab*. Alternatif proses yang dapat memproses fitur *slab* pada

d16 adalah mesin *milling* konvensional (*face milling*), mesin *milling* NC, dan mesin sekrup (*shaping machine*). Data mengenai biaya pemesinan, waktu pemesinan, dan toleransi dari masing-masing alternatif proses pemesinan dapat dilihat dalam Tabel 5.

Tabel 5. Data dimensi *d16*

Nilai Nominal karakteristik $\tau_{d16} = 162,306\text{mm}$			
Alt.proses [<i>k</i>]	Biaya mesin [<i>c_{ijk}</i>] (Rp/jam)	Toleransi [<i>t_{ijk}</i>] (mm)	Waktu pemesinan [<i>w_{ijk}</i>] (jam)
Milling manual (<i>x₂₂₁</i>)	11000	0,025<tol<0,05	1,17
Milling NC (<i>x₂₂₂</i>)	62550	0,001	0,93
Shaping (<i>x₂₂₃</i>)	8000	0,025<tol<0,05	1,46

Perhitungan waktu pemesinan untuk mesin *milling* dilakukan dengan menggunakan *software Master CAM*. Parameter-parameter pemesinan seperti diameter pahat, jenis material pahat, jenis material benda kerja, kedalaman potong, kecepatan potong, kecepatan makan, dan lain-lain dapat dilihat pada *machining data handbooks*. Sedangkan perhitungan waktu pemesinan untuk mesin *milling* manual dan mesin sekrup dilakukan dengan menggunakan perhitungan data waktu baku dengan memberikan faktor penyesuaian dan kelonggaran untuk fitur pada masing-masing dimensi komponen. Namun pada penelitian ini diasumsikan bahwa untuk waktu mesin *milling* manual diberikan kelonggaran sebesar 25 % lebih lama dari waktu mesin NC. Sementara waktu mesin sekrup diasumsikan kelonggarannya 25 % lebih lama dari waktu mesin *milling* manual. Asumsi ini didasarkan pada pengalaman operator pada industri kecil logam.

Besar *Mij* bergantung kepada jumlah alternatif proses dari setiap komponen rancangan proses. Dari data pada Tabel 2, Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5 dapat diperoleh $M_{11} = 3$, $M_{12} = 3$, $M_{21} = 3$, dan $M_{22} = 3$. Berdasarkan spesifikasi kualitas produk (*clearance* antara kedua *subassembly*) dapat diketahui t_d adalah $0,001 \pm 0,0005$ in ($0,0254 \pm 0,0127$ mm).

Dengan menggunakan persamaan 16 diperoleh perumusan matematis dari model optimisasi perencanaan proses produk *Slideway*. Kemudian dengan bantuan *software LINGO* maka dapat diperoleh solusi optimal. Perumusan model optimisasi seperti pada persamaan 16, selanjutnya dituliskan dalam bentuk

persamaan program LINGO. Nilai koefisien biaya kerugian kualitas (A_p) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 20. Jika diasumsikan perusahaan memberi jaminan mengganti produk *reject* dengan memberi beban biaya kepada konsumen Rp.100.000,- untuk spesifikasi kualitas produk $0,001 \pm 0,0005$ in ($0,0254 \pm 0,0127$ mm), maka nilai C_r adalah Rp.100.000,-. Nilai A_p dapat dihitung sebagai berikut:

$$A_p = \frac{C_r}{t_d^2} \dots\dots\dots(20)$$

$$A_p = \frac{Rp.100.000,-}{(0.0127)^2} = 620001240.$$

Solusi permasalahan optimisasi dengan menggunakan *software* LINGO 8.0 dapat diperlihatkan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Solusi permasalahan optimisasi

Tol.desain	D3	d7	d15	d16	Total biaya(Rp)
$t_d = 0,0127\text{mm}$	Mesin NC	Mesin NC	Mesin NC	Mesin NC	227332

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Makalah ini mengembangkan model penetapan toleransi dengan meminimasi biaya manufaktur dan biaya kerugian kualitas untuk produk *assembly* (biasanya untuk *mechanical assembly*) dan juga memperhatikan alternatif perencanaan proses. Artinya toleransi proses yang dihasilkan oleh alternatif proses yang terpilih untuk memproses komponen-komponen *assembly* meminimumkan total biaya dan mampu memenuhi fungsionalitas dari produk *assembly* tersebut.

Saran

Pada makalah ini dapat disarankan beberapa hal berikut ini untuk penelitian lebih lanjut:

1. Hubungan antara variabel karakteristik komponen rancangan proses bersifat nonlinear dan dependen satu sama lain, untuk itu perlu digunakan pendekatan non linear untuk merumuskan fungsi karakteristik kualitas produk akhir dari karakteristik kualitas masing-masing komponen rancangan proses.
2. Toleransi yang dievaluasi tidak hanya toleransi dimensi melainkan mengikutsertakan toleransi geometrik.

3. Nilai rata-rata karakteristik kualitas dari hasil masing-masing alternatif proses tidak sama dengan nilai target dari karakteristik kualitas komponen rancangan atau dengan kata lain perlu dikembangkan model optimisasi perencanaan proses untuk toleransi asimetris.
4. Perhitungan biaya manufaktur tidak hanya mengalikan biaya pemesinan dan waktu pemesinan, namun biaya-biaya lainnya yang berkaitan dengan proses manufaktur juga ikut dimasukkan dalam perhitungan, contoh: biaya *set up*, biaya operator, dan lain-lain. Sedangkan untuk waktu pemesinan dilakukan perhitungan dengan menggunakan data empirik yang terdapat pada lantai produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- C. Zhang dan Wang., (1998), *Robust design of assembly and machining tolerance allocations*, **IIE Transactions**, Vol. 30.p. 17-29.
- G.Taguchi., (1989), **Quality Engineering in Production Systems**, McGraw-Hill, New York.
- Hong, Y. S. and Chang, T.-C., (2002), *A Comprehensive Review of Tolerancing Research*, **International Journal of Production Research**, Vol. 40(11), p.2425-2459.
- Ikhsan, Aidil., (1998), **Model Optimasi Toleransi Manufaktur Yang Memperhatikan Penumpukan Toleransi untuk Benda Prismatik Dengan Bantuan Komputer**, Tesis Magister, Program Studi Teknik dan Manajemen Industri, Institut Teknologi Bandung.
- Jeang, A., (1997), *An Approach of Tolerance Design for Quality Improvement and Cost Reduction*, **International Journal of Production Research**, Vol. 35(5), p.1193-1211.
- Nainggolan, Marihot, (2004), **Pembangkitan Alternatif Urutan Proses Berbasis Fitur Menggunakan Algoritma Pencarian Ruang Solusi**, Tesis Magister, Departemen Teknik Industri, Institut Teknologi Bandung.
- Ye, B., and Salustri, F.A. (2000), *Simultaneous Tolerance Synthesis for Manufacturing and Quality*. <http://www.google.com/> [date of access: 10 Maret 2005].

Zhang, Chao & Hong, (1997), **Advanced Toerancing Techniques**, John Wiley & Sons, Inc. New York.