

PENGEMBANGAN STRATEGI PEMESINAN BENTUK RONGGA SEGITIGA UNTUK MENGURANGI WAKTU PEMESINAN

Mochammad Chaeron

Fakultas Teknik Industri, Jurusan Teknik Industri,
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta
Jalan Babarsari No.2 Tambakbayan Yogyakarta 55281
Email: m.chaeron@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Terdapat dua strategi untuk pemesinan bentuk rongga segitiga yaitu: direction parallel dan contour parallel. Kedua strategi tersebut masing-masing mempunyai kekurangan. Pada strategi direction parallel, untuk menyelesaikan pemesinan, harus ditambahkan lintasan pahat mengelilingi batas untuk menghilangkan scallop. Sedangkan pada strategi contour parallel, pemesinan harus dilakukan secara overlap untuk menghindari timbulnya daerah sisa pemesinan di tengah area bentuk rongga. Kedua hal tersebut menyebabkan terjadinya proses pemesinan berulang. Pengembangan terhadap strategi contour parallel dan direction parallel dilakukan untuk mengurangi sebanyak mungkin terjadinya proses pemesinan berulang itu. Penambahan ataupun penggantian lintasan pahat menjadi pilihan utama dalam pengembangan strategi ini. Pada akhirnya strategi hasil pengembangan berhasil memberikan lintasan pahat yang lebih pendek, yang berarti dengan menggunakan strategi hasil pengembangan, proses pemesinan bentuk rongga dapat dilakukan lebih cepat.

Kata kunci: bentuk rongga segitiga, strategi pemesinan, scallop, overlap

ABSTRACT

There are two machining strategies exist for triangular pocket machining: direction parallel and contour parallel. Both of those strategies have a weakness. On direction parallel strategy, to finish the machining, we must add a tool path around the boundary to remove scallop. Whereas on contour parallel strategy, we must do machining with overlap to avoid unmachined area remain. Both of those can cause the repeated machining process. The development we've done, toward contour parallel and direction parallel strategy, have aim to reduce as much as appearance of the repeated machining process. We must add or change a tool path in develop this strategy. At last, the development strategy can give shorter toll path successfully. Its mean, with the development strategy, we can do triangular pocket machining faster.

Keywords: triangularpocket, machining strategy, scallop, overlap

PENDAHULUAN

Operasi yang paling banyak dijumpai dalam pemesinan part-part logam adalah operasi pemesinan bentuk rongga (*pocket*), yaitu membuang semua material yang terdapat di dalam suatu batas (*boundary*) tertutup pada permukaan datar benda kerja sampai ke kedalaman tertentu (Kramer, 1992 dan Arya, *et al.*, 2001). Bentuk rongga merupakan fitur khusus yang banyak dijumpai pada proses pemesinan di perusahaan pembuat *mould* dan *dies*. Daya saing perusahaan pembuat *mould* dan *dies* sangat ditentukan oleh kemampuan dalam memenuhi waktu penyelesaian pesanan. Karena itulah usaha-usaha untuk memperpendek waktu pemesinan selalu menjadi perhatian utama. Waktu penyelesaian pesanan mempunyai hubungan erat dengan perencanaan proses pemesinan. Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan pemesinan suatu fitur tergantung pada banyak faktor, di antaranya adalah karakteristik mesin, strategi pemesinan, ukuran dan jenis pahat yang dipilih, geometri fitur dan spesifikasi toleransi serta parameter pemesinan.

Faktor terpenting dalam pemesinan bentuk rongga adalah ukuran pahat karena semua faktor yang lain tergantung pada ukuran pahat (Kyoung, *et al.*, 1997). Di sisi lain, penentuan ukuran pahat untuk pemesinan bentuk rongga seringkali bukanlah masalah yang mudah karena beberapa alasan (Veeramani dan Gau, 1997). Pertama, ada banyak kandidat pahat yang dapat dipakai untuk melakukan pemesinan. Kedua, isu-isu pemotongan berlebih (*gauging*) dan toleransi perlu diperhatikan selama penentuan ukuran pahat. Ketiga, prosedur penentuan ukuran pahat harus memperhatikan ukuran-ukuran yang tersedia dalam persediaan pahat.

Tugas perencana proses selanjutnya, setelah ukuran pahat diperoleh, adalah membangkitkan lintasan pahat. Ada dua strategi pemesinan yang banyak dipakai di dalam pembangkitan lintasan pahat untuk pemesinan bentuk rongga, yaitu *contour parallel* dan *direction parallel* (Arkin *et al.*, 2000). Kedua strategi tersebut, *direction parallel* dan *contour parallel*, masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. Strategi *direction parallel* memungkinkan lintasan pahat tanpa *overlap* tapi menyisakan *scallop* di sepanjang sisi bentuk rongga (Veeramani dan Gau, 1997). Sedangkan strategi *contour parallel* memungkinkan lintasan pahat yang bebas *scallop* di sepanjang sisi bentuk rongga tapi membutuhkan *overlap* antar lintasan untuk menghindari daerah sisa di tengah-tengah daerah bentuk rongga (Kyoung, *et al.*, 1997).

Strategi pemesinan yang berbeda akan memberikan panjang lintasan pahat yang berbeda pula. Sejak panjang lintasan pahat berbanding lurus dengan waktu pemesinan dan kebanyakan fungsi tujuan dalam optimasi proses pemesinan adalah minimasi waktu pemesinan, maka perencana proses harus membangkitkan lintasan pahat sedemikian sehingga panjang lintasan pahat seminimal mungkin. Hal tersebut dapat dicapai jika lintasan pahat mampu mengkover keseluruhan daerah bentuk rongga (tanpa daerah sisa) dengan *overlap* antar lintasan pahat seminimal mungkin.

METODE PENELITIAN

Materi utama yang menjadi dasar penelitian ini merupakan hasil studi literatur terhadap karya-karya ilmiah, hasil penelitian para pakar yang telah dimuat dalam buku maupun jurnal. Metode penelitian yang digunakan adalah metode teoritis, pengembangan strategi pemesinan dan studi kasus melalui contoh numeris.

Sesuai dengan asas metode teoritis, penelitian dilakukan dengan bersandar pada hasil studi literatur terhadap karya-karya ilmiah yang telah dihimpun, yang berkaitan dengan proses pemesinan bentuk rongga (*pocket*). Untuk mencapai tujuan penelitian, diperlukan pemahaman mengenai karakteristik pemesinan menggunakan mesin CNC milling, strategi-strategi pemesinan yang ada untuk pemesinan bentuk rongga, metode-metode pembangkitan lintasan pahat dan asas-asas trigonometri segitiga untuk pemodelan lintasan pahat. Untuk pengembangan strategi, penelitian dilakukan dalam tiga tahap, yaitu:

1. Tahap pengumpulan data.

Tahap ini dilakukan untuk mendapatkan data panjang lintasan pahat dari strategipemesinan bentuk rongga yang eksis saat ini. Data tersebut diperoleh dengan cara memodelkan lintasan pahat secara grafis memakai perangkat lunak AutoCAD.

dan karena

$$\overline{IL} = \overline{AI} \cdot \sin(\beta) = \left(c - r \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - r \cdot \cot\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \cdot \sin(\beta)$$

maka nilai n dapat dituliskan kembali sebagai:

$$i = \left[\frac{\left(c - r \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - r \cdot \cot\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \cdot \sin(\beta)}{(2 \cdot r - \rho)} \right]$$

Sehingga total panjang bagian mendatar ($TPBD$) adalah sebagai berikut:

$$TPBD = \sum_{i=1}^i \left[a - r \cdot \left(\cot\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cot\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right) - (2 \cdot r - \rho) \cdot (i - 1) (\cot(\beta) + \cot(\gamma)) \right] \dots (1)$$

Dimana, ρ adalah lebar *overlap* antar dua lintasan pahat. Strategi *direction parallel* ini memungkinkan ρ sama dengan nol (0).

Penghematan bagian mendatar:

Lintasan penghematan bagian mendatar merupakan pengurangan panjang lintasan mendatar CE menjadi CD.

$$\overline{DE} = \frac{\overline{AD} \cdot \sin(\frac{1}{4} \beta)}{\sin(180^\circ - \beta)} \dots \dots \dots (2.a)$$

$$\overline{GH} = \frac{\overline{CG} \cdot \sin(\frac{1}{4} \gamma)}{\sin(180^\circ - \gamma)} \dots \dots \dots (2.b)$$

$$n = i - 1$$

Persamaan (2.a) digunakan pada n ganjil sedangkan (2.b) digunakan pada n genap.

Panjang bagian menaik:

Total panjang bagian menaik ($TPBN$) diestimasi sebagaipenjumlahan dari $AI+BI$, $TPBN = AI + BI$, dapat dihitung sebagai berikut:

$$\overline{AI} = c - r \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - r \cdot \cot\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

$$\overline{BI} = b - r \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - r \cdot \cot\left(\frac{\gamma}{2}\right)$$

$$TPBN = \left(c - r \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - r \cdot \cot\left(\frac{\beta}{2}\right) + b - r \cdot \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - r \cdot \cot\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \dots \dots \dots (3)$$

Panjang bagian untuk menghilangkan *scallop*

Pada strategi *direction parallel* hasil pengembangan, bagian untuk menghilangkan *scallop* adalah dengan menambah lintasan pahat sepanjang batas bentuk rongga (AI dan BI). Jalur pembuangan *scallop* pada strategi hasil pengembangan diperlihatkan di Gambar 1.

$$\overline{AD} = \frac{\overline{DJ}}{\sin(\frac{3}{4} \beta)} = \frac{2R}{\sin(\frac{3}{4} \beta)} \dots \dots \dots (4.a)$$

$$\overline{CG} = \frac{2R}{\sin(\frac{3}{4} \gamma)} \dots \dots \dots (4.b)$$

Persamaan (4.a) digunakan pada n ganjil sedangkan (4.b) digunakan pada n genap.

Panjang lintasan pahat untuk pemesinan *pocket* segitiga menggunakan strategi *contour parallel* dapat dituliskan sebagai fungsi $f(a, \beta, \gamma, a, b, c, r)$ yang merupakan penjumlahan dari persamaan (1), persamaan (3) dan persamaan (4a atau 4b) dikurangi persamaan (2a atau 2b).

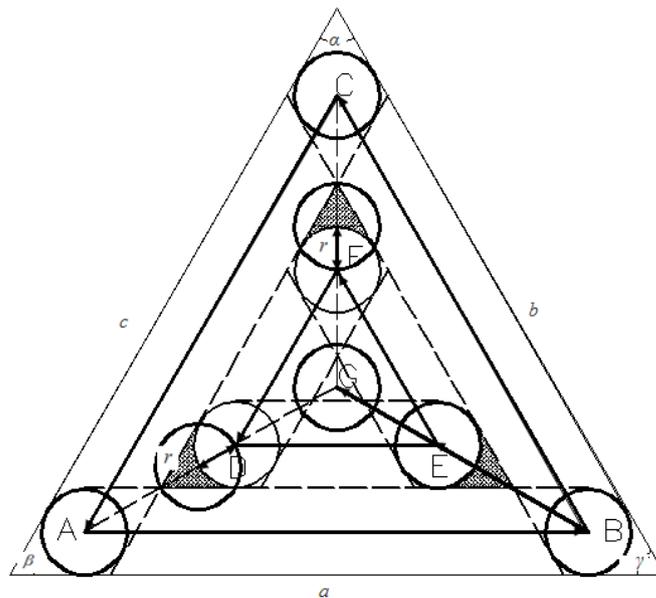
Pengembangan Strategi Berbasis Strategi *Contour Parallel*

Pengembangan strategi dilakukan dengan membangkitkan lintasan pahat tanpa menggunakan *overlapping* dan menambahkan lintasan pahat untuk memotong daerah dimana masih terdapat *scallop*. Pahat yang dipakai berdiameter $2r$. Langkah-langkah pembangkitan lintasan pahat diawali dengan melakukan *offset* ke dalam sejauh diameter pahat (r). Hasil *offset* itu adalah segitiga ABC.

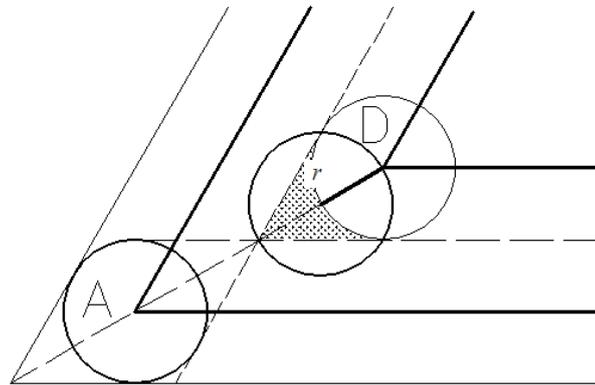
Langkah selanjutnya adalah melakukan *offset* ke dalam terhadap segitiga ABC sejauh $2(r-\rho)$. Demikian seterusnya hingga mencapai lintasan ke n . Namun hal yang perlu diperhatikan dalam pengembangan strategi ini adalah ρ bernilai nol (0), karena pengembangan strategi ini tidak memerlukan *overlapping*. Pemesinan *pocket* segitiga dengan menggunakan strategi *contour parallel* tanpa menggunakan *overlapping* dapat dilihat pada Gambar 2.

Dari Gambar 2 terlihat bahwa lintasan pahat terdiri dari tiga bagian yaitu:

- Bagian yang mengelilingi (sejajar) *boundary pocket* (ABC dan DEF)
- Bagian yang menaik yang menghubungkan lintasan pahat yang sejajar dengan AB
- Bagian penghilang *scallop*. Gambar bagian penghilang *scallop* dapat dilihat pada Gambar 3



Gambar 2. Lintasan pahat pengembangan strategi *contour parallel*



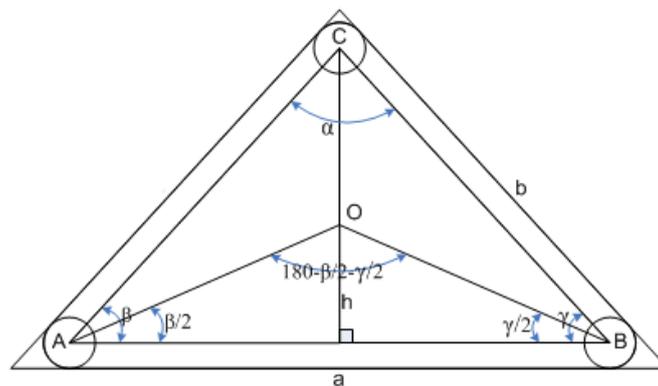
Gambar 3 Gambar lintasan penghilang *scallop* sejauh r

Panjang bagian yang sejajar keliling rongga:

Garis *offset* yang paling dekat dengan batas rongga (lintasan pahat terluar) berjarak sebesar *radius* (r) pahat dari garis kontur rongga sehingga untuk segitiga ABC:

$$\overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CA} = (a + b + c) - 2 \cdot r \cdot \left(\text{Cot}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \text{Cot}\left(\frac{\beta}{2}\right) + \text{Cot}\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right)$$

Untuk mencari jumlah segitiga yang sejajar dengan batasrongga, perlu dicari terlebih dahulu besarnya h (lihat Gambar 4).



Gambar 4 Nilai h untuk mencari jumlah segitiga yang sejajar dengan batas rongga

Dari Gambar 4, dengan hukum *sinus* dapat dicari nilai h sebagai berikut:

$$\frac{\overline{AB}}{\text{Sin}\left(180 - \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{\overline{OA}}{\text{Sin}\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{\overline{OB}}{\text{Sin}\left(\frac{\beta}{2}\right)}$$

$$\overline{OA} = \frac{\overline{AB} \cdot \text{Sin}\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\text{Sin}\left(180 - \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma}{2}\right)} \text{ dan } \overline{OB} = \frac{\overline{AB} \cdot \text{Sin}\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\text{Sin}\left(180 - \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma}{2}\right)}$$

Sehingga,

$$h = \overline{OA} \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \overline{OB} \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \frac{\overline{AB} \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\sin\left(180 - \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{\overline{AB} \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\sin\left(180 - \left(90 - \frac{\alpha}{2}\right)\right)}$$

$$h = \frac{\overline{AB} \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\left(a - r \cdot \left(\cot\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cot\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Selanjutnya jumlah segitiga dalam yang sejajar batas rongga adalah:

$$n = \frac{h}{2 \cdot r - \rho} = \frac{\left(a - r \cdot \left(\cot\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cot\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{(2 \cdot r - \rho) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Dimana nilai n merupakan pembulatan keatas.

Total panjang lintasan pahat yang sejajar batas rongga:

$$\sum_{i=1}^n (a + b + c) - ((2 \cdot r) + 2 \cdot (2 \cdot r - \rho) \cdot (i - 1)) \cdot \left(\cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \cot\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cot\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right) \quad (5)$$

Total panjang lintasan untuk menghilangkan *scallop*:

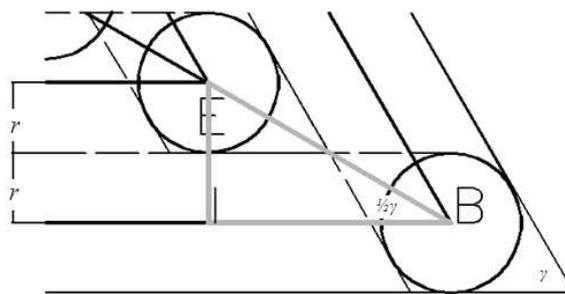
$$(n - 1) \times 2 \times 2 \left(\frac{r}{\sin \frac{1}{2} \{Max \beta, \gamma\}} - r\right) \dots\dots\dots (6)$$

Panjang lintasan menaik :

Panjang lintasan menaik dapat dilihat pada segitiga BEI Gambar 5.

Total panjang lintasan menaik adalah:

$$(n - 1) \left(\frac{2r}{\sin \frac{1}{2} \{Min \beta, \gamma\}}\right) \dots\dots\dots (7)$$



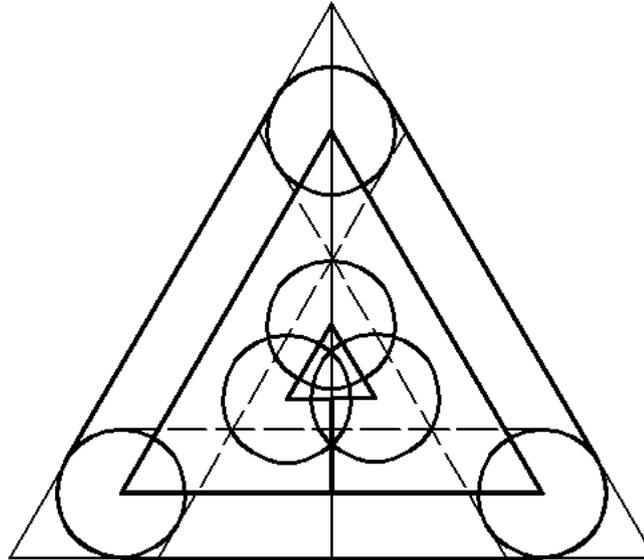
Gambar 5 Lintasan menaik pengembangan strategi *contour parallel*

Panjang lintasan pengembangan strategi *contour parallel* untuk pemesinan ronggasegitiga dapat dituliskan sebagai fungsi $f(a, \beta, \gamma, a, b, c, \rho, r)$ yang merupakan penjumlahan dari persamaan (5), persamaan (6), dan persamaan (7).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Contoh Numerik 1

Hasil perhitungan pada sebuah *pocket* segitiga sama sisi yang memiliki sudut ($\alpha = \beta = \gamma = 60^\circ$) dengan panjang sisi (a, b, c) = 10 cm dan jari-jari kelengkungan sudut dan radius pahat 10 mm. [1] Panjang lintasan pahat strategi *direction parallel* adalah 388,231 mm dan strategi *contour parallel* adalah 251,28 mm. Pengembangan strategi *direction parallel* menghasilkan panjang lintasan pahat yang lebih pendek, yaitu sebesar 297,175 mm. Namun pengembangan strategi *contour parallel* tanpa *overlapping* memberikan lintasan pahat yang lebih panjang, yaitu sebesar 276,08 mm.



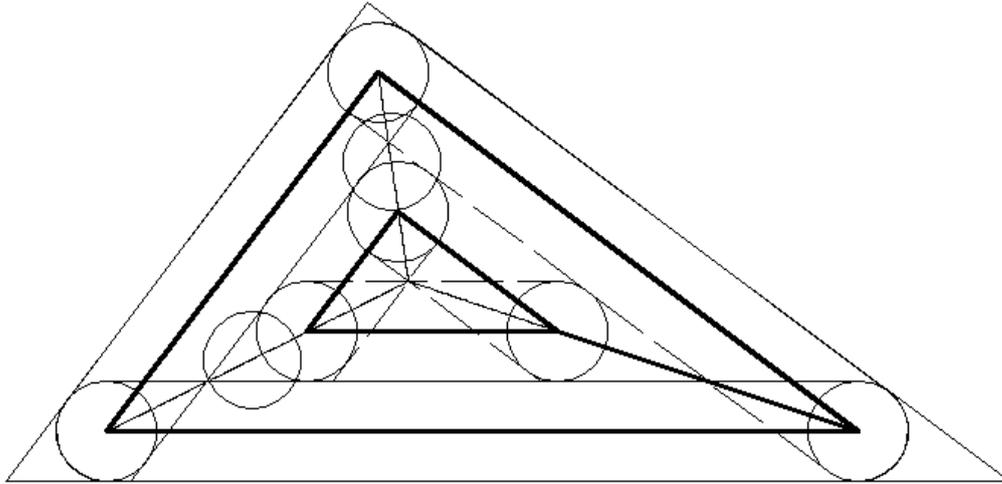
Gambar 6 Strategi pemesinan *contour parallel* dengan *overlapping*

Berdasarkan hasil perhitungan pada contoh numerik 1 menunjukkan bahwa strategi pemesinan *contour parallel* dengan *overlapping* memberikan lintasan pahat yang paling pendek. Hal ini disebabkan oleh besarnya sudut batas rongga segitiga sama sehingga penentuan besarnya *overlapping* (ρ) juga sama. *Scallop* atau daerah sisa hasil pemotongan diselesaikan oleh lintasan pahat ke ($n+1$).

Contoh numerik 2

Pocket segitiga memiliki sudut $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 53^\circ$, $\gamma = 37^\circ$ dengan panjang sisi $a = 100$ mm, $b = 80$ mm, $c = 60$ mm. Hitung panjang lintasan pahat jika jari-jari kelengkungan sudut dan radius pahat = 5 mm. [1] strategi *direction parallel* menghasilkan panjang lintasan pahat = 407,846 mm dan strategi *contour parallel* dengan *overlapping* menghasilkan panjang lintasan pahat = 316,0176 mm. Hasil pengembangan strategi *direction parallel* mampu memberikan panjang lintasan yang lebih pendek yaitu sebesar 318,347 mm dan pengembangan strategi *contour parallel* tanpa *overlapping* juga mampu memberikan panjang lintasan pahat yang lebih pendek sebesar 296,578 mm.

Berdasarkan hasil perhitungan pada sebuah segitiga yang memiliki sudut-sudut yang tidak sama pada ketiga sisinya. Pengembangan strategi *direction parallel* mampu menghasilkan lintasan pahat yang lebih pendek daripada strategi *contour parallel* dengan *overlapping*. Hal ini disebabkan oleh besarnya *overlapping* ditentukan oleh sisi yang memiliki *scallop* terpanjang sedangkan setiap sisi memiliki panjang *scallop* yang tidak sama sehingga terdapat lintasan yang mengalami pemesinan berulang yang terlalu panjang.



Gambar 7 Strategi pemesinan *contour parallel* tanpa *overlapping*

Strategi *direction parallel* yang dikembangkan bukanlah strategi pemesinan yang paling cepat pada contoh kasus ini. Strategi pemesinan yang paling cepat adalah strategi pemesinan *contour parallel* tanpa *overlapping*. Strategi ini memiliki lintasan pahat yang paling pendek karena lintasan menaik yang digunakan merupakan lintasan miring terpanjang yang dibentuk oleh sudut terkecil. Sementara lintasan untuk menghilangkan sisa pemotongan adalah lintasan pada batas *pocket* yang memiliki sudut lebih besar.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan pada contoh numerik 1 dan contoh numerik 2 diketahui bahwa strategi pemesinan *contour parallel* mampu memberikan lintasan pahat yang paling pendek. Strategi *contour parallel* dengan *overlapping* cocok untuk segitiga sama sisi ($\alpha = \beta = \gamma = 60^\circ$), sedangkan strategi *contour parallel* tanpa *overlapping* cocok untuk segitiga yang memiliki sudut berlainan ($\alpha \neq \beta \neq \gamma$). Pemilihan strategi untuk pemesinan bentuk rongga segitiga harus mempertimbangkan ukuran pahat dan bentuk segitiga untuk memperoleh lintasan pahat yang paling pendek.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arya, S., Cheng, S.W., Mount, D.M., 2001, *Approximation Algorithms for Multiple-Tool Milling*, Int'l. J. of Computational Geometry and Applications, 11, 339-372.
- [2] Chaeron, M., 2006, Model Analitis Panjang Lintasan Pahat untuk Pemesinan Bentuk Rongga (*Pocket*) Segitiga, *Jurnal Teknologi Industri*, Vol. X, No. 3, juli 2006.
- [3] Kramer, T.R., 1992, *Pocket Milling with Tool Engagement Detection*, Journal of Manufacturing System, Vol. 11, No. 2, pp. 114-123.
- [4] Kyoung, Y.M., Cho, K.K., Jun, C.S., 1997, *Optimal Tool Selection for Machining in Process Planning*, Computers Industrial Engineering, Vol. 33, No. 3-4, pp. 505-508
- [5] Purcell, Edwin J., Varberg, D., 1996, *Kalkulus dan Geometry Analitis*, Edisi Keempat, Erlangga, Jakarta.
- [6] Veeramani, D., Gau, Y.S., 1997, Selection of an Optimal Set of Cutting-Tool for Triangular Pocket, *International Journal of Production Research*, Vol.35, No. 9, pp. 2621-2637.