

# Karakteristik Pemotongan Ortogonal Kering Paduan Titanium Ti6Al4V Menggunakan Pahat Karbida

Armansyah GINTING<sup>1</sup>

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan  
Email: draginting@yahoo.com

## ABSTRAK

Pada kajian ini, paduan titanium Ti6Al4V dipotong menggunakan pahat karbida (WC-Co) dengan tujuan mempelajari karakteristik pemotongan ortogonal kering bahan tersebut. Pahat karbida sisipan dipasangkan pada pemegang pahat sehingga menghasilkan geometri pahat terpasang bersudut geram ( $\gamma$ ) 0° dan 30°. Tiga tingkat laju pemotongan (Vc) yaitu 15, 30 dan 60 m/min serta pemakanan (f) yaitu 0.1, 0.2 dan 0.3 mm/tooth ditetapkan sebagai kondisi pemotongan. Hasil kajian menunjukkan bahwa pahat karbida bersudut geram 30° tidak dapat digunakan untuk pemotongan ortogonal Ti6Al4V karena mengalami kegagalan katastropik segera setelah pemotongan sepanjang 1000 mm untuk seluruh kondisi pemotongan. Untuk pahat bersudut geram 0°, pemotongan dapat berlangsung untuk semua kondisi pemotongan dan didapatkan bahwa gaya pemotongan cenderung turun seiring dengan kenaikan laju pemotongan pada pemakanan 0.1 mm tetapi yang sebaliknya terjadi saat pemakanan dinaikkan hingga 0.3 mm. Hal ini terjadi akibat peristiwa pelembutan material pada suhu pemotongan tinggi dan juga berkaitan erat dengan parameter pembentukan geram yaitu koefisien gesek ( $\mu$ ) dan sudut geser utama ( $\phi$ ), dan lokalisasi geser adiabatik saat pembentukan geram bersegmen.

**Kata kunci:** Sudut geram pahat, gaya pemotongan, kegagalan katastropik, koefisien gesek, sudut geser utama, geram bersegmen.

## ABSTRACT

*In this study, titanium alloy Ti6Al4V was cut using carbide tool (WC-Co) for the purpose of studying the orthogonal dry cutting characteristic on the material. The insert carbide tool was mounted on tool holder and having rake angle ( $\gamma$ ) of 0° and 30°. There were 3 levels of cutting speed (Vc) of 15, 30, and 60 m/min and feed (f) 0.1, 0.2 and 0.3 mm/tooth selected as the cutting conditions in this study. The results of study show that tool with rake angle of 30° experiences catastrophic failure soon after cutting length of 1000 mm at all cutting conditions. For tool with rake angle of 0°, cutting can be carried out at all cutting conditions and it is found that cutting force tends to decrease when the increasing of cutting speed at feed of 0.1 mm but in opposite when feed is increased up to 0.3 mm. It is due to metal softening at high cutting temperature, the chip formation parameters, i.e. friction coefficient ( $\mu$ ) and primary shear zone ( $\phi$ ), and the shear banding localisation on segmented chip formation.*

**Keywords:** Tool rake angle, cutting force, catastrophic failure, friction coefficient, primary shear zone, segmented chip.

## PENDAHULUAN

Penggunaan paduan titanium pada industri pesawat terbang merupakan suatu keharusan karena paduan titanium merupakan bahan dengan karakteristik istimewa sebagaimana yang diperlukan oleh pesawat terbang yaitu ketangguhan sifat mekanik pada suhu tinggi dan perbandingan antara ketangguhan bahan dan massa bahan yang baik.

Namun demikian, para pakar proses pemesinan menemukan bahwa bukan hal yang mudah memotong bahan paduan titanium menjadi komponen pesawat terbang karena sifat ketermesinan paduan titanium yang rendah. Oleh karena itu, paduan titanium digolongkan kepada bahan yang sulit di mesin (*difficult-to-machine material*).

Dari seluruh bahan pahat yang tersedia, bahan pahat yang dinilai oleh banyak peneliti sebagai

<sup>1</sup> Profesor tamu di Lamefip-ENSAM CER Bordeaux, Esplanade des Arts et Metiers 33405 Talence Cedex, France.

bahan yang cukup baik digunakan untuk pemesinan paduan titanium adalah pahat Karbida (WC-Co) [1,2,3,4]. Namun harus dicatat bahwa pahat Karbida tersebut digunakan pada keadaan pemersinan basah yaitu pada pemotongan yang menggunakan cairan pemotongan dalam kuantitas yang besar.

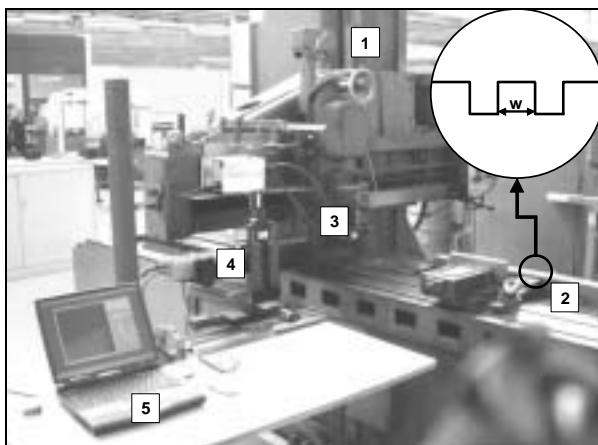
Akhir-akhir ini, cairan pemotongan bekas (cairan pemotongan yang telah habis masa pakaiannya) sebagai buangan dari industri pemotongan logam mendapat perhatian serius karena mengancam kelestarian lingkungan. Sreejith dan Ngori [5] melaporkan bahwa jutaan gallon cairan pemotongan bekas dihasilkan dari industri pemotongan logam setiap tahunnya. Cairan pemotongan bekas ini biasanya hanya dimasukkan ke dalam kontainer dan ditimbun di bawah tanah. Sebagai industri yang menggunakan banyak cairan pemotongan saat proses fabrikasi komponen yang terbuat dari paduan titanium, maka industri pesawat terbang mesti mempertimbangkan masalah pencemaran lingkungan tersebut. Untuk mengatasi hal ini, maka para pakar pemesinan merekomendasikan suatu strategi yang cukup ekstrim yaitu dengan pemesinan kering (pemesinan tanpa menggunakan cairan pemotongan) atau dari sudut pandang lingkungan, strategi ini disebut dengan pemesinan hijau (*green machining*) [5].

Agar pemesinan kering dapat dilakukan pada paduan Titanium, maka perlu diadakan kajian mengenai karakteristik ketermesinan kering bahan tersebut. Untuk itu, pada kajian ini karakteristik ketermesinan kering tersebut dipelajari dengan metode eksperimental pemotongan ortogonal paduan titanium Ti6Al4V menggunakan pahat WC-Co. Gaya pemotongan yang diukur pada saat pengujian pemesinan merupakan data utama untuk memperoleh nilai parameter pembentukan geram yaitu koefisien gesek ( $\mu$ ) dan sudut geser utama ( $\phi$ ). Selanjutnya, berdasarkan kondisi pemotongan, gaya pemotongan dan parameter pembentukan geram disusunlah karakteristik pemotongan ortogonal kering dimaksud.

## METODE PENELITIAN

Susunan peralatan yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Pelaksanaan eksperimen pemotongan dilakukan menggunakan mesin sekrap GSP 2108 R.20 yang memiliki panjang meja kerja 2000 mm dan laju pemotongan yang bervariasi antara 6 hingga 60 m/menit. Pada eretan dimana pemegang pahat dijepitkan, dipasang meja alat pengukur gaya pemotongan yaitu KISTLER yang dilengkapi dengan 4 peraba piezo-elektrik (*dynamometer with 4 piezoelectric sensors*). Peralatan ini dihubungkan dengan pemegang pahat sehingga memungkinkan untuk mendapatkan nilai gaya pemotongan akibat laju pemotongan ( $F_c$ ) dan gesekan ( $F_f$ ). Untuk tujuan merekam proses

pembentukan geram (*chip formation*), digunakan kamera berkelajuan tinggi yang dilengkapi dengan lensa berupa mikroskop. Namun demikian, hasil rekaman pembentukan geram tersebut tidak dapat dilaporkan pada kertas kerja ini.



Gambar 1. Susunan Peralatan Penelitian Pengujian Pemesinan: (1) Mesin sekrap GSP2108 R.20, (2) Bendakerja paduan titanium Ti6Al4V, lihat inset  $w$  = lebar pemotongan ortogonal, (3) Meja dynamometer dan pemegang pahat, (4) Kamera laju tinggi yang dilengkapi lensa mikroskop, dan (5) PC data akuisisi untuk gaya pemotongan dari dinamometer dan video proses pembentukan geram dari kamera laju tinggi.

Benda kerja yang digunakan adalah paduan Titanium Ti6Al4V berbentuk balok berukuran (1000x60x50) mm. Permukaan benda kerja ini terlebih dahulu dimesin dengan frais tegak untuk membuang lapisan permukaan yang keras akibat pengerasan kerja (*work hardening*) maupun tegangan sisa (*residual stresses*) akibat proses pendahuluan pembentukan paduan titanium tersebut. Proses frais dilakukan hingga kualitas pemesinan kualitas akhir (*finish machining*). Selanjutnya, agar proses pemotongan ortogonal dapat dilakukan pada operasi sekrap, maka pada permukaan bagian atas benda kerja dibuat alur-alur dengan lebar puncak ( $w$  = lebar pemotongan ortogonal) 4 mm yang lebih kecil dari lebar pahat sisipan yaitu 4.5 mm (lihat inset pada Gambar 1). Komposisi kimia dan sifat mekanik benda kerja paduan titanium Ti6Al4V diberikan masing-masing pada Tabel 1 dan 2.

Pahat yang digunakan pada penelitian ini adalah berupa pahat sisipan dari bahan Karbida (WC-Co) kelas K20. Pahat sisipan ini dipasangkan pada pemegang pahat sehingga memiliki geometri sudut geram (*rake angle*/ $\mu$ ) pada sistem pahat terpasang yaitu  $0^\circ$  dan  $30^\circ$  manakala sudut bebas (*clearance angle*/ $\theta$ ) adalah  $12^\circ$ . Geometri pahat ini ditetapkan berdasarkan teori pemotongan ortogonal yang mana proses pembuangan bahan atau pembentukan geram lebih mudah terjadi apabila pahat mempunyai bidang aliran geram bersudut positif. Selain itu, sudut geram positif akan

menghasilkan sudut geser utama yang semakin besar sehingga panjang kontak antarmuka pahat-geram akan menjadi lebih kecil dan konsekuensinya gaya pemotongan juga lebih kecil. Gaya pemotongan yang kecil berarti pembentukan geram berlangsung dengan energi yang lebih kecil. Selanjutnya nilai sudut geram  $30^\circ$  dipilih berdasarkan keberhasilan penelitian sebelumnya ketika pemesinan ortogonal Aluminium AA2024 T351 [6].

Pengujian pemesinan seluruhnya dilakukan pada kondisi pemotongan kering. Pemesinan kering merupakan topik yang penting dibicarakan hari ini karena undang-undang lingkungan hidup mengenai pengendalian pembuangan cairan pemotongan bekas ini telah diberlakukan (Sreejith & Ngoi 2000). Kondisi pemotongan yang dipilih pada penelitian ini adalah laju pemotongan 15, 30 dan 60 m/min, manakala pemakanan adalah 0.1, 0.2 dan 0.3 mm/tooth. Kondisi pemotongan tersebut adalah kondisi pemotongan yang lazim digunakan pada industri pesawat terbang untuk memotong paduan titanium.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Parameter Pembentukan Geram dan Gaya Pemotongan

Hasil pengukuran yang diperoleh dari pengujian dipaparkan pada Tabel 3. Ternyata tidak seluruh data yang diinginkan berhasil diperoleh. Khusus untuk pemotongan menggunakan pahat bersudut geram  $30^\circ$ , seluruh kondisi pemotongan berakhir dengan kerusakan pahat katastropik (*catastrophic tool failure*) segera setelah memotong sepanjang

benda kerja yaitu 1000 mm. Lebih lanjut hal ini akan diteliti lagi dan akan dilaporkan pada publikasi yang akan datang.

Data-data gaya pemotongan yang dipaparkan pada Tabel 3 sebenarnya adalah data yang diperoleh dari keluaran pengukuran yang dihasilkan oleh dinamometer sebagaimana contoh plot yang disajikan pada Gambar 2. Selanjutnya untuk nilai parameter pembentukan geram yaitu koefisien gesek ( $\mu$ ) dan sudut geser utama ( $\phi$ ) (lihat Gambar 3) dihitung menggunakan persamaan pemotongan ortogonal Merchant [7], yaitu:

$$m = \tan \gamma = \frac{F_f}{F_N} = \frac{F_c \sin \gamma + F_t \cos \gamma}{F_c \cos \gamma - F_t \sin \gamma} \quad (1)$$

$$\phi = 45^\circ + \frac{g}{2} \cdot \frac{t}{2} \quad (2)$$

dengan:

$F_c$  : Gaya pemotongan akibat laju pemotongan

$F_f$  : Gaya pemotongan akibat gesekan

$F_N$  : Gaya normal

$\gamma$  : Sudut geram pahat

$\tau$  : Sudut gesek

### Perilaku Pemotongan Ortogonal

Untuk menganalisis data guna mempelajari perilaku pemotongan ortogonal ketika pemotongan kering paduan titanium Ti6Al4V menggunakan pahat karbida, maka data-data yang dipaparkan pada Tabel 3 di plot dalam bentuk hubungan yang lain. Untuk hubungan antara laju pemotongan ( $V_c$ ) dengan gaya pemotongan ( $F_c$  dan  $F_f$ ) disajikan pada

Tabel 1. Sifat Mekanik Paduan Titanium Ti6Al4V.

Kek.tarik (MPa)	Elasti. (MPa)	Mulur (%)	Mampat (%)	Modulus (GPa)	Kekerasan (HV)	Kerapatan (g/cm <sup>3</sup> )	Panas spes 20-100°C (J/kg K)	Konduk. terma20°C (W/m K)
931	862	10	25	110	340	4.43	580	7.3

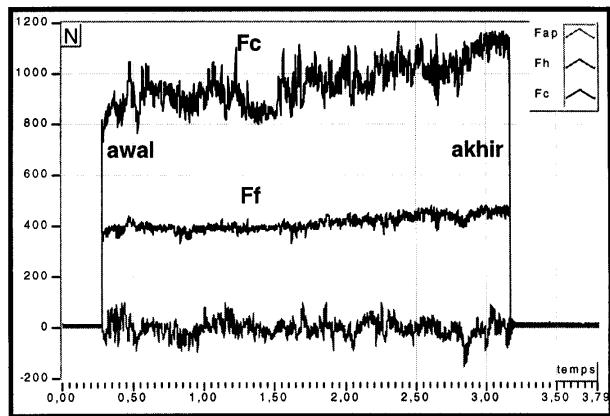
Tabel 2. Komposisi Kimia Paduan Titanium Ta6Al4V.

Fe	V	Al	C	O	N	O <sub>2</sub> +N
Max 0.25	3.5 – 4.5	5.5 – 6.75	Max 0.8	Max 0.2	Max 0.3	Max 0.25

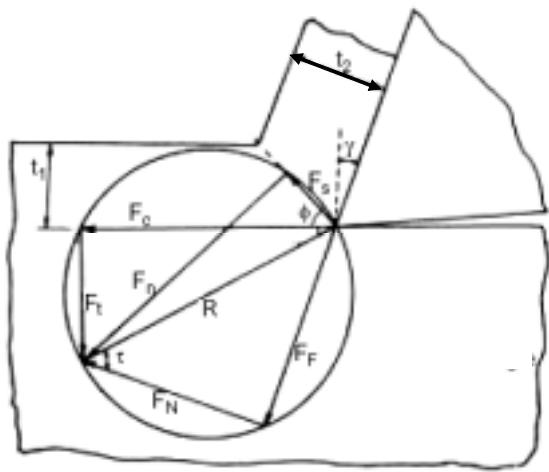
Tabel 3. Data Hasil Pengukuran.

No	V <sub>c</sub>	f	$\gamma$ ( $^\circ$ )	F <sub>c</sub> (N) awal	F <sub>c</sub> (N) akhir	F <sub>f</sub> (N) awal	F <sub>f</sub> (N) akhir	$\mu$ awal	$\mu$ akhir	$\theta$ ( $^\circ$ )
1	15	0.1	0	900	1100	400	480	0.44	0.43	21.49
2	15	0.2	0	1200	1350	520	600	0.43	0.44	21.49
3	15	0.3	0	1750	2100	700	850	0.40	0.40	23.20
4	30	0.1	0	970	1200	450	550	0.46	0.46	20.30
5	30	0.2	0	1250	1420	580	650	0.46	0.46	20.35
6	30	0.3	0	1300	1790	420	700	0.32	0.39	25.47
7	60	0.1	0	800	1000	300	600	0.37	0.60	19.37
8	60	0.2	0	900	1100	580	710	0.64	0.65	12.18
9	60	0.3	0	1600	1950	800	1170	0.50	0.60	16.24
10	15	0.1	30	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
...	...	...	30	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
18	60	0.3	30	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

Gambar 4(a), 4(b) dan 5(a). Selanjutnya untuk laju pemotongan ( $V_c$ ) dengan koefisien gesek ( $\mu$ ) pada Gambar 5(b). Akhirnya untuk laju pemotongan ( $V_c$ ) dengan sudut geser utama ( $\phi$ ) disajikan pada Gambar 5(c). Susunan gambar tersebut disajikan demikian rupa oleh karena disebabkan pembahasan berikut.



**Gambar 2. Evolusi Pengukuran Gaya Pemotongan Sepanjang Proses Pemesinan Berlangsung pada Laju Pemotongan ( $V_c$ ) 15 m/min, Pemakanan ( $f$ ) 0.1 mm Menggunakan Pahat Bersudut Geram  $0^\circ$ .**



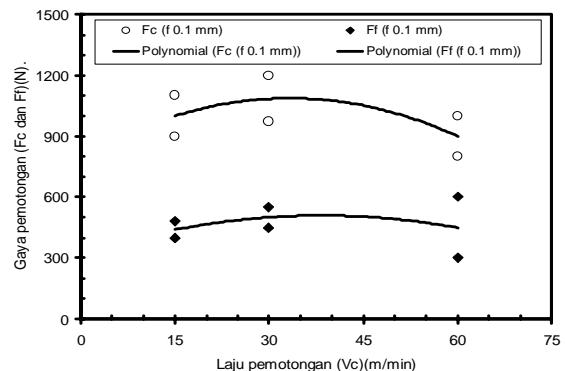
**Gambar 3. Sistem Gaya Pemotongan dan Parameter Pembentukan Geram pada Mode Pemotongan Ortogonal (Merchant 1944).**

Dari plot yang ada pada Gambar 4(a), 4(b) dan 5(a), dapat dilihat bahwa kecenderungan hubungan antara  $V_c$  dan  $F_c$ , demikian pula  $V_c$  dan  $F_f$  adalah sebagai berikut:

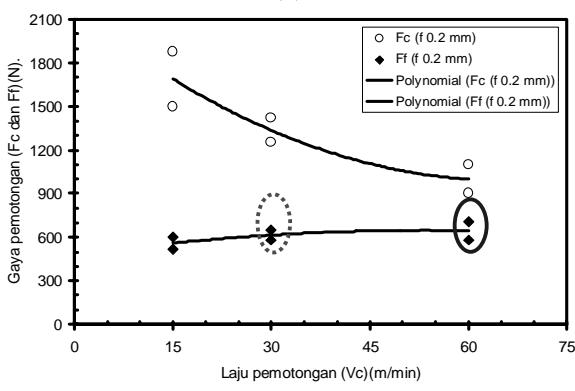
- Untuk nilai  $f$  0.1 mm ( $\gamma 0^\circ$ ) yaitu plot pada Gambar 4(a),  $F_c$  dan  $F_f$  cenderung berbanding terbalik dengan  $V_c$ . Nilai  $F_c$  dan  $F_f$  yang pada awalnya naik dari laju pemotongan 15 ke 30 m/min kembali turun saat laju pemotongan naik ke 60 m/min. Dalam hal ini, kenaikan gaya pemotongan  $F_c$  dan  $F_f$  dari laju pemotongan 15

ke 30 m/min adalah disebabkan oleh meningkatnya gaya yang diperlukan untuk menghasilkan geram dan ini adalah suatu konsekuensi logis. Selanjutnya, turunnya gaya pemotongan  $F_c$  dan  $F_f$  saat laju pemotongan naik dari 30 ke 60 m/min adalah karena peristiwa pelembutan material (*metal softening*) akibat tingginya suhu pemotongan pemesinan kering pada laju pemotongan 60 m/min tersebut. Peristiwa pelembutan material ini juga mengakibatkan geram yang terbentuk pada pemotongan ortogonal paduan titanium ini berbentuk geram bersegmen (*segmented chip*) dengan lokalisasi kawasan geser adiabatik (*localisation of adiabatic shear band*) (lihat Gambar 6).

- Untuk nilai  $f$  0.2 mm ( $\gamma 0^\circ$ ) yaitu plot pada Gambar 4(b),  $F_c$  cenderung berbanding terbalik dengan  $V_c$  manakala  $F_f$  cenderung berbanding lurus. Nilai  $F_c$  turun seiring dengan kenaikan laju pemotongan hingga 60 m/min manakala nilai  $F_f$  naik. Penjelasan mengenai turunnya nilai  $F_c$  dalam hal ini juga sama seperti pada nomor 1, dan tidak adanya kenaikan  $F_c$  dari laju pemotongan 15 ke 30 m/min adalah diyakini karena pertambahan nilai  $f$  dari 0.1 ke 0.2 mm cukup untuk meningkatkan suhu sehingga peristiwa pelembutan material (*metal softening*) sudah terjadi pada laju pemotongan 30 m/min. Untuk nilai  $F_c$  yang cenderung naik pembahasannya akan disajikan kemudian.
- Untuk nilai  $f$  0.3 mm ( $\gamma 0^\circ$ ) yaitu plot pada Gambar 5(a),  $F_c$  dan  $F_f$  mempunyai kecenderungan yang sama seperti layaknya pada plot Gambar 4(a) walaupun untuk arti yang berbeda. Saat ini, kecenderungan data adalah turun ketika laju pemotongan naik dari 15 ke 30 m/min dan selanjutnya naik seiring dengan kenaikan laju pemotongan hingga 60 m/min. Penyebab mengapa gaya pemotongan  $F_c$  dan  $F_f$  turun ketika laju pemotongan naik dari 15 ke 30 m/min adalah sebagaimana penjelasan nomor 1 dan juga nomor 2, manakala penyebab naiknya kembali gaya pemotongan  $F_c$  dan  $F_f$  ketika laju pemotongan naik dari 30 ke 60 m/min (sebagaimana pada nomor 2) adalah sebagai berikut ini.



(a)



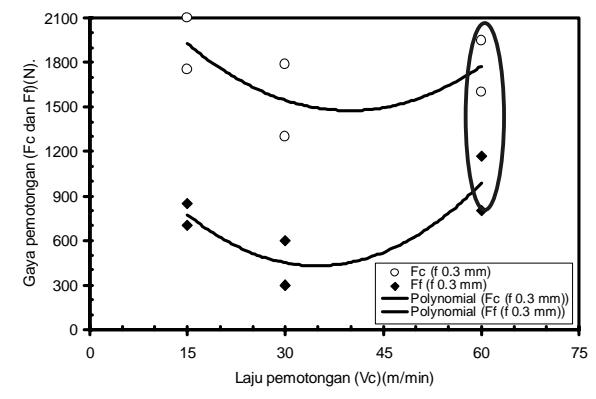
(b)

**Gambar 4. Plot Laju Pemotongan ( $V_c$ ) vs. Gaya Pemotongan ( $F_c$  dan  $F_f$ ): (a) Untuk pemakanan ( $f$ ) 0.1 mm dan sudut geram pahat ( $\gamma$ )  $0^\circ$ , dan (b) Untuk pemakanan ( $f$ ) 0.2 mm dan sudut geram pahat ( $\gamma$ )  $0^\circ$ .**

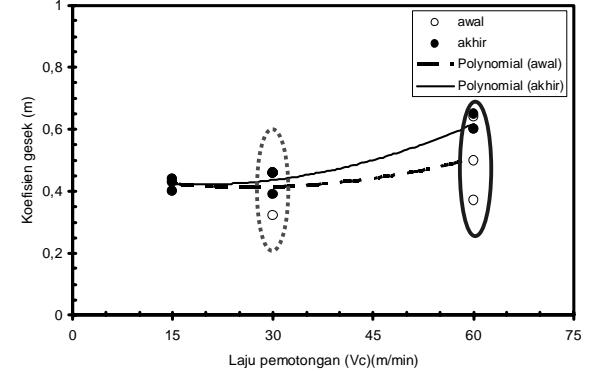
Pada saat  $F_f$  (plot pada Gambar 4(b)) naik, maka juga terlihat bahwa kenaikan itu diikuti dengan naiknya nilai koefisien gesek yang ditunjukkan oleh plot pada Gambar 5(b). Perhatikan sistem gaya pemotongan model pemotongan ortogonal Merchant [7], dimana nilai  $F_f$  berbanding lurus dengan nilai koefisien gesek, yaitu sebagaimana ditunjukkan oleh Persamaan 9(1). Selanjutnya, apabila diperhatikan lagi hubungannya dengan plot pada Gambar 5(c), maka terlihat bahwa pada saat yang bersamaan pula terjadi kecenderungan penurunan sudut gesek utama. Korelasi peristiwa ini akan menjadi lebih dramatis lagi dampaknya, sebagaimana ditunjukkan oleh plot Gambar 5, apabila laju pemotongan dan pemakanan dinaikkan menjadi 60 m/min dan 0.3 mm.

Nilai koefisien gesek ( $\mu$ ) yang semakin besar berarti bahwa aliran geram pada permukaan bidang geram pahat berubah dari peristiwa kontak menggelincir (*sliding contact*) menjadi kontak melekat (*sticking contact*). Sebagaimana di atas, hal ini sudah cukup menjadi alasan kuat mengapa naiknya nilai gaya pemotongan  $F_f$ . Selanjutnya, geram yang kontak melekat mulai ujung potong mayor (titik ujung vektor R di ujung pahat seperti pada Gambar 3) hingga akhir bidang gesek sekunder (*secondary shear zone*) (bidang antarmuka pahat-geram / *tool chip interface*) terjadi saat sudut gesek utama (*primary shear zone*) ( $\phi$ ) yang kecil (lihat plot Gambar 5(c)). Korelasi keadaan ini mengakibatkan geram yang terbentuk melekat dan menumpuk pada ujung potong pahat. Akibatnya, walaupun geram yang terbentuk tetap merupakan geram bersemen (*segmented chip*) yaitu sama dengan geram yang dihasilkan oleh laju pemotongan 30 m/min dan pemakanan 0.3 mm (saat ini  $F_c$  dan  $F_f$  turun sebagaimana ditunjukkan oleh plot pada Gambar 5(a)), gerakan pahat untuk pemotongan ke depan (lihat arah  $F_c$  pada Gambar 3) akan tertahan. Perlu gaya pemotongan ( $F_c$ ) yang lebih besar untuk mengeyahkan geram yang melekat pada ujung potong pahat demi terbentuknya geram bersemen.

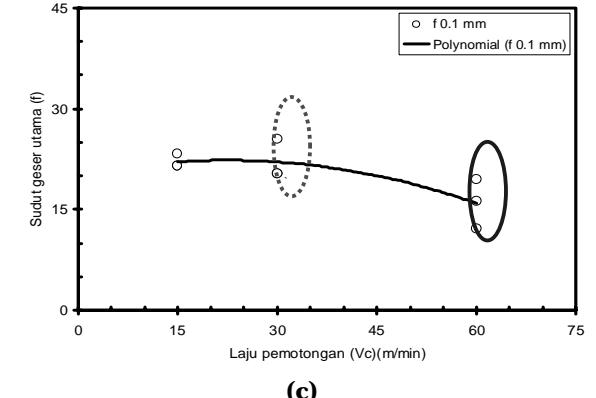
(*chip interface*) terjadi saat sudut gesek utama (*primary shear zone*) ( $\phi$ ) yang kecil (lihat plot Gambar 5(c)). Korelasi keadaan ini mengakibatkan geram yang terbentuk melekat dan menumpuk pada ujung potong pahat. Akibatnya, walaupun geram yang terbentuk tetap merupakan geram bersemen (*segmented chip*) yaitu sama dengan geram yang dihasilkan oleh laju pemotongan 30 m/min dan pemakanan 0.3 mm (saat ini  $F_c$  dan  $F_f$  turun sebagaimana ditunjukkan oleh plot pada Gambar 5(a)), gerakan pahat untuk pemotongan ke depan (lihat arah  $F_c$  pada Gambar 3) akan tertahan. Perlu gaya pemotongan ( $F_c$ ) yang lebih besar untuk mengeyahkan geram yang melekat pada ujung potong pahat demi terbentuknya geram bersemen.



(a)

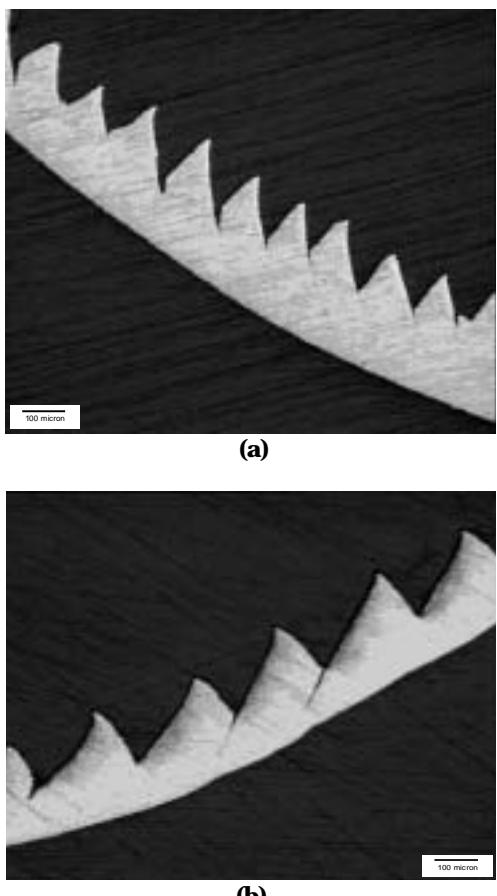


(b)



(c)

**Gambar 5. Plot Laju Pemotongan ( $V_c$ ) vs.: (a) Gaya Pemotongan ( $F_c$  dan  $F_f$ ), (b) Koefisien gesek ( $\mu$ ), dan (c) Sudut gesek utama ( $\phi$ ).**



**Gambar 6. Morfologi Geram Bersegmen (*segmented chip*) yang terbentuk:** (a) Geram yang dihasilkan pada laju pemotongan 30 m/min dan pemakanan 0.3 mm, dan (b) Geram yang dihasilkan pada laju pemotongan 60 m/min dan pemakanan 0.3 mm.

Gaya pemotongan ( $F_c$ ) yang lebih besar itu akan mengakibatkan regangan (*strain*) dan laju regangan (*strain rate*) yang lebih tinggi pada geram dan khususnya kawasan geser adiabatik (*adiabatic shear banding*) [8] sehingga segmen geram yang dihasilkan lebih renggang berbanding yang dihasilkan oleh laju pemotongan 30 m/min dan ketebalan geram (lihat  $t_2$  pada Gambar 3) juga menjadi lebih tipis (lihat Gambar 6).

## KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan yang dipaparkan di atas, maka berikut disusun kesimpulan dari penelitian ini sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai.

1. Pahat karbida bersudut geram positif ( $\gamma > 30^\circ$ ) yang secara teoretik menurut konsep pemotongan ortogonal akan memberikan hasil yang baik, ternyata tidak dapat digunakan untuk memotong kering paduan titanium Ti6Al4V. Pahat ini mengalami kegagalan katastropik segera setelah pemotongan sepanjang 1000 mm untuk seluruh kondisi pemotongan yang lazim bagi paduan titanium.

2. Pahat Karbida bersudut geram positif ( $\gamma > 0^\circ$ ) yang secara teoritik menurut konsep pemotongan ortogonal tidak direkomendasikan untuk digunakan, malah ternyata memberikan hasil yang dapat menjelaskan karakteristik pemotongan ortogonal kering paduan titanium Ti6Al4V untuk seluruh kondisi pemotongan yang lazim bagi paduan titanium.
3. Untuk pahat Karbida bersudut geram positif ( $\gamma > 0^\circ$ ), didapatkan bahwa:
  - a. Gaya pemotongan ( $F_c$  dan  $F_f$ ) cenderung turun seiring dengan kenaikan laju pemotongan ( $V_c$ ) pada pemakanan ( $f$ ) 0.1 mm tetapi yang sebaliknya terjadi saat nilai pemakanan ( $f$ ) dinaikkan hingga 0.3 mm.
  - b. Nilai koefisien gesek ( $\mu$ ) cenderung mengalami kenaikan seiring dengan laju pemotongan ( $V_c$ ).
  - c. Nilai sudut geser utama ( $\phi$ ) cenderung mengalami penurunan seiring dengan laju pemotongan ( $V_c$ ).
4. Kenaikan gaya pemotongan  $F_c$  dan  $F_f$  dari laju pemotongan ( $V_c$ ) 15 ke 30 m/min saat pemakanan ( $f$ ) 0.1 mm adalah disebabkan oleh meningkatnya gaya yang diperlukan untuk menghasilkan geram dan ini adalah suatu konsekuensi logis. Selanjutnya, turunnya gaya pemotongan  $F_c$  dan  $F_f$  saat laju pemotongan naik dari 30 ke 60 m/min adalah karena peristiwa pelembutan material (*metal softening*) akibat tingginya suhu pemotongan pemesinan kering pada laju pemotongan 60 m/min tersebut. Peristiwa pelembutan material ini juga mengakibatkan geram yang terbentuk pada pemotongan ortogonal paduan titanium ini berbentuk geram bersegmen (*segmented chip*) dengan lokalisasi kawasan geser adiabatik (*localisation of adiabatic shear band*).
5. Kenaikan gaya pemotongan  $F_c$  dan  $F_f$  dari laju pemotongan ( $V_c$ ) 30 ke 60 m/min saat pemakanan ( $f$ ) 0.3 mm adalah disebabkan oleh kenaikan koefisien gesek ( $\mu$ ) dan turunnya nilai sudut geser utama ( $\phi$ ). Kenaikan nilai koefisien gesek berarti perubahan peristiwa aliran geram pada permukaan bidang geram pahat dari peristiwa kontak menggelincir (*sliding contact*) menjadi kontak melekat (*sticking contact*). Korelasi peristiwa kontak melekat pada saat sudut geser utama kecil, mengakibatkan geram yang terbentuk melekat dan menumpuk pada ujung potong pahat sehingga perlu gaya pemotongan yang lebih besar untuk mengeyahkan geram yang melekat pada hujung potong pahat demi terbentuknya geram bersegmen.
  - Gaya pemotongan ( $F_c$ ) yang lebih besar mengakibatkan regangan (*strain*) dan laju regangan (*strain rate*) yang lebih tinggi pada geram dan khususnya kawasan geser adiabatik (*adiabatic shear banding*) sehingga segmen geram yang dihasilkan lebih renggang dan ketebalan geram juga menjadi lebih tipis.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada MCF M. Nouari, MCF D. Coupard dan Pr. F. Girot atas kerjasama yang baik selama kerjasama penelitian di LAMEFIP ENSAM CER Bordeaux, Perancis. Juga untuk Prof. H. A. Abdel-Aal dari Universitas Wisconsin AS, MCF M. El Mansori selama kerjasama penelitian di LMPF ENSAM CER Châlons-en-Champagne, Perancis. Selanjutnya, terima kasih kepada ENSAM Perancis dan rekan-rekan industri pesawat terbang atas pembiayaan penelitian "Scientific Aspects on Machining of Aeronautic Materials: Orthogonal Cutting, Milling and Numerical Simulation". Akhirnya, terima kasih kepada ENSAM atas kerjasama penelitian dan kesempatan menjadi Profesor Tamu mulai tahun 2004.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Siekmann, H.J., 1955, *How to machine titanium*, The Tool Engineer 34:78-82
2. Dearnley, P.A. and Grearson, A.N., 1986, *Evaluation of principal wear mechanism of cemented carbides and ceramics for machining titanium alloys*, Mater. Sc. Technol. 2:47-58
3. Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M., 1997, *Titanium alloys and their machinability - A review*, J. of Mater. Proc. Technol. 68:262-274
4. López de Lacalle, L.N., Perez-Bilbatua, J., Sanchez, J.A., Llorente, J.I., Gutierrez, A., Alboniga, J., 2000, *Using high pressure coolant in the drilling and turning of low machinability alloys*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 16:85-91
5. Sreejith, P.S. and Ngoi, B.K.A., 2000, *Dry machining: Machining of the future*, J. of Mater. Proc. Technol. 101:287-291
6. List, G., 2004, *Etude des mecanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caracterisation de l'interface outil-copeau application a l'usinage a sec de l'alliage d'aluminium aeronautique AA2024 T351*, Docteur These, ENSAM CER Bordeaux, Perancis
7. Merchant, M.E, 1944, *Basic mechanics of the metal cutting process*, J. App. Mech. Rev. A11:168-175
8. Ginting, A. and Nouari, M., 2006, *Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material*, Int. J. Mach. Tools & Manuf., 46:758-768.