

## Pengaruh Pemesinan Kering Terhadap Kekasaran dan Kekerasan Permukaan Paduan Titanium

Gusri Akhyar Ibrahim  
Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung  
[gusriakhyar@eng.unila.ac.id](mailto:gusriakhyar@eng.unila.ac.id)

### Abstrak

*Komponen-komponen mesin pesawat terbang yang dibuat daripada bahan paduan titanium memerlukan tingkat kelayakan dan kenyamanan terhadap kondisi permukaan yang dimesin. Integritas permukaan yang dimesin menjadi salah satu indikator penting terhadap kualitas komponen mesin yang diproduksi. Bagaimanapun juga, pada waktu pemesinan, permukaan paduan titanium yang dimesin mudah mengalami kerusakan karena bahan ini bersifat mampu-mesin yang tidak baik. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh model pemesinan kering terhadap integritas permukaan bahan Ti-6%Al-4%V ELI yang dimesin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekasaran permukaan yang diperoleh sangat ditentukan oleh kadar pemakanan dan jari-jari ujung pahat. Pada tingkat awal proses pemesinan, nilai kekasaran permukaan yang dihasilkan ada pada level yang tinggi dan kemudian menurun seiring dengan aus yang berlaku pada ujung mata pahat. Pada jara beberapa mikron di bawah permukaan bahan yang dimesin, didapati efek pengerasan sehingga nilai kekerasan yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan pada permukaan paling atas. Bahkan, lapisan putih yang keras dijumpai setebal lebih kurang 2  $\mu\text{m}$  pada kondisi operasi pemesinan; kecepatan potong 95 m/min, feed rate of 0.35 mm/rev and depth of cut of 0.10 mm. Kondisi ini diperoleh pada akhir pemotongan atau pada kondisi aus telah mencapai maksimum.*

**Kata kunci:** *pemesinan kering, titanium, kekasaran permukaan, kekerasan permukaan.*

### PENDAHULUAN

Titanium dan paduan titanium telah digunakan secara besar-besaran di bidang industri pesawat terbang karena bahan ini memiliki sifat unggul antaranya adalah kombinasi rasio antara kekuatan dan berat yang baik pada temperatur tinggi (*strength-to-weight ratio*), memiliki sifat tahan patah, dan sifat tahan korosi pada suhu tinggi [1]. Akan tetapi, karakteristik dari bahan paduan titanium untuk mesin pesawat terbang ini juga memiliki sifat mudah membentuk austenit saat proses pemesinan sehingga cenderung berlaku perlakuan panas. Karakteristik lain adalah mudah bereaksi dengan material pahat potong di bawah kondisi atmosfer sehingga cenderung membentuk *build-up-edge* dan melekat pada permukaan pahat potong. Konduktifitas termal titanium yang rendah menyebabkan kerusakan permukaan pada bahan yang dipotong, sehingga merusak kualitas permukaan, adanya abrasiv dan kerusakan mikrostruktur [2,3]. Oleh karena itu material titanium dan paduan titanium dikategorikan sebagai bahan yang sulit dimesin.

Proses pemesinan paduan titanium pada tingkat kecepatan tinggi akan menyebabkan penyerpihan yang cepat pada bagian ujung pahat potong, sehingga mudah berlaku patah katastrofik. Kegagalan pahat secara cepat dan penyerpihan pada bagian ujung pahat potong ini menghasilkan kondisi permukaan bahan yang dimesin menjadi rusak, yang ditandai dengan permukaan yang kasar dan tidak seragam [4]. Hal ini tidak hanya menyebabkan nilai

kekasaran permukaan yang tinggi, akan tetapi juga menyebabkan nilai kekerasan permukaan yang tinggi dan kerusakan mikrostruktur. Konduktifitas termal paduan titanium yang rendah akan meningkat suhu pada ujung pahat potong, hal ini juga berkontribusi terhadap kerusakan permukaan yang dimesin. Bahkan kerusakan permukaan semakin parah sebagai akibat daripada suhu yang tinggi terkonsentrasi pada ujung pahat potong. Demikian juga dengan modulus elastisitas yang rendah menyebabkan kerusakan mampu-mesin permukaan bahan paduan titanium.

Penelitian tentang keadaan permukaan bahan yang dimesin menggunakan pahat karbida telah dilakukan. Antara hasil penelitian yang diperoleh adalah berlakunya pembentukan lapisan putih pada proses pemesinan pada kecepatan potong tinggi. Pada bagian di bawah permukaan didapati nilai kekerasan permukaan lebih tinggi dan sebagiannya lebih rendah daripada nilai kekasaran bahan asli [4]. Beberapa usaha telah dilakukan untuk meningkatkan sifat mampu-mesin paduan titanium, seperti menggunakan metode pemesinan kering dan mengembangkan jenis pahat yang digunakan sewaktu proses pemesinan. Metode pemesinan kering digunakan adalah untuk menghindari penggunaan bahan pelumas, yang bersifat berbahaya bagi kesehatan manusia dan merusak lingkungan hidup [5]. Sedangkan penambahan lapisan keras pada permukaan pahat potong dapat berfungsi untuk meningkatkan ketahanan aus dan prestasi umur pahat potong [3]. Dengan pengembangan dan perluasan penggunaan bahan pahat potong karbida ini,

berpotensi untuk meningkatkan sifat mampu-mesin paduan titanium, antaranya adalah dengan penggunaan bahan super keras pada permukaan pahat. Lapisan tersebut juga berfungsi untuk mengurangi gesekan antara pahat potong dan bahan yang dipotong [5]. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai kekasaran permukaan dan kekerasan permukaan bahan yang dimesin (paduan titanium, Ti-6Al-4V ELI). Selain itu, tulisan ini juga untuk mengkaji faktor yang dominan berkontribusi terhadap kerusakan permukaan bahan yang dimesin.

**METODOLOGI PENELITIAN**

Bahan benda kerja yang digunakan pada penelitian adalah paduan titanium jenis alpha beta Ti-6Al-4V *Extra Low Interstitial* (Ti-6Al-4V-ELI). Mikrostruktur dari paduan titanium jenis ini adalah fasa equiaxed  $\alpha$  dan sekelingnya adalah fasa  $\beta$  pada daerah batas butir. Komposisi kimia dari paduan titanium yang digunakan adalah; C=0.11%, Si=0.03%, Fe=0.18%, Al=6.1%, N=0.007%, V=4.0%, S=0.003%, O=0.11%, H=0.031%, Y=0.005% dan sisanya adalah Titanium. Sedangkan sifat-sifat fisika yang terkandung pada bahan paduan titanium ini adalah tegangan tarik sebesar  $132 \times 10^3$  Psi, tegangan yiels pada offset 2% sebesar  $119 \times 10^3$  Psi, perpanjangan 17/14% dan %Ra=42.0. Sekurang-kurangnya 3 mm permukaan terluar bahan paduan

titanium dibuang untuk berbagai jenis kerusakan permukaan dan juga menghilangkan tegangan sisa permukaan sebagai daripada proses pengecoran. Hal ini dapat merusak hasil permesinan, sehingga perlu di buang dan juga untuk mendapat keadaan permukaan yang rata dan seragam [6].

Pemesinan atau pembubutan dilakukan dalam kondisi kering atau tanpa menggunakan pelumas (*dry machining*) dan pada tingkat kecepatan tinggi menggunakan mesin bubut *Colchester T4 6000 CNC*. Pahat bubut dan pemegangn pahat yang digunakan dipilih berdasarkan rekomendasi dari suplayer perusahaan Kennametal [7]. Tiga jenis pahat yang digunakan pada pengjian ini adalah pahat bubut yang tidak dilapisi (K313), pahat bubut yang dilapisi secara metode kimia atau *Chemical Vapor Deposition* (KC9225) dan pahat bubut yang dilapisi secara fisika atau *Physical Vapor Deposition* (KC5010). Pahat bubut yang dilapisi secara proses kimia terdiri dari empat lapis lapisan keras yaitu TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiCN-TiN sedangkan pahat bubut yang dilapisi secara fisika terdiri satu lapis lapisan keras saja yaitu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Penentuan jenis parameter dan tingkat parameter pemotong ditentukan berdasarkan metode Taguchi dengan pendekatan susunan ortogon L<sub>27</sub> orthogonal, sebagaimana yang ditunjukkan pada Table 1.

Tabel 1. Faktor dan level daripada parameter pemotongan dengan pendekatan Metode Taguchi susunan ortogonal L<sub>27</sub>.

Faktor	Level		
	0	1	2
A- Kecepatan potong (m/min)	55	75	95
B- Kadar pemakanan (mm/rev)	0.15	0.25	0.35
C- Kedalaman potong (mm)	0.10	0.15	0.20

Setelah semua parameter pemotongan ditentukan, respon umur pahat bubut dan nilai kekasaran permukaan ditentukan dengan cara mengukur setiap kali pemotongan dilakukan. Aus muka rusuk pahat (*flank wear*) dilakukan dengan menggunakan alat ukur keausan pahat, Mitutoyo Tool Maker Microscope. Umur pahat ditentukan mencatat lamanya proses pemotongan dilakukan sampai pahat bubut dikatakan tidak bisa dipakai lagi atau gagal, yaitu menggunakan alat ukur waktu stopwatch. Pengukuran dilakukan setiap satu kali pemotongan, dan akan dihentikan apabila aus pahat telah mencapai VB= 0,2 mm. Nilai kekasaran permukaan diukur menggunakan alat ukur kekasaran permukaan Phertometer Surfece Roughness Tester,

manakalah nilai kekerasan permukaan ditentukan menggunakan alat uji kekerasan berskala mikro yaitu Ultra Hardness Tester jenis Vickers. Untuk menentukan beberapa kerusakan pada permukaan yang dipotong dilakukan pengujian Scanning Electron Microscope (SEM), agar supaya dapat diamati bentuk ketidak seragaman permukaan bahan yang dipotong.

**HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

Kondisi permukaan bahan titanium yang dipotong tidak hanya dipengaruhi oleh keakuratan dimensi komponen yang dihasilkan, akan tetapi juga

ditentukan oleh sifat-sifat yang dimiliki bahan titanium tersebut. Sedangkan, kondisi permukaan akhir komponen yang dibuat digambarkan sebagai geometri permukaan yang memiliki sifat tahan terhadap umur lelah dan tahan terhadap korosi, yang mana hal tersebut sangat bergantung kepada keadaan permukaan yang dihasilkan [6]. Faktor-faktor yang mempengaruhi keadaan integritas permukaan bahan yang potong adalah temperatur yang dihasilkan selama proses pemotongan, tegangan sisa yang terbentuk, transformasi fasa metalurgi yang berlaku dan plastik deformasi pada mikrostrukturnya. Bagaimanapun juga, faktor yang dominan menentukan keadaan permukaan bahan titanium yang dipotong adalah nilai kekasaran permukaan dan kekerasan permukaan, sebagai akibat daripada suhu yang tinggi sewaktu proses pemotongan berlangsung.

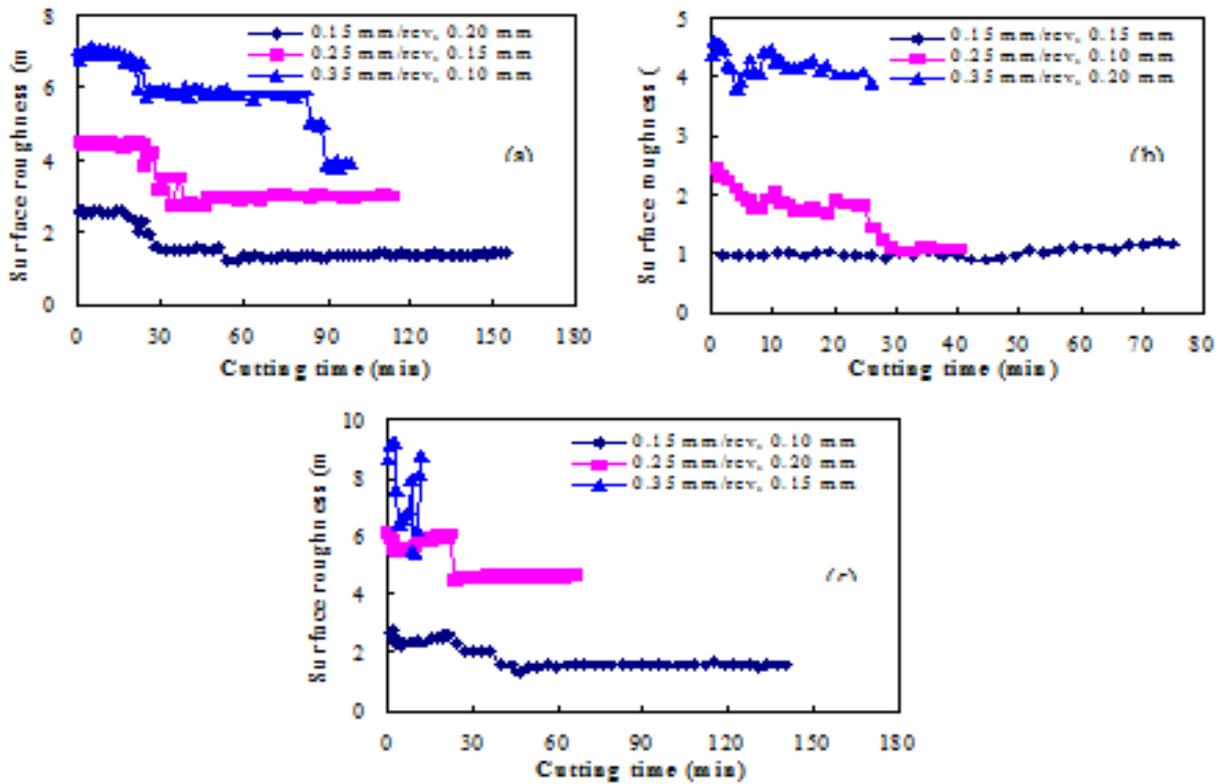
### Surface Roughness

Gambar 1 menunjukkan grafik antara umur pahat dan nilai kekasaran permukaan yang diperoleh sewaktu pemotongan Ti-6Al-4V ELI dilakukan menggunakan pahat yang dilapisi dan tidak dilapisi. Pemotongan dilakukan dalam keadaan kering dan pada tingkat kecepatan potong dan kadar pemakanan (0.15, 0.25 and 0.35 mm/rev). Kurva nilai kekasaran permukaan menunjukkan perbedaan yang ekstrim pada tingkat kadar pemakanan yang berbeda, baik untuk pahat karbida yang dilapisi maupun untuk pahat karbida yang tidak dilapisi. Secara klasik, nilai kekasaran permukaan bahan yang dimesin berkorelasi langsung dengan rumus  $h \approx f^2/8R$  or  $h_{CLA} \approx f^2/18 (3R)^{1/2}$  [8], dimana  $h$  adalah perbedaan tinggi antara puncak dan lembah,  $h_{CLA}$  adalah kekasaran permukaan rata-rata (pada garis tengah),  $f$  adalah kadar pemakanan dan  $R$  adalah jari-jari pahat potong. Rumus tersebut menunjukkan bahwa nilai kekasaran permukaan sangat tergantung pada kadar pemakanan dan jari-jari pahat potong. Persamaan ini memberikan nilai kekasaran permukaan yang ideal, yang hanya akan diperoleh pada waktu kondisi pemotongan yang terbaik juga (ideal). Dari Gambar 1 diperoleh bahwa nilai kekasaran permukaan sangat tergantung pada kadar pemakanan, sehingga pemilihan kadar suapan yang rendah akan menghasilkan kondisi permukaan yang dimesin lebih baik, lebih homogeny dan kerusakan permukaan yang lebih sedikit.

Gambar 1a menunjukkan variasi nilai kekasaran permukaan untuk pahat karbida yang tidak dilapisi pada kecepatan potong 75 m/min dan variasi kadar pemakanan 0.15, 0.25 dan 0.35 mm/rev serta kedalaman potong adalah 0.10, 0.15 dan 0.20 mm. Nilai kekasaran permukaan yang diperoleh pada tingkat awal pemotongan adalah lebih tinggi. Kemudian nilai kekasaran berkurang secara tidak teratur hingga mencapai aus pahat, VB=0.2 mm.

Nilai kekasaran permukaan cenderung menjadi lebih kecil (permukaan lebih halus) hingga mencapai akhir dari umur pahat. Hal ini mungkin disebabkan oleh deformasi berlaku pada muka rusuk pahat potong atau sebagian material paduan titanium melekat pada ujung pahat potong. Hal seperti ini juga dikemukakan oleh peneliti sebelumnya bahwa nilai kekasaran permukaan semakin berkurang menjelang akhir umur pahat, yang disebabkan aus yang berlaku pada ujung pahat potong [2]. Sedangkan menurut Bhattacharyya [8] berkurangnya nilai kekasaran permukaan disebabkan oleh perubahan jari-jari pahat potong (menjadi lebih besar). Jika aus pada jari-jari ujung pahat potong menjadi lebih besar, ini berarti jari-jari ujung pahat potong menjadi lebih besar, sehingga permukaan bahan yang dihasilkan menjadi lebih halus. Untuk kadar pemakanan 0.25 mm/rev, nilai kekasaran permukaan menurun secara tiba-tiba pada saat umur pahat telah mencapai 26.13 menit. Hal ini disebabkan oleh chipping berlaku pada bagian jari-jari ujung pahat potong, yang mana panjangnya mencapai 0.05 mm dari ujung pahat potong.

Gambar 1b menunjukkan grafik antara umur pahat potong dan nilai kekasaran permukaan pada waktu pemesinan paduan titanium Ti-6Al-4V ELI menggunakan pahat karbida yang dilapisi (lapisan super keras) pada kecepatan potong 55 m/min. Secara umum, kecenderungan garis setiap kurva adalah hampir sama yaitu mempunyai tiga pola. Polanya adalah nilai kekasaran permukaan tinggi pada awal pemotongan dan kemudian menurun secara teratur. Sedangkan pada akhir pemotongan, nilai kekasaran permukaan cenderung stabil atau menurun hingga mencapai akhir umur pahat potong. Dapat dilihat pada Gambar 1B bahwa untuk kadar pemakanan 0.25 mm/rev, nilai kekasaran permukaan bahan yang dimesin menurun secara drastis. Pada saat umur pahat telah mencapai 10.27 menit, nilai kekasaran permukaan menurun dari 2.06  $\mu\text{m}$  ke 1.717  $\mu\text{m}$  dan pada umur pahat mencapai 24.53 menit, nilai kekasaran permukaan menurun dari 1.80  $\mu\text{m}$  menjadi 1.20  $\mu\text{m}$ . Hal ini disebabkan oleh aus berlaku secara teratur pada bagian jari-jari pahat potong, sehingga menyebabkan geometri jari-jari pahat potong semakin besar. Sebagaimana yang dinyatakan oleh Bothroyd bahwa secara teori nilai kekasaran permukaan bergantung pada geometri jari-jari pahat potong [9,5]. Nilai kekasaran permukaan pada kadar pemakanan 0.35 mm/rev adalah lebih besar berbanding dengan nilai kekasaran permukaan pada kadar pemakanan 0.25 mm/rev. Hal ini mungkin disebabkan oleh pemesinan bahan paduan titanium beroperasi pada kadar pemakanan yang tinggi dan juga pada kedalaman potong yang tinggi (0.20 mm).



Gambar 1. Grafik antara waktu potong dan nilai kekasaran permukaan oleh pahat karbida; (a) pahat potong yang tidak dilapisi pada kecepatan potong 75 m/min, (b) Pahat karbida yang dilapisi secara CVD pada kecepatan potong 55 m/min, (c) pahat karbida yang dilapisi secara PVD pada kecepatan potong 75 m/min.

**Kekerasan Permukaan**

Gambar 2 menunjukkan grafik nilai kekerasan mikro di bawah permukaan yang dimesin ketika memotong bahan Ti-6Al-4V ELI menggunakan pahat karbida yang dilapisi dan tidak dilapisi dalam keadaan pemesinan tanpa menggunakan pelumas. Nilai kekerasan di bawah permukaan diukur hingga kedalaman mencapai 490 μm di bawah permukaan. Pemesinan dengan metode pemesinan kering pada semua variasi kadar pemakanan dan kedalaman potong, secara umum menunjukkan kecenderungan berlakunya efek pengerasan permukaan, yang seiring dengan meningkatnya suhu selama proses pemotongan terutama pada ujung pahat potong [4,10].

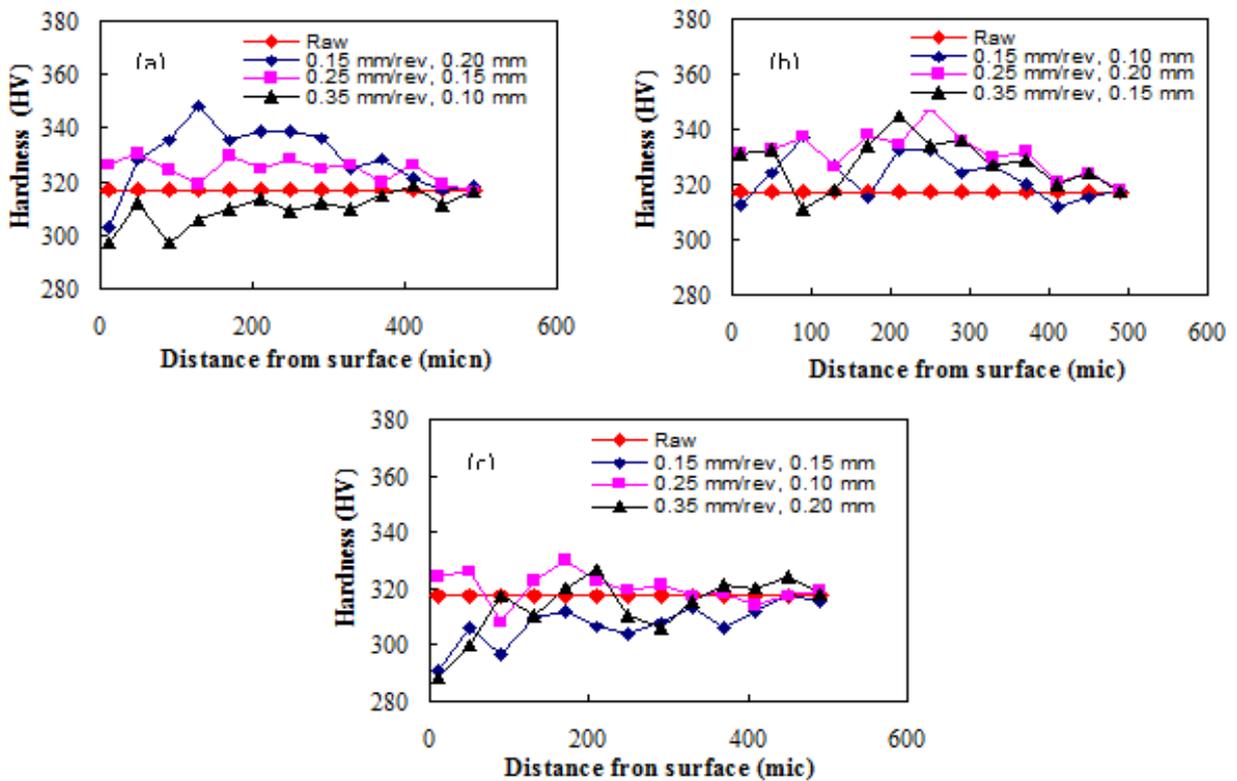
Proses work hardening berlaku pada bagian bawah permukaan bahan yang dimesin sehingga menyebabkan kekerasan bahan meningkat daripada kekerasan rata-rata bahan asal. Nilai kekerasan permukaan bahan asal (*raw material*) paduan titanium Ti-6Al-4V ELI alloy adalah sebesar 317 HV<sub>100</sub>. Bagaimanapun juga, nilai kekerasan mikro di beberapa bagian bawah permukaan lebih rendah daripada nilai kekerasan bahan asal. Hal disebut dengan efek pelembutan yang disebabkan telah berlalu proses penuaan lebih *over-aging* pada bahan

paduan titanium. Dari data penelitian diperoleh bahwa, keadaan ini berlaku pada pemesinan kecepatan tinggi, yang menghasilkan suhu lebih tinggi dan terkonsentrasi pada bagian ujung pahat potong. Peneliti sebelumnya juga telah menemukan hasil yang hampir sama ketika pembubutan Ti-6Al-4V ELI menggunakan pahat karbida dalam keadaan pemesinan kering. Efek pelembutan pada bahan paduan titanium yang disebabkan oleh pemanasan lebih sebagai hasil daripada suhu yang tinggi sewaktu proses pemotongan. Selain itu, konduktivitas termal yang rendah dari Ti-6Al-4V ELI juga menyebabkan suhu di bawah permukaan cenderung terkonsentrasi [4,11]. Nilai kekerasan sejauh 10 μm sampai 90 μm di bawah permukaan bahan yang dimesin meningkat secara regular sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2a, 2b dan 2c. Aus yang berlaku pada ujung potong pahat karbida berpengaruh secara signifikan terhadap mikrostruktur bahan yang dipotong. Peningkatan nilai kekerasan permukaan seiring dengan peningkatan aus pada muka rusuk pahat karbida. Oleh karena itu peningkatan aus pada pahat membangkitkan panas yang lebih tinggi pada ujung potong pahat karbida, sehingga lapisan permukaan yang terdeformasi. Permukaan yang terdeformasi ini,

membentuk lapisan yang memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi.

Gambar 2b menunjukkan nilai kekerasan di bawah permukaan yang dihasilkan pada waktu pemotongan paduan titanium menggunakan pahat karbida yang dilapisi secara CVD dalam keadaan pemesinan tanpa menggunakan pelumas. Hampir semua nilai kekerasan adalah lebih tinggi daripada nilai kekerasan bahan asal (*raw material*). Hal ini mungkin disebabkan oleh peran dari lapisan keras yang dapat menurunkan gesekan antara pahat karbida dan material potong, sehingga dapat mengurangi jumlah panas yang dibangkitkan selama proses pemotongan. Hal ini juga disebabkan oleh

penggunaan jari-jari pahat potong yang besar, yang mana kontak area menjadi lebih besar sehingga menurunkan konsentrasi suhu. Sedangkan pada Gambar 2c, nilai kekerasan di bawah permukaan yang dimesin, sebagian besar berada di bawah nilai kekerasan bahan asal. Dalam kasus ini, kemungkinan berlaku proses pelembutan atau pemanasan lebih (*over aging*) karena temperature yang dihasilkan terkonsentrasi pada ujung potong pahat. Proses pemanasan lebih telah menurunkan nilai kekerasan paduan titanium pada bagian permukaan dan di bawah permukaan hingga mencapai 400  $\mu\text{m}$ .



Gambar 2. Nilai kekerasan permukaan dan di bawah permukaan paduan Ti-6Al-4V ELI menggunakan pahat karbida pada tingkat kecepatan potong 75 m/min; (a) pahat karbida yang tidak dilapisi (b) pahat karbida CVD (c) pahat karbida PVD.

### KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa hasil pemesinan paduan titanium Ti-6Al-4V ELI menggunakan pahat karbida yang dilapisi dan tidak dilapisi dalam keadaan kering adalah bahwa nilai kekasaran permukaan sangat ditentukan oleh kadar suapan dan juga jari-jari ujung pahat potong. Tiga langkah *trend-line* dari grafik nilai kekasaran permukaan yakni nilai kekasaran permukaan tinggi pada awal pemotongan, stabil pada tahap kedua dan cenderung menurun hingga ke akhir umur pahat.

Pengerjaan pengerasan berlaku di bagian bawah permukaan yang dimesin sehingga nilai kekerasannya lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kekerasan bahan asal. Selain itu juga berlaku proses pelembutan di bawah permukaan yang dimesin sebagai akibat dari panas lebih.

### REFERENCES

- [1] Ezugwu, E.O. & Wang, Z.M., 1997, "Titanium alloys and their machinability- a

- review”, *Journal of Materials Processing Technology*, 262-274.
- [2] Che Haron, C.H., 2001, “Tool life and surface integrity in turning titanium alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 231-237.
- [3] Ezugwu, E.O., 2005, “Key Improvements in The Machining of Difficult-to-Cut Aerospace Superalloys”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1353-1367.
- [4] Che Haron, C.H. & Jawaid, A., 2005, “The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% Al-4% V”, *Journal of Materials Processing Technology*, 188-192.
- [5] Che Haron, C.H., Ginting, A., 2007, “Performance of alloyed uncoated and CVD-coated carbide tools in dry milling of titanium alloy Ti-6242S”, *Journal of Materials Processing Technology*, 77-82.
- [6] Kalpakjian, S. & Schmid, S.R., 2001, “*Manufacturing Engineering and Technology International Edition*. USA, Prentice Hall.
- [7] Kennametal, 2006, *Kennametal Lathe Tooling Catalogue*, Kennametal Company
- [8] Bhattacharyya, A., 1984, *Metal Cutting - Theory and practice*. India
- [9] Boothroyd, G. & W. A. Knight., 2006, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. USA Taylor & Francis, CRC.
- [10] Ezugwu, E.O. & Bonney, J., 2007, “Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies”, *International Journal of Machine Tools and Manufacturer*, 884-891.
- [11] Ezugwu, E.O. & Booney, J., 2003, “An overview of the machinability of aeroengine alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 233-253.