

Karakteristik Aus Mata Pisau Terlapis Bahan Pengeras pada Pemotongan Kayu Mersawa dan Papan Partikel

(Wear Characteristics of Hard Coated Tools in Cutting Mersawa Wood and Particleboard)

Fauzan Fahrussiam^{1*}, Wayan Darmawan², Imam Wahyudi², Hiroshi Usuki³,
Masahiro Yoshinobu³, Shuhou Koseki⁴

(Diterima Juni 2015/Disetujui September 2015)

ABSTRAK

Penggunaan kayu mersawa dan papan partikel sebagai material konstruksi bangunan dan tujuan dekoratif terus mengalami peningkatan. Penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa material tersebut menghasilkan laju aus yang tinggi yang disebabkan oleh kandungan silika dan resin. Artikel ini menjelaskan karakteristik aus mata pisau yang telah dilapisi bahan pengeras baru pada pemotongan kayu mersawa dan papan partikel. Kayu mersawa dan papan partikel dengan kerapatan 0,8 dan 0,61 g/cm³ dipotong menggunakan mata pisau *tungsten carbide* K10 yang telah dilapisi dengan lapisan tunggal titanium aluminium nitrid (TiAlN), multi-lapis TiAlN/titanium silikon nitrid (TiSiN), dan multi-lapis TiAlN/titanium boron nitrid (TiBN). Uji pemotongan menggunakan *computer numeric control router* pada kecepatan potong 17 m/s dengan laju pengumpanan sebesar 0,1 mm/rev untuk melihat karakteristik aus pada sisi *clearance* mata pisau. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mata pisau yang telah dilapisi menghasilkan aus yang lebih rendah dibandingkan dengan mata pisau tanpa pelapis pada pemotongan kayu mersawa dan papan partikel. Lapisan multi-lapis TiAlN/TiBN pada penelitian ini menghasilkan daya tahan aus yang paling tinggi. Kekerasan yang tinggi, koefisien friksi yang rendah, daya tahan oksidasi yang tinggi, dan ketahanan terhadap delaminasi yang tinggi pada lapisan multi-lapis TiAlN/TiBN menunjukkan bahwa lapisan ini sangat cocok diaplikasikan pada pemotongan kayu abrasif (kandungan silika tinggi) dan kayu komposit pada kecepatan potong yang tinggi.

Kata kunci: aus *clearance*, kayu abrasif, lapisan multi-lapis, papan partikel, silika

ABSTRACT

The use of mersawa wood and particleboard as a materials has been increasing for building constructions and decorative purpose. In previous study reported that, these materials provide a high rate of wear caused by abrasion (high silica) and resin content. This article presents the characteristics of wear on the clearance face of newly multilayer-coated K10 cutting tools when milling mersawa wood and particleboard. The K10 cutting tools were coated with monolayer titanium aluminum nitride (TiAlN), multilayer TiAlN/titanium silicon nitride (TiSiN), and TiAlN/titanium boron nitride (TiBN). Mersawa wood with density of 0.80 g/cm³ and particleboard with a density of 0.61 g/cm³ were cut using the coated tools and uncoated K10. Cutting tests were performed on *computer numeric control router* at a high cutting speed of 17 m/s and a feed rate of 0.1 mm/rev to investigate the wear characteristics on the clearance face of these coated tools. Result of research shown that the coated tools experienced a smaller amount of wear than the uncoated tool when cutting the mersawa and particleboard. The best coating among other coated in this study was multilayer TiAlN/TiBN. The high hardness, low coefficient of friction, high resistance to oxidation, and high resistance to delamination wear of the multilayer-coated TiAlN/TiBN tool indicate a very promising applicability of this coating for high-speed cutting of abrasive woods and wood based materials.

Keywords: abrasive wood, clearance wear, multilayer coated tools, particleboard, silica

PENDAHULUAN

Saat ini, penggunaan kayu abrasif (kandungan

¹ Program Studi Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680.

² Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680.

³ Universitas Shimane, Nishikawatsu-cho, Matsue 690-8504 Jepang.

⁴ Hitachi Tool Engineering Ltd. Tokyo 100-8220 Jepang.

* Penulis Korespondensi:

E-mail: fauzan.fahutan47@gmail.com

silika tinggi) dan produk kayu komposit sudah diaplikasikan untuk tujuan konstruksi bangunan maupun dekoratif. Dalam industri pengolahan kayu sekunder di mana kayu abrasif dan produk komposit diproses secara intensif, aus mata pisau menjadi faktor penting terkait dengan produktivitas, kualitas, dan biaya produksi (Sheikh-Ahmad & McKenzie 2000). Maka dari itu, penelitian terkait dengan karakteristik aus mata pisau akan membantu perusahaan dalam memilih jenis bahan pisau yang cocok digunakan dalam proses produksinya.

Material mata pisau yang banyak digunakan dalam proses pengolahan kayu adalah jenis *tungsten*

carbide (WC) tipe K10. Namun, penggunaan material ini semakin terbatas terutama pada saat pemotongan produk komposit seperti papan partikel terkait dengan daya tahan aus yang rendah yang disebabkan oleh suhu oksidasi dan abrasifitas yang tinggi (Sheikh-Ahmad & Bailey 1999; Darmawan *et al.* 2001). Oleh karena itu, inovasi yang telah dan sedang dikembangkan adalah dengan memberikan bahan pelapis pada permukaan mata pisau untuk meningkatkan daya tahan aus mata pisau *tungsten carbide*.

Penelitian sebelumnya (Salje & Stuehmeier 1988; Darmawan *et al.* 2001) melaporkan bahwa mata pisau *tungsten carbide* K10 dilapisi bahan Titanium Nitrid (TiN) dan Titanium Carbide (TiC) dengan metode *chemical vapor deposition* (CVD) untuk pemotongan papan partikel. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa lapisan TiN tidak memberikan pengaruh yang nyata dibandingkan mata pisau tanpa pelapis pada saat pemotongan papan partikel. Selain itu, lapisan TiC pada mata pisau *tungsten carbide* juga dilaporkan menghasilkan delaminasi yang tinggi pada awal pemotongan. Sheikh-Ahmad dan Stewart (1995) melaporkan bahwa bahan pelapis TiN, TiN/TiCN, dan TiAlN yang diaplikasikan pada *tungsten carbide* K10 dengan ukuran partikel halus (0,8 μm) dan kandungan *cobalt* yang rendah (3%) menggunakan metode *physical vapor deposition* (PVD) pada pemotongan papan partikel menghasilkan peningkatan daya tahan aus pisau yang rendah. Sebaliknya, pengaplikasian bahan pelapis pada *tungsten carbide* dengan ukuran partikel yang kasar dan kandungan *cobalt* yang tinggi mengurangi daya tahan aus mata pisau. Kelemahan utama dari pelapisan dengan metode PVD adalah adanya *chipping* pada sisi *rake* mata pisau. Hal ini disebabkan oleh ikatan adhesi yang tidak cukup kuat antara substrat mata pisau dengan bahan pelapis.

Penelitian Fuch dan Raatz (1997) melaporkan bahwa *tungsten carbide* (WC 93,5%, Co 5%, *Tantalum carbide*, dan *Niobium carbide* (TaC/NbC) 1,5%) dilapisi TiN, Titanium Aluminium Oxide Nitride (TiAlON), dan TiC menggunakan metode *plasma-assisted chemical vapor deposition* (PACVD) untuk pemotongan papan partikel. Hasil penelitian tersebut menjelaskan bahwa lapisan TiN dan TiAlON tidak memberikan peningkatan daya tahan aus mata pisau dibandingkan dengan mata pisau tidak terlapis. Sedangkan lapisan TiC hanya memberikan peningkatan daya tahan aus yang rendah. Darmawan *et al.* (2001) melaporkan bahwa aus yang terjadi pada lapisan TiN, CrN, CrC, TiCn, dan TiAlN saat pemotongan papan semen dihasilkan dari proses delaminasi bahan pelapis pada kecepatan potong rendah maupun tinggi. Di antara bahan pelapis yang digunakan dalam penelitian tersebut, lapisan TiAlN menghasilkan delaminasi yang paling rendah. Pada kecepatan potong yang tinggi, delaminasi bahan pelapis disebabkan oleh proses oksidasi dan dipercepat oleh peningkatan suhu pemotongan.

Hasil penelitian yang dijelaskan di atas mengindikasikan bahwa lapisan tunggal tidak memberikan perkembangan daya tahan aus yang signifikan ter-

hadap masa pakai pisau pada pemotongan produk komposit dengan kecepatan potong tinggi. Maka dari itu, penelitian yang sedang dikembangkan adalah untuk mendapatkan bahan pelapis baru yang memiliki daya tahan aus yang tinggi pada saat pemotongan material abrasif. Lapisan multi-lapis akan menjadi salah satu teknik untuk meningkatkan daya tahan aus lapisan tunggal. Oleh karena itu, lapisan TiAlN dengan kekerasan yang tinggi, daya tahan oksidasi yang baik, dan memiliki daya tahan aus yang lebih tinggi dibandingkan lapisan tunggal lainnya, pada penelitian ini akan dikombinasikan secara multi-lapis dengan bahan pelapis baru, yaitu Titanium Boron Nitrid (TiBN) dan Titanium Silikon Nitrid (TiSiN) yang memiliki sifat yang lebih baik (kekerasan yang tinggi, koefisien friksi yang rendah, dan daya tahan oksidasi yang tinggi (Chang *et al.* 2007; Ding *et al.* 2008). Lapisan multi-lapis TiAlN/TiBN dan TiAlN/TiSiN diaplikasikan pada permukaan mata pisau *tungsten carbide* tipe K10 dengan metode *arc-ion plating* (AIP) dan kemudian diujikan pada pemotongan kayu mersawa dan papan partikel. Penggunaan kayu mersawa dan papan partikel dalam penelitian ini didasarkan oleh kandungan bahan abrasive yang tinggi pada material tersebut. Darmawan *et al.* (2006) menjelaskan bahwa komponen anorganik terutama silika akan mempercepat laju aus mata pisau. Muladi (2005) menyatakan bahwa kayu dengan kadar silika di atas 0,35% akan menumpulkan mata pisau. Maka dari itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aus *clearance* mata pisau yang telah dilapisi bahan pengeras pada pemotongan kayu mersawa dan papan partikel pada kecepatan potong tinggi.

METODE PENELITIAN

Bahan Pelapis dan Material Potong

Spesifikasi umum lapisan multi-lapis mata pisau yang diujikan dan material yang dipotong dijelaskan pada Tabel 1 dan 2. *Tungsten carbide* K10 (WC 90% & Co 10%) dipilih sebagai substrat dengan panjang 7 mm, lebar 4 mm, dan tebal 2 mm dan tingkat kekerasan sebesar 1.450 HV. Sudut *rake* dan *clearance* mata pisau yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 13° dan 5° yang merupakan jenis yang sudah komersial di pasaran untuk pemotongan kayu dan produk komposit. Bahan pelapis tunggal TiAlN dan multi-lapis TiAlN/TiBN dan TiAlN/TiSiN dideposisikan pada permukaan *tungsten carbide* K10 pada sisi *rake* dan *clearance* menggunakan metode *arc-ion plating* (AIP) dengan ketebalan 3 μm (1,5 μm lapisan TiAlN di atas substrat, dan 1,5 μm lapisan TiBN di atas lapisan TiAlN, atau lapisan TiSiN di atas lapisan TiAlN).

Prosedur Pengujian

Pengujian karakteristik aus mata pisau dilakukan dengan metode yang dikembangkan oleh Darmawan *et al.* (2006), yaitu uji pemotongan pada *computer*

Tabel 1 Karakteristik bahan pelapis^a

Bahan pelapis	Ketebalan lapisan (µm)	Kekerasan (HV)	Suhu mulai oksidasi	Koefisien friksi
Tanpa pelapis (K10)	-	1450	700 °C	0,22–0,28
TiAlN	3	2800	800 °C	0,8
TiAlN/TiBN	3	2700	800 °C	0,6
TiAlN/TiSiN	3	3600	1100 °C	0,9

^a ketebalan lapisan target. Kekerasan, suhu oksidasi, dan koefisien friksi dihitung berdasarkan ASTM E2546 (ASTM International 2009), ASTM G111 (ASTM International 2006), dan ASTM G99 (ASTM International 2010).

Table 2 Karakteristik material potong

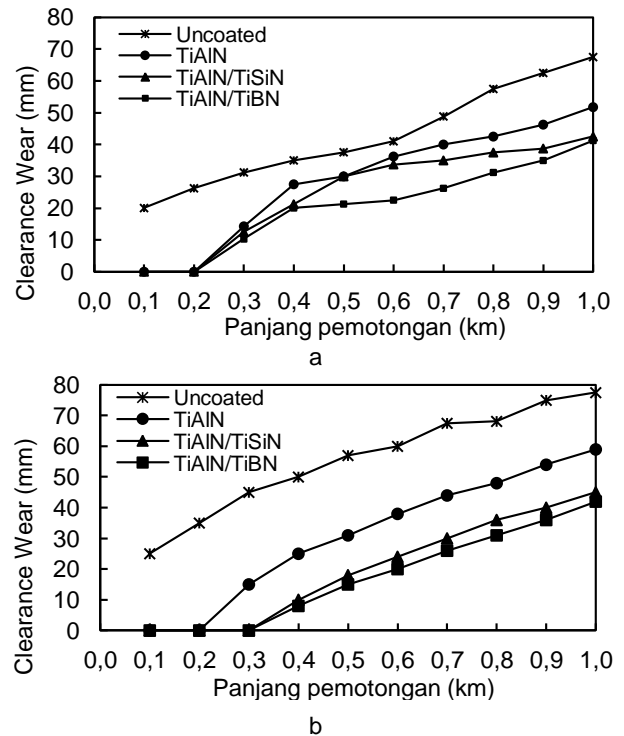
Karakteristik ^a	Papan partikel	Mersawa
Ketebalan (mm)	15	50
Kadar air (%)	8	12
Kerapatan (g/cm ³)	0,61	0,80
Kandungan silika ^a (%)	1,86	1,00

^a kandungan silika dihitung berdasarkan TAPPI T211 om-85 (TAPPI 1991).

numeric control (CNC) router. Contoh uji kayu mersawa berbentuk balok (50 x 15 x 6 cm³) dan papan partikel berbentuk persegi panjang (150 x 100 x 1,2 cm³) dipasang di atas meja CNC router, kemudian divakum dengan bantuan mesin compressor sehingga posisi material potong tidak berubah selama proses pemotongan. Mata pisau diperiksa di bawah digital video microscope sebelum pemotongan untuk memastikan tidak ada retak maupun cacat pada sisi rake dan clearance mata pisau. Uji pemotongan dilakukan sampai panjang pemotongan 1.000 m. Setiap panjang 100 m dilakukan pengukuran aus pada sisi clearance mata pisau di bawah digital video microscope. Setelah akhir pemotongan (1.000 m), mata pisau juga dianalisis menggunakan scanning electron microscopy/energy dispersive spectroscopy (SEM/EDS) untuk mengidentifikasi kerusakan dan oksidasi yang terjadi pada mata pisau.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jumlah aus pada sisi clearance mata pisau disajikan pada Gambar 1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah aus clearance semakin tinggi dengan meningkatnya panjang pemotongan. Mata pisau terlapis menunjukkan daya tahan aus yang lebih tinggi terutama dalam mengurangi laju aus clearance dibandingkan dengan mata pisau tidak terlapis pada pemotongan kayu mersawa maupun papan partikel. Meskipun mata pisau dengan lapisan tunggal dan lapisan multi-lapis menghasilkan perkembangan aus yang relatif sama pada awal pemotongan, aus clearance lapisan tunggal meningkat tajam dan melampaui aus clearance lapisan multi-lapis, yang mana menunjukkan perkembangan yang terus meningkat selama pemotongan kayu mersawa dan papan partikel. Mata pisau tidak terlapis menghasilkan aus clearance sebesar 68 µm pada pemotongan kayu mersawa dan 78 µm pada pemotongan papan partikel sampai panjang pemotongan 1 km. Lapisan tunggal TiAlN menghasilkan aus clearance lebih besar dari 50 µm, sementara lapisan multi-lapis



Gambar 1 Aus clearance mata pisau terlapis dan tanpa pelapis terhadap panjang pemotongan kayu mersawa (a) dan papan partikel (b).

menghasilkan aus clearance kurang dari 50 µm pada panjang pemotongan 1 km. Hal ini diindikasikan oleh kekerasan yang lebih rendah, daya tahan oksidasi yang lebih rendah, dan koefisien friksi yang lebih tinggi (Tabel 1) pada mata pisau tidak dilapis dibandingkan dengan mata pisau terlapis.

Hasil yang didapatkan dari Gambar 1 menunjukkan bahwa lapisan multi-lapis TiAlN/TiBN memiliki daya tahan aus clearance yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan multi-lapis TiAlN/TiSiN dan lapisan tunggal TiAlN pada saat pemotongan kayu mersawa maupun papan partikel. Daya tahan aus yang tinggi pada lapisan multi-lapis TiAlN/TiBN disebabkan oleh beberapa alasan. Pertama, koefisien friksi lapisan multi-lapis TiAlN/TiBN lebih rendah dibandingkan lapisan multi-lapis TiAlN/TiSiN, dan lapisan tunggal TiAlN, yang menyebabkan abrasi yang rendah dengan bahan abrasif yang dikandung pada kayu mersawa dan papan partikel. Kedua, hasil penelitian Usuki *et al.* (2013) melaporkan bahwa lapisan TiBN memberikan efek pelumasan pada temperatur yang tinggi.

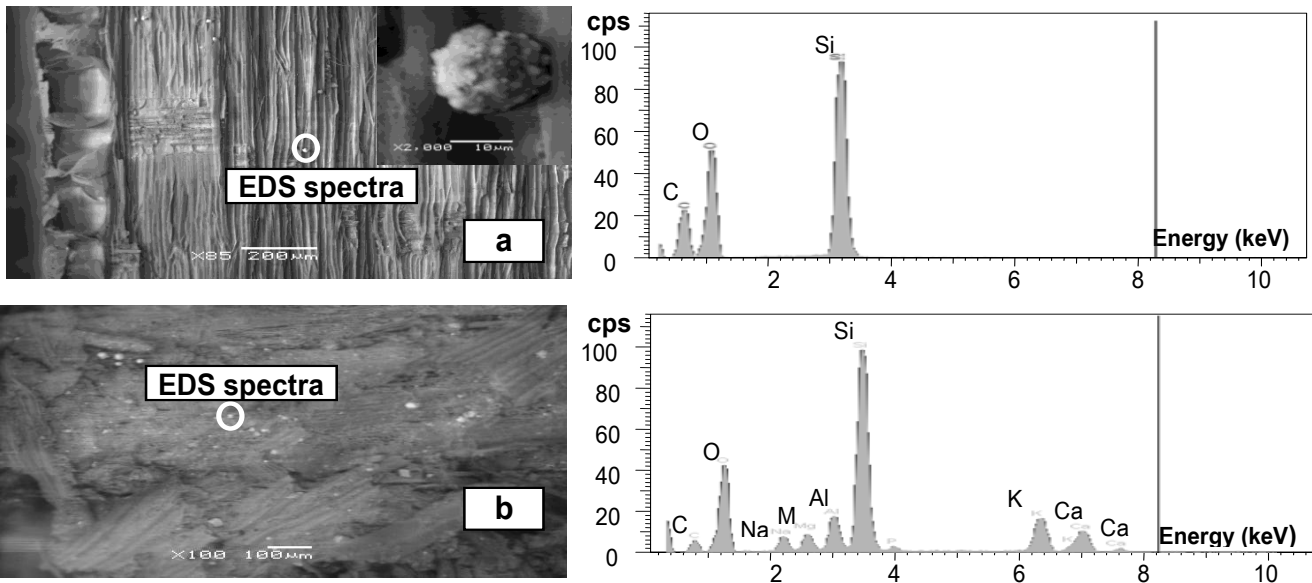
Gambar 1 juga menunjukkan bahwa, papan partikel menyebabkan jumlah aus clearance yang

lebih tinggi dibandingkan kayu mersawa. Hasil foto SEM kayu mersawa pada Gambar 2a menunjukkan adanya beberapa butiran kristal silika. Di bawah pembesaran yang tinggi (2.000X), permukaan silika kayu mersawa terlihat bergelombang, yang mana akan mengikis permukaan mata pisau selama pemotongan. Hasil foto SEM papan partikel menunjukkan adanya resin yang mengeras (Gambar 2b). Analisis EDS pada butiran kristal kayu mersawa dan papan partikel menunjukkan presentase jumlah Si dan O (Gambar 2 sebelah kanan) yang mana mengindikasikan persentase jumlah silika. Hal ini merupakan alasan utama meningkatnya jumlah aus ketika memotong kayu dengan kandungan silika yang tinggi dan papan partikel. Kandungan silika yang lebih tinggi pada papan partikel (Tabel 2) mengakibatkan abrasi secara mekanis lebih tinggi selama pemotongan dibandingkan kayu mersawa.

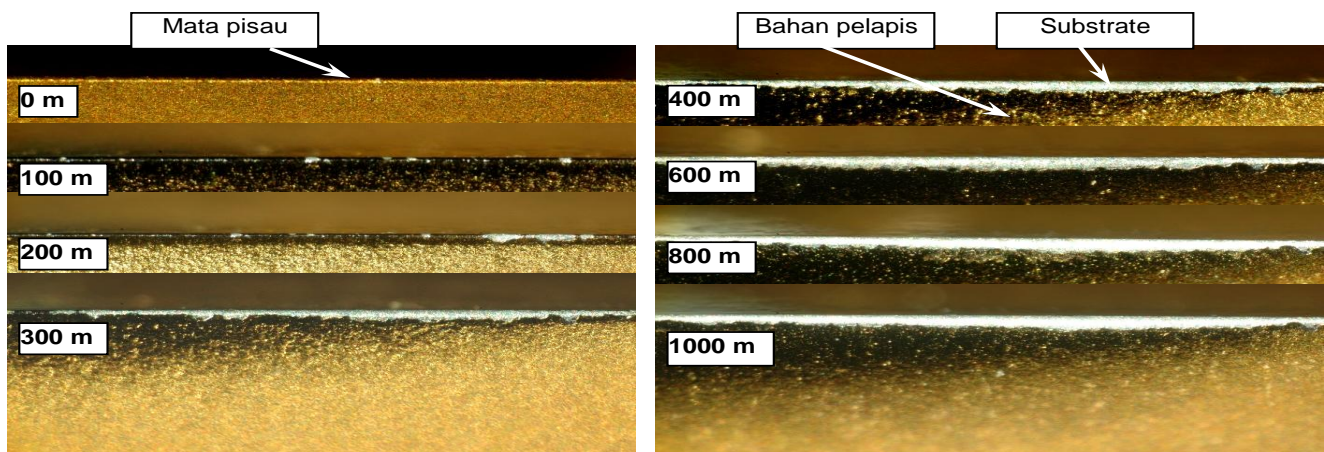
Pengamatan aus mata pisau terlapis di bawah *digital video microscope* menunjukkan mekanisme delaminasi bahan pelapis yang relatif sama pada pemotongan kayu mersawa dan papan partikel.

Gambar 3 menggambarkan mekanisme delaminasi lapisan multi-lapis TiAlN/TiBN yang dipilih sebagai bahan diskusi pada artikel ini. Delaminasi lapisan TiAlN/TiBN diawali dengan adanya *chipping* awal bahan pelapis pada mata pisau. Luas *chipping* semakin meningkat pada panjang pemotongan 200 m. Bertambahnya panjang pemotongan sampai 300 m menunjukkan mata pisau mengalami *chipping* bahan pelapis yang semakin jelas. *Chipping* bahan pelapis terjadi pada semua sisi mata pisau setelah mencapai panjang pemotongan 400 m. Selanjutnya, lapisan TiAlN/TiBN secara berangsur terdelaminasi sepanjang sisi mata pisau sampai panjang pemotongan lebih dari 400 m. Aus yang terjadi pada substrat K10 disebabkan oleh terlepasnya lapisan TiAlN/TiBN dari substrat K10.

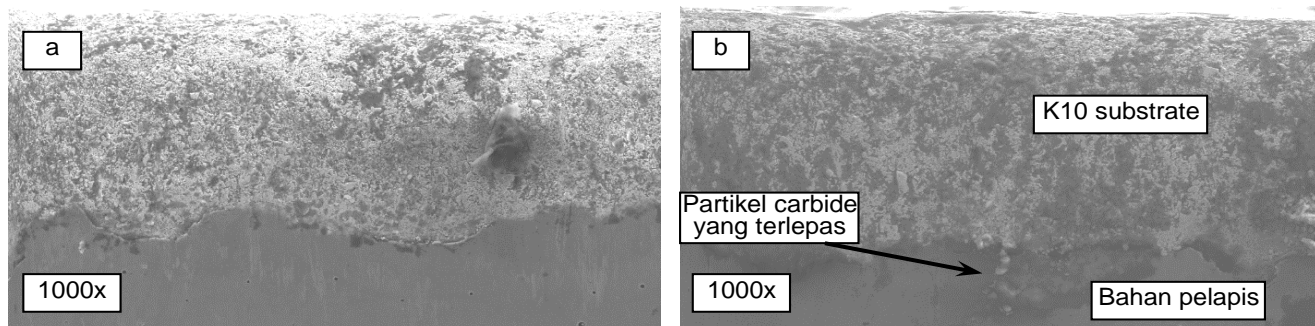
Analisis SEM aus lapisan TiAlN/TiBN pada pemotongan kayu mersawa dan papan partikel sampai panjang pemotongan 1 km disajikan pada Gambar 4. Gambar tersebut menunjukkan bahwa pola aus yang dihasilkan oleh lapisan TiAlN/TiBN pada dua material potong relatif sama. Delaminasi bahan pelapis dihasil-



Gambar 2 SEM *micrograph* (kiri) dan EDS profil (kanan) dari kandungan bahan abrasif kayu mersawa (a) dan papan partikel (b).



Gambar 3 Mekanisme aus lapisan multi-lapis TiAlN/TiBN pada saat pemotongan papan partikel.



Gambar 4 SEM aus mata pisau multi-lapis TiAlN/TiBN pada pemotongan kayu mersawa (a) dan papan partikel (b) pada panjang pemotongan 1 km.

kan oleh bahan pelapis TiAlN/TiBN pada substrat *carbide*. Hal ini menunjukkan bahwa substrat dari lapisan TiAlN/TiBN akan mengalami berbagai kemungkinan abrasi mekanis yang mengakibatkan terlepasnya partikel *tungsten carbide* dari substrat selama proses pemotongan. Proses terlepasnya partikel *tungsten carbide* disebabkan oleh kandungan *cobalt* (Co) yang mengalami oksidasi selama proses pemotongan (Stewart 1992). Hal tersebut mengakibatkan ikatan antar partikel *tungsten carbide* menjadi tidak kompak dan mengakibatkan permukaan mata pisau yang tidak rata (bergelombang). Hal ini berpotensi menghasilkan permukaan papan yang kasar selama pemotongan (Darmawan *et al.* 2012).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa, pemberian bahan pelapis meningkatkan daya tahan aus mata pisau. Delaminasi lapisan TiAlN, TiAlN/TiSiN, dan TiAlN/TiBN diawali dengan adanya *chipping* yang disebabkan oleh abrasi secara mekanis. Pola aus mata pisau yang telah dilapisi bahan pelapis pada pemotongan kayu mersawa dan papan partikel hampir sama; proses aus substrat *tungsten carbide* terjadi setelah bahan pelapis terpisah dari substrat *carbide*. Mata pisau dengan lapisan multi-lapis TiAlN/TiBN menghasilkan daya tahan aus terbaik yang mengindikasikan penggunaannya berpotensi untuk diaplikasikan pada material abrasif dengan kecepatan potong tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. 2006. *Standard guide for corrosion tests in high temperature or high pressure environment*. ASTM G111-97. In: Annual Book of ASTM Standards. 03(02). Philadelphia (US): ASTM International. <http://doi.org/cvfz2g>
- ASTM International. 2009. *Standard practice for instrumented indentation testing*. ASTM E2546-07. In: Annual Book of ASTM Standards. 03(01). Philadelphia (US): ASTM International. <http://doi.org/fxhj6v>
- ASTM International. 2010. *Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus*. ASTM G99-05. In: Annual Book of ASTM Standards. 03(02). Philadelphia (US): ASTM International. <http://doi.org/bdjsq>
- Chang CL, Chen WC, Tsai PC, Ho WY, Wang DY. 2007. Characteristics and performance of TiSiN/TiAlN multilayer coatings synthesized by cathodic arc plasma evaporation. *Surface and Coatings Technology*. 202(4–7): 987–992. <http://doi.org/bbf7ng>
- Darmawan W, Tanaka C, Usuki H, Ohtani T. 2001. Performance of coated carbide tools when grooving wood-based materials: Effect of work materials and coating materials on the wear resistance of coated carbide tools. *Journal of Wood Science*. 47(2): 94–101. <http://doi.org/fnbz98>
- Darmawan W, Rahayu IS, Tanaka C. 2006. Chemical and mechanical wearing of woodworking cutting tools by tropical woods. *Journal of Tropical Forest Science*. 18(4): 166–172.
- Darmawan W, Rahayu I, Nandika D, Marchal R. 2012. The Importance of Extractives and Abrasives in Wood Materials on the Wearing of Wood Cutting Tools. *Journal of BioResources*. 7(4): 4715–4729. <http://doi.org/72w>
- Ding XZ, Tan ALK, Zeng XT, Wang C, Yue T, Sun CQ. 2008. Corrosion resistance of CrAlN and TiAlN coatings deposited by lateral rotating cathode arc. *Thin Solid Films*. 516(16): 5716–5720. <http://doi.org/cb8w74>
- Fuch I, Raatz C. 1997. Study of wear behavior of specially coated (CVD, PACVD) cemented carbide tools while milling of wood-based materials. In: Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar. University of British Columbia, Vancouver, B.C. (CA), June 17–19, pp 709–715.
- Salje E, Stuehmeier W. 1988. Milling particleboard with high hard cutting materials. In: Proceedings of the Ninth International Wood Machining Seminar. University of California Forest Products Laboratory, Richmond, California (US), October 10–12, pp 211–228.

- Sheikh-Ahmad JY, Stewart JS. 1995. Performance of different PVD coated tungsten carbide tools in the continuous machining of particleboard. In: Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar. Kyoto University, Kyoto (JP), October 2–4, pp 282–291.
- Sheikh-Ahmad JY, Bailey JA. 1999. High-temperature wear of cemented tungsten carbide tools while machining particleboard and fiberboard. *Journal of Wood Science*. 45(6): 445–455. <http://doi.org/cfjk23>
- Sheikh-Ahmad JY, McKenzie WM. 2000. Measurement of tool wear and dulling in the machining of particleboard. In: Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar. Vancouver (CA), Juni 17–20, pp 659–670.
- Stewart HA. 1992. High-temperature halogenation of tungsten carbide cobalt tool material when machining medium density fiberboard. *The Forest Products Journal*. 42(10): 27–31.
- TAPPI. 1991. *TAPPI Test Methods: Ash in Wood and Pulp (T211 om-85)*, Vol. 1. Atlanta (US): TAPPI Press.
- Usuki H, Uehara K, Isaka M, Kubota K. 2013. Machining of Inconel 718 with Lubricant-Coated Tool. *International Journal of Automation Technology*. 7(3): 306–312.