

MEKANISME KEAUSAN PAHAT PADA PROSES PEMESINAN: SEBUAH TINJAUAN PUSTAKA

Zaenal Abidin

e-mail: zenpolines@yahoo.com

Jurusan Teknik Mesin Politeknik
Negeri Semarang
Jl. Prof. H. Sudarto, S.H.,
Tembalang, Kotak Pos
6199/SMS, Semarang 50329

Keausan adalah sebuah fenomena yang sering terjadi dalam engineering. Keausan bukan hanya proses tunggal, tetapi beberapa proses berbeda yang dapat berlangsung independen atau secara bersamaan. Kompleksitas proses keausan dapat dibaca dengan mengetahui berbagai variabel yang terlibat, yaitu kekerasan, ketangguhan, kelenturan, modulus elastisitas, kekuatan tarik, kelelahan, dan struktur permukaan yang saling bertemu, seperti geometri, temperatur, tegangan, distribusi tegangan, koefisien gesek, dan atmosfer dari permukaan yang aus. Sebuah pahat gagal dengan tiga macam cara yang berbeda; perpatahan nyata, deformasi plastis dan keausan bertahap. Dua cara pertama mewakili kegagalan dini dari pahat. Keausan bertahap adalah hal yang tidak dapat dicegah dan biasanya telah diperkirakan secara alami pada proses pemotongan logam.

Kata kunci: "keausan", "kegagalan pahat", "permukaan bahan"

1. Pendahuluan

Keausan pahat akan timbul dengan sendirinya dalam proses pemotongan logam. Kompleksitas yang mengelilingi keausan pahat bersumber dari berbagai faktor meliputi material yang diproses, alat pemesinan, alat potong, pendingin dan kondisi pemotongan. Selama pemesinan, alat potong berinteraksi langsung dengan material. Geram dihasilkan dengan mengikis material, sementara panas yang terbentuk dari deformasi plastis dari material dan gesekan antarpermukaan material dan alat potong dipindahkan ke alat potong. Ketergantungan pada pendekatan empiris untuk memahami dan memperkirakan keausan pahat berasal dari ketidakmampuan untuk mengamati kondisi fisik dan mengidentifikasi mekanisme yang tepat dibalik keausan pahat. Dalam model empiris, ketahanan terhadap hilangnya material akibat adanya kontak permukaan dari sebuah komponen, menjadi pertimbangan dalam perhitungan dengan persamaan empiris. Mekanisme keausan pahat telah diidentifikasi dan diklasifikasikan, diantaranya adhesi [8,9], abrasi [10,11,9], difusi [12,13] dan dissolusi [14,15], reaksi kimia [16,17] dan oksidasi [9].

Keausan tepi (*flank wear*) bermula dari aksi *abrasive* pada fase kedua pada material [19,20,10], sementara keausan kawah (*crater wear*) diketahui sebagai kombinasi yang kompleks dari berbagai mekanisme keausan

seperti adhesi [21,22], abrasi [14,20], dissolusi [14] dan difusi [12,13].

Suhu pemotongan, kondisi kontraksi dan tekanan pada permukaan alat kerja dan pahat, mempengaruhi keausan alat dan mekanisme keausan [23,5]. Hampir seluruh energi pemotongan diubah menjadi panas melalui proses gesekan, antara geram dengan pahat dan antara pahat dengan benda kerja, serta proses perusakan molekular atau ikatan atom pada bidang geser (*shear plane*). Panas ini sebagian besar terbawa oleh geram, sebagian merambat melalui pahat dan sisanya mengalir melalui benda kerja menuju sekeliling. Karena tekanan yang besar akibat gaya pemotongan serta temperatur yang tinggi maka permukaan aktif dari pahat akan mengalami keausan. Keausan tersebut makin lama makin membesar yang selain memperlemah pahat juga akan memperbesar gaya pemotongan sehingga dapat menimbulkan kerusakan fatal.

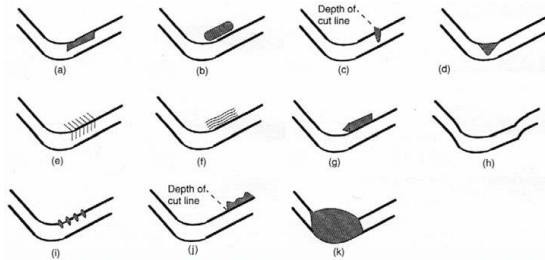
2. Macam-macam Keausan Alat Potong

Keausan didefinisikan oleh ASTM sebagai kerusakan permukaan benda yang secara umum berhubungan dengan peningkatan hilangnya material yang disebabkan oleh pergerakan relatif benda dan sebuah substansi kontak [24]. Pada pengertian yang lebih luas, keausan adalah kerusakan permukaan atau kontak material dari satu atau kedua permukaan secara rolling, relative sliding, atau gerakan yang

menghentak (*impact motion*) [25].

Sebuah pahat gagal dengan tiga macam cara yang berbeda; perpatahan nyata, deformasi plastis dan keausan bertahap [26]. Dua cara pertama mewakili kegagalan dini dari pahat. Keausan bertahap adalah hal yang tidak dapat dicegah dan biasanya telah diperkirakan secara alami pada skenario khusus pemotongan logam.

Tipe-tipe keausan berikut diidentifikasi pada alat potong titik tunggal seperti ditunjukkan pada Gambar 1: (a) keausan flank, (b) keausan crater, (c) keausan notch, (d) keausan nose radius, (e) patahan thermal, (f) patahan parallel, (g) *Built-Up Edge* (BUE), (h) deformasi plastis nyata, (i) *edge chipping*, (j) *chip hammering* dan (k) perpatahan nyata. Tempat dan bentuk sebenarnya dari keausan akan bervariasi tergantung pada operasi pemesinan.



Gambar 1. Macam-macam Keausan Pahat [18]

Penumpukan lapisan material benda kerja pada bidang geram di daerah dekat mata potong didalam proses pemesinan disebut BUE (*Built Up Edge*) yang mengubah geometri pahat karena berfungsi sebagai mata potong yang baru dari pahat yang bersangkutan. Karena telah mengalami regangan yang tinggi, BUE dalam proses pemotongan baja akan menjadi sangat keras (*strain hardened*).

3. Dasar Mekanisme Keausan Pahat

Adhesi

Keausan terjadi ketika satu permukaan menggesek permukaan lain dan mengikis salah satu permukaan diikuti dengan yang lainnya, kemudian kikisan tersebut keluar dari permukaan sebelumnya. Setelah melalui berbagai percobaan, hukum keausan *adhesive* ditemukan oleh [6]:

1. keausan tersebut berbanding langsung dengan muatan antara permukaan yang berinteraksi.

2. keausan tersebut berbanding pada jarak gesekan.
3. keausan tersebut berbanding terbalik dengan kekerasan yang telah diauskan.

Hukum keausan adhesi Holm-Archard adalah

$$V = \frac{kLx}{P} \quad (1)$$

dimana V adalah volume dari keausan per jarak gesekan, k adalah konstanta probabilitas, L adalah muatan antara permukaan, x adalah jarak gesek dan p adalah kekerasan dari permukaan yang diauskan.

Abrasi

Keausan *abrasive* terjadi ketika permukaan kasar yang keras dan atau permukaan yang mengandung partikel keras menggesek bagian atas dari permukaan yang lunak [6]. Pada keausan pahat, keausan *abrasive* adalah pemindahan dari material pahat oleh fase *abrasive* yang keras pada material kerja. Fase *abrasive* dengan morfologi yang kompleks dapat menghasilkan abrasi 2-body sementara *abrasive* dengan morfologi yang sederhana menghasilkan abrasi 3-body. Model abrasi 2-body [40,41] dapat dinyatakan dengan

$$V_{2-body} = \frac{L \tan \theta}{\pi \cdot p_1} x \quad (2)$$

dimana V_{2-body} adalah volume keausan, x adalah kedalaman gesekan, L adalah muatan antara permukaan yang berinteraksi, θ adalah sudut kekasaran dari *abrasive* dan P_1 adalah kekerasan dari permukaan yang terabrasi. Pada keausan *abrasive* 2-body, partikel yang keras adalah aspek keras pada salah satu permukaan gesek atau sebuah fase partikel kedua yang keras yang dibatasi pada permukaan ini

Model kuantitatif dan empiris untuk abrasi 3-body yang meliputi ketergantungan parameter telah disajikan [40,41] sebagai

$$V_{3-body} = \frac{xL \tan \theta}{3p_1} \cdot \frac{P_1}{P_a} < 0.8$$

$$V_{3-body} = \frac{xL \tan \theta}{5.3p_1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{-2.5}, \quad 1.25 > \frac{P_1}{P_a} < 0.8 \quad (3)$$

$$V_{3-body} = \frac{xL \tan \theta}{2.43p_1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{-6}, \quad \frac{P_1}{P_a} > 1.25$$

dimana V_{3-body} adalah volume keausan dan Pa adalah kekerasan dari *abrasive*.

Volume keausan pada abrasi 3-body bergantung pada perbandingan kekerasan antara pahat dan *abrasive*. Pada abrasi 3-body, partikel keras akan hilang atau bergulir bebas antara kedua permukaan yang bergesek. Pada kasus pemotongan logam dengan material ferro, partikel keras yang tak terbatas bisa jadi merupakan sementit spheroid dan geram yang dapat terpisah dari zona stagnan.

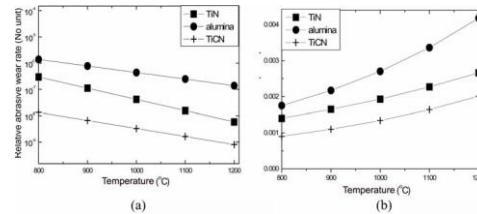
Untuk menggunakan metode ini, nilai kekerasan panas dari berbagai lapisan (TiN, alumina (Al₂O₃) dan TiCN) dan sementit (Fe₃C) telah diamati [20,41,42] dan disajikan pada Tabel 1. Data kekerasan panas dibutuhkan untuk menghitung efek pelunakan thermal pada partikel *abrasive*, begitu juga dengan permukaan alat. Data kekerasan panas telah dicocokkan dengan rumus, $P = P_o e^{-\alpha T}$, dimana tiap material memiliki nilai karakteristik untuk P_o dan α . Juga tegangan antarpermukaan pada muka sisi diasumsikan konstan pada kondisi pemotongan yang sama, yang independen pada lapisan, sehingga rumus (2) dan (3) harus dikalibrasi menggunakan percobaan sebenarnya [42]. Model tersebut diwakili dengan Rumus (2) dan (3), memperkirakan kecenderungan hubungan dengan temperatur pemotongan yang sama sekali berkebalikan, ditunjukkan pada Gambar 3. Tingkat keausan *abrasive* relatif digunakan untuk menandai ketergantungan pada perbandingan kekerasan (Pt/Pa) dimana material alat (TiN, alumina dan TiCN) berubah, tetapi *abrasive* selalu pada partikel sementit (Fe₃C).

Tabel 1. Data Kekerasan Panas dari Berbagai Lapisan Material dan Sementit [42]

Material	P_o	$\alpha \times 10^{-3}$	Temperature range (°C)
Cementite (Fe ₃ C)	1200	1,347	0-400
	3320	3,891	401-1400
TiN	2563	1,600	0-1300
	2468	1,616	0-500
Alumina (Al ₂ O ₃)	3671	2,180	501-1200
	2787	0,400	0-400
TiCN	5496	2,000	401-1200

Ketika proses pemesinan baja spheroid dan pearlite, keausan pahat diperkirakan meningkat dengan kandungan karbon yang lebih tinggi.

Seiring dengan bertambahnya kecepatan pemotongan, suhu mencapai nilai yang tinggi, yang cukup untuk mengubah pearlite menjadi austenite. Fase sementit, yang mendominasi *abrasive* pada baja campuran rendah, telah menghilang seiring dengan material (baja) melewati permukaan sisi.



Gambar 3. (a) model 3-body dan (b) model 2-body Diffusi

Proses diffusi akan timbul pada daerah terjadi pelekatan (adhesi) antara material benda kerja dengan pahat di bawah tekanan dan temperatur yang tinggi serta adanya aliran metal (geram dan permukaan terpotong relatif terhadap pahat). Keausan difusi umumnya mengakibatkan melemahnya struktur permukaan dari pahat [37,45], diffusi dideskripsikan dengan

$$\frac{\partial C_{i1}}{\partial t} = D_{i1} \frac{C_{i1}}{\partial y^2} \tag{4}$$

$$\frac{\partial C_{i2}}{\partial t} = D_{i2} \frac{C_{i2}}{\partial y^2} - V_c \frac{\partial C_{i2}}{\partial x}$$

dimana V_c adalah percepatan chip bulk, C_{i1} dan C_{i2} adalah konsentrasi dari spesies i pada pahat dan geram, D_{i1} dan D_{i2} adalah koefisien difusi atau spesies i pada pahat dan geram, dan t adalah waktu.

Dissolusi

Pada keausan dissolusi, spesimen dari material alat membentuk larutan padat di dalam chip. Seiring dengan chip hilang, material alat dipindahkan secara konstan dari muka garutan. Keausan dissolusi bergantung pada kelembaman kimia dari material alat, begitu juga dengan afinitas kimia pada komponen alat dengan material alat. Pada kecepatan pemotongan yang relatif tinggi, keausan dissolusi mendominasi proses keausan; model kuantitatif telah dibuat oleh Kramer [46]. Untuk komposisi material alat berbentuk ternary, $A_xB_yC_z$, kelarutan kimia dapat ditentukan [47] dengan kondisi ekuilibrium

termodinamis,

$$\Delta G_{A_x B_y C_z} = x\Delta \bar{G}_A + y\Delta \bar{G}_B + z\Delta \bar{G}_C \quad (5)$$

dimana $\Delta G_{A_x B_y C_z}$ adalah energi bebas dari pembentukan permukaan alat/chip dari material alat, T adalah temperatur larutan dan $\Delta \bar{G}_i$ ($i = A, B$ atau C) adalah energi bebas geraham parsial relatif dari komponen i dalam larutan (pengukuran relatif dari kondisi murni i pada tekanan dan suhu yang sama pada larutan),

$$\Delta G_{A_x B_y C_z} = \Delta \bar{G}_i^{xs} + RT \ln S_i \quad (6)$$

dimana $\Delta \bar{G}_i^{xs}$ adalah energi bebas geraham berlebih dari komponen i pada larutan, R adalah konstanta gas universal, T adalah temperatur spesies i pada pecahan. Dari rumus (6) dan data pada Si pada waktu T yang diberikan, energi bebas berlebih pada komponen i ke dalam matriks dari material kerja dapat diperkirakan.

Lebih jauh, $\Delta \bar{G}_i^{xs}$ adalah konstanta pada batas bawah dari larutan (hukum Henry). Sebagai contoh, senyawa biner, TiN, hanya memiliki dua istilah dalam evaluasi dari energi bebas dari pembentukan sebagai

$$\Delta G_{A_x B_y} = x\Delta \bar{G}_A + y\Delta \bar{G}_B \quad \text{dimana } A = \text{Ti}, x = 1,$$

$B = \text{N}$ dan $y = 1$. Terakhir, dengan definisi dari

$$\Delta G^{xs} = x\Delta \bar{G}_A^{xs} + y\Delta \bar{G}_B^{xs} + z\Delta \bar{G}_C^{xs}, \quad M = x \ln x +$$

$y \ln y + z \ln z$ dan $N = x + y + z$, kelarutan kimia, $S_{A_x B_y C_z}$, dari material lapisan tersier,

$A_x B_y C_z$, dalam material kerja (pada *mole fraction*):

$$S_{A_x B_y C_z} = \exp\left(\frac{\Delta G_{A_x B_y C_z} - \Delta G^{xs} - RTM}{NRT}\right) \quad (7)$$

Abrasi dan dissolusi telah digunakan untuk memperkirakan keausan crater pada pemesinan baja campuran rendah [42]. Nilai energi bebas dari formasi diamati dari literatur termodinamis [48,49,50]. Properti termodinamika untuk ketiga material lapisan, TiN, TiCN dan alumina dan karbida ditunjukkan pada Tabel 2 dan 3.

Dissolusi dari material alat diasumsikan mengikuti hukum Henry karena jumlah dari material alat yang berubah bentuk menjadi chip saat proses pemotongan cukup kecil. Keausan dissolusi dapat menjelaskan keausan pahat pada alat karbida, pahat berlapis karbida [17,43] dan alat keramik [18]. Gambar 4(a)-(c) menunjukkan kelarutan kimia dari WC, TiC, TiN, TiCN dan Al_2O_3 pada baja (besi- α).

Reaksi Kimia

Disini, reaksi kimia bukanlah mekanisme keausan. Bagaimanapun, jika reaksi kimia terjadi, dapat berpengaruh besar pada keausan pahat ketika material pahat bereaksi dengan material kerja atau kimia lain untuk membentuk senyawa yang terbawa pada pelepasan geram atau pada permukaan yang baru dari benda kerja [36]. Melapisi pahat atau mengubah zat additives pada fluida potong akan meningkatkan daya tahan terhadap reaksi kimia [18].

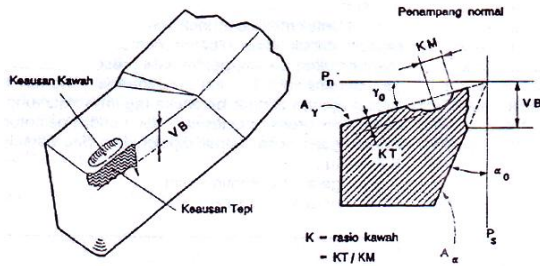
Oksidasi adalah salah satu mekanisme keausan reaksi kimia, yang terjadi ketika spesimen dari material alat atau material kerja bereaksi dengan oksigen atmosfer. Oksidasi dapat diamati sebagai kedalaman kasar dari derajat pemotongan (keausan notch). Adanya notch dapat menyebabkan kegagalan dengan patahnya pahat. Kadangkala serpihan keausan dihasilkan oleh oksidasi yang mengarah pada meningkatnya keausan *abrasive* [18].

4. Bidang Aktif Pahat yang Mengalami Kerusakan/Keausan

Selama proses pembentukan geram berlangsung, pahat dapat mengalami kegagalan dari fungsinya yang normal karena berbagai sebab antara lain: (a) Keausan yang secara bertahap membesar (tumbuh) pada bidang aksi pahat; (b) Retak yang menjalar sehingga menimbulkan patahan pada mata potong pahat; (c) Deformasi plastik yang akan mengubah bentuk/geometri pahat.

Jenis kerusakan yang terakhir di atas jelas disebabkan tekanan temperatur yang tinggi pada bidang aktif dimana kekerasan dan kekuatan material pahat akan turun bersama dengan naiknya temperatur. Keretakan dan terutama keausan disebabkan oleh berbagai faktor. Gambar 6 menunjukkan keausan dapat terjadi pada bidang geram ($A\gamma$) dan/atau pada bidang utama ($A\alpha$) pahat. Karena bentuk dan letaknya yang spesifik, keausan pada bidang geram dikenal dengan keausan kawah (*crater wear*) dan keausan pada bidang utama/mayor

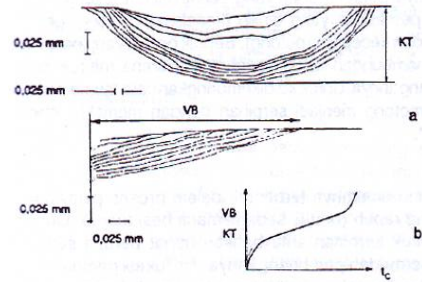
dinamakan sebagai keausan tepi (*flank wear*).



Gambar 6. Keausan kawah (Crater Wear) dan keausan tepi (Flank Wear) [45].

Keausan tepi dapat diukur dengan menggunakan mikroskop, dimana bidang mata potong P_s diatur sehingga tegak lurus sumbu optik. Dalam hal ini besarnya keausan tepi dapat diketahui dengan mengukur panjang VB (mm), yaitu jarak antara mata potong sebelum terjadi keausan (mata potong didekatnya dipakai sebagai referensi) sampai kegaris rata-rata bekas keausan pada bidang utama. Sementara itu, keausan kawah hanya dapat diukur dengan mudah dengan memakai alat ukur kekasaran permukaan.

Selama proses pemotongan berlangsung, keausan tepi VB dan juga keausan kawah KT akan membesar (tumbuh) setaraf dengan bertambahnya waktu pemotongan t_c (min). Gambar 7 menunjukkan salah satu grafik hasil pengukuran keausan dengan menggunakan alat ukur kekasaran permukaan (talysurf) untuk selang pemotongan setiap dua menit. Kecepatan pertumbuhan keausan tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor (jenis material benda kerja, material pahat, kondisi pemotongan, geometri pahat dan pemakaian cairan pendingin). Untuk suatu keadaan tertentu keausan kawah dapat tumbuh dengan cepat, dan pada keadaan lain tidak terjadi keausan kawah. Mungkin pula pada situasi tertentu permukaan aktif pahat tidak menunjukkan tanda-tanda keausan yang berarti, tetapi dalam pemakaian selanjutnya mata potong tersebut tiba-tiba rusak sama sekali.



Gambar 7. (a) Keausan kawah dan keausan tepi yang terjadi pada pahat karbida dari grafik hasil pengukuran permukaan. (b) Pertumbuhan keausan sebagai fungsi dari waktu pemotongan.

5. Pandangan Umum dari Mekanisme Keausan Alat Potong

Diantara lima mekanisme keausan yang disebutkan, tiga mekanisme keausan dapat diidentifikasi sebagai keausan *steady-state*, yaitu

1. Abrasi
2. Dissolusi umum
3. Adhesi

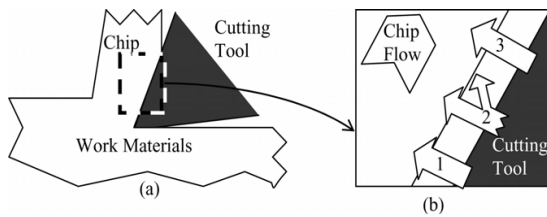
Dissolusi umum terdiri dari

1. Pemindehan material pahat.
- 2a. Reaksi kimia dari spesies yang terpisah dengan material kerja jika reaksi tersebut mungkin.
- 2b. Perjalanan atom melewati permukaan alat-chip.
3. Difusi dari spesies yang terpisah yang tidak dapat menjadi reaksi kimia.

Untuk keausan flank, keausan *abrasive* yang dipersulit oleh transformasi fase nampak sebagai satu-satunya mekanisme keausan. Karena tanda-tanda yang jarang, keausan *abrasive* dapat diabaikan dan transformasi fase dapat dikenali sebagai teknik XRD (*X-Ray Diffraction*) pada permukaan baru yang terbentuk dan perluasan dari keausan *abrasive* [1]. Morfologi dari fase kedua menandakan bahwa perilaku keausan bertipe abrasi 2-body dan 3-body. Kemudian, model keausan *abrasive* [40] dapat diaplikasikan termasuk pada rasio kekerasan panas antara fase keras kedua dan lapisan untuk menjelaskan proses keausan seperti pada pemesinan material ferrous dengan fase sementit [41,20,42]. Transformasi fase sangat mungkin terjadi pada material kerja seperti campuran titanium dan material ferrous bahkan pada campuran kekerasan-larutan seperti campuran alluminium. Sebagai tambahan, komponen campuran baru dan proses heat-treatment

optimum untuk material kerja dapat dianjurkan untuk mengurangi keausan *abrasive*.

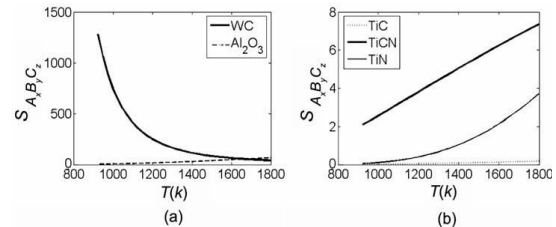
Pada Gambar 8, ketiga mekanisme ditunjukkan pada keausan kawah. Abrasinya ditunjukkan dengan tanda panah #1 pada Gambar 8(b) yang datang dari fase keras kedua pada material kerja (seperti sementit pada baja campuran rendah) mengabrasi lapisan material seperti pada keausan tepi.



Gambar 8. Pola keausan dari material pahat menjadi geram.

Dissolusi umum meliputi pemisahan dari lapisan material, perpindahan atomik permukaan dari spesies yang terpisah dan/atau reaksi kimia antara spesies yang terpisah dan material kerja dan diffusi selanjutnya [52,53] kedalam material kerja. Wong dan Kwon [53] menyebutkan bahwa hipotesa dissolusi dari keausan pahat diformulasikan sebagai kondisi batasan untuk perpindahan spesies pahat ke dalam arus beram dengan diffusi. Dengan kata lain, keausan dissolusi dijabarkan sebagai gabungan kejadian dari dissosiasi pada permukaan dan diffusi lanjutan dari elemen yang terdekomposisi dalam area beram. Pada kasus pemesinan campuran titanium dengan alat karbida yang tak terlapis, lapisan TiC dari atom karbon (terpisah dari karbida tungsten) dan titanium pada material kerja telah ditemukan pada permukaan [16]. Tingkat diffusi dari karbon melalui lapisan reaksi ini lebih rendah jika dibandingkan dengan kasus dimana permukaan reaksi tidak muncul, maka hal itu mengurangi tingkat keausan. Sebagai hasilnya, berbagai pahat terlapis tidak menampilkan kinerja dari pahat karbida tak terlapis ketika proses pemesinan campuran titanium. Kelarutan antara 1.0 (100%) pada titanium untuk kesemua material alat ditunjukkan oleh Gambar 7 (a) dan (b) menjadi tidak terpakai; bagaimanapun, hal itu dapat dikatakan sebagai

reaksi kimia yang potensial antara dissosiasi spesies keausan alat dan material alat [53] jika cukup tinggi untuk membentuk reaksi daripada melarutkan titanium.



Gambar 9. Daya larut dari bermacam material alat pada Titanium

Adhesi yang ditunjukkan pada panah #3 pada Gambar 8(b) merupakan formasi dari ikatan yang kuat pada permukaan alat dengan benda kerja yang diikuti dengan lepasnya material pahat. Rabinowicz [6] mengembangkan model *adhesive* menggunakan energi permukaan dan nilai kekerasan. Perkiraan dengan Persamaan (1) adalah tidak akurat karena permukaan berada dibawah tekanan hidrostatis yang membuatnya sulit untuk memperkirakan kondisi yang tak terpengaruhnya. Pada pahat berlapis alumina, kadangkala terdapat geram yang keluar sebagai hasil dari keausan *adhesive* [50].

DAFTAR PUSTAKA

1. Kim, W. and Kwon P. (2002) 'Phase transformation and its effect on flank wear in machining steels', *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, pp.659–666.
2. Kumar, R., Prakash, B., and Sethuramiah, A (2002), A systematic methodology to characterise the running-in and steady state wear process, *Wear*, 252, 445-454
3. Vishwanath, N. and Bellow, D. G. (1995), Development of an equation for the wear of polymers, *Wear*, 181-183, 42-49.
4. Rajesh, J. J. and Bijwe, J. (2005), Dimensional analysis for *abrasive* wear behaviour of various polyamides, *Tribol. Lett.*, 18, 331-340.

5. Shaw, M. (2005) *Metal Cutting Principles*, 2nd edition, New York: Oxford University Press Inc.21. Akasawa, T. and Hishiguti, H. (1980) 'Crater wear mechanism of WC-Co tools at high cutting speeds', *Wear*, Vol. 65, pp.141–150.
6. Rabinowicz, E. (1995) *Friction and Wear of Materials*, 2nd edition, New York: John Wiley & Sons, Inc.
7. Opitz, H. (1963) 'Tool wear and tool life', *International Production Engineering Research Conference – Proceedings*, Pittsburgh, Pennsylvania, 9–12 September, pp.107–113.
8. Burwell, J.T. (1955) 'Survey of possible wear mechanisms', *Wear-Usure-Verschleiss*, Vol. 1, No. 1, pp.119–141.
9. Wright, P.K. and Bagchi, A. (1981) 'Wear mechanisms that dominate tool-life in machining', *Journal of Applied Metal Working*, Vol. 1, No. 4, pp.15–23.
10. Ramalingam, S. and Wright, P.K. (1981) 'Abrasive wear in machining: experiments with materials of controlled microstructure', *ASME Transactions – Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 103, No. 2, pp.151–156.
11. Takeyama, H. and Murata, R. (1963) 'Basic investigation of tool wear', *ASME Transactions – Journal of Engineering for Industry*, Vol. 85, No. 1, pp.33–38.
12. Cook, N.H. and Nayak, P.N. (1969) 'Development of improved cutting tool materials', *Technical Report of AFML-TR-69-185*, US Air Force Materials Laboratory.
13. Trent, E.M. (1963) 'Cutting steel and iron with cemented carbide tools – Part I: an analysis of tool wear', *Journal of the Iron and Steel Institute*, Vol. 201, pp.847–855.
14. Kramer, B.M. and Kwon, P. (1985) 'Computational design of coating materials', *Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol. A3, No. 6, pp.2349–2444.
15. Kramer, B.M. and Suh, N.P. (1980) 'Tool wear by solution: a quantitative understanding', *ASME Transactions – Journal of Engineering for Industry*, Vol. 102, No. 4, pp.303–309.
16. Hartung, P.D. and Kramer, B.M. (1982) 'Tool wear in titanium machining', *Annals of the CIRP*, Vol. 31, No. 1, pp.75–80.
17. Kramer, B.M. (1987) 'On tool materials for high speed machining', *ASME Transactions – Journal of Engineering for Industry*, Vol. 109, No. 2, pp.87–91.
18. Stephenson, D.A. and Agapiou, J.S. (2006) *Metal Cutting Theory and Practice*, 2nd edition, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis group
19. Byrd, J.D. and Ferguson, B.L. (1978) 'A study of the influence of hard inclusions on carbide tool wear utilizing a powder metal technique', *Proceedings of the VIth NAMRC*, pp.310–1315.
20. Kwon, P. (2000) 'Predictive models for flank wear on coated inserts', *Journal of Tribology*, Vol. 122, pp.340–347.
21. Asakawa, T. and Hishiguti, H. (1980) 'Crater wear mechanism of WC-Co tools at high cutting speeds', *Wear*, Vol. 65, pp. 141–150
22. Dixon, G., Wright, R.N. and Lee, M. (1985) 'Process involved in the wear of cemented carbide tools', *Wear*, Vol. 104, pp.157–171.
23. Gekonde, H.O. and Subramanian, S.V. (2002) 'Tribology of tool-chip interface and tool wear mechanisms', *Surface and Coatings Technology*, Vol. 149, pp.151–160.
24. Blau, P.J. (1997), Fifty years of research on the wear of metals, *Tribol. Int*, 30, 321–331.
25. Bhushan, B. (2002) *Introduction to Tribology*, New York: John Wiley & Sons.
26. Kramer, B.M. (1993) 'Tribological aspects of metal cutting', *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp.372–376.
27. Vleugels, J. and Van Der Biest (1999) 'Chemical wear mechanisms of innovative ceramic cutting tools in the machining of steel', *Wear*, Vols. 225–229, pp.285–294.
28. Astakhov, V.P. (2006) *Tribology of Metal Cutting*, San Diego, CA: Elsevier
29. Astakhov, V.P. (2004) 'The assessment of cutting tool wear', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp.637–647.
30. Kapoor, A. and Franklin, F. J. (2000), Tribological layers and the wear of ductile materials, *Wear*, 245, 204–215.

31. Suh, N. P. (1973), The delamination theory of wear, *Wear*, 25, 111-124.
32. Suh, N. P. (1977), An overview of the delamination theory of wear, *Wear*, 44, 1-16.
33. Quinn, T. F. J (1971), Oxidational wear, *Wear*, 18,413-419.
34. Archard, J. F. (1953),, Contact and rubbing offlat surfaces, *J. Appl. Phys.*, 24, 981-988.
35. Sarkar,A. D. (1980), *Friction and wear*, Academic Press, London.
36. Childs, T.H.C., Maekawa, K., Obikawa, T. and Yamane, Y. (2000) *Metal Machining – Theory and Applications*, London: Arnold Publishers.
37. Boothroyd, G. and Knight, W.A (1989) *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2nd edition, New York: Marcel Dekker Inc.
38. Trent, E.M. and Wright, P.K. (2000) *Metal Cutting*, 2nd edition, Boston: Butterworth-Heinemann.
39. Rabinowicz, E. (1977) ‘Abrasive wear resistance as a materials test’, *Lubrication Engineering*, Vol. 33, pp.378–381.
40. Rabinowicz, E., Dunn, L.A. and Russell, P.G. (1961) ‘A study of abrasive wear under three-body conditions’, *Wear*, Vol. 4, pp.345–355.
41. Kwon, P. and Kountanya, R. (1999) ‘Experimental observation on machining spheroidized plain carbon steels’, *Tribology Transactions*, Vol. 42, No. 2, pp. 265–272
42. Wong, T., Kim, W. and Kwon, P. (2004) ‘Experimental support for a model-based prediction of tool wear’, *Wear*, Vol. 257, pp.790–798.
43. Kwon, P. and Kim, W-S. (2002) ‘Phase transformation and its effect on flank wear in machining steels’, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, pp.659–666.
44. Naerheim, Y. and Trent, E.M. (1977) ‘Diffusion wear of cemented carbides tools when cutting steel at high speeds’, *Metals Technology*, Vol. 4, pp.548–556.
45. Molinari, A. and Nouari, M. (2002) ‘Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting’, *Wear*, Vol. 252, pp.135–149.
46. Kramer, B.M. (1979) ‘An analytic approach to tool wear’, PhD Thesis, Cambridge, MA: MIT.
47. Kramer, B.M. and Suh, N.P. (1980) ‘Tool wear by solution: a quantitative understanding’, *ASME Transactions – Journal of Engineering for Industry*, Vol. 102, No. 4, pp.303–309.
48. Kubaschewski, O., Evans, E.L. and Alcock, C.B. (1967) *Metallurgical Thermochemistry*, 4th edition, Oxford: Pergamon Press.
49. Kwon, P. (formerly Judd, P.) (1985) ‘Theoretical foundations for the optimization of ceramic coated tools’, MS Thesis, Cambridge, MA MIT
50. Kim, W.S. (2000) ‘A new methodology for predicting tool wear’, PhD Thesis, Michigan State University, East Lansing, MI.
51. Hartung, P.D. (1981) ‘Tool wear in titanium machining’, PhD Thesis, Cambridge, MA: MIT.
52. Hua, J. and Shivpuri, R. (2005) ‘A cobalt diffusion based model for predicting crater wear of carbide tools in machining titanium alloys’, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 127, No. 1, pp.136–144.
53. Wong, T. and Kwon, P. (2006) ‘Dissolution profile of tool material into chip lattice’, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, pp.928–937.
54. Kubaschewski, O., Alcock, C.B. and Spencer, P.J. (1993) *Materials Thermochemistry*, 6th edition, Oxford: Pergamon Press.