

EVALUASI EFEK AIR JET COOLING TERHADAP TEMPERATUR PEMOTONGAN LOGAM

Paryanto^{a*}, Rusnaldy^a, Tony Suryo Utomo^b dan Yusuf Umardani^a

^aLaboratorium Metrologi Industri, Jurusan Teknik Mesin

^bLaboratorium Thermofluid, Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Kampus Undip Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

Phone: +62-24-7460059 ext. 118, Fax: +62-24-7460059, *E-mail: paryanto.undip@gmail.com

ABSTRAK

Pada proses pemesinan, cutting fluid (media pendingin) berfungsi sebagai pendinginan, pelumasan dan pembuangan geram, sehingga sangat menentukan performansi dari sebuah proses pemesinan. Sampai saat ini, media pendingin yang dipakai pada proses pemesinan masih mengandung zat-zat yang berbahaya bagi kesehatan operator dan tidak ramah lingkungan. Oleh sebab itu diperlukan media pendingin alternatif yang aman, ramah lingkungan, dan efisien dalam penggunaannya. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah dengan menggunakan pendingin udara berkecepatan tinggi (air jet cooling). Dengan menggunakan air jet cooling diharapkan akan diperoleh efek pendinginan yang lebih baik dan dapat menurunkan temperatur pemotongan, sehingga dapat mengurangi laju keausan pahat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengoptimisasi tekanan dan posisi penyemprotan air jet cooling sehingga diperoleh temperatur pahat yang minimum. Proses pemesinan yang digunakan adalah proses bubut dengan material ST 40. Metode penelitian yang digunakan adalah secara eksperimental dan dengan menggunakan pemodelan Finite Element Method (FEM). Tekanan penyemprotan divariasikan dari 0,5 – 6 bar untuk masing-masing posisi penyemprotan (interface dan overhead). Dari hasil penelitian diperoleh kesimpulan bahwa pada pemesinan menggunakan air jet cooling, posisi overhead akan lebih efektif jika dibandingkan posisi interface, dan pada tekanan penyemprotan 3 bar akan diperoleh temperatur pahat yang minimum.

Keywords: air jet cooling, temperatur pahat, bubut, ST 40

1. Pendahuluan

Pada proses pemesinan, terjadinya keausan pahat merupakan sesuatu yang harus diminimalisir karena akan menyebabkan terjadinya cacat pada hasil produk. Faktor terbesar penyebab terjadinya keausan pahat adalah karena adanya panas yang dihasilkan selama proses pemesinan [1]. Sedangkan untuk meningkatkan produktifitas pemesinan dibutuhkan putaran spindel dan kecepatan potong yang tinggi, hal ini jelas menghasilkan temperatur yang tinggi pada daerah pemotongan [2]. Oleh karena itu diperlukan suatu media pendingin untuk mengurangi keausan pahat sehingga dapat meningkatkan kualitas hasil proses pemesinan.

Penggunaan media pendingin yang saat ini banyak dipakai masih mengandung zat-zat yang berbahaya bagi kesehatan operator dan tidak ramah lingkungan [3-5]. Sehingga diperlukan alternatif media pendingin yang aman bagi kesehatan operator dan ramah lingkungan, tetapi efektif dalam penggunaannya. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah dengan menggunakan pendingin *air jet cooling* [6-11]. Selain hal tersebut,

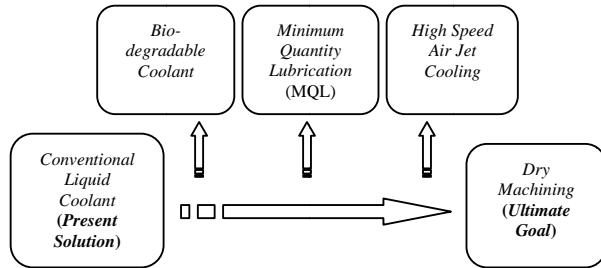
dengan penggunaan udara sebagai media pendingin akan dapat mengurangi biaya operasional pada proses pemesinan [12].

Mulai tahun 1990an, proses pemesinan dengan menggunakan metode *Minimum Quantity Lubrication* (MQL) untuk berbagai jenis material telah mulai diteliti. Secara umum dari penelitian tentang MQL dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan MQL memberikan hasil yang lebih baik dibanding dengan pemesinan kering (*dry machining*), apabila ditinjau dari laju keausan pahat dan kekasaran permukaan hasil pemesinan [2, 13-17].

Meskipun metode MQL memiliki banyak keuntungan dibandingkan dengan menggunakan media pendingin biasa, tetapi seiring dengan perkembangan industri metode ini dianggap kurang efisien karena masih memerlukan *fluid coolant* sebagai campuran media pendingin sehingga tidak ramah terhadap lingkungan dan tidak begitu efisien. Perkembangan terbaru tentang teknik pendinginan pada proses pemesinan adalah dengan menggunakan *air jet cooling*,



hal ini karena pada metode ini tidak diperlukan *fluid coolant* sehingga lebih ekonomis dan ramah lingkungan [5]. Secara umum perkembangan penggunaan jenis media pendingin ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Perkembangan penggunaan media pendingin [13].

Pada tahun 2006, Y. Su, dkk [14], melakukan penelitian tentang proses bubut dengan material Inconel 718 dengan menggunakan media pendingin udara yang dinginkan. Dalam penelitiannya proses pendinginan dilakukan dengan menyemprotkan udara dingin (-20°C sampai 20°C) pada benda kerja dan pahat. Berdasarkan hasil penelitian ini, dibandingkan dengan *dry machining* proses pendinginan metode ini mampu meningkatkan umur pahat 78% dan meningkatkan kualitas permukaan benda kerja sebesar 124%. Tetapi pada proses ini memiliki kekurangan, yaitu diperlukannya suatu mekanisme tambahan yang digunakan untuk mendinginkan udara, sehingga tidak begitu efisien.

Perbandingan hasil pemesinan kering dengan *air jet cooling* pada material baja AISI 1020 telah diteliti oleh A. Bareggia, dkk [1], dengan menggunakan pemodelan FEM. Pada penelitian tersebut diperoleh kesimpulan bahwa dengan menggunakan tekanan dan posisi penyemprotan udara yang tepat dapat menurunkan temperatur pahat, sehingga dapat mengurangi keausan yang terjadi pada pahat.

Pada tahun 2009, Brian Boswell dan Tilak T. Chandratilleke [7], meneliti proses pemesinan dengan pendinginan menggunakan udara dingin, dari hasil penelitian tersebut diperoleh kesimpulan bahwa udara dingin dapat meminimalisir keausan pahat. Penelitian tentang efektifitas dari penggunaan media udara sebagai pendingin pada proses pemesinan sampai saat ini masih terus dilakukan.

Pada pendinginan *air jet cooling* yang diperlukan hanya kompresor sebagai penghasil udara bertekanan, nozzle sebagai pengarah semprotan udara, dan katup untuk mengatur tekanan udara keluaran nozzle. Sehingga apabila mengacu pada proses pemesinan yang ramah lingkungan (*green machining/eco-machining*) dan efisiensi proses pemesinan maka penggunaan *air jet cooling* memiliki potensi yang besar untuk

dikembangkan.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengukur temperatur pahat pada proses pemotongan logam dengan menggunakan *air jet cooling*. Dari data tersebut akan diperoleh besarnya tekanan dan posisi penyemprotan yang optimum sehingga diperoleh temperatur pahat yang minimum. Karena keausan pahat sangat dipengaruhi oleh temperatur maka data tersebut juga digunakan untuk memprediksi laju keausan pahat.

Selama proses pemesinan, sebagian besar energi pemotongan diubah menjadi panas melalui proses gesekan antara geram dengan pahat dan antara pahat dengan benda kerja serta deformasi plastis di permukaan material [18]. Menurut Trent dan Wright [19], sekitar 99% dari energi pemotongan diubah menjadi panas, sehingga hal ini mengakibatkan kenaikan temperatur pada pahat dan benda kerja. Distribusi temperatur yang dihasilkan akan tergantung dari nilai konduktivitas panas dan kapasitas panas spesifik dari material pahat dan benda kerja. Sedangkan jumlah panas yang hilang akan tergantung dari perpindahan panas secara konveksi dan radiasi [20].

Berdasarkan dari beberapa hasil penelitian pada berbagai kondisi pemotongan, prosentase panas yang terbawa geram, pahat dan benda kerja masing-masing berkisar diantara 75%, 20%, dan 5%. Perpindahan panas pada proses pemotongan logam yang paling besar adalah proses konduksi, sedangkan pada proses pendinginan menggunakan cairan pendingin, proses konveksi paksalah yang paling dominan. Menurut Taufiq Rochim [21], panas total yang ditimbulkan permenit dapat dihitung menggunakan Persamaan 1:

$$Q = k_s A v \quad (1)$$

dimana:

Q	= Panas yang timbul permenit (J/min)
$k_s A$	= F_v = Gaya potong (N)
k_s	= Gaya potong spesifik (N/mm^2)
A	= Luas penampang geram (mm^2)
v	= kecepatan potong (m/min)

Sedangkan besarnya panas yang terbawa geram sesuai Persamaan 2 berikut ini:

$$Q_c = \Delta Q_c W c_w \quad (2)$$

dimana:

Q_c	= Panas yang terbawa geram (J/min)
ΔQ_c	= Kenaikan temperatur geram ($^{\circ}K$)
W	= Berat geram yang terbentuk permenit (g/min)
c_w	= panas spesifik benda kerja ($J/g.K$)

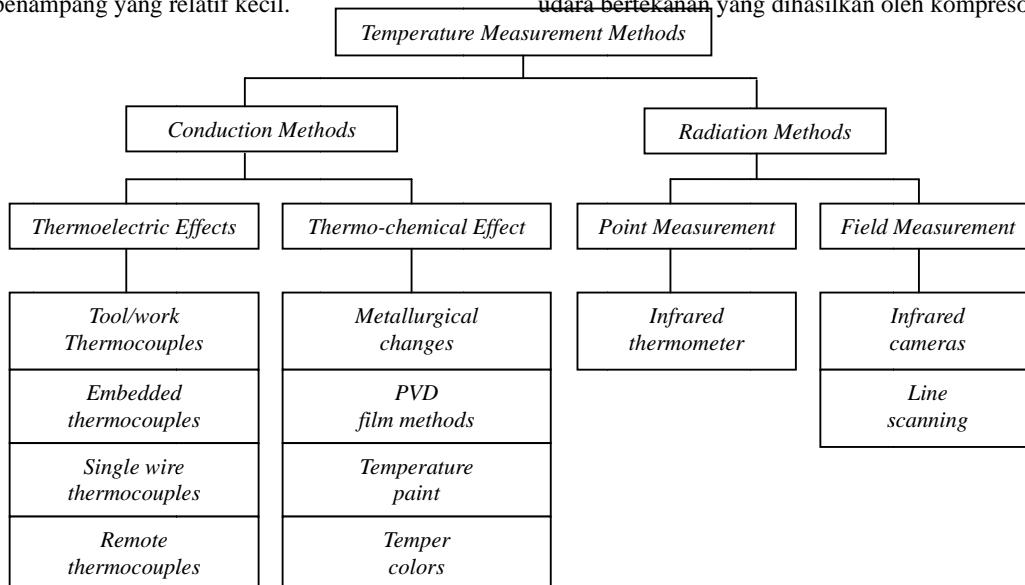
Walaupun prosentase panas yang terbawa geram sangat tinggi, tidak berarti temperatur geram lebih tinggi dari pada temperatur pahat, hal ini karena panas pada



geram selalu mengalir bersama dengan terbentuknya geram sedangkan panas yang merambat melalui pahat terjadi proses konduksi secara terus menerus dan pada permukaan penampang yang relatif kecil.

2.2 Peralatan Penelitian

Mesin bubut yang digunakan adalah EMCO Maier Maximat V13. Media pendingin yang digunakan adalah udara bertekanan yang dihasilkan oleh kompresor.



Gambar 2 Metode pengukuran temperatur pemotongan logam [18].

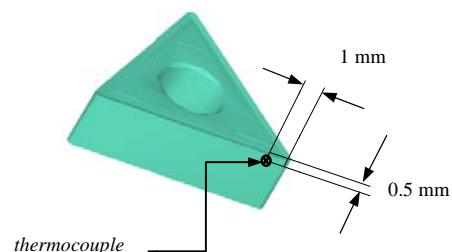
Pada proses pemesinan, temperatur pemotongan merupakan besaran yang paling sulit diukur dibandingkan besaran yang lain, seperti: gaya pemotongan, keausan pahat, dan kekerasan permukaan. Hal tersebut karena temperatur merupakan besaran skalar yang dipengaruhi oleh banyak faktor [22]. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengukur temperatur pemotongan, tetapi sampai sekarang tidak ada justifikasi tentang metode apa yang paling akurat, setiap metode memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pada Gambar 2 ditampilkan beberapa metode pengukuran temperatur pemotongan yang biasanya digunakan [18]:

2. Metodologi Penelitian

2.1 Material Penelitian

Benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ST 40 dengan dimensi $\varnothing 34 \times 60$ mm. Komposisi unsur kimia sepesimen uji adalah sebagai berikut: %C = 0,10; %Si = 0,21; %Mn = 0,66; %Ni = 0,11; %Fe = 98,12; dengan nilai kekerasan 55,7 HRA. Sebelum diuji benda kerja telah di *facing* dengan kedalaman 2 mm dengan tujuan untuk membuat permukaan benda kerja yang mengalami pengerasan akibat pengerolan selama proses manufaktur. Jenis pahat yang digunakan adalah TNMG 160404 FG CT 3000 dengan *tool holder* tipe PTNFR1616.

Termometer KW06-283 digunakan untuk mengukur temperatur pahat pada waktu proses pemesinan. Pada termometer jenis ini dilengkapi dengan *thermocouple* yang digunakan sebagai sensor yang ditempelkan dibenda yang akan diukur. Gambar 3 memperlihatkan posisi pemasangan *thermocouple* pada pahat. Hasil pengukuran termometer kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan *software DEFORM 3D*. Sehingga diperoleh prediksi temperatur pemotongan di bagian daerah kontak antara pahat dan benda kerja.



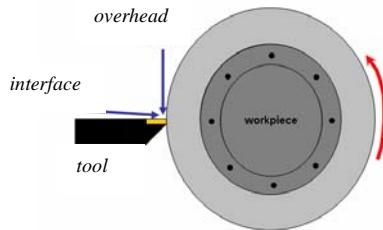
Gambar 3 Posisi pemasangan *thermocouple*.

2.3 Sistem Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menvariasikan tekanan penyemprotan dari 0,5 – 6 bar, masing-masing untuk posisi *interface* dan *overhead* (Gambar 4). Sedangkan



parameter pengujian secara keseluruhan diperlihatkan seperti terlihat pada Tabel 1.



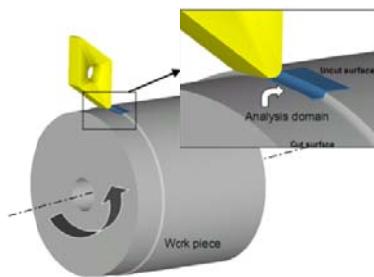
Gambar 4 Posisi penyemprotan udara pendingin [1].

Tabel 1 Parameter proses pengujian.

Parameter pengujian	Nilai
Jenis pendingin	<i>dry, dromus</i> (32,7 l/h), <i>air jet cooling</i> (0,5 – 6 bar)
Kecepatan potong (v_c)	140 m/min
Feed (f)	0,112 mm/rev
Kedalaman potong (a)	0,5 mm
Diameter nozzle (d)	2 mm
Jarak ujung nozel dengan geram	2 cm

2.4 Pemodelan Menggunakan FEM

Pemodelan proses bubut dengan metode elemen hingga dilakukan dengan simulasi menggunakan *Software DEFORM 3D V5.0*. Dengan pemodelan seperti pada Gambar 5 dapat diketahui interaksi antara benda kerja dengan pahat sekaligus proses terbentuknya geram. Pahat potong dimodelkan sebagai *rigid body* karena diasumsikan tidak mengalami deformasi saat proses berlangsung, sedangkan benda kerja dimodelkan sebagai *plastic* sempurna karena benda mengalami deformasi plastis. Pemodelan *plastic* pada benda kerja akan menghasilkan simulasi yang mendekati perlakuan pada kondisi sebenarnya. Proses *meshing* elemen menggunakan *Arbitrary Lagrangian Eulerian* (ALE), sehingga selama proses simulasi, *meshing* berlangsung secara *transient* [23, 24].

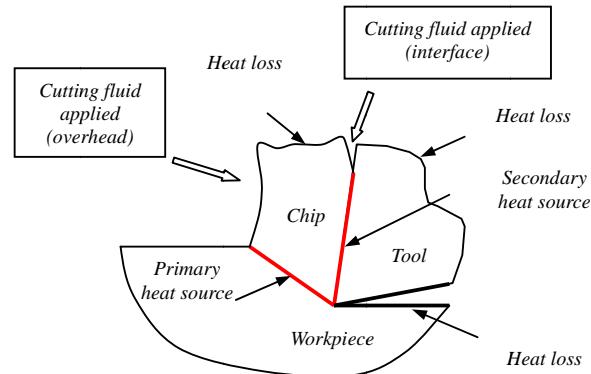


Gambar 5 Pemodelan proses bubut pada *Software DEFORM 3D V5.0* [24].

Pemodelan *DEFORM 3D* hanya digunakan untuk memodelkan proses pemesinan kering, sedangkan pemodelan untuk *air jet cooling* masih dalam tahap pengembangan. Jumlah *mesh* benda kerja adalah 80.000 elemen dengan *arc angle* 90°, sedangkan pahat dimodelkan dengan menggunakan jumlah *mesh* 50.000 elemen.

3. Hasil dan Pembahasan

Sebagian besar energi yang digunakan untuk proses pemotongan logam diubah menjadi panas, kemudian panas ini akan diteruskan ke geram, pahat, dan benda kerja. Dari proses perpindahan panas tersebut maka akan menyebabkan terbentuknya tiga daerah panas, yaitu: daerah panas pada bidang geser, daerah panas pada kontak antara geram dan permukaan pahat, dan daerah panas pada kontak antara permukaan pahat dan benda kerja. Pemodelan perpindahan panas dan sistem pendinginan terlihat pada Gambar 6. Distribusi temperatur pemotongan pada proses pemesinan perlu untuk diketahui, hal ini karena dengan mengetahui distribusi temperatur pemotongan akan dapat diketahui laju keausan pahat, dan perubahan sifat-sifat mekanik dari benda kerja dan pahat yang dapat mempengaruhi besarnya gaya pemotongan.



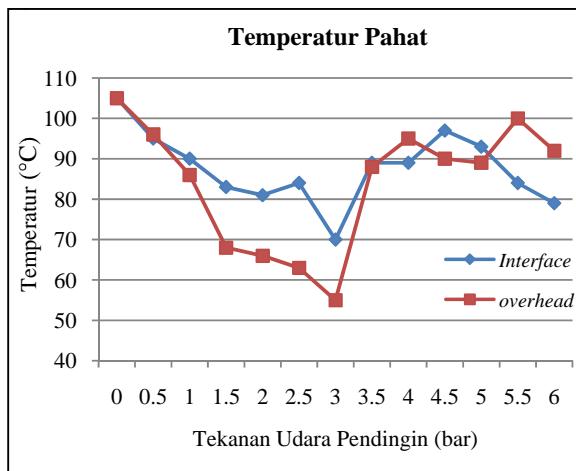
Gambar 6 Pemodelan perpindahan panas pada proses bubut.

3.1 Hasil Pengujian

Pada penelitian ini, temperatur pemotongan diukur menggunakan *thermocouple* tipe K, dengan menempatkan ujung *thermocouple* pada daerah *clearance face* pahat dengan jarak 1 mm dari ujung kontak pahat. Dari pengujian yang telah dilakukan diperoleh hasil temperatur pahat seperti pada Gambar 7. Pada gambar tersebut menunjukkan hasil temperatur pahat untuk pendinginan menggunakan *air jet cooling*



dengan posisi penyemprotan *interface* dan *overhead*. Tekanan pendinginan 0 bar menunjukkan bahwa proses pemesinan dilakukan dengan tanpa media pendingin.

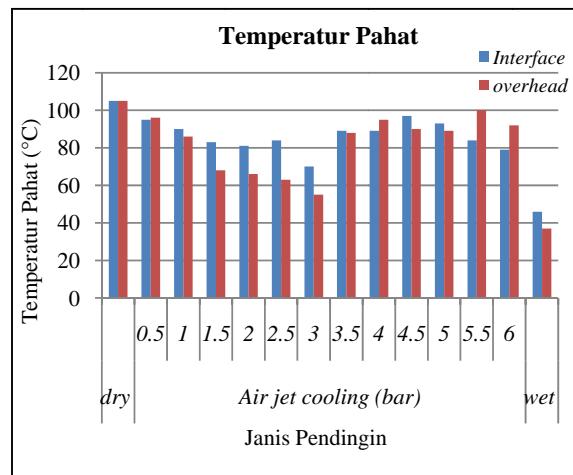


Gambar 7 Temperatur pahat pada proses pemesinan menggunakan *air jet cooling*.

Dari Gambar 7 diketahui bahwa tekanan penyemprotan semakin dinaikkan maka pendinginan terhadap pahat akan semakin efektif, hal ini karena pada tekanan rendah laju dari aliran udara pendingin belum menghasilkan pendinginan yang cukup untuk membuang panas yang dihasilkan selama proses pemotongan. Sedangkan apabila tekanan *air jet cooling* semakin dinaikkan sampai 3 bar, kemampuan pendinginan akibat adanya perpindahan panas semakin besar dan udara pendingin mampu untuk masuk ke dalam celah kontak antara pahat dan geram. Akan tetapi jika tekanan penyemprotan melebihi 3 bar, maka efektivitas pendinginan akan semakin berkurang, hal ini karena pada tekanan diatas 3 bar udara pendingin mengalami kompresi yang menyebabkan naiknya temperatur udara pendingin dan tumbukan antara udara yang disemprotkan dengan benda kerja/pahat menyebabkan timbulnya panas, sehingga pendinginan tidak begitu efektif.

Dari grafik pada Gambar 7 dapat diperoleh kesimpulan bahwa pendinginan menggunakan *air jet cooling* paling efektif mendinginkan pahat adalah pada tekanan penyemprotan 3 bar, hal tersebut terjadi baik pada posisi *interface* maupun pada posisi *overhead*. Secara umum, jika ditinjau dari kemampuan pendinginan terhadap pahat maka pendinginan dari arah *overhead* lebih baik jika dibandingkan dengan pendinginan dari arah *interface*. Hal tersebut karena pada posisi *interface* udara tidak mampu untuk masuk ke celah antara pahat dan benda kerja, berbeda jika menggunakan media pendingin cair.

Jika dilihat dari efektifitas pendinginan, penggunaan *air jet cooling* pada proses pemesinan lebih baik jika dibandingkan dengan pemesinan kering, tetapi tidak lebih baik jika dibandingkan dengan pemesinan menggunakan pendinginan *dromus* (Gambar 8). Hal ini karena pada pendinginan *air jet cooling* kemampuan mendisipasi panasnya tidak sebaik jika menggunakan pendinginan *dromus*. Pada pemesinan basah hampir seluruh panas yang ada di pahat diserap oleh *dromus*, sehingga temperatur pahat menjadi rendah.

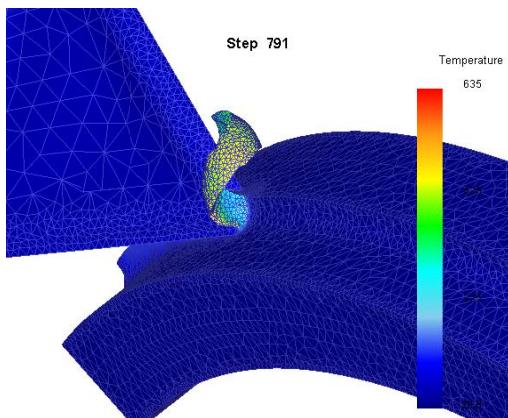


Gambar 8 Perbandingan temperatur pahat pada proses pemesinan kering, *air jet cooling* dan basah.

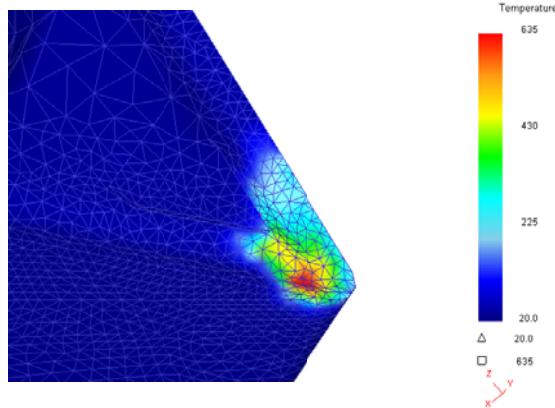
3.2 Hasil Pemodelan Menggunakan FEM

Pemodelan proses pemesinan menggunakan FEM digunakan untuk memprediksi distribusi temperatur selama proses pemotongan logam. Hal ini karena pengukuran temperatur menggunakan metode eksperimental akan sulit dilakukan dan hanya mampu mengukur pada bagian luarnya saja. Dengan pemodelan menggunakan software *DEFORM 3D* akan dapat diketahui distribusi temperatur baik pada pahat, geram dan benda kerja (Gambar 9).





Gambar 9 Hasil pemodelan proses pemesinan menggunakan *DEFORM 3D*.



Gambar 10 Distribusi temperatur pada pahat.

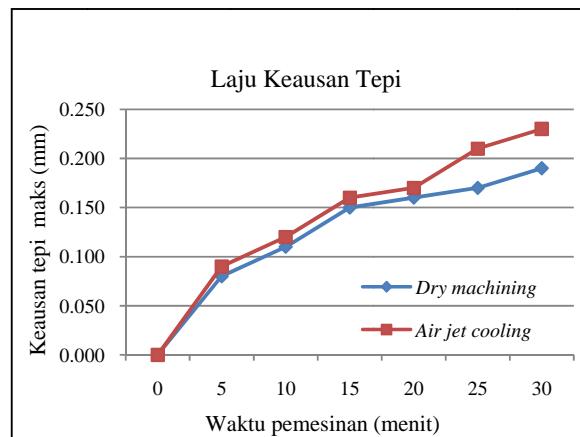
Dari Gambar 10 terlihat distribusi temperatur pada pahat, dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa temperatur tertinggi terjadi pada permukaan kontak antara pahat dengan geram. Perbandingan hasil simulasi dan pengujian secara eksperimental dapat dilihat pada Tabel 2. Dari tabel tersebut diperoleh bahwa pada titik yang sama, perbedaan temperatur pahat antara hasil pengujian dan simulasi sebesar 2,85%. Sehingga secara umum pemodelan menggunakan *DEFORM 3D* akan diperoleh hasil yang mendekati hasil eksperimental. Perbedaan yang terjadi disebabkan karena adanya keterbatasan dalam proses *meshing*.

Tabel 2 Perbandingan hasil simulasi dan hasil eksperimental.

Metode pengukuran	Temperatur pahat (°C)
Eksperimental dengan <i>thermocouple</i>	105
Hasil pemodelan <i>DEFORM 3D</i>	102

3.3 Laju Keausan Pahat

Dari pengujian keausan pahat yang telah dilakukan diperoleh grafik keausan tepi maksimum pahat seperti terlihat pada Gambar 11. Pada pengujian tersebut pendinginan *air jet cooling* dilakukan pada tekanan penyemprotan 3 bar dengan posisi dari arah *overhead*. Dari grafik terlihat bahwa penggunaan *air jet cooling* secara umum mampu mengurangi laju keausan pahat jika dibandingkan dengan proses pemesinan kering. Hal ini karena dengan menggunakan *air jet cooling*, pahat megalami proses pendinginan sehingga temperatur pahat tidak terlalu tinggi. Temperatur pahat yang tinggi akan menurunkan kekuatan material pahat dan memfasilitasi terjadinya fenomena abrasi dan difusi. Akibat kekuatan material yang menurun, adanya abrasi dan adanya fenomena difusi akan menyebabkan pahat menjadi mudah aus.



Gambar 11 Laju keausan tepi pahat.

4. Kesimpulan

Penggunaan *air jet cooling* pada proses pemesinan akan dapat menurunkan temperatur pemotongan sehingga akan mengurangi laju keausan pahat. Pada tekanan penyemprotan 3 bar dengan posisi penyemprotan *overhead* diperoleh nilai optimum dengan efek pendinginan yang paling efektif. Secara umum pada proses pemesinan menggunakan *air jet cooling* arah penyemprotan *overhead* akan lebih efektif jika dibandingkan penyemprotan dari arah *interface*. Penggunaan FEM sebagai *tool* sangat membantu untuk mengetahui distribusi temperatur pemotongan secara keseluruhan, penentuan parameter pemotongan dan jumlah *meshing* akan sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi. Pengembangan pemodelan pemesinan menggunakan *air jet cooling* akan dilakukan pada penelitian berikutnya.

Ucapan Terima Kasih



Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Metrologi Industri, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro yang telah mendanai dan menfasilitasi penelitian ini.

Referensi

- [1] Andrea Bareggi, Andrew Torrance dan Garret O' Donnell, *Modelling thermal effects in machining by finite element method*, Proceedings of the 24th International Manufacturing Conference, Waterford, (2007) 263 – 272.
- [2] Nikhil Ranjan Dhar, Sumaiya Islam dan M. Kamruzzaman, *Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4340 steel*, G.U. Journal of Science, 20 (2) (2007) 23 – 32.
- [3] Veijo Kauppinen, *Environmentally reducing of coolants in metal cutting*, Proceedings University's Days 8th International Conference, Helsinki University of Technology, (2002).
- [4] Anshu D. Jayal, A.K. Balaji, Richard Sesek, Adam Gaul dan Dean R. Liliquist, *Machining performance and health effect of cutting fluid application in drilling of A390.0 cast aluminium alloy*, Journal of Manufacturing Processes, vol. 9 (2) (2007) 137 – 146.
- [5] Andrea Bareggi, Andrew Torrance dan Garret O' Donnell, *Green cutting using supersonic air jets as coolant and lubricant during turning*, Advanced in Manufacturing Technology, (2006) 261 – 266.
- [6] Jefry B. Dahmus dan Timothy G. Gatowski, *An environmental analysis of machining*, Proceeding of IMECE, ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, (2004).
- [7] Brian Boswell dan Tilak T. Chandratilleke, *Air-cooling used for metal cutting*, American Journal of Applied Sciences 6 (2), (2009) 251 – 262.
- [8] F. Itoigawa, T.H.C. Childs, T. Nakamura dan W. Bellucco, *Effect and mechanisms in minimum quantity lubrication machining of aluminum alloy*, Journal of Wear 260, (2006) 339 – 344.
- [9] M. Monno, G.M. Pittala dan A. Bareggi, *Finite element modeling of titanium assisted by high speed air jet*, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, (2006).
- [10] P. Dahlman, *A comparison of temperature reduction in high-pressure jet-assisted turning using high pressure versus high flowrate*, Master's thesis, Production Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, (2001).
- [11] N. R. Dhar dan M. Kamruzzaman, *Effects of cryogenic cooling on temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-8740 steel by coated carbide*, Proceedings of the 1st International Conference & 7th AUN/SEED-Net Fieldwise Seminar on Manufacturing and Material Processing, (2006) 36 – 41.
- [12] Shaw C. Feng dan Mitsuro Hattori, *Cost and process information modeling for dry machining*, Manufacturing Engineering Laboratory, NIST DoC, (2001).
- [13] J.F. Kelly dan M.G. Cotterell, *Minimal lubrication machining of aluminium alloys*, Journal of Materials Processing Technology 120, (2002) 327 – 334.
- [14] Y. Su, N. He, L. Li, A. Iqbal, M.H. Xiao, S. Xu dan B.G. Qiu, *Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, (2007) 927 – 933.
- [15] K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland dan T. Wakabayashi, *Dry machining and minimum quantity lubrication*, Dept. of Machining Technology, University of Dortmund, Germany, (2004).
- [16] Raviraj Shetty, R. Pai dan S.S. Rao, *Tribological studies on discontinuously reinforced aluminum composites based on the orthogonal arrays*, ARPN Journal of Engineering and Applied Science, Vol. 3 No. 1, (2008).
- [17] Anselmo Eduardo Diniz, Aldo Braghini Júnior dan Fernando Teixeira Filho, *Tool wear damage caused by abundant emulsion in milling operation of PH stainless steel*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering 2, (2008) 133 – 138.
- [18] J.M. Longbottom dan J.D. Lanham, *Cutting temperature measurement while machining-a review*, An International Journal of Aircraft Engineering and Aerospace Technology 77 (2), (2005) 122 – 130.
- [19] Trent, E.M., Wright, P.K. (2000), *Metal Cutting*, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Boston, MA.
- [20] Müller-Hummel, P. dan Lahres, M., *A new instrument to optimize cutting processes: in situ temperature measurement on diamond coated tools*, Innovations in Material Research, Vol. 1 No.1, (1996) 1 – 9.
- [21] Taufiq Rachim, *Teori dan teknologi proses permesinan*. Institut Teknologi Bandung Press, (1993).
- [22] David A. Stephenson dan John S. Agapiou, *Metal Cutting Theory dan Practice*, 2nd Ed., Taylor & Francis, (2006).
- [23] Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C., Filice, L. dan Umbrello, D., *Criterion to evaluate diffusive wear in 3D simulations when turning AISI 1045 steel*, International Jurnal Master Form 1, (2008) 495 – 498.



- [24] *Documentation for 3D Machining wizard, manual instruction DEFORM 3D*, Scientific Forming Technologies Corporation, (2003).

