

Penentuan Faktor yang Mempengaruhi Daya dan Taburan Tegasan Semasa Pemesinan Besi Tuangan Mulur (FCD 500) Secara Simulasi (Determination of Factors that Affect Force and Stress Distribution During Machining Ductile Cast Iron (FCD 500) by Simulation)

AMINAH ISHAK, JAHARAH A.GHANI* & CHE HASSAN CHE HARON

ABSTRAK

Kaedah unsur terhingga (FEM) berdasarkan pemodelan dan simulasi proses pemotongan telah menarik minat ramai penyelidik secara berterusan untuk mengkaji lebih mendalam terutamanya mengenai penjanaan daya dan suhu di dalam zon pemotongan yang sebelum ini tegasan tidak boleh diukur secara langsung. Dalam kajian ini, simulasi proses pemotongan ortogon besi tuang mulur (FCD 500) menggunakan mata pemotong karbida pada pelbagai keadaan angin sejuk telah dikaji. Perisian DEFORM digunakan untuk menjalankan simulasi proses pemotongan ortogon dengan laju pemotongan (100-300 m/min), kadar suapan (0.15-0.35 mm/pus), kedalaman pemotongan (0.2-0.8 mm) dan suhu angin sejuk (2° -25°C). Mata pemotong mempunyai jejari hidung mata pemotong 0.4 mm, sudut sadak, $\alpha = 5^\circ$ dan sudut kelegaan, $\beta = 7^\circ$. Reka bentuk uji kaji adalah menggunakan kaedah Taguchi dalam tatasusunan ortogon L_9 , nisbah S/N dan analisis Pareto ANOVA digunakan untuk menganalisis kesan parameter pemotongan terhadap hasil pemesinan iaitu daya, tegasan dan suhu semasa pemesinan. Keputusan menunjukkan kadar suapan memberikan pengaruh yang paling tinggi (96.12%) terhadap daya pemotongan. Tegasan pemotongan paling dipengaruhi oleh kadar suapan iaitu 78.87%. Kajian ini telah membuktikan, banyak masa, kos dan tenaga dapat dijimatkan dalam mengkaji kebolehmesinan sesuatu bahan secara simulasi berbanding dengan kaedah eksperimen, di samping keputusan yang tepat diperoleh.

Kata kunci: Alat pemotong karbida; besi tuangan mulur (FCD 500); daya pemotongan; tegasan pemotongan

ABSTRACT

Finite element method (FEM) based on modeling and cutting process simulation has continuously attracted many researchers to study in more detail especially on force generation and temperature in cutting zones, in which previously stress could not be measured directly. In this study, orthogonal cutting process simulation of ductile cast iron (FCD 500) using carbide cutting tool in various chilled air condition was studied. DEFORM software was used to carry out the cutting process simulation at various cutting speed (100-300 m/min), feed rate (0.15-0.35 mm/rev), depth cutting (0.2-0.8 mm) and chilled air temperature (2° -25°C). The cutting tool has tool nose radius of 0.4 mm, rake angle, $\alpha = 5^\circ$ and clearance angle, $\beta = 7^\circ$. Experimental design used was Taguchi method using orthogonal L_9 array, S/N ratio and Pareto ANOVA analysis were used to analyse the cutting parameters effect on machining response of cutting force, stress and temperature generated during the machining process. The results showed that the feed rate has the highest influence (96.12%) on the cutting force. Cutting stress was mostly influenced by feed rate (78.87%). This simulation studies proved that great deal of time, cost and energy can be saved in study the machinability of certain material using simulation compared with experimental method, besides a right decision can be achieved.

Keywords: Carbide cutting tool; cutting force; cutting stress; ductile cast iron (FCD 500)

PENGENALAN

Penyelidikan terhadap proses pemesinan yang semakin berkembang pada masa kini telah meningkatkan kebolehan pemesinan ke tahap yang lebih tinggi. Teknologi seperti pemesinan mikro, pemesinan nano, pemesinan halaju tinggi dan pemesinan kering telah membantu penyelidikan pemesinan berkembang. Penggunaan mesin yang moden juga tiada gunanya jika mata pemotong yang digunakan haus dengan cepat dan hasil kerja tidak memuaskan. Ini akan mengakibatkan masa pemesinan yang lama dan kejaitan dimensi dan kemas benda kerja merosot.

Menurut Trent (1995), pemesinan ialah proses bahan yang tidak dikehendaki dibuang daripada benda kerja dalam bentuk serpihan untuk membentuk permukaan benda kerja yang baru, melalui pergerakan relatif dan penggunaan daya. Pemesinan merupakan proses tak langsung dengan kerja mekanikal ditukar kepada haba melalui ubah bentuk plastik semasa pembentukan serpihan dan disebabkan kerja geseran antara benda kerja dan mata pemotong.

Kajian yang lalu membuktikan bahawa perubahan ke atas sudut sadak dalam arah positif memberi pengaruh yang positif kepada daya-daya pemotongan (Shaw

1984). Keadaan ini menyumbang kepada pengurangan kawasan sentuhan serpihan/perkakas dan daya geseran dan menyebabkan aliran serpihan menjadi mudah. Pengurangan daya dengan mengehendkan sentuhan di muka sadak mungkin satu teknik yang berguna untuk beberapa keadaan, tetapi dalam banyak kes pengurangan daya tidak praktikal kerana menyebabkan mata pemotong menjadi tumpul (Trent 1995).

Umumnya, lebih tinggi sudut sadak maka lebih rendah daya-daya yang dihasilkan semasa pemotongan logam. Walau bagaimanapun, secara praktikalnya dalam operasi pemotongan sudut sadak dihadkan. Sudut sadak yang tinggi mengurangkan kekuatan mata pemotong dan mempercepatkan haus. Oleh itu, sepatutnya terdapat keseimbangan antara sudut sadak dan daya pemotongan. Terdapat satu nilai sudut sadak yang optimum pada setiap keadaan pemotongan yang khusus (Gunay et al. 2005).

Dalam pemotongan logam, kedalaman pemotongan, kadar suapan dan kelajuan pemotongan adalah parameter utama yang dikawal oleh operator mesin. Ini adalah kerana terdapat kaitan yang rapat antara mata pemotong dengan benda kerja dan daya pemotongan serta kualiti permukaan pemesinan (Korkut & Donertas 2007). Shunmugam et al. (2000) dan Tandon et al. (2002) pula menyatakan parameter pemotongan seperti kedalaman pemotongan, kadar suapan dan kelajuan pemesinan mempengaruhi kejayaan yang besar dalam keseluruhan operasi pemesinan.

Kajian ke atas bahan AISI 52100 menggunakan DEFORM 2D (Escalona et al. 2005), menunjukkan bahawa pada kelajuan pemotongan yang malar, kadar suapan meningkat sebanyak 50% dan peningkatan hampir 100 N kepada daya pemotongan. Hal ini berlaku kerana serpihan menjadi lebih besar apabila kadar suapan

dinaikkan, mampatan yang tinggi dihasilkan oleh mata pemotong dan benda kerja yang membawa kepada ubah bentuk plastik yang tinggi kepada kawasan pemotongan. Apabila pengaruh bagi kelajuan pemotongan ke atas daya pemotongan dianalisis, penurunan sekitar 30 N oleh daya pemotongan apabila kelajuan pemotongan ditingkatkan sebanyak 50% pada kadar suapan malar.

Banyak kajian telah dijalankan untuk mengira suhu dan kecerunan suhu di atas muka sadak mata pemotong dan perkembangan telah dibuat ke arah penghapusan punca-punca ralat. Kajian terkini menggunakan analisis unsur terhingga menunjukkan perkembangan yang agak besar dalam perhitungan suhu antara muka dan kecerunan suhu dalam keratan dua dimensi melalui mata pemotong (Abukhshim et al 2006). Perbandingan taburan suhu yang dihitung dengan kecerunan suhu yang diukur menunjukkan keyakinan bahawa kaedah ini mungkin dapat digunakan untuk menghitung suhu yang dipercayai.

Artikel ini akan membentangkan kajian mengenai simulasi kesan angin sejuk ke atas daya dan taburan tegasan semasa pemesinan besi tuangan mulur (FCD 500) secara simulasi menggunakan mata pemotong karbida.

REKA BENTUK SIMULASI

Simulasi dijalankan menggunakan kaedah Taguchi dengan tiga aras bagi parameter pemotongan pemboleh ubah. Jadual 1 menunjukkan parameter pemotongan yang digunakan dalam kajian ini. Menurut konsep reka bentuk Taguchi (Park 1996), gabungan parameter yang dipilih untuk menjalankan uji kaji ini adalah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2, iaitu susunan ortogon L_9 .

JADUAL 1. Parameter pemotongan tiga aras

Aras	Halaju pemotongan (m/ min)	Kadar suapan (mm/pus)	Kedalaman pemotongan (mm)	Suhu (°C)
	A	B	C	D
0	100	0.15	0.2	2°
1	200	0.25	0.5	10°
2	300	0.35	0.8	25°

JADUAL 2. Gabungan parameter pemesinan yang digunakan dalam eksperimen, L_9

No. Eksperimen	1	2	3	4	Penentuan parameter
Petunjuk	A	B	C	D	-
1	0	0	0	0	A0B0C0D0
2	0	1	1	1	A0B1C1D1
3	0	2	2	2	A0B2C2D2
4	1	0	1	2	A1B0C1D2
5	1	1	2	0	A1B1C2D0
6	1	2	0	1	A1B2C0D1
7	2	0	2	1	A2B0C2D1
8	2	1	0	2	A2B1C0D2
9	2	2	1	0	A2B2C1D0

Jadual 3 menunjukkan pemboleh ubah yang digunakan untuk proses simulasi pemesinan ortogon menggunakan DEFORM iaitu geometri benda kerja, jenis elemen yang digunakan untuk jaringan benda kerja dan perkakas, pekali pemindahan haba antara muka serpihan dan perkakas, pekali geseran (kawasan lekit), panjang rantau bagi lekatan dan jumlah langkah.

Deform berupaya mengendalikan jaringan global apabila terdapat anjakan keadaan sempadan yang ditakrifkan untuk benda kerja (Halil 2003). Oleh itu, dalam

model Deform, sempadan sebelah kiri nod dipasang pada arah X dan sempadan bawah nod dipasang pada arah Y. Jadual 4, menunjukkan keadaan sempadan yang digunakan untuk simulasi pemotongan ortogon dan Rajah 1 pula menunjukkan gambaran umum simulasi pemotongan ortogon dengan menggunakan perisian DEFORM.

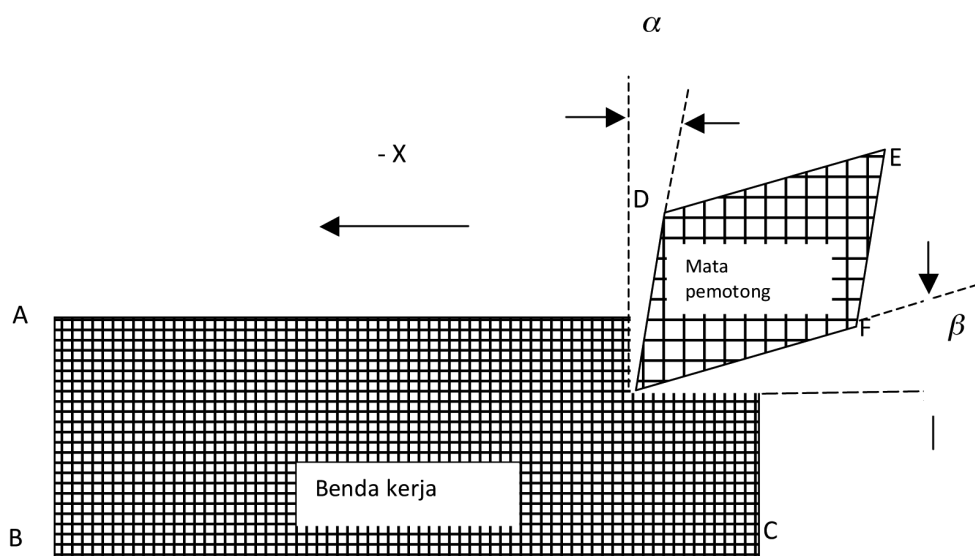
Simulasi pemotongan menggunakan Deform membenarkan mata pemotong menembusi benda kerja untuk membentuk serpihan. Semasa operasi tersebut, unsur-unsur pada hujung mata pemotong dipadamkan melalui

JADUAL 3. Pemboleh ubah untuk proses simulasi pemesinan ortogon untuk FCD 500 menggunakan DEFORM

Bahan benda kerja	Plastik
Geometri benda kerja	$10 \times 3 \text{ mm}^2$
Bahan perkakas	Tegar, $R = 0.4 \text{ mm}$ $\alpha = 5$, $\beta = 7$ dan $\alpha = 8$, $\beta = 5$
Geometri perkakas	$3 \times 3 \text{ mm}^2$
Jejaring benda kerja	1500
Jejaring perkakas	700
Jenis elemen yang digunakan untuk jaringan benda kerja dan perkakas	4 nod
Pekali pemindahan haba pada antara muka serpihan dan perkakas	13 N/s/mm/C
Pekali geseran (kawasan lekatan)	0.5
Panjang rantau bagi lekatan	Sama seperti kedalaman pemotongan
Jumlah langkah	700

JADUAL 4. Keadaan-keadaan sempadan yang digunakan untuk simulasi

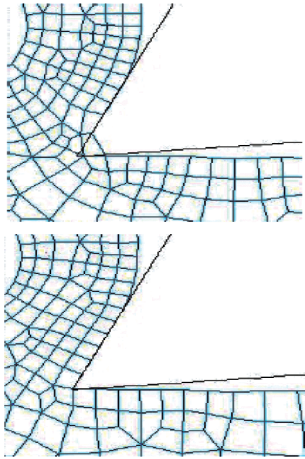
Keadaan sempadan	Benda kerja	Perkakas
Anjakan kekangan dalam X	BC	-
Anjakan kekangan dalam Y	AB-BC	FE-ED
Pertukaran haba dengan persekitaran	AB-BC	FE-ED
Pergerakan mata pemotong	-	- X



RAJAH 1. Gambaran umum bagi FEM untuk simulasi pemotongan ortogon dengan menggunakan DEFORM 2D

penjaringan apabila ia mencapai satu nilai kerosakan genting (Halil 2003). Rajah 2 menunjukkan peringkat unsur dipadamkan sepanjang simulasi pemotongan.

Geseran antaramuka sadak mata pemotong dan serpihan adalah menggunakan model geseran ricih dan faktor geseran adalah antara 0.2 dan 0.7 untuk melihat kesan geseran pada proses pemboleh ubah (Halil 2003).



RAJAH 2. Kesan unsur yang rosak dipadamkan melalui penjaringan di DEFORM 2D

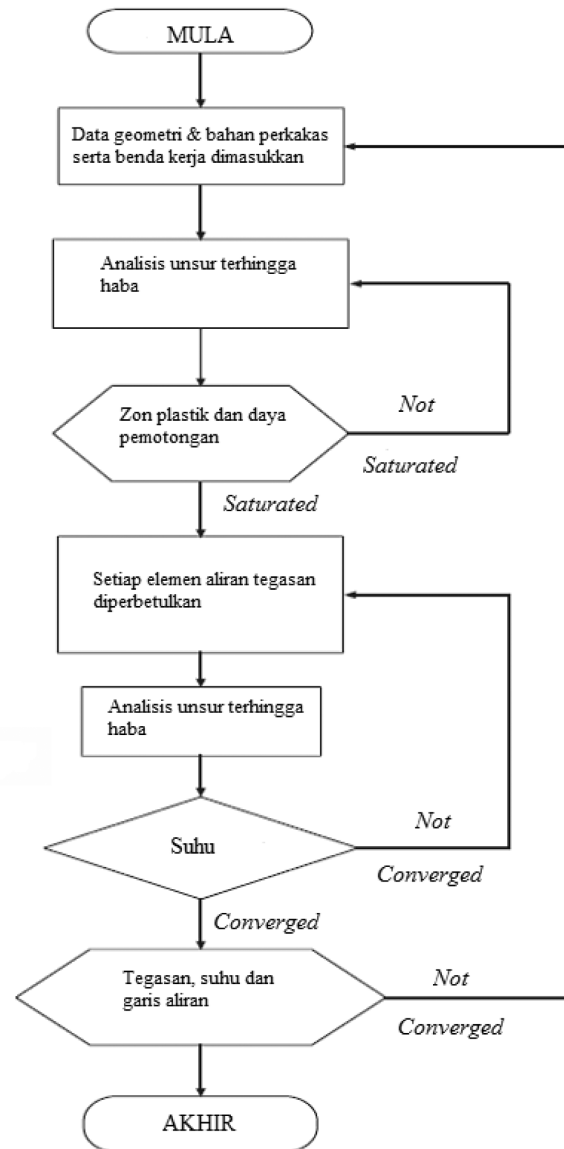
KAEDAH SIMULASI

Simulasi pemotongan ortogon dijalankan di dalam keadaan jejari hujung mata pemotong adalah tetap iaitu $R = 0.4$ mm. Setiap simulasi dijalankan sebanyak dua kali untuk memastikan keputusan yang diperolehi boleh dipercayai. Kaedah analisis unsur terhingga digunakan dalam simulasi pemotongan seperti yang ditunjukkan dalam carta alir pada Rajah 3.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Keputusan simulasi uji kaji ditunjukkan dalam Jadual 5. Jadual tersebut menunjukkan semua parameter pemesinan yang digunakan iaitu kelajuan pemotongan, kadar suapan, kedalaman pemotongan dan suhu angin sejuk pada sudut sadak dan sudut kelegaan yang telah ditetapkan. Sifat ciri lebih kecil lebih baik (LB) dipilih untuk menganalisis hasil daya pemotongan, taburan tegasan dan taburan suhu. Kaedah reka bentuk uji kaji klasik adalah terlalu kompleks dan bukan mudah digunakan. Untuk menyelesaikan masalah ini, kaedah Taguchi menggunakan pendekatan yang khusus iaitu reka bentuk uji kaji dalam tatasusunan ortogon bagi mengkaji keseluruhan parameter dengan bilangan uji kaji yang kecil (Thamizhmanii et al 2007).

Kaedah Taguchi adalah berdasarkan nisbah isyarat - hinggar (S/N) untuk menjumlahkan perubahan sekarang dan bergantung pada sifat-sifat yang tertentu. S/N dikira mengikut jangkaan yang diharapkan iaitu terdiri daripada 'lebih kecil adalah lebih baik' (LB), 'nominal adalah



RAJAH 3. Kaedah analisis unsur terhingga

terbaik' (NB) dan 'lebih besar adalah lebih baik' (HB). Jadual 5 menunjukkan hasil pengiraan nisbah S/N yang didapati daripada persamaan (1) (Park 1996) bagi nisbah S/N daya pemotongan, suhu pemotongan dan taburan tegasan untuk setiap uji kaji.

$$S/N_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right). \quad (1)$$

Sifat kualiti lebih kecil adalah lebih baik dipilih untuk menganalisis keputusan daya pemotongan dalam operasi pemesinan. Ini adalah kerana daya pemotongan yang kecil diperlukan untuk menghasilkan kekemasan permukaan yang baik serta meminimumkan haus mata pemotong (Jaharah et al. 2004).

Rajah 4 menunjukkan kesan parameter pemboleh ubah pemotongan terhadap daya pemotongan. Didapati kadar

JADUAL 5. Keputusan simulasi untuk daya, suhu dan tegasan serta nisbah S/N

No. Uji kaji	Daya (N)	Nisbah S/N daya pemotongan	Tegasan (MPa)	Nisbah S/N tegasan
1	356	-51.03	608	-55.68
2	410	-52.26	548	-54.78
3	292	-49.31	606	-55.65
4	366	-51.27	571	-55.13
5	433	-52.73	532	-54.52
6	260	-48.30	680	-56.65
7	378	-51.55	587	-55.37
8	431	-52.69	564	-55.03
9	259	-48.27	645	-56.19

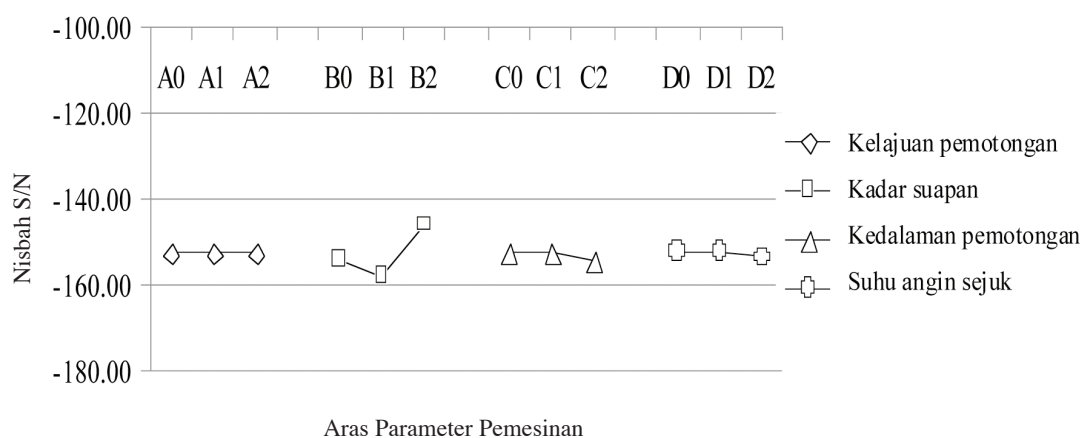
suapan mempunyai kecerunan relatif yang paling tinggi dan menunjukkan parameter yang paling penting dalam mempengaruhi daya pemotongan. Daripada kajian literatur dapat dinyatakan bahawa serpihan menjadi lebih besar apabila kadar suapan meningkat (Shaw 1984; Trent 1995). Ini bermakna lebih banyak bahan kerja akan dipotong pada setiap putaran maka semakin banyak tenaga yang diperlukan. Penglibatan tenaga yang besar menyebabkan berlakunya mampatan yang tinggi antara mata pemotong dan benda kerja dan mengakibatkan ubah bentuk plastik yang tinggi ke atas kawasan pemotongan. Kelakuan ini menyebabkan daya pemotongan meningkat. Pemerhatian ini selari dengan dapatan Escalona et al. (2005) dalam kajiannya ke atas bahan AISI 52100 menggunakan perisian DEFORM 2D, iaitu kelajuan pemotongan paling kurang memberi kesan ke atas daya pemotongan. Merujuk kepada Rajah 4, didapati daya pemotongan adalah hampir malar terhadap kelajuan pemotongan. Ini menunjukkan daya pemotongan yang tinggi adalah berkaitan dengan luas sentuhan yang besar. Luas kawasan sentuhan yang besar menunjukkan lebih daya pemotongan diperlukan manakala luas kawasan sentuhan yang kecil menunjukkan kurang daya pemotongan diperlukan di kawasan tersebut. Secara teorinya, daya pemotongan yang tinggi diperlukan untuk menghasilkan serpihan yang mempunyai luas kawasan

sentuh yang besar, sudut satah ricih yang kecil dan sangat tebal. Kajian sebelumnya menunjukkan bahawa kelajuan pemotongan tidak banyak mempengaruhi daya pemotongan berbanding dengan pemboleh ubah pemotongan yang lain seperti kadar suapan, kedalaman pemotongan dan jejari muncung mata pemotong (Escalona et al. 2005).

Analisis Pareto ANOVA dalam Jadual 6 menunjukkan faktor yang mempengaruhi daya pemotongan ialah kadar suapan menyumbang kepada peratus pengaruh yang paling tinggi iaitu 96.12%. Kedalaman pemotongan mempunyai peratus pengaruh sebanyak 2.54%, diikuti dengan suhu pemotongan 1.28% dan kelajuan pemotongan sebanyak 0.06%.

Dalam proses pelarikan, nilai parameter pemotongan yang tinggi bukan sahaja menawarkan peningkatan produktiviti tetapi juga mengakibatkan risiko kemerosotan dalam kualiti permukaan dan hayat mata pemotong (Abukhshim et al. 2005). Kemerosotan pada kualiti permukaan semasa pelarikan berkait rapat dengan perkembangan haus perkakas.

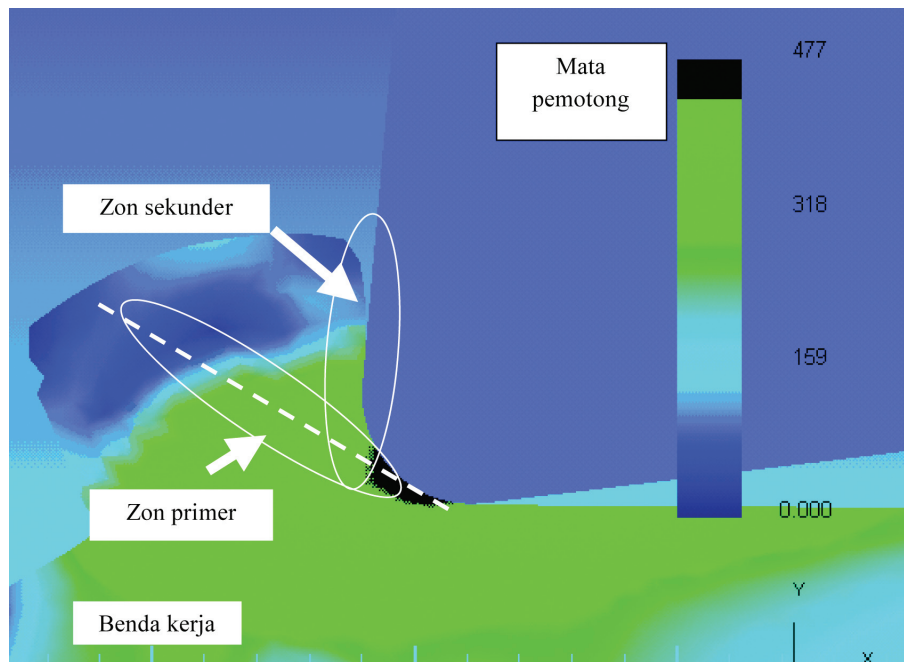
Penelitian Rajah 5, secara umumnya diperhatikan nilai tegasan maksimum berlaku dalam zon ubah bentuk primer dan tegasan didapati semakin berkurangan di zon sekunder. Daya pemotongan yang bertindak ke atas perkakas dengan sudut sadak yang kecil mengenakan tegasan yang tinggi ke



RAJAH 4. Plot nisbah S/N untuk daya pemotongan

JADUAL 6. Pareto ANOVA untuk analisis daya pemotongan ($\alpha = 5^{\circ}$, $\beta = 7^{\circ}$)

Faktor dan hubungan	Aras	Kelajuan pemotongan (db)	Kadar suapan (db)	Kedalaman pemotongan (db)	Suhu angin sejuk (db)
Jumlah pada faktor	0	-152.59	-153.85	-152.02	-152.02
	1	-152.30	-157.67	-151.79	-152.10
	2	-152.51	-145.87	-153.59	-153.27
Jumlah kuasa dua (S)		0.14	217.53	5.74	2.90
Peratus pengaruh (%)		0.06	96.12	2.54	1.28

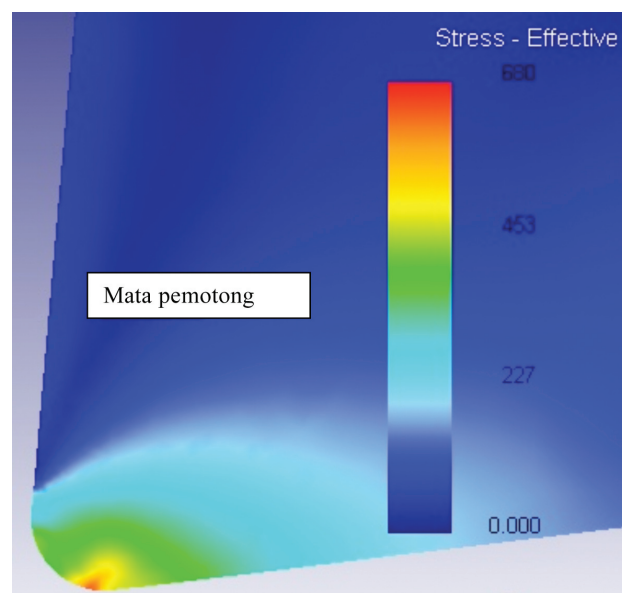


RAJAH 5. Agihan tegasan pada permukaan benda kerja dan serpihan

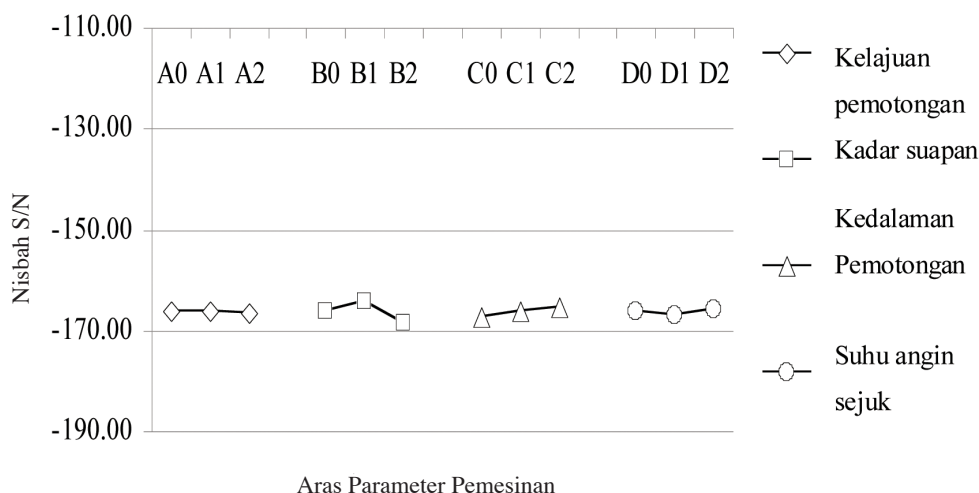
atas muka sadak yang sebahagian besarnya dalam keadaan mampatan. Menurut Escalona et al. (2005), ricihan benda kerja di sepanjang zon primer menunjukkan wujud tegasan maksimum.

Daripada analisis Rajah 6, secara amnya diperhatikan bahawa kecerunan tegasan mampatan adalah maksimum terutama di kawasan hidung pinggir pemotong dan menurun ke sifar di tempat serpihan terputus sentuhan dengan perkakas. Menurut Lo (2000), tegasan normal dan tegasan efektif bertindak pada pinggir mata pemotong, pengurangan tegasan tersebut berlaku apabila terdapat peningkatan sudut sadak daripada nilai sadak negatif kepada sudut sadak positif.

Rajah 7 menunjukkan plot bagi kesan utama setiap paras pemboleh ubah parameter pemotongan yang terlibat terhadap nilai nisbah S/N bagi tegasan yang dialami oleh mata pemotong. Berdasarkan Rajah 7 didapati kadar suapan memberikan kesan yang paling mendalam kepada tegasan mata pemotong. Manakala parameter pemotongan yang lain seperti kelajuan pemotongan,



RAJAH 6. Agihan tegasan pada pinggir mata pemotong



RAJAH 7. Plot nisbah S/N untuk tegasan pemotongan, lebih kecil lebih baik ($\alpha = 5^\circ, \beta = 7^\circ$)

kedalaman pemotongan dan suhu angin sejuk kurang memberi kesan ke atas tegasan mata pemotong. Secara teorinya diketahui bahawa serpihan menjadi lebih besar apabila kadar suapan meningkat. Ini bermakna lebih banyak bahan kerja yang dipotong pada setiap putaran maka semakin luas kawasan sentuhan antara mata pemotong dan serpihan. Luas kawasan sentuhan adalah berkait rapat dengan tegasan pemotongan. Manakala tegasan pemotongan adalah berkait rapat dengan daya pemotongan. Lebih luas kawasan sentuhan lebih tenaga yang diberikan menyebabkan berlakunya mampatan yang tinggi antara mata pemotong dan benda kerja dan mengakibatkan ubah bentuk plastik yang tinggi ke atas kawasan pemotongan. Kelakuan ini menyebabkan tegasan pemotongan meningkat. Walau bagaimanapun, Boothroyd dan Knight (2005) membuat kesimpulan bahawa pengaruh keadaan pemotongan ke atas tegasan sentuhan adalah kecil.

Analisis ANOVA dijalankan untuk meneliti pengaruh setiap parameter pemotongan yang digunakan. Berdasarkan Jadual 7, kadar suapan mempunyai peratus pengaruh yang paling tinggi iaitu 78.87%, kedalaman pemotongan 15.58%, suhu mempunyai peratus pengaruh 4.48% dan diikuti oleh kelajuan pemotongan sebanyak 1.08%.

KESIMPULAN

Secara keseluruhannya, kajian ini telah membuktikan bahawa simulasi proses pemotongan besi tuang mulur dengan mata pemotong karbida dan menggunakan parameter pemotongan yang berbeza mempengaruhi kesan kepada daya pemotongan dan tegasan pemotongan semasa proses pemotongan dilakukan. Simulasi mendapati daya pemotongan mata pemotong paling dipengaruhi oleh kadar suapan pemotongan (96.12%), kedalaman pemotongan (2.54%), suhu angin sejuk (1.28%) dan kelajuan pemotongan (0.06%). Manakala taburan tegasan pemotongan paling dipengaruhi oleh kadar suapan (7.87%), kedalaman pemotongan (15.58%) dan suhu angin sejuk (4.48%) serta kelajuan pemotongan (1.08%). Parameter optimum untuk daya pemotongan ialah pada kadar suapan 0.35 mm/pus, kedalaman pemotongan 0.5 mm, suhu angin sejuk 2°C dan kelajuan pemotongan 200 m/min. Parameter optimum untuk tegasan pemotongan pula ialah pada kadar suapan 0.25 mm/pus, kedalaman pemotongan 0.8 mm, suhu angin sejuk 25°C dan kelajuan pemotongan 100 m/min. Umumnya nilai tegasan maksimum berlaku dalam zon ubah bentuk primer dan semakin berkurangan di zon sekunder. Suhu angin sejuk didapati kurang memberi kesan terhadap daya mata pemotong.

JADUAL 7. Pareto ANOVA untuk analisis tegasan pemotongan ($\alpha = 5^\circ, \beta = 7^\circ$)

Faktor dan hubungan	Aras	Kelajuan pemotongan (db)	Kadar suapan (db)	Kedalaman pemotongan (db)	Suhu (db)
Jumlah pada faktor	0	-166.10	-166.18	-167.35	-166.39
	1	-166.30	-164.32	-166.10	-166.80
	2	-166.59	-168.49	-165.54	-165.81
Jumlah kuasa dua (S)		0.36	26.20	5.17	1.49
Kadar pengaruh (%)		1.08	78.87	15.58	4.48

RUJUKAN

- Abukhshim, N.A., Mativenga, P.T. & Sheikh, M.A. 2005. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46: 782-800.
- Boothroyd, G. & Knight, W. 2005. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. New York.
- Escalona, P.M., Melkote, S. & Li, K. 2005. Influence of the stress, strain and temperature on the surface roughness of an AISI 52100 steel due to an orthogonal cut. *JMEPEG* 14: 582-590.
- Gunay, M., Korkut, I., Aslan, E. & Seker, U. 2005. Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force. *Journal of Materials Processing Technology* 166: 44-49.
- Halil, B. 2003. Simulation of orthogonal metal cutting by finite element analysis. MSc Thesis. The Middle East Technical University. (unpublished).
- Jaharah, A., Ghani, I.A. & Choudhury, H.H. 2004. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameter. *Journal of Materials Processing Technology* 145: 84-92.
- Korkut, I. & Donertas, M.A. 2007. The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling. *Materials and Design* 28(1): 308-312.
- Lo, S.P. 2000. An analysis of cutting under different rake angles using the finite element method. *Journal of Material Processing Technology* 164: 47-53.
- Park, S.H. 1996. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*. Chapman and Hall.
- Shaw, M.C. 1984. *Metal Cutting Principles*. New York: Oxford University Press.
- Shunmugam, M.S., Bhaskara Reddy, S.V. & Narendran T.T. 2000. Selection of optimal conditions in multi-pass face-milling using GA. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40: 401-414.
- Tandon, V., El-Mounayri, H. & Kishawy, H. 2002. NC end milling optimization using evolutionary computation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42: 595-605.
- Thamizhmanii, S. Saparudin, S. & Hasan, S. 2007. Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 20: 1-2.
- Trent, E.M. 1995. *Pemotongan Logam*. Penterjemah, Abu Abdullah. Kuala Lumpur: Dewan Bahasa dan Pustaka.
- Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi
Malaysia
- *Pengarang untuk surat-menyurat; email: jaharah@eng.ukm.my
- Diserahkan: 13 Februari 2012
Diterima: 6 Ogos 2012