

# STUDI PARAMETER PEMESINAN OPTIMUM PADA OPERASI CNC END MILLING SURFACE FINISH BAHAN ALUMINIUM

**Handoko<sup>1)</sup>, B. Tulung Prayoga<sup>2)</sup>**

Program Diploma Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada<sup>1,2)</sup>  
Jl. Yacaranda Sekip Unit IV, Yogyakarta, Telepon (0274) 649130, Fax. (0274) 580990  
E-mail : hanformal@yahoo.com<sup>1)</sup>, Beni\_d3@yahoo.com<sup>2)</sup>

## Abstrak

*Operator mesin perkakas hingga kini masih dihadapkan pada masalah penentuan parameter pemesinan seperti cutting speed, feedrate dan depth of cut yang optimum terutama pada operasi finishing. Lewat penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa tolok ukur parameter optimal suatu operasi pemesinan. Operasi pemesinan yang dipilih adalah proses end milling surface finish dengan mesin CNC Denford FANUC.*

*Pengujian dilakukan dengan memotong permukaan datar balok aluminium pada lima variasi putaran spindle, tiga variasi depth of cut dan lima variasi feedrate. Setiap spesimen yang telah dikerjakan diukur kekasaran permukaannya ( $R_a$ ). Efektifitas variasi proses pemesinan yang dipilih ditentukan dengan menghitung MRR (Material Removal Rate) sebagai tolok ukur produktifitas.*

*Dari data – data yang telah diperoleh selanjutnya dianalisa dengan multiple regression untuk mendapatkan model matematis dari proses pemesinan yang dilakukan. Model ini memberikan gambaran kuantitatif untuk pemilihan variasi optimum yang menghasilkan kualitas permukaan cukup baik ( $N_6$  dan  $N_7$ ) ditambah upaya evaluasi untuk mempertahankan produktifitas. Persamaan dari model adalah  $R_a = 2,5362 - 0,0011n + 0,0025f - 0,0123t$  dengan kesesuaian terhadap data hasil pengujian sebesar 66,02 %.*

*Kata Kunci : end milling, surface roughness, multiple regression.*

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Upaya penelitian dibidang operasi mesin perkakas telah dimulai pada awal abad 19 oleh F.W. Taylor yang melakukan eksperimen selama 26 tahun dengan lebih dari 30.000 eksperimen dan menghasilkan 400 ton geram (Jerard *et al*, 2001). Tujuan utama Taylor adalah menghasilkan solusi sederhana atas permasalahan intrisik dalam menentukan kondisi pemotongan yang aman dan efisien. Taylor percaya bahwa solusi tersebut secara empiris dapat diselesaikan kurang dari setengah menit oleh mekanik yang handal lewat pengalaman mereka. Masalahnya adalah bahwa para mekanik tersebut meskipun sanggup bekerja dengan memuaskan namun kesulitan menularkan pengetahuannya secara sistematis dan kuantitatif kepada orang lain. Hingga saat ini ketika mengoperasikan mesin – mesin perkakas, operator seringkali hanya menggunakan estimasi atau *trial and error* dalam memilih besaran *cutting speed*, *feedrate* dan *depth of cut*, padahal besaran tersebut berpengaruh terhadap kualitas hasil pemesinan serta produktifitas. Dengan demikian diperlukan upaya untuk meneliti nilai optimum dari

beragam tipe operasi mesin perkakas yang banyak dipakai. Salah satunya adalah operasi *end milling*. Operasi ini terutama yang menggunakan mesin CNC semakin memberikan beragam pilihan besaran parameter dalam kode numeriknya. Operator perlu mendapatkan informasi kuantitatif korelasi antar parameter untuk menghasilkan kualitas *surface finish* yang baik.

### Tinjauan Pustaka

Yang dan Chen (2001) menggunakan metode Taguchi untuk merancang prosedur sistematis agar diperoleh parameter yang menghasilkan performa pemesinan optimal serta proses kendali mutu operasi mesin frais. Mesin yang digunakan adalah Fadal VMC-40 *vertical milling* dengan pahat HSS empat *flute* dan bahan aluminium 6061. Parameter optimum yang dihasilkan berupa *depth of cut* = 0,2 inch (0,5 mm), *spindle speed* = 5000 rpm, *feedrate* = 10 inch/menit (254 mm/menit) dan *tool diameter* = 0,75 inch (19 mm) dengan interval keyakinan sebesar 95 % serta rata – rata kekasaran permukaan = 23  $\mu$  inch. Lebih spesifik pada topik operasi *surface finish*, Lou *et al* (1998) membuat prediksi atas kekasaran permukaan aluminium 6061.

Mesin yang digunakan Fadal CNC *End Milling*. Hasil prediksinya berada pada akurasi 90,29 % untuk *training data* dan 90,03 % untuk *testing data*. Ditinjau dari parameter pemesinan, diketahui lewat uji statistik bahwa *feedrate* memegang peranan kunci dalam menghasilkan *surface roughness* pada operasi *end milling* yang diteliti.

Pada pemantauan output secara *in process* yaitu saat proses pemesinan sedang berlangsung, Huang dan Chen (2001) telah melakukannya untuk operasi mesin bubut CNC. Selain parameter pemesinan seperti yang diteliti oleh Yang dan Chen, mereka menambahkan informasi getaran mesin yang diperoleh dari *accelerator* (PCB356B08 Piezotronics). Mesin bubut yang digunakan adalah Enterprise 1500 buatan Mysore Kirloskar (India) pada bahan 6061 T2. Huang dan Chen juga melaporkan bahwa tanpa data vibrasi mesin, akurasi prediksi dengan *multiple regression* berkurang sekitar 1,5 %.

Mengenai bagaimana tekstur permukaan benda kerja dihasilkan, Ryu *et al* (2006) mempelajarinya untuk operasi *flat end milling*. Alas dari pahat *flat end mill* memiliki *end cutting edge angle* yang menentukan pola tekstur permukaan selain parameter pemesinan. Seperti halnya hasil penelitian Lou, diperoleh hasil bahwa *feedrate* merupakan parameter pemesinan yang penting. Namun Ryu *et al* menjelaskan lebih detail dengan menunjukkan bahwa operasi *end milling* pada *feedrate* rendah dan pemotongan tebal masih lebih baik dalam menghasilkan tekstur permukaan daripada operasi yang menggunakan *feedrate* tinggi tetapi lewat pemotongan tipis.

### Tujuan Penelitian

Memberikan kontribusi ilmiah kepada komunitas industri berupa tolok ukur parameter optimal operasi pemesinan *surface finish* dengan *end milling* CNC pada bahan paduan AISi. Parameter yang digunakan adalah *cutting speed*, *feedrate* dan *depth of cut*. Metode penentuan parameter optimum menggunakan metode statistik *multiple regression*.

### Dasar Teori

Seringkali menjadi tidak realistis ketika menyimpulkan sesuatu hanya berdasarkan satu faktor penyebab. Dalam situasi tersebut, peneliti harus dengan cermat mengidentifikasi faktor – faktor lain dan melibatkannya secara eksplisit kedalam sebuah persamaan misalnya model regresi linier (Linear Regression Model, LRM). Pada aplikasinya untuk operasi pemesinan dengan tiga faktor penyebab (*spindle speed*, *feedrate* dan *depth of cut*) maka persamaan interaksi ketiga faktor tersebut adalah:

$$R_a = \alpha_i + \beta_1.n_i + \beta_2.f_i + \beta_3.t_i \quad (1)$$

dengan:  $R_a$  = kekasaran permukaan ( $\mu\text{m}$ )

$n_i$  = putaran *spindle* (rpm)

$f_i$  = *feedrate* (mm/menit)

$$t_i = \text{depth of cut (mm)}$$

Variabel  $R_a$  sering disebut sebagai *response*, output atau variabel dependen sedangkan  $n$ ,  $f$  dan  $t$  merupakan *predictor*, input, *independent variables* atau *explanatory variables*. Jika terdapat lebih dari satu output maka disebut persamaan *multivariate multiple regression*.

Seberapa baik sebuah model akan sesuai dengan data pengujian? Salah satu jawaban dari pertanyaan tersebut adalah menggunakan tolok ukur kuantitatif *coefficient of determination*, disimbolkan sebagai  $R^2$  (*R Square*).

Dengan nilai  $0 \leq R^2 \leq 1$ , sebuah model akan sempurna ketika nilai  $R^2 = 1$ . Namun analisa yang hati – hati amat diperlukan untuk model dengan  $R^2$  tinggi tanpa *intercept* ( $\alpha_i$  pada persamaan 1). Sebaiknya tidak membandingkan model tanpa *intercept* dengan model yang memiliki *intercept*. Seberapa baik nilai  $R^2$  tergantung pada bidang studi yang ditekuni. Untuk data dengan variabel – variabel yang korelasinya lemah serta terlalu banyak *noise*, angka 0,6 sudah memadai (Faraway, J.J., 2002).

### CARA PENELITIAN

Pengujian dilakukan dengan memotong permukaan datar balok paduan AISi pada variabel pemesinan berupa lima variasi putaran *spindle*, tiga variasi *depth of cut* dan lima variasi *feedrate* (total = 75 variasi) menggunakan mesin CNC Denford FANUC *Milling* dan pahat HSS *end mill* empat *flute* diameter 16 mm. Kemudian setiap spesimen yang telah dikerjakan diukur kekasaran permukaannya menggunakan *profilometer*. Pengujian kekasaran permukaan dilakukan menurut standar ISO, terbagi dalam kelas – kelas kekasaran dengan panjang sampel yang sesuai (Tabel 1).

Tabel 1. Kelas kekasaran permukaan menurut ISO (Rochim, 2001, p.62)

Ra ( $\mu\text{m}$ )	Kelas kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12,5	N10	2,5
6,3	N9	
3,2	N8	0,8
1,6	N7	
0,8	N6	
0,4	N5	
0,2	N4	0,25
0,1	N3	
0,05	N2	
0,025	N1	0,08

Tolok ukur produktifitas proses pemesinan ditentukan dengan menghitung MRR (*Material Removal Rate*). Semakin tinggi nilai MRR semakin produktif operasi pemesinan tersebut.

Dari data – data yang telah diperoleh selanjutnya dianalisa secara statistik untuk menentukan model matematis *multiple regression* dari proses pemesinan yang dilakukan. Pemodelan tersebut dilakukan pada 75

*training data* sesuai dengan total jumlah variasi. Perangkat lunak yang digunakan adalah "R" versi 2.7.2 (*open source*) sebagai *core* dari perangkat lunak "Multiple Regression (v1.0.26) in Free Statistics Software (v1.1.23-r3)" sebagai *front end* dengan pengembangan algoritma oleh Wessa (2008). Model ini akan memberikan gambaran kuantitatif untuk pemilihan variasi optimum yang menghasilkan kualitas permukaan cukup baik tanpa mengorbankan produktifitas.

### HASIL PENELITIAN

Hasil pengujian untuk 75 variasi menunjukkan kelas kekasaran permukaan yang berhasil diraih adalah N6, N7 dan N8. Sebanyak 81,33% dari total spesimen uji berada pada kelas N6 dan N7. Setelah dilakukan komputasi statistik untuk seluruh data, diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 2. Multiple Linear Regression : Least Squares

Variabel	Parameter	Standard Error	T-STAT		
			H0:parameter=0	2-tail p-value	1-tail p-value
Intercept	2,5362	0,2666	9,5102	0	0
n	-0,0011	0,0001	-7,9389	0	0
f	0,0025	0,0003	8,6532	0	0
t	-0,0123	0,0990	-0,1238	0,9018	0,4509

Berdasarkan Tabel 2 dapat ditentukan bahwa *Estimated Regression Equation* untuk seluruh *training data* adalah:

$$R_a = 2,5362 - 0,0011n + 0,0025f - 0,0123t \quad (2)$$

dengan statistik regresi dan residu sebesar (Tabel 3):

Tabel 3. Multiple Linear Regression : Regression and Residual Statistics

No.	Statistik Regresi dan Residu	Nilai
1.	Multiple R	0,8125
2.	R Square	0,6602
3.	Adjusted R Square	0,6458
4.	Standard Error	0,3502
5.	Observations	75
6.	Residual Standard Deviation	0,3502
7.	Sum Squared Residuals	8,7058

Hasil olah data dengan ANOVA (*analysis of variance*) adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Tes ANOVAberbasis R versi 2.7.2

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	16,9113	5,6371

Residual	71	8,7058	0,1226
Total	74	25,6172	
F Test	45,9731		
Significance F	1,3x10-16		

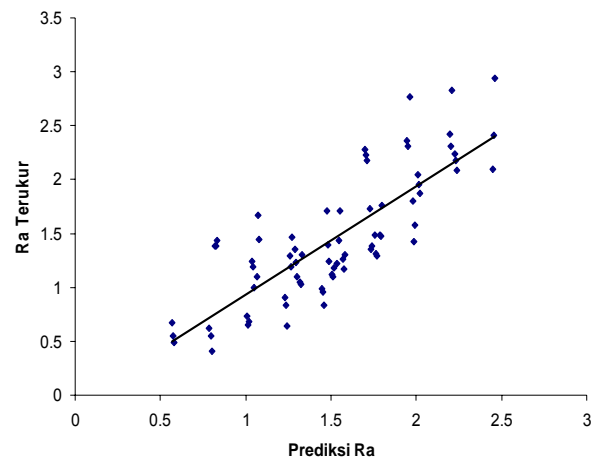
Berikutnya Tabel 5 menunjukkan hasil meta-analisa dari tes Goldfeld-Quandt untuk mendeteksi heteroskedasis.

Tabel 5. Meta Analysis of Goldfeld-Quandt test for Heteroskedasticity

Deskripsi	# significant tests	% significant tests	OK / NOK
1% type I error level	7	0.11290323	NOK
5% type I error level	19	0.30645161	NOK
10% type I error level	30	0.48387097	NOK

### PEMBAHASAN

Hasil olah data *multiple regression* berupa sebuah model matematik yang diharapkan dapat memprediksi kekasaran permukaan. Model tersebut sebagaimana dijabarkan pada persamaan (2) dapat dinyatakan secara grafis sebagai berikut:



Gambar 1. Perbandingan antara data uji (Ra terukur) dengan prediksi model regresi.

Dari Tabel 3 diketahui bahwa nilai *Multiple R* sebesar 0,8125 dan  $R^2 = 0,6602$ . Data tersebut mengindikasikan bahwa koefisien korelasi antara variabel dependen *Ra* dengan prediksi (berdasarkan model regresi) kurang tinggi (Lou, *et al*, 1998). Model masih kurang sesuai dengan sebaran data. Hanya 66,02 % dari data hasil pengujian yang nilainya sesuai dengan prediksi. Dengan demikian pada penelitian selanjutnya dibutuhkan upaya prediksi menggunakan metode

lainnya yang secara statistik akan menghasilkan  $R^2$  lebih tinggi. Prediksi dapat juga diperbaiki dengan menambahkan variabel lain yang dianggap berperan terhadap kualitas *surface finish* seperti getaran mesin ke dalam model regresi.

Pada tes ANOVA, nilai  $F Test = 5,6371 / 0,1226 = 45,9731$  dapat dikatakan cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa semua prediktor yang menunjang persamaan regresi memiliki signifikansi yang cukup kuat terhadap output ( $Ra$ ). Dalam nilai  $F Test$  ini, Yang dan Chen (2001) mencoba menambahkan variabel diameter pahat. Ternyata pengaruh diameter pahat terhadap  $Ra$  dapat diabaikan yang mereka buktikan lewat nilai  $F Test$  yang cukup rendah.

Hasil meta-analisa tes Goldfeld-Quandt (Tabel 5) menunjukkan tidak adanya heteroskedasis. Artinya asumsi yang biasa dilakukan pada *least square* bahwa *error* terdistribusi secara identik (*constant variance*) dapat diterima (heteroskedasis menggugurkan asumsi tersebut).

Berdasarkan produktifitasnya, hasil pekerjaan *surface finish* pada penelitian ini dibagi kedalam dua kelas yang diterima yaitu kelas yang memenuhi standar N6 ( $Ra$  maksimum =  $0,8 \mu m$ ) dan standar N7 ( $Ra$  maksimum =  $1,6 \mu m$ ) sebagai berikut:

Tabel 5. Produktifitas yang memenuhi standar kualitas kekasaran permukaan N6

MRR $\frac{mm^3}{menit}$	Ra ( $\mu m$ )	N6	n	f	t
2400	0,6226	accept	1800	100	1,5
2400	0,6688	accept	2000	100	1,5
2400	0,7291	accept	1600	100	1,5
1600	0,5479	accept	2000	100	1
1600	0,5507	accept	1800	100	1
1600	0,6477	accept	1600	100	1
800	0,4082	accept	1800	100	0,5
800	0,4913	accept	2000	100	0,5
800	0,6406	accept	1400	100	0,5
800	0,6801	accept	1600	100	0,5

Hanya 10 data (13,33 % data) yang memenuhi syarat kelas N6. Tabel 5 sekaligus membuktikan pernyataan Ryu *et al* (2006) mengenai pentingnya peran dan nilai rendah dari *feedrate*.

Pada kelas yang lebih rendah, ada 51 data (68 % data) memenuhi syarat kelas N7 (Tabel 6). Produktifitas tertinggi dapat diraih pada *feedrate* = 500 mm/menit, *depth of cut* = 1,5 mm serta *spindle speed* = 1800 hingga 2000 rpm.

Tabel 6. Produktifitas yang memenuhi standar kualitas kekasaran permukaan N7

MRR $\frac{mm^3}{menit}$	Ra ( $\mu m$ )	N6	n	f	t
800	0,4082	accept	1800	100	0,5
800	0,4913	accept	2000	100	0,5
800	0,6406	accept	1400	100	0,5
800	0,6801	accept	1600	100	0,5
800	0,8384	accept	1200	100	0,5
1600	0,5479	accept	2000	100	1
1600	0,5507	accept	1800	100	1
1600	0,6477	accept	1600	100	1
1600	0,8387	accept	1400	100	1
1600	0,9514	accept	1200	100	1
1600	0,9956	accept	1800	200	0,5
1600	1,2407	accept	1400	200	0,5
1600	1,4367	accept	2000	200	0,5
1600	1,4667	accept	1600	200	0,5
2400	0,6226	accept	1800	100	1,5
2400	0,6688	accept	2000	100	1,5
2400	0,7291	accept	1600	100	1,5
2400	0,9103	accept	1400	100	1,5
2400	0,9823	accept	1200	100	1,5
2400	1,1006	accept	1800	300	0,5
2400	1,1847	accept	1600	300	0,5
2400	1,3787	accept	1400	300	0,5
2400	1,4423	accept	2000	300	0,5
3200	1,1890	accept	1800	200	1
3200	1,1927	accept	1600	200	1
3200	1,2907	accept	1600	400	0,5
3200	1,3040	accept	2000	400	0,5
3200	1,3830	accept	2000	200	1
3200	1,3893	accept	1400	200	1
3200	1,5733	accept	1400	400	0,5
4000	1,3007	accept	2000	500	0,5
4800	1,0960	accept	1600	300	1
4800	1,2317	accept	1800	300	1
4800	1,2433	accept	1800	200	1,5
4800	1,2957	accept	1600	200	1,5
4800	1,3513	accept	1400	300	1
4800	1,3810	accept	2000	200	1,5
6400	1,0315	accept	2000	400	1
6400	1,3133	accept	1600	400	1
6400	1,4210	accept	1400	400	1
6400	1,4387	accept	1800	400	1
7200	1,0973	accept	2000	300	1,5
7200	1,1240	accept	1600	300	1,5
7200	1,3510	accept	1800	300	1,5

Tabel 6. Produktifitas yang memenuhi standar kualitas kekasaran permukaan N7 (lanjutan)

$\frac{mm^3}{MRR( menit )}$	Ra ( $\mu m$ )	N6	n	f	t
8000	1,1733	accept	2000	500	1
8000	1,4740	accept	1800	500	1
9600	1,0437	accept	2000	400	1,5
9600	1,2210	accept	1800	400	1,5
9600	1,4863	accept	1600	400	1,5
12000	1,2660	accept	2000	500	1,5
12000	1,4813	accept	1800	500	1,5

### KESIMPULAN

1. Kekasaran permukaan ( $R_a$ ) terbukti tergantung pada *spindle speed* ( $n$ ), *feedrate* ( $f$ ) serta *depth of cut* ( $t$ ).
2. Model *linear multiple regression* untuk pemotongan *flat end mill* 16 mm pada bahan AISi dengan pahat HSS empat *flute* adalah:  

$$R_a = 2,5362 - 0,0011n + 0,0025f - 0,0123t$$
3. Model tersebut masih kurang sesuai dengan data pengujian ( $R^2 = 0,6602$ ) sehingga perlu dicoba model lain yang menghasilkan  $R^2$  lebih tinggi.
4. Untuk mendapatkan kekasaran permukaan N6, gunakan *feedrate* rendah (100 mm/menit).
5. Tanpa mengorbankan kekasaran permukaan N7, produktifitas tertinggi dapat diraih pada *feedrate* = 500 mm/menit, *depth of cut* = 1,5 mm serta *spindle speed* = 1800 – 2000 rpm.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Supriyadi atas bantuan operasional mesin CNC dan Lilik Dwi Setyana, ST, MT atas penyediaan fasilitas penelitian di Laboratorium Metrologi, Program Diploma Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Terima kasih juga disampaikan kepada The R Foundation for Statistical Computing sebagai pengembang perangkat lunak *open source* statistik yaitu R versi 2.7.2 serta kepada Prof. dr. P. Wessa (Resa R&D - Office for Research, Development, and Education) yang mengembangkan algoritma perangkat lunak Multiple Regression (v1.0.26) in Free Statistics Software (v1.1.23-r3) pada *server* <http://www.wessa.net/> sebagai *front end* komputasi statistik.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Faraway, J.J., 2002, *Practical Regression and Anova using R*, <http://www.stat.lsa.umich.edu/~faraway/book>
- [2] Huang, L., Chen, J.C., 2001, A Multiple Regression Model to Predict In-process Surface Roughness in Turning Operation Via Accelerometer, *Journal of Industrial technology*,

- Vol. 17, No. 2, February to April 2001, [www.nait.org](http://www.nait.org).
- [3] Jerard, R.B., et al., 2001, Online Optimization of Cutting Conditions for NC Machining, 2001 NSF Design, *Manufacturing and Industrial Innovation Research Conference*, January 7-10 2001, Tampa, Florida.
  - [4] Lou, Mike S., et al., 1998, Surface Roughness Prediction Technique For CNC End Milling, *Journal of Industrial Technology* Vol. 15, No. 1.
  - [5] Rochim, T., 2001, *Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Penerbit ITB, Bandung.
  - [6] Ryu, S.H., et al., 2006, Roughness and Texture Generation on End Milled Surfaces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006), pp. 404–412, Elsevier Ltd.
  - [7] The R Development Core Team, 2006, , *An Introduction to R, Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics* Version 2.8.0 (2008-10-20), ISBN 3-900051-12-7.
  - [8] The R Development Core Team, 2003, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Reference Index Version 2.8.0 (2008-10-20), ISBN 3-900051-07-0, The R Foundation for Statistical Computing.
  - [9] Wessa, P., 2008, , *Free Statistics Software*, Office for Research Development and Education, version 1.1.23-r3, <http://www.wessa.net>
  - [10] Yang, J.L., Chen, J.C., 2001, A Systematic Approach for Identifying Optimum Surface Roughness Performance in End Milling Operations, *Journal of Industrial technology*, Vol. 17, No. 2, February to April 2001, <http://www.nait.org>