

OPTIMASI PROSES SIDE MILLING DENGAN KARAKTERISTIK MULTIRESPON MENGGUNAKAN WEIGHTED PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS (WPCA) DAN METODE TAGUCHI

Laily Ulfiyah^a, Bobby O. P. Soepangkat^b, Bambang Pramujati^b

^a*Mahasiswa Program Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri,*

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

^b*Laboratorium Proses Manufaktur Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri,*

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Kampus ITS Keputih Sukolilo Surabaya 60111 Jawa Timur Indonesia

Email: lee_4wi@yahoo.com^a, bobs_1994@me.its.ac.id^b, pramujati@me.its.ac.id^b

Abstract

This paper presents the optimization of the side milling process of Al 6061, with multiple performance characteristics based on the orthogonal array with Taguchi method and Weighted Principal Component Analysis (WPCA). The experimental studies were conducted under varying side milling process variables, i.e., main axis of rotation, feed rate and radial depth of cut. The optimized multiple performance characteristics were surface roughness and tool wear. Weighted Principal Component Analysis (WPCA) has been applied to eliminate response correlation and to convert correlated responses into equal or less number of uncorrelated quality indices called principal components. Based on individual principal components a Multi-Response Performance Index (MPI) has been introduced to derive an equivalent single objective function which has been optimized (maximized) using Taguchi method. Since main axis of rotation, feed rate and radial depth of cut had three levels, the experiment design used L₉ orthogonal array with replication. The quality characteristics of surface roughness and tool wear were smaller-is-better. Optimal result has been verified by confirmatory test. Experimental results have shown that machining performance in the side milling process can be improved effectively through this method. The side milling process variables which significantly affected surface roughness and tool wear are main axis of rotation and feed rate.

Key words: *surface roughness, side milling, tool wear, Taguchi method, Weighted Principal Component Analysis (WPCA).*

Pendahuluan

Proses freis (*milling*) dalam industri manufaktur merupakan salah satu proses yang digunakan dalam pemotongan logam. Secara umum proses freis terdiri dari *slab milling*, *face milling* dan *end milling* (Kalpakjian, 2001). *End milling* sendiri dalam prosesnya diklasifikasikan dalam *side milling*, *face milling*, *slot milling*, *plunging*, *diagonal plunging*, *pocketing* dan *helical interpolation*.

End mill merupakan pahat yang diperlukan dalam proses *end milling*, dimana logam dihilangkan oleh gigi-gigi dari pahat yang berputar. Lebih kurang 30% penggunaan dari proses *end milling* memanfaatkan *HSS* (*High Speed Steel*) *end mill* (Thomas, 2005). *End milling* banyak digunakan untuk melakukan proses pemesinan paduan Al 6061 pada pembuatan rangka konstruksi, piston motor, blok mesin, *valve* dan *silinder head* motor bakar.

Pada proses pemesinan, selain dimensi produk, kekasaran permukaan benda kerja juga merupakan salah satu karakteristik kualitas yang kritis (*Critical*

to Quality Characteristics/CTQ) untuk menunjukkan hasil proses pemesinan. Secara khusus, kekasaran permukaan benda kerja memegang peranan penting pada kualitas produk dan merupakan salah satu parameter yang penting untuk mengevaluasi keakurasiannya dari hasil proses pemesinan (Petropoulos, dkk. 2009). Selain itu, pengukuran keausan pahat (*tool wear*) juga diperlukan, karena dalam proses pemesinan harga produksi banyak dipengaruhi oleh penggunaan pahat.

Banyak penelitian yang menunjukkan bahwa kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong aksial (*axial depth of cut*), kedalaman potong radial (*radial depth of cut*) serta sudut *end mill* memiliki pengaruh terhadap kekasaran permukaan benda kerja dan keausan pahat. Berdasarkan hasil penelitiannya Hascalik dan Caydas (2007), parameter pemesinan yang paling mempengaruhi kekasaran permukaan benda kerja pada proses bubut material paduan Ti-6Al-4V adalah gerak makan. Aslan (2006) dan Gaitonde (2009) melakukan penelitian dengan menggunakan panjang keausan tepi pahat sebagai

respon tujuan untuk pemodelan proses maupun penentuan *machinability*.

Pada proses pemesinan, penentuan kombinasi parameter proses yang tepat untuk mencapai respon yang optimum sangat penting untuk dilakukan secara efektif. Hal ini bertujuan untuk mengurangi proses coba-coba sehingga waktu dan biaya proses pemesinan dapat diminimalkan. Selain pengaruh parameter proses terhadap respon, penentuan kombinasi parameter untuk mencapai respon yang optimum telah menjadi fokus penelitian pada proses pemesinan.

Beberapa penelitian dilakukan dengan menggunakan optimasi yang berbeda-beda untuk menentukan parameter pemesinan yang diinginkan. Metode Taguchi dan *grey-fuzzy logics* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengoptimalkan proses *side milling* dengan multi karakteristik respon (Lu dkk., 2008).

Oktem, dkk. (2005) menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dan *Genetic Algorithm* (GA) untuk melakukan optimasi pada proses *side milling* material Al 7075-T6 dengan *end mill PVD AlTiN coated carbide* berdiameter 10 mm. Hasil optimasi menunjukkan adanya penurunan kekasaran permukaan dari 0,412 μm pada saat sebelum optimasi menjadi 0,375 μm pada saat setelah optimasi. Penurunan kekasaran permukaan benda kerja yang terjadi adalah kurang lebih 10%.

Dari beberapa tinjauan pustaka yang telah disebutkan, diketahui bahwa penelitian hanya dilakukan untuk melihat hubungan antara variabel-variabel proses terhadap beberapa karakteristik proses *side milling*. Selain itu diasumsikan juga bahwa tidak ada korelasi antara respon-respon. masing-masing karakteristik respon, independen satu sama lain yaitu mereka tidak berkorelasi. Tetapi dalam praktiknya asumsi tersebut mungkin tidak selalu berlaku, bahkan kemungkinan optimasi satu respon dapat menyebabkan kerugian terhadap respon lainnya. Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menentukan pengaturan variabel-variabel proses *side milling* yang tepat agar dapat meminimalkan kekasaran permukaan dan keausan pahat serta mengetahui hubungan antar respon tersebut. Variabel-variabel proses yang diamati adalah putaran poros utama, kecepatan makan, dan kedalaman pemakanan radial. Metode yang digunakan adalah metode *Weighted Principal Component Analysis* (WPCA) dan digabungkan dengan metode Taguchi.

Metode *Weighted Principal Component Analysis* (WPCA) digunakan untuk menghilangkan korelasi antar respon dan untuk mengubah respon berkorelasi menjadi indeks respon *uncorrelated* yang disebut dengan komponen utama (*principal components*) (Datta dan Mahapatra, 2011).

Komponen utama yang berbeda masing-masing memiliki nilai variansi atau komponen utama adalah *independent* satu sama lain, oleh karena itu untuk menghasilkan nilai variansi total maka masing-masing variansi dari komponen utama dianggap atau digunakan sebagai bobot. Komponen-komponen utama diakumulasi lebih dahulu untuk menghitung indeks kinerja multi-response (*Multi-Response Performance Index/ MPI*). Selanjutnya, suatu nilai dari kerugian kualitas gabungan (*Combined Quality Loss/CQL*) yang didefinisikan sebagai penyimpangan nilai MPI dari nilai ideal yang diinginkan. CQL ini berfungsi sebagai suatu fungsi respon tunggal dengan tujuan untuk mengurangi korelasi antar respon pada proses. Choudhury dkk. (2010), telah menggunakan metode ini, dengan jenis karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik.

Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

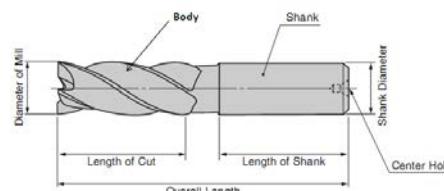
Bahan Eksperimen

1. Benda Kerja

Material benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah material aluminium jenis 6061. Material ini memiliki dimensi 35 x 35 x 80 mm dan kekerasannya adalah 20 BHN.

2. Pahat

Pahat *end mill* yang digunakan dalam penelitian ini adalah HSS NACHI seri 6230, yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pahat tersebut mempunyai dua mata potong, berdiameter 10 mm dan memiliki panjang keseluruhan 75 mm.



Gambar 1. Pahat End Mill

3. Mesin freis CNC

Mesin freis CNC yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin freis yang terdapat di Laboratorium Proses Manufaktur Teknik Mesin ITS. Adapun spesifikasinya adalah sebagai berikut:

- a. Jenis Mesin : VERTICAL VMC-200
- b. Pembuat Produk : EMCO
- c. Kontrol : Emco Tronic
- d. Jumlah sumbu : 3
- e. Sumbu gerak X : 420 mm
- f. Sumbu gerak Y : 330 mm
- g. Sumbu gerak Z : 400 mm
- h. Tool Stations : 12
- i. Spindles : 1
- j. Motor Power : 10 kw

- k. *Spindle Speed* : 4500 rpm
4. Peralatan Ukur
- Measurescope* untuk mengukur panjang keausan tipe pahat (VB).
 - Surface Roughness Tester*, untuk mengetahui angka kekasaran permukaan benda kerja.
 - Peralatan bantu lainnya, yaitu mistar ingsut, meja rata dan *U-block*.

Rancangan Eksperimen

Penentuan variabel proses pada mesin freis CNC dilakukan dengan merujuk kepada rekomendasi NACHI *cutting tools* untuk pengrajinan aluminium 6061. Selain itu penentuan variabel proses juga didasarkan pada penelitian-penelitian sebelumnya, sedangkan proses *end milling* yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah *down milling* dengan model pengrajinan *side milling* untuk penggunaan *roughing*.

Variabel-variabel yang digunakan untuk mendapatkan data eksperimen adalah sebagai berikut:

1. Variabel bebas

Varibel bebas dan level-levelnya ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Bebas dan Pengaturan Level-levelnya

Variabdal bebas			level 1	level 2	level 3
A.	Putaran poros utama (n)	rpm	750	1500	2250
B.	Kecepatan makan (V_f)	mm/min	150	300	450
C.	Kedalaman pemakanan radial (a_r)	mm	1,5	2,5	3,5

2. Variabel respon

Variabel respon pada penelitian ini adalah:

- Keausan pahat (VB, μm).
- Kekasaran permukaan benda kerja (R_a , μm).

3. Variabel konstan.

Variabel proses *freis* yang nilainya konstan dalam penelitian ini adalah:

- Kedalaman potong aksial (a_a) sebesar 5 mm.
- Waktu pemotongan selama 20 menit.

Variabel respon yang meliputi kekasaran permukaan benda kerja dan keausan pahat memiliki karakteristik kualitas respon semakin kecil semakin baik (*smaller is better*). Hal ini berarti bahwa nilai kekasaran permukaan benda kerja serta keausan pahat

minimum adalah yang paling diinginkan.

Berdasarkan banyaknya variabel bebas dan jumlah level yang ditunjukkan pada Tabel 1, didapatkan 6 derajat kebebasan untuk rancangan eksperimen ini, sehingga matriks ortogonal yang digunakan adalah $L_9(3^4)$. Matriks ortogonal jenis L_9 memiliki 4 kolom dan 9 baris yang mampu digunakan untuk empat buah variabel bebas yang masing-masing memiliki 3 level. Rancangan eksperimen berdasarkan matriks orthogonal untuk penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

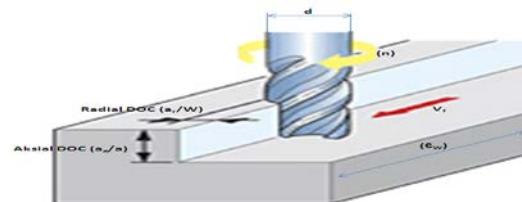
Tabel 2. Rancangan Eksperimen $L_9(3^4)$

Perc. Ke-	Variabel Proses		
	N	V_f	a_r
1	750	150	1.5
2	750	300	2.5
3	750	450	3.5
4	1500	150	2.5
5	1500	300	3.5
6	1500	450	1.5
7	2250	150	3.5
8	2250	300	1.5
9	2250	450	2.5

Skema Numerik

Perhitungan Variabel Proses Pemesinan

Pelaksanaan eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan variabel proses yang terdapat pada mesin freis CNC VERTICAL VMC-200 yaitu putaran poros utama (n), kecepatan makan (V_f) dan kedalaman pemakanan radial (a_r), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses *End Milling*

Variabel-variabel proses tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut (Rochim, 1993).

- Gerak makan gigi (mm/gigi)

$$f_z = V_f / (z n) \quad (1)$$

- Kecepatan pemakanan

$$V_f = n \cdot f_z \cdot z \quad (\text{mm/menit}) \quad (2)$$

- Putaran poros utama

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} \quad (\text{rpm}) \quad (3)$$

- Waktu pemotongan (menit)

$$t_p = \frac{L_p}{V_p} \quad (4)$$

Dengan: $L_p = L_w L_n + L_n$ mm,

$$L_w \geq \sqrt{\alpha(d-\alpha)} ;$$

untuk menge-freis datar

$$L_w \geq 0; \text{ untuk menge-freis tegak}$$

$$L_n \geq 0; \text{ untuk menge-freis datar}$$

$$L_n = d/2; \text{ untuk menge-freis tegak}$$

Weighted Principal Component Analysis (WPCA)

Tahapan analisa dengan metode *Weighted Principal Component Analysis* (WPCA) adalah sebagai berikut:

1. Melakukan normalisasi terhadap respon atau karakteristik kualitas dengan menggunakan persamaan berikut (Datta dkk., 2011):

- a. Semakin Kecil Semakin Baik

$$X_i^*(k) = \frac{\min X_i(k)}{X_i(k)} \quad (5)$$

- b. Semakin Besar Semakin Baik

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k)}{\max X_i(k)} \quad (6)$$

- c. Nominal-the-best

$$X_i^*(k) = \frac{\min \{X_i(k), X_{0b}(k)\}}{\max \{X_i(k), X_{0b}(k)\}} \quad (7)$$

Dengan:

$$i = 1, 2, \dots, m;$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

i adalah banyaknya baris pada matriks orthogonal dan k adalah banyaknya respon pada percobaan. $X_i^*(k)$ adalah data yang dinormalisasi dari respon k pada urutan hasil percobaan i . Setelah data respon dinormalisasi nilai $X_i^*(k)$ akan berada diantara 0 dan 1. Nilai maksimum dari $X_i^*(k)$ adalah 1 dan dianggap sebagai kondisi ideal.

2. Menentukan ada tidaknya korelasi antar respon dengan menghitung nilai korelasi *Pearson* (ρ). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut (Sunaryo, 2012):

$$\rho_{jk} = \frac{\text{Cov}(Q_j, Q_k)}{\sigma_{Q_j} \times \sigma_{Q_k}} \quad (8)$$

$$Q_i = \{X_0^*(i), X_1^*(i), X_2^*(i), \dots, X_m^*(i)\}$$

Dengan:

$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\begin{array}{ll} j & \neq k \\ i & = 1, 2, \dots, n \end{array} \quad (2.5)$$

Penentuan ada tidaknya korelasi dilakukan dengan hipotesa sebagai berikut:

$$H_0: \rho_{jk} = 0$$

$$H_1: \rho_{jk} \neq 0$$

Jika $t_{\text{hitung}} > |t_{\text{tabel}}|$ pada α tertentu maka tolak H_0 (tidak ada korelasi antar respon).

3. Menghitung *Principal Components Analysis* (PCA) dari masing-masing respon penelitian. Untuk melakukan PCA, terlebih dahulu dihitung nilai *principal component* dengan menggunakan persamaan berikut (Choudhury dkk., 2010):

$$Z_j = \sum_{i=1}^p a_{ji} Y_i \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^p a_{ji}^2 = 1$$

Dengan: $j = 1, \dots, k$
 a adalah *eigen factor*.

4. Menghitung nilai *multi-response performance index* (MPI) dengan menggunakan persamaan berikut (Choudhury dkk., 2010):

$$\text{MPI} = \sum_{j=1}^k W_j Z_j, \quad (10)$$

Dengan: W adalah akuntabilitas proporsi yang digunakan sebagai bobot prioritas individual.

5. Menghitung nilai *Combined Quality Loss* (CQL) dengan menghitung selisih absolut antara nilai MPI pada kondisi ideal dengan nilai MPI dari data respon.

Perhitungan Rasio S/N

Dalam metode Taguchi, fungsi kerugian (*loss function*) didefinisikan sebagai fungsi yang digunakan untuk menghitung deviasi antara nilai eksperimen dan nilai yang diinginkan.

Rasio S/N digunakan untuk memilih nilai level faktor terbesar untuk mengoptimalkan karakteristik kualitas dari eksperimen. Perhitungan nilai rasio S/N berdasarkan jenis karakteristik kualitas dari masing-masing respon adalah sebagai berikut (Soejanto, 2009):

- 1) Semakin kecil semakin baik

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right] \quad (11)$$

2) Tertuju pada nilai tertentu

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n} \right] \quad (12)$$

3) Semakin besar semakin baik

$$S/N = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{(1/y_i^2)}{n} \right] \quad (13)$$

Hasil dan Pembahasan

Data hasil eksperimen ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Hasil Eksperimen

Percobaan Ke-	Kekasaran Permukaan (μm)		Keausan Pahat (μm)	
	1	2	1	2
1	0,38	0,39	0,03	0,03
2	1,71	1,61	0,227	0,22
3	2,21	2,25	0,34	0,342
4	0,39	0,39	0,026	0,03
5	0,83	0,79	0,037	0,038
6	1,3	1,27	0,133	0,134
7	0,25	0,28	0,03	0,03
8	0,71	0,72	0,045	0,048
9	0,94	0,95	0,063	0,06

Data respon dari eksperimen dinormalisasi terlebih dahulu sesuai dengan jenis karakteristik kualitas masing-masing respon, yaitu semakin kecil semakin baik dengan menggunakan persamaan 5. Dalam penelitian ini jumlah baris pada matriks orthogonal (i) adalah sebanyak $m = 9$, dan banyaknya respon (k) adalah sebanyak $n = 2$. Hasil normalisasi dari dua respon ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Normalisasi Respon

Percobaan ke-	Xi^*Ra	Xi^*VB
Kondisi ideal	1.000	1.000
1	1.453	1.071
2	6.264	7.982
3	8.415	12.179
4	1.472	1.000
5	3.057	1.339
6	4.849	4.759
7	1.000	1.071
8	2.698	1.661
9	3.566	2.196

Setelah dilakukan normalisasi data respon pada kondisi ideal, selanjutnya dilakukan pemeriksaan adanya korelasi atau tidak antar respon dengan menggunakan persamaan 8. Nilai korelasi antar

respon sebesar 0.961. Tabel 5 menunjukkan koefisien korelasi Pearson antar respon. Pada semua kasus, nilai koefisien korelasi non-nol menunjukkan bahwa ada korelasi diantara semua respon. Nilai korelasi sebesar 0.961 menunjukkan adanya korelasi diantara kekasaran permukaan benda kerja dan keausan pahat. Untuk mengurangi bahkan menghilangkan korelasi antar respon tersebut diterapkan *principal component* (*PCA*). Tabel 6 menunjukkan hasil dari *PCA*.

Tabel 5. Koefisien Korelasi Pearson

Variabel	Pearson's correlation	
	PC 1	PC 2
Xi^*Ra	0.707	0.707
Xi^*VB	0.707	-0.707

Tabel 6. Hasil dari *PCA*

	Z1	Z2
Eigenvalue	1.9576	0.0424
Proportion	0.979	0.021
Cumulative	0.979	1

Selanjutnya, nilai korelasi antar respon dikonversi menjadi indeks kualitas korelasi yang disebut sebagai komponen utama (*principal component*) sesuai dengan persamaan 9. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 7. Nilai komponen utama ini digunakan untuk menghitung MPI dengan menggunakan persamaan 10. Hasil perhitungan untuk MPI ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. *Principal Components* dan *MPI*

Percobaan ke-	Xi^*Ra	Xi^*VB	Z1	Z2	<i>MPI</i>
Kondisi ideal	1.000	1.000	1.414	0.000	1.384
1	1.453	1.071	1.785	-0.270	1.742
2	6.264	7.982	10.072	1.215	9.886
3	8.415	12.179	14.560	2.661	14.310
4	1.472	1.000	1.747	-0.333	1.704
5	3.057	1.339	3.108	-1.214	3.017
6	4.849	4.759	6.793	-0.064	6.649
7	1.000	1.071	1.465	0.051	1.435
8	2.698	1.661	3.082	-0.733	3.002
9	3.566	2.196	4.074	-0.968	3.968

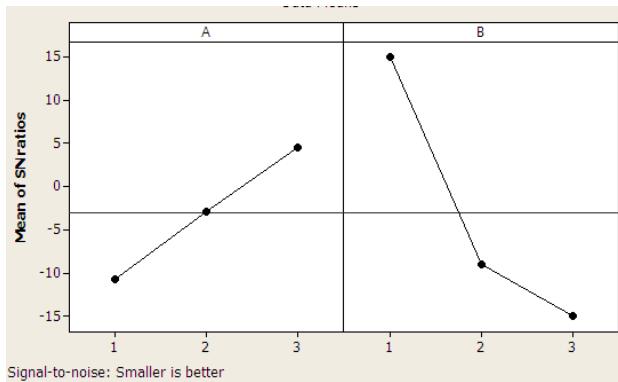
Dari nilai *MPI*, didapatkan nilai *Combined Quality Loss (CQL)* yang didefinisikan sebagai penyimpangan dari nilai ideal yang diinginkan. Selanjutnya CQL diminimalkan dengan cara menghitung rasio S/N dari CQL dengan karakteristik kualitas semakin kecil semakin baik (persamaan 11). Hasil perhitungan nilai rasio S/N ditampilkan pada

Tabel 8 dan plot rasio S/N untuk mengevaluasi seting optimal ditampilkan pada Gambar 3.

Berdasarkan plot rasio S/N didapatkan seting nilai level untuk masing-masing variabel proses yang meminimalkan respon kekasaran permukaan benda kerja dan keausan pahat. Tabel 9 menunjukkan prediksi kombinasi optimal menjadi A(3), B(1). Hasil dari seting optimal telah diverifikasi melalui uji konfirmasi yang menunjukkan peningkatan kinerja mesin pada proses *side milling* berdasarkan hasil yang diprediksi.

Tabel 8. Nilai MPI dan CQL

Percobaan ke-	MPI	CQL	SN
Kondisi Ideal	1.384	0.000	0.000
1	1.742	0.357	8.942
2	9.886	8.502	-18.590
3	14.310	12.926	-22.229
4	1.704	0.319	9.911
5	3.017	1.633	-4.259
6	6.649	5.265	-14.427
7	1.435	0.051	25.934
8	3.002	1.617	-4.176
9	3.968	2.584	-8.245



Gambar 3. Plot Rasio S/N untuk Mengevaluasi Seting Optimal

Tabel 9. Kombinasi Variabel Proses untuk Respon Optimum

Variabel Proses	Tingkatan Level	Nilai Level
Putaran poros utama (A)	Level 3	2250 rpm
Kecepatan makan (B)	Level 1	150 mm/min

Perbandingan antara hasil prediksi dan eksperimen ditunjukkan pada Tabel

10. Hasil prediksi dari nilai rasio S/N untuk CQL adalah 22.448, sedangkan dalam eksperimen nilai rasio S/N adalah 22.824. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan kualitas dengan menggunakan seting optimal yang dilakukan pada penelitian ini.

Tabel 10. Perbandingan hasil Prediksi dan Eksperimen Konfirmasi

Level Faktor	Prediksi	Konfirmasi
	A(3), B(1)	A(3), B(1)
Rasio S/N	22.448	22.824

Kesimpulan

Besarnya kekasaran permukaan dan keausan pahat hasil proses *side milling* tergantung pada variabel proses, yaitu putaran poros utama, kecepatan pemakanan, dan kedalaman potong radial. Penelitian ini menghasilkan pengaturan variabel-variabel proses yang tepat agar dapat menghasilkan kekasaran permukaan benda kerja dan keausan pahat yang minimal. Hal tersebut diperoleh pada pengaturan variabel proses putaran poros utama sebesar 2250 rpm dan kecepatan makan sebesar 150 mm/min.

Ucapian Terima kasih

Terimakasih kepada Laboratorium Proses Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS) yang telah membantu menyediakan material dan fasilitas pada penelitian ini.

Referensi

- AMME (American Society of Mechanical Engineers). Milling cutter and end mill. United Engineering Centre, ANSI/ASME B94.19 (1985).
- Aslan, E., Necip, C., Burak, B. Design of Optimization of Cutting Parameters when Turning Hardened AISI 4140 Steel (63 HRC) with Al₂O₃ + TiCN Mixed Ceramic Tool. Journal Materials and Design, Vol. 28, pp. 1618–1622 (2007).
- Choudhury, B. S., Datta, S., Sen, R. S., Parametric Optimization of Electroless Ni-P Coating Using Weighted Principal Component Analysis (WPCA) and Taguchi Method. International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 5, Number 4 (2010).
- Datta, S., Mahapatra, S.S. Bead Geometry Optimization of Submerged Arc Weld : Exploration of Weighted Principal Component Analysis (WPCA). 2nd International Conference on Mechanical, Industrial and Manufacturing Technologies (MIMT 2011), Singapore (2011).
- Kalpakjian, S. dan Steven, R.S. Manufacturing

- Processes for Engineering Materials. New Jersey, Prentice Hall (2001).
- Lu, H.S. Chen, J.Y. and Chung, C.T. The Optimal Cutting Parameter Design of Rough Cutting Process in Side Milling. Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering, Vol. 29, pp. 183-186 (2008).
- Oktem, H. Erzurumlu, T. and Kurtaran, H. Application of Respon Surface Methodology in the Optimization of Cutting Conditions for Surface Roughness. Journal of Materials Processsing Technology, Vol. 170, pp. 11-16 (2005).
- Petropoulos, G., Kechagias, J., Akis, V.I., and Maropoulos, S. Surface Roughness Investigation of a Reinforced Polymer Composite. International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems (2009).
- Rochim, T. Teori dan Teknologi Proses Pemesinan. Bandung, Institut Teknologi Bandung (1993).
- Sivasakthivel, P. S., Murugan, V. V., and Sudhakaran, R. Prediction of Tool Wear From Machining Parameters by Response Surface Methodology in End Milling. International Science and Technology, Vol. 2(6), hal. 1780-1789 (2010).
- Soejanto, I. Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi. Graha Ilmu, Yogyakarta. (2009).
- Sunaryo, S. Lecture Notes Taguchi Method Multi Respon (Approach with Principal Component Analisys). ITS (2012).
- Thomas, D. Application of HSS Cutting Tools in the Mechanical Enginering Industry. Paper International HSS Forum Conference Aachen, Germany (2005).