

APLIKASI METODA TAGUCHI UNTUK MENGIDENTIASI KEKASARAN PERMUKAAN DALAM PEMBUBUTAN PADUAN TITANIUM

Gusri Akhyar Ibrahim

Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung
Sati1771@gmail.com

ABSTRACT

Disain parameter Taguchi adalah satu perangkat yang sangat penting untuk mendapatkan disain yang bersifat lebih akurat. Disain Taguchi menawarkan satu pendekatan yang sederhana dan sistematis untuk optimisasi prestasi, kualitas dan biaya operasi. Tujuan dari tulisan ini adalah untuk mengembangkan kajian tentang metoda optimisasi Taguchi untuk nilai kekasaran permukaan dari parameter pemotongan, pada saat membubut Ti-6Al-4V ELI menggunakan pahat sementit karbida dalam keadaan pemesinan kering dan kelajuan tinggi. Parameter pemotongan yang dievaluasi adalah kelajuan potong, suapan, kedalaman potong dan jenis pahat karbida, yang masing-masingnya adalah tiga level. Pemilihan parameter pemotongan ditentukan berdasarkan kepada metoda disain Taguchi. Susunan orthogonal Taguchi dan rasio signal-to-noise (S/N) serta analisis varian (ANOVA) digunakan untuk mendapatkan level yang optimal dan menganalisis pengaruh parameter pemotongan terhadap nilai kekasaran permukaan. Konfirmasi pengujian untuk parameter pemotongan optimal perlu dilakukan agar supaya dapat mengetahui efektifitas metoda optimisasi Taguchi. Oleh karena itu dapat ditunjukkan bahwa metoda Taguchi adalah sangat sesuai untuk menyelesaikan masalah kekasaran permukaan yang berlaku pada saat pemotongan Ti-6Al-4V ELI.

Keywords : Metoda Taguchi , paduan titanium, kekasaran permukaan dan pemesinan kering.

1. Pengenalan

Titanium dan paduan titanium digunakan untuk mesin pesawat dan struktur rangka karena memiliki kekuatan yang baik pada suhu tinggi, tahan patah dan tahan korosi. Paduan ini semakin banyak digunakan di bidang proses kimia, biomedik, otomotif dan industri nuklir [5]. Bagaimanapun, paduan titanium adalah bahan yang sukar dimesin karena memiliki modulus elastisitas rendah, konduktivitas termal rendah dan tingkat reaksi kimia yang tinggi dengan bahan lain. Beberapa karakter daripada bahan mesin pesawat adalah membentuk matrik austenik yang menyebabkan pengerjaan keras berlaku dengan cepat, cenderung meningkatkan kekerasan pada suhu tinggi, cenderung bereaksi dengan bahan pahat di bawah keadaan atmosfer, cenderung membentuk BUE, menimbulkan bahan yang bersifat abrasif pada mikrostruktur dan secara umum mempunyai konduktivitas rendah [4, 2]. Keadaan ini menyebabkan berlakunya pengerjaan dingin semasa pemesinan sehingga merusak kemampu-mesinan paduan titanium [4].

Kualitas disain satu produk dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan kualitas sistem, perencanaan dan proses pembuatan [10,12]. Satu sistem perencanaan

yang kuat adalah satu teknik metodologi untuk mendapatkan produk dan proses dengan meminimalkan gangguan yang dapat merusak kualitas. Dengan demikian keadaan ini dapat menghasilkan kualitas produk yang tinggi dengan pengembangan yang sedikit dan biaya produksi yang rendah [10]. Disain Taguchi parameter adalah satu disain yang penting karena menawarkan disain yang sederhana dan sistematis untuk mengoptimalkan prestasi pahat, kualitas dan biaya. Rasio antara isyarat dan gangguan dan susunan ortogonal adalah faktor penting dalam disain metoda Taguchi. Rasio antara isyarat dan gangguan mampu mengukur kualitas yang bergantung kepada variasi sedangkan susunan ortogonal mampu mengakomodasi beberapa faktor secara simultan [10,11].

Metoda Taguchi menawarkan bahwa kualitas produk diukur dengan karakteristik kualitas seperti nominal lebih baik, lebih kecil lebih baik dan lebih besar lebih baik [10,12]. Ghani et al. [6] melakukan penelitian yaitu memesin paduan titanium menggunakan mesin milling dengan metoda Taguchi. Setelah dianalisis dengan konsep rasio isyarat terhadap gangguan dan analisis varian, diperoleh bahwa kedua pendekatan tersebut memberikan hasil yang hampir sama.



Pemesinan dilakukan pada kecepatan potong 355 m/min, suapan 0.1 mm.gigi dan dalam pemotongan 0.5 mm.

Aplikasi metoda Taguchi untuk mendisain parameter pemesinan dilakukan untuk menentukan keadaan pemesinan yang idial seperti suapan, kecepatan potong dan kombinasi dengan gaya potong. Walaupun, intereaksi antara kadar suapan dengan gaya potong adalah kecil, hasil penelitian menunjukkan bahwa kekasaran permukaan meningkat dengan menurunkan kadar suapan dan membesarkan gaya potong [7]. Peneliti lain juga menunjukkan bahwa metoda Taguchi mampu memberikan hasil yang lebih baik berbanding metoda lain untuk karakteristik parameter yang beragam seperti umur perkakas, gaya potong, kekasaran permukaan dan bahan kerja yang terbuang [9].

Penelitian ini menggambarkan pembubutan Ti-6Al-4V ELI dengan empat faktor pemesinan dan masing-masingnya tiga peringkat. Tujuan utama kajian ini adalah mengembangkan metoda Taguchi untuk mendapatkan keadaan pemotongan yang optimal dalam hal nilai kekasaran permukaan bahan Ti-6Al-4V ELI menggunakan pahat bubut bersalut dan tidak bersalut dalam keadaan pemesinan kering.

2. Metoda Taguchi dan Disain Penelitian

2.1. Metoda Taguchi

Taguchi didefinisikan sebagai pengurangan kualitas produk sehingga mempengaruhi produk sejak proses produksi hingga pengiriman produk ke konsumen [11]. Beberapa kehilangan antaranya disebabkan oleh penyimpangan fungsi dari nilai yang sudah ditargetkan, yang mana ini dinamakan dengan kehilangan yang disebabkan oleh variasi fungsional. Faktor yang tidak bisa dikontrol menyebabkan fungsi karakter produk menyimpang dari target sehingga dinamakan dengan faktor gangguan. Taguchi merumuskan menjadi dua tahapan prosedur optimisasi termasuk ke dalamnya radio isyarat terhadap gangguan yang diberikan oleh kombinasi setiap tingkat parameter. Standar deviasi yang digunakan adalah minimum sehingga menjaga agar nilai rata-rata adalah target [11,12,13]. Implementasi ini dalam sistem teknik ditentukan dengan cara memanipulasi faktor produksi, yang mana dapat dilakukan dalam tiga kategori:

1. Kontrol faktor, yang mempengaruhi proses pada variabel yang diukur dengan cara rasio isyarat terhadap gangguan.
2. Faktor isyarat, yang tidak mempengaruhi rasio S/N atau proses .
3. Faktor, yang tidak mempengaruhi rasio S/N dan proses rerata.

2.2. Experimental details

Pemesinan atau pembubutan dilakukan menggunakan mesin bubut Colchester T4 dalam keadaan kering. Tiga jenis inser yang digunakan adalah

pahat tanpa salutan K313 (WC-Co), pahat bersalut KC9225 (TiN-Al₂O₃-TiCN-TiN) CVD dan KC5010 (TiAlN) PVD. Maksimum aus rusuk diukur setiap satu kali pemesinan, kemudian VB diukur dengan mikroskop. Nilai kekasaran permukaan diukur dengan alat ukur kekasaran permukaan Mahr Perthometer. Pembubutan dilakukan sampai VB mencapai 0.2 mm.

Pengujian dilakukan dengan empat factor dan masing-masingnya tiga level, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Disain factorial yang dipilih adalah susunan orthogonal 27 dengan 20 derajat kebebasan [10]. Hal ini dipilih karena kemampuannya mengecek intereaksi antara faktor sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Faktor dan level yang dipilih dalam pengujian

Faktor	Level		
	0	1	2
A- Kecepatan potong (m/min)	55	75	95
B- Kadar suapan (mm/rev)	0.15	0.25	0.35
C- Dalam pemotongan	0.10	0.15	0.20
D- Jenis pahat	K313	KC9225	KC5010

Tabel 2. Hasil pengujian untuk kekasaran permukaan dan perhitungan rasio S/N

Uji	Faktor				Kode
	A	B	C	D	
1	0	0	0	0	A ₀ B ₀ C ₀ D ₀
2	0	0	1	1	A ₀ B ₀ C ₁ D ₁
3	0	0	2	2	A ₀ B ₀ C ₂ D ₂
4	0	1	0	1	A ₀ B ₁ C ₀ D ₁
5	0	1	1	2	A ₀ B ₁ C ₁ D ₂
6	0	1	2	0	A ₀ B ₁ C ₂ D ₀
7	0	2	0	2	A ₀ B ₂ C ₀ D ₂
8	0	2	1	0	A ₀ B ₂ C ₁ D ₀
9	0	2	2	1	A ₀ B ₂ C ₂ D ₁
10	1	0	0	0	A ₁ B ₀ C ₀ D ₀
11	1	0	1	1	A ₁ B ₀ C ₁ D ₁
12	1	0	2	2	A ₁ B ₀ C ₂ D ₂
13	1	1	0	1	A ₁ B ₁ C ₀ D ₁
14	1	1	1	2	A ₁ B ₁ C ₁ D ₂
15	1	1	2	0	A ₁ B ₁ C ₂ D ₀
16	1	2	0	2	A ₁ B ₂ C ₀ D ₂
17	1	2	1	0	A ₁ B ₂ C ₁ D ₀
18	1	2	2	1	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁
19	2	0	0	0	A ₂ B ₀ C ₀ D ₀
20	2	0	1	1	A ₂ B ₀ C ₁ D ₁
21	2	0	2	2	A ₂ B ₀ C ₂ D ₂
22	2	1	0	1	A ₂ B ₁ C ₀ D ₁
23	2	1	1	2	A ₂ B ₁ C ₁ D ₂
24	2	1	2	0	A ₂ B ₁ C ₂ D ₀
25	2	2	0	2	A ₂ B ₂ C ₀ D ₂
26	2	2	1	0	A ₂ B ₂ C ₁ D ₀
27	2	2	2	1	A ₂ B ₂ C ₂ D ₁

3. Hasil Penelitian dan Diskusi



3.1 Rasio isyarat terhadap gangguan (S/N)

Dalam metoda Taguchi, isyarat mewakili nilai yang dikehendaki untuk sifat keluaran sedangkan gangguan mewakili nilai yang tidak dikehendaki. Taguchi menggunakan rasio S/N untuk mengukur penyimpangan karakteristik kualitas daripada nilai yang dikehendaki. Data pengujian untuk nilai kekasaran permukaan dan nilai rasio S/N ditunjukkan pada Tabel 3. Nilai rasio S/N untuk kekasaran permukaan dihitung berdasarkan kepada kaedah lebih kecil lebih baik [12,13].

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} (\sum y^2) \quad (1)$$

Tabel 3 menunjukkan data aktual kekasaran permukaan dan nilai S/N di dalam susunan orthogonal L27. Masing-masing faktor A, B, C dan D diletakkan pada kolom 1, 2, 5 dan 9 secara berurutan. Intereaksi antara faktor kecepatan potong dan suapan adalah AxB, antara kecepatan potong dan dalam pemotongan AxC dan antara suapan dan dalam pemotongan BxC, masing-masing diletakkan pada kolom 3, 6 dan 8.

Tabel 3. Hasil pengujian untuk kekasaran permukaan dan rasio S/N .

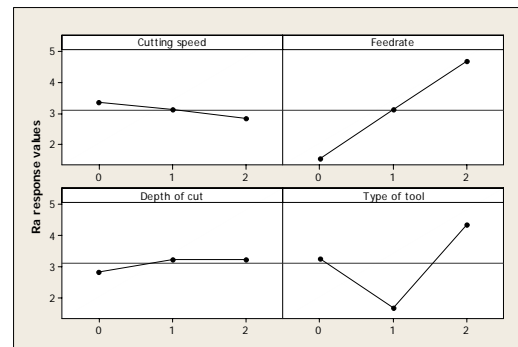
No uji	Kode	Kekasaran permukaan R_a (μm)	Rasio S/N
1	A ₀ B ₀ C ₀ D ₀	1.71	-4.66
2	A ₀ B ₀ C ₁ D ₁	1.17	-1.364
3	A ₀ B ₀ C ₂ D ₂	2.50	-7.959
4	A ₀ B ₁ C ₀ D ₁	1.09	-0.749
5	A ₀ B ₁ C ₁ D ₂	4.94	-13.875
6	A ₀ B ₁ C ₂ D ₀	3.48	-10.832
7	A ₀ B ₂ C ₀ D ₂	6.01	-15.578
8	A ₀ B ₂ C ₁ D ₀	6.49	-16.245
9	A ₀ B ₂ C ₂ D ₁	2.82	-9.067
10	A ₁ B ₀ C ₀ D ₀	0.53	5.514
11	A ₁ B ₀ C ₁ D ₁	1.56	-3.863
12	A ₁ B ₀ C ₂ D ₂	1.44	-3.168
13	A ₁ B ₁ C ₀ D ₁	4.67	-13.387
14	A ₁ B ₁ C ₁ D ₂	3.02	-9.601
15	A ₁ B ₁ C ₂ D ₀	0.97	0.264
16	A ₁ B ₂ C ₀ D ₂	3.94	-11.91
17	A ₁ B ₂ C ₁ D ₀	2.56	-8.165
18	A ₁ B ₂ C ₂ D ₁	6.19	-15.834
19	A ₂ B ₀ C ₀ D ₀	2.02	-6.108
20	A ₂ B ₀ C ₁ D ₁	1.73	-4.761
21	A ₂ B ₀ C ₂ D ₂	1.10	-0.828
22	A ₂ B ₁ C ₀ D ₁	3.56	-11.029
23	A ₂ B ₁ C ₁ D ₂	2.37	-7.495
24	A ₂ B ₁ C ₂ D ₀	4.31	-12.69
25	A ₂ B ₂ C ₀ D ₂	1.29	-2.212
26	A ₂ B ₂ C ₁ D ₀	4.26	-12.589
27	A ₂ B ₂ C ₂ D ₁	5.20	-14.321

3.2 Analisis varian (anova)

Taguchi merekomendasikan bahwa menganalisis data menggunakan rasio S/N memberikan keuntungan yaitu memberikan nilai optimum dengan variasi yang sedikit. Nilai rata-rata yang diperoleh adalah mendekati nilai target [12]. Hasil pengujian dianalisis dengan cara mengecek kesan utama faktor terhadap nilai kekasaran permukaan, sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai rata-rata rasio S/N setiap level dihitung berdasarkan kepada nilai pada Tabel 1 dan perbedaan nilai rasion S/N antara maksimum dan minimum juga ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 4. Ra respon untuk nilai kekasaran permukaan s

Level	Kec. potong	Suapan	Dalam pemot.	Jenis pahat
0	3.357	1.529	2.828	3.283
1	3.118	3.122	3.241	1.677
2	2.850	4.673	3.256	4.364
Delta	0.507	3.144	0.428	2.688
Rank	3	1	4	2

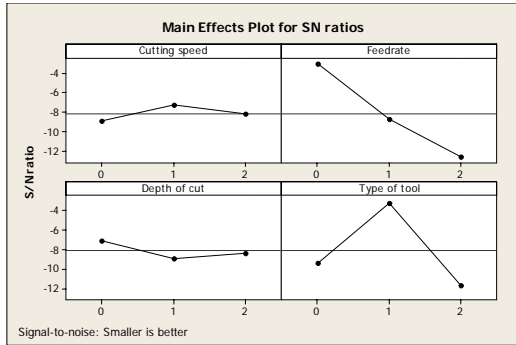


Gambar 2. Grafik Ra respon untuk nilai kekasaran permukaan s

Tabel 5. S/N respon untuk nilai kekasaran permukaan

Level	Kec. Potong	Suapan	Dalam pemot.	Jenis pahat
0	-8.918	-3.022	-7.063	-9.403
1	-7.221	-8.757	-8.961	-3.252
2	-8.213	-12.574	-8.329	-11.697
Delta	1.697	9.553	1.897	8.445
Rank	4	1	3	2





Gambar 3. Grafik kesan nilai S/N parameter terhadap kekasaran permukaan

Kadar suapan dan jenis pahat adalah dua faktor yang memberikan nilai delta paling besar, masing-masingnya adalah 9.553 dan 8.445. Berdasarkan prediksi Taguchi bahwa perbedaan nilai terbesar memberikan kesan yang lebih signifikan. Karena itu dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatkan kadar suapan dapat menurunkan nilai kekasaran permukaan secara signifikan. Selanjutnya, perubahan jari-jari pahat

dapat meningkatkan/menurunkan nilai kekasaran permukaan.

Analisis *anova* dapat menentukan faktor yang paling signifikan daripada semua faktor dan menentukan kesan setiap faktor intereaksi. Tabel 4 menunjukkan nilai signifikan daripada kadar suapan dan jenis pahat, dimana nilai P adalah 0.000. ini berarti bahwa kadar suapan dan jenis pahat memberikan kesan yang sangat signifikan terhadap nilai kekasaran permukaan, yang mana nilai standar signifikannya 0.05. Sebaliknya, kecepatan potong dan dalam pemotongan adalah tidak memberikan kesan yang signifikan. Sedangkan kontribusi kadar suapan dan jenis pahat masing-masingnya adalah 47.146% dan 38.881%. Daripada hasil ini dapat disimpulkan bahwa kadar suapan memberikan kontribusi yang lebih besar berbanding dengan faktor lain. Bhattacharyya [1] menemukan bahwa nilai kekasaran permukaan sangat bergantung kepada kadar suapan dan geometri pahat pemotong. Karena ketiga jenis pahat yang digunakan bergeometri yang berbeda-beda sehingga kesan geometri pahat adalah signifikan terhadap kekasaran permukaan.

Tabel 6. Analisis varian (ANOVA) untuk rasio S/N kekasaran permukaan

No	Faktor	Kode	DF	SS	Varian (V)	F	Persen (P)	Kontribusi P (%)
1	Kecepatan potong	A	2	13.083	6.542	1.36	0.327	1.482
2	Kadar suapan	B	2	416.179	208.089	43.13	0.000	47.146
3	Kecepatan potong x kadar suapan	AxB	4	44.858	11.214	2.32	0.170	5.082
5	Dalam pemotongan	C	2	16.800	8.400	1.74	0.253	1.903
6	Kecepatan potong x dalam pemotongan	AxC	4	5.958	1.490	0.31	0.862	0.675
8	Kadar suapan x dalam pemotongan	BxC	4	13.697	3.424	0.71	0.614	1.552
10	Jenis pahat	D	2	243.223	171.611	35.57	0.000	38.881
	Kesalahan		6	28.949	4.825			3.279
	Total		26					100

Intereaksi antara kecepatan potong dan kadar suapan (AxB), kecepatan potong dan dalam pemotongan (AxC) dan kadar suapan dan dalam pemotongan (BxC) juga signifikan. Nilai signifikannya adalah 0.170 untuk AxB, 0.862 untuk AxC dan 0.614 untuk BxC. Sebagaimana disebutkan oleh Ghani et al. [6] bahwa faktor yang paling memberikan kesan signifikan terhadap kekasaran permukaan adalah kadar suapan semasa memesin bahan mesin pesawat angkasa. Oleh karena itu kualitas kekasaran permukaan bahan yang dimesin dapat dikontrol dengan menentukan kadar suapan yang tepat. Ia juga merekomendasikan untuk mendapatkan permukaan bahan kerja yang dimesin yang halus sangat ditentukan oleh kadar suapan dan kemudian kecepatan potong.

3.3 Penentuan kekasaran permukaan minimum

Menggunakan data yang telah dipaparkan di atas, prestasi kekasaran permukaan dapat diprediksi menggunakan parameter pemesinan dengan perhitunga sebagai berikut;

Prediksi nilai rata-rata untuk kekasaran permukaan minimum.

$$\begin{aligned}
 &= Y + (A2-Y)+(B0-Y)+(C0-Y)+ \\
 &\quad (D-Y) \\
 &= 2.997+(2.850-2.997)+(1.529-2.997)+ (2.828- \\
 &\quad 2.997) + (1.677 - 2.997) \\
 &= 0.107 \mu\text{m}.
 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, rasio S/N maksimum dihitung dengan menentukan apakah nilai kekasaran permukaan



minimum diterima atau tidak. Rasio S/N diprediksi dengan cara sebagai berikut.

Prediksi rasio S/N (maksimum)

$$\begin{aligned} &= \eta + (\eta A1 - \eta) + (\eta B0 - \eta) + (\eta C0 - \eta) + \\ &\quad (\eta D1 - \eta) \\ &= -7.781 + (-7.221 + 7.781) + (-0.022 + 7.781) + (- \\ &\quad 7.063 + 7.781) + (-3.252 + 7.781) \\ &= -3.252 \text{ dB.} \end{aligned}$$

Dimana Y adalah nilai rerata kekasaran permukaan, η adalah nilai rerata rasio S/N. dengan cara prediksi ini, dapat disimpulkan bahwa proses pemesinan menghasilkan nilai kekasaran permukaan paling baik ($R_a = 0.138 \mu\text{m}$). Nilai $R_a = 0.138 \mu\text{m}$ adalah nilai paling kecil dibandingkan dengan nilai pengujian. Konfirmasi daripada pengujian adalah penting untuk memastikan keadaan pemesinan yang optimum. Sebaliknya, keadaan optimum untuk rasio S/N kekasaran permukaan adalah -3.252 dB .

4. Konfirmasi pengujian

Konfirmasi pengujian adalah sangat penting dalam hal disain parameter, khususnya pada tahap penentuan parameter yang memberikan pengaruh atau dapat dilakukan dengan metoda fraksional factorial terkecil. Dalam kajian ini, konfirmasi pengujian dilakukan untuk kondisi optimal adalah (A2B0C0D1). Tujuan konfirmasi pengujian adalah untuk memvalidasi hasil yang diperoleh berdasarkan perhitungan statistik.

4. Kesimpulan

Daripada hasil analisis pembubutan paduan titanium menggunakan konsep rasio S/N dan analisis varian, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Disain metoda Taguchi adalah sesuai untuk menentukan keadaan optimum pemesinan Ti-6Al-4V ELI, dalam hal mendapatkan nilai kekasaran permukaan yang rendah.
2. Konsep rasio S/N dan pendekatan ANOVA untuk data analisis memberikan hasil yang hampir sama.
3. Faktor yang paling signifikan untuk nilai kekasaran permukaan pada masa membubut Ti-6Al-4V ELI adalah kadar suapan dan jenis pahat, yang mana kontribusi masing-masingnya adalah 47.146% dan 38.881%.
4. Kondisi optimum pemesinan untuk mendapatkan nilai kekasaran permukaan yang terbaik adalah pada kecepatan potong 95 m/min, kadar suapan 0.15 mm/rev, dalam pemotongan 0.10 mm dan jenis pahat KC9225.

Daftar Pustaka

- [1] Bhattacharyya, *Metal cutting theory and practice*, New Central Book Agency, Calcutta, 1998.
- [2] Che Haron, C.H., *Tool Life and Surface Integrity in Turning Titanium Alloy*. Journal of Materials Processing and Technology (2001) 231-237.
- [3] Eyup, B. and Aykut, S. 2006. *A Study of Taguchi Optimization Method for Identifying Optimum Surface Roughness in CNC Milling of cobalt-based Alloy*. International Journal Advanced manufacture Technologi. 940-947.
- [4] Ezugwu, E.O., *Key Improvements in The Machining of Difficult-to-Cu Aerospace Superalloys*. International Journal of Machine Tools & Manufacture (2005)1353-1367.
- [5] Ezugwu E.O., Bonney J. and Yamane Y., *An Overview of The Machinability of Aeroengine alloys*. Journal of Material Processing and Technology (2003) 233-253.
- [6] Ghani, J.A., Choudhury, I.A., Hasan, H.H., *Application of Taguchi Method in Optimization of End Milling Parameters*. Journal of Materials Processing Technology (2004) 84-92.
- [7] Liu, C.H., Andrian, C., Chen, C.A., Wang, Y.T., *Grinding Force Control in Automatic Surface Finish System*. Journal of Materials Processing Technology (2005) 367-373.
- [8] Lou, M.S., Chen, J.C. and Li, C., *Surface Roughness Prediction Technique for CNC End-Milling*. Journal Inderscience Technolgy (1998) 1-6.
- [9] Mohan, N.S., Ramachndra, A., Kulkarni, S.M., *Influence of Process Parameters on Cutting Force and Torque During Drilling of Glass-Fiber Polyester reinforce Composite*. Journal of Composite Structures (2005) 407-413.
- [10] Park, S.H., *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*. Chapman & Hall, London, 1996.
- [11] Phadke, M.S., *Quality Engineering Using Design of Experiment, Quality Control, Robust Design and The Taguchi Method*. Wadsworth & Books, California, 1998.
- [12] Ranjit, R., *Design of experiment Using The Taguchi Approach*. John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [13] Ranjit, R., *A Primer on The Taguchi Method*, Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan, 1999.
- [14] Yang, J.L. and Chen, J.C., *A System Approach for Identifying Optimum Surface Roughness Performance in End-Milling Process*. Journal Inderscience Technology (2001)



