

ANALISIS TINGKAT KEKASARAN PERMUKAAN HASIL PROSES MILLING PADA BAJA KARBON S45C DENGAN METODE 3³ DESAIN FAKTORIAL

Herry Syaifullah

Pembuatan Peralataan Dan Perkakas Produksi, Politeknik Manufaktur Astra, Jl. Gaya Motor Raya No. 8, Sunter, 14330, Jakarta Utara

E-mail : herry.syaifullah@polman.astra.ac.id

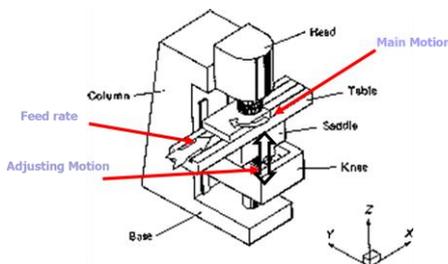
Abstrak-- Dalam menghasilkan produk yang berkualitas industri manufaktur melakukan pengembangan dalam proses produksinya. Bukan hanya dimensi, tingkat kehalusan suatu permukaan memiliki peranan yang sangat penting dalam suatu komponen produk khususnya yang menyangkut masalah gesekan pelumasan, keausan, tahanan terhadap kelelahan dan sebagainya. Namun, produsen suatu alat potong tidak ada yang memuat nilai tingkat kehalusan permukaan yang dihasilkan dari suatu proses pemotongan dengan parameter setting tertentu. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui tingkat kekasaran permukaan hasil proses *milling* terhadap pengaruh variasi putaran spindle (*spindle speed*), kecepatan gerak potong (*feed rate*), dan kedalaman potong (*depth of cut*). Penelitian dilakukan dengan membuat spesimen benda uji dengan material baja karbon S45C menggunakan alat potong (*cutter*) jenis *end mill cutter finishing 4 flute* dan proses pemotongan dilakukan pada mesin *milling*.

Kata Kunci : Kekasaran permukaan, *spindle speed*, *feed rate*, *depth of cut*

I. PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Mesin *milling* merupakan salah satu mesin yang sangat diandalkan oleh industri manufaktur dalam membuat berbagai produknya. Mesin ini dapat memenuhi kebutuhan produksi untuk berbagai produk dengan bentuk yang kompleks. Seperti memproduksi perkakas-perkakas penting yaitu *dies*, *mould*, *jig* dan *fixture* yang memiliki tuntutan kualitas yang tinggi baik secara geometri maupun tingkat kekasaran/kehalusan permukaannya.



Gambar 1. Gerak Pemotongan

Pada proses pemotongannya, mesin *milling* mempunyai tiga gerakan utama yaitu gerakan berputarnya alat potong/*spindle* (*main motion*), kecepatan gerak potong (*feed motion*) dan kedalaman potong (*adjusting motion/depth of cut*). Berdasarkan gerakan tersebut, maka dalam prosesnya seseorang yang mengoperasikan mesin *milling* harus mengetahui dan mampu memperhitungkan parameter setting dari gerakan tersebut guna menghasilkan kualitas

permukaan hasil potong yang baik atau tingkat kehalusan permukaan yang baik.

Tingkat kehalusan suatu permukaan memiliki peranan yang sangat penting dalam suatu komponen produk khususnya yang menyangkut masalah gesekan pelumasan, keausan, tahanan terhadap kelelahan dan sebagainya. Namun, produsen suatu alat potong tidak ada yang memuat nilai tingkat kehalusan permukaan yang dihasilkan dari suatu proses pemotongan dengan parameter setting tertentu. Dan pada umumnya produsen alat potong (*cutter*) hanya mencantumkan parameter putaran spindle (*spindle speed*), kecepatan gerak potong (*feed rate*), dan kedalaman potong (*depth of cut*) saja tanpa memuat nilai tingkat kekasaran permukaan hasil pemotongan.

Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui tingkat kekasaran permukaan hasil proses *milling* terhadap pengaruh variasi putaran spindle (*spindle speed*), kecepatan gerak potong (*feed rate*), dan kedalaman potong (*depth of cut*). Sehingga diketahui pengaruhnya terhadap tingkat kekasaran permukaan yang dihasilkan dari proses *milling* tersebut, agar menghasilkan produk yang memiliki tingkat kekasaran permukaan yang sesuai dengan tuntutan kualitas.

I.2 Pokok Masalah

Permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

“Apa pengaruh variasi putaran spindle (*spindle speed*), kecepatan gerak potong (*feed rate*) dan kedalaman potong (*depth of cut*) terhadap tingkat kekasaran permukaan baja karbon S45C pada proses *milling* yang menggunakan jenis alat potong (*cutter*) *End Mill Cutter 4 Flute HSS Finishing?*”

I.3 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengetahui tingkat kekasaran permukaan baja karbon S45C hasil pemotongan pada proses *milling* berdasarkan pengaruh variasi putaran *spindel* (*spindle speed*), kecepatan gerak potong (*feed rate*), dan kedalaman potong (*depth of cut*) dengan menggunakan alat potong (*cutter*) *End Mill Cutter 4 Flute HSS Finishing*.

Sedangkan tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi parameter setting untuk putaran *spindle* (*spindle speed*), kecepatan gerak potong (*feed rate*) dan kedalaman potong (*depth of cut*) terhadap tingkat kekasaran permukaan yang dihasilkan.
2. Memberikan alternatif dalam menentukan putaran *spindle* (*spindle speed*), kecepatan gerak potong (*feed rate*) dan kedalaman potong (*depth of cut*) yang sesuai sehingga dapat menghasilkan tingkat kekasaran permukaan sesuai tuntutan kualitas.
3. Sebagai bahan referensi bagi penelitian sejenis dalam rangka pengembangan pengetahuan yang lebih luas.

II. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam penulisan ini terdiri dari tahapan berikut :

- a. Observasi Lapangan
Merupakan langkah awal yang dilakukan penulis untuk mendapatkan informasi yang berhubungan dengan objek penelitian.
- b. Studi *Literature*
Merupakan langkah penelusuran dan penelaah buku-buku referensi, untuk menambah wawasan teoritis yang lebih luas.
- c. Pengambilan Data
Pengambilan data pengujian penelitian ini dilakukan di Laboratorium *Machining Process* Politeknik Manufaktur Astra Jakarta.

III. PROSES DAN DATA HASIL PENGUJIAN

III. 1. Data Instrumen Pengujian

a. Material dan Desain Specimen Benda Uji

Material yang digunakan sebagai specimen benda uji adalah jenis material S45C yang umum digunakan sebagai material berbagai produk permesinan. Karena material S45C memiliki keunggulan dalam kemampuan untuk proses permesinan (*machine ability*) & kemampuan untuk dilas (*weld ability*) yang baik, dan juga memiliki kemampuan untuk berbagai proses perlakuan panas (*heat treatment*). Material S45C adalah jenis baja karbon kekuatan menengah (*medium strength steel / mild steel / medium carbon steel*).



Gambar 6. Desain *Specimen* Benda Uji

b. Mesin *Milling*

Dalam pengujian ini, mesin yang digunakan seperti terlihat pada gambar 7. adalah jenis mesin *milling* yang memiliki sistem pengoperasian berbasis komputer (CNC) dengan merk *MAKINO KE55*. Mesin ini dipilih karena memiliki konstruksi yang baik, sehingga faktor mesin yang dapat mempengaruhi hasil dari pengujian kekasaran permukaan lebih kecil. Selain itu, ketepatan dari parameter setting mesin yang dimasukkan (*data input*) juga sangat baik. Sehingga dalam pengambilan data pengujian akan menghasilkan data uji tingkat kekasaran permukaan yang akurat.



Gambar 7. Mesin *Milling* *MAKINO KE55*

Berikut data spesifikasi mesin *milling* yang digunakan:

- Merk : *MAKINO KE55*
- Buatan : *Singapore*
- Tahun : 2008
- *Speed Range Spindle Head* : 45 - 4500 rpm
- *Feed Rate* : 1 - 5000 mm/min
- Daya motor : AC 3.7/5.5 kW 5/7.5 hp
- Sistem kontrol : *CNC Fanuc Japan*

c. Alat Potong (*Cutter*)

Alat potong (*cutter*) *milling* yang digunakan adalah jenis *End Mill Cutter 4 Fluet Finishing Ø 20 mm* merk *YG-1 Tank Power* dengan geometri mata potong dan karakteristik sesuai standar produk No. *EP932200*. Alat potong (*cutter*) jenis ini merupakan alat potong yang paling umum digunakan pada proses *milling*.

Tabel 1. End Mill Cutter 4 Fluet Finishing YG-1 Tank Power



YPM

- Recommended for pocketing, tracer milling, cam milling, die sinking and drilling.
- 專用於銑削：槽、內孔、齒輪、
- Designed for high speed cutting of difficult-to-cut materials, stainless steels, titanium, exotic materials.
- 專用於高速銑削難加工材料：不銹鋼、鈦、特殊鋼。
- YG-1's new developed TANK-POWER Coating suitable for high speed cutting.
- YG-1新開發之TANK-POWER塗層適合高速銑削。

EP932

MATERIAL	Structural Steels, Carbon Steels		Structural Steels, Carbon Steels, Cast Irons		Carbon Steels, Alloy Steels, Tool Steels		Prehardened Steels, Alloy Steels, Tool Steels		Alloy Steels, Tool Steels, Austenitic Stainless Steels	
	SPM	FEED	SPM	FEED	SPM	FEED	SPM	FEED	SPM	FEED
2	8000	250	6000	210	3000	110	3200	75		
3	6300	360	5700	300	4200	220	2800	155	2300	110
4	5000	420	4500	350	3400	260	2200	175	1900	130
5	4200	440	3800	370	2800	275	1800	190	1600	140
6	3700	470	3400	390	2500	285	1700	200	1400	155
8	3000	500	2500	420	1900	320	1300	210	1100	160
10	2200	550	2000	460	1500	330	1000	230	850	175
12	1900	500	1700	420	1300	320	850	210	690	160
14	1700	480	1500	400	1100	300	750	200	600	150
16	1550	440	1300	370	950	280	650	190	520	145
20	1200	380	1000	320	750	240	500	155	420	120
25	950	320	800	265	600	200	400	130	340	110

RPM=REVOLUTION PER MIN. Feed=mm/rev.

(Sumber: www.qygl.com/cctrl/news/file/ENDMILL_TANK-POWER.pdf)

d. Alat Uji Kekasaran Permukaan

Alat uji kekasaran permukaan untuk menguji tingkat kekasaran permukaan pada specimen benda uji setelah proses *milling* dilakukan adalah dengan menggunakan alat uji kekasaran permukaan merk *TESA RUGOSURF 10 Roughness Gauge* terlihat pada gambar 8., Alat uji ini merupakan jenis alat uji langsung (*direct measure*) menggunakan metode jarum peraba (*stylus*) sebagai sensor pembacanya dan angka tingkat kekasaran permukaan hasil pengujian dapat dilihat langsung pada layar digital (*display-LCD*).



Gambar 8. *TESA RUGOSURF 10 Roughness Gauge*

Berikut data spesifikasi alat uji kekasaran:

- Merk : *TESA RUGOSURF 10 Roughness Gauge*
- Buatan : *Swiss*
- No. Product : *06930010*
- Display : *LCD, 2 line of 16 characters*
- Roughness Parameter : *ISO 4287-1997/JIS B0601 Ra - Rq (RMS) Rt - Rz - Rc. Rsm - Rmr.*
- Jarak ukur : *X-axis 16mm dan Z-axis 160µm*
- Stylus tip : *Diamon tip*
- Tip radius : *5 µm, 90°*
- Panjang cut-off : *0,25, 0,8, 2,5 mm*

III.2. Proses Pengujian

Tahapan proses pengujian yang dilakukan pada penelitian ini seperti tergambar pada gambar 2. diagram alur proses.



Gambar 2. Diagram Alur Proses Pengujian

Berikut adalah penjelasan tahapan proses pengujian yang dilakukan pada penelitian ini:

1. Persiapan instrumen pengujian, dimana persiapannya meliputi mesin *milling*, alat potong (*cutter*) *end mill cutter* yang digunakan. Serta data parameter yang digunakan.
2. Persiapan material specimen benda uji, dimana material yang digunakan sebagai specimen benda uji adalah material *S45C*. Lalu melakukan pengujian tingkat kekerasan (*hardness*) pada material tersebut untuk memastikan tingkat kekerasan yang sesuai dengan karakteristik material *S45C*. Pengujian ini menggunakan mesin uji kekerasan (*hardness tester*).



Gambar 3. Pengujian Kekerasan

3. Proses *milling*, yaitu dengan melakukan proses *milling* jenis pemotongan muka (*facing*) dengan menggunakan cairan pendingin (*coolant*) untuk menjaga ketahanan/ketajaman mata potong dari alat potong (*cutter*), Dimana dilakukan klasifikasi pembuatan beberapa specimen benda uji berdasarkan variasi putaran *spindle* (*spindle speed*), kecepatan gerak potong (*feed rate*) dan kedalaman potong (*depth of cut*).



Gambar 4. Proses *Milling* Pemakanan Muka (*Facing*)

4. Pengukuran kekasaran, yaitu melakukan pengujian tingkat kekasaran pada specimen benda uji hasil dari proses *milling*, dan melakukan pencatatan data hasil pengujian.



Gambar 5. Pengukuran Kekasaran

5. Analisis dan pembahasan, yaitu melakukan analisa terhadap data hasil pengujian dimana data yang diperoleh diolah dengan melakukan perhitungan statistik, membuat tabel dan grafik. Sehingga dapat dilakukan pembahasan bagaimana hasil yang diperoleh dari penelitian pengujian tingkat kekasaran permukaan yang dilakukan.
6. Kesimpulan, yaitu melakukan penyimpulan dari hasil penelitian yang mengacu pada pokok masalah.

III.3. Data Hasil Pengujian

a. Data Pengujian Kekerasan *Specimen Benda Uji*

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan material specimen benda uji yaitu material S45C. Sehingga dapat ditentukan *setting parameter* untuk proses *milling*. Berikut data hasil pengujian kekerasan yang dilakukan pada 4 bidang dimana masing-masing bidang dilakukan 2 titik pengujian:

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Kekerasan

No.	No. Bidang	Tingkat Kekerasan
1	1	25 HRc
2		27 HRc
3	2	26 Hrc
4		30 HRc
5	3	27 HRc
6		28 HRc
7	4	29 HRc
8		27 HRc

Berdasarkan data pada tabel 2. dapat diketahui tingkat kekerasan material specimen benda uji berdasarkan nilai kekerasan yang sering muncul (modus) yaitu 27 HRc. Ini berarti tingkat kekerasan material specimen benda uji sesuai dengan karakteristik material S45C yang memiliki tingkat kekerasan standar 20-30 HRc.

b. Data Tingkat Kekasaran Permukaan

Sebelum melakukan pengujian tingkat kekasaran permukaan berdasarkan variasi putaran *spindle (spindle speed)* kecepatan gerak potong (*feed rate*) dan kedalaman potong (*depth of cut*) pada proses *milling*, perlu dilakukan perhitungan parameter setting untuk mendapatkan parameter yang sesuai. Berikut perhitungan untuk putaran *spindle*:

- *End Mill Cutter 4 Fluet Finishing* Ø 20 mm
- *Material specimen S45C* memiliki *cutting speeds* 30-45 m/min dengan menggunakan alat potong (*cutter*) *High Speed Steel (HSS)*.

1. Perhitungan Putaran *Spindle (Spindle Speed)*

Dengan rumus persamaan berikut dan *cutting speeds* 30 m/min:

$$n = \frac{30(m/\text{min}) \times 320}{20(mm)} = 480 \quad (1)$$

Dengan rumus persamaan berikut dan *cutting speeds* 45 m/min:

$$n = \frac{45(m/\text{min}) \times 320}{20(mm)} = 720 \quad (2)$$

- Putaran *spindle* minimum 480 RPM menjadi 450 RPM (paling minimum),
- Putaran *spindle* maksimum 720 RPM menjadi 750 RPM (paling maksimum),
- Dan putaran *spindle* menengah adalah $(480 + 720)/2 = 600$ RPM.

2. Perhitungan Kecepatan Gerak Potong (*Feed Rate*)

$CPT = 0.08 - 0.15$ untuk *End Mill Cutter* pada Material S45C

Dengan rumus persamaan berikut maka kecepatan gerak potong (*feed rate*) minimum.

$$\begin{aligned} \text{Feed (mm/min)} &= N \times CPT \times n \\ &= 4 \times 0.08 \times 450 \quad (\text{berdasarkan} \\ &\quad \text{perhitungan RPM}) \\ &= 144 \end{aligned}$$

Dengan rumus persamaan berikut maka kecepatan gerak potong (*feed rate*) maksimum.

$$\begin{aligned} \text{Feed (mm/min)} &= N \times CPT \times n \\ &= 4 \times 0.15 \times 450 \quad (\text{berdasarkan} \\ &\quad \text{perhitungan RPM}) \\ &= 270 \end{aligned}$$

- Kecepatan gerak potong (*feed rate*) minimum 144 m/min dibulatkan menjadi 140 m/min.
- Kecepatan gerak potong (*feed rate*) maksimum 270 menjadi 300 m/min
- Dan kecepatan gerak potong (*feed rate*) menengah adalah $(140 + 300)/2 = 220$ m/min.

3. Kedalaman Potong (*Depth of Cut*)

Nilai dari kedalaman pemotongan untuk jenis alat potong (*cutter*) *end mill cutter finishing* ditentukan berkisar antara 0.5 – 1.5 mm. Maka kedalaman potong untuk pengujian adalah 0.5 mm, 1 mm, dan 1.5 mm.



Berikut ini adalah tabel variasi parameter dan banyaknya populasi specimen benda uji:

Tabel 3. Variasi *Parameter* dan Banyaknya Populasi *Specimen*

Nomor Specimen	Spindle Speed	Feed Rate	Depth of Cut	Panjang Specimen	Jumlah Pengukuran
1	450	144	0.5	115	3
2	450	144	1	115	3
3	450	144	1.5	115	3
4	450	192	0.5	115	3
5	450	192	1	115	3
6	450	192	1.5	115	3
7	450	240	0.5	115	3
8	450	240	1	115	3
9	450	240	1.5	115	3
10	600	144	0.5	115	3
11	600	144	1	115	3
12	600	144	1.5	115	3
13	600	192	0.5	115	3
14	600	192	1	115	3
15	600	192	1.5	115	3
16	600	240	0.5	115	3
17	600	240	1	115	3
18	600	240	1.5	115	3
19	750	144	0.5	115	3
20	750	144	1	115	3
21	750	144	1.5	115	3
22	750	192	0.5	115	3
23	750	192	1	115	3
24	750	192	1.5	115	3
25	750	240	0.5	115	3
26	750	240	1	115	3
27	750	240	1.5	115	3

Berikut ini adalah tabel hasil pengukuran tingkat kekasaran permukaan specimen benda uji:

Tabel 4. Data Hasil Pengukuran Tingkat Kekasaran Permukaan

No. Specimen	Tingkat Kekasaran Permukaan (Ra)								
	I			II			III		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	3.43	3.35	3.2	2.82	3.01	3.05	3.12	2.91	2.99
2	4.22	4.21	4.34	4.03	4.3	4.34	3.96	3.98	3.91
3	4.23	4.32	4.19	4.51	4.42	4.66	4.16	4.18	4.19
4	4.25	3.82	4.18	4.03	4.08	4.08	3.48	3.76	3.51
5	3.81	3.86	3.94	3.91	3.83	3.96	3.68	3.61	3.77
6	4.36	4.54	4.38	4.48	4.58	4.68	4.63	4.86	4.66
7	2.96	2.97	2.81	2.83	2.97	2.94	3.29	2.91	3.26
8	3.37	3.32	3.08	3.6	3.63	3.67	3.08	3.3	3.56
9	5.15	3.8	3.65	4.01	2.88	3.88	3.86	3.97	3.83
10	3.4	2.89	3.22	2.88	3.4	2.91	3.31	3.21	3.74
11	2.92	3.5	3.11	2.53	3.16	2.97	2.94	3.34	3.14
12	2.4	2.23	2.78	2.2	2.74	2.73	2.49	3.31	3.52
13	2.67	3.75	3.36	3.09	3.45	3.21	3.88	3.36	3.68
14	2.39	2.26	2.62	2.06	2.72	2.62	3.26	2.79	2.69
15	3.37	3.15	3.55	2.84	2.85	2.74	2.88	2.97	2.79
16	4.59	4.86	5.3	4.73	5.26	5.65	5.28	4.99	5.35
17	3.62	2.58	2.95	3.06	2.62	2.78	3.93	2.84	2.59
18	3.73	3.9	3.57	3.75	4.1	4.13	3.91	4.11	3.96
19	2.55	3.15	2.44	2.99	3.08	3.11	3.12	3.36	3.21
20	3.03	2.93	3.02	2.59	2.82	2.79	2.78	2.52	2.61
21	2.2	2.45	2.27	2.69	2.51	2.47	2.71	3.53	3.01
22	2.73	2.56	3.09	2.91	2.89	2.85	2.42	2.97	2.81
23	3.39	3.07	3.15	3.12	2.85	3.4	3.27	2.62	3.6
24	2.89	3.26	3.51	3.47	3.7	3.13	3.27	3.47	3.06
25	2.68	3.19	2.78	2.7	2.83	2.72	3.41	2.71	3.03
26	3.25	4.67	4.55	3.44	3.8	4.14	3.36	3.09	3.16
27	3.94	4.31	3.59	4.04	4.15	3.36	3.94	4.17	3.57

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1. Analisis Data Hasil Pengujian

1. Perhitungan Analisis Data

Untuk melakukan perhitungan analisis data, diperlukan data hasil pengujian tingkat kekasaran permukaan yang telah disusun sedemikian rupa untuk mempermudah pengambilan data perhitungan. Dan tabel 5. menunjukkan data hasil pengukuran tingkat kekasaran permukaan yang telah disusun secara terpisah dari masing-masing faktor namun saling berkaitan.

	Depth Of Cut (C)										Yi...								
	0.5			1			1.5			Yi...									
	Feed rate (B)			Feed rate (B)			Feed rate (B)												
	140	220	300	140	220	300	140	220	300										
450	3.33	4.08	2.91	4.26	3.87	3.26	4.25	4.43	4.20	102.45									
	2.96	9.30	4.06	11.72	2.91	8.97	4.22	12.43	3.90		11.46	3.63	10.20	4.53	12.96	4.58	13.73	3.59	11.68
	3.01	3.58	3.15	3.95	3.69	3.31	4.18	4.72	3.89										
600	3.17	3.26	4.92	3.18	2.42	3.05	2.47	3.05	3.36	3.73	90.04								
	3.06	9.65	3.25	10.15	5.21	15.34	2.89	9.21	2.47	7.80		2.82	8.99	2.56	8.14	2.81	9.05	3.99	11.71
	3.42	3.64	5.21	3.14	2.91	3.12	3.11	2.88	3.99										
750	2.71	2.79	2.88	2.99	3.20	4.16	2.31	3.22	3.95	84.63									
	3.06	9.00	2.88	8.40	2.75	8.68	2.73	8.36	3.12		9.48	3.79	11.15	2.56	7.95	3.43	9.92	3.85	11.69
	3.23	2.73	3.05	2.64	3.16	3.20	3.08	3.27	3.89										
Y _{jk}	27.95	30.27	32.99	30.00	28.74	30.34	29.05	32.70	35.08	277.12									
Y _{j.}	91.21			89.08			96.83			277.12									

Berdasarkan data nilai tingkat kekasaran permukaan (Ra) dari tabel 5. dan menggunakan rumus persamaan berikut dapat dihitung:

1. Jumlah kuadrat total (*Sum of Square Total*):

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2}{abcn}$$

$$= [(3.33)^2 + (4.08)^2 + (2.91)^2 + (4.26)^2 + \dots + (3.89)^2] - \frac{(277.12)^2}{81}$$

$$= 34.51$$

2. Jumlah kuadrat putaran spindle (*Sum of Square Spindle Speed*):

$$SS_{Spindle Speed} = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i...}^2 - \frac{y^2}{abcn}$$

$$SS_{Spindle Speed} = \frac{1}{27} [(102.45)^2 + (90.04)^2 + (84.63)^2] - \frac{(277.12)^2}{81}$$

$$= 6.183$$

3. Jumlah kuadrat kecepatan gerak potong (*Sum of Square Feed Rate*):

$$SS_{Feed rate} = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{jk.}^2 - \frac{y^2}{abcn}$$

$$SS_{Feed rate} = \frac{1}{27} [(27.95 + 30.00 + 29.05)^2 + (30.27 + 28.74 + 32.70)^2 + (32.99 + 30.34 + 35.08)^2] - \frac{(277.12)^2}{81}$$

$$= 2.435$$

4. Jumlah kuadrat kedalaman potong (*Sum of Square Depth of Cut*):

$$SS_{Depth of cut} = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{j..}^2 - \frac{y^2}{abcn}$$

$$SS_{Depth of cut} = \frac{1}{27} [(91.21)^2 + (89.08)^2 + (96.83)^2] - \frac{(277.12)^2}{81} = 1.187$$

5. Jumlah kuadrat dari putaran spindle (A) dan kecepatan gerak potong (B) (*Sum of Square AB*):

$$SS_{AB} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i.k.}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{9} [(34.69)^2 + (36.91)^2 + (30.85)^2 + (27.00)^2 + (27.00)^2 + (36.04)^2 + (25.31)^2 + (27.80)^2 + (31.52)^2] - \frac{(277.12)^2}{81} - 6.183 - 2.435$$

$$= 7.88$$

6. Jumlah kuadrat dari putaran spindle (A) dan kedalaman potong (C) (*Sum of Square AC*):

$$SS_{AC} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{9} [(29.99)^2 + (34.09)^2 + (38.37)^2 + (35.14)^2 + (26.00)^2 + (28.90)^2 + (26.08)^2 + (28.99)^2 + (29.56)^2] - \frac{(277.12)^2}{81} - 6.183 - 1.187 = 8.336$$

7. Jumlah kuadrat dari kedalaman potong (C) dan kecepatan gerak potong (B) (*Sum of Square BC*):

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{jk.}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{9} [(27.95)^2 + (30.27)^2 + (32.99)^2 + (30.00)^2 + (28.74)^2 + (30.34)^2 + (29.05)^2 + (32.70)^2 + (35.08)^2] - \frac{(277.12)^2}{81} - 1.187 - 2.435$$

$$= 1.19$$

8. Jumlah kuadrat dari putaran spindle (A), kecepatan gerak potong (B) dan kedalaman potong (C) (*Sum of Square ABC*):

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk.}^2 - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{3} [(9.30)^2 + (11.72)^2 + (8.97)^2 + (12.43)^2 + \dots + (9.92)^2 + (11.69)^2] - \frac{(277.12)^2}{81} - 6.183 - 1.187 - 2.435 - 8.336 - 7.88 - 1.19 = 4.56$$

Jumlah kuadrat subtotal:

$$SS_{Subtotal} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcn}$$

$$SS_{Subtotal} = \frac{1}{3} [(9.30)^2 + (11.72)^2 + (8.97)^2 + (12.43)^2 + \dots + (9.92)^2 + (11.69)^2] - \frac{(277.12)^2}{81} = 31.762$$

Jumlah kuadrat error:

$$SS_{Error} = SS_{Total} - SS_{Subtotal}$$

$$SS_{Error} = 34.51 - 31.762 = 2.748$$

IV.2. Pembahasan Hasil Analisis Data

Hasil perhitungan analisis data nilai tingkat kekasaran permukaan (R_a) yang telah dihitung dirangkum dalam tabel 6. berikut ini:

Tabel 6. Tabel Analisis Variasi Tingkat Kekasaran Permukaan

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_o	F_a	P
A	6.18	2	3.09	60.84	3,35	$F_o > F_a$
B	2.44	2	1.22	23.96	3,35	$F_o > F_a$
C	1.19	2	0.59	11.68	3,35	$F_o < F_a$
AB	7.88	4	1.97	38.76	2,73	$F_o > F_a$
AC	8.34	4	2.08	41.02	2,73	$F_o > F_a$
BC	1.19	4	0.30	5.84	2,73	$F_o > F_a$
ABC	4.56	8	0.57	11.21	2,31	$F_o < F_a$
Error	2.7439	54	0.05	-	-	-
Total	34.51	80	-	-	-	-

Note: F_a (nilai kritis) berdasarkan tabel tingkat kepentingan (level of significance) $\alpha = 0.05$

Dari hasil analisa variansi yang dilakukan terhadap data hasil pengukuran tingkat kekasaran permukaan yang diperoleh dapat dilihat pada tabel 6. Harga F_o (Fobservasi) dibandingkan dengan harga F_a (Ftabel). Dimana bila $F_o > F_a$ maka faktor mempunyai pengaruh terhadap variabel yang diuji dan bila $F_o < F_a$ maka faktor tidak atau sedikit memberi pengaruh pada variabel respon dengan α yang telah ditentukan. Dengan demikian nilai dari F_o dan F_a pada tabel 6. dapat dilihat dan disimpulkan apakah faktor

berpengaruh atau tidak terhadap tingkat kekasaran permukaan.

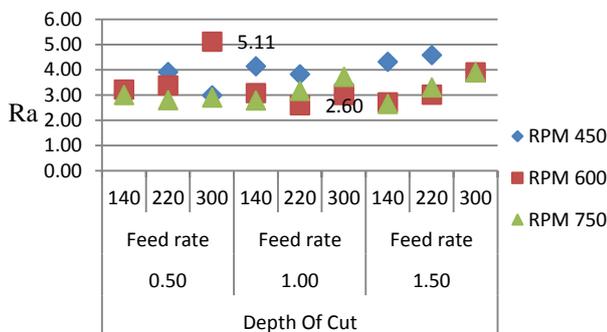
- Berdasarkan variasi putaran *spindle* (*spindle speed*) atau faktor A, $F_o = 60.84 > F_a = 3.35$ maka H_1 diterima bahwa putaran *spindle* (*spindle speed*) berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan dengan tingkat kepentingan 5%.
- Berdasarkan variasi kecepatan gerak potong (*feed rate*) atau faktor B, $F_o = 23.96 > F_a = 3.35$ maka H_1 diterima bahwa kecepatan gerak potong (*feed rate*) berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan dengan tingkat kepentingan 5%.
- Berdasarkan variasi kedalaman potong (*depth of cut*) atau faktor C, $F_o = 11.68 > F_a = 3.35$ maka H_1 diterima bahwa kedalaman potong (*depth of cut*) berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan dengan tingkat kepentingan 5%.
- Berdasarkan interaksi antara faktor A dan faktor B, $F_o = 38.76 > F_a = 2.73$ maka H_1 diterima bahwa interaksi antara faktor A dan faktor B berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan dengan tingkat kepentingan 5%.
- Berdasarkan interaksi antara faktor A dan faktor C, $F_o = 41.02 > F_a = 2.73$ maka H_1 diterima bahwa interaksi antara faktor A dan faktor C berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan dengan tingkat kepentingan 5%.
- Berdasarkan interaksi antara faktor B dan faktor C, $F_o = 5.84 > F_a = 2.73$ maka H_1 diterima bahwa interaksi antara faktor B dan faktor C berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan dengan tingkat kepentingan 5%.
- Dan Berdasarkan interaksi tiga faktor A, B dan C $F_o = 5.84 > F_a = 2.73$ maka H_1 diterima bahwa interaksi antara faktor A, B dan C berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan dengan tingkat kepentingan 5%.

Untuk mengetahui nilai tingkat kekasaran permukaan (R_a) terkecil (halus) dan terbesar (kasar) berdasarkan interaksi dari ketiga faktor, yaitu putaran *spindle* (*spindle speed*), kecepatan gerak potong (*feed rate*) dan kedalaman potong (*depth of cut*). Nilai tingkat kekasaran permukaan (R_a) pada tabel 5. di rata-rata untuk mempermudah pembacaan nilai tingkat kekasaran permukaan (R_a) seperti ditunjukkan pada tabel 7. berikut ini:

Tabel 7. Tabel Rata-rata Tingkat Kekasaran Permukaan

Ra		Depth Of Cut								
		0.50			1.00			1.50		
		Feed rate			Feed rate			Feed rate		
		140	220	300	140	220	300	140	220	300
RPM	450	3.10	3.91	2.99	4.14	3.82	3.40	4.32	4.58	3.89
600	3.22	3.38	5.11	3.07	2.60	3.00	2.71	3.02	3.90	
750	3.00	2.80	2.89	2.79	3.16	3.72	2.65	3.31	3.90	

Dari tabel 7. diatas, terlihat bahwa nilai tingkat kekasaran permukaan dengan nilai Ra terkecil/permukaan “halus” terdapat pada interaksi putaran *spindle* 600 RPM, kecepatan gerak potong 220 m/min dan kedalaman potong 1 mm yaitu sebesar 2.60 μm . Dan nilai tingkat kekasaran permukaan dengan Ra terbesar/permukaan “kasar” terdapat pada interaksi putaran *spindle* 600 RPM, kecepatan gerak potong 300 m/min dan kedalaman potong 0.5 mm yaitu sebesar 5.11 μm . Atau dapat dilihat pada grafik gambar 9. berikut ini:



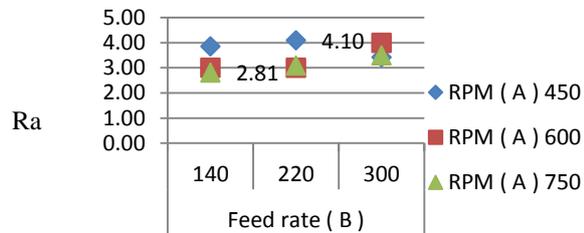
Gambar 9. Grafik Rata-rata Tingkat Kekasaran Permukaan

Lalu berdasarkan interaksi dari dua faktor, bisa dilihat nilai tingkat kekasaran permukaan dan gambaran pengaruh dari masing-masing dua faktor yang berinteraksi. Tabel 8. menunjukkan nilai tingkat kekasaran permukaan berdasarkan interaksi antara variasi putaran *spindle* (*spindle speed*) atau faktor A dengan variasi kecepatan gerak potong (*feed rate*) atau faktor B.

Tabel 8. Tabel Tingkat Kekasaran Permukaan Faktor A dan B

Ra		Feed rate (B)		
		140	220	300
RPM (A)	450	3.85	4.10	3.43
	600	3.00	3.00	4.00
	750	2.81	3.09	3.50

Dari tabel 8. diatas, terlihat bahwa nilai tingkat kekasaran permukaan (Ra) terkecil (halus) terdapat pada interaksi putaran *spindle* 750 RPM dan kecepatan gerak potong 140 m/min yaitu sebesar 2.81 μm . Dan nilai tingkat kekasaran permukaan (Ra) terbesar (kasar) terdapat pada interaksi putaran *spindle* 450 RPM dan kecepatan gerak potong 220 m/min yaitu sebesar 4.10 μm . Atau dapat dilihat pada grafik gambar 10. berikut ini:



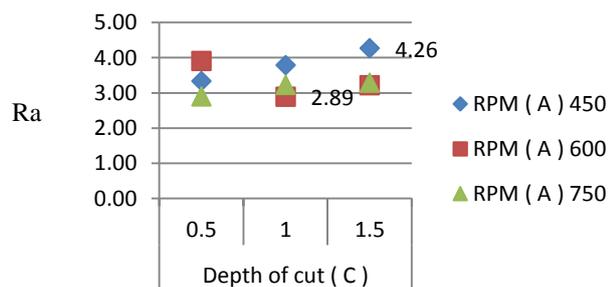
Gambar 10. Grafik Tingkat Kekasaran Permukaan Antara A dan B

Tabel 9. menunjukkan nilai tingkat kekasaran permukaan berdasarkan interaksi antara variasi putaran *spindle* (*spindle speed*) atau faktor A dengan variasi kedalaman potong (*depth of cut*) atau faktor C.

Tabel 9. Tabel Tingkat Kekasaran Permukaan Faktor A dan C

Ra		Depth of cut (C)		
		0.5	1	1.5
RPM (A)	450	3.33	3.79	4.26
	600	3.90	2.89	3.21
	750	2.90	3.22	3.28

Dari tabel 9. diatas, terlihat bahwa nilai tingkat kekasaran permukaan (Ra) terkecil (halus) terdapat pada interaksi putaran *spindle* 600 RPM, dan kedalaman potong 1 mm yaitu sebesar 2.89 μm . Dan nilai tingkat kekasaran permukaan (Ra) terbesar (kasar) terdapat pada interaksi putaran *spindle* 450 RPM, dan kedalaman potong 1.5 mm yaitu sebesar 4.26 μm . Atau dapat dilihat pada grafik gambar 11. berikut ini:



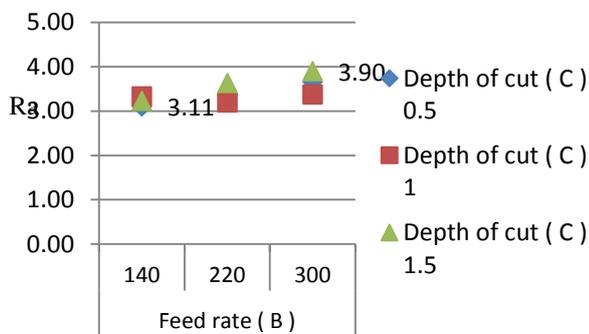
Gambar 11. Grafik Tingkat Kekasaran Permukaan Antara A dan C

Tabel 10. menunjukkan nilai tingkat kekasaran permukaan berdasarkan interaksi antara variasi kedalaman potong (*depth of cut*) atau faktor C dengan variasi kecepatan gerak potong (*feed rate*) atau faktor B.

Tabel 10. Tabel Tingkat Kekasaran Permukaan Faktor B dan C

Ra		Feed rate (B)		
		140	220	300
Depth of cut (C)	0.5	3.11	3.36	3.67
	1	3.33	3.19	3.37
	1.5	3.23	3.63	3.90

Dari tabel 10. diatas, terlihat bahwa nilai tingkat kekasaran permukaan (Ra) terkecil (halus) pada interaksi kecepatan gerak potong 140 m/min dan kedalaman potong 0.5 mm yaitu sebesar 3.11 μm . Dan nilai tingkat kekasaran permukaan (Ra) terbesar (kasar) pada interaksi kecepatan gerak potong 300 m/min dan kedalaman potong 1.5 mm yaitu sebesar 3.90 μm . Atau dapat dilihat pada grafik gambar 12. berikut ini:



Gambar 12. Grafik Tingkat Kekasaran Permukaan Antara B dan C

Selain bisa didapatkan hasil bahwa diterimanya Hipotesis satu (H1) dan gambaran pengaruh dari masing-masing faktor. Dapat ditentukan juga faktor yang paling berpengaruh dari ketiga faktor tersebut. Dapat dilihat dari tabel 6. bahwa F_{oA} (*spindle speed*) = 60.84 > F_{oC} (*depth of cut*) = 11.68 < F_{oB} (*feed rate*) = 23.96. Yang berarti bahwa faktor putaran *spindle* (*spindle speed*) yang paling berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan hasil proses *milling*. Dan diikuti faktor kecepatan gerak potong (*feed rate*) yang berpengaruh kedua. Sedangkan faktor kedalaman potong (*depth of cut*) memiliki pengaruh yang lebih kecil dari kedua faktor yang berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan hasil proses *milling*.

V. KESIMPULAN

- Bahwa faktor yang sangat berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan material baja karbon S45C pada proses *milling* yang menggunakan jenis

alat potong (*cutter*) *End Mill Cutter 4 Flute HSS Finishing* sesuai urutan berikut:

- putaran *spindle* (*spindle speed*)
- kecepatan gerak potong (*feed rate*)
- kedalaman potong (*depth of cut*)

- Untuk mendapatkan hasil tingkat kehalusan permukaan yang “halus” dengan nilai Ra sekitar 2.60 μm , *parameter setting* yang digunakan adalah putaran *spindle* 600 RPM, kecepatan gerak potong 220 m/min dan kedalaman potong 1 mm. Sedangkan untuk mendapatkan hasil tingkat kehalusan permukaan yang “kasar” dengan nilai Ra sekitar 5.11 μm , maka *parameter setting* yang digunakan adalah putaran *spindle* 600 RPM, kecepatan gerak potong 300 m/min dan kedalaman potong 0.5 mm.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- Adrianto, Ruli (2010). *Pengaruh Kecepatan Spindle, Kecepatan Pemakanan dan Kedalaman Pemakanan Terhadap Tingkat Kekasaran Permukaan Benda Kerja Hasil Pemesinan Bubut CNC Pada Baja ST 40*. Surakarta:skripsi USM.
- Degarmo, E. Paul. Black, JT. Kohser, Ronald A (2003). *Materials and Processes in Manufacturing*. Wiley.
- Dotson, Connie L. (2006). *Fundamentals of Dimensional Metrology 5th edition*. Thomson Delmar Learning.
- Groover, Mikell P. (2007). *Fundamentals of Modern Manufacturing 3th edition*. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Harinaldi (2005). *Prinsip-prinsip Statistik untuk Teknik dan Sains*. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Krar, Steve F. Gill, Arthur R. Smid, Peter (2010). *Technology of Machine Tools*. McGraw-Hill.
- Montgomery, Douglas C (2009). *Design and Analysis of Experiment 7th edition*. John Wiley & Soas (Asia) Pte Ltd.
- Munadi, Sudji (1988). *Dasar-dasar metrologi industry*. Depdikbud. Jakarta.
- Rochim, Taufiq (1982). *Teori dan Teknologi Proses Pemesinan*. Institut Teknologi Bandung.
- Rochim, Taufiq (2001). *Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik*. Institut Teknologi Bandung.
- Widarto (2008). *Teknik Pemesinan*. Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah Departemen Pendidikan Nasional.
- www.aws.org/wj/mar04/ochi.html
- www.custompartnet.com/wu/milling
- www.sutton.com.au