

## Optimasi Parameter Proses Milling dengan Pendinginan Fluida Alami (Cold Natural Fluid) terhadap Kualitas Permesinan Baja ST 42 dengan Metode Taguchi

Nalendro Mataram<sup>1a</sup>, Syam Ramadhani Saputra<sup>2b</sup>, Khanif Setiyawan<sup>3c</sup>

<sup>1</sup>Jl. Kadrie Oening Rt.019, Air Hitam, Samarinda

<sup>2</sup>Jl. KH Harun Nafsi Gang. H.M. Yahya, Kel. Rapak Dalam, Samarinda

<sup>3</sup> Jl. Ir. H. Juanda No.15, Sidodadi, Kec. Samarinda Ulu, Samarinda

<sup>a</sup>mataram12@gmail.com, <sup>b</sup>syamramadhanisaputra@gmail.com, <sup>c</sup>ks366@umkt.ac.id

### Abstrak

Proses pemesinan milling adalah proses pemesinan yang banyak digunakan untuk pembuatan suatu komponen. Waktu yang dibutuhkan membuat komponen diupayakan seminimal mungkin untuk mencapai kapasitas produksi yang tinggi. Proses pemotongan yang maksimum akan menghasilkan laju pemakanan material (MRR) yang tinggi namun mengakibatkan kekasaran permukaan (Ra) yang tinggi. Upaya mendapatkan kondisi optimal pemesinan milling yang mampu menghasilkan produk berkualitas dan efisien, diperlukan kondisi pemotongan yang tepat. Kondisi optimal dalam penelitian ini pada parameter pemesinan dan waktu yang cepat terhadap kekasaran permukaan. Pengukuran kekasaran permukaan sesuai Standar JIS (industry manufactur), material yang digunakan dalam penelitian adalah Baja ST 42 dengan pahat HSS-Superhard End Milling 5 mm. Dari hasil pengujian dan investigasi permesinan Milling pada baja ST 42, cutting condition menempati peringkat pertama untuk respon kekasaran permukaan daerah hasil proses milling, ini berarti bahwa cutting condition memiliki pengaruh paling besar terhadap hasil kekasaran permukaan hasil proses milling. Dari eksperimen yang dilakukan dapat dihasilkan bahwa dengan desain penelitian dengan variasi tiga pendingin nilai kekasaran terendah adalah 0,9568 ra dan tertinggi 2,6883 ra, menunjukkan cutting condition menempati peringkat pertama untuk respon temperatur pahat, ini berarti bahwa cutting condition memiliki pengaruh paling besar terhadap hasil temperatur pahat.

**Kata kunci** : Milling Process, Taguchi Method, Surface Raughne

### Latar belakang

Proses pembentukan komponen melalui permesinan dilakukan dengan cara membuang bagian benda kerja yang tidak digunakan menjadi geram (chips), sehingga terbentuk benda kerja. Dari semua prinsip pemotongan proses pemesinan dengan menggunakan mesin perkakas adalah proses yang paling banyak dilakukan untuk menghasilkan suatu produk jadi yang berbahan baku logam. Diperkirakan sekitar 60% sampai 80% dari seluruh proses pembuatan komponen mesin yang komplit dilakukan dengan proses pemesinan [1].

Kualitas barang produksi yang dianggap baik biasanya ditandai dengan kualitas permukaan komponen yang baik. Untuk mendapatkan hasil kualitas permukaan yang sesuai dengan tuntutan perancangan bukanlah hal yang mudah, karena banyak faktor yang harus diperhatikan. Seorang operator mesin harus memiliki pengetahuan yang benar tentang penggunaan alat ukur dan mesin supaya dapat memenuhi permintaan penyelesaian permukaan (surface finish) yang sesuai dengan perancangan. Milling merupakan salah satu proses pemesinan yang banyak digunakan untuk pembuatan komponen. Mesin

milling sering digunakan untuk membuat komponen yang mempunyai fitur berupa suatu profil dan juga trajectory yang kompleks. Sebagai contoh, proses pemesinan milling sering digunakan dalam pembuatan cetakan (mould), untuk pekerjaan perataan permukaan, pembentukan roda gigi, pembentukan pola permukaan, dan pekerjaan bor.

Penelitian yang akan dilakukan diarahkan untuk mendapatkan kondisi optimal dari parameter pemesinan terhadap hasil kekasaran permukaan komponen. Untuk proses optimasi, metode eksperimen yang digunakan adalah metode Taguchi. Metode Taguchi adalah metode eksperimen yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dalam waktu yang bersamaan menekan biaya dan sumber daya seminimal mungkin sehingga dicapai kondisi yang optimal dan efisien [2]. Parameter pemesinan yang terdiri dari kecepatan putaran spindle (spindle speed), kecepatan pemakanan (feed rate), kedalaman pemakanan (depth of cut), dan penggunaan cairan pendingin (kondisi pemotongan), berpengaruh terhadap hasil. Penelitian ini bertujuan mencari optimasi permesinan milling pada material baja ST 40. Metode ini digunakan dengan tujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dalam waktu yang bersamaan sehingga dicapai kondisi yang optimal.

Menurut [3], yang melakukan analisis pengaruh kecepatan potong, kecepatan pemakanan, kedalaman pemakanan, dan geometri pahat terhadap kekasaran permukaan ketika melakukan slot end milling pada Al 2014-T6, bahwa untuk kondisi tanpa cairan pendingin, kekasaran permukaan sangat dipengaruhi oleh kecepatan potong, kecepatan pemakanan, dan geometri pahat. Sedangkan untuk kondisi dengan cairan pendingin, faktor yang sangat berpengaruh terhadap kekasaran

permukaan adalah kecepatan pemakanan dan geometri pahat.

Bernardos P.G., Vosniakos G.C. (2003), memprediksi hubungan antara kedalaman pemakanan, kecepatan makan per gigi, kecepatan potong, pahat, cairan pendingin dan gaya potong dengan kekasaran permukaan pada pemesinan milling paduan aluminium. Penelitian yang dilakukan menggunakan *Taguchi design of experimental* dan *Artificial Neural Networks* [4].

Parameter pemesinan memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan adalah kecepatan putaran spindle dan kondisi pemotongan. Bertambahnya kedalaman pemakanan ataupun kecepatan potong tidak meningkatkan hasil kekasaran pada benda uji. Parameter yang mempengaruhi hasil kualitas permukaan suatu komponen. [5] diketahui bahwa parameter yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan adalah kecepatan potong, kedalaman pemakanan, dan kecepatan pemakanan.[6]. kondisi pemotongan optimum yang diperoleh pada pemesinan AISI 4140 menggunakan pahat CBN pada keadaan pemesinan laju tinggi, keras dan kering adalah pada laju pemotongan 200 m/min, laju pemakanan 0.16 mm/min dan kedalaman potong 1.1 mm dengan volume pembuangan geram 161.02 cm<sup>3</sup>. Kondisi optimal kekasaran terendah permukaan dapat dicapai pada kedalaman pemakanan level 3 (1.5 mm), kecepatan potong pada level 1 (20 m/min), gerak makan pada level 2 (0.33mm/rev) dengan kombinasi tersebut dihasilkan harga kekasaran terendah 1,52 µm<sup>3</sup>.

Dari hasil penelitian diatas menunjukkan efektifitas pendinginan menggunakan udara dengan temperatur lingkungan masih lebih rendah dibandingkan dengan menggunakan media pendingin cair (dromus). Untuk memperbesar efektivitas proses

pendinginan udara yang digunakan harus bersuhu rendah.

Aplikasi pendinginan menggunakan udara-dingin pada proses pemesian logam diharapkan menjadi nilai tambah pada usaha pemesian logam, karena secara ekonomis mampu mengurangi biaya yang seharusnya digunakan untuk: membeli cairan pendingin, membeli pahat akibat rendahnya umur pahat, serta biaya pengiriman dan pengolahan limbah. Dari beberapa literatur yang telah disebutkan diatas, pada proses pemesian milling terdapat beberapa parameter yang berpengaruh pada kekasaran permukaan komponen diantaranya adalah kecepatan pemotongan atau kecepatan putaran spindle, kedalaman pemakanan, geometri pahat, kecepatan pemakanan, dan penggunaan cairan pendingin.

Dalam penelitian ini untuk meningkatkan optimasi permesinan digunakan udara yang lebih dingin untuk meningkatkan fungsinya sebagai media pendingin. Meningkatkan gradien suhu melalui penukar kalor diharapkan akan berpengaruh terhadap kualitas produk permesinan milling. Alat penukar kalor didesain untuk menyerap panas fluida agar dapat di atur pada kondisi suhu fluida pada 8-10 °C.

### Tinjauan Pustaka

Fokus utama pada industri pemesian modern saat ini adalah pencapaian kualitas terbaik, akurasi dimensi atau kepresisian hasil pemesian, hasil akhir permukaan, produktivitas yang tinggi, laju keausan pahat yang rendah, pemesian yang ekonomis dan peningkatan performansi produk dengan masih mempertimbangkan dampak lingkungan. Saat ini, beberapa segmen konsumen menuntut komponen hasil pemesian dengan kriteria kekasaran tertentu, selain itu menuntut juga agar komponen tersebut diproses atau dikerjakan dalam waktu yang cepat. Sebagai contoh dalam pembuatan poros,

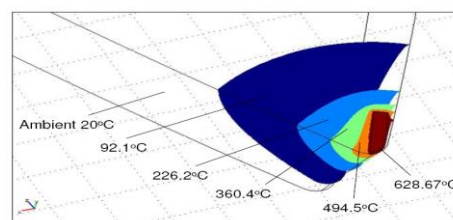
kekasaran dituntut sekecil mungkin dan waktu pengerjaan yang secepat mungkin.

### Cairan pendingin (*Cutting fluid*)

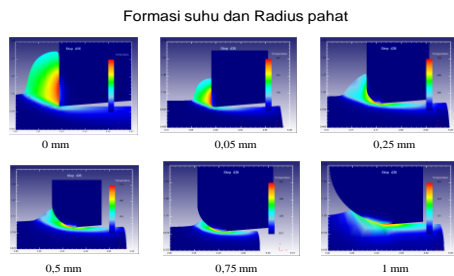
Dalam proses permesinan dikenal adanya dua macam kondisi pemotongan yaitu kondisi kering (*dry machining*) dan kondisi basah (*wet machining*). Pada proses kering proses pemotongan benda dilakukan tanpa menggunakan penambahan atau pemberian cairan pendingin pada permukaan benda kerja dan pahat. Sedangkan pada proses basah proses pemotongan dilakukan dengan penambahan cairan pendingin pada permukaan pahat dan benda kerja.

### Temperatur Pemotongan

Pada proses pemotongan logam, temperatur pahat dan benda kerja akan naik yang disebabkan karena adanya gesekan diantara keduanya. Jika tidak didinginkan hal ini akan menaikkan laju keausan pahat dan menimbulkan kerusakan pada benda kerja. Saat ini pendinginan pada proses pemotongan logam dilakukan dengan menggunakan media dromus atau menggunakan metode MQL/MQC. Dengan menggunakan dromus akan diperoleh laju pendinginan yang maksimum, tetapi dengan menggunakan dromus juga akan menaikkan biaya operasional (8-16%) dan tidak ramah terhadap lingkungan .



Gambar 1. Distribusi Temperatur Pahat pada Proses Pemotongan Logam dengan FEM.



Gambar 2. Distribusi Temperatur dengan Menggunakan FEM

Pada Gambar 1 terlihat bahwa temperatur tertinggi selama proses pemotongan adalah pada daerah ujung pahat, hal ini disebabkan pada daerah ujung merupakan daerah yang mengalami gesekan terbesar.

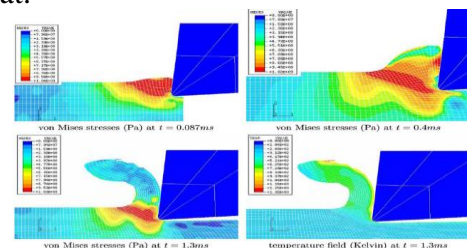
Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan pendinginan metode MQL/MQC diperoleh hasil yang hampir sama dengan menggunakan pendinginan dromus, tetapi metode MQL/MQC ini memiliki kekurangan yaitu timbulnya aerosol coolant di daerah pemotongan logam, hal ini jelas akan membahayakan kesehatan operator.

Untuk mengetahui distribusi temperatur pada seluruh bagian pahat, cara yang paling efektif adalah menggunakan FEM. Metode eksperimen hanya mampu melihat pada suatu daerah tertentu pada pahat. Penelitian untuk mengetahui temperatur pahat dan benda kerja dimaksudkan untuk mengontrol keausan pahat, meminimalisir gaya pemotongan dan meningkatkan kualitas hasil pemessinan .

### Pembentukan geram (*Chip formation*)

Pada mulanya diperkirakan geram terbentuk karena adanya retak mikro (micro crack).dengan bertambahnya tekanan pahat, retak tersebut menjalar kedepan sehingga terjadilah geram Karena pentingnya proses pemessinan pada semua industri, maka teori pemessinan dipelajari secara luas dan

mendalam sejak lama,terutama terjadinya proses penyayatan sehingga terbentuk beram. Proses terbentuknya beram adalah sama untuk hampir semua proses pemessinan. Laju regangan (*strain rate*) terbentuk cepat pada proses pembentukan geram tergantung pada bahan benda kerja, temperatur benda kerja, cairan pendingin, dan sebagainya. Hal ini Tergantung juga pada material pahat, temperatur pahat, dan getaran pahat.



Gambar 3. Bentuk Formasi chip dengan FEM

Proses pembentukan geram dipengaruhi oleh bentuk pahat (cutting tool). Fenomena Untuk semua jenis proses pemessinan termasuk gerinda, honing, lapping, planing, bubut, atau frais,mempunyai karakteristik berbeda-beda.

Secara umum ada tiga tahapan utama yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu:  
1) Mendesain dan membuat sistem pendingin udara berkecepatan tinggi yang portable tanpa harus merubah desain mesin bubut yang sudah ada;  
2) Melakukan pemodelan FEM proses pemessinan dengan pendinginan udara-dingin;  
3) Melakukan eksperimen untuk mendapatkan parameter optimum dari besarnya tekanan dan posisi penyemprotan udara-dingin untuk memperoleh tingkat kekasaran permukaan dan temperatur pahat yang minimum.

### Parameter yang Dapat Diatur pada Mesin Frais/ milling

Maksud dari parameter yang dapat diatur adalah parameter yang dapat langsung diatur oleh operator mesin ketika sedang mengoperasikan mesin

frais. Seperti yang disampaikan oleh menurut Rahdiyanto (2010), parameter yang dimaksud adalah putaran spindel ( $n$ ), gerak makan ( $f$ ), dan kedalaman potong ( $a$ ). Pada mesin konvensional putaran spindel bisa langsung diatur dengan cara mengubah posisi handel pengatur putaran mesin. Gerak makan bisa diatur dengan cara mengatur handel gerak makan sesuai dengan tabel  $f$  yang ada di mesin. Gerak makan ini pada proses frais ada dua macam yaitu gerak makan per gigi ( $\text{mm/gigi}$ ), dan gerak makan per putaran ( $\text{mm/putaran}$ ). Kedalaman potong diatur dengan cara menaikkan benda kerja, atau dengan cara menurunkan pahat.

Putaran spindel ( $n$ ) ditentukan berdasarkan kecepatan potong. Kecepatan potong ditentukan oleh kombinasi material pahat dan material benda kerja. Kecepatan potong adalah jarak yang ditempuh oleh satu titik (dalam satuan meter) pada selubung pahat dalam waktu satu menit. Rumus kecepatan potong identik dengan rumus kecepatan potong pada mesin bubut. Pada proses frais besarnya diameter yang digunakan adalah diameter pahat.

**Cutting speed;  $v_c$  (kecepatan potong)**

Kecepatan potong adalah kecepatan pahat memotong benda kerja, terdapat hubungan antara kecepatan potong pada benda kerja. Korelasi antara kedua kecepatan tersebut ditunjukkan dengan Persamaan 1.

$$v = \frac{\pi d n}{1000} \quad (1)$$

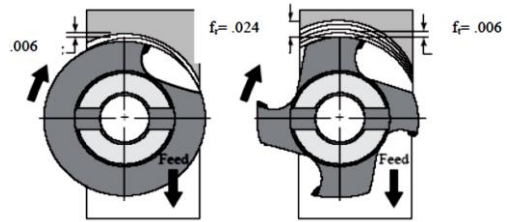
dimana,

- $v$  : kecepatan potong (m/min)
- $d$  : diameter pahat (mm)
- $n$  : kecepatan spindel (rpm)

**Feed rate;  $v_f$  (kecepatan pemakanan)**

Kecepatan pemakanan adalah kecepatan pergeseran pahat terhadap benda kerja. Agar proses

pemesinan berjalan dengan optimal, harus dipilih harga kecepatan pemakanan yang tepat.



Gambar 4. Perbedaan antara gerak makan per gigi ( $f_t$ ) dan gerak makan per putaran ( $f_r$ ).

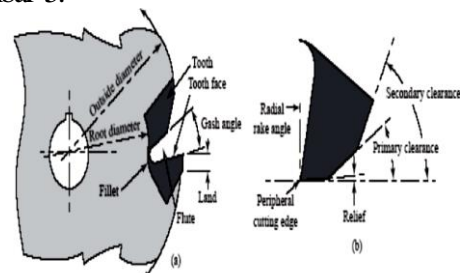
Dalam memilih harga  $v_f$  memperhatikan jenis proses, jenis bahan pahat, jenis bahan benda kerja, dan daya mesin yang tersedia. Persamaan kecepatan pemakanan ditunjukkan dengan persamaan 2.

$$v_f = f \cdot n \quad (2)$$

dimana,

- $v_f$  : kecepatan pemakanan (m/min)
- $f$  : feedrate (mm/min),
- $n$  : kecepatan spindel (rpm)

Nama-nama bagian pahat frais rata dan geometri gigi pahat frais rata ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Konfigurasi pahat frais : (a) nama-nama bagian pahat frais rata, (b) geometri gigi pahat *Depth of cut*

Pahat untuk proses frais dibuat dari material HSS atau karbida. Material pahat untuk proses frais pada dasarnya sama dengan material pahat untuk pahat bubut. Untuk pahat karbida juga digolongkan dengan kode P, M, dan K. Pahat frais karbida bentuk sisipan dipasang pada tempat pahat sesuai dengan bentuknya (Gambar 5). Standar ISO untuk bentuk dan ukuran pahat sisipan tersebut mengatur tentang bentuk sisipan, sudut potong, toleransi bentuk, pemutus tatal (chipbreaker),

panjang sisi potong, tebal sisipan, sudut bebas, arah pemakanan, dan kode khusus pembuat pahat.

#### **Cutting time; $t_c$ (waktu pemotongan)**

Waktu pemotongan merupakan lamanya waktu yang digunakan selama proses (tahap) pemotongan benda kerja. Waktu menunjukkan korelasi antara panjang dan kecepatan pemotongan, yang ditunjukkan pada persamaan 3 sebagai berikut:

$$t_c = l_t / v_f \quad (3)$$

dimana,

$t_c$ : waktu pemotongan (min)

$l_t$ : panjang pemotongan (mm)

$v_f$ : kecepatan pemakanan (mm/min)

#### **Rate of metal removal; Z, MRR (kecepatan penghasilan geram)**

Kecepatan penghasilan geram merupakan kecepatan yang diperoleh dari hasil perkalian antara gerak makan, kedalaman potong dan kecepatan potong, yang ditunjukkan melalui persamaan 4.

$$Z = A \cdot v \quad (4)$$

Karena penampang geram sebelum terpotong  $A = f \cdot a$ , maka korelasi antara keduanya di tunjukan dengan persamaan 5.

$$Z = f \cdot a \cdot v \quad (5)$$

dimana,

$Z$  : kecepatan penghasilan chips (mm<sup>3</sup>/min)

$a$  : kedalaman pemotongan (mm)

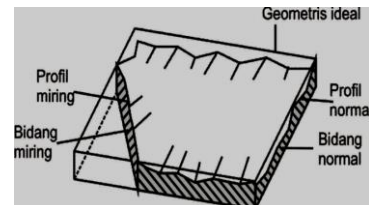
$v$  : kecepatan potong (mm/min)

$f$  : *feed* (mm)

#### **Kekasaran Permukaan Benda Kerja**

Kekasaran Permukaan, menurut istilah keteknikan, permukaan adalah suatu batas yang memisahkan benda padat dengan sekitarnya. Istilah profil

sering disebut dengan istilah lain yaitu permukaan mempunyai arti tersendiri yaitu garis hasil pemotongan secara normal atau serong dari suatu penampang permukaan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dibawah ini.



Gambar 6. Bidang dan Profil Pada Penampang Permukaan [1]

Karakteristik suatu permukaan memegang peranan penting dalam menilai kualitas hasil permesinan, kekasaran permukaan dibedakan menjadi dua bentuk, diantaranya :

- Ideal Surface Roughness*, yaitu : kekasaran ideal yang dapat dicapai dalam suatu proses permesinan dengan kondisi ideal.
- Natural Surface Roughness*, yaitu : kekasaran alamiah yang terbentuk dalam proses permesinan karena adanya beberapa faktor yang mempengaruhi proses permesinan diantaranya karena keahlian operator, getaran yang terjadi pada mesin ketidakaturan *feed mekanisme*, adanya cacat pada material dan gesekan antara chip dan material.

#### **Desain Ekperimen dengan Metode Taguchi**

Metode Taguchi adalah desain eksperimen adalah evaluasi secara serentak terhadap dua atau lebih faktor atau parameter terhadap kemampuannya untuk mempengaruhi rata-rata hasil atau variabilitas hasil gabungan dari karakteristik produk atau proses tertentu. Untuk mencapai hal itu secara efektif level dari kontrol harus dibuat bervariasi, hasil dari kombinasi pengujian tertentu diamati dan dikumpulkan untuk

selanjutnya dianalisa untuk menentukan faktor mana yang berpengaruh dan mengetahui hasil maksimal yang dapat diperoleh. Filosofi Taguchi terhadap kualitas terdiri dari dari tiga buah konsep, yaitu:

- a. Kualitas harus didesain ke dalam produk dan bukan sekedar memeriksanya.
- b. Kualitas terbaik dicapai dengan meminimumkan deviasi dari target. Produk harus didesain sehingga kokoh (*robust*) terhadap faktor lingkungan yang tidak dapat dikontrol.
- c. Biaya kualitas harus diukur dengan fungsi deviasi standar tertentu dan kerugian harus diukur pada seluruh sistem.

### Metode Penelitian

Langkah – langkah Ekperimen pada pelaksanaan proses penelitian sebagai berikut:

1. Persiapan, yaitu menyiapkan mesin skrap, mesin potong, spesimen uji, kompresor udara, *air cooling system* dan *adjustable spot cooler*.
2. Merangkai alat pendingin berupa kompresor udara, *air cooling system*, perangkat ukur suhu dan tekanan fluida pada penurun suhu udara dan nosel yang digunakan/ *adjustable spot cooler*.
3. Membuat Pembuatan Specimen, yang akan digunakan terlebih dahulu dipotong dengan mesin potong listrik, kemudian diskrap untuk meratakan permukaan dan pada sudut – sudut yang tajam dikikir, dimensi specimen adalah baja ST 42 dengan panjang 50 mm, lebar 50 mm dan tebal 40 mm
4. Memberi jarak pada spesimen uji untuk setiap jarak pengambilan data dengan pahat 5 mm, masing – masing permukaan digunakan untuk 3 alur.
5. Penerapan permesinan milling dengan menggunakan udara dingin, nitrogen

dan neat oil dengan melalui penukar kalor.

6. Dengan menggunakan table taguchi sesuai factor dan level pengaruh level terhadap rata-rata kekasaran permukaan daerah hasil proses milling pada material ST 42.
7. Interpretasi hasil didasarkan smaller the better, dengan analisis ini maka kekasaran terkecil merupakan hasil yang paling optimum.
8. Parameter dan level dianalisis Alat ini berfungsi sebagai pengganti sistem pendingin yang udah ada dimesin-mesin perkakas. Alat ini diterapkan tanpa membongkar sistem pendingin yang sudah ada. Sistem operasi yang otomatis dan hemat listrik, hal ini karena untuk meningkatkan efisiensi proses produksi, pada sisi waktu dan biaya. Alat didesain mampu menghasilkan udara-dingin yang aman bagi kesehatan operator dan ramah lingkungan, tetapi tetap efektif dalam penggunaannya. Proses dengan ANOVA.

Minyak alami yang digunakan adalah dromus drathon 816.03 (*neat cutting oil*) merupakan minyak dengan viskositas sedang yang mengandung additive sulfur dan klorine yang khusus diformulasikan memberikan daya potong tinggi, bau dan penguapannya sedikit selama pemakaian. dromus drathon 816.03 (*neat cutting oil*) berikut adalah keuntungan dromus drathon 816.03 (*neat cutting oil*), antara lain:

- a. Proses pengerjaannya mudah diamati, karena warnanya bening.
- b. Memberikan hasil yang lebih baik pada permukaan benda yang dikerjakan.
- c. Memiliki sifat pelumas dan pendingin yang baik.
- d. Berkemampuan tinggi dan tidak bau.

Karakteristik tipe dromus drathon 816.03 (*neat cutting oil*) Manual Produk *Drathon Lubricants*, dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik tipe dromus drathon 816.03 (*neat cutting oil*) Manual Produk *Drathon Lubricants, Best Industrial Maintenance Lubricant (2013)*

Properties	Test Method	Value/ Indeks
Density @ 15°C	ASTM D1298	0.889
Kin. Viscosity @ 40°C, Cst	ASTM D445	21.9
Kin. Viscosity @ 100°C, Cst	ASTM D445	4.3
Flash Point, °C	ASTM D93	185
Copper Corrosion Test, 3 Haors @ 50°C, @ 100°C,	ASTM D130	1A 1A
Color	ASTM D1500	3.0

### Pendingin Udara (Penurun Suhu Fluida)

Pendinginan dilakukan melalui refrigerasi dengan pemindahan energi panas yang terkandung di dalam ruangan tersebut. Fluida penukar kalor dan udara ruang yang dikondisikan agar mampu menurunkan udara pada suhu 7 – 10 ° C.

Dalam penelitian ini yang digunakan adalah desain eksperimen dengan empat faktor dan tiga level sesuai dengan pola orthogonal L9 seperti pada tabel 2.

Tabel 2. *Orthogonal array L9*

Kondisi Percobaan	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2

8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tabel 3. Perencanaan Data Ekperiman Taguchi Baja ST 42

Parameter	Faktor	Level 1	Level 2	Level 3
Spindel speed	A	360	565	950
Feed rate	B	36	63	98
Depth of cut	C	0,5	0,75	1
Cutting Condition	D	Neat Oil (MQL)	Udara Dingin	Nitrogen

Prinsip kerja sistem pendinginan yang digunakan adalah dengan memanfaatkan udara pendingin yang telah diatur agar mencapai suhu yang rendah dengan dilewatkan pada ruang pendingin

### Hasil dan Pembahasan

Hasil eksperimen dan perhitungan dengan menggunakan analisa varian sesuai parameter dan level dan pengolahan data dengan menggunakan analisis ANOVA, Analisis varian (ANOVA) Taguchi. ANOVA merupakan teknik yang digunakan dalam menganalisis data yang telah disusun dalam perencanaan eksperimen secara statistik. ANOVA digunakan untuk membantu mengidentifikasi kontribusi faktor sehingga akurasi perkiraan model dapat ditentukan. ANOVA untuk matrik ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. dapat dilihat pada tabel 4 sampai 11 sebagai berikut;

### Hasil Penelitian pada baja ST 42 dengan Milling

Nilai rata-rata kekasaran permukaan hasil proses milling pada material Baja ST 42 ditunjukkan pada tabel 4 dan tabel nilai rata-rata suhu proses pada tabel 5,



dan daya listrik pada Tabel 6, sebagai berikut.

Tabel 4. Nilai Rata-Rata Kekasaran Permukaan Hasil Proses *Milling* Pada Material Baja ST 42

Percobaan	Nilai Rata-Rata Kekasaran Permukaan Hasil Proses <i>Milling</i> ( $\mu\text{m}$ )
1	1.4829
2	0.9568
3	2.0851
4	1.9931
5	1.0393
6	2.5887
7	1.3608
8	2.6883
9	1.9761

Untuk mengidentifikasi pengaruh level dari faktor terhadap rata-rata kekasaran permukaan daerah hasil proses *milling*, rata-rata temperatur pahat, dan rata-rata konsumsi daya listrik mesin *milling* dilakukan pengolahan data respon (data asli) yang diperoleh melalui pengujian.

Tabel 5. Nilai Rata-Rata Temperatur Pahat Pada Material Baja ST 42

Percobaan	Nilai Rata-Rata Temperatur Pahat ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	27.70
2	21.77
3	27.93
4	27.37
5	24.60
6	21.10
7	20.73
8	27.27
9	25.73

Tabel 6. Nilai Rata-Rata Konsumsi Daya Listrik Pada Baja ST 42

Percobaan	Nilai Rata-Rata Daya Listrik Mesin <i>Milling</i> (Watt)
1	352.00
2	403.33
3	360.80
4	353.47
5	354.93
6	403.33
7	396.00
8	363.73
9	374.73

Perhitungan rata-rata kekasaran permukaan daerah hasil proses *milling*, rata-rata temperatur pahat, dan rata-rata konsumsi daya listrik mesin *milling* melalui kombinasi level dari masing-masing faktor dapat dilihat respon pengaruh level terhadap rata-rata kekasaran permukaan hasil proses *milling* pada material Baja ST 42 dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Respon Pengaruh Level Terhadap Rata-Rata Kekasaran Permukaan Hasil Proses *Milling* Pada Material Baja ST 42

Faktor	Level			Selisih (maks - min)	Ran king
	1	2	3		
<i>Spindel speed</i>	2.5083	1.877	2.0084	0.6346	4
<i>Feed rate</i>	1.613	1.565	3.216	1.6552	2
<i>Depth of cut</i>	2.253	1.642	2.495	0.8531	3
<i>Cutting condition</i>	1.4994	1.6354	3.2555	1.7561	1

Respon pengaruh level terhadap rata-rata temperatur pahat pada material Baja

ST 42 dapat dilihat pada Tabel 8 sebagai berikut;

Tabel 8. Respon Pengaruh Level Terhadap Rata-Rata Temperatur Pahat Pada Material Baja ST 42

Faktor	Level			Selisih (maks - min)	Ranking
	1	2	3		
<i>Spindel speed</i>	24.47	24.36	24.58	0.22	4
<i>Feed rate</i>	23.93	24.54	24.92	0.99	2
<i>Depth of cut</i>	24.02	24.96	24.42	0.93	3
<i>Cutting condition</i>	24.68	21.20	27.52	6.32	1

Respon pengaruh level terhadap rata-rata konsumsi daya listrik mesin milling

pada Material Baja ST 42 ditunjukkan pada Tabel 9 dibawah ini.

Tabel 9. Respon Pengaruh Level Terhadap Rata-Rata Konsumsi Daya

Faktor	Level			Selisih (maks - min)	Ranking
	1	2	3		
<i>Spindel speed</i>	378.64	370.58	378.16	8.07	3
<i>Feed rate</i>	367.16	374.00	386.22	19.07	2
<i>Depth of cut</i>	373.02	377.18	377.18	4.16	4
<i>Cutting condition</i>	356.89	400.89	365.93	34.96	1

Dari Tabel 9 dapat dilihat *cutting condition* menempati peringkat pertama untuk respon kekasaran permukaan daerah hasil proses milling, ini berarti bahwa *cutting condition* memiliki pengaruh paling besar terhadap hasil kekasaran permukaan hasil proses *milling*.

Tabel 9 menunjukkan *cutting condition* menempati peringkat pertama untuk respon temperatur pahat, ini berarti bahwa *cutting condition* memiliki pengaruh paling besar terhadap hasil temperatur pahat. Hal ini menunjukkan *cutting condition* menempati peringkat pertama untuk respon konsumsi daya listrik mesin milling, ini berarti *cutting condition* memiliki pengaruh paling besar terhadap konsumsi daya listrik mesin milling. Besarnya prosentase kontribusi masing-masing faktor terhadap nilai kekasaran permukaan, temperatur pahat, dan konsumsi daya listrik mesin milling dapat dihitung

menggunakan metode analisis varian (ANOVA).

#### **Analisa Varian (ANOVA) Kekasaran Permukaan, Temperatur Pahat, dan Konsumsi Daya Listrik Mesin Milling Material Baja ST 42**

#### **Analisa Varian (ANOVA) Kekasaran Permukaan Hasil Proses Milling pada Baja ST 42**

Untuk mengetahui besarnya pengaruh setiap faktor rata-rata kekasaran permukaan daerah hasil proses milling dapat dilakukan dengan menggunakan analisa varian. Hasil perhitungan dengan menggunakan analisa varian seperti yang terlihat pada lampiran A.3 dan ringkasan perhitungan anova nilai rata-rata kekasaran permukaan hasil proses milling pada material Baja ST 42 (Ra) dapat ditampilkan seperti pada Tabel 10 berikut ini:

Tabel 10. ANOVA Nilai Rata-Rata Kekasaran Permukaan Hasil Proses *Milling* Pada Material Baja ST 42 (Ra)

Faktor	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Hitung	SS'	Kontribusi (%)
<i>Spindel speed</i>	0.6707	2	0.3353	14.0975	0.6231	4.9555
<i>Feed rate</i>	5.3162	2	2.6581	111.7427	5.2686	41.9000
<i>Depth of cut</i>	1.1598	2	0.5799	24.3791	1.1123	8.8456
<i>Cutting condition</i>	5.6178	2	2.8089	118.0833	5.5702	44.2990
<i>Error</i>	0.1903	8	0.0237875			
Total					12.5742	100

Dari Tabel 10 di atas dapat dilihat bahwa semua faktor yang digunakan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap rata-rata kekasaran permukaan daerah hasil proses milling, hal ini dapat kita lihat dari nilai  $F_{hitung}$  yang lebih besar dari nilai  $F_{tabel}$  yang digunakan. Adapun faktor yang paling berpengaruh terhadap rata-rata nilai kekasaran permukaan daerah hasil proses milling adalah cutting condition dengan nilai kontribusi sebesar 44.2990% dan kontribusi terkecil dimiliki oleh spindle speed dengan kontribusi sebesar

4.9555%. Urutan persentase pengaruh faktor terhadap nilai kekasaran permukaan daerah hasil proses milling ini sama dengan Tabel 9.

#### Analisa Varian (ANOVA) Temperatur Proses *Milling* Baja ST 42

Untuk mengetahui besarnya pengaruh setiap faktor rata-rata temperatur pahat dilakukan perhitungan dengan menggunakan analisa varian. Tabel 11 berikut ini:

Tabel 11. ANOVA Nilai Rata-Rata Temperatur Pahat Proses *Milling* Pada Baja ST 42 (°C)

Faktor	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Hitung	SS'	Kontribusi (%)
<i>Spindel speed</i>	0.074	2	0.037	10.217	0.067	0.106
<i>Feed rate</i>	1.494	2	0.747	206.079	1.487	2.361
<i>Depth of cut</i>	1.316	2	0.658	181.457	1.308	2.077
<i>Cutting condition</i>	60.127	2	30.064	8293.379	60.120	95.456
<i>Error</i>	0.029	8	0.003625			
Total					62.982	100

Dari Tabel 11 di atas dapat dilihat bahwa semua faktor yang digunakan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap rata-rata temperatur pahat, hal ini dapat dilihat dari nilai  $F_{hitung}$  yang lebih besar dari nilai  $F_{tabel}$  yang digunakan. Faktor yang paling berpengaruh terhadap rata-rata nilai temperatur pahat adalah cutting condition dengan nilai kontribusi sebesar 95.456% dan kontribusi terkecil dimiliki oleh spindle speed dengan kontribusi sebesar 0.106%. Urutan persentase

pengaruh faktor terhadap nilai temperatur pahat sama dengan tabel 8.

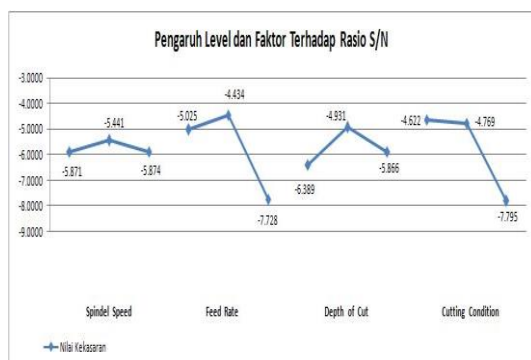
#### Analisa Varian (ANOVA) Konsumsi Daya Listrik pada Proses *Milling* Baja ST 42

Besarnya pengaruh setiap faktor rata-rata konsumsi daya listrik mesin milling dilakukan perhitungan dengan menggunakan analisa varian. dapat ditampilkan seperti pada Tabel 12, berikut ini:

Tabel 12. ANOVA Nilai Rata-Rata Konsumsi Daya Listrik Baja ST 42

Faktor	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Hitung	SS'	Kontribusi (%)
Spindel speed	122.733	2	61.366	11.911	112.429	3.201
Feed rate	559.767	2	279.883	54.327	549.463	15.644
Depth of cut	34.537	2	17.269	3.352	24.234	0.690
Cutting condition	2836.374	2	1418.187	275.276	2826.070	80.464
Error	41.215	8	5.151875			
Total					3512.196	100

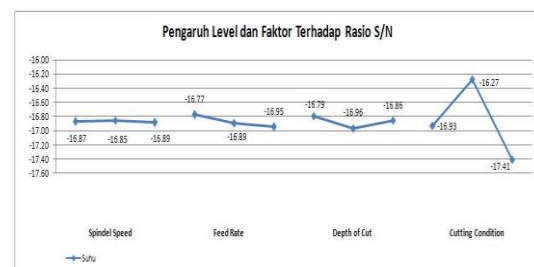
Dari tabel 12 di atas dapat dilihat bahwa semua faktor yang digunakan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap rata-rata konsumsi daya listrik mesin milling, hal ini dapat kita lihat dari nilai  $F_{hitung}$  yang lebih besar dari nilai  $F_{Tabel}$  yang digunakan. Adapun faktor yang paling berpengaruh terhadap rata-rata nilai konsumsi daya listrik mesin milling adalah cutting condition dengan nilai kontribusi sebesar 80.464% dan kontribusi terkecil dimiliki oleh depth of cut dengan kontribusi sebesar 0.690%. Urutan persentase pengaruh faktor terhadap nilai temperatur pahat ini sama dengan tabel 8 menunjukkan hasil eksperimen metode Taguchi, pengaruh level terhadap rasio S/N kekasaran permukaan.



Gambar 7. Grafik Rasio S/N Kekasaran Permukaan Daerah Hasil Proses Milling Pada Material Baja ST 42

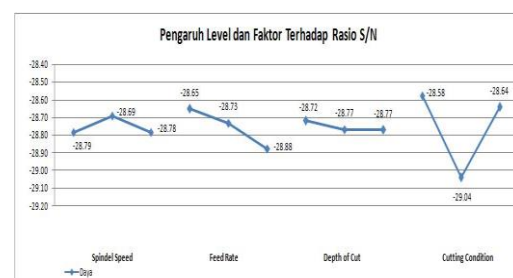
Gambar 7 menunjukkan bahwa, kondisi permesinan yang menghasilkan kekasaran permukaan paling halus pada spindle speed 565 rpm, feed rate 132 mm/rev, depth of cut 0.75 mm, dan

cutting condition udara dingin. Sedangkan nilai kekasaran paling tinggi dihasilkan pada spindle speed 580 rpm, feed rate 200 mm/min, depth of cut 1 mm, dan cutting condition nitrogen. Sedangkan pengaruh level terhadap rasio S/N untuk suhu proses ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Grafik Rasio S/N Temperatur Pahat Pada Material Baja ST 42

Pada grafik pengaruh level terhadap suhu proses sesuai gambar 7, menunjukkan bahwa kondisi permesinan yang menghasilkan temperatur pahat paling rendah pada spindle speed 950 rpm, feed rate 36 mm/min, depth of cut 1,0 mm, dan cutting condition udara dingin.



Gambar 9. Grafik Rasio S/N Konsumsi Daya Listrik Permesinan Baja ST 42

Pada grafik pengaruh level dan proses permesinan terhadap daya mesin pada Gambar 9 kondisi permesinan yang membutuhkan daya permesinan paling kecil pada spindle speed 350 rpm, feed rate 36 mm/min, *depth of cut* 0.5 mm, dan *cutting condition neat oil*. Sedangkan konsumsi daya listrik yang tinggi dihasilkan pada *spindle speed* 580 rpm, feed rate 200 mm/min, *depth of cut* 1 mm, dan *cutting condition* udara dingin.

Untuk mendapatkan nilai optimasi proses milling dengan menggunakan fluida alami yang didinginkan menjadi satu isu strategis teknologi permesinan, maraknya isu pelestarian lingkungan berimbas juga pada proses produksi dengan menggunakan mesin produksi. Proses permesinan saat ini memiliki kecenderungan menggunakan proses *dry* atau tanpa pelumasan dan penggunaan pelumas *vegetable oil*. Hal ini dikarenakan *cutting fluid* berbahan mineral oil memiliki kecenderungan menimbulkan limbah cair yang dapat membahayakan kelestarian lingkungan. Karakteristik suatu permukaan memegang peranan penting dalam perancangan komponen mesin atau peralatan. Karakteristik permukaan perlu dinyatakan dengan jelas, karena berkaitan dengan gesekan, keausan, pelumasan, ketahanan lelah, faktor *assembly* dua atau lebih komponen mesin dan sebagainya.

Penelitian-penelitian sebelumnya telah banyak membahas tentang parameter dan hubungan parameter terkait proses *milling* dan prediksi kekasarannya. dari diagram Isikawa (*fishbone diagram*), terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kekasaran permukaan hasil proses permesinan, beberapa yang paling berpengaruh adalah *cutting tools*, *feed rate*, *depth of cut* dan pendinginan, dan vibrasi. Pada penelitian yang dilakukan tidak semua ukur dan di hitung.

Parameter yang di ukur adalah suhu, daya dan permukaan hasil proses permesinan dengan menggunakan tiga jenis pendinginan yang di dinginkan dengan menggunakan alat penukar kalor dengan target suhu berada pada kisar 6 – 11<sup>0</sup>C dengan asumsi bahwa dengan semakin besar selisih suhu akan menghasilkan produk milling dengan kekasaran yang berada pada nilai nilai standar industri manufaktur.

### Kesimpulan

Dari hasil pengujian untuk mendapatkan optimasi permesinan *milling* pada Baja ST 42 dengan variasi pendingin menggunakan metode taguchi dapat disimpulkan bahwa, dari ketiga material di atas untuk mencapai optimasi permesinan memiliki yang kondisi yang sama sebagai berikut :

- Berdasarkan eksperimen untuk mendapatkan nilai kekasaran paling kecil, faktor yang dominan adalah *feed rate* dan pendingin udara dingin, hal ini dilihat dari data kekasaran permukaan pada tiga material, *feed rate* yang rendah dan penggunaan udara dingin merupakan kondisi yang paling optimal.
- Fluida Udara dingin yang digunakan dalam pendinginan berpengaruh untuk menurunkan suhu proses, terlihat dari data eksperimen pada tiga material udara dingin sebagai faktor yang paling dominan.
- Daya motor dalam proses milling dipengaruhi faktor gesek, hal ini terlihat dari data semua proses permesinan *depth of cut* yang rendah dan penggunaan pendingin berbasis minyak masih menjadi faktor dominan rendahnya tingkat konsumsi daya listrik.

## Referensi

- [1] Rochim, Taufiq. (2007). "*Klasifikasi Proses, Gaya dan Daya Permesinan*", Institut Teknologi Bandung.
- [2] Soejanto, Irwan. 2009. *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*. Bandung : Graha Ilmu.
- [3] Wang M. Y., Chang H. Y. (2004), Experimental Study of Surface roughness in Slot End Milling Al2014-T6, International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Vol. 8 No. 1, Tatung University, Taiwan.
- [4] Bernardos P.G., Vosniakos G.C. (2003), Predicting Surface Roughness in Machining: a Review, International Journal of Machine Tools & Manufacturing, National Technical University of Athens. Greece.
- [5] Yang, John L. et al. (2001), A Systematic Approach for Identifying Optimum Surface Roughness Performance in End Milling Operations, Journal Industrial Technology, Iowa State University.
- [6] Sunaryo, 2010, Optimasi Parameter Pemesinan Proses CNC Frais Terhadap Hasil Kekasaran Permukaan Dan Keausan Pahat Menggunakan Metode Taguchi