

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Handoko, et al (2008), operator mesin perkakas hingga kini masih dihadapkan pada masalah penentuan parameter pemesinan seperti *cutting speed*, *feedrate* dan *depth of cut* yang optimum terutama pada operasi *finishing*. Penelitian tersebut dilakukan dengan memotong permukaan datar pada balok aluminium dengan pahat HSS *end mill* empat *fluet* diameter 16 mm pada lima variasi putaran *spindle*, tiga variasi *depth of cut* dan lima variasi *feedrate*. Hasil penelitian didapatkan bahwa kekasaran permukaan (R_a) terbukti tergantung pada *spindle speed* (n), *feed rate* (f) serta *depth of cut* (t).

Chen, et al (2012), meneliti mengenai pengaruh kekasaran permukaan akhir-pabrik pada kinerja pemotongan-mesin kecepatan tinggi. Penelitian tersebut menggunakan mesin HSC untuk pemakanan benda kerja DIN 1.2344. Penelitian ini menghasilkan kekasaran permukaan sebesar $0,23 \pm 0,03 \mu\text{m}$, dengan kecepatan pemotongan 251,32 m/mnt, *feed per tooth* 0,1 mm/tooth, *axial cutting depth* 1,0 mm dan *radial cutting depth* 0,75 mm.

Sonief, et al (2013), permasalahan kekasaran permukaan tidak dapat dihindari seiring dengan seringnya penggunaan proses *milling* karena kekasaran permukaan akan mempengaruhi kualitas benda kerja yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan pahat *end mill* pemakanan frais tegak dengan bahan aluminium didapatkan kecepatan pemakanan berpengaruh negatif dan kecepatan spindle berpengaruh positif serta proses pemakanan *climbing* lebih halus dari pada proses pemakanan *conventional* karena pada pemakanan *climbing* pembuangan geram ke belakang pahat dan sedikit geram yang dibawa oleh pahat.

Dimitrios, et al (2011), *ball end mill* digunakan untuk mencapai kualitas permukaan yang tinggi, terutama dalam geometri yang kompleks. Sejumlah parameter pemotongan diuji (*axial dan radial depth of cut*, *feed rate*, kemiringan sudut ϕ dan ω) untuk melakukan 96 percobaan dan hasilnya akan diolah dengan menggunakan analisis regresi dan analisis varian. Pada proses *milling* masih dimungkinkan untuk penerapan beberapa strategi untuk menghasilkan parameter yang lebih optimum sehingga menghasilkan kualitas permukaan yang lebih baik yaitu dengan proses pemakanan miring (*oblique*).

Penelitian ini menggunakan proses pemakanan benda kerja dengan *conventional* miring. Parameter yang digunakan dalam proses pemakanan yaitu kecepatan putaran *spindle* dan kecepatan pemakanan. Penelitian dilakukan dengan tujuan mengetahui pengaruh kekasaran permukaan dengan parameter pemakanan. Penelitian ini menggunakan 3 variasi kecepatan putaran spindle, 3 variasi kecepatan pemakanan, dan 3 variasi kemiringan pahat. Hasil yang diharapkan adalah parameter pemotongan yang optimum untuk menghasilkan kualitas permukaan yang baik.

2.2 Pemotongan Logam

Menurut Rochim (1985:1) proses pemotongan logam adalah suatu proses yang digunakan untuk mengubah bentuk suatu produk dari logam (komponen mesin) dengan cara memotong. Tergantung dari cara pemotongannya, maka pemotongan logam dapat dikelompokkan menjadi 4, yaitu:

1. Proses pemotongan dengan mesin las
2. Proses pemotongan dengan mesin press
3. Proses pemotongan dengan mesin perkakas
4. Proses pemotongan non konvensional

Proses pemesinan merupakan proses pembentukan suatu produk dengan pemotongan dan menggunakan mesin perkakas. Gerak relatif dari pahat terhadap benda kerja dapat dipisahkan menjadi dua macam komponen gerakan yaitu gerak potong (*cutting movement*) dan gerak makan (*feeding movement*). Pemesinan merupakan salah satu teknologi yang banyak digunakan dalam industri, sehingga penelitian mengenai pemesinan tetap dilakukan, dengan tujuan menghasilkan kualitas hasil pemotongan yang semakin baik serta hubungan parameter pemotongan agar didapatkan mutu suatu produk yang lebih baik pula. Menurut jenis kombinasi dari gerak potong dan gerak makan maka proses pemesinan dikelompokkan menjadi tujuh macam proses berlainan sesuai dengan gambar 2.1

jenis proses		gerak potong	gerak makan
membubut		benda kerja m/min	pahat mm/min
menggurdil		pahat m/min	pahat mm/min
mengefreis		pahat m/min	benda kerja mm/min
mengerinda rata		pahat m/s	benda kerja
mengerinda silindris		pahat m/s	benda kerja 1 & 2
sekrup meja (a) sekrup (b)		a benda kerja b pahat m/min	a pahat b benda kerja
memarut dan menggergaji		pahat m/min	

Gambar 2.1 Klasifikasi proses pemesinan menurut jenis gerakan pahat terhadap benda kerja

Sumber : Rochim (1985: 6)

2.3 Proses Milling

Pengefraisan (*milling*) merupakan salah satu proses pemotongan yang paling serbaguna untuk pembuatan komponen – komponen dengan bentuk bukan rotational. Mesin *milling* merupakan suatu proses dimana alat potong berputar pada sumbunya dan melakukan pemakanan terhadap benda kerja. Mesin *milling* dilakukan untuk pemakanan permukaan benda kerja dengan akurasi yang tinggi. Proses pemakanan dilakukan satu kali atau dua kali putar dengan satu atau lebih mata pahat dengan benda kerja di letakkan diam dan dijepit pada ragum, hal ini kemudian dimakamkan dengan pahat yang berputar.

Macam – macam mesin *milling* yang dibedakan menurut posisi *spindle* nya :

1. Mesin *milling horizontal*

Mesin jenis ini memiliki sumbu pisau yang sejajar dengan permukaan benda kerja. Contoh mesin *milling horizontal* dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Mesin *milling horizontal*
Sumber : Hidayat (2013)

2. Mesin *milling vertical*

Mesin jenis ini memiliki sumbu pisau yang tegak lurus dengan permukaan benda kerja. Contoh mesin *milling vertical* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Mesin *milling vertical*
Sumber : Hidayat (2013)

3. Mesin *milling universal*

Mesin jenis ini posisi sumbu pisau dapat dirubah sehingga dapat digunakan untuk sumbu pisau sejajar maupun tegak lurus. Contoh mesin *milling universal* dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Mesin *milling universal*
Sumber : Hidayat (2013)

2.3.1 Fungsi Mesin *Milling*

1. Pengefraisan muka

Penggunaan mesin milling untuk meratakan bidang atas benda kerja, mertakan ujung atau tepi benda kerja, dan mengefrais alur dangkal pada benda kerja.

2. Pengefraisan spiral

Pada benda kerja yang besar dan akan dilakukan pemakanan yang terbilang tebal, biasanya dilakukan dengan pengefraisan spiral.

3. Pengefraisan datar

Pengefraisan datar seringkali digunakan untuk permukaan datar, pembuatan alur lebar yang dangkal namun pengfraisan ini hanya dapat melalui pemakanan yang tipis.

4. Pemotongan roda gigi

Pengefraisan jenis ini menggunakan cutter frais roda gigi yang dikhususkan untuk pembuatan berbagai macam roda gigi.

5. Pengeboran

Dengan menggunakan mesin frais, bisa juga dilakukan pengeboran. Pengeboran ini seringkali dilakukan pada mesin milling vertikal untuk membuat lubang beragam ukuran dan ketelitian yang tinggi.

6. Reaming

Reaming adalah sebuah proses pembuatan lubang yang akurat pada benda kerja, peralatan yang digunakan dalam proses pembuatan lubang ini adalah reamer

7. Boring

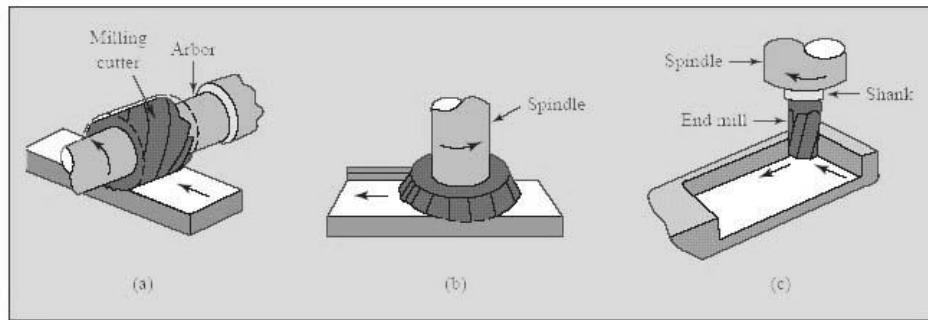
Boring biasanya merupakan proses lanjutan dari pengeboran, fungsinya adalah melakukan pembesaran lubang dengan akurasi yang tinggi. Alat yang digunakan biasanya terbuat dari karbida.

8. Pembuatan celah

Dengan bantuan alat yang bernama slotting tool, mesin milling horizontal dapat digunakan untuk membuat celah pada benda kerja.

2.3.2 Klasifikasi Mesin *Milling*

Menurut klasifikasi nya, mesin *milling* dibagi menjadi 3, seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.5, yaitu :



Gambar 2.5 Klasifikasi mesin *milling* (a) *slab milling*; (b) *face milling*; (c) *end milling*
 Sumber : *Anonymous* (2011)

a. *Slab Milling*

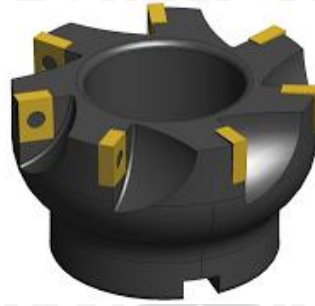
Dalam pengefraisan datar atau *slab milling* tepi – tepi sisi potongnya membentuk permukaan sebuah silinder dan dapat lurus (sejajar dengan sumbu silinder) atau miring. Pisau ini berukuran cukup lebar untuk dapat mengerjakan seluruh lebar permukaan benda kerja. Gerak utamanya adalah perputaran pisau sementara gerak pengumpanan diberikan pada benda kerja. Pahat dengan gigi yang miring lebih sering digunakan dari pada mata gigi lurus, dikarenakan beban pada mata gigi yang lebih rendah saat operasi, sehingga permukaan benda kerja lebih halus dan juga mengurangi gaya pada pahat. Pahat *slab mill* dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Pahat *Slab Mill*
 Sumber : *Antika* (2012)

b. *Face Milling*

Apabila suatu operasi pengefraisan menggunakan gigi – gigi yang dipasang ke muka pisau yang tegak lurus terhadap sumbu , maka operasi ini disebut pengefraisan muka (*face milling*). Pahat *face mill* dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Pahat *Face Mill*
Sumber : Antika (2012)

c. *End Milling*

Tepi – tepi sisi potong yang ditempatkan di permukaan silindris pisau akan menciptakan sebuah pisau frais ujung (*end mill*). Pisau frais ini merupakan salah satu alat iris yang paling serbaguna karena dapat dibuat mengikuti lintasan apapun dalam suatu bidang dan tegak lurus (atau menyudut) terhadap permukaan benda kerja. Pahat *End Mill* dapat dilihat pada gambar 2.8.



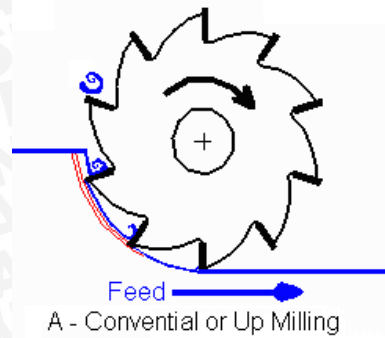
Gambar 2.8 Pahat *End Mill*
Sumber : Antika (2012)

2.3.3 Mekanisme *Milling*

Mekanisme pemakanan mesin *milling* dapat dibedakan berdasarkan arah rotasi pahat yaitu *conventional milling* dan *climb milling*. Proses tersebut memiliki perbedaan yang didasarkan pada gerak utama dan gerak pengumpanan.

1. *Conventional* atau *up milling*

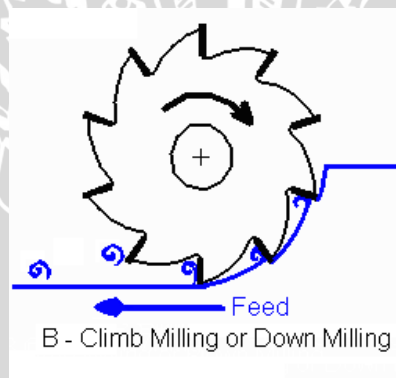
Pada pengefraisan naik gerak pengumpanannya berlawanan dengan perputaran pisau, gigi pisau masuk pada kedalaman minimum dengan gaya awal yang dibutuhkan relatif rendah. Mekanisme *up milling* dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Up milling*
Sumber : Stanton (2002)

2. *Climb* atau *down milling*

Pada pengefraisan turun gerak pengumpanannya searah dengan perputaran pisau, dalam hal ini pemotongan diawali pada permukaan dengan ketebalan tatal yang dibutuhkan cukup tinggi dan konstruksi mesin harus kuat serta dilengkapi dengan transmisi yang bebas slip balik. Mekanisme *up milling* dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 *Down milling*
Sumber : Stanton (2002)

2.3.4 Parameter Pemotongan

Proses pemesinan sangat dipengaruhi oleh parameter pemotongan agar dihasilkan mutu suatu produk yang baik. Tiga parameter utama pada setiap proses adalah kecepatan potong (*cutting speed*), kecepatan pemakanan (*feed rate*) dan kedalaman pemakanan (*depth of cut*). Parameter pemotongan tersebut adalah :

1. Kecepatan pemotongan (*cutting speed*)

Kecepatan potong merupakan kecepatan gerakan utama pahat dalam proses menyayat benda kerja. Kecepatan potong dipengaruhi oleh kekerasan material benda kerja, material pahat yang digunakan, geometri pahat dan tingkat kehalusan yang diinginkan. Kecepatan pemotongan umumnya dinyatakan dalam satuan meter per

menit (m/min). Rekomendasi dalam pemilihan parameter kecepatan potong untuk pahat HSS dan karbida dijelaskan pada Tabel 2.1.

Pada pemotongan yang kasar digunakan putaran rendah dan kecepatan pemakanan yang besar (cepat). Untuk menghasilkan mutu dari permukaan yang lebih baik maka pemotongan tingkat *finishing* (penyelesaian) putaran dipertinggi, keruncingan pahat dikurangi dan kecepatan pemakanan diperlambat.

Persamaan untuk mencari kecepatan potong (*cutting speed*) adalah:

$$Cs = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Dengan :

Cs = Kecepatan Potong (m/menit)

d = diameter benda kerja (mm)

n = putaran spindel (rpm)

Tabel 2.1 Data untuk Mesin Frais

Material	Kekerasan BHN	HSS		Carbide	
		Speed m/min	Feed mm/tooth	Speed m/min	Feed mm/tooth
C 20 Steel	110 – 160	20	0,13	90	0,18
C 35 Steel	120 – 180	25	0,13	80	0,18
C 50 Steel	160 – 200	20	0,13	60	0,18
Alloy Steel	180 – 200	30	0,10	60	0,18
Alloy Steel	220 – 300	18	0,08	90	0,18
Alloy Steel	220 – 300	14	0,08	60	0,15
Alloy Steel	300 – 400	14	0,05	60	0,13
Stainless Steel	200 – 300	20	0,10	85	0,13
Cast Iron	180 – 220	16	0,18	58	0,20
Malleable iron	160 – 240	27	0,15	85	0,18
Cast steel	140 – 200	16	0,15	50	0,18
Copper	120 – 160	38	0,15	180	0,15
Brass	120 – 180	75	0,28	240	0,25
Bronze	160 – 200	38	0,18	180	0,15
Aluminium	70 – 105	120	0,28	240	0,25
Magnesium	40 – 60	210	0,28	380	0,25

Sumber : Kalpakjian, 2000

2. Kecepatan pemakanan (*feed rate*)

Kecepatan pemakan dihitung berdasarkan ketebalan geram yang dapat dipotong oleh setiap gigi pahat, biasanya disebut pemakanan per gigi. Besarnya pemakanan tiap gigi tergantung oleh beberapa faktor yaitu jenis material yang dipotong, jenis pahat yang digunakan, kedalaman pemotongan dan hasil akhir yang diinginkan. Untuk menghitung kecepatan pemakanan dapat digunakan satuan $\mu\text{m/put}$ atau mm/menit.

Persamaan untuk mencari kecepatan pemakanan (*feed rate*) adalah:

$$S_m = S_z \cdot Z \cdot n \quad (2.2)$$

Dengan :

S_z = pemakanan tiap gigi (mm/gigi)

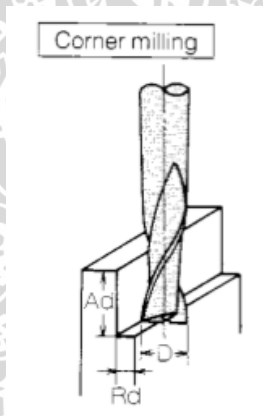
Z = jumlah gigi potong pahat

N = putaran spindle mesin (rpm)

S_m = Kecepatan pemakanan (mm/mnt)

3. Kedalaman potong (*depth of cut*)

Kedalaman potong (*depth of cut*) adalah tebal bagian benda kerja yang dibuang dari benda kerja, atau jarak antara permukaan yang dipotong terhadap permukaan yang belum terpotong. Besarnya kedalaman pemakanan berhubungan erat dengan kecepatan pemakanan dan juga dari diameter pahat tersebut. Semakin tinggi kecepatan pemakanan, maka pahat yang digunakan semakin kecil diameternya dan kedalaman pemakanan pada benda kerja menjadi kecil. Kedalaman potong dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 *Dept of cut*
Sumber : John (2010)

Keterangan gambar :

D = diameter pahat

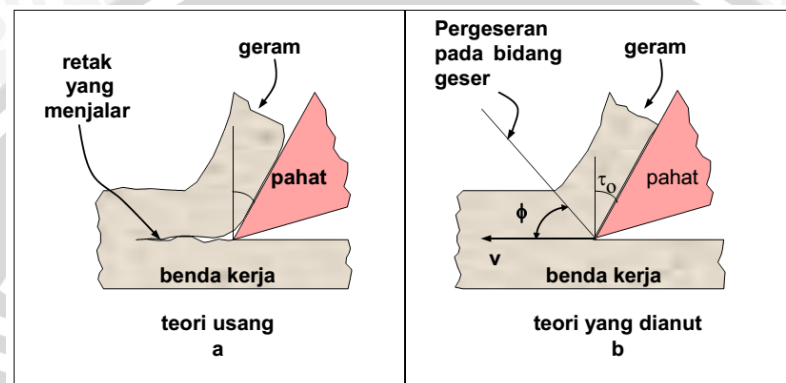
Ad = *Axial Depth of cut*

Rd = *Radial width of cut*

2.3.5 Mekanisme Pembentukan Geram

Pada mulanya diperkirakan bahwa geram terbentuk karena adanya retak rambut (*micro crack*) yang timbul pada benda kerja tepat diujung pahat pada saat pemotongan dimulai. Dengan bertambahnya tekanan pahat, retak rambut tersebut menjalar kedepan

sehingga terjadilah geram, lihat gambar 2.12a, itu merupakan teori lama, karena logam yang pada umumnya bersifat ulet (*ductile*) apabila mendapat tekanan akan timbul tegangan (*stress*) didaerah sekitar konsentrasi gaya penekanan dari mata potong pahat. Tegangan pada logam (benda kerja) tersebut mempunyai orientasi yang kompleks dan pada salah satu arah akan terjadi tegangan geser (*shearing stress*) yang maksimum. Apabila tegangan geser ini melebihi kekuatan logam yang bersangkutan maka akan terjadi deformasi plastis (perubahan bentuk) yang menggeser dan memutuskan material benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser (*shear plane*), lihat gambar 2.12 b.



Gambar 2.12 Teori yang menerangkan terjadinya geram
Sumber: Rochim (1985: 22)

Geram yang dihasilkan memiliki ketebalan berbeda – beda dipengaruhi oleh gerak makan gigi dan sudut posisi pada setiap perubahan harga karena perubahan posisi mata potong. Geram dari proses pemotongan memiliki bentuk beragam tergantung pada jenis material benda kerja dan kondisi pemotongan yang digunakan. Pada umumnya, bentuk geram dapat dibagi menjadi tiga, yaitu :

1. Geram kontinyu (*continuous chips*)

Geram ini terbentuk akibat proses pemesinan material ulet yang memiliki koefisien gesek rendah. Geram kontinyu akan timbul pada kecepatan pemotongan tinggi.

2. Geram kontinyu dengan *built up edge*

Geram ini terbentuk akibat proses pemesinan material ulet yang memiliki koefisien gesek relative tinggi sehingga menyebabkan geram menempel pada mata pahat yang berlapis – lapis. Geram ini dapat menyebabkan permukaan benda kerja menjadi kasar.

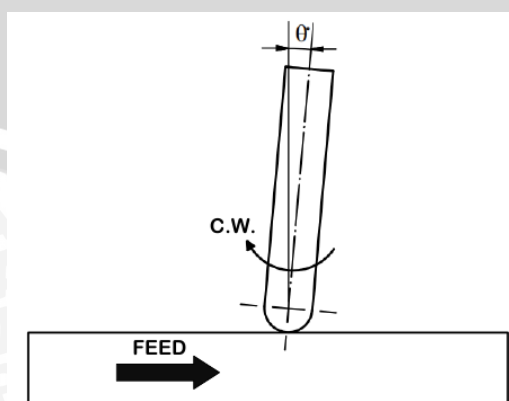
3. Geram tak kontinyu (*discontinuous chips*)

Geram ini terbentuk akibat proses pemesinan material yang rapuh. Ketika terjadi geram ini, tepi potong menghaluskan ketidakrataan sehingga diperoleh penyelesaian yang cukup baik. Pahat memiliki umur yang cukup pahat dan kerusakan biasanya terjadi akibat aksi penggerusan singgung pahat.

2.4 *End Mill*

Pahat *end mill* memiliki diameter kecil (*tapered shank*) dan juga diameter yang besar (*straight shank*) yang terpasang pada poros mesin milling. Pahat *End mill* dapat dibuat dari *high-speed steel* (HSS) atau karbida. Pahat dapat bergerak pada sumbu tegak lurus terhadap permukaan benda kerja maupun pemakanan miring dengan pemakanan meruncing atau melengkung. Pemakanan dengan pahat *end mill* dapat menghasilkan pemotongan secara setengah lingkaran maupun pemakanan kantong. Pahat *end mill* dapat bekerja pada permukaan pahat maupun pada tepian pahat. Dengan pahat *end mill* dapat menghasilkan benda kerja dengan variasi ukuran dan bentuk.

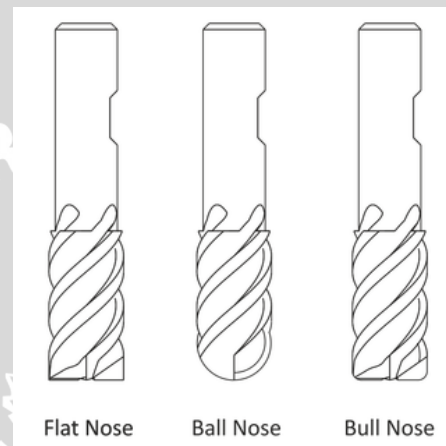
Dalam proses *end mill*, kecepatan pemotongan bervariasi sesuai dengan posisi kontak dari ujung pemotongan dalam kaitannya dengan benda kerja. Kecepatan ujung pemotongan pusat adalah nol. Karena itu, ketika sumbu alat adalah normal terhadap bidang pemotongan, permukaan mesin yang dihasilkan dapat menjadi kasar dan pemakaian alat dapat mendekati pemotongan nol di area kecepatan. Dalam hal ini, pengaturan sudut kemiringan pemesinan dapat meningkatkan kinerja alat dan permukaan kekasaran (Dimitrios et. al. 2011). Penempatan alat pemotong dibedakan sesuai dengan sudut kemiringan antara alat (θ), putaran *spindle* (C.W. atau *clockwise*) dan arah pemakanan (*Feed*) pada pemakanan *conventional*. Dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Strategi Proses *End Mill*

2.4.1 Bentuk Pahat *End Mill*

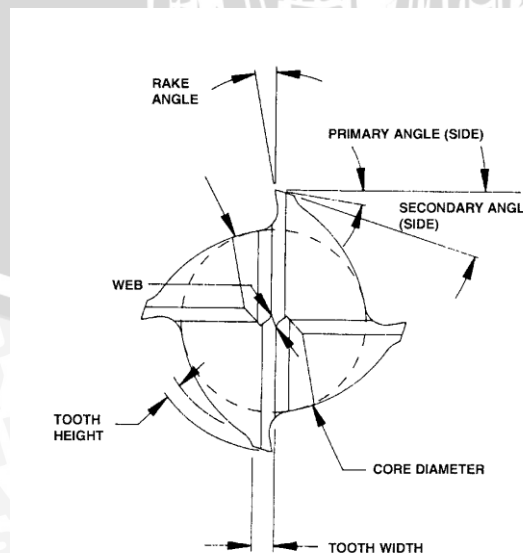
Jenis pahat *end mill* yang paling banyak digunakan yaitu pahat dengan permukaan bawah rata (*flat bottom end mill*) yang digunakan dalam operasi pemakanan permukaan yang datar dengan sudut tajam antara permukaan bawah dengan dinding, *end mill* dengan setengah lingkaran (*ball nose end mill*) digunakan untuk 3D *machining* dengan variasi permukaan, dan *end mill* dengan radius sudut (*bull nose end mill*) digunakan dalam pemakanan permukaan datar yang membutuhkan sudut antara dinding dan bagian bawah. Jenis pahat *end mill* dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14 Jenis pahat *end mill*
Sumber : HSMWork (2009)

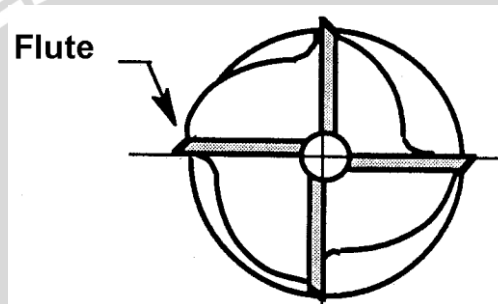
2.4.2 Fitur *End Mill*

Dalam pemotongan logam, hal yang memiliki pengaruh terhadap konfigurasi *cutting edge* adalah sudut, orientasi permukaan gigi, dan bentuk mata pahat yang digunakan untuk memotong benda. Desain *end mill* digambarkan pada gambar 2.15.



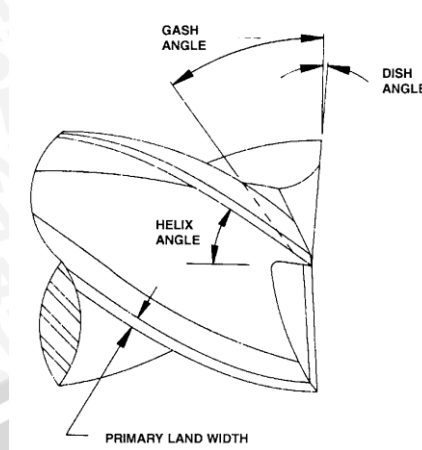
Gambar 2.15 Desain *End Mill*
Sumber : Melin (2013)

- **Cutting Edge** merupakan garis lurus yang membentuk sudut dengan sumbu *cutter*.
- **Axial Runout** merupakan perbedaan antara pembacaan indicator tertinggi dan terendah diambil dari permukaan *cutter* yang berdekatan dengan diameter luar.
- **Cutter Sweep (Runout)** bahan yang dihilangkan oleh *cutter*.
- **Cutting Edge** adalah ujung dari gigi pemotong. Perpotongan dua permukaan halus yang telah diselesaikan umumnya dari sebuah sudut kurang dari 90° .
- **Cutting Edge Angle** adalah sudut yang dibentuk oleh *cutting edge* dan sumbu alat.
- **Flute** adalah alur sepanjang pisau *end mill*, sedangkan bagian tajam sepanjang tepi pisau disebut gigi. *Flute* dapat dilihat pada gambar 2.16. Pisau *milling* mungkin memiliki satu sampai banyak gigi, dengan 2, 3, dan 4. Biasanya, lebih banyak jumlah giginya lebih cepat proses pemotongan bahan.



Gambar 2.16 *Flute*
Sumber : Melin (2013)

- **Shank** adalah bagian silinder yang tidak beralur dari alat yang digunakan untuk ditempatkan pada poros mesin.
- **Tooth** adalah ujung pemotongan dari *end mill*.
- **Dish Angle** adalah sudut yang terbentuk pada akhir *cutting edge* dan bidang tegak lurus terhadap sumbu *cutter*.
- **Gash (Notch)** adalah pemotongan sekunder pada alat untuk memberikan ruang *chip* yang berada pada sudut – sudut.
- **Gash Angle** adalah sudut bantuan dari fitur *gash*.
- **Helix Angle** adalah sudut yang dibentuk oleh garis singgung helix dan bidang melalui sumbu *cutter* atau sudut yang bermata helix dengan bidang yang berisi sumbu pemotong silinder. Dapat dilihat pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 *Helix Angle*
 Sumber : Melin (2013)

2.5 Kekasaran Permukaan

Salah satu karakteristik geometris yang ideal dari suatu komponen adalah permukaan yang halus (Munadi,1988:223). Kehalusan permukaan mempunyai peranan yang penting dalam perencanaan suatu komponen mesin khususnya menyangkut masalah gesekan pelumasan, keausan, dan tahanan terhadap kelelahan.

Karakteristik geometri bentuk permukaan bila ditinjau dari profilnya dapat diuraikan menjadi dua macam diantaranya:

1. Permukaan yang kasar (*roughness*)

Permukaan yang kasar berbentuk gelombang pendek yang tidak teratur dan terjadi karena getaran pisau (pahat) potong atau proporsi yang kurang tepat dari pemakanan (*feed*) pisau potong dalam proses pembuatannya. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Permukaan yang kasar
 Sumber: Munadi (1988:225)

2. Permukaan yang bergelombang (*waviness*)

Pada gambar 2.19 menjelaskan permukaan yang bergelombang mempunyai bentuk gelombang yang lebih panjang dan tidak teratur yang dapat terjadi karena beberapa faktor misalnya posisi senter yang tidak tepat, adanya gerakan tidak lurus (*non linier*) dari pemakanan (*feed*), getaran mesin, tidak seimbang (*balance*) batu gerinda, perlakuan panas (*heat treatment*) yang kurang baik, dan sebagainya.



Gambar 2.19 Permukaan yang bergelombang
 Sumber: Munadi (1988:225)

Secara lebih rinci lagi, ketidakteraturan dari suatu profil (konfigurasi penampang permukaan) dapat dilihat pada tabel 2.2.

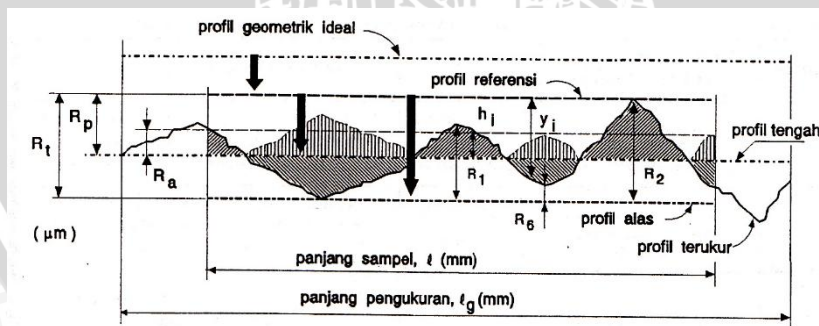
Tabel 2.2 Ketidakteraturan Suatu Profil

Tingkat	Profil terukur; bentuk grafik hasil pengukuran	Istilah	Contoh kemungkinan penyebabnya
1		Kesalahan bentuk (form error)	Kesalahan bidang-bidang pembimbing mesin perkakas dan benda kerja, kesalahan posisi pengecaman benda kerja,
2		Gelombang (waviness)	Kesalahan bentuk perkakas, kesalahan penyenteran perkakas, getaran dalam proses pemesinan.
3		Alur (grooves)	Jejak/bekas pemotongan (bentuk ujung pahat, gerak makan).
4		Serpihan (flakes)	Proses pembentukan geram, deformasi akibat proses pancar pasir, pembentukan module pada proses electroplating.
			Kombinasi ketidakteraturan dari tingkat 1 sampai dengan 4.

TEKNIK PRODUKSI, MESIN, FTI-ITB

Sumber: Rochim (2001:55)

2.5.1 Profil Permukaan



Gambar 2.20 Posisi profil referensi, profil tengah dan profil dasar terhadap profil terukur untuk satu panjang sampel

Sumber: Rochim (2001:56)

Pada gambar 2.20 diatas, secara garis besar profil permukaan hasil proses pemesinan dapat dibagi menjadi bagian-bagian berikut:

1. Profil Geometris Ideal (*Geometrically Ideal Profile*)



Profil ini merupakan profil dari geometris permukaan yang ideal yang tidak mungkin diperoleh dikarenakan banyaknya faktor yang mempengaruhi dalam proses pembuatannya. Bentuk dari profil geometris ideal ini dapat berupa garis lurus, lingkaran, dan garis lengkung.

2. Profil Referensi (*Reference Profile*)

Profil ini digunakan sebagai dasar dalam menganalisis karakteristik dari suatu permukaan. Bentuknya sama dengan bentuk profil geometris ideal, tetapi tepat menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur pada panjang sampel yang diambil dalam pengukuran.

3. Profil Terukur (*Measured Profile*)

Profil terukur adalah profil dari suatu permukaan yang diperoleh melalui proses pengukuran. Profil inilah yang dijadikan sebagai data untuk menganalisis karakteristik kekasaran permukaan produk pemesinan.

4. Profil Alas (*Root Profile*)

Profil dasar adalah profil referensi yang digeserkan kebawah hingga tepat pada titik paling rendah pada profil terukur.

5. Profil Tengah (*Centre Profile*)

Profil tengah adalah profil yang berada ditengah-tengah dengan posisi sedemikian rupa sehingga jumlah luas bagian atas profil tengah sampai pada profil terukur sama dengan jumlah luas bagian bawah profil tengah sampai pada profil terukur. Profil tengah ini sebetulnya merupakan profil referensi yang digeserkan kebawah dengan arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal sampai pada batas tertentu yang membagi luas penampang permukaan menjadi dua bagian yang sama yaitu atas dan bawah.

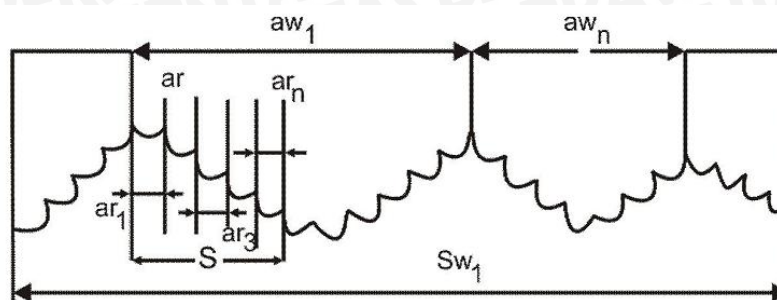
6. Kedalaman Total (*Peak to Valley*), R_t

Kedalaman total ini adalah besarnya jarak dari profil referensi sampai dengan profil dasar. Satuannya adalah dalam micron (μm).

7. Kedalaman Perataan (*Peak to Mean Line*), R_p

Kedalaman perataan (R_p) merupakan jarak rata-rata dari profil referensi sampai dengan profil terukur. Bila juga dikatakan bahwa kedalaman perataan merupakan jarak antara profil tengah dengan profil referensi

2.5.2 Parameter Permukaan



Gambar 2.21 Lebar gelombang dan lebar kekasaran
Sumber: Munadi (1988:225)

Pada Gambar 2.21 menjelaskan beberapa parameter yang bisa digunakan untuk menjelaskan ketidakrataan permukaan adalah

1. Lebar Gelombang (*Waviness Width*), A_w

Lebar gelombang adalah jarak rata-rata aritmetis dari jumlah jarak a_{wi} yang terletak di antara dua puncak gelombang pada profil terukur yang letaknya berdekatan dengan panjang sampel pengukuran s_w . Satuan dari lebar gelombang adalah dalam milimeter.

2. Lebar Kekasaran (*Roughness Width*), A_r

Lebar kekasaran adalah jarak rata-rata aritmetis dari jumlah jarak a_{ri} yang terletak di antara dua puncak kekasaran pada profil terukur yang letaknya berdekatan dengan panjang sampel pengukuran s . Satuan dari lebar kekasaran juga dalam milimeter.

2.5.3 Kriteria Evaluasi Permukaan Akhir

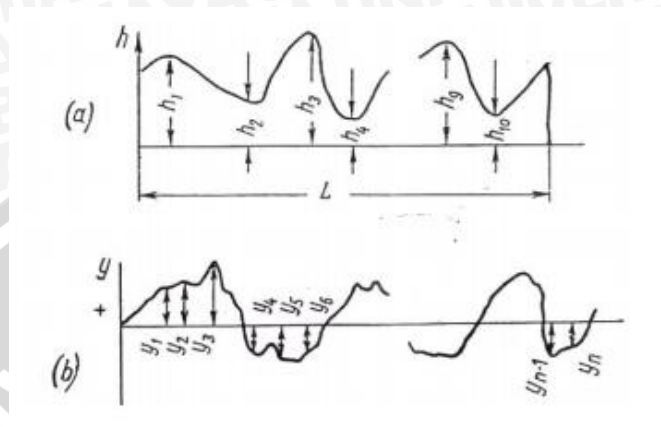
Kekasaran rata-rata merupakan harga rata-rata secara aritmetis dari harga absolut antara harga profil terukur dengan profil tengah. Angka kekasaran (ISO *roughness number*) dan panjang sampel standart dapat dilihat pada tabel 2.3 dan tabel 2.4 merupakan interval kekasaran permukaan proses pemotongan dari beberapa pemesinan. Mengacu pada gambar 2.22b nilai penyimpangan rata-rata R_a sesuai rumus berikut:

$$R_a = \frac{1}{n}(y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.3)$$

yang mana: $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ adalah jarak dari titik permukaan profil dari garis tengah. n adalah jumlah titik penyimpangan dari profil mikro yang diukur. Garis tengah membagi profil permukaan sehingga penjumlahannya $y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2 = 0$.

Penyimpangan mikro R_z , yang didefinisikan sebagai rata-rata ketinggian (jarak puncak ke lembah) dari lima penyimpangan utama pada gambar 2.22a yang diukur sepanjang garis dasar:

$$R_z = \frac{(h_1 + h_3 + h_5 + h_7 + h_9) - (h_2 + h_4 + h_6 + h_8 + h_{10})}{5} \quad (2.4)$$



Gambar 2.22 Menentukan R_z dan R_a dari penyimpangan permukaan
Sumber: D. Maslov, dkk. (1967: 221)

Tabel 2.3 Angka kekasaran (ISO roughness number) dan panjang sampel standart

Harga kekasaran, R_a (μm)	Angka kelas kekasaran	Panjang sampel (mm)
50 25	N 12 N 11	8
12,5 6,3	N 10 N 9	2,5
3,2 1,6 0,8 0,4	N 8 N 7 N 6 N 5	0,8
0,2 0,1 0,05	N 4 N 3 N 2	0,25
0,025	N 1	0,08

Sumber: Rochim (2001:56)

Tabel 2.4 Kemampuan proses mesin untuk kekasaran permukaan

Operation	Kekasaran permukaan (mikron)										
	25	12.5	6.25	3.2	1.6	0.8	0.4	0.20	0.10	0.05	0.025
Gergaji, Pemotongan las	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Gerinda tangan	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pengikiran, amplas	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bubut, Shaping, Milling	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pengeboran	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Surface grinding	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cylindrical Grind.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Honing, Lapping	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Polishing	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Super Finishing	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bulfining	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Sumber : Rao (2009 : 79)

2.5.4 Alat Ukur Kekasaran Permukaan

Alat ukur kekasaran permukaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat ukur jenis Mitutoyo Surftest SJ – 301. Dalam penggunaan alat ini, prinsip kerjanya adalah :

1. *Detector stylus* akan mendeteksi permukaan benda kerja yang akan diukur.
2. *Detector stylus* merubah gerakan mekanik yang terdeteksi menjadi sinyal elektrik.
3. sinyal elektrik ini akan dimasukkan dalam proses perhitungan.
4. Hasil perhitungan akan ditampilkan pada layar monitor.
5. Data dicetak.

2.6 Aluminium

Aluminium merupakan logam ringan dengan ketahanan korosi dan hantaran listrik yang baik. Untuk mengetahui sifat fisik aluminium dapat kita lihat tabel 2.5. Sedangkan untuk mengetahui sifat mekanik aluminium pada tabel 2.6.

Tabel 2.5 Sifat-sifat fisik aluminium

Sifat - Sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	> 99,0
Masa jenis (20°C)	2,6989	2,71
Titik cair	660,2	653-657
Panas jenis (cal/g.°C)(100°C)	0,2226	0,2297
Hantaran listrik	64,94	59 (dianil)
Tahanan listrik koefisien temperatur (°C)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuai (20-100°C)	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$
Jenis Kristal, konstanta kisi	<i>fcc, a = 4,013kX</i>	<i>fcc, a = 4,04kX</i>

Sumber: Surdia (1984:134)

Tabel 2.6 Sifat-sifat mekanik aluminium

Sifat - sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		> 99,0	
	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm ²)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur (0,2%) (kg/mm ²)	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44

Sumber: Surdia (1984:134)

2.6.1 Klasifikasi paduan aluminium

Paduan aluminium diklasifikasikan dalam berbagai standar oleh berbagai negara di dunia (tata surdia,1984:135). Klasifikasi yang sangat terkenal adalah standar *Aluminium Association* di Amerika (AA) yang didasarkan atas standar terdahulu dari

Alcoa (*Aluminium Company of America*). Paduan tempaan dinyatakan dengan satu angka atau dua angka “S”, sedangkan paduan coran dinyatakan dengan tiga angka “S”. Standard AA menggunakan penandaan dengan empat angka sebagai berikut:

1. Angka pertama menyatakan sistem paduan dengan unsur-unsur yang dipadukan atau ditambahkan (1:Al murni; 2:Al-Cu; 3:Al-Mn; 4:Al-Si; 5:Al-Mg; 6:Al-Mg-Si dan 7:Al-Zn).
2. Angka kedua menyatakan kemurnian dalam paduan yang dimodifikasi dan aluminium murni.
3. Angka ketiga dan keempat dimaksudkan untuk tanda Alcoa terdahulu kecuali huruf S. Sebagai contoh 3S sebagai 3003 serta 61 S sebagai 6061.

2.6.2 Unsur - Unsur Paduan Aluminium

Aluminium murni mempunyai kemurnian hingga 99,96% dan minimal 99%. Zat pengotornya berupa unsur Fe dan Si. Aluminium paduan memiliki berbagai kandungan atom-atom atau unsur-unsur utama (mayor) dan minor. Unsur mayor seperti Mg, Mn, Zn, Cu, dan Si sedangkan unsur minor seperti Cr, Ca, Pb, Ag, Fe, Sn, Zr, Ti, Sn, dan lain-lain. Unsur-unsur paduan yang utama dalam Aluminium antara lain:

1. Silikon (Si)

Dengan atau tanpa paduan lainnya silikon mempunyai ketahanan terhadap korosi. Bila bersama aluminium ia akan mempunyai kekuatan yang tinggi setelah perlakuan panas, tetapi silikon mempunyai kualitas pengerjaan mesin yang jelek, selain itu juga mempunyai ketahanan koefisien panas yang rendah.

2. Tembaga (Cu)

Dengan unsur tembaga pada aluminium akan meningkatkan kekerasannya dan kekuatannya karena tembaga bisa memperhalus struktur butir dan akan mempunyai kualitas pengerjaan mesin yang baik, mampu tempa, keuletan yang baik dan mudah dibentuk.

3. Magnesium (Mg)

Dengan unsur magnesium pada aluminium akan mempunyai ketahanan korosi yang baik dan kualitas pengerjaan mesin yang baik, mampu las serta kekuatannya cukup.

4. Nikel (Ni)

Dengan unsur nikel aluminium dapat bekerja pada temperatur tinggi, misalnya piston dan *silinder head* untuk motor.

5. Mangan (Mn)

Dengan unsur mangan aluminium sangat mudah dibentuk, tahan korosi baik, sifat dan mampu lasnya baik.

6. Seng (Zn)

Umumnya seng ditambahkan bersama-sama dengan unsur tembaga dalam prosentase kecil. Dengan penambahan ini akan meningkatkan sifat-sifat mekanik pada perlakuan panas, juga kemampuan mesin.

7. Ferro (Fe)

Penambahan *ferro* dimaksud untuk mengurangi penyusutan, tapi penambahan *ferro* (Fe) yang besar akan menyebabkan struktur perubahan butir yang kasar, namun hal ini dapat diperbaiki dengan Mg atau Cr.

8. Titanium (Ti)

Penambahan titanium pada aluminium dimaksud untuk mendapat struktur butir yang halus. Biasanya penambahan bersama-sama dengan Cr dalam prosentase 0,1%, titanium juga dapat meningkatkan mampu mesin.

9. Bismuth

Digunakan untuk meningkatkan sifat mampu mesin dari aluminium

2.7 Hipotesis

Spindle speed, feed rate dan diameter dari pahat berpengaruh secara langsung terhadap kekasaran permukaan yang dihasilkan berdasarkan rumus :

$$Ra = \frac{0.064}{d_t} \left(\frac{v_f}{n_t} \right)^2$$

dengan :

v_f = feed rate

d_t = diameter pahat

n_t = spindle speed

Kemiringan dari pahat mempengaruhi besarnya diameter pahat yang memotong benda kerja, sehingga kemiringan pahat mempengaruhi tingkat kekasaran permukaan yang dihasilkan.

Dengan penjelasan diatas, proses pemakanan miring *end mill* dengan menggunakan cara *conventional* didapatkan hipotesis sebagai berikut :

- *Spindle speed, feed rate*, dan kemiringan pahat berpengaruh terhadap kekasaran permukaan.

- Kombinasi parameter yang dapat memperkecil kekasaran permukaan yaitu dengan menambah nilai *Spindle speed* dan kemiringan pahat, serta mengurangi nilai *feed rate*.

