

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Aditya (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh *spindle speed*, *feed rate* dan jumlah mata pahat *ball nose end mill* terhadap kekasaran permukaan aluminium pada proses *conventional milling*. Berdasarkan hasil pengujian dan pengolahan data yang didapatkan oleh peneliti dapat diambil kesimpulan *Feed Rate* (kecepatan pemakanan) mempunyai pengaruh yang positif (berbanding lurus) yaitu semakin tinggi maka kekasaran permukaan semakin besar, sedangkan *Spindle Speed* (kecepatan spindel) dan jumlah mata pahat berpengaruh negatif (berbanding terbalik) yaitu semakin tinggi dan banyak maka kekasaran permukaan semakin kecil.

Budiarto (2013), melakukan penelitian tentang pengaruh *cutting speed* dan *depth of cut* kondisi *chatter* terhadap kekasaran permukaan benda kerja proses bubut. Penelitian ini menggunakan spesimen uji carbon steel S45C dan menghasilkan nilai kekasaran permukaan terendah pada proses pembubutan sebesar $4.216 \mu\text{m}$ dengan amplitudo getarannya sebesar 18.232 m/s^2 dimana hasil ini didapatkan dari kombinasi variabel *cutting speed* 8.635 m/min dan *depth of cut* 0.6 mm . Nilai Kekasaran permukaan tertinggi sebesar $7.630 \mu\text{m}$ dengan amplitudo getarannya sebesar 377.881 m/s^2 dimana hasil ini didapatkan pada variasi *cutting speed* 25.120 m/min dengan *depth of cut* 1.2 mm .

Triatma (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh parameter pemotongan menggunakan pahat *end mill* pada proses *climb milling* terhadap kekasaran permukaan baja karbon rendah menghasilkan Parameter pemotongan paling berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan secara berturut-turut adalah kecepatan pemakanan (*Feed rate*), kecepatan spindel (*Spindle speed*) dan kedalaman pemotongan (*Depth of cut*).

Romiyadi dkk (2013) melakukan penelitian tentang pengaruh kemiringan spindel dan kecepatan pemakanan terhadap getaran mesin *milling* universal knuth ufm 2 dan didapat kesimpulan semakin besar kemiringan spindel, semakin besar pula getaran mesin *milling* yang terjadi baik pada proses up milling maupun pada proses down milling. Begitu pula dengan pengaruh perubahan kecepatan pemakanan terhadap getaran mesin *milling*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kemiringan spindel 30° , 45° maupun 60° , perubahan kecepatan pemakanan akan memberikan pengaruh positif terhadap getaran mesin *milling*.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa getaran mesin *milling* yang terjadi pada proses down milling lebih tinggi dibandingkan dengan getaran pada proses up milling untuk semua kemiringan spindle.

Pada penelitian kali ini menggunakan proses pemakanan yaitu *climb milling*. Parameter yang digunakan dalam proses pemakanan yaitu *feed rate* dan *depth of cut*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kekasaran permukaan dengan parameter pemotongan. Penelitian ini menggunakan variasi *feed rate* dan *depth of cut*.

2.2 Pemotongan Logam

Proses pemotongan logam adalah suatu proses yang digunakan untuk mengubah suatu produk dari logam (komponen mesin) dengan cara memotong. Pemotongan logam dapat dikelompokkan menjadi empat menurut cara pemotongannya, yaitu

1. proses pemotongan dengan mesin las,
2. pemotongan dengan mesin pres,
3. pemotongan dengan mesin perkakas dan
4. pemotongan dengan mesin konvensional.

Proses permesinan merupakan proses pembentukan suatu produk dengan metode pemotongan dan menggunakan mesin perkakas. Gerakan pahat terhadap benda kerja yang dipotong ada dua yaitu gerak potong dan gerak makan. Permesinan merupakan salah satu teknologi yang banyak digunakan dalam industri, sehingga penelitian mengenai permesinan terus dilakukan, dengan tujuan untuk menghasilkan hasil pemotongan yang semakin baik serta mendapatkan parameter pemotongan yang paling tepat agar menghasilkan produk yang semakin baik pula.

2.3 Parameter Pemotongan

2.3.1 Kecepatan Potong

Kecepatan potong adalah kecepatan gerakan utama pahat dalam proses menyayat benda kerja. Kecepatan potong yang digunakan dan diameter pahat akan menentukan putaran mesin *milling*. Kecepatan potong dipengaruhi oleh : kekerasan material benda kerja, material pahat yang digunakan, geometri pahat dan tingkat kehalusan yang dikehendaki. Rekomendasi dalam pemilihan parameter kecepatan potong dapat dilihat pada tabel 2.1.

Pada pemotongan yang kasar digunakan putaran rendah dan kecepatan pemotongan yang tinggi sedangkan untuk *finishing* (penyelesaian) putaran dipertinggi, keruncingan

pahat dikurangi dan kecepatan pemakanan diperlambat. Hasil dan mutu dari permukaan benda kerja tersebut pasti lebih baik. Persamaan untuk mencari kecepatan potong (*cutting speed*) yaitu sebagai berikut (Subagio,2008):

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (2-1)$$

Dengan :

V_c = Kecepatan Potong (m/min)

d = Diameter Pahat (mm)

n = Putaran Spindel (rpm)

Kecepatan potong dipengaruhi oleh kecepatan spindel, bila kecepatan spindel yang digunakan semakin tinggi maka pemotongan akan jauh lebih cepat sehingga kualitas pemotongan juga akan semakin baik.

Tabel 2.1 Data untuk Mesin *Milling*

Material	Kekerasan BHN	HSS		Karbida	
		<i>Speed</i> m/min	<i>Feed</i> Mm/tooth	<i>Speed</i> m/min	<i>Feed</i> Mm/tooth
C 20 Steel	110 – 160	20	0,13	90	0,18
C 20 Steel	120 – 180	25	0,13	80	0,18
C 20 Steel	160 – 200	20	0,13	60	0,18
Alloy Steel	180 – 200	30	0,13	60	0,18
Alloy Steel	220 – 300	18	0,10	90	0,18
Alloy Steel	220 – 300	14	0,08	60	0,15
Alloy Steel	300 – 400	14	0,08	60	0,13
Stainless Steel	200 – 300	20	0,05	85	0,13
Cast Iron	180 – 220	16	0,10	58	0,20
Malleable iron	160 – 240	27	0,18	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	0,15	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 : Rao, (2009:105)

2.3.2 Kecepatan Pemakanan

Kecepatan pemakanan dihitung berdasarkan ketebalan geram yang dapat dipotong oleh setiap gigi pahat atau disebut juga 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.

Kecepatan pemakanan juga mempengaruhi kualitas hasil pemotongan karena semakin tinggi kecepatan pemakanan maka geram yang dihasilkan juga semakin banyak yang dapat

menghasilkan permukaan yang kasar sehingga kualitas hasil pemotongan juga tidak akan baik. Persamaan untuk mencari kecepatan pemakanan (*feed rate*) yaitu sebagai berikut (Subagio,2008):

$$Vf = Fz.z.n \quad (2-2)$$

Dengan :

Vf = Kecepatan Pemakanan (mm/min)

Fz = Pemakanan per Gigi (mm/rev)

n = Putaran Spindel (rpm)

z = Jumlah Mata Pahat

2.3.3 Kedalaman Pemakanan (*Depth of Cut*)

Besarnya kedalaman pemakanan berhubungan erat dengan kecepatan pemakanan dan diameter pahat. Semakin tinggi kecepatan pemakanan, maka pahat yang digunakan semakin kecil diameternya dan kedalaman pemakanan pada benda kerja menjadi kecil.

Kedalaman pemakanan juga dapat mempengaruhi kualitas hasil pemotongan karena semakin dalam pemotongan maka beban dan gaya yang diperlukan untuk memotong akan semakin besar sehingga dapat mengganggu kerja dari pahat yang dapat mengakibatkan hasil pemotongan yang tidak baik.

2.4 Material Benda Kerja

2.4.1 Aluminium

Aluminium adalah logam yang ringan dengan massa jenis $2.7 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^3$. Selain itu juga memiliki sifat penghantar panas yang baik sehingga digunakan pula pada komponen mesin, komponen pesawat dan komponen industri.

Aluminium merupakan logam yang reaktif sehingga mudah teroksidasi dengan oksigen sehingga membentuk lapisan aluminium oksida, alumina (Al_2O_3) dan membuatnya tahan korosi. Aluminium bersifat ulet, mudah dimesin dan dibentuk dengan kekuatan tarik untuk aluminium murni sekitar $5 \times 10^{-6} \text{ kgf/m}^2$. Bila diproses seperti dirol dingin kekuatan bisa mencapai $\pm 15 \times 10^{-6} \text{ kgf/m}^2$.

Tabel 2.2 Karakteristik Aluminium

Alloy	Temper	Tensile strenght psi	Tensile yield strenght psi	Elongation & in 2 in	Hardness Bhn	Shear strength Psi	Fatigue limit psi
6050	0	16.000	8.000	35	26	11.000	8.000
	T6	37.000	32.000	13	80	23.000	13.000
6061	0	18.000	8.000	25	30	12.000	9.000
	T4.T451	35.000	21.000	22	65	24.000	13.000
	T6.T651	45.000	40.000	12	95	30.000	14.000
	T81	55.000	52.000	15		32.000	
	T91	59.000	57.000	12		33.000	14.000
	T913	67.000	66.000	10		35.000	
6066	0	22.000	12.000	18	43	14.000	
	T4.T451	52.000	30.000	18	90	29.000	
	T6.T651	57.000	52.000	12	120	34.000	16.000
6070	0	21.000	10.000	20	35	14.000	9.000
	T6	57.000	52.000	12	120	34.000	14.000
6101	T6	32.000	28.000	15	71	20.000	
6151	T6	48.000	43.000	17	100	32.000	12.000
6201	T81	48.000		6			15.000
6262	T9	58.000	55.000	10	120	35.000	13.000
6351	T4.T451	42.000	27.000	20	60	22.000	13.000
	T6.T651	49.000	43.000	13	95	29.000	13.000
6951	0	16.000	6.000	30	28	11.000	
	T6	39.000	33.000	13	82	26.000	

Sumber : Swartz, (1992:187)

2.4.2 Aluminium 6061

Dari sekian banyak logam yang potensial, Komposit Matrik Logam (MMCs) paduan Al 6061 telah menjadi objek dari banyak riset, terutama oleh keringanannya, murah dan kemudahan untuk difabrikasi. Al 6061 memiliki ketahanan korosi yang tinggi, karena akan terbentuk lapisan baru akibat lapisan lama yang terkelupas, sifat mampu bentuk yang tinggi. Al 6061 mempunyai titik lebur 660°C , kekuatan tarik $12.6 \times 10^{-6} \text{ kgf/m}^2$, massa jenis $2.70 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^3$ dan konduktifitas termal pada 25°C yaitu 237 W/m.K .

2.5 Mesin Milling

Mesin *milling* adalah salah satu mesin perkakas untuk mengerjakan atau menyelesaikan permukaan suatu benda kerja dengan menggunakan pisau (pahat) sebagai alat potongnya. Pada mesin *milling*, pisau terpasang pada *arbor* dan diputar oleh spindel.

Benda kerja terpasang pada meja dengan bantuan ragam (*vice*) atau alat bantu lainnya. Meja bergerak *vertical* (naik-turun), *horizontal* (maju-mundur dan kekiri-kekanan). Dengan gerakan ini maka dapat menghasilkan benda-benda seperti pembuatan bidang rata, alur, roda gigi, segi banyak beraturan, bidang bertingkat.

Sesuai dengan kebutuhannya, mesin *milling* dibagi menjadi dua yaitu, mesin *milling* baku dan mesin *milling* khusus. Mesin *milling* baku dibagi lagi menjadi dua kelompok, yaitu mesin *milling* meja dan mesin *milling* lutut dan tiang. Mesin-mesin *milling* yang tergolong jenis mesin *milling* lutut dan tiang diantaranya ialah mesin *milling horizontal*, mesin *milling vertical* dan mesin *milling universal*. Pada mesin *milling horizontal*, meja dari mesinnya hanya dapat digerakan pada tiga arah yaitu arah membujur, arah melintang dan arah tegak. Sedangkan pada mesin *milling vertical* letak sumbu utama spindelnnya tegak lurus terhadap meja mesin, dengan perlengkapan kepala tegak yang dapat diputar-putar, maka kedudukan spindel sumbu utama dapat dibuat menyudut terhadap meja mesin. Sedangkan untuk *milling universal*, meja dari mesin ini hampir sama seperti pada mesin *horizontal* hanya meja mesin *universal* dapat diputar mendatar dan membentuk sudut 45° ke arah tiang mesin.

Mesin *milling* pada saat ini telah banyak yang dilengkapi dengan pengendali CNC untuk meningkatkan produktivitas dan fleksibilitasnya. Dengan menggunakan pengendali CNC maka waktu produksi bisa dipersingkat dan menghasilkan bentuk benda kerja yang bervariasi. Mesin *milling* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Mesin *milling*

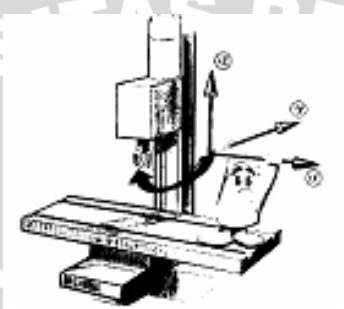
Sumber : Laboratorium CNC Teknik Mesin Brawijaya

2.5.1 Prinsip Kerja Mesin Milling

Mesin *milling* CNC TU-3A menggunakan sistem persumbuan dengan dasar sistem koordinat *Cartecius*, prinsip kerja mesin CNC TU-3A adalah meja bergerak melintang dan *horizontal* sedangkan pisau atau pahat berputar. Untuk arah gerak persumbuan mesin tersebut diberi lambang persumbuan sebagai berikut :

1. Sumbu X untuk arah gerakan *horizontal*
2. Sumbu Y untuk arah gerakan melintang
3. Sumbu Z untuk arah gerakan *vertical*

Untuk menjelaskan sistem persumbuan dapat dilihat pada gambar 2.2.

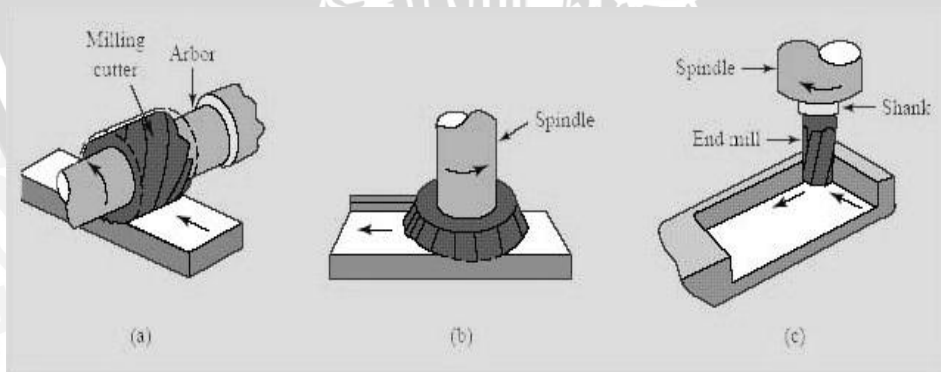


Gambar 2.2 Sumbu mesin CNC TU-3A

Sumber : Laboratorium CNC Teknik Mesin Brawijaya

2.5.2 Macam Pemakanan Pada Mesin Milling

Pemakanan mesin *milling* dibagi menjadi tiga, yaitu *slab milling*, *face milling* dan *end milling* seperti pada Gambar 2.3.



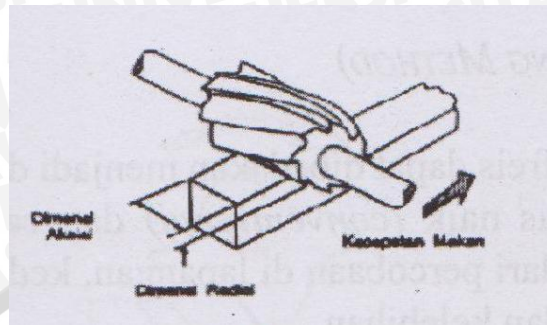
Gambar 2.3 Dasar operasi *milling* (a) *slab milling*, (b) *face milling*, (c) *end milling*

Sumber : Subagio, (2008:80)

a. Slab Milling

Pemakanan *slab milling*, atau *peripheral milling*, sumbu rotasi pahat sejajar dengan permukaan benda kerja. Pahat pada *slab milling* memiliki mata pahat yang heliks. Pahat

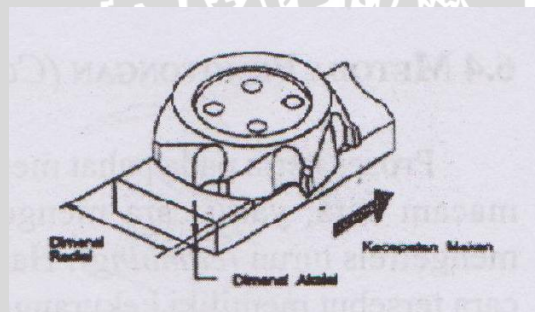
dengan gigi yang heliks lebih sering digunakan dari pada mata gigi lurus, dikarenakan beban pada mata gigi yang lebih rendah saat beroperasi, sehingga permukaan benda kerja lebih halus dan juga mengurangi gaya pada pahat.



Gambar 2.4 Slab milling
Sumber : Subagio, (2008:80)

b. Face Milling

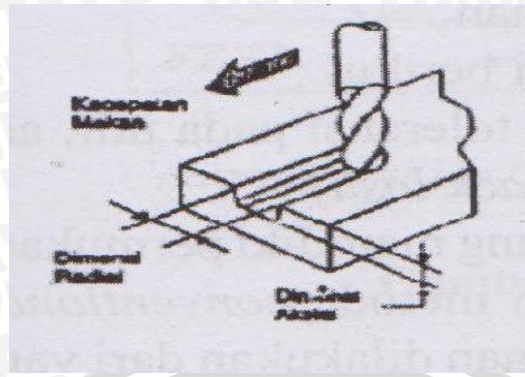
Pada *face milling* pahat dipasang pada poros yang memiliki sumbu putar tegak lurus terhadap benda kerja. Pahat memiliki mata tajam pada bagian tepi.



Gambar 2.5 Face milling
Sumber : Subagio, (2008:80)

c. End Milling

Permukaan rata serta dapat menghasilkan berbagai profil dengan menggunakan proses *end milling*. Pahat pada proses *end milling* memiliki tangkai yang lurus dan meruncing dengan berbagai ukuran. Pahat berputar pada sumbu tegak lurus terhadap benda kerja, tetapi juga dapat dimiringkan untuk melakukan *machine-tapered surface*.

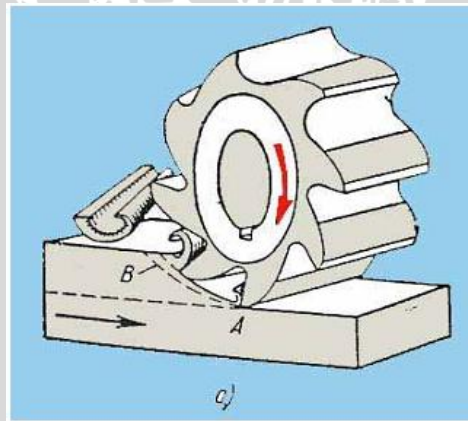


Gambar 2.6 End milling
Sumber : Subagio, (2008:80)

2.5.3 Mekanisme Milling

Proses *milling* dapat dibedakan berdasarkan arah rotasi pahat, yaitu *up milling* (*conventional milling*) dan *down milling* (*climb milling*). Masing-masing dari proses tersebut memiliki perbedaan dan ciri khas. Untuk memahami proses ini, dapat dilihat Gambar 2.7 dan Gambar 2.8:

- a. *Up Milling* (*Conventional milling*), yaitu proses pemakanan yang arah gerakan pahat berlawanan dengan arah pemakanan (*feed*) saat pemotongan.



Gambar 2.7 Conventional milling
Sumber : Widarto, (2008:188)

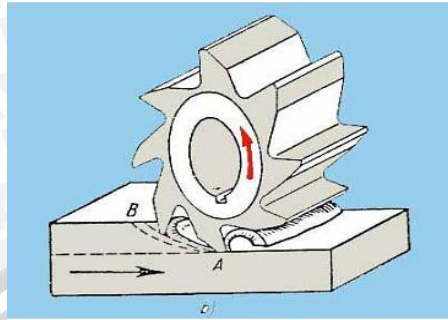
Kelebihan *Conventional Milling* :

- Kerja pahat tidak dipengaruhi oleh karakteristik benda kerja

Kekurangan *Conventional Milling* :

- Hasil pemotongan lebih kasar karena arah pemakanan berlawanan
- Benda kerja cenderung terangkat karena arah pemakanan yang berlawanan

- b. *Down Milling (Climb milling)*, yaitu proses pemakanan yang arah gerakan pahat searah dengan arah pemakanan (*feed*) saat pemotongan.



Gambar 2.8 *Climb milling*

Sumber : Widarto, (2008:188)

Kelebihan *Climb Milling* :

- Hasil pemotongan lebih halus karena arah pemakanan yang searah
- Benda kerja tertahan pada posisinya karena arah pemakanan yang searah

Kekurangan *Climb Milling* :

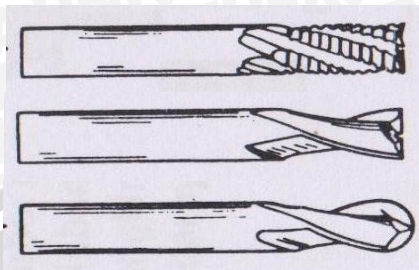
- Tidak cocok untuk pengerjaan benda yang kasar karena akan terjadi pemakanan yang berlebih sehingga akan mengurangi umur pahat.

2.6 End Mill Cutter

Pahat *end mill* merupakan salah satu jenis pahat mesin CNC *milling* yang banyak digunakan. Ukuran pahat jenis ini sangat bervariasi, mulai ukuran kecil sampai ukuran besar. Biasanya pahat ini terbuat dari baja kecepatan tinggi (HSS) atau karbida, dan memiliki satu atau lebih alur (*flute*). Pahat ini dipakai untuk membuat alur pada bidang datar atau pasak dan umumnya dipasang pada posisi tegak (*vertical*), namun pada kondisi tertentu dapat juga dipasang pada posisi *horizontal*.

Pahat *end mill* ini digunakan untuk pengemillingan muka, *horizontal*, *vertical*, menyudut atau melingkar. Bentuk Pahat *end mill* yang bervariasi dapat melakukan pemakanan dengan berbagai jenis bentuk permukaan, jenis pahat *end mill* yang paling umum digunakan yaitu pahat dengan permukaan bawah yang rata (*flat bottom end mill*), pahat dengan ujung setengah lingkaran (*ball nose end mill*), dan pahat dengan radius sudut (*bull nose end mill*). Setiap jenis pahat *end mill* masing-masing digunakan berdasarkan tipe pemakanan dalam operasi permesinan. Pahat *flat bottom end mill* digunakan dalam operasi pemakanan permukaan yang datar dengan sudut tajam antara permukaan bawah dan

dinding. Pahat *ball nose end mill* digunakan untuk 3D *machining* dengan variasi permukaan. Pahat *bull nose end mill* digunakan dalam pemakanan permukaan yang datar yang membutuhkan sudut antara dinding dan bagian bawah.



Gambar 2.9 Bentuk pahat *end mill*

Sumber : Laboratorium CNC Teknik Mesin Brawijaya

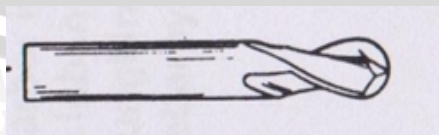
2.6.1 Ball Nose End Mill

Pahat *ball nose end mill* digunakan dalam operasi mesin *milling*. Pahat *ball nose end mill* terbuat dari baja kecepatan tinggi (HSS) dan karbida. Pahat *ball nose end mill* memiliki ujung pahat setengah bola atau radius. Biasanya digunakan untuk pemakanan permukaan dengan bentuk benda kerja yang berupa permukaan silindris.

Pahat *ball nose end mill* dapat bekerja pada permukaan pahat maupun pada tepian pahat. Dengan pahat *ball nose end mill* dapat dihasilkan benda kerja dengan variasi ukuran dan bentuk.

2.6.2 Bentuk Pahat Ball Nose End Mill

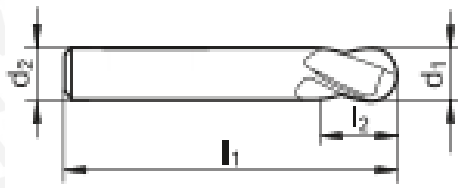
Setiap jenis pahat *end mill* digunakan berdasarkan tipe pemakanan dalam operasi mesin *milling*. Pahat *ball nose end mill* digunakan untuk 3D *machining* dengan variasi permukaan. Jenis pahat *end mill* dengan ujung setengah bola atau radius ini (*ball nose end mill*) biasanya digunakan pada industri otomotif dan penerbangan untuk membuat produk yang silindris dan berlekuk.



Gambar 2.10 Pahat *ball nose end mill*

Sumber : Laboratorium CNC Teknik Mesin Brawijaya

2.6.3 Fitur Pahat *Ball Nose End Mill*



Gambar 2.11 Desain pahat *ball nose end mill*

Sumber : Guhring, (2000:1173)

- Diameter luar (*outside diameter*) : diameter lingkaran yang melakukan pemakanan samping.
- Panjang (*length*) : panjang pahat dari ujung gigi ke ujung *shank*
- Gigi (*Tooth*) : bagian dari pahat yang dimulai dari bagian samping sampai bagian permukaan bawah pahat.
- *Flute*/Alur/Jumlah gigi : alur heliks sepanjang pisau *ball nose end mill*, sedangkan bagian tajam sepanjang tepi pisau disebut sebagai gigi.
- Sudut Heliks : sudut alur dari pisau pemotong *ball nose end mill* yang berbentuk heliks.
- Pemegang (*Shank*) : bagian silinder yang tidak beralur dari alat yang digunakan untuk memegang ke cekam.
- *Coating*/Pelapis : Pelapisan yang tepat dapat memiliki pengaruh yang besar pada proses pemotongan dengan meningkatkan kecepatan potong dan umur pahat, dan meningkatkan kehalusan permukaan akhir.

2.7 Getaran pada proses pemotongan

Getaran yang dialami oleh mesin disebabkan oleh adanya sumber penyebab getaran yang kemudian diteruskan keseluruh bagian mesin yang bersangkutan. Sumber getaran ini dapat berasal dari dalam mesin itu sendiri. Misalnya, ketidak seimbangan gaya yang disebabkan titik berat benda kerja atau pahat tidak pada sumbu putar, *ball bearing* yang rusak, belt yang bergetar, dan sebagainya. Getaran yang terjadi karena sumber-sumber getaran yang tersebut diatas dinamakan sebagai getaran eksitasi paksa (*forced excited vibration*). Getaran pada proses pemesinan sangat merugikan. Pada proses finishing akan mengurangi ketelitian dimensi, bentuk serta kehalusan suatu produk.

2.7.1 Klasifikasi Getaran

Getaran adalah gerakan bolak balik melalui titik kesetimbangan. Kesetimbangan disini maksudnya adalah keadaan dimana suatu benda berada pada posisi diam tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut. Getaran mempunyai amplitudo yang sama. Secara umum getaran dibagi menjadi dua, yaitu getaran bebas dan getaran paksa.

2.7.2 Getaran Bebas

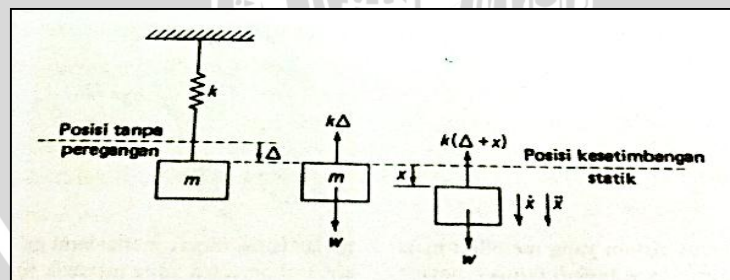
Getaran bebas terjadi jika sistem beroslisasi karena bekerjanya gaya yang ada dalam sistem itu sendiri dan jika tidak ada gaya luar yang bekerja. System yang bergetar bebas akan bergetar pada satu atau lebih frekuensi naturalnya. Semua system yang memiliki massa dan elastisitas dapat mengalami getaran bebas atau getaran yang terjadi tanpa ransangan dari luar.

1. Getaran Bebas Tanpa Redaman

Hukum Newton kedua adalah dasar pertama untuk meneliti gerak system. Seperti ditunjukkan dalam gambar 2.12, perubahan bentuk pegas pada posisi kesetimbangan statik adalah Δ , dan gaya pegas $k\Delta$ adalah sama dengan gaya gravitasi w yang bekerja pada massa m :

$$k\Delta = w = mg \quad (2-3)$$

Dengan mengukur simpangan x dari posisi kesetimbangan statis, maka gaya-gaya yang bekerja pada m adalah $k(\Delta+x)$ dan w . dengan x yang dipilih positif dalam arah kebawah, semua besaran (gaya, kecepatan dan percepatan) juga positif dalam arah kebawah.



Gambar 2.12 Sistem pegas massa dan diagram benda bebas

Sumber : Thomson (1995:16)

Hukum Newton kedua untuk gerak diterapkan pada massa m :

$$m\ddot{x} = \Sigma F = w - k(\Delta + x) \quad (2-4)$$

dan karena $k\Delta = w$, diperoleh :

$$m\ddot{x} = -kx \quad (2-5)$$

Jelaskan bahwa pemilihan posisi kesetimbangan static sebagai acuan untuk x mengeliminasi w , yaitu gaya yang disebabkan gravitasi, dan gaya pegas statik $k\Delta$ dari persamaan gerak, hingga gaya resultan pada m adalah gaya pegas karena simpangan x saja.

Dengan mendefinisikan frekuensi lingkaran w_n lewat persamaan

$$w_n^2 = \frac{k}{m}; \quad (2-6)$$

sehingga persamaan dapat ditulis :

$$\ddot{x} + w_n^2 x = 0 \quad (2-7)$$

sehingga persamaan umum dari persamaan diferensial linier orde kedua yang homogen :

$$x = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t = 0 \quad (2-8)$$

Dengan A dan B adalah dua konstanta yang penting. Konstanta ini dihitung dari kondisi awal x_0 dan $\dot{x}_0$, sehingga didapat persamaan,

$$x = \frac{\dot{x}_0}{w} \sin wt + x_0 \cos wt \quad (2-9)$$

Persamaan diatas disubstitusi sehingga menjadi :

$$x = X \sin (wt + \theta) \quad (2-10)$$

X adalah amplitude perpindahan dan θ adalah sudut fasa yang didefinisikan sebagai :

$$x = \sqrt{(\dot{x}_0/\omega)^2 + x_0^2} \quad (2-11)$$

$$\tan \theta = \frac{x_0}{\dot{x}_0/\omega} \quad (2-12)$$

Kecepatan X dan percepatan X adalah turunan pertama dan kedua dari persamaan 2.7 dan 2.8 Terhadap waktu yang dapat ditulis dalam berbagai bentuk sebagai berikut :

$$x = x_0 \cos \omega t - \dot{x}_0 \sin \omega t \quad (2-13)$$

$$x = X \cos(\omega t + \theta) = X \sin(\omega t + \theta + \frac{\pi}{2}) \quad (2-14)$$

$$x = X \cos(\omega t + \theta) \quad (2-15)$$

Dengan X adalah amplitudo kecepatan. Untuk percepatan :

$$\ddot{x} = -\dot{x}_0 \omega \sin \omega t - x_0 \omega^2 \cos \omega t \quad (2-16)$$

$$\ddot{x} = -X \omega^2 \sin(\omega t + \theta) = X \omega^2 \sin(\omega t + \theta + \pi) \quad (2-17)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 x \quad (2-18)$$

$$x = -X \sin(\omega t + \theta) \quad (2-19)$$

$\ddot{x} = -\omega^2 x$ adalah amplitude percepatan.

Perioda natural osilasi dibentuk dari $\omega_n \tau = 2\pi$, atau

$$\tau = T \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2-20)$$

2. Getaran bebas dengan redaman

Bila sistem linier satu derajat kebebasan dirangsang, maka responnya akan tergantung pada jenis rangsangan dan redaman yang ada. Bentuk persamaan geraknya sebagai berikut :

$$m\ddot{x} + F_d + kx = 0 \quad (2-21)$$

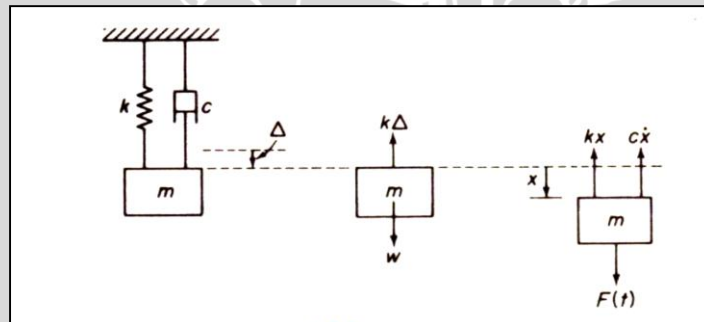
Dengan F_d adalah gaya peredam. Walaupun gambaran gaya peredam sebenarnya adalah sulit, dapat diasumsikan model – model redaman ideal yang sering menghasilkan perkiraan respon yang memuaskan. Dari model ini, gaya redaman karena kekentalan yang sebanding dengan kecepatan, menghasilkan pengolahan matematika yang paling mudah.

Gaya redaman karena kekentalan dinyatakan oleh persamaan,

$$F_d = c\dot{x} \quad (2-22)$$

Dengan c adalah konstanta kesebandingan. Secara simbolik gaya ini dinyatakan oleh peredam seperti terlihat pada gambar 2.12. Dari diagram benda bebas persamaan gerak dapat ditulis sebagai berikut :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2-23)$$



Gambar 2.13 Sistem getaran bebas dengan redaman dan diagram benda bebas.
Sumber : Thomson (1995:27)

Solusi persamaan diatas ada dua macam. Jika $F(t) = 0$, maka diperoleh persamaan differensial homogen yang solusinya secara fisis sesuai dengan getaran teredam bebas. Dengan persamaan homogen :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2-24)$$

Solusi persamaan ini tergantung pada besarnya redaman. Bila redaman cukup kecil, system masih akan bergetar, namun pada akhirnya akan berhenti. Keadaan ini disebut

kurang teredam, dan merupakan kasus yang paling mendapatkan perhatian dalam analisis vibrasi. Bila peredaman diperbesar sehingga mencapai titik saat sistem tidak lagi berosilasi, kita mencapai titik redaman kritis. Bila peredaman ditambahkan melewati titik kritis ini sistem disebut dalam keadaan melewati redaman.

Nilai koefisien redaman yang diperlukan untuk mencapai titik redaman kritis pada model massa-pegas-peredam adalah :

$$C_c = 2\sqrt{km} \quad (2-25)$$

Untuk mengkarakterisasi jumlah peredaman dalam sistem digunakan rasio yang dinamakan rasio redaman. Rasio ini adalah perbandingan antara peredaman sebenarnya terhadap jumlah peredaman yang diperlukan untuk mencapai titik redaman kritis. Rumus untuk rasio redaman (ζ) adalah :

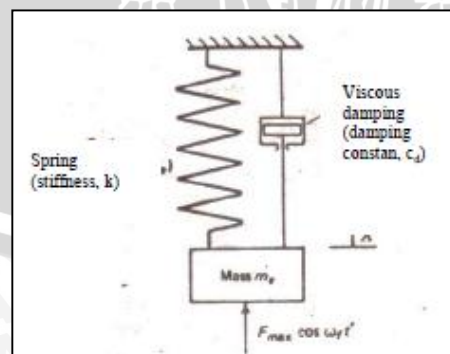
$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (2-26)$$

2.7.3 Getaran Paksa

1. Getaran Paksa dengan Redaman

Terjadinya getaran antara pahat dan benda kerja pada saat proses pemesinan akan menimbulkan efek yang merugikan, diantaranya rendahnya kualitas permukaan dan terjadinya kesalahan bentuk atau ukuran pada benda kerja. Selain itu timbulnya getaran juga akan mempercepat laju keausan pahat, memperpendek umur komponen mesin.

Getaran yang terjadi pada proses pemesinan adalah getaran paksa, yaitu getaran yang disebabkan oleh eksitasi getaran dari luar. Untuk sistem dengan satu derajat kebebasan gambar 2.14, persamaan getaran paksa yang terjadi adalah sebagai berikut :



Gambar 2.14 pemodelan sistem pegas massa satu derajat kebebasan dengan peredam cairan

Sumber : Boothroyd (1989:198)

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c_d \frac{dx}{dt} + kx = F_{max} \cos \omega_f t \quad (2-27)$$

Dengan :

x = perpindahan (mm)

t = waktu (s)

m = massa ekuivalen (kg)

c_d = gaya redaman per unit kecepatan (konstanta peredam cairan)

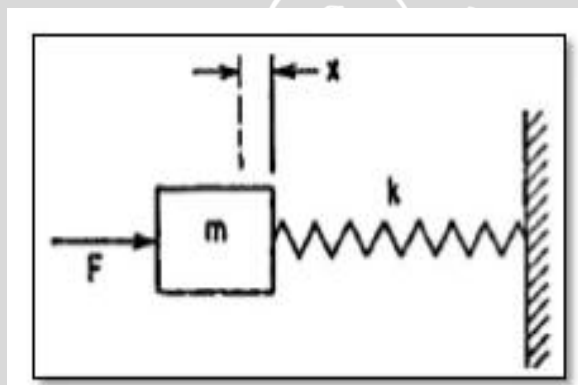
k = restoring force per unit perpindahan (kekakuan pegas)

F_{max} = nilai puncak dari gaya harmoni eksternal (N)

ω_f = frekuensi angular dari gaya harmoni eksternal

Getaran paksa (*vibration force*) pada peralatan mesin kebanyakan disebabkan oleh variasi siklik dari gaya – gaya pemotongan. Misalnya, variasi siklik pada proses milling dimana frekuensi getaran paksa akan sama dengan hasil dari frekuensi putaran peralatan dan jumlah gigi pada roda gigi.

2. Getaran paksa tanpa redaman



Gambar 2.15 pemodelan sistem pegas massa satu derajat kebebasan tanpa peredam

Sumber : Harris Piersol (2002: 192)

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (2-28)$$

Dengan :

x = perpindahan (mm)

t = waktu (s)

m = massa ekuivalen (kg)

k = restoring force per unit perpindahan (kekakuan pegas)

F_0 = nilai dari gaya harmoni eksternal (N)

ω_f = frekuensi angular dari gaya harmoni eksternal

2.7.4 Resonansi

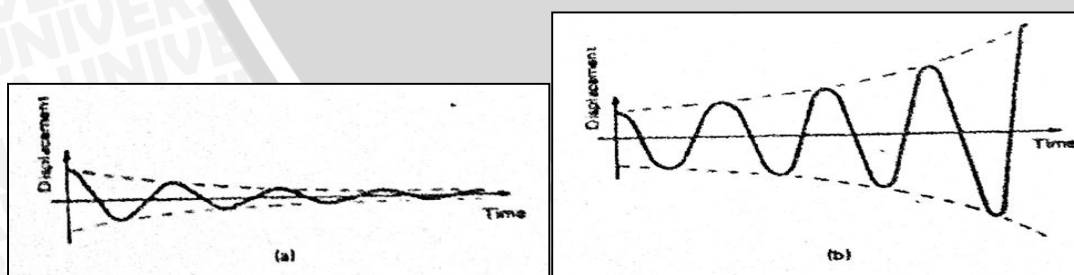
Resonansi terjadi bila frekuensi eksitasi sama dengan frekuensi pribadi sistem. Bila hal ini terjadi, amplitudo getaran akan bertambah tanpa henti dan diatur hanya dengan besar peredam yang ada dalam sistem. Dengan demikian, agar kerusakan yang dihasilkan akibat amplitudo getaran yang sangat besar pada resonansi dihindari maka, frekuensi pribadi sistem harus diketahui dan dijaga sempurna.

2.7.5 Getaran tereksitasi sendiri (*chatter*)

Chatter biasa terjadi pada saat proses pemesian ketika variasi siklik pada gaya potong tidak normal, untuk contoh pada benda kerja berbentuk bulat. *Chatter* ini tidak diketahui penyebab gaya getarannya, dan sulit untuk memprediksi kondisi yang diperlukan untuk memperbaiki fenomena ini.

Pada proses pemesian, getaran tereksitasi sendiri bisa terjadi dengan satu atau dua cara.

1. Pada kondisi tertentu, proses pemotongan pada dasarnya tidak stabil sehingga perpindahan relative pahat terhadap benda kerja yang sangat cepat akan menciptakan amplitudo getaran yang besar. Situasi tidak stabil ini bisa dimodelkan dengan mengasumsikan bahwa c_d , gaya redam ekuivalen per unit kecepatannya adalah negative. Kondisi ini secara umum mengacu pada peredaman negative dan sistem redaman negative kondisinya tidak stabil. Pada gambar 2.16 perilaku yang dihasilkan sistem pegas massa sederhana dibandingkan dengan perilaku sistem yang sama dengan kondisi redaman positif, untuk c_d adalah positif. Ini akan menunjukkan bagaimana interaksi antara pahat potong dan benda kerja bisa menghasilkan redaman negatif konstan pada mesin.



Gambar 2.16 Tingkah laku sistem pegas massa satu derajat kebebasan. a) Peredaman positif (konstanta redaman $c_d > 0$), b) Peredaman negative (konstanta redaman $c_d < 0$).

Sumber : boothroyd (1981:202)

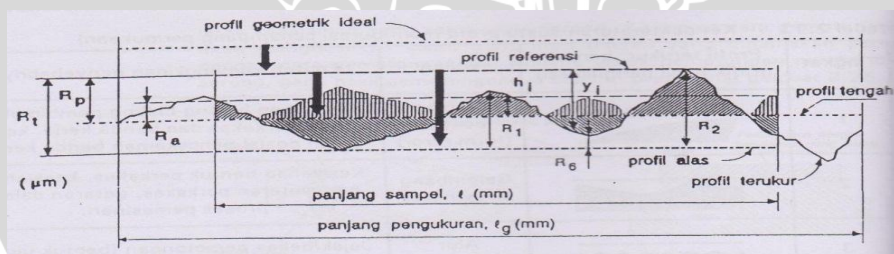
2. Getaran tereksitasi sendiri bisa menjadi lebih rumit tetapi terlihat lebih umum. Pada kasus ini, proses pemotongan pada dasarnya stabil (c_d lebih besar dari 0), dan getaran yang muncul disebabkan oleh gerak relative pahat benda kerja selama proses pemotongan. Namun, dengan operasi pemotongan paling praktis, pemotongan *overlapping* diambil, dan ketika pahat memindahkan *chatter* selama langkah awal pemotongan, getaran paksa terjadi karena variasi pada gaya potong. Getaran paksa bisa mengakibatkan kenaikan amplitude getaran dan disebut *regenerative chatter*.

2.8 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan merupakan salah satu bentuk dari ketidakteraturan konfigurasi suatu permukaan yang kemungkinannya dapat berupa goresan atau lekuk-lekuk kecil pada suatu permukaan.

Nilai kekasaran permukaan berpengaruh terhadap kualitas dan keandalan suatu benda kerja dari proses permesinan, karena nilai kekasaran dapat mempengaruhi kemampuan benda kerja dalam mengeliminasi terjadinya korosi pada permukaan. Guratan-guratan atau kawah-kawah yang ada dapat menampung zat ataupun material yang bersifat korosif sehingga menyebabkan korosi pada permukaan benda kerja tersebut.

Beberapa istilah profil dan parameter permukaan dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.17 Profil Kekasaran Permukaan

Sumber : Rochim, (1993:56)

Keterangan gambar :

- Profil geometri ideal (*geometrically ideal profile*) : Merupakan profil permukaan geometris ideal yang dapat berupa garis lurus ataupun garis lengkung.
- Profil terukur (*measured profile*) : Merupakan profil permukaan yang terukur oleh alat ukur.
- Profil referensi (*reference profile*) : Merupakan profil yang digunakan sebagai referensi untuk menganalisis ketidakteraturan konfigurasi permukaan. Profil ini dapat berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometri ideal, serta

menyinggung puncak tertinggi dari profil geometri ideal, serta menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dalam suatu panjang sampel. Profil referensi biasa disebut sebagai profil puncak (*custline*)

- Profil dasar (*root profile*) : Merupakan profil yang digeser ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal pada suatu panjang sampel) hingga menyinggung titik terendah dari profil terukur.
- Profil tengah (*center profile*) : Merupakan profil referensi yang digeser ke bawah sedemikian rupa, sehingga jumlah luas dari daerah-daerah diatas profil tengah sampai ke profil terukur adalah sama dengan jumlah luas dari daerah dibawah profil tengah sampai ke profil terukur. Pada gambar ditunjukkan oleh daerah yang diarsir tegak dan datar.

Beberapa parameter permukaan lain yaitu :

- Kedalaman total (*peak to valley height*), R_t : Jarak rata-rata antara profil referensi dan profil dasar.
- Kedalaman perataan (*peak to mean line*), R_p : Jarak rata-rata antara profil referensi dengan profil terukur atau R_p ini juga sama dengan jarak profil referensi ke profil tengah.
- Kekasaran rata-rata aritmetis (*mean roughness index*), R_a : Harga rata-rata aritmetis dari harga absolut antara profil terukur dengan profil tengah.

$$R_a = \frac{1}{n} (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2-29)$$

Dengan :

$y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ = jarak dari titik permukaan profil garis tengah.

n = jumlah titik penyimpangan dari profil mikro yang diukur

- Kekasaran rata-rata kuadrat (*root mean square height*), R_g : Akar dari jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan profil tengah.

Menurut profilnya, ketidakaturan konfigurasi suatu permukaan dapat dibagi dalam beberapa tingkatan, yaitu:

1. Tingkatan pertama adalah ketidakaturan makrogeometri yang berupa kesalahan bentuk (*form error*). Hal tersebut disebabkan oleh adanya lenturan yang terjadi pada mesin perkakas maupun benda kerja serta kesalahan posisi pada pencekaman benda kerja.

2. Tingkatan kedua adalah ketidakraturan yang menyerupai gelombang (*waviness*). Hal ini disebabkan oleh terjadinya getaran sewaktu pemotongan. Kemungkinan terjadinya ketidakraturan ini karena kesalahan bentuk perkakas, kesalahan penteteran perkakas dan terjadinya getaran pada saat proses pemotongan.
3. Tingkatan ketiga, disebut sebagai alur (*grooves*), adalah ketidakraturan permukaan karena adanya guratan yang disebabkan adanya jejak dari pahat.
4. Tingkat keempat adalah serpihan (*flake*), yang terjadi karena proses pembentukan geram.

Faktor-faktor lain yang menyebabkan terjadinya kekasaran permukaan pada proses permesinan *milling* adalah :

1. Terjadinya getaran (*chatter*) saat pemotongan berlangsung
2. Ketidaktepatan gerakan pahat
3. Ketidakraturan mekanisme pemakanan (*feeding*)
4. Kerusakan pada struktur mesin perkakas

Untuk mempermudah penulisan nilai kekasaran permukaan maka ditetapkan nilai kekasaran permukaan sesuai standar ISO yang dapat dilihat pada tabel 2.3 dan 2.4 merupakan nilai interval kekasaran permukaan proses pemotongan dari beberapa permesinan. Interval nilai kekasaran ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam memproduksi suatu barang.

Tabel 2.3 Angka Kekasaran (ISO roughness number) dan panjang sampel standar

Harga kekasaran Ra (μm)	Angka kelas Kekasaran	Panjang sampel (mm)
50 25	N12 N 11	8
12.5 6.3	N 10 N 9	2.5
3.2 1.6 0.8 0.4	N8 N7 N6 N5	0.8
0.2 0.1 0.05	N4 N3 N2	0.25
0.025	N 1	0.08

Sumber : Rochim, (1993:76)

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											
Bulfin											

Sumber : Rao, (2009:79)

2.9 Hipotesis Penelitian

Pada proses pemakanan menggunakan pahat *ball nose end mill* dengan metode *climb mill* dan variasi parameter pemotongan (*feed rate* dan *depth of cut*) akan mempengaruhi *chatter* dan kekasaran permukaan. Semakin tinggi *feed rate* dan *depth of cut* maka kekasaran permukaan akan semakin tinggi dan *chatter* akan tinggi pula. Pemakanan benda menjadi lebih banyak dan semakin dalam pemotongan disebabkan karena beban dan gaya yang diperlukan untuk memotong akan semakin besar dan *chatter* akan meningkat sehingga kekasaran permukaan akan semakin tinggi.