

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Fakhrudin (2014), dalam penelitiannya tentang pengaruh parameter dan perbedaan proses pemotongan terhadap kekasaran permukaan pada proses pemotongan *end mill*. Penelitian tersebut menggunakan pahat *end mill* dengan pemakanan frais tegak pada benda kerja Aluminium 6061. Dengan menggunakan tiga variasi kecepatan pemakanan yaitu 700, 800 dan 900 rpm serta tiga variasi kecepatan spindle yaitu 100, 200 dan 300 mm/min pada proses pemakanan *climbing* dan *conventional*. Dari hasil penelitian tersebut menyebutkan bahwa perubahan kecepatan pemakanan mempunyai pengaruh yang positif (berbanding lurus) terhadap kekasaran permukaan sedangkan kecepatan spindle berpengaruh negatif (berbanding terbalik) terhadap kekasaran permukaan. Proses pemakanan *climbing* menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih halus dibandingkan dengan proses pemakanan *conventional*.

Aditya (2014), dalam penelitiannya tentang pengaruh *spindle speed*, *feed rate* dan jumlah mata pahat *ball nose end mill* terhadap kekasaran permukaan aluminium pada proses *conventional milling*. Penelitian tersebut menggunakan tiga variasi *spindle speed* yaitu 700, 800 dan 900 rpm, tiga variasi *feed rate* yaitu 100, 200 dan 300 mm/min serta jumlah mata pahat dua dan empat. Dari penelitian tersebut menyimpulkan bahwa *feed rate* (kecepatan pemakanan) mempunyai pengaruh yang positif (berbanding lurus) yaitu semakin tinggi *feed rate* maka kekasaran permukaan semakin besar, sedangkan *spindle speed* (kecepatan spindle) dan jumlah mata pahat berpengaruh negatif (berbanding terbalik) yaitu semakin tinggi *spindle speed* dan banyak jumlah mata pahat maka kekasaran permukaan semakin kecil.

Budiarto (2013), dengan penelitiannya tentang pengaruh *cutting speed* dan *depth of cut* kondisi *chatter* terhadap kekasaran permukaan benda kerja proses bubut. Dalam penelitiannya menggunakan baja S45C berbentuk poros dengan diameter 25mm, variasi *cutting speed* 8,635, 12,168, 14,915, 20,420 dan 25,120 mm/menit serta *depth of cut* 0,6, 0,9 dan 1,2 mm. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa semakin tinggi *cutting speed* dan *depth of cut* maka akan menghasilkan amplitudo getaran dan kekasaran permukaan yang tinggi.

Romiyadi (2013), dalam penelitiannya tentang pengaruh kemiringan spindel dan kecepatan pemakanan terhadap getaran mesin frais universal KNUTH UFM 2. Penelitian tersebut menggunakan sudut kemiringan 30° , 45° dan 60° , kecepatan pemakanan 45, 69, 108, dan 233 mm/min menyimpulkan bahwa semakin besar kemiringan spindel dan kecepatan pemakanan maka getaran yang dihasilkan akan semakin besar baik pada proses *up milling* maupun *down milling*. Pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa getaran yang terjadi pada *down milling* lebih tinggi dibandingkan proses *up milling* untuk semua kemiringan spindel.

2.2 Proses Manufaktur

Proses manufaktur dapat juga didefinisikan sebagai penerapan ilmu fisika dan kimia untuk mengubah bentuk geometri, sifat-sifat dan bentuk dari suatu material dalam pembuatan suatu produk.

Proses manufaktur dapat dibagi menjadi dua bagian dasar yaitu:

1. Pengecoran (*Casting*)

Pengecoran merupakan salah satu proses manufaktur dengan menuangkan logam cair ke dalam sebuah cetakan. Sehingga menjadi sebuah produk baru.

2. Pengerjaan Mekanis (*Mechanical Working*)

Yaitu pembentukan logam dengan cara memberikan gaya sehingga mendeformasi benda tersebut baik pada suhu diatas maupun dibawah rekristalisasi (*hot working and cold working*). Contohnya yaitu pengerolan, penempaan dan lain-lain.

3. Pengelasan (*Welding*)

Merupakan salah satu proses manufaktur untuk menggabungkan beberapa bagian benda sehingga menjadi produk baru yang diinginkan dengan cara pengelasan atau penyambungan.

4. Pemesinan (*Machining*)

Proses pemesinan yaitu membuat suatu produk dengan memotong atau mengurangi bahan dari bentuk awal menjadi sesuai dengan yang diinginkan. Contohnya yaitu pembubutan, frais, menggergaji dan lain-lain.

5. Metalurgi Serbuk (*Powder Metallurgy*)

Produk dibuat dengan melakukan proses penekanan serbuk logam pada cetakan (*die casting*) lalu disintering atau dipanaskan didalam tungku pada temperatur tertentu.

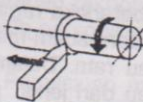




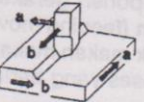
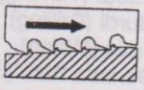
2.3 Proses Pemesinan

Proses pemesinan atau pemotongan logam merupakan suatu proses yang digunakan untuk mengubah bentuk suatu produk logam dengan mekanisme proses pemotongan menjadi sebuah bentuk baru sesuai yang diinginkan. Dalam perkembangannya proses pemesinan masih merupakan proses yang paling banyak digunakan dalam pembuatan suatu produk.

Proses pemesinan menurut cara pemotongannya dapat dikelompokkan menjadi:

1. Proses pemotongan dengan mesin las.
2. Proses pemotongan dengan mesin pres.
3. Proses pemotongan dengan mesin perkakas.
4. Proses pemotongan non konvensional (*electro discharge machining, laser beam machining, chemical milling, dan sebagainya*)

Tabel 2.1 Klasifikasi proses pemesinan

Jenis proses		Gerak potong	Gerak makan
Bubut		benda kerja m/min	pahat mm/min
Gurdi		pahat m/min	pahat mm/min
Freis		pahat m/min	benda kerja mm/min
Gerinda rata		pahat m/s	benda kerja
Gerinda silindrik		pahat m/s	benda kerja 1&2
Sekrap meja (a) Sekrap (b)		<u>a</u> benda kerja <u>b</u> pahat m/min	<u>a</u> pahat <u>b</u> benda kerja m/min
Parut dan Gergaji		pahat m/min	

Sumber: Rochim (1993:6)

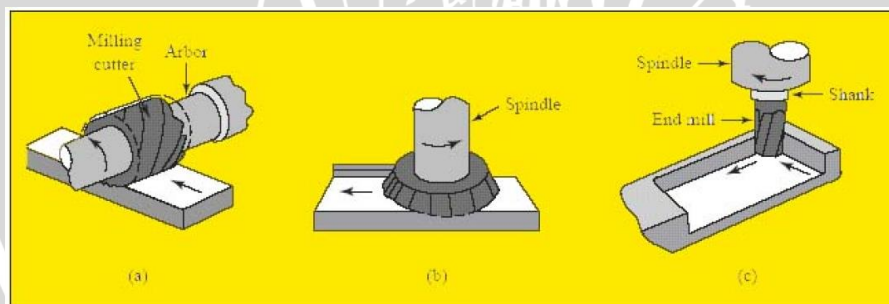
Dalam proses pemesinan, gerakan pahat terhadap benda kerja yang dipotong dibagi menjadi dua yaitu gerak pemotongan dan gerak pemakanan. Pada tabel 2.1 merupakan klasifikasi proses pemesinan menurut jenis gerak relatif pahat terhadap benda kerja. Proses pemesinan merupakan salah satu teknologi yang masih banyak digunakan dalam industri manufaktur. Sehingga penelitian tentang proses pemesinan terus dikembangkan dengan tujuan untuk menghasilkan produk pemesinan serta parameter pemotongan yang baik.

2.4 Proses Frais

Proses pemesinan frais (*milling*) merupakan proses penyayatan benda kerja menggunakan alat potong dengan mata potong jamak yang berputar. Proses penyayatan menggunakan gigi potong yang banyak yang mengitari pahat ini dapat menghasilkan proses pemesinan yang lebih cepat. Permukaan benda kerja yang disayat dapat berupa datar, menyudut dan melengkung. Permukaan benda kerja hasil proses *milling* juga bisa berbentuk kombinasi dari beberapa bentuk.

2.4.1 Klasifikasi Proses Frais

Klasifikasi proses frais dapat dibagi menjadi tiga yaitu berdasarkan jenis pahat, arah penyayatan dan posisi relatif pahat terhadap benda kerja.



Gambar 2.1 (a) *Slab Milling* (b) *Face Milling* (c) *End Milling*
Sumber: Widarto (2008:187)

a. *Slab Milling*

Proses frais ini disebut juga *slab milling* atau frais periperal, sumbu rotasi dari pahat sejajar dengan permukaan benda kerja. Pahat yang digunakan memiliki mata pahat berbentuk heliks. Pahat berbentuk heliks sering digunakan karena beban pada mata gigi yang lebih rendah saat proses *milling* berlangsung, sehingga permukaan benda kerja lebih halus dan juga mengurangi gaya pada pahat.

b. *Face Milling*

Pada proses *face milling*, pahat dipasang pada poros yang memiliki sumbu putar tegak lurus terhadap benda kerja. Pahat ini memiliki mata yang tajam pada bagian tepinya. Permukaan hasil proses frais dihasilkan dari penyayatan oleh gigi.

c. *End Milling*

Pahat pada proses *end mill* memiliki tangkai yang lurus dan meruncing dengan berbagai ukuran. Pahat berputar pada sumbu tegak lurus terhadap benda kerja dan juga dapat dimiringkan sesuai dengan kebutuhan. Gigi potong pada pahat terletak pada selubung dan badan pahat.

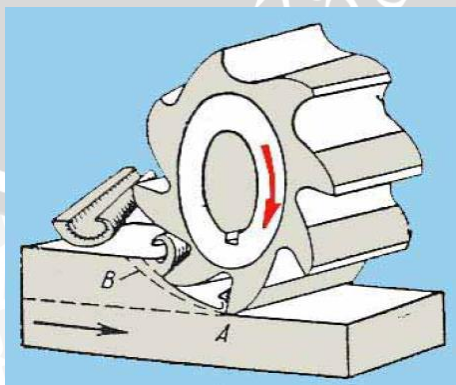
2.4.2 Mekanisme Proses Frais

Mekanisme proses frais dapat dibedakan berdasarkan arah gerak rotasi pahat, yaitu *conventional milling (up milling)* dan *climb milling (down milling)*. Setiap mekanisme memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing.

1. *Conventional Milling (Up Milling)*

Proses pemakanan pada *conventional milling* yaitu arah gerakan pahat yang berlawanan dengan arah pemakanan pada saat pemotongan. Benda kerja bergerak menuju ke arah sisi mata pahat bergerak arah naik. Hal ini menyebabkan benda seolah ditahan oleh putaran pahat. Geram yang dihasilkan bervariasi dari tipis pada saat mulai memotong menjadi tebal ketika meninggalkan benda.

Kelebihan *conventional* yaitu kerja pahat tidak dipengaruhi oleh karakteristik benda kerja. Getaran yang ditimbulkan lebih kecil dibanding *climb mil*. Kekurangan *conventional* yaitu hasil pemotongan lebih kasar karena arah pemakanan berlawanan dan benda kerja cenderung terangkat.

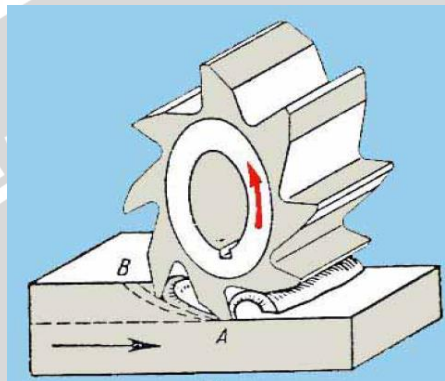


Gambar 2.2 Proses *conventional milling*
Sumber: Widarto (2008:188)

2. *Climb Milling (Down Milling)*

Pada proses *climb mill* arah pemakanan searah dengan arah pahat pada saat poses pemotongan. Benda kerja bergerak menuju arah pahat dimana sisi pahat bergerak ke arah turun. Geram yang dihasilkan memiliki bentuk dari tebal ke tipis.

Kelebihan *climb mill* yaitu hasil pemotongan lebih halus karena arah pemakanan yang searah dan benda kerja posisinya tertahan karena arah pemakanan yang searah. Kekurangan *climb mill* yaitu kurang cocok untuk pengerjaan benda yang kasar karena akan terjadi pemakanan yang berlebih sehingga akan mengurangi umur pahat.



Gambar 2.3 Proses *climb milling*
Sumber: Widarto (2008:188)

2.5 Parameter Pemotongan

2.5.1 Kecepatan Potong (*Cutting Speed*)

Kecepatan potong adalah kecepatan gerakan pahat dalam proses pemotongan benda kerja. Kecepatan potong tersebut ditentukan oleh diameter pahat dan kecepatan spindle. Pada tabel 2.2 dapat dilihat pemilihan parameter pemotongan berdasarkan material pahat dan benda kerja. Kecepatan potong dipengaruhi oleh kekerasan material benda kerja, material pahat, geometri pahat dan tingkat kekasaran permukaan yang dikehendaki.

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

Dengan:

v : kecepatan potong (m/min)

d : diameter pahat (mm)

n : putaran spindle (rpm)

Tabel 2.2 Data untuk mesin *milling*

Material	Kekerasan BHN	HSS		Karbida	
		Speed m/min	Feed Mm/tooth	Speed m/min	Feed 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)

2.5.2 Kecepatan Pemakanan (*Feed Rate*)

Kecepatan pemakanan dapat dihitung berdasarkan ketebalan geram yang dapat dipotong oleh gigi pahat atau pemakanan per gigi. Besarnya pemakanan tiap gigi tergantung dari jenis material benda kerja, material 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 akan semakin tebal dan banyak sehingga menghasilkan permukaan yang kasar. Persamaan untuk mencari kecepatan pemakanan yaitu:

$$f_z = \frac{v_f}{nz} \quad (2-2)$$

Dengan:

v_f : kecepatan pemakanan (mm/min)

f_z : pemakanan per gigi (mm/gigi)

n : putaran spindel (rpm)

z : jumlah mata pahat

2.5.3 Kedalaman Pemakanan (*Depth of Cut*)

Penentuan kedalaman pemakanan berhubungan erat dengan kecepatan pemakanan dan diameter pahat. Semakin tinggi kecepatan pemakanan maka pahat yang digunakan semakin kecil diameternya dan kedalaman benda kerja juga semakin berkurang.

Kedalaman pemakanan juga dapat mempengaruhi kualitas hasil pemotongan dari produk yang dihasilkan. Karena semakin dalam pemotongan maka kecepatan penghasilan geram akan semakin meningkat. Dengan meningkatnya geram yang dihasilkan maka gaya yang dihasilkan pada saat proses pemotongan semakin besar sehingga dapat mengganggu kerja dari pahat yang dapat mengurangi kualitas dari hasil pemotongan.

$$Z = \frac{v_f a w}{1000} \quad (2-3)$$

Dengan:

- Z : kecepatan penghasilan geram (cm³/min)
- v_f : kecepatan pemakanan (mm/min)
- a : kedalaman pemotongan (mm)
- w : lebar pemotongan (mm)

2.6 Gaya Tangensial (*Gaya Potong*) Proses Frais

Untuk mengetahui gaya pemotongan spesifik dalam proses frais diperlukan dinamometer momen puntir yang dipasang pada spindel mesin frais. Dengan dinamometer tersebut dapat dipelajari pengaruh kondisi pemotongan termasuk jenis pahat frais dengan geometri serta jumlah giginya terhadap gaya dan momen puntir yang pada akhirnya akan menentukan ketelitian geometri produk yang dihasilkan.

Besarnya gaya potong dipengaruhi oleh luas penampang geram dan gaya potong spesifik. Gaya potong spesifik tersebut dipengaruhi oleh gerak makan atau lebih tepatnya tebal geram sebelum terpotong. Dalam proses frais harga tebal geram tersebut berubah sesuai dengan sudut poisi dari suatu gigi pada saat tertentu. Dengan demikian untuk menghitung gaya potong perlu diketahui harga tebal geram pada saat tersebut.

$$h = f_z \sin k_r \sin \phi \quad (2-4)$$

Dengan:

- h : tebal geram (mm)
- f_z : pemakanan pergigi (mm/gigi)
- k_r : sudut potong utama
- φ : sudut posisi

Dalam frais tegak maka gaya tangensial pergigi dapat ditulis sebagai berikut:

$$F_t = k_s A \tag{2-5}$$

$$k_s = k_{s1.1} h^{-p} \tag{2-6}$$

$$A = h a (\sin k_r)^{-1} \tag{2-7}$$

Dengan:

F_t : gaya potong (N)

k_s : gaya potong spesifik (N/mm²)

$k_{s1.1}$: gaya potong spesifik referensi (N/mm²)

p : pangkat untuk tebal geram rata-rata

A : luas penampang geram (mm²)

Tabel 2.3 Gaya potong spesifik referensi dalam proses frais

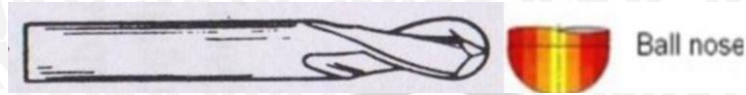
Jenis Benda Kerja	Klasifikasi DIN	Kekuatan UTS, N/mm ²	$k_{s1.1}$ (N/mm ²) [▼]	p
Baja Struktur: (Structural Steels)	St 50	520	1990	0,25
	St 60	620	2110	0,16
Baja Mampu Laku Panas (Heat treable Steels)	Ck 45	670	2220	0,14
	Ck 60	770	2130	0,17
Baja Sementasi (Cementation Steels)	16 Mn Cr 5	770	2100	0,27
	18 Cr Ni 6	630	2260	0,30
	42 Cr Mo 4	730	2500	0,26
	34 Cr Mo 4	600	2240	0,21
	50 Cr V 4	600	2220	0,27
	EC Mo 80	590	2290	0,17
Baja Perkakas Panas: (Hot Work Tool Steels)	55 Ni Mo V6			
	- annealed	940	1740	0,25
	- treated	(352 BHN)	1920	0,24
Baja Perkakas Ekstrusi: (Cold Extrusion T.S)	210 Cr 46	-	2100	0,26
	34 Cr 4	-	2100	0,26
Besi Tuang : (Cast Iron)	GG 26	(200 BHN)	1160	0,26
	GG 30		1100	0,26

Sumber: Rochim (1993:214)

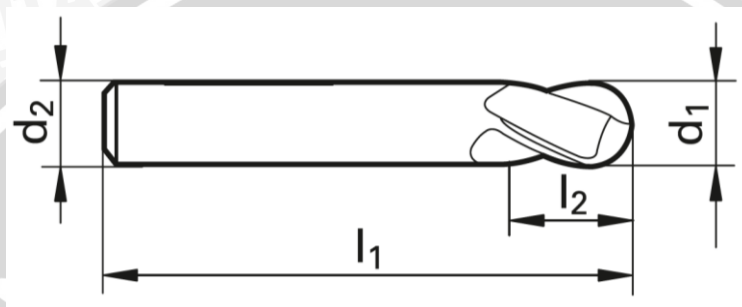
2.7 Ball Nose End Mill

Pahat *ball nose end mill* merupakan salah satu jenis pahat yang banyak digunakan dalam mesin *milling*. Ukuran pahat jenis ini sangat beragam, mulai dari ukuran kecil sampai dengan ukuran besar. Pahat *end mill* biasanya terbuat dari baja kecepatan tinggi (HSS) atau karbida serta memiliki satu atau beberapa alur (*flute*). Pahat ini biasanya dipakai untuk membuat alur pada bidang datar atau pasak. Pahat ini dapat dipasang pada posisi tegak (*vertical*) maupun posisi tidur (*horizontal*).

Pahat *ball nose end mill* memiliki ujung pahat yang berbentuk setengah bola atau radius. Pahat ini biasanya digunakan untuk pemakanan permukaan dengan bentuk benda kerja yang berupa permukaan silindris. Pahat *ball nose end mill* dapat bekerja pada permukaan maupun pada tepian pahat.



Gambar 2.4 Pahat *ball nose end mill*
Sumber: Pemrograman Mesin CNC TU 3A



Gambar 2.5 Desain pahat *ball nose end mill*
Sumber: Guhring (2000:1171)

- Diameter luar (*outside diameter*) yaitu diameter lingkaran luar yang melakukan pemakanan samping.
- Panjang (*length*) yaitu panjang pahat dari ujung gigi sampai ujung *shank*.
- Gigi (*tooth*) yaitu bagian dari pahat yang tajam pada bagian samping.
- Jumlah gigi (*flute*) yaitu banyaknya jumlah alur heliks sepanjang pshat.
- Sudut heliks yaitu sudut alur dari pisau pemotong *ball nose end mill* yang berbentuk heliks.
- Pemegang (*shank*) yaitu bagian silinder yang tidak beralur dari pahat yang digunakan.

2.8 Aluminium

Menurut Surdia (1995) penggunaan aluminium merupakan yang tertinggi diantara logam non fero setiap tahunnya. Keunggulan dari aluminium yaitu memiliki massa ringan serta memiliki ketahanan korosi dan penghantar listrik yang baik. Penambahan unsur lain untuk paduan aluminium yang dapat menambah sifat mekaniknya antara lain Cu, Mg, Mn, Ni, Zn dan lain sebagainya. Oleh karena itu, material ini sering digunakan sebagai bahan dalam berbagai industri yaitu pesawat terbang, mobil konstruksi dan lain sebagainya.

2.8.1 Aluminium 6061

Aluminium 6061 termasuk dalam paduan Al-Mg-Si. Paduan ini telah banyak digunakan menjadi objek riset karena murah, mudah dibentuk, tahan korosi dan sebagai tambahan dapat dilakukan perlakuan panas setelah pengerjaan.

Tabel 2.4 Sifat-sifat mekanik paduan Aluminium 6061

Paduan	Keadaan	Kekuatan tarik (kgf/mm ²)	Kekuatan mulur (kgf/mm ²)	Perpanjangan (30%)	Kekuatan geser (kgf/mm ²)	Kekerasan Brinell	Batas leleh (kgf/mm ²)
6061	O	12,6	5,6	30	8,4	30	6,3
	T4	24,6	14,8	28	16,9	65	9,5
	T6	31,6	28	15	21	95	9,5

Sumber: Surdia (1995:140)

2.9 Getaran Dalam Proses Pemesinan

Getaran yang dialami oleh mesin disebabkan adanya sumber getaran yang diteruskan ke seluruh bagian atau komponen dari mesin tersebut. Sumber getaran ini dapat berasal dari mesin itu sendiri. Getaran pemesinan merupakan parameter yang tidak dapat dikontrol secara bebas, sebab keberadaannya akan selalu timbul pada saat proses pemesinan berlangsung. Getaran pada proses pemesinan merupakan getaran yang disebabkan oleh gaya potong dan getaran eksitasi pribadi.

2.9.1 Klasifikasi Getaran

Getaran merupakan gerakan bolak-balik melalui titik kesetimbangan. Yang dimaksud kesetimbangan yaitu keadaan dimana suatu benda berada pada posisi diam jika tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut. Getaran mempunyai amplitudo (jarak simpangan terjauh dengan titik tengah) yang sama.

1. Getaran Bebas

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

a) Getaran bebas tanpa redaman

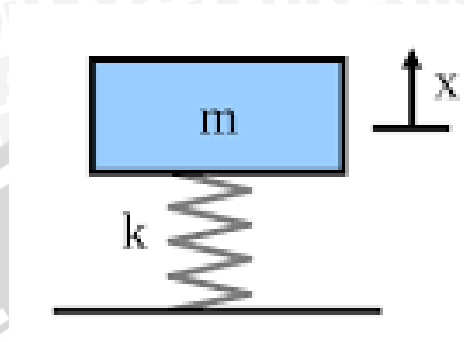
Pada model sederhana redaman dapat dianggap diabaikan dan tidak ada gaya luar yang mempengaruhi massa. Pada gambar 2.6 gaya yang berlaku pada pegas F_s sebanding

dengan panjang peregangan x , sesuai hukum Hooke atau bila dirumuskan secara matematis:

$$F_s = -kx \quad (2-8)$$

Dengan:

k : tetapan pegas (N/m)



Gambar 2.6 Model massa pegas sederhana

Sumber: Sonief (2014:4)

Sesuai hukum kedua Newton gaya yang ditimbulkan sebanding dengan percepatan massa:

$$\Sigma F = m a = m \ddot{x} \quad (2-9)$$

Karena $F = F_s$, maka didapatkan persamaan diferensial berikut:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2-10)$$

Bila kita menganggap bahwa memulai getaran sistem dengan meregangkan pegas sejauh A kemudian melepaskannya, solusi persamaan diatas yang memberikan gerakan massa adalah:

$$x(t) = A \cos(2\pi f_n t) \quad (2-11)$$

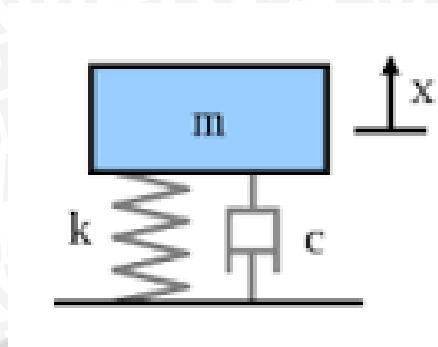
Solusi ini menyatakan bahwa massa akan berosilasi dalam gerak harmonis sederhana yang memiliki amplitudo A dan frekuensi f_n . Bilangan f_n adalah salah satu besaran yang terpenting dalam analisis getaran dan dinamakan frekuensi alami tak teredam.

Untuk sistem massa pegas sederhana f_n didefinisikan sebagai:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2-12)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2-13)$$

b) Getaran bebas dengan redaman



Gambar 2.7 Model massa pegas peredam sederhana
Sumber: Sonief (2014:5)

Bila peredaman diperhitungkan, berarti gaya peredaman juga berlaku pada massa selain gaya yang disebabkan oleh peragangan pegas. Bila bergerak dalam fluida benda akan mendapatkan peredaman karena kekentalan fluida. Gaya akibat kekentalan ini sebanding dengan kecepatan benda. Konstanta kekentalan (viskositas) c dinamakan koefisien peredaman dengan satuan N s/m.

$$F_d = -cv = -c\dot{x} = -c \frac{dx}{dt} \quad (2-14)$$

Dengan menjumlahkan semua gaya yang berlaku pada benda maka didapatkan persamaan:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2-15)$$

Solusi persamaan ini tergantung pada besarnya redaman. Bila redaman cukup kecil, sistem masih akan bergetar, namun pada akhirnya akan berhenti. Keadaan ini disebut kurang redaman dan termasuk kasus yang paling mendapatkan perhatian dalam analisis vibrasi. Bila peredaman diperbesar sehingga mencapai titik saat sistem tidak lagi berisolasi, maka akan mencapai titik redaman kritis. Bila peredaman ditambahkan melewati titik kritis ini sistem disebut dalam keadaan lewat redam. Nilai koefisien redaman yang diperlukan untuk mencapai titik redaman kritis pada model massa pegas redaman adalah:

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (2-16)$$

Untuk mengkarakterisasi jumlah peredaman dalam sistem digunakan nisbah yang dinamakan nisbah redaman. Nisbah ini adalah perbandingan antara peredaman sebenarnya terhadap jumlah peredaman yang diperlukan untuk mencapai titik redaman kritis. Rumus nisbah redaman adalah:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (2-17)$$

Frekuensi alamiah teredam lebih kecil daripada frekuensi alamiah takredam.

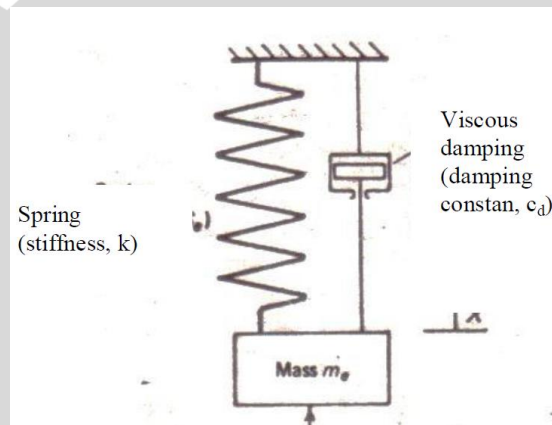
$$f_d = \sqrt{1 - \zeta^2} f_n \quad (2-18)$$

2. Getaran Paksa Dengan Redaman

Getaran paksa terjadi bila gaya bolak balik atau getaran diterapkan pada sistem mekanis. Terjadinya getaran antara pahat dan benda kerja pada saat proses pemesinan berlangsung akan menimbulkan efek yang merugikan. Kerugian tersebut diantaranya menurunkan ketelitian geometri, mempercepat laju keausan pahat dan lain-lain.

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

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (2-19)$$



Gambar 2.8 Pemodelan sistem pegas massa satu derajat kebebasan dengan peredam cairan
Sumber: Boothroyd (1989:241)

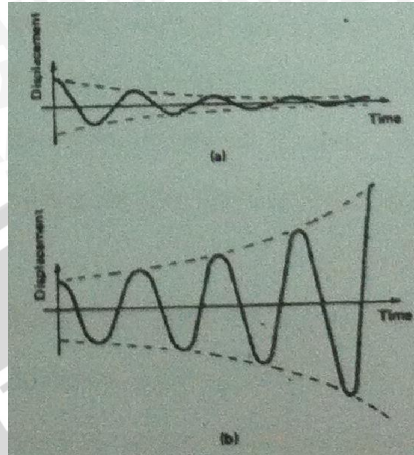
2.9.2 Getaran Tereksitasi Sendiri (*Chatter*)

Chatter bisa terjadi pada saat proses berlangsung ketika variasi siklik pada gaya potong tidak normal. *Chatter* sulit diketahui penyebab gaya getarnya dan sulit untuk memprediksi kondisi yang akan terjadi atau untuk menentukan perubahan pada kondisi pemotongan diperlukan untuk memperbaiki fenomena ini.

Pada proses pemesinan, getaran tereksitasi sendiri bisa terjadi dengan dua cara yaitu:

1. Pada kondisi tertentu proses pemotongan pada dasarnya tidak stabil sehingga perpindahan relatif pahat terhadap benda kerja yang sangat cepat akan menimbulkan amplitudo getaran yang besar. Situasi tidak stabil ini bisa dimodelkan dengan mengasumsikan bahwa C_d gaya redam ekivalen per unit kecepatannya adalah negatif. Kondisi ini secara umum mengacu pada peredaman negatif dan sistem redaman negatif

kondisinya tidak stabil. Pada gambar 2.9 perilaku yang dihasilkan sistem pegas massa sederhana dibandingkan dengan perilaku sistem yang sama dengan kondisi redaman positif. Ini akan menunjukkan bagaimana interaksi antara pahat potong dan benda kerja bisa menghasilkan redaman negatif konstan pada mesin.



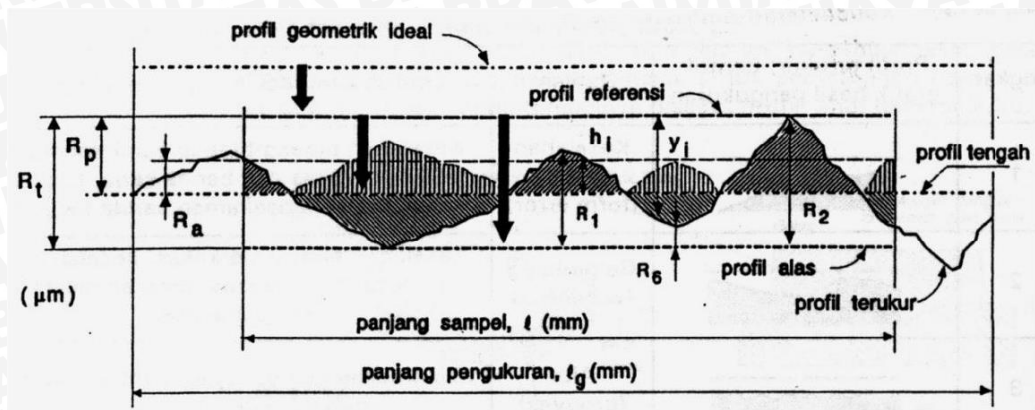
Gambar 2.9 Sistem pegas massa satu derajat kebebasan. a) peredaman positif (konstanta redaman $C_d > 0$), b) peredaman negatif (konstanta redaman $C_d < 0$)

Sumber: Boothroyd (1981:202)

2. Proses pemotongan pada dasarnya stabil ($C_d > 0$) dan getaran yang muncul disebabkan oleh gerak relatif pahat-benda kerja selama proses pemotongan. Namun, dengan operasi pemotongan paling praktis, pemotongan *overlapping* diambil dan ketika pahat berpindah selama langkah awal pemotongan getaran paksa terjadi karena variasi pada gaya potong. Getaran paksa mengakibatkan kenaikan amplitudo getaran dan disebut *regenerative chatter*.

2.10 Kekasaran Permukaan (*Surface Roughness*)

Kekasaran permukaan merupakan suatu bentuk dari ketidakrataan tekstur suatu permukaan yang kemungkinan dapat berupa goresan atau lekuk-lekuk kecil. Nilai kekasaran permukaan berpengaruh terhadap kualitas suatu produk hasil proses pemesinan. Karena nilai kekasaran permukaan dapat berpengaruh terhadap masalah gesekan pelumasan, keausan dan lain sebagainya.



Gambar 2.10 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*)
Profil referensi juga disebut profil puncak (*crestline*). Merupakan profil yang digunakan sebagai referensi untuk menganalisa ketidakteraturan konfigurasi permukaan. Profil ini dapat berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometri ideal yang menyinggung puncak tertinggi dari profil geometri ideal, serta menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dalam suatu panjang sampel.
- Profil dasar (*root profile*)
Merupakan profil yang digeser ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal pada suatu panjang sampel) sehingga menyinggung titik terendah dari profil terukur.
- Profil tengah (*center profile*)
Pada gambar ditunjukkan oleh daerah yang diarsir tegak dan datar. Merupakan profil referensi yang digeser ke bawah sedemikian rupa, sehingga memiliki jumlah luas yang sama dari daerah-daerah diatas profil tengah sampai profil terukur.

Beberapa parameter permukaan lainnya:

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

$$R_a = \frac{1}{n} (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n) = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n} \quad (2-20)$$

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
Merupakan akar dari jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan profil tengah.

Menurut profilnya, ketidakraturan konfigurasi suatu permukaan dapat dibagi menjadi:

- Tingkat pertama yaitu ketidakraturan 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.
- Tingkat kedua yaitu 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.
- Tingkat ketiga yaitu alur (*grooves*), ketidakraturan permukaan karena adanya guratan yang disebabkan adanya jejak dari pahat.
- Tingkat keempat yaitu serpihan (*flake*), ketidakraturan yang terjadi karena proses pembentukan geram.
- Tingkatan kelima merupakan kombinasi dari ketidakraturan dari tingkatan satu sampai empat.

Faktor yang menyebabkan terjadinya kekasaran permukaan pada proses permesinan *milling* yaitu:

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

Tabel 2.5 Angka kekasaran permukaan

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

Sumber: Rochim (1993:76)

Tabel 2.6 Kemampuan proses pemesinan 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)

2.11 Hipotesis Penelitian

Dari penjelasan tersebut maka dapat disimpulkan hipotesis yaitu semakin tinggi *feed rate* dan *depth of cut* maka kekasaran permukaan akan semakin tinggi serta semakin tinggi *feed rate* dan *depth of cut* maka amplitudo getaran yang terjadi juga semakin tinggi. Semakin besar nilai amplitudo getaran, maka semakin besar pula nilai kekasaran permukaan yang terbentuk.