

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Studi Terdahulu

Huo et al. (2015) melakukan penelitian tentang analisis karakter permukaan *monocrystalline silicon* yang dilakukan proses *micro-milling* menggunakan pahat *micro-end mill* berbahan tungsten karbida berdiameter 0,5 mm. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa semakin tinggi *spindle speed* dan semakin rendah *feedrate* yang dihasilkan akan memberikan kekasaran permukaan yang rendah.

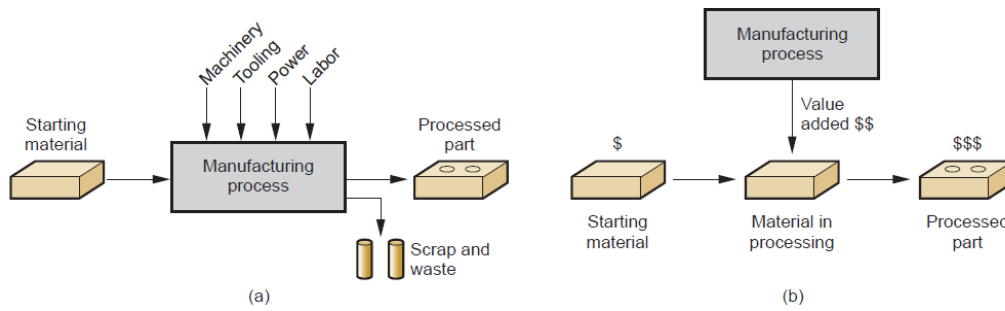
Kalinski et al. (2015) melakukan penelitian tentang reduksi getaran yang terjadi pada proses *ball-end milling* dengan menentukan *spindle speed* optimalnya. *Spindle speed* berpengaruh terhadap terciptanya getaran pada pahat dalam konteks ini *ball-end mill*. Dari penelitian ini didapat kesimpulan bahwa amplitudo getaran pada pahat potong menurun ketika diperoleh nilai *spindle speed* semakin optimal, sehingga meningkat pula kualitas produk yang dihasilkan.

Paul et al. (2013) melakukan penelitian tentang efek dari pengaplikasian magnet sebagai peredam dalam proses *hard turning*. Dari penelitian ini dihasilkan kesimpulan bahwa magnet sebagai peredam mampu memperkecil getaran pada pahat potong, meningkatkan *surface finish*, mereduksi *cutting force* dan *tool wear* secara signifikan.

Ali et al. (2012) melakukan penelitian tentang getaran permesinan (*chatter*) dan kekasaran permukaan benda kerja PMMA (*poly methyl methacrylate*) pada proses *micro milling*. Dari penelitian tersebut didapat kesimpulan bahwa parameter permesinan yaitu *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* dapat mempengaruhi nilai *chatter* yang terjadi pada mesin *micro milling*. Besarnya nilai *chatter* diperanguhi oleh *feed rate* dan *depth of cut*. Sedangkan yang paling mempengaruhi dalam menentukan nilai kekasaran adalah *spindle speed*.

### 2.2 Proses Manufaktur

Proses manufaktur bisa didefinisikan dalam dua cara, yaitu secara teknologi dan secara ekonomi. Proses manufaktur secara teknologi yaitu penerapan dari proses fisik maupun kimiawi yang bertujuan mengubah geometri, sifat, dan/atau tampilan dari suatu bahan awal untuk menghasilkan produk atau *part* tertentu. Proses manufaktur juga termasuk proses *assembly* dari sejumlah *part* untuk membuat produk.



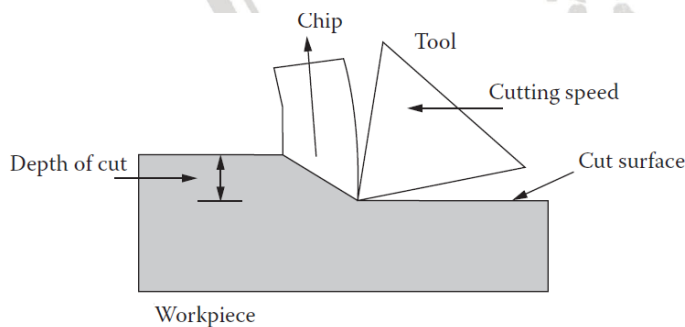
Gambar 2.1 a) *Technical Process* dan b) *Economic Process*

Sumber: Groover (2010, p.4)

Secara ekonomi, proses manufaktur adalah transformasi suatu material menjadi sebuah benda yang memiliki nilai guna yang lebih tinggi dengan satu atau lebih proses juga *assembly*. Pada intinya, proses manufaktur bertujuan untuk meningkatkan nilai guna suatu material dengan cara mengubah ukurannya, *properties*-nya, ataupun menggabungkannya dengan material lain yang sudah diubah. Sebagai contoh, ketika minyak bumi diubah menjadi plastik atau bijih besi diubah menjadi baja, nilai guna benda tersebut bertambah. (Groover, 2010, p.4)

### 2.3 Proses *Machining*

Proses *machining* merupakan proses manufaktur dengan menggunakan pahat potong (*cutting tool*) untuk menghilangkan sebagian material untuk mendapatkan bentuk yang diinginkan (Groover, 2010, p.483). Secara umum, proses *machining* dilakukan untuk *finishing* pada *parts* yang dihasilkan dari proses *casting* dan *forming* sebelum siap untuk disatukan (*assembly*) ataupun digunakan. (El-Hofy, 2014, p.1)



Gambar 2.2 Proses *Machining*

Sumber : El Hofy (2014, p.5)

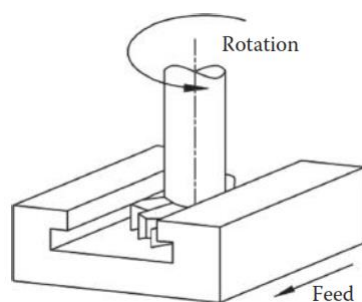
## 2.4 Mesin *Milling*

Proses *milling* termasuk proses manufaktur non-abrasif yang melakukan pemotongan menggunakan pahat dengan geometri tertentu (Rattat, 2017). Mekanismenya yaitu pahat potong *multi-edge* memotong berputar pada sumbu mesin dan melakukan proses permesinan terhadap benda kerja (*workpiece*). Oleh karena itu, mesin *milling* merupakan mesin perkakas yang berkapabilitas dalam melakukan proses *milling*. Secara umum penggunaan dari mesin *milling* yaitu dengan menempatkan benda kerja pada pencekam dan alat potong dipasangkan pada sumbu utama yang digerakkan oleh *spindle*. Mesin *milling* memiliki karakteristik yang serupa dengan mesin bor, tetapi dengan fleksibilitas yang lebih tinggi karena dapat melakukan pemakanan pada benda kerja ke segala arah (Groover, 2010, p.523).

Berdasarkan orientasi *spindle* yang memutar sumbu utamanya, mesin *milling* dibagi menjadi 3 macam, yaitu:

1. Mesin *milling universal*
2. Mesin *milling* vertikal
3. Mesin *milling* horizontal

Pada penelitian ini, proses yang dilakukan pada mesin *milling* adalah *slot-milling*. *Slot-milling* merupakan salah satu jenis dari proses *milling* yang bertujuan untuk membentuk celah pada benda kerja.



Gambar 2.3 Proses *Slot Milling*  
Sumber : El-Hofy (2014, p.7)

### 2.4.1 Parameter Pemotongan pada Proses *Slot-Milling*

Parameter pemotongan merupakan kondisi-kondisi yang ditentukan dalam melakukan proses permesinan. Terdapat beberapa macam parameter pemotongan pada proses *slot-milling*, antara lain:

#### 1. Kecepatan pemotongan dan *Spindle speed*

Kecepatan pemotongan ( $V_c$ ) merupakan kecepatan tangensial dari sisi luar pahat potong. Kecepatan pemotongan secara langsung berkaitan dengan diameter pahat potong dan kecepatan putaran *spindle*, seperti pada persamaan berikut:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan:

$V_c$  = Kecepatan pemotongan (m/min)

D = Diameter pahat potong (mm)

N = *Spindle speed* (rpm)

Sumber: Davim (2011, p.222)

Besarnya nilai diameter pahat potong dalam satu kali jalannya pemakanan pada proses *milling* selalu tetap sehingga dalam parameter ini kecepatan putaran *spindle* yang mempengaruhi kualitas suatu produk.

#### 2. *Feed per tooth*

*Feed per tooth* ( $f_z$ ) merupakan jarak yang ditempuh pahat dalam menyayat benda kerja per jumlah sudu pahat (*cutting edge*). Parameter ini juga dapat diartikan sebagai ketebalan *chip* yang dihasilkan untuk satu sudu pahat, sesuai dengan persamaan berikut:

$$f_z = \frac{V_f}{z \cdot N} \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan:

$f_z$  = *Feed per tooth* (mm/tooth)

$V_f$  = *Feed rate* (mm/min)

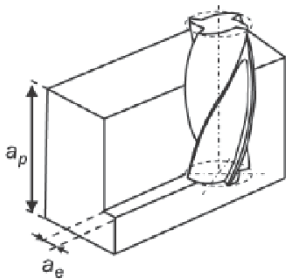
z = Jumlah sudu pahat (tooth)

N = Kecepatan putaran *spindle* (rpm)

Sumber: Davim (2011, p.223)

### 3. *Depth of Cut*

*Depth of Cut* adalah dalamnya pemotongan benda kerja yang dilakukan oleh pahat potong. Terdapat dua macam *depth of cut* pada proses *milling* antara lain *axial depth of cut* ( $a_p$ ) dan *radial depth of cut* ( $a_e$ ). Keduanya berpengaruh terhadap beban yang diterima oleh pahat potong. Beban yang diterima pahat akan semakin meningkat ketika nilai *depth of cut* semakin besar. Persamaan dari *depth of cut* adalah sebagai berikut:



Gambar 2.4 Axial Depth of Cut ( $a_e$ ) dan Radial Depth of Cut ( $a_p$ )  
Sumber: Davim (2011,p.225)

### 4. *Material removal rate*

*Material removal rate* dalam proses *milling* dapat ditentukan melalui *cross-sectional area* dari bagian yang terpotong dan *feed rate*:

$$R_{MR} = w \cdot d \cdot V_f \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan:

$R_{MR}$  = *Material removal rate* ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )

$w$  = Lebar pahat potong (mm)

$d$  = Dalamnya pemakanan/*depth of cut* (mm)

$V_f$  = *Feed rate* (mm/min)

Sumber: Groover (2010, p. 527)

#### 2.4.2 *Micromill CNC Milling*

*Micro-milling* (jika menggunakan pahat *end mill* menjadi *micro-end milling*) merupakan suatu proses yang memungkinkan dalam memproduksi *micro parts* termasuk cetakan/*dies* mikro dan perangkat berbahan logam yang berfungsi sepenuhnya (Ali et. al, 2012).

*Micromill CNC Milling* merupakan mesin perkakas berjenis *milling* yang dikontrol menggunakan bahasa numerik, yaitu data perintah dengan kode angka, huruf, dan simbol. Mesin *milling* CNC memiliki keunggulan daripada mesin perkakas konvensional di segi fleksibilitasnya dan produktivitasnya sehingga jenis mesin CNC cocok untuk produksi massal. Mesin CNC juga memiliki keunggulan dalam hal melakukan pengerjaan dengan tingkat kerumitan yang tinggi dan mengurangi campur tangan operator selama mesin beroperasi.

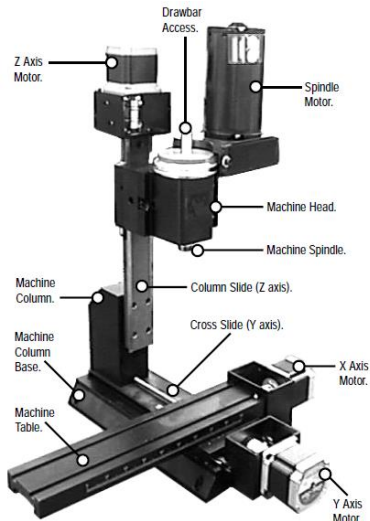


Gambar 2.5 Mesin *Micromill CNC Milling*  
Sumber: *Micromill Operator Manual*

Prinsip dasar dari mesin ini yaitu meja kerja bergerak melintang dan horizontal sedangkan pahat berputar dan bergerak secara vertikal. Arah persumbuan mesin ini mengacu pada koordinat kartesius dengan penjelasan sebagai berikut:

1. Sumbu X untuk arah gerak horizontal atau ke kiri dan ke kanan.
2. Sumbu Y untuk arah gerak melintang atau ke depan dan ke belakang.
3. Sumbu Z untuk arah gerak vertikal atau ke atas dan ke bawah.

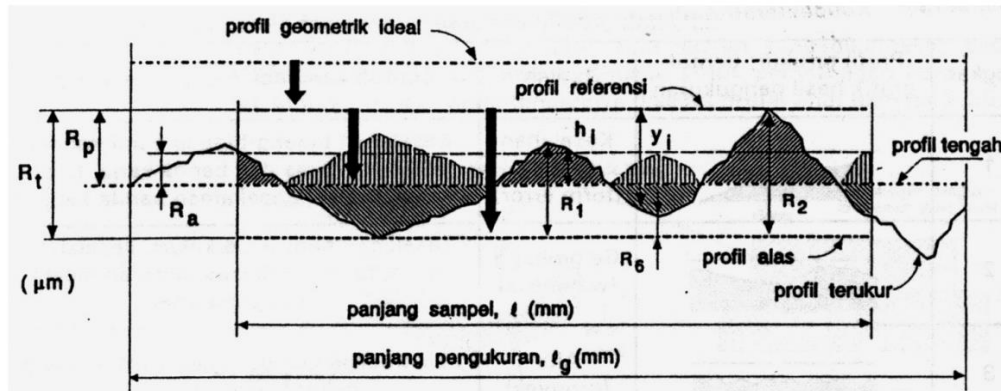
Untuk sistem persumbuan secara detail dapat dilihat pada gambar 2-9.



Gambar 2.6 Sistem Persumbuan Mesin CNC Milling  
 Sumber : *Micromill Operator Manual*

### 2.5 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan atau *surface roughness* merupakan ketidakrataan suatu konfigurasi permukaan yang dapat berupa lekukan-lekukan ataupun goresan kecil pada benda. Kekasaran permukaan digunakan sebagai tolak ukur kualitas dari suatu produk. Material dengan nilai kekasaran permukaan yang tinggi cenderung bersifat korosif. Beberapa istilah profil permukaan dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.7 Profil Kekasaran Permukaan  
 Sumber : Rochim (2001, p.56)

Beberapa bagian dari profil dan parameter kekasaran permukaan, yaitu:

1. Profil Geometri Ideal

Merupakan profil permukaan sempurna berupa garis lurus, lingkaran, dan garis lengkung.

2. Profil Terukur



Merupakan profil yang dapat diukur menggunakan alat ukur.

### 3. Profil Referensi

Merupakan profil yang berfungsi sebagai referensi atau acuan dalam menganalisis ketidakteraturan konfigurasi permukaan. Profil ini berbentuk garis lurus atau sesuai dengan bentuk profil geometri ideal dan menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dalam suatu panjang sampel. Profil ini juga biasa disebut dengan profil puncak (*cust-line*).

### 4. Profil Alas

Merupakan profil yang digeser ke bawah secara tegak lurus terhadap profil geometris ideal pada suatu panjang sampel sampai menyentuh titik terendah dari suatu profil terukur.

### 5. Profil Tengah

Merupakan profil yang posisinya berada di tengah-tengah berfungsi untuk mengetahui luas daerah di bawah profil tengah sampai profil terukur yang ditunjukkan oleh daerah terarsir.

### 6. Kekasaran Rata-rata Aritmetis (Ra)

Merupakan harga rata-rata aritmetis dari harga absolut antara profil terukur dengan profil tengah, disebut juga *mean roughness index*. Nilai kekasaran rata-ratanya ditinjau dari luasan puncak dan luasan lembah pada suatu panjang pengukuran tertentu.

Tabel 2.1  
Angka kekasaran (ISO *Roughness Number*) dan Panjang Sampel Standar

Harga kekasaran Ra ( $\mu\text{m}$ )	Angka kelas kekasaran	Panjang sampel (mm)
50	N12	8
25	N11	
12.5	N10	2.5
6.3	N9	
3.2	N8	
1.6	N7	0.8
0.8	N6	
0.4	N5	
0.2	N4	
0.1	N3	0.25
0.05	N2	
0.025	N1	

Sumber: Rochim (2001, p.62)



Hubungan dari nilai kekasaran permukaan dengan parameter *spindle speed* bisa didapat dari persamaan hubungan antara pemakanan dengan kekasaran permukaan terdapat pada persamaan berikut

$$Ra = \frac{f^2}{32NR} \dots\dots\dots (2-4)$$

dengan:

Ra = Kekasaran permukaan rata-rata ( $\mu\text{m}$ )

f = *Feed* (mm/rev)

NR = *Nose radius* (mm)

Sumber: (Groover, 2010, p.590)

Dimana nilai *feed* didapat melalui persamaan berikut

$$f = \frac{V_f}{N} \dots\dots\dots (2-5)$$

dengan:

$V_f$  = *Feed rate* (mm/min)

N = *Spindle speed* (rpm)

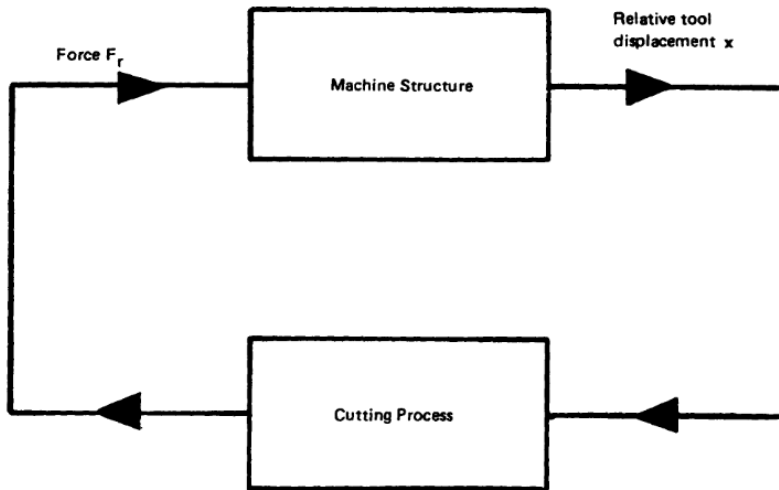
Sumber: Groover (2010, p.590)

Sehingga nilai kekasaran permukaan akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya nilai *spindle speed*. Hasil kekasaran permukaan yang diperoleh selama proses permesinan adalah gabungan dari kedua efek (Boothroyd, 1989, p.166), antara lain:

1. Kekasaran permukaan ideal, yang dihasilkan dari geometri pahat potong dan asutan (*feed*) atau kecepatan asutan (*feed speed*).
2. Kekasaran permukaan natural, hasil dari ketidakteraturan jalannya pahat selama proses pemotongan.

## 2.6 Getaran pada Proses Permesinan

Getaran dalam proses *milling*, terjadi karena adanya perpindahan (*displacement*) pada pahat potong dari titik keseimbangannya yang diakibatkan oleh terbentuknya gaya yang mengeksitasi sistem tersebut dan kembali lagi ke titik keseimbangannya dikarenakan adanya *regenerative effect*. *Regenerative effect* merupakan siklus yang terbentuk ketika *machine tool* mengalami *displacement* lalu pada *cutting process* dihasilkan nilai *cutting force* dan kembali lagi menghasilkan *tool displacement*, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.8.



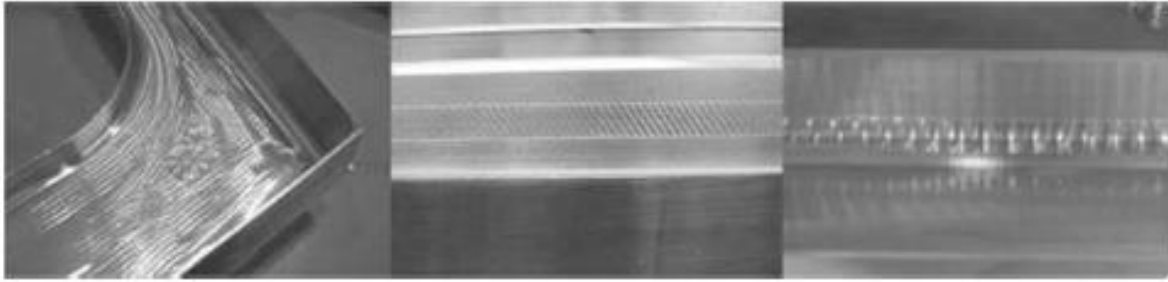
Gambar 2.8 Regenerative Effect  
 Sumber: Boothroyd (1989, p.252)

Besarnya getaran yang terjadi pada proses permesinan memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas dari suatu produk. Getaran yang tidak terkontrol akan mengakibatkan beberapa hal berikut:

- Permukaan benda kerja yang kasar.
- Dimensi benda kerja yang tidak sesuai.
- Keausan prematur, *chipping*, dan kegagalan pada pahat potong.
- Kemungkinan adanya kerusakan pada komponen mesin
- Suara bising jika parameter yang digunakan dalam frekuensi tinggi.

(Kalpakjian & Schmid, 2009, p.706).

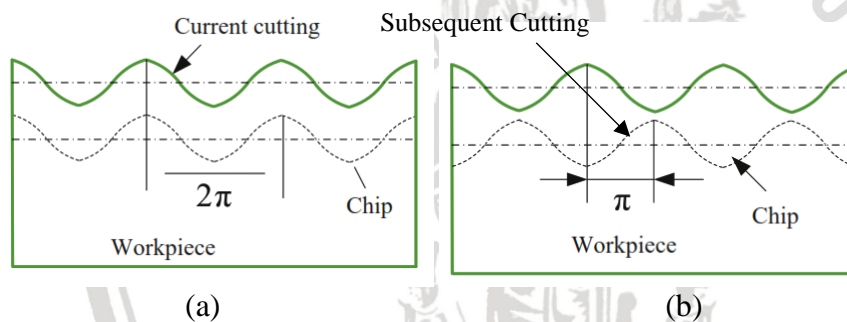
Selama operasi permesinan, *machine tools* mengalami kedua jenis getaran yaitu *forced vibrations* dan *self excited vibrations* (Altintas, 2012, p.125). *Self-excited vibrations* bisa disebut juga dengan istilah *chatter*, getaran ini disebabkan oleh adanya interaksi dari proses penghilangan geram dengan struktur dari pahat potong yang menciptakan fluktuasi pada *cutting force*. *Chatter* biasanya dimulai dengan adanya gangguan pada area pemotongan seperti inhomogenitas kondisi permukaan benda kerja.



Gambar 2.9 Chatter pada Proses Milling  
Sumber : Davim (2011, p. 283)

Getaran pada proses permesinan dapat digolongkan sebagai resonansi jika hasil bagi antara frekuensi natural dengan *excitation frequency* memiliki nilai yang bulat (integer), sedangkan getaran dapat digolongkan sebagai *regenerative chatter* jika hasil baginya berupa nilai yang tidak bulat. (Song, 2014, p.175)

Hal tersebut juga dapat dilihat melalui fase *chip load* pada gambar 2.10 di bawah ini



Gambar 2.10 Fase *Chip Load* untuk Resonansi (a) dan *Regenerative Chatter* (b)  
Sumber : Song (2014, p.175)

### 2.6.1 *Regenerative Chatter*

*Regenerative chatter* adalah salah satu jenis dari *self-excited vibration*, dimana tipe ini terjadi saat *cutting edge* memotong permukaan benda kerja yang sudah terpotong oleh *tooth* sebelumnya (Davim, 2011, p.284). Jika *tooth* sebelumnya mengalami getaran, maka *tooth* selanjutnya yang memotong permukaan yang sama akan menghasilkan *chip thickness* dan gaya pemotongan yang berbeda. Oleh karena itu, faktor-faktor yang mempengaruhi *chatter* antara lain:

- a. Gaya pemotongan, *chatter* akan semakin rentan terjadi ketika gaya pemotongan semakin besar dimana gaya pemotongan dipengaruhi parameter-parameter permesinan seperti *spindle speed*. *Spindle speed* yang terlalu rendah akan menghasilkan gaya pemotongan yang besar. Hubungan ini dapat diketahui melalui persamaan berikut

$$F_t = k_{tc} \cdot a \cdot h + k_{te} \cdot a \dots\dots\dots (2-6)$$

$$F_n = k_{nc} \cdot a \cdot h + k_{ne} \cdot a$$

dengan:

$F_t$  = *Tangential cutting force* (N)

$F_n$  = *Normal cutting force* (N)

$k_{tc}$ ,  $k_{te}$ ,  $k_{nc}$ ,  $k_{ne}$  = Koefisien *cutting force*

$a$  = *chip width/axial depth of cut* (mm)

$h$  = *chip thickness*

Sumber: Bolsunovsky (2013, p.235)

Nilai *chip thickness* bisa ditentukan dengan persamaan

$$h = f_z \cdot \sin(\theta) \dots\dots\dots (2-7)$$

dengan:

$f_z$  = *Feed per tooth* (mm/tooth)

$\theta$  = Sudut rotasi pahat

Sumber: Davim (2011, p. 225)

Kemudian nilai  $f_z$  dapat diketahui melalui persamaan 2-2 yang menjelaskan hubungan *spindle speed* dengan *feed per tooth* berbanding terbalik sehingga memenuhi pernyataan di atas.

- b. Jenis dan tebal *chip* yang dihasilkan, *continuous chip* menghasilkan *chatter* yang lebih kecil dibandingkan *discontinuous chip*.

Sesuai dengan namanya, *regenerative chatter* berlangsung secara terus menerus. *Self-excited vibrations* dapat dikontrol dengan menaikkan kekakuan dinamis dari sistem ataupun melakukan peredaman. (Kalpakjian & Schmid, 2009, p.707).

**2.6.2 Peredaman (*Damping*)**

Peredaman (*damping*) merupakan fenomena penurunan amplitudo getaran sebagai hasil dari energi yang terdisipasi dari suatu sistem untuk mengatasi gaya gesekan ataupun gaya resistif lainnya, dalam konteks ini *chatter*. Terdapat beberapa jenis peredaman, antara lain:

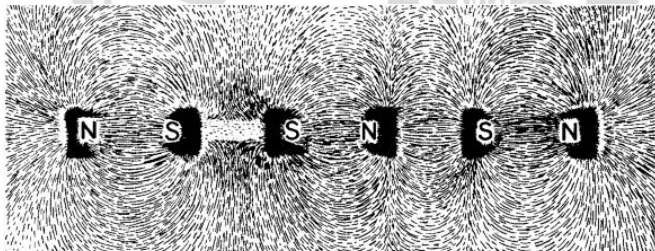
- 1. *Viscous damping*, yaitu peredaman dengan memanfaatkan viskositas suatu fluida yang berfungsi untuk menahan getaran. Contoh dari peredaman ini adalah oli atau minyak.



2. *Couloumb damping*, disebut juga sebagai peredaman gesekan kering. Peredaman jenis ini dihasilkan dari gesekan yang terjadi antara dua permukaan kering atau kurangnya pelumasan.
3. *Solid* atau *hysteretic damping*, yaitu peredaman yang dimiliki oleh material itu sendiri yang sedang mengalami getaran.
4. *Magnetic damping*, yaitu peredaman yang memanfaatkan medan magnet dalam meredam getaran. Prinsip dari peredaman ini menggunakan prinsip *eddy current* yang dapat menghasilkan gaya yang bersifat menahan getaran yang terjadi pada sebuah konduktor.

## 2.7 Magnet

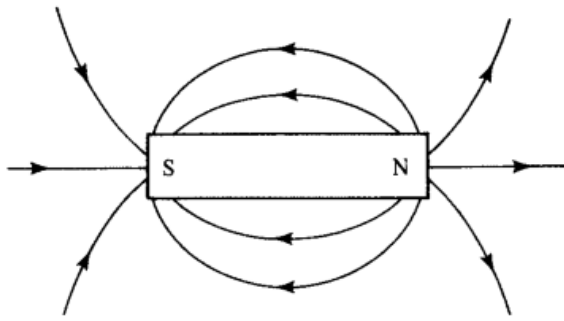
Magnet adalah suatu material atau objek yang dapat menghasilkan medan magnet. Medan magnet merupakan area dimana gaya magnet masih akan berpengaruh terhadap benda di sekitarnya. Pola ataupun bentuk medan magnet biasanya digambarkan dengan garis gaya magnet. Secara kasat mata, garis ini tidak terlihat kecuali dengan mendekatkan bijih besi kepada magnet.



Gambar 2.11 Garis Gaya Magnet  
Sumber : Cullity (2009, p.5)

Semakin rapat bijih besi yang menempel pada magnet, maka semakin kuat medan magnet yang berada pada area tersebut. Medan magnet terbesar terletak pada bagian kutub-kutub dari magnet dimana kutub magnet terdiri atas kutub utara (*north pole*) dan kutub selatan (*south pole*). Magnet memiliki prinsip jika kedua kutub yang sama masing-masing didekatkan, maka magnet akan tolak menolak dan sebaliknya jika kedua kutub yang berbeda didekatkan, maka magnet akan menarik satu sama lain.

Sifat lainnya dari magnet yaitu arah garis gaya magnet selalu dimulai dari kutub utara menuju ke kutub selatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.12 Arah Garis Gaya Magnet  
 Sumber : Cullity (2009, p.4)

Jika kedua objek menarik satu sama lain dan juga saling tolak, maka benda-benda tersebut dapat dikatakan sebagai magnet. Namun, jika terdapat benda yang tertarik tetapi tidak menolak terhadap magnet, benda tersebut tergolong sebagai *magnetic material* (Coey, 2009).

**2.7.1 Magnet Permanen**

Magnet permanen merupakan salah satu jenis dari magnet yang dapat mempertahankan kekuatan magnetnya dalam jangka waktu lama. Magnet jenis ini terbuat dari feromagnetik keras yang dapat termagnetisasi jika ditempatkan di dalam medan magnet.

**2.7.2 Magnet Permanen sebagai Peredam Getaran**

Dua buah magnet jika didekatkan pada dua kutub yang sama akan menghasilkan gaya tolak atau *repulsive force*. Yang pertama dilakukan adalah mencari nilai induksi magnet ( $B_0$ ) melalui persamaan berikut

$$B_0 = \frac{B_r}{\pi} \left( 0,5\pi - \tan^{-1} \frac{AB}{2L\sqrt{4L^2 + A^2 + B^2}} \right) \dots \dots \dots (2-8)$$

dengan:

$B_0$  = Induksi magnet pada permukaan magnet permanen (T)

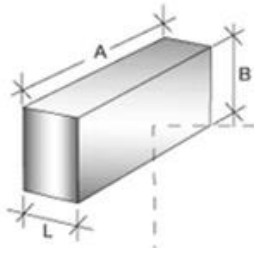
$B_r$  = *Residual induction* (T)

A = Panjang magnet permanen batang (m)

B = Lebar magnet permanen batang (m)

L = Tebal magnet permanen batang (m)





Gambar 2.13 Dimensi Magnet Permanen Batang

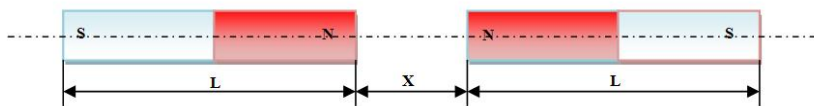
Sehingga, persamaan gaya tolak yang dihasilkan oleh dua buah gaya magnet adalah

$$F = \frac{B_0^2 (AB)^2}{4\pi\mu_0 \left(0,5\pi - \tan^{-1} \frac{AB}{2L\sqrt{4L^2 + A^2 + B^2}}\right)^2} \left(-\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x+2L)^2} + \frac{2}{(x+L)^2}\right) \dots (2-9)$$

dengan:

x = Jarak antara 2 magnet permanen

$\mu_0$  = Permeabilitas ruang hampa =  $4\pi \times 10^{-7}$



Gambar 2.14 Ilustrasi Posisi Tolak Menolak pada 2 buah Magnet Permanen Identik

Besarnya jarak antara 2 magnet permanen (x) dapat ditentukan terlebih dahulu dengan peletakan yang sedekat mungkin dengan pahat tetapi tidak menempel (Sulaiman, 2012). Pada penelitian ini, nilai x yang digunakan sebesar 25 mm berdasarkan pertimbangan keamanan antara magnet dengan pahat pada saat proses permesinan. Menggunakan persamaan 2-9 besarnya gaya tolak antara 2 magnet permanen yang didapat adalah 6,7 N dengan kedua magnet memiliki kekuatan masing-masing sebesar 12000 Gauss.

Besarnya gaya tolak yang dimiliki magnet permanen memiliki hubungan terhadap peredaman getaran dibuktikan dengan berkurangnya nilai amplitudo getaran, melalui permodelan *single degree of freedom* (SDOF) system dengan peredaman dapat diketahui persamaan berikut

$$m\ddot{x} + (c_1 + c_2)\dot{x} + (k_1 + k_2)x = F_0 \dots (2-10)$$

Dan persamaan untuk amplitudo getaran yaitu

$$X = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}} \dots (2-11)$$



keterangan:

$m$  = Massa (kg)

$c$  = Konstanta peredaman

$k$  = Konstanta pegas

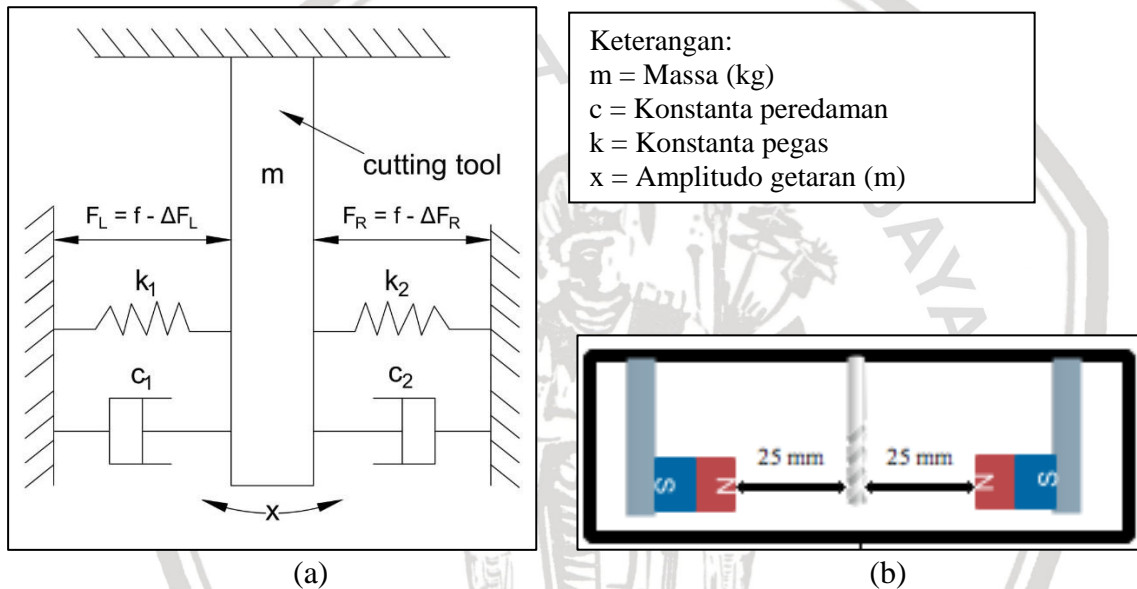
$x$  = Amplitudo getaran (m)

$\omega$  = Frekuensi angular dari gaya harmonik (rad/s)

$F_0$  = Gaya yang mengeksitasi/*Cutting Force* (N)

Sumber : Rao (2011, p.271)

Permodelan SDOF *system* diterapkan pada penelitian ini dengan magnet sebagai peredam menghasilkan *free body diagram* sebagai berikut



Gambar 2.15 Sistem *Single Degree of Freedom* (SDOF) dengan Magnet Permanen (a) dan Skema Pemasangannya (b)

*Displacement* yang dihasilkan oleh *cutting tool* terdorong oleh gaya yang dihasilkan magnet. *Repulsive force* menyebabkan pahat tetap berada di titik keseimbangannya dan menghasilkan persamaan

$$F_L = f - \Delta F_L \dots\dots\dots(2-12a)$$

$$F_R = f - \Delta F_R \dots\dots\dots(2-12b)$$

keterangan:

$F_L$  = Gaya yang dihasilkan oleh magnet di sebelah kiri pahat (N)

$F_R$  = Gaya yang dihasilkan oleh magnet di sebelah kanan pahat (N)

$f$  = Gaya eksitasi eksternal yang dihasilkan *cutting tool* (N)

Sumber : Nandi (2011, p.725)



Gaya eksitasi eksternal yang dihasilkan *cutting tool* sama dengan *cutting force* pada persamaan 2-11, sehingga

$$f = F_0 \dots \dots \dots (2-13)$$

Gaya total ( $F_{\text{total}}$ ) yang dihasilkan oleh sistem memiliki persamaan berikut

$$F_{\text{total}} = F_0 + F_{\text{repulsive}} \dots \dots \dots (2-14)$$

Gaya tolak ( $F_{\text{repulsive}}$ ) sebagai gaya peredam yang dihasilkan dari kedua gaya magnet di kiri dan kanan *cutting tool* menjadi pengurang pada *cutting force* ( $f = F_0$ )

$$F_{\text{repulsive}} = -(\Delta F_L + \Delta F_R) \dots \dots \dots (2-15)$$

Mensubstitusi persamaan 2-15 ke dalam persamaan 2-14, persamaan gaya total menjadi

$$F_{\text{total}} = F_0 - (\Delta F_L + \Delta F_R) \dots \dots \dots (2-16)$$

Nilai amplitudo getaran dapat diperoleh berdasarkan permodelan SDOF *system* dengan magnet sebagai peredam yang memiliki persamaan

$$m\ddot{x} + (c_1 + c_2)\dot{x} + (k_1 + k_2)x = F_{\text{total}} \dots \dots \dots (2-17)$$

$$x = \frac{F_{\text{total}}}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}} \dots \dots \dots (2-18)$$

$$= \frac{F_0 - (\Delta F_L + \Delta F_R)}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}}$$

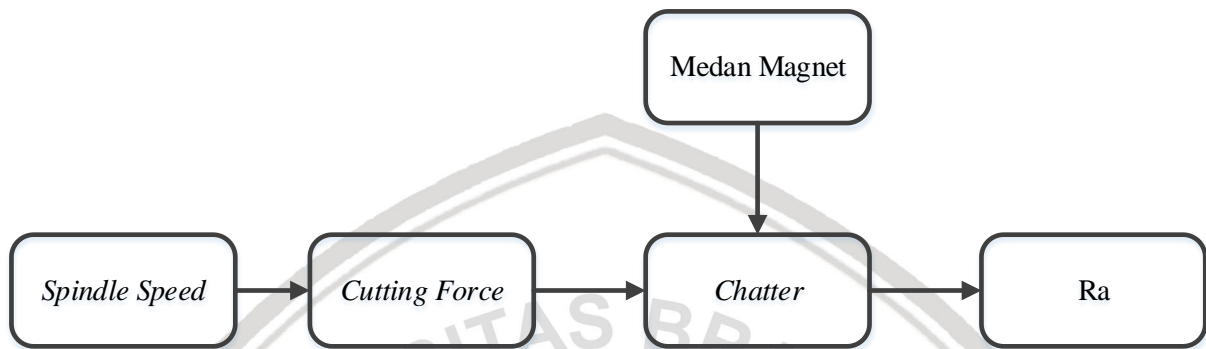
Persamaan 2-18 membuktikan bahwa besarnya nilai  $F_{\text{repulsive}}$  yang menjadi pengurang nilai *cutting force* ( $F_0$ ) berpengaruh dalam menurunkan nilai amplitudo getaran tergantung pada seberapa besar kekuatan yang dihasilkan dua magnet permanen identik yang dipasang pada kiri dan kanan *cutting tool*.

## 2.8 Kerangka Penelitian

Dari tinjauan pustaka dapat disimpulkan bahwa parameter permesinan yaitu *spindle speed* memiliki pengaruh pada proses permesinan. Besarnya *spindle speed* akan mempengaruhi nilai *feed per tooth*, yang mana nilai *feed per tooth* akan mempengaruhi nilai *tangential* dan *normal cutting force*. Besarnya *cutting force* dapat diketahui melalui persamaan 2-6.

*Chatter* menentukan bagaimana geometri yang dihasilkan pada permukaan benda kerja, dimana geometri tersebut menjadi tolak ukur kualitas benda kerja yang diproses sesuai dengan apa yang dijabarkan pada tinjauan pustaka.

Pengaplikasian medan magnet dalam meredam *chatter* yang terjadi juga akan mempengaruhi kualitas dari suatu permukaan benda kerja.



Gambar 2.16 Kerangka Penelitian

## 2.9 Hipotesis

Berdasarkan latar belakang, tinjauan pustaka, dan penelitian-penelitian sebelumnya yang telah dibuat, maka peneliti dapat menarik hipotesis penelitian, yaitu:

1. Nilai kekasaran permukaan akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya nilai *spindle speed*.
2. Nilai kekasaran permukaan akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya nilai *spindle speed* dengan pengaplikasian medan magnet pada operasi permesinannya.