

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Sebelumnya**

**Chen, Lu dan Altintas (2014)** melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan magnet aktuator pada mesin bubut CNC menggunakan material aluminium 6061 untuk mengurangi getaran lateral dan getaran torsi. Penelitian tersebut membuktikan dengan penambahan magnet aktuator dengan parameter permesinan yang sama dapat mendapatkan hasil permesinan yang lebih halus daripada tidak ditambah dengan magnet aktuator, dikarenakan penambahan aktuator dapat mengurangi getaran torsi dan getaran lateral yang terjadi saat proses permesinan.

**Ali dan Fahmi (2013)** melakukan penelitian tentang adanya getaran yang terjadi saat proses *end milling* pada *poly methyl methacrylate (PMMA)* dengan variasi parameter permesinan *spindle speed*, *feed rate* dan *depth of cut*. Getaran yang terjadi diukur menggunakan *accelerometer* dan menghasilkan getaran minimal yang terjadi sebesar 64.3 Hz dengan *spindle speed* 2500 rpm, *feed rate* 2 mm/min, dan *depth of cut* 1.5 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa dibandingkan dengan *spindle speed*, *feed rate* dan *depth of cut* memiliki pengaruh tertinggi pada getaran selama proses permesinan.

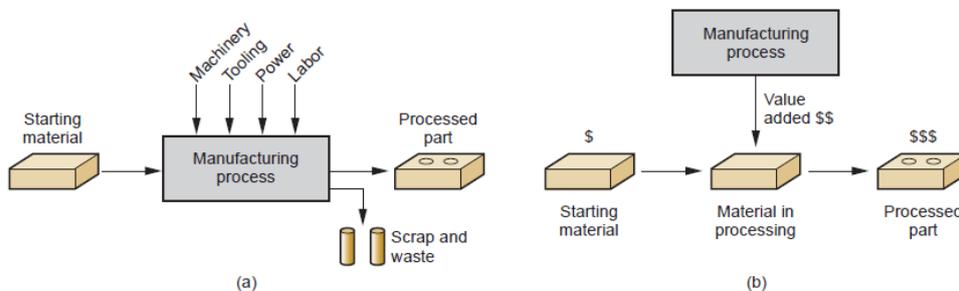
**Sulaiman (2012)** melakukan penelitian tentang penambahan magnet permanen sebagai *chatter control* pada proses *end milling* menggunakan material *Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)*. Penelitian tersebut menghasilkan dengan melakukan penambahan magnet permanen dapat mengurangi getaran yang terjadi saat permesinan hingga 60%. Sehingga nilai kekasaran permukaan dapat material dapat direduksi sampai dengan 50% dibandingkan dengan nilai kekasaran permukaan tanpa penambahan magnet permanen.

**Arifin (2011)** melakukan penelitian tentang pengaruh parameter permesinan terhadap kekasaran permukaan baja karbon fasa ganda pada proses *Freis*. Hasil dari penelitian tersebut adalah parameter permesinan mempengaruhi kekasaran permukaan hasil permesinan. Semakin tinggi *depth of cut* dan *feed rate* maka semakin tinggi pula kekasaran permukaan hasil permesinan.

## 2.2 Proses Manufaktur

Proses manufaktur adalah bagian dari proses produksi yang dapat merubah keadaan kualitatif dari produk seperti material, part atau mesin. Proses manufaktur membutuhkan komponen-komponen sederhana untuk diproses sehingga menjadi barang yang lebih kompleks.

Manufaktur merupakan pembentukan produk. Produk dari hasil manufaktur tersebut digunakan untuk membuat produk yang lain seperti mesin press untuk lembaran plat menjadi bentuk yang diinginkan, *drilling* untuk membuat lubang, mesin gergaji, dan mesin lainnya untuk memproduksi benda kecil seperti senar gitar sampai part motor seperti *crankshaft* dan *connecting rods* (Kalpakjian, 2009).



Gambar 2.1 Dua Cara Mendefinisikan Proses Manufaktur a) *Technical Process* dan b) *Economic Process*

Sumber: Groover (2013, p. 4)

## 2.3 Proses Permesinan

Proses permesinan atau proses pemotongan logam dengan menggunakan pahat (perkakas-potong) pada mesin perkakas.

Proses permesinan (*Machining Process*) adalah proses yang digunakan untuk mengubah bentuk produk material dari logam dengan cara memotong. Berdasarkan cara pemotongannya maka proses permesinan dapat dikelompokkan menjadi 4 kelompok, antara lain:

1. Proses permesinan menggunakan mesin las
2. Proses permesinan menggunakan mesin pres
3. Proses permesinan menggunakan mesin perkakas
4. Proses permesinan menggunakan non-konvensional (seperti: *Electro discharge, machining, laser beam machining, chemical milling*, dan sebagainya).

(Rochim, 1993)

Pengerjaan logam menggunakan proses permesinan adalah salah satu teknologi yang semakin terbaru, sehingga baik digunakan dalam industri manufaktur, oleh karena itu penelitian mengenai proses permesinan terus dilakukan untuk memberikan sebuah kualitas produk dalam permesinan yang baik dengan penentuan parameter yang paling tepat untuk mendapatkan hasil yang maksimal.

## 2.4 Mesin *Milling* CNC

Mesin CNC adalah mesin perkakas yang menggunakan sistem otomatis dikontrol oleh komputer dengan menggunakan bahasa numerik (data perintah dengan kode angka, huruf dan simbol). *Milling cutter* berputar dengan kecepatan tinggi sehingga menyebabkan beberapa bagian material akan hilang (Singh, 2006, p. 460).

Prinsip kerja dari mesin CNC adalah sumber daya komputer yang menggunakan bahasa numerik digunakan sebagai fungsi kontrol dari bagian mekanik, sehingga bila dibandingkan dengan mesin perkakas yang menggunakan sistem konvensional, maka mesin perkakas CNC lebih teliti, lebih tepat, lebih fleksibel dan cocok untuk produksi dengan jumlah masal. Penggunaan prinsip kerja tersebut juga dapat menunjang produksi yang membutuhkan tingkat kerumitan benda kerja yang tinggi dan dapat menggantikan fungsi kontrol dari operator mesin perkakas selama mesin beroperasi.



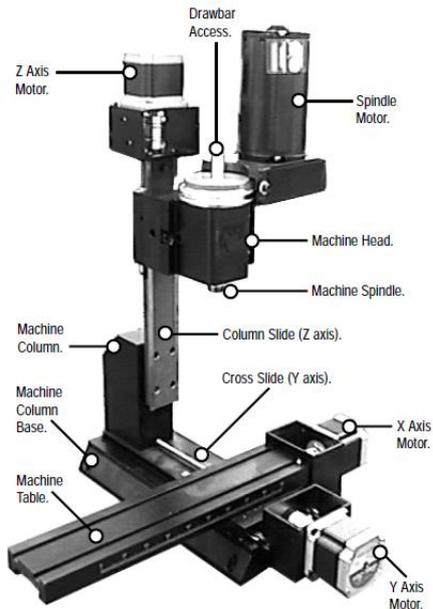
Gambar 2.2 Denford *Micromill* EO1037  
Sumber: *Micromill Operator Manual*

Mesin *micromill* CNC *milling* pada dasarnya menggunakan sistem persumbuan koordinat kartesius, prinsipnya meja kerja bergerak melintang dan horizontal sedangkan

pahat berputar dan bergerak ke atas dan kebawah. Untuk arah persumbuan mesin ini digunakan lambang sebagai berikut :

1. Sumbu X untuk arah gerak horizontal atau ke kanan dan ke kiri
2. Sumbu Y untuk arah gerak melintang atau kedepan dan ke belakang
3. Sumbu Z untuk arah gerakan vertikal atau keatas dan kebawah

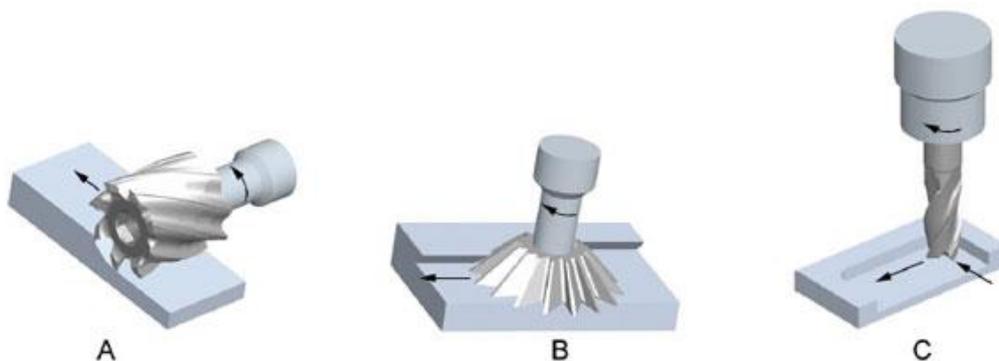
Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah :



*Gambar 2.3 Sistem Persumbuan Mesin Milling*  
 Sumber: *Micromill Operator Manual*

## 2.5 Macam Pemakanan Pada Mesin Milling

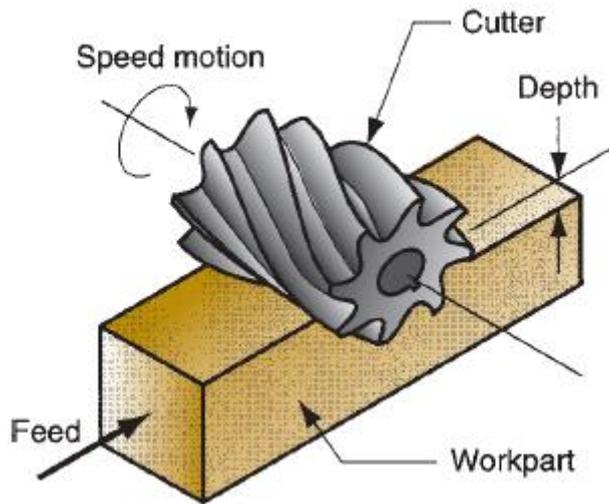
Berdasarkan dari arah pemakanan, jenis pahat, dan posisi relatif pahat terhadap benda kerja mesin *milling* dibagi menjadi 3 jenis, yaitu *slab milling*, *face milling*, dan *end milling*.



*Gambar 2.4 A. Slab Milling, B. Face Milling, C. End Milling*  
 Sumber: *Nuffield Engineering Supplies (2012)*

### A. Slab Milling

Proses *slab milling* dimana permukaan yang benda kerja dihasilkan oleh gigi pisau yang terletak pada permukaan luar badan alat potongnya. Sumbu dari putaran pisau biasanya pada bidang yang sejajar dengan permukaan benda kerja yang disayat (Rochim, 1985, p. 16).

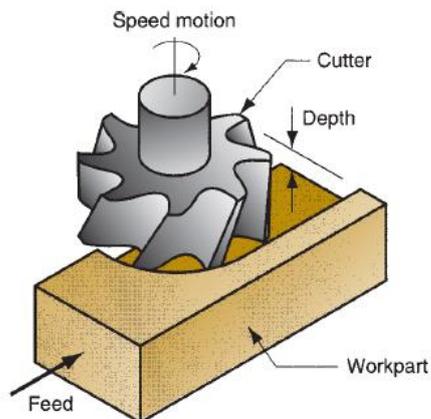


Gambar 2.5 Slab Milling

Sumber: Groover (2012, p. 567)

### B. Face Milling

Pada proses *face milling*, pisau dipasang pada spindel yang memiliki sumbu putar tegak lurus terhadap permukaan benda kerja. Permukaan hasil proses *face milling* dihasilkan dari hasil penyayatan oleh ujung dan selubung pisau (Rochim, 1985, p. 16).

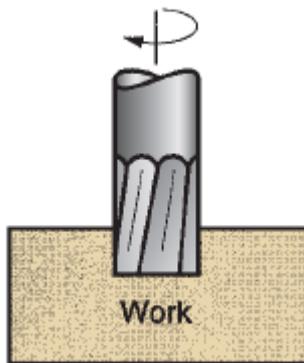


Gambar 2.6 Face Milling

Sumber: Groover (2013, p. 567)

### C. End Milling

Pisau pada proses *end milling* biasanya berputar pada sumbu yang tegak lurus permukaan benda kerja. Pisau dapat digerakkan menyudut untuk menghasilkan permukaan menyudut. Gigi potong pada pisau terletak pada selubung pisau dan ujung badan pisau (Rochim, 1985, p. 16).

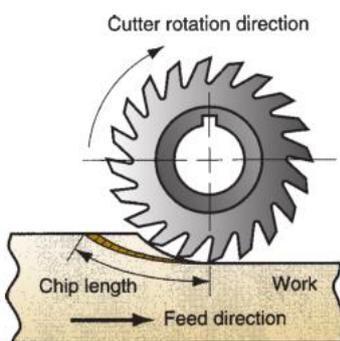


Gambar 2.7 End Milling  
Sumber: Groover (2013, p. 569)

### 2.6 Arah Pemotongan Mesin Milling

Menurut arah pemakanan dengan araha *cutter teeth* pada proses *milling* dibagi menjadi 2 bentuk, yaitu:

1. *Up Milling* atau yang bisa juga disebut *conventional milling*, dimana arah pemakanan berlawanan arah dengan arah *cutter teeth*, ketika *teeth* memotong benda kerja.



Gambar 2.8 Up Milling atau Conventional Milling  
Sumber: Groover (2013, p. 568)

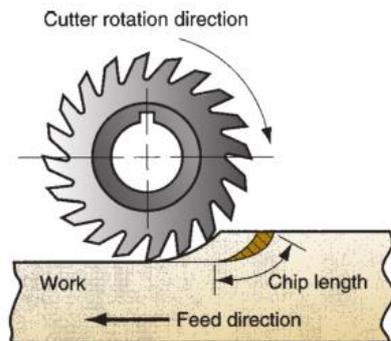
Persamaan teoritis untuk mengetahui ketebalan *chip* yang dihasilkan pada proses up milling adalah sebagai berikut:

$$t_c = f_t \cdot \sin(\Phi + \alpha) \dots\dots\dots(2-1)$$

Dimana:

$\alpha$  = rake angle

2. *Down milling* atau yang bisa juga disebut *climb milling*, dimana arah pemakanan searah dengan *cutter teeth*, ketika *teeth* memotong benda kerja.



Gambar 2.9 Down Milling atau Climb Milling  
Sumber: Groover (2013, p. 568)

Persamaan teoritis untuk mengetahui ketebalan *chip* yang dihasilkan pada proses up milling adalah sebagai berikut:

$$t_c = f_t \cdot \sin \Phi \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana:

$t_o$  = tebal *chip*

$f_t$  = *feed per tooth*

$\Phi$  = *cutting effective angle*

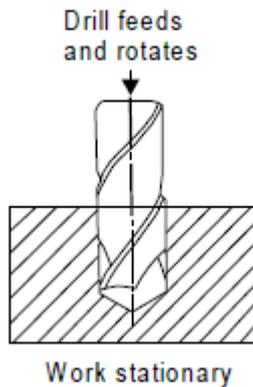
Arah pemotongan berbeda, sehingga hasil *geometri* pemotongan akan berbeda pula. Pada *up milling*, geram atau *chip* yang dihasilkan akan berbentuk memanjang. Sedangkan pada *down milling*, geram atau *chip* yang dihasilkan akan berbentuk lebih pendek dibandingkan dengan arah pemotongan *up milling* (groover, 2013).

## 2.7 Macam Pemakanan pada *End Milling*

### 2.7.1 *Drilling*

*Drilling* adalah proses pemakanan dalam pembuatan lubang dengan menghilangkan sebagian volume dari material dengan menggunakan rotasi *cutting tool* yaitu pahat *drill*. *Drilling* menghilangkan *solid metal* untuk menghasilkan lubang berbentuk lingkaran. Sebelum melakukan pemakanan, lokasi lubang telah ditentukan dengan menggambar dua

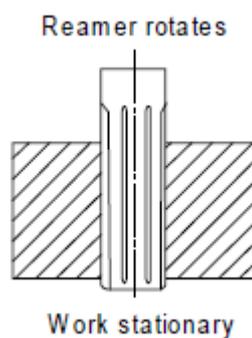
buah titik, yaitu pada sudut terluar dan pada titik pusat lubang, titik tersebut digunakan untuk membantu pahat *drill* dalam beroperasi (Singh, 2006, p. 443).



*Gambar 2.10 Drilling*  
Sumber: Singh (2006, p. 443)

### 2.7.2 Reaming

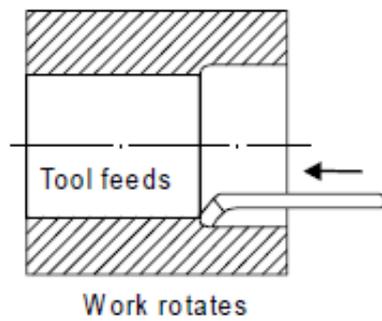
*Reaming* adalah proses pemakanan untuk memberi ukuran dan melakukan proses *finishing* pada lubang yang telah dibuat oleh proses *drilling*. *Reaming* dilakukan menggunakan *cutting tool* bernama *reamer* (lihat gambar 2.11). *Reaming* dilakukan untuk membuat lubang menjadi halus, presisi dan sesuai dengan diameter yang diinginkan (Singh, 2006, p. 443)



*Gambar 2.11 Reaming*  
Sumber: Singh (2006, p. 443)

### 2.7.3 Boring

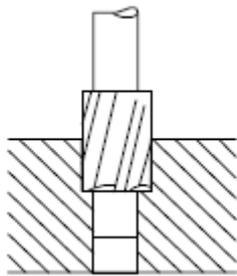
*Boring* adalah sebuah proses pemakanan untuk memperbesar lubang yang mana lubang tersebut telah dibuat oleh proses *drilling* (Singh, 2006, p. 443).



*Gambar 2.12 Boring*  
 Sumber: Singh (2006, p. 443)

#### **2.7.4 Counter-Boring**

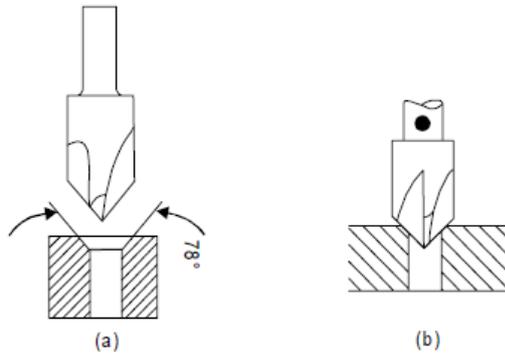
*Counter-Boring* adalah proses pemakanan untuk membuat memperbesar ujung lubang dengan bentuk silindris. Hal ini dilakukan untuk tempat dari kepala *rivet* (*Counter-sunk rivet*) agar dapat sejajar dengan benda kerja (Singh, 2006, p. 444).



*Gambar 2.13 Counter-Boring*  
 Sumber: Singh (2006, p. 444)

#### **2.7.5 Counter-Sinking**

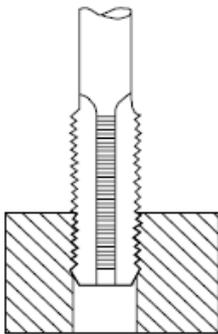
*Counter-sinking* adalah proses pemakanan untuk memperbesar ujung lubang dengan bentuk bersudut (lihat gambar 2.14), biasanya untuk tempat dari kepala sekrup (*flat head screw*). Fungsinya adalah tersedianya tempat untuk kepala sekrup agar dapat sejajar dengan benda kerja (Singh, 2006, p. 444).



Gambar 2.14 Counter-Sinking  
Sumber: Singh (2006, p. 444)

### 2.7.6 Tapping

*Tapping* adalah proses pemakanan berupa penguliran dalam dengan menggunakan *cutting tool* yang dinamakan *tap*. Dalam prosesnya, *tap* diputar masuk menuju lubang secara manual atau dengan bantuan mesin. *Tap* menghilangkan sebagian material dan membuat sebuah ulir dalam, yang dapat dilalui benda dengan ulir luar yang mempunyai ukuran yang sama (Singh, 2006, p. 444).



Gambar 2.15 Tapping  
Sumber: Singh (2006, p. 444)

## 2.8 Parameter Pemotongan

Ada beberapa parameter pemotongan yang digunakan pada proses pemotongan logam, antara lain:

### 1. Kecepatan Spindel (*Spindle speed*)

Spindel pada mesin *milling* adalah bagian dari sistem utama mesin *milling* yang mempunyai fungsi untuk memegang dan memutar *cutter* sehingga dapat menghasilkan putaran atau gerakan pemotongan. Jadi kecepatan spindel adalah kecepatan putar pada

*cutter* yang memiliki satuan rpm. Besarnya kecepatan spindel berdasarkan kecepatan pemakanan dan diameter pahat dan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$n = \frac{V_f \times 1000}{\pi \times D} \dots\dots\dots (2-3)$$

Keterangan:

$n$  = *Spindle Speed* (rev/min)

$V_f$  = Kecepatan potong (m/menit)

$D$  = Diameter *cutter* (mm)

Kecepatan spindel yang tinggi dapat menghasilkan benda kerja dengan kualitas yang tinggi (halus). Hal ini dikarenakan kecepatan spindel yang tinggi mengakibatkan pahat/*cutter* semakin cepat berputar dan semakin sering pula melakukan penyayatan, sehingga benda kerja sering terkikis menyebabkan permukaan menjadi semakin halus. Putaran spindel yang tinggi juga dapat menyebabkan benda kerja berputar lebih stabil sehingga penyayatan menjadi stabil dan halus (Yunus, 2014).

## 2. *Feed rate*

Kecepatan pemotongan (*feed rate*) adalah kecepatan pemotongan benda kerja oleh *cutting tool* dalam suatu proses permesinan. Satuan dari *feed rate* adalah mm/menit. Kecepatan pemotongan dan diameter pahat akan menentukan putaran mesin *milling* dan dalam proses *drilling*. *Feed rate* dipengaruhi oleh kekerasan material benda kerja, material pahat, geometri pahat dan tingkat kehalusan yang dikehendaki.

Untuk mengetahui besar *feed rate* dapat menggunakan rumus sebagai berikut (Groover, 2013, p. 582):

$$fr = f \times n \dots\dots\dots (2 - 4)$$

Dimana:

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

$f$  = *Feed* (mm/tooth)

$n$  = *spindle speed* (rev/min)

Berdasarkan rumus diatas, *feed motion* berbanding lurus terhadap *feed rate*. Semakin besar nilai *feed motion* maka menyebabkan jarak antar puncak sayatan benda kerja semakin jauh sehingga kekerasan permukaannya semakin besar (Tegar, 2013).

*Feed motion* sendiri merupakan jarak pemakanan dalam satu kali putaran pahat. Rumus dari *feed motion* adalah sebagai berikut (Davim, 2011):

$$f = n \cdot a_f \cdot Z \dots\dots\dots (2 - 5)$$

Dengan:

$f$  = *Feed motion* (mm/rev)

$a_f$  = *Chip load* (mm)

$Z$  = *Number of teeth*

$n$  = *Spindle Speed* (rev/min)

*Feed motion* memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan kekasaran rata-rata aritmetis ( $R_a$ ). Semakin besar *feed motion* maka kekasaran rata-rata yang dihasilkan juga akan semakin besar (Tegar, 2013).

### 3. Kedalaman Pemakanan (*depth of cut*)

Kedalaman pemakanan adalah dalamnya pahat melakukan pemakanan pada benda kerja saat penyayatan atau tebal total bekas penyayatan atau pemotongan. Semakin besar nilai *depth of cut* maka kedalaman pemakanan semakin tinggi juga. Dalam proses permesinan, kedalaman pemotongan berhubungan dengan beban atau gaya, saat proses pemotongan semakin rendah kedalaman pemotongan maka beban atau gaya yang terjadi semakin rendah juga, sehingga pahat tidak terlalu bergetar dan menerima beban ringan ketika melakukan penyayatan dan membuat permukaan menjadi lebih halus (Fidiawan, 2014)

### 4. *Cutting speed*

*Cutting speed* pada proses *drilling* adalah kecepatan pemakanan yang diukur dari diameter terluar dari pahat *drill*. Hal ini ditentukan untuk mendapatkan kesesuaian pemotongan, walaupun kebanyakan proses pemotongan (*drilling*) menggunakan kecepatan yang rendah ketika dekat dengan rotasi axis (Groover, 2013, p. 562). Untuk mengatur kecepatan yang diinginkan pada proses *drilling*, perlu untuk mengatur kecepatan rotasi pada *drill* seperti pada rumus berikut (Rochim, 1993, p. 19):

$$v_f = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \dots\dots\dots (2 - 6)$$

Dimana:

$V_f$  = *Cutting Speed* (m/min)

$D$  = Diameter pahat (mm)

$n$  = *Spindle Speed* (rev/min)

### 5. *Material Removal Rate (MRR)*

Gabungan dari ketiga parameter di atas disebut sebagai kondisi pemesinan yang mana ketiganya dapat membentuk model tiga dimensi dari proses pemesinan yang

dalam beberapa proses permesinan dapat digunakan untuk mencari *Material Removal Rate* yang mana dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$MRR = vfa \dots \dots \dots (2 - 7)$$

Dimana:

$MRR = \text{Material removal rate (mm}^3/\text{s)}$

$v = \text{cutting speed (mm/min)}$

$f = \text{feed (mm/rev)}$

$a = \text{depth of cut (mm)}$

Dari nilai *material removal rate* bisa didapat hubungannya dengan gaya pemotongan dengan menggunakan persamaan daya pemotongan yang dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{P_u \cdot MRR}{n} = F_c \dots \dots \dots (2 - 8)$$

Dimana :

$F_c = \text{Gaya pemotongan}$

$P_u = \text{Daya per satuan volume}$

$MRR = \text{Material removal rate}$

$n = \text{kecepatan potong}$

Setelah diketahui gaya pemotongannya, nilai dari amplitude getarannya bisa didapat dari persamaan :

$$a_v = \frac{F_c}{\sqrt{4c_c^2 \omega_f^2 + (\omega_n^2 - \omega_f^2)^2}} \dots \dots \dots (2 - 9)$$

Dimana :

$a_v = \text{Amplitudo getaran}$

$F_c = \text{Gaya potong}$

## 2.9 Material Benda Kerja

Kegiatan permesinan erat kaitanya dengan jenis material yang akan diproses. Aluminium 6061 termasuk material berjenis logam yang sering digunakan sebagai material untuk berbagai kebutuhan dikarenakan ketersediaan aluminium itu sendiri yang berlimpah mencapai 8% dari massa bumi.

Unsur – unsur paduan aluminium antara lain:

1. Copper (Cu), menaikkan kekuatan dan kekerasan, namun menurunkan elongasi (pertambahan panjang pangsangan saat ditarik). Kandungan Cu dalam alumunium yang paling optimal adalah antara 4-6%.
2. Zink atau Seng (Zn), menaikkan nilai tensile.
3. Mangan (Mn), menaikkan kekuatan dalam temperature tinggi.
4. Magnesium (Mg), menaikkan kekuatan alumunium dan menurunkan nilai *ductility*-nya. Ketahanan korosi dan *weldability* juga baik.
5. Silikon (Si), menyebabkan paduan alumunium tersebut bisa diperlakukan panas untuk menaikkan kekerasannya.
6. Lithium (Li), ditambahkan untuk memperbaiki sifat tahan oksidasinya.

Aluminium 6061 adalah aluminium *Alloy* yang telah melalui proses *precipitation-hardening*, komposisi campuran utama dari aluminium 6061 adalah magnesium dan silikon. Aluminium 6061 memiliki sifat mekanik yang baik, *weldability* yang baik, biasa digunakan untuk pengujian material (seperti tekan, tarik dll), dan salah satu aluminium campuran yang paling sering digunakan. Umumnya material alumunium jenis 6XXX diaplikasikan untuk automotif dan alat-alat konstruksi karena memiliki *machine ability*, *corrosion*, konduktivitas thermal dan elektik yang cukup baik.

Alloy group	Nominal chemical composition <sup>(1)</sup> , wt%										
	Mg	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Zr	Other
<b>Wrought alloys</b>											
1xxx (Al)	0.006–	0.006–	0.002–	0.01–	0.002–	0.006–	...	0.006–	0.006–	...	...
> 99.00%)	0.25	0.7	0.06	0.03	0.05	0.6		0.35	0.05		
2xxx (Cu)	0.02–	0.10–	0.02–	0.05–	0.05–	0.12–	0.05–	0.8–	0.10–	0.05–	...
	0.8	1.3	0.3	0.2	1.3	1.3	2.3	6.8	0.80	0.5	
3xxx (Mn)	0.05–	0.3–	0.05–	0.05–	0.05–	0.1–	0.05	0.05–	0.05–	0.1–	...
	1.3	1.8	0.10	0.40	1.8	1.0		0.50	1.0	0.5	
4xxx (Si)	0.05–	0.8–	0.04–	0.05–	0.03–	0.20–	0.15–	0.05–	0.05–	...	...
	2.0	13.5	0.30	0.25	1.5	1.0	1.3	1.5	0.25		
5xxx (Mg)	0.2–	0.08–	0.05–	0.05–	0.03–	0.10–	0.03–	0.03–	0.05–	...	...
	5.6	0.7	0.20	0.35	1.4	0.7	0.05	0.35	2.8		
6xxx (Mg + Si)	0.05–	0.20–	0.08–	0.03–	0.03–	0.08–	0.2	0.10–	0.05–	0.05–	...
	1.5	1.8	0.20	0.035	1.0	1.0		1.2	2.4	0.20	

(ASM Metal Handbook Volume 9, 2004)

Gambar 2.16 Komposisi aluminium 6061

Sumber: ASM Metal Handbook Volume 9 (2004)

*American Standard Testing Materials* (ASTM) menggolongkan aluminium untuk memudahkan identifikasi yang menggunakan empat digit yaitu sebagai berikut:

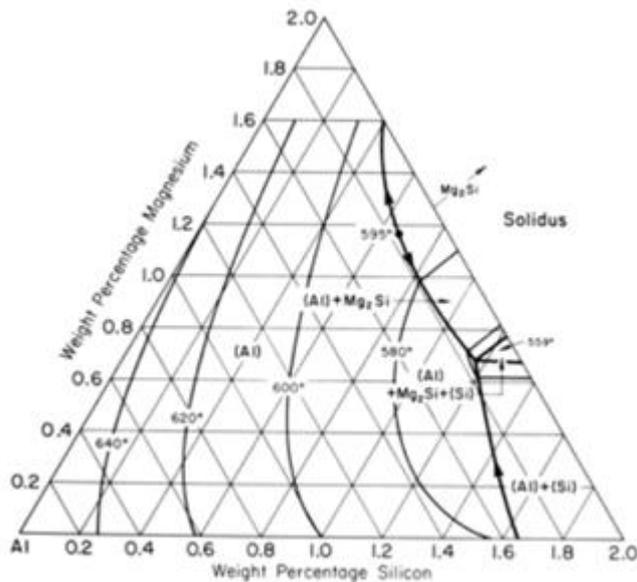
- Digit pertama menjelaskan unsur campuran utama, untuk angka 6 menjelaskan unsur campuran utama adalah magnesium dan silicon.
- Digit kedua menjelaskan jumlah olahan aluminium paduan yang beberapa kali, untuk angka 0 menjelaskan bahwa aluminium masih belum diolah.
- Digit ketiga dan keempat menjelaskan jumlah kandungan aluminium, untuk angka 61 menjelaskan bahwa jumlah kandungan aluminium sebesar 61%.

Tabel 2.1 Sifat mekanis aluminium 6061

<b>Mechanical Properties</b>			
<b>Hardness, Brinell</b>	95	95	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
<b>Hardness, Knoop</b>	120	120	Converted from Brinell Hardness Value
<b>Hardness, Rockwell A</b>	40	40	Converted from Brinell Hardness Value
<b>Hardness, Rockwell B</b>	60	60	Converted from Brinell Hardness Value
<b>Hardness, Vickers</b>	107	107	Converted from Brinell Hardness Value
<b>Ultimate Tensile Strength</b>	<u>310 MPa</u>	45000 psi	AA; Typical
<b>Tensile Yield Strength</b>	<u>276 MPa</u>	40000 psi	AA; Typical
<b>Elongation at Break</b>	<u>12 %</u>	12 %	AA; Typical; 1/16 in. (1.6 mm) Thickness
<b>Elongation at Break</b>	<u>17 %</u>	17 %	AA; Typical; 1/2 in. (12.7 mm) Diameter
<b>Modulus of Elasticity</b>	<u>68.9 GPa</u>	10000 ksi	AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
<b>Notched Tensile Strength</b>	<u>324 MPa</u>	47000 psi	2.5 cm width x 0.16 cm thick side-notched specimen, $K_t = 17$ .
<b>Ultimate Bearing Strength</b>	<u>607 MPa</u>	88000 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
<b>Bearing Yield Strength</b>	<u>386 MPa</u>	56000 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
<b>Poisson's Ratio</b>	0.33	0.33	Estimated from trends in similar Al alloys.
<b>Fatigue Strength</b>	<u>96.5 MPa</u>	14000 psi	AA; 500,000,000 cycles completely reversed stress; RR Moore machine/specimen
<b>Fracture Toughness</b>	<u>29 MPa-m<sup>1/2</sup></u>	26.4 ksi-in <sup>1/2</sup>	$K_{Ic}$ ; TL orientation.
<b>Machinability</b>	<u>50 %</u>	50 %	0-100 Scale of Aluminum Alloys
<b>Shear Modulus</b>	<u>26 GPa</u>	3770 ksi	Estimated from similar Al alloys.
<b>Shear Strength</b>	<u>207 MPa</u>	30000 psi	AA; Typical

Sumber: ASM Metal Handbook Volume 9 (2004)

Paduan aluminium seri 6061 berdasarkan tabel 2.1 maka unsur yang memiliki komposisi paling besar serta sangat mempengaruhi sifat mekanik dari paduan aluminium seri 6061 adalah Magnesium (Mg) dan Silika (Si), sehingga paduan aluminium seri 6061 memiliki diagram fasa sebagai berikut:



*Gambar 2.17* Diagram Fasa Aluminium 6061  
Sumber: ASM Metal Handbook Volume 9 (2004)

Paduan aluminium seri 6061 akan menghasilkan dua fasa dan satu karbida yang bisa dianalisis berdasarkan diagram fasa yang ada. Fasa-fasa dan karbida yang terbentuk dari paduan aluminium seri 6061 adalah  $\beta$ -AlFeSi,  $\alpha$ -Al(FeSi) dan  $Mg_2Si$ .

Magnesium dan silica menjadi unsur paduan yang sangat penting bagi paduan aluminium seri 6061 karena magnesium dan silica akan membentuk karbida  $Mg_2Si$  yang menyebabkan paduan seri 6061 ini bisa diberikan perlakuan panas untuk memperbaiki sifat mekaniknya. Adanya unsur besi (Fe) menyebabkan kelarutan silica (Si) dalam aluminium (Al) akan berkurang. Adanya fasa  $\alpha$  dan  $\beta$  disebabkan oleh terjadinya reaksi peritektik dan reaksi solidifikasi diakhiri dengan reaksi eutektik.

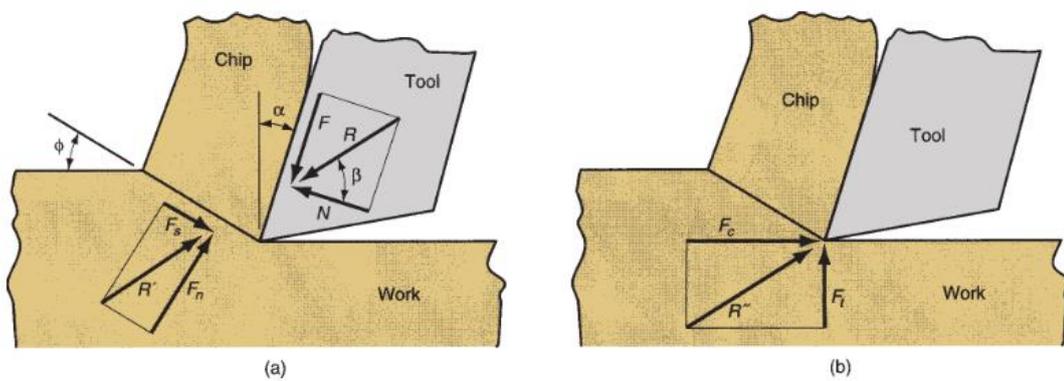
Adapun larutan etsa yang digunakan untuk menganalisis struktur mikro dari paduan aluminium 6061 adalah keller. Keller merupakan etsa yang dibuat dari campuran larutan 2ml HF + 3ml HCl + 5ml HNO<sub>3</sub> + 190 ml H<sub>2</sub>O.

Sistem penamaan pada paduan aluminium hasil pengerjaan dilakukan dengan registrasi empat angka, dengan angka pertama menunjukkan unsur paduan utama pada aluminium tersebut, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1. Pada seri 1XXX, dua angka terakhir

menunjukkan jumlah kadar minimum aluminium pada paduan dalam 99,00%. Sementara pada seri 2XXX hingga 8XXX, dua angka terakhir menunjukkan kandungan unsur paduan utama.

**2.10 Hubungan Gaya dan Lingkaran Gaya (Teori Merchant)**

Beberapa gaya yang terjadi pada proses permesinan pada *orthogonal cutting model*, yang berdasarkan tegangan geser (*sheer stress*), koefisien gesek (*coeffitien of friction*) dan beberapa gaya yang berhubungan.



Gambar 2.18 (a) Hubungan Gaya Terhadap Hasil Chip pada Orthogonal Cutting Model (b) Gaya yang Bereaksi terhadap Tool  
 Sumber: Groover (2013, p. 533)

Pada hubungan gaya terhadap chip terdapat 2 gaya yang terjadi akibat benda kerja yaitu gaya geser ( $F_s$ ) dan gaya geser normal ( $F_n$ ), dengan gaya geser maka dapat diketahui nilai tegangan geser (*sheer stress*) dengan persamaan:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \dots\dots\dots (2 - 10)$$

Dimana:

$\tau$  = Tegangan Geser

$A_s$  = Area of Sheer Plane

Pada hubungan gaya terhadap chip dapat juga mengetahui nilai koefisien gesek (*coefficient of friction*) dengan persamaan:

$$\mu = \tan \beta \dots\dots\dots (2 - 11)$$

Dimana:

$\mu$  = Koefisien Gesek

$\beta$  = Sudut Gesek (*Friction Angle*)

Terdapat dua gaya yang bereaksi terhadap *cutting tool*, yaitu *cutting force* ( $F_c$ ) dan *thrust force* ( $F_t$ ). *Cutting force* adalah gaya yang arahnya searah dengan *cutting speed* ( $V_c$ ), sedangkan *thrust force* adalah gaya yang arahnya tegak lurus terhadap *cutting force* dimana gaya ini berkaitan erat dengan ketebalan *chip* sebelum pemakanan ( $t_c$ ).

$$F_c = \frac{\tau t_o w \cos(\beta - \alpha)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \beta - \alpha)} \dots\dots\dots(2 - 12)$$

$$F_t = \frac{\tau t_o w \sin(\beta - \alpha)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \beta - \alpha)} \dots\dots\dots(2 - 13)$$

Dimana:

$\tau$  = Tegangan Geser

$t_o$  = *chip thickness* sebelum pemakanan

$\Phi$  = *cutting effective angle*

$\beta$  = Sudut Gesek (*Friction Angle*)

$\alpha$  = *rake angle*

$w$  = *width orthogonal cutting operation*

## 2.11 Getaran dan *Chatter* pada Proses Permesinan

Dalam proses permesinan dan penggunaan *machine tools*, perlu diperhatikan bahwasannya kekakuan mesin adalah salah satu hal yang patut diperhatikan dalam salah satu parameter permesinan. Kekakuan mesin yang rendah akan menyebabkan adanya getaran (vibrasi) dan *chatter* pada *cutting tool* yang akan berpengaruh pada kualitas produk. Vibrasi dan *chatter* yang tidak terkontrol akan menyebabkan hal salah satunya sebagai berikut:

- Hasil permukaan yang buruk
- Akurasi dari dimensi benda kerja yang tidak sesuai
- *Cutting tool* yang mudah rusak
- Kerusakan pada komponen mesin apabila terlalu banyak getaran yang terjadi
- Akan menyebabkan bunyi mesin yang bising ketika memakai frekuensi parameter yang tinggi

Vibrasi dan *chatter* pada proses permesinan dapat dibedakan pada dua tipe dari vibrasi pada permesinan: *forced vibration* dan *self-excited vibration*

### a. *Forced Vibration* (Getaran Paksa)

*Forced vibration* pada umumnya terjadi karena adanya beberapa gaya akibat pemakaian secara berkala pada *machine tool*, seperti pada roda gigi, ketidakseimbangan komponen pada mesin, dan lain- lain yang biasanya terjadi pada proses *milling* atau

pembubutan. *Forced vibration* (getaran paksa) disebabkan oleh pemakaian yang berulang-ulang dari *cutting tool* pada permukaan benda kerja (Kalpakjian, 2009, p. 707).

b. *Self-Excited Vibration*

Pada umumnya disebut *chatter*, *self-excited vibration* disebabkan karena adanya interaksi antara proses pemotongan dengan struktur dari alat potong pada mesin. *Chatter* biasanya mempunyai amplitudo yang tinggi. *Chatter* biasanya terjadi dengan gangguan pada daerah pemotongan yang mungkin terjadi karena:

1. Tipe dari geram yang dihasilkan
2. Struktur benda kerja yang tidak homogen
3. Kondisi permukaan benda kerja
4. Variasi dari gesekan pada alat potong yang dipengaruhi oleh *cutting fluid* dan efektifitasnya (Kalpakjian, 2009, p. 726).

Berikut adalah empat komponen yang menyebabkan defleksi dan dapat menyebabkan vibrasi:

1. *Spindle*
2. *Supporting arm* yang digunakan pada *cutting tool*
3. *Drill*
4. *Cutting tool* (Kalpakjian, 2009, p. 708)

Kekasaran permukaan akan naik seiring kenaikan gerak pemakanan pada kondisi putaran, sudut total pahat yang sama untuk kedua jenis benda kerja, sehingga korelasi antara getaran dan kekasaran permukaan adalah positif dimana semakin naik amplitudo getaran maka kekasaran permukaan akan semakin naik pula. (Haans, 2006)

Hubungan antara gaya potong dengan *chatter* (amplitudo getaran) dapat dilihat pada rumus (Boothroyd, 1981, p. 198)

$$a_v = \frac{F}{\sqrt{4C_c^2 \omega_f^2 + (\omega_n^2 - \omega_f^2)^2}} \dots \dots \dots (2 - 14)$$

Dengan:

$a_v$  = Amplitudo getaran

$F$  = Nilai puncak gaya pengganggu dibagi massa (N/kg)

$\omega_f$  = Frekuensi gaya angular

$\omega_n$  = Frekuensi angular *natural* dari sistem

$C_c$  = Koefisien redaman

Dari rumus di atas dapat dilihat bahwa gaya berbanding lurus dengan amplitudo getaran yang dihasilkan. Semakin besar gaya potong yang dihasilkan maka amplitudo yang dihasilkan juga akan semakin besar.

### **2.12 End Mill Cutter**

Umumnya pisau frais mempunyai lebih dari satu galur (flute) dengan bentuk heliks. Bagian sepanjang tepi galur yang tajam disebut sebagai gigi. Di mana gigi pisau frais ini merupakan bagian yang memotong (menyayat) benda kerja yang difrais, dan beram atau tatal hasil penyayatan akan keluar dari pisau frais melalui galur.

Ada beberapa macam material yang umum digunakan sebagai bahan untuk membuat pisau frais, seperti: baja kecepatan tinggi atau HSS (*high speed steel*), karbida, dan kobalt.

#### **a. Baja kecepatan tinggi**

Baja kecepatan tinggi atau HSS (*High Speed Steel*) merupakan material yang banyak digunakan untuk membuat pisau frais. Pisau frais yang terbuat dari baja kecepatan tinggi umumnya memiliki warna yang mengkilap dan bobotnya relatif ringan. Pisau frais HSS ini digunakan untuk pengefraisan umum baik untuk benda kerja yang terbuat dari bahan *ferro* (besi dan baja) maupun *non-ferro* (bukan bahan dari besi).

#### **b. Karbida**

Selain dari bahan HSS, dewasa ini pisau frais banyak juga yang terbuat dari bahan karbida. Pisau frais karbida memiliki warna yang tidak mengkilap dan relatif lebih berat dibandingkan pisau frais HSS. Pisau frais karbida memiliki sifat yang tahan terhadap pengikisan (abrasi). Dibandingkan pisau frais yang terbuat dari HSS, material karbida memang lebih mahal. Namun demikian, pisau frais karbida lebih tahan lama dan bisa dipakai pada kecepatan yang lebih tinggi dengan keausan lebih sedikit sehingga dalam jangka panjang pisau frais dari material karbida lebih ekonomis.

#### **c. Kobalt**

Dibandingkan pisau frais yang terbuat dari HSS, pisau frais yang terbuat dari baja kobalt lebih tahan terhadap panas dan tahan terhadap pengikisan. Pisau frais baja kobalt banyak digunakan untuk mengefraisi benda kerja yang terbuat dari material yang keras, seperti titanium dan baja tahan karat (*stainless steel*). Material ini tersusun dari baja perkakas yang dipadu dengan kobalt sekitar 8%.

#### **d. Material Pelapis**

Sekarang ini banyak pisau frais yang diberi material pelapis. Pemakaian material pelapis ini dapat meningkatkan kekerasan permukaan pisau frais. Hal ini akan membuat umur pisau frais menjadi lebih lama serta dapat meningkatkan kecepatan potong dan

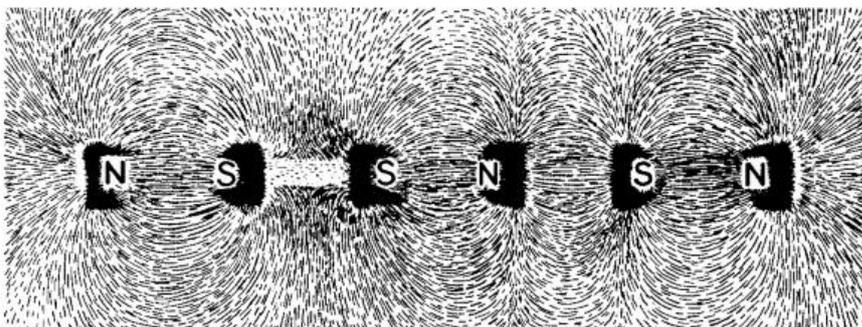
pemakanan (*feed*) hingga 15% sampai 25%. Jenis material pelapis yang umum digunakan sebagai pelapis standar pisau frais, antara lain: Titanium Nitride (TiN), Titanium Carbonitride (TiCN) dan Titanium Aluminum Nitride (TiAlN).

### 2.13 Magnet

Magnet adalah sebuah material atau objek yang dapat memproduksi medan magnet. Medan magnet ini tidak terlihat namun berpengaruh pada sifat-sifat magnet. Medan magnet adalah daerah di sekitar magnet di mana magnet lain masih dapat dipengaruhi oleh gaya magnet jika berada pada daerah itu. Medan magnet itu sering digambarkan dengan garis gaya magnet. Garis gaya magnet adalah pola garis yang terbentuk di sekitar medan magnet. Sifat garis gaya magnet tersebut adalah:

- Garis gaya magnet keluar dari kutub utara dan masuk ke kutub selatan.
- Garis gaya magnet tidak pernah berpotongan.
- Tempat yang mempunyai garis gaya magnet yang rapat, menunjukkan medan magnet yang kuat.

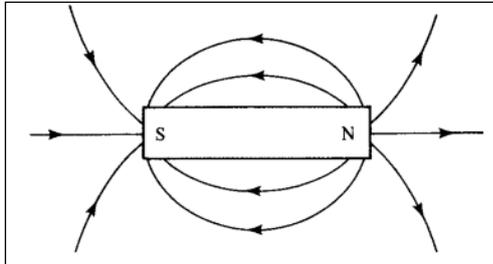
Magnet mempunyai 2 kutub yaitu kutub utara dan kutub selatan, meskipun magnet tersebut di potong-potong tetap saja akan memiliki 2 kutub yaitu kutub selatan dan kutub utara. Di kutub-kutub inilah kekuatan sifat kemagnetan yang paling besar. Bagian kutub ini adalah ciri khas yang terus melekat atau tidak dapat dipisahkan dari suatu magnet. Suatu magnet memiliki medan magnet. Kekuatan dari magnet diukur berdasarkan *magnetic moment* atau jumlah *magnetic flux* yang dihasilkan pada medan magnet tersebut.



Gambar 2.19 Garis-garis gaya magnet  
Sumber: Cullity (2009, p. 5)

Sifat – sifat yang dimiliki oleh garis gaya magnet yang ditunjukkan pada gambar 2.17 diatas antara lain:

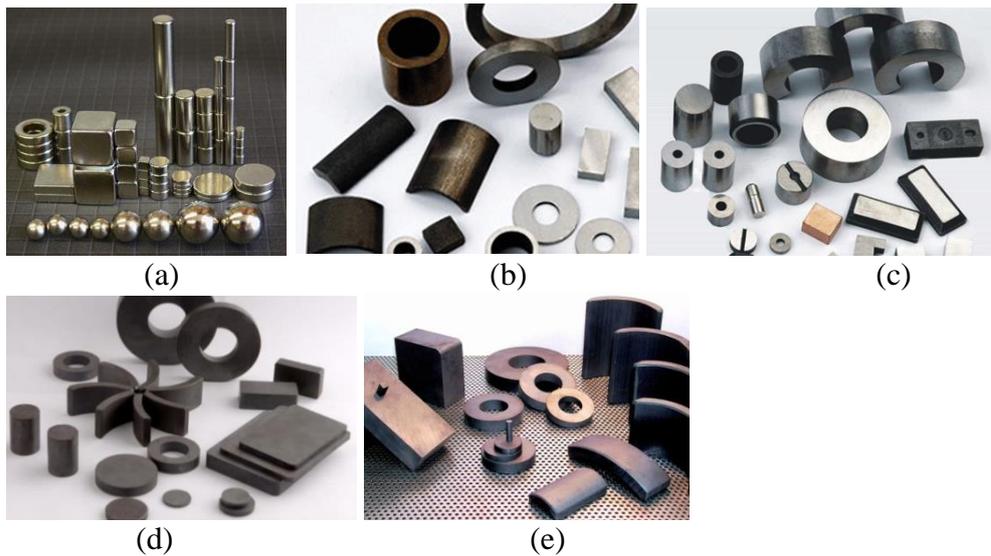
- Garis gaya magnet semakin rapat pada kutub - kutub magnet. Hal ini menunjukkan medan magnet yang paling kuat terdapat pada kutub magnet.
- Garis gaya magnet yang dihasilkan tidak saling berpotongan.
- Garis gaya magnet keluar dari kutub utara dan masuk menuju kutub selatan.



Gambar 2.20 Arah garis-garis gaya magnet  
Sumber: Cullity (2009, p.4)

Magnet dibedakan menjadi 2 yaitu magnet permanen dan magnet sementara. Magnet permanen adalah objek yang dibuat dari material yang telah dimagnetisasi sehingga dapat menghasilkan medan magnet yang tetap. Magnet sementara adalah objek atau material yang memiliki medan magnet akibat pengaruh dari medan magnet disekitarnya. Saat medan magnet yang mempengaruhinya telah hilang, maka objek atau material tersebut juga akan kehilangan medan magnetnya.

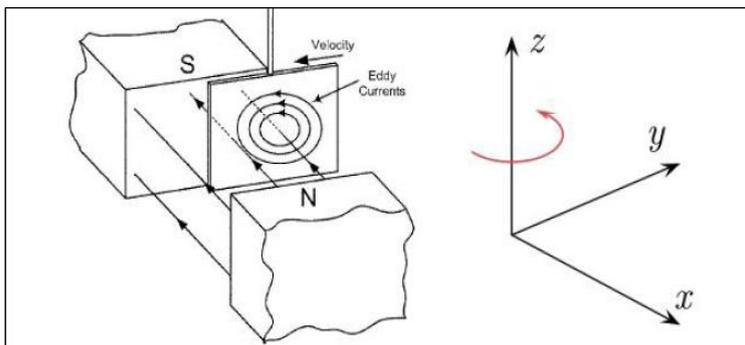
Pada magnet permanen akan menghasilkan gaya tarik pada material ferromagnetik akibat dari adanya medan magnet. Medan magnet pada magnet permanen dapat menghasilkan gaya tolak apabila dua buah magnet permanen saling berdekatan pada kutub yang sama. Berikut ini adalah jenis magnet permanen berdasarkan materialnya yaitu magnet neodimium, magnet samarium *cobalt*, magnet AlNiCo, magnet keramik, dan magnet ferit.



Gambar 2.21 Macam-macam magnet permanen (a) magnet neodimium, (b) magnet samarium *cobalt*, (c) magnet AlNiCo, (d) magnet keramik, (e) magnet ferit  
Sumber: Everbeen Magnet (2017)

### 2.13.1 Magnet Permanen Sebagai Peredam Getaran (*Magnetic Damping*)

Magnet sebagai peredam getaran (*magnetic damping*) adalah salah satu jenis sistem peredaman getaran. Peredaman magnet ini memakai prinsip arus eddy dimana arus eddy ini timbul karena ada konduktor yang bergerak memotong medan magnet. Gerakan relatif antara konduktor dengan medan magnet ini menimbulkan sirkulasi arus eddy didalam konduktor. Sirkuli ini akan menimbulkan medan magnet induksi yang menentang perubahan medan magnet, yang akan mengakibatkan terjadinya gaya tolak antara konduktor sama medan magnet (Sung Bae, 2009).



Gambar 2.22 Skema terjadinya prinsip arus eddy  
Sumber: Zhemin (2007, p. 7)

Besarnya gaya tolak antara medan magnet dengan konduktor yang ditimbulkan oleh arus eddy dapat menggunakan persamaan gaya Lorentz sebagai berikut:

$$F = \sigma(v \times B) \times B \dots\dots\dots(2-15)$$

Dimana:

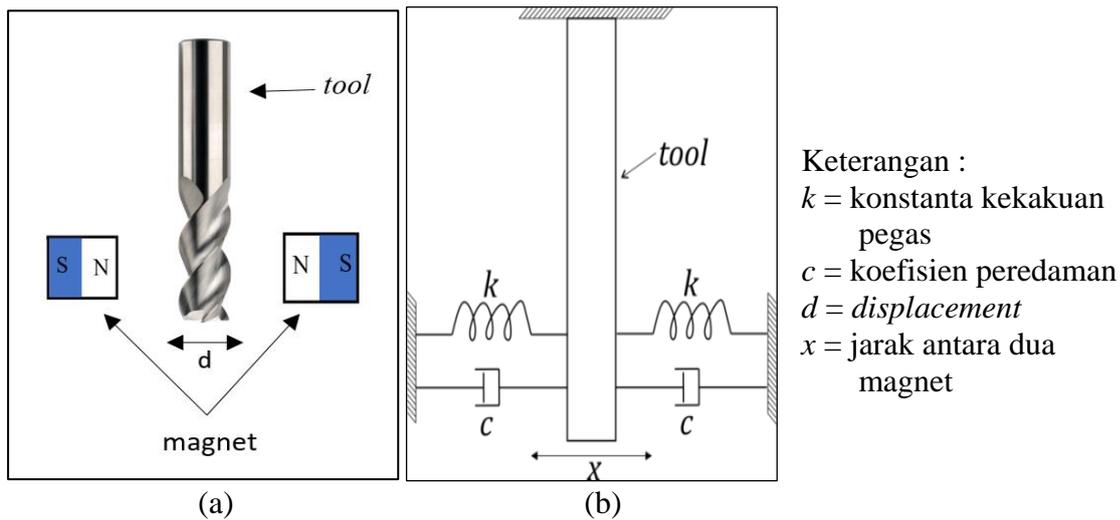
$F$  = Gaya Lorentz

$\sigma$  = konduktivitas bahan

$v$  = kecepatan gerak konduktor

$B$  = Induksi magnet

Pada penelitian ini, getaran yang terjadi saat pahat berputar diredam oleh magnet permanen, dimana posisi dari pahat diantara dua buah magnet permanen yang tolak menolak. Pemodelan getaran dan peredaman dapat disetarakan dengan prinsip *viscous damping*, dikarenakan gaya peredaman yang terjadi *viscous damping* berbanding lurus dengan kecepatan getaran. Seperti yang dapat dilihat pada persamaan 2-15 diatas menunjukkan bahwa gaya Lorentz yang dihasilkan oleh arus Eddy berbanding lurus dengan kecepatan gerak konduktor.



Gambar 2.23 (a) Ilustrasi peletakan magnet pada pahat; (b) Pemodelan getaran dan peredaman pada pahat

Dua buah magnet permanen identik yang berdekatan dengan kutub yang sama akan menghasilkan gaya tolak menolak diantara dua magnet tersebut. Gaya tolak yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$F = \frac{B_0^2(AB)^2}{4\pi\mu_0\left(0,5\pi - \tan^{-1}\frac{AB}{2L\sqrt{4L^2+A^2+B^2}}\right)^2} \left(-\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x+2L)^2} + \frac{2}{(x+L)^2}\right) \dots\dots\dots(2-16)$$

Dimana:

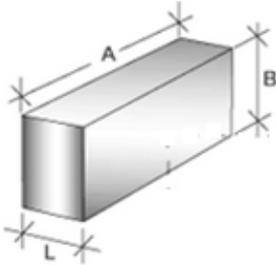
$F$  = Gaya tolak menolak antara 2 magnet (N)

$B_0$  = Induksi magnet pada permukaan (Tesla)

A, B, dan L = dimensi magnet (m), dapat dilihat pada gambar 2.22

$\mu_0$  = permeabilitas ruang hampa ( $\text{N/A}^2$ )

x = jarak antara dua magnet (m)



Gambar 2.24 Dimensi magnet permanen

Nilai  $B_0$  dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$B_0 = \frac{B_r}{\pi} \left( 0,5\pi - \tan^{-1} \frac{AB}{2L\sqrt{4L^2 + A^2 + B^2}} \right) \dots\dots\dots (2-17)$$

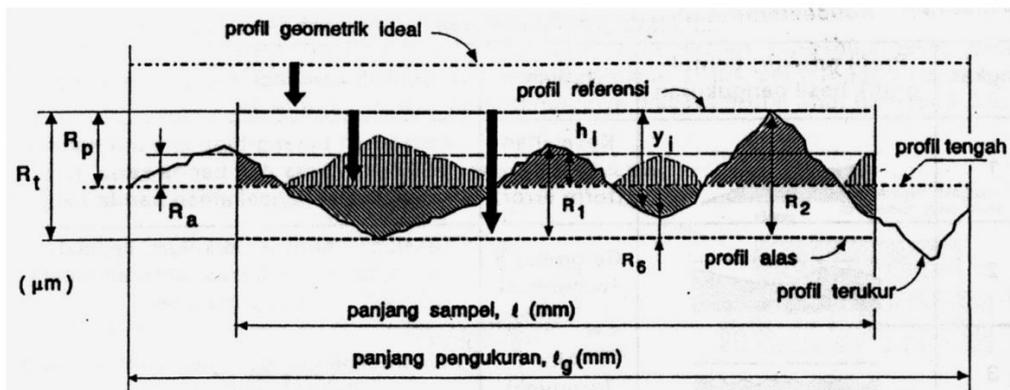
Dimana:

$B_r$  = *Residual Induction* magnet permanen

Nilai x diketahui apabila jarak antara magnet permanen dengan pahat telah ditentukan terlebih dahulu. Magnet permanen perlu diletakkan sedekat mungkin dengan pahat tetapi tidak menempel pada pahat (Sulaiman, 2012). Peletakan magnet permanen di dekat pahat memperhatikan keamanan seperti magnet tidak menabrak pahat atau benda kerja, serta tidak mengganggu keluarnya *chip* saat proses permesinan berlangsung. Pada penelitian ini, jarak antara magnet permanen dengan pahat adalah 60 mm. Jarak ini adalah jarak terdekat dengan pahat namun aman untuk melaksanakan proses permesinan. Berdasarkan perhitungan pada persamaan 2-12, diperkirakan pada jarak tersebut gaya tolak yang dihasilkan diantara 2 magnet permanen dengan kekuatan masing-masing 14300 Gauss adalah sebesar 11,4 N.

## 2.14 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan (*surface roughness*) merupakan sebuah ketidakraturan suatu konfigurasi permukaan yang dapat berupa goresan atau lekukan-lekukan kecil pada suatu benda. Nilai kekasaran permukaan berpengaruh terhadap kualitas produk yang dihasilkan. Selain itu juga dapat mempengaruhi kemampuan benda untuk mencegah terjadinya korosi pada permukaan. Zat atau material yang bersifat korosif akan bertempat pada material yang nilai kekasarannya tinggi sehingga kecenderungan untuk berkarat semakin besar. Beberapa istilah profil permukaan yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.25 Profil Kekasaran Permukaan  
Sumber: Rochim (1993)

Keterangan gambar :

1. Profil geometri ideal (*geometrically ideal profile*)  
Merupakan profil permukaan geometris ideal yang dapat berupa garis lurus, lingkaran, dan garis lengkung
2. Profil terukur (*measured profile*)  
Merupakan profil permukaan yang dapat diukur oleh alat ukur. Profil inilah yang dijadikan sebagai data untuk menganalisis karakteristik kekasaran permukaan.
3. Profil referensi (*reference profile*)  
Merupakan profil yang berguna sebagai referensi untuk menganalisa ketidakaturan konfigurasi permukaan. Profil ini berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometri ideal, serta menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dalam suatu panjang sampel. Biasanya profil ini disebut dengan profil puncak (*custline*).
4. Profil dasar (*root profile*)  
Merupakan profil yang digeser ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal pada suatu panjang sampel) samapai menyentuh titik terendah dari profil terukur.
5. Profil tengah (*centered profile*)  
Merupakan profil yang berada ditengah-tengah dengan posisi sedemikian rupa yang berfungsi untuk mengetahui luas daerah dibawah profil tengah sampai profil terukur yang ditunjukkan oleh daerah terarsir.

Beberapa parameter permukaan yang lain yaitu:

- Kedalaman total (*peak to valley height*),  $R_t$   
Kedalaman total merupakan jarak rata-rata antara profil referensi dan profil dasar.
- Kedalaman perataan (*peak to mean lene*),  $R_p$

Kedalaman perataan merupakan jarak rata-rata antara profil referensi dengan profil terukur, atau dengan kata lain jarak rata-rata profil referensi ke profil tengah.

- Kekasaran rata-rata aritmetis (*mean roughness index*),  $R_a$

Merupakan harga rata-rata aritmetis dari harga absolute antara profil terukur dengan profil profil tengah.

Menurut bentuk profilnya, ketidakraturan konfigurasi suatu permukaan dapat diklasifikasikan beberapa tingkatan, yaitu:

1. Tingkatan pertama adalah ketidakraturan makrogeometri yang berupa kesalahan bentuk (*form error*) yang disebabkan oleh adanya ruang yang longgar pada mesin perkakas sehingga benda kerja menjadi lentur dan terjadi kesalahan posisi ketika pencekaman benda kerja.
2. Tingkatan kedua adalah ketidakraturan yang membentuk seperti gelombang (*waviness*). Hal tersebut terbentuk karena adanya getaran pada saat proses pemotongan dan juga terjadi kesalahan penggunaan perkakas.
3. Tingkatan ketiga adalah ketidakraturan permukaan berbentuk seperti alur (*grooves*) yang disebabkan oleh jejak yang ditinggalkan pahat yang bergetar.
4. Tingkatan keempat adalah seripihan (*flake*) yang menempel pada permukaan benda kerja yang disebabkan karena proses pembentukan geram (*chips*).
5. Tingkatan kelima merupakan kombinasi dari ketidakrataan tingkatan pertama sampai ketidakrataan tingkat keempat.

Tabel 2.2  
 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	0.8
1.6	N7	
0.8	N6	
0.4	N5	
0.2	N4	0.25
0.1	N3	
0.05	N2	
0.025	N1	0.08

Sumber : Rochim (1993)

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan ketika proses permesinan, diantaranya :

1. Terjadinya getaran saat proses pemotongan berlangsung.
2. Jenis, bentuk, material, dan ketajaman alat potong.
3. Tingkat kekerasan dari material benda kerja.
4. Laju pemakanan (*feeding*) dan radius ujung pahat (*nose radius tool*)
5. Kondisi pemotongan dari mesin perkakas yang digunakan.

Hubungan antara *feeding* dengan kekasaran permukaan terdapat pada persamaan (Groover, 2013) berikut:

$$Ra = \frac{f^2}{32NR} \dots\dots\dots (2 - 18)$$

Dimana:

$Ra$  = kekasaran teoritis rata-rata (*mean roughness index*) ( $\mu\text{m}$ )

$f$  = *feed* (mm/rev)

$NR$  = radius pojok (mm)

## 2.15 Kerangka Pemikiran

Dari tinjauan pustaka didapatkan bahwa semakin besar nilai *spindle speed* yang diberikan akan berdampak terhadap nilai *Material Removal Rate (MRR)*, sebab hubungannya berbanding lurus sesuai fungsi :

$$MRR = f(n, a, f)$$

Nilai *MRR* akan berpengaruh terhadap gaya pemotongan ( $F_c$ ), sebab nilai *MRR* lurus dengan  $F_c$  sesuai fungsi :

$$F_c = f(P_u, MRR, \frac{1}{n})$$

Nilai  $F_c$  akan berpengaruh terhadap amplitudo getaran, sebab nilai  $F_c$  berbanding lurus dengan amplitudo getaran sesuai fungsi:

$$a_v = f(F_c, \frac{1}{n}, \frac{1}{z})$$

Sehingga besarnya nilai *spindle speed* akan berpengaruh terhadap nilai amplitudo getarannya. Sedangkan untuk kaitannya dengan kekasaran permukaan, nilai *MRR* berbanding lurus dengan nilai kekasaran rata-rata sesuai fungsi :

$$R_a = C + b_1v + b_2f + b_3\alpha$$

dengan:

$R_a$ : surface roughness

$C$  = konstanta

$b$  = koefisien regresi, menunjukkan angka peningkatan variabel terikat

$v$  = feed rate

$f$  = cutting speed

$\alpha$  = depth of cut

Bentuk umum eksponen yaitu:

$$Y = e^{b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3}$$

Dijadikan bentuk:

$$Y = e^{b_0} \cdot e^{b_1x_1} \cdot e^{b_2x_2} \cdot e^{b_3x_3}$$

Atau:

$$\ln Y = (b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3) \ln e$$

Dipermisalkan menjadi

$$R_a = \ln Y$$

$$C = b_0$$

$$b_1v = b_1x_1$$

$$b_2 f = b_2 x_2$$

$$b_3 \alpha = b_3 x_3$$

Pada penelitian ini *feed rate* dan *depth of cut* konstan, maka untuk regresi yang hanya memakai satu variabel bebas yaitu *spindle speed*, maka nilai Y dapat dinyatakan:

$$X_1 = \text{feed rate}$$

$$X_2 = \text{depth of cut}$$

$$X_3 = \text{spindle speed}$$

Dimana:

$X_1$  dan  $X_2$  merupakan variabel bebas bernilai konstan (C), sehingga Untuk mendapatkan nilai regresi dengan satu variabel bebas, maka nilai Y bisa dinyatakan:

$$Y = (b_0 + b_1 + b_2)C + b_3 X_3$$

Sehingga untuk mendapatkan nilai regresi maka dengan menggunakan persamaan linear dengan persamaan berikut:

$$Y = a + bX$$

dengan:

$Y$  = kekasaran permukaan (variabel terikat)

$a$  = konstanta

$b$  = koefisien regresi, menunjukkan angka peningkatan variabel terikat

$X$  = kecepatan pemakanan (variabel bebas)

Untuk mendapatkan nilai a dan b menggunakan matriks regresi linear,

$$\begin{bmatrix} n & \sum X \\ \sum X & \sum X^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum XY \end{bmatrix}$$

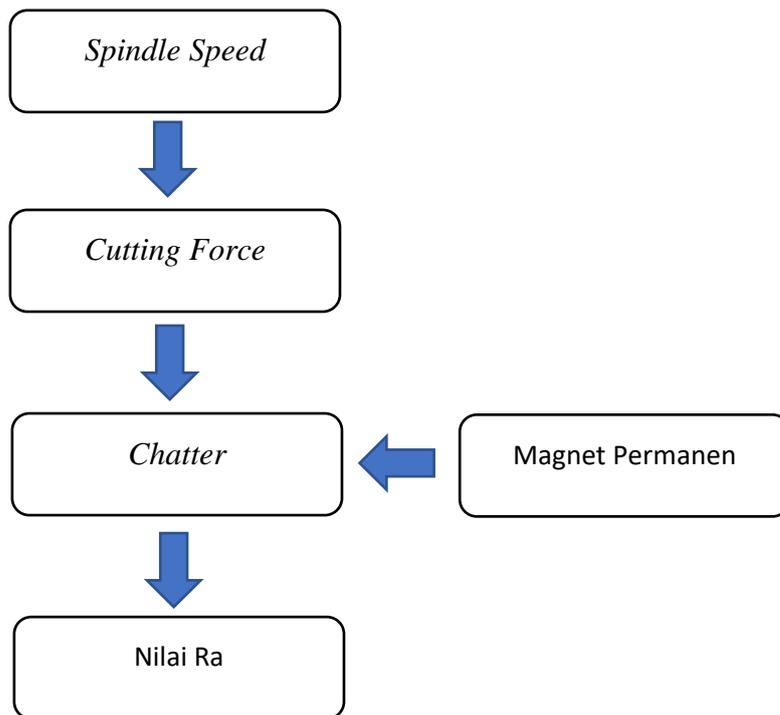
dengan:

$n$  = Jumlah Data

$X$  = Kecepatan pemakanan (variabel bebas)

$Y$  = Kekasaran Permukaan (variabel terikat)

Untuk meningkatkan kualitas permukaan benda kerja, maka fenomena *chatter* harus diredam. Peredaman *chatter* menggunakan prinsip sistem *magnetic damping*, dimana pahat yang berputar dan mengalami getaran diposisikan diantara dua buah magnet permanen yang tolak menolak. Hal ini bertujuan agar timbul arus eddy pada medan magnet yang dihasilkan oleh dua buah magnet permanen tersebut, dimana arus eddy tersebut dapat menginduksi medan magnet sehingga akan menimbulkan gaya yang dapat menahan *displacement* dari getaran pahat.



Gambar 2.26 Kerangka pemikiran Penelitian

## 2.16 Hipotesis

Berdasarkan rumusan masalah dan tinjauan pustaka, maka dapat dibuat hipotesis penelitian sebagai berikut :

1. Penambahan magnet permanen dalam proses *end milling* dapat mengurangi kekasaran permukaan benda kerja.
2. Semakin meningkatnya *spindle speed* pada proses *end milling* dapat mengurangi kekasaran permukaan benda kerja.