

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

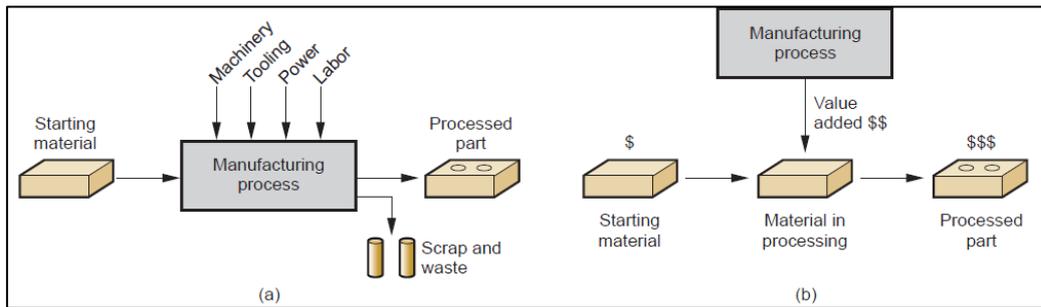
Putra (2013) melakukan penelitian tentang analisis pengaruh parameter pemakanan terhadap getaran *mini PC-based CNC milling* pada diameter tool 10 mm. Penelitian tersebut menghasilkan bahwa variasi parameter pemakanan kedalaman pemakanan (*depth of cut*) dan kecepatan pemakanan (*feed rate*) berpengaruh terhadap getaran mesin *mini PC-Based HERCUS V300 CNC Mill*. Semakin besar *depth of cut* maka getaran yang dihasilkan akan semakin besar. Semakin besar *feed rate*, maka getaran yang dihasilkan akan meningkat.

Danur (2013) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh parameter pemotongan terhadap getaran *mini pc-based CNC milling*. Penelitian tersebut berhasil menyimpulkan bahwa semakin besarnya nilai *feed rate* dan *depth of cut* akan menyebabkan semakin besarnya nilai amplitudo percepatan getaran.

Ali (2012) melakukan penelitian tentang getaran permesinan (*chatter*) dan kekasaran permukaan pada proses *micro milling* benda kerja PMMA. Penelitian tersebut menghasilkan bahwa parameter permesinan (*spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut*) dapat mempengaruhi nilai *chatter* yang terjadi pada mesin *micro milling*. Parameter permesinan yang paling mempengaruhi besarnya nilai *chatter* adalah *feed rate* dan *depth of cut*. Sedangkan untuk nilai kekasaran hal yang paling mempengaruhi adalah nilai *spindle speed*.

Sulaiman (2012) melakukan penelitian tentang pengaruh *cutting parameters* dan penambahan *magnetic field* terhadap kekasaran permukaan titanium alloy (Ti-6Al-4V) dan nilai *chatter* yang terjadi. Penelitian tersebut berhasil membuktikan bahwa penambahan *magnetic field* berhasil mengurangi nilai *chatter* yang terjadi, sehingga nilai kekasaran permukaan mampu direduksi sampai dengan 50% dari nilai kekasaran permukaan tanpa menggunakan *magnetic field*.

2.2 Proses Manufaktur



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

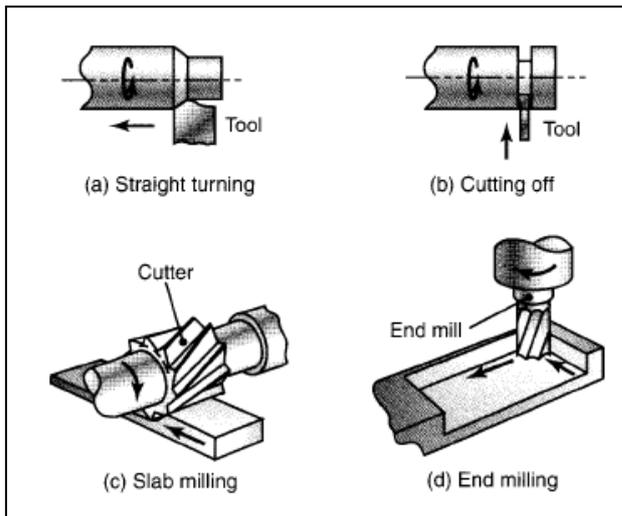
Sumber : Groover (2013, p.4)

Proses manufaktur adalah sebuah proses untuk mengubah geometri, properti, dari suatu bahan awal untuk membuat suatu produk. Proses ini melibatkan gabungan dari mesin, alat, dan tenaga juga untuk mentransformasi material menjadi bahan yang mempunyai nilai lebih tinggi dengan satu atau lebih operasi pemrosesan dan perakitan. Inti dari proses manufaktur ialah menambahkan nilai dari suatu bahan dengan merubah bentuk atau propertinya atau dengan menggabungkan dengan bahan lainnya dengan melakukan hal tersebut maka nilai suatu bahan dapat bertambah. Sebagai contoh ialah ketika pasir diproses menjadi kaca maka nilai dari kedua bahan menjadi berbeda. (Groover, 2013, p.4)

2.3 Proses *Machining*

Proses *machining* adalah proses pembuangan bahan yang tidak diinginkan pada benda kerja sehingga diperoleh produk jadi dengan ukuran, bentuk, dan kualitas permukaan yang diinginkan. (El-Hofy, 2014, p.1).

Salah satu bagian dari proses *machining* adalah dengan pembuangan geram (*chip removal*). Proses *turning* (bubut), *milling* (frais), *drilling*, dan *boring* termasuk ke dalam proses *cutting*. Selama proses *cutting*, pahat merambah ke dalam benda kerja sejauh *depth of cut* untuk melakukan *chip removal*.



Gambar 2.2 Proses *cutting*
 Sumber : Kalpakjian & Schmid (2009:557)

2.4 Proses *Milling*

Proses *milling* adalah proses pembuangan logam dengan cara memakan logam menggunakan *rotating multitoothed cutter*. Pada proses ini tingkat pemindahan material (*Material Removal Rate*) akan meningkat ketika *cutter* berputar pada kecepatan tinggi. Kualitas permukaan juga meningkat dikarenakan *multicutting edges* dari *milling cutter*. Proses *milling* berbeda dari *drill* atau *turning tool*. Pada *drill* atau *turning tool*, *tools* secara terus menerus bersentuhan dengan material untuk dipotong. Sedangkan *milling* adalah proses terputus-putus (*intermittent*), karena masing-masing *tooth* menghasilkan geram (*chip*) dengan ketebalan bervariasi. Proses *milling* mempunyai dua klasifikasi *peripheral (plain) milling* or *face (end) milling*. (El-Hofy, 2014, p.82).

2.4.1 *Micromilling*

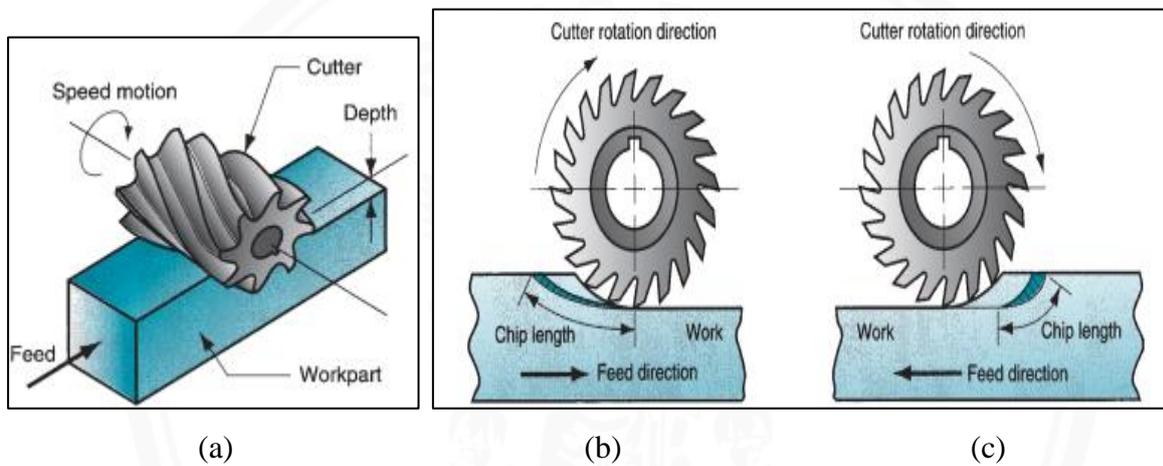
Micromilling adalah teknologi yang berupa pengecilan (*scaled down*) dari *milling* konvensional. Karena itu, keduanya memiliki kinematika yang serupa, dengan pelepasan material (*material removal*) yang dicapai oleh interaksi mekanis antara pemotong berputar (*rotating cutter*) dan benda kerja, menyebabkan pemotongan (*shearing*) material sepanjang jalur *tools* dan menghasilkan *material removal* dalam bentuk geram (*chips*). Meski begitu, beberapa kendala terjadi ketika melakukan perubahan dari makro ke mikro. Kendala seperti *size effect* dan *tool failures* membuat teknologi ini menjadi lebih sulit dibandingkan dengan *milling* makro. (Cheng, 2013, p.186)

2.4.2 Macam-Macam Proses *Milling*

Pada dasarnya, proses *milling* ada dua macam, yaitu :

1. *Peripheral Milling*

Pada *peripheral milling* pemotongan terjadi pada *teeth* yang tersusun di pinggiran dari *milling cutter*, dan permukaan yang dihasilkan adalah bidang yang sejajar dengan sumbu pemotongan. *Peripheral milling* biasanya dilakukan pada mesin *milling* horizontal. Karena itu, kadang disebut *horizontal milling*. Permukaan dan juga jenis formasi chip dipengaruhi oleh arah dari rotasi *cutter* sehubungan dengan pergerakan benda kerja. Sehingga *peripheral milling* dapat diklasifikasikan menjadi *up-milling* dan *down-milling*. (El-Hofy, 2014, p.82).

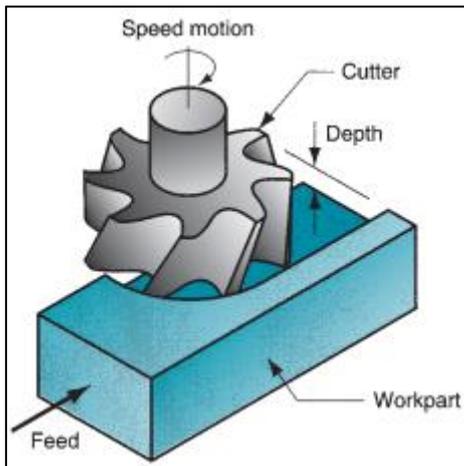


Gambar 2.3 (a) *Peripheral Milling* (b) *up-milling* dan (c) *down-milling*

Sumber : (Groover, 2010, p.524).

2. *Face Milling*

Pada *face milling* permukaan yang dihasilkan adalah bidang yang tegak lurus dengan sumbu pemotongan. Bila menggunakan *cutter* berdiameter besar lebih baik untuk memiringkan kepala spindle (*spindle head*) sedikit pada sudut $1-3^\circ$ untuk memberikan beberapa *clearance*, yang berguna untuk peningkatan *surface finish*. *Face milling* biasanya dilakukan pada mesin *milling vertical*, sehingga biasa disebut *vertical milling*. (El-Hofy, 2014, p.84).

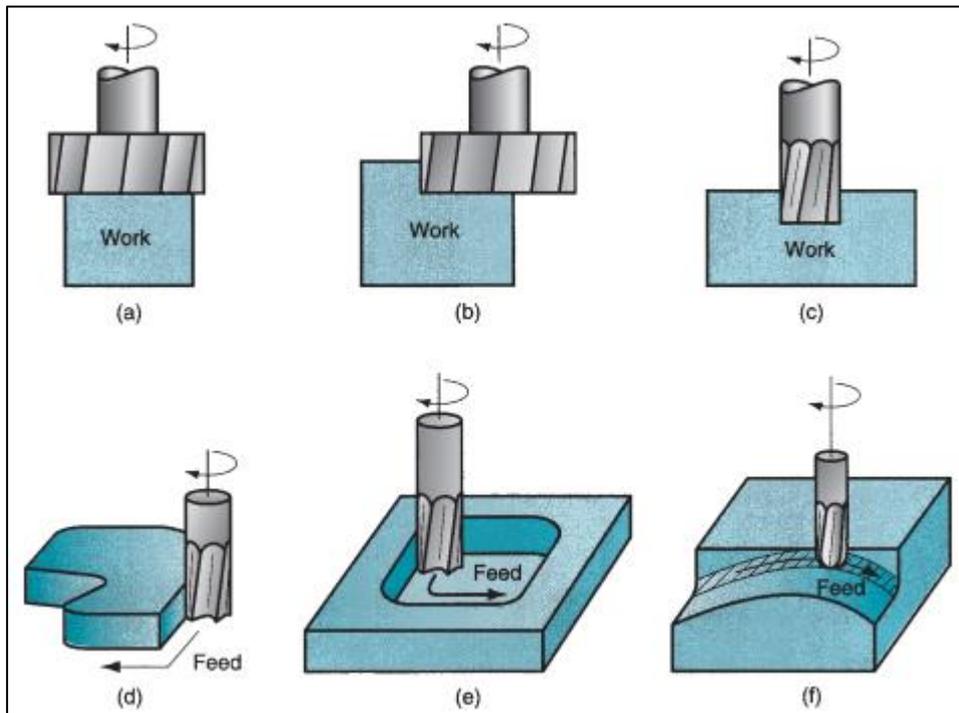


Gambar 2.4 Face Milling

Sumber : (Groover, 2010, p.524).

Proses *face milling* dibagi menjadi beberapa macam, yaitu :

- a. *Conventional face milling*, dimana diameter pahat potong lebih besar daripada benda kerja, sehingga kedua sisi pahat menggantung di luar benda kerja.
- b. *Partial face milling*, dimana sebagian sisi pahat menggantung di luar benda kerja.
- c. *End milling*, dimana diameter pahat lebih kecil dari benda kerja, sehingga terbentuk *slot* pada benda kerja.
- d. *Profile milling*, bentuk dari *end milling* dimana proses pemakanan dilakukan pada sisi luar benda kerja
- e. *Pocket milling*, bentuk lain dari *end milling* dimana pemakanan dilakukan di dalam luas permukaan benda kerja untuk membuat celah.
- f. *Surface contouring*, dimana penggunaan pahat dengan ujung berbentuk bola untuk pembuatan garis lengkung pada permukaan benda kerja.



Gambar 2.5 Macam-macam proses *face milling* : (a) *conventional face milling*, (b) *partial face milling*, (c) *end milling*, (d) *profile milling*, (e) *pocket milling*, dan (f) *surface contouring*

Sumber : Groover (2010, p.526)

2.4.3 Parameter Pemotongan pada Proses *Milling*

Terdapat beberapa macam parameter pemotongan dasar pada proses *milling*, antara lain :

1. *Cutting Speed*

Cutting speed adalah kecepatan pada permukaan terluar dari *milling cutter*. Dapat dihitung dengan menggunakan kecepatan spindle (*spindle speed*) sebagai berikut (Groover, 2010, p.526):

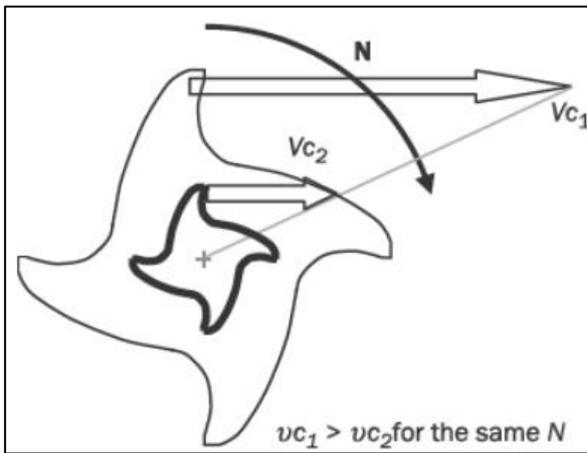
$$N = \frac{v}{\pi D} \dots \dots \dots (2-1)$$

Keterangan :

N = *Spindle speed* (rev/min)

V = *Cutting speed* (mm/min)

D = Diameter (mm)



Gambar 2.6 Ilustrasi kecepatan pemotongan pada 2 buah pahat dengan diameter berbeda
 Sumber : Davim (2011, p.223)

2. Feed rate

Feed pada milling biasanya disebut *feed per cutter tooth* atau *chip load*, yang melambangkan ukuran chip yang dibentuk oleh masing-masing *cutter*. Hal ini dapat dihitung menjadi *feed rate* dari *spindle speed* dan jumlah gigi pada *cutter* sebagai berikut (Groover, 2010, p.526):

$$V_f = N n_t f \dots\dots\dots(2-2)$$

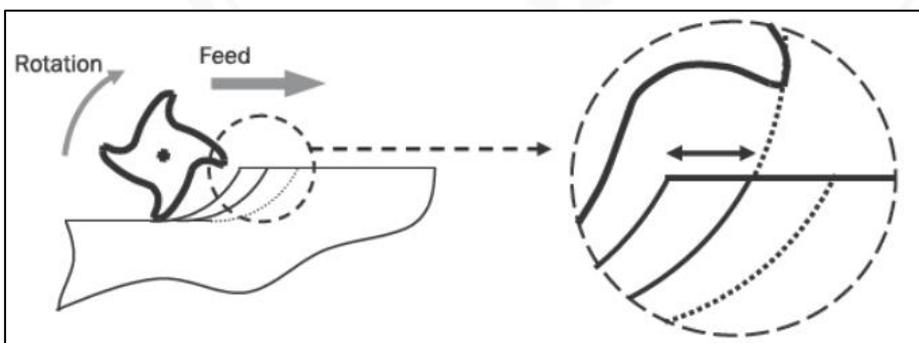
Keterangan :

V_f = Feed rate (mm/min)

N = Spindle speed (rev/min)

n_t = Jumlah gigi pada *cutter*

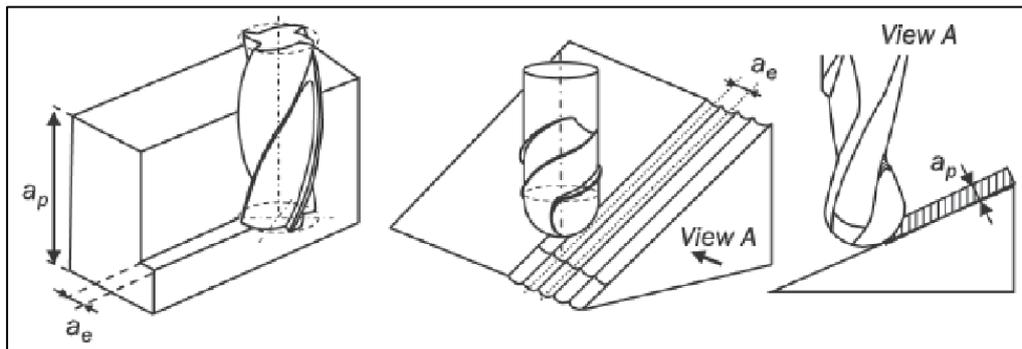
f = Chip load (mm/tooth)



Gambar 2.7 Ilustrasi feed per cutter tooth pada proses milling
 Sumber : Davim (2011, p.223)

3. Kedalaman Pemotongan (*Depth of cut*)

Terdapat dua macam *depth of cut* pada proses *milling* yaitu *axial depth of cut* (a_p) dan *radial depth of cut* (a_e), keduanya diukur dalam millimeter (mm). Baik *axial* maupun *radial depth of cut* akan berpengaruh terhadap beban yang diterima oleh mata pahat. Semakin tinggi *depth of cut*, maka beban yang diterima mata pahat akan meningkat.



Gambar 2.8 Axial depth of cut (a_p) dan radial depth of cut (a_e)

Sumber : Davim (2011, p.225)

Depth of cut akan mempengaruhi *material removal rate*. Di mana semakin besar *depth of cut* akan meningkatkan *material removal rate*. Hal ini menyebabkan hasil pengoperasian *milling* yang kasar dan meningkatnya konsumsi daya. Selain itu, menurut Arifin (2011) semakin meningkat *depth of cut* maka gaya potong meningkat sehingga akan terjadi beban bengkok yang menyebabkan perubahan defleksi hingga hasil akhir yang dicapai adalah kekasaran permukaan.

Peningkatan nilai *depth of cut* juga akan mempengaruhi getaran yang terjadi pada proses *milling* atau disebut juga *chatter*. Peningkatan *depth of cut* akan membuat proses *milling* menjadi tidak stabil, sehingga *chatter* juga akan meningkat. Peningkatan *chatter* yang terjadi pada proses *milling* akan menghasilkan kekasaran permukaan yang tinggi.

4. Material Removal Rate

Material Removal Rate (MRR) pada proses *milling* dapat ditentukan dari *cross-sectional area* dari pemotongan dan *feed rate* dengan membuat penyesuaian dari *cross-sectional area*.. Untuk menilai MRR, dapat menggunakan persamaan berikut (Groover, 2010, p.527):

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

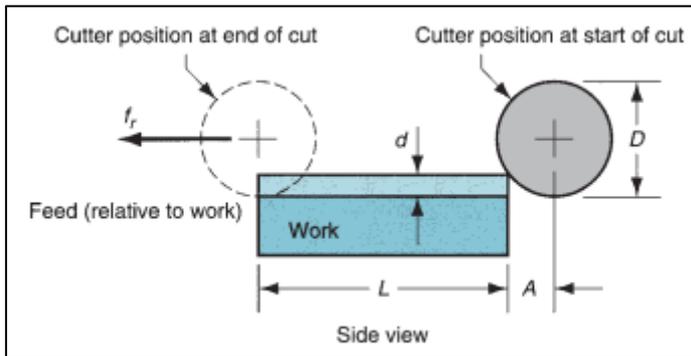
Keterangan :

R_{MR} = Material Removal Rate

w = lebar benda kerja (mm)

d = Depth of cut (mm/min)

V_f = Feed rate (mm/min)



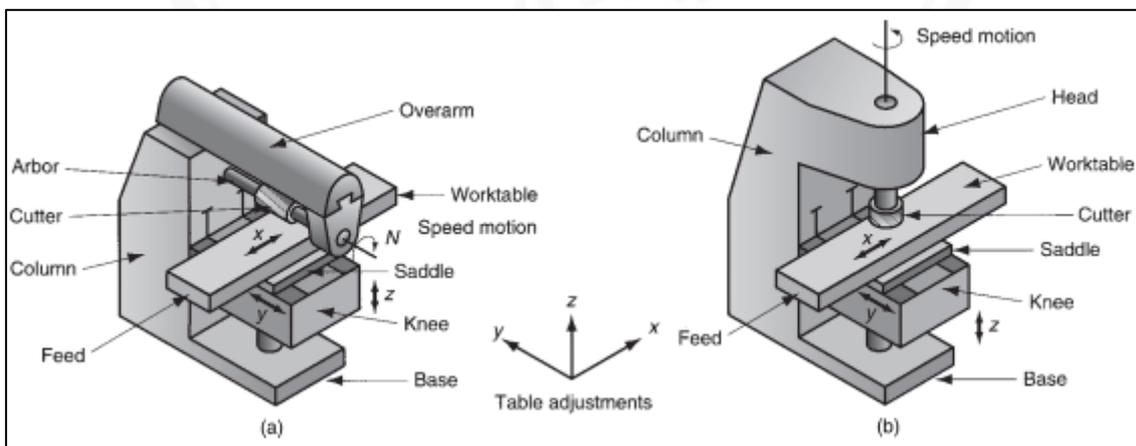
Gambar 2.9 Material removing rate

Sumber : Groover, 2010, p.526

2..4.4 Mesin Milling

Mesin *milling* dibagi menjadi 3 jenis menurut putaran *spindle* utamanya, antara lain :

1. Mesin *milling universal*
2. Mesin *milling vertical*
3. Mesin *milling horisontal*



Gambar 2.10 (a) Mesin *milling horisontal* dan (b) Mesin *milling vertical*

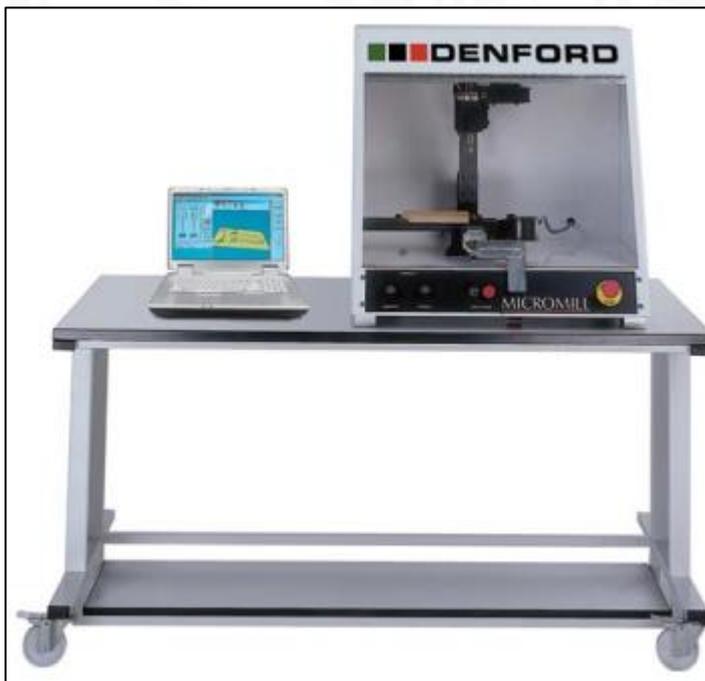
Sumber : Groover, 2010, p.526

Sedangkan, menurut fungsinya ada 5 jenis mesin *milling*, antara lain :

1. Mesin *milling copy*
2. Mesin *milling hobbing*
3. Mesin *milling gravier*
4. Mesin *milling planer*
5. Mesin *milling Computer Numerical Control (CNC)*

2.4.5 Mesin Denford Micromill CNC Milling

Mesin *Computer Numerical Control (CNC)* adalah mesin *milling* yang menggunakan *control unit* dan *motor-driven feeds*. Namun, hal yang membedakan dengan mesin *milling* konvensional adalah segala *basic control functions* dikendalikan oleh komputer. Operator juga tetap dibutuhkan pada mesin *milling* CNC untuk mengganti *cutter* atau memasang dan melepas benda kerja dari mesin. (Rattat, 2017, p. 35)



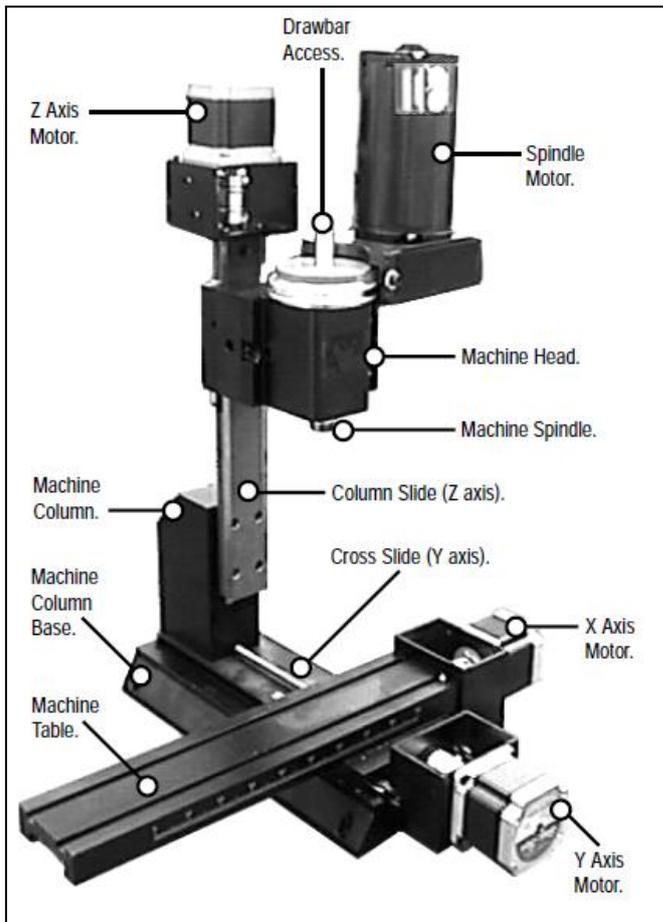
Gambar 2.11 Mesin Denford Micromill CNC Milling

Sumber : Denford Micromill Operator Manual

Pada dasarnya, mesin CNC *micromill* menggunakan sistem persumbuan koordinat Cartecius. Prinsipnya, meja kerja bergerak melintang dan horizontal sedangkan pahat

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

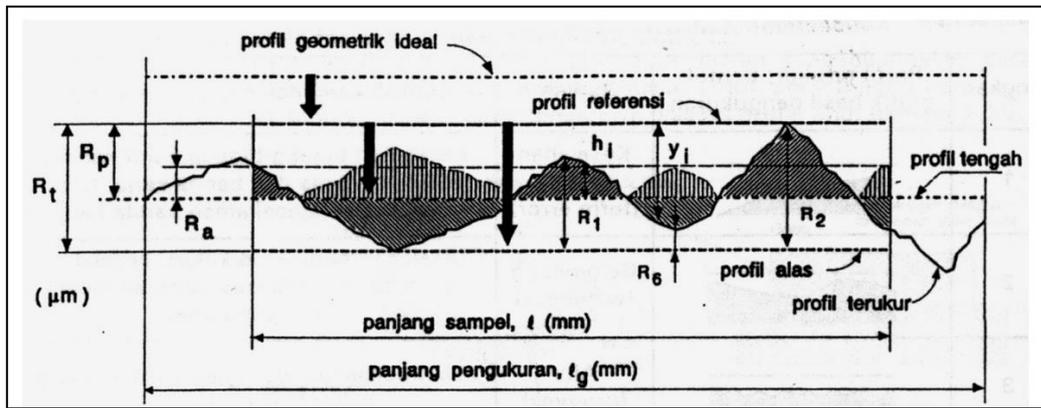
1. Sumbu X untuk arah gerak horizontal atau ke kanan dan ke kiri
2. Sumbu Y untuk arah gerak melintang atau kedepan dan ke belakang
3. Sumbu Z untuk arah gerakan vertikal atau keatas dan kebawah



Gambar 2.12 Sistem Persumbuan Mesin Denford Micromill CNC Milling
Sumber : Denford Micromill Operator Manual

2.5 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan (*surface roughness*) didefinisikan sebagai ketidakraturan suatu konfigurasi permukaan yang dapat berupa goresan atau lekukan-lekukan kecil pada suatu benda. Kualitas suatu produk dipengaruhi oleh nilai kekasaran permukaan. Selain itu, material yang memiliki kekasaran permukaan yang tinggi akan cenderung korosif. Gambar di bawah ini menunjukkan beberapa istilah profil permukaan.



Gambar 2.13 Profil Kekasaran Permukaan

Sumber : Rochim (1993, p.56)

Keterangan gambar :

- Profil geometri ideal (*geometrically ideal profile*)
Merupakan profil permukaan geometris ideal yang dapat berupa garis lurus, lingkaran, dan garis lengkung
- Profil terukur (*measured profile*)
Merupakan profil permukaan yang dapat diukur oleh alat ukur. Profil inilah yang dijadikan sebagai data untuk menganalisis karakteristik kekasaran permukaan.
- 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*).
- 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.
- 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.
- Kedalaman rata-rata kuadrat (*root mean square height*), R_g
Merupakan akar dari jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan 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 2.1
Angka Kekasaran (*ISO roughness number*) dan Panjang Sampel Standar

Harga kekasaran Ra (μm)	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, p.76)

Beberapa faktor yang dapat 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 pemakanan dengan kekasaran permukaan terdapat pada persamaan berikut (Groover, 2013, p.637) :

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

Keterangan :

Ra = Kekasaran permukaan rata-rata (μm)

f = *Feed* (mm/rev)

NR = *Nose radius* (mm)

Dimana nilai *feed* didapat melalui persamaan berikut

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

Keterangan :

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 ketidakaturan jalannya pahat selama proses pemotongan.

2.6 Getaran pada Proses *Milling*

Getaran (*vibration*) pada mesin atau *cutting tool* yang juga disebut *chatter* merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada suatu benda kerja. *Chatter* tampak pada hasil permukaan benda kerja yang terlihat bergelombang. Beberapa hal yang mempengaruhi *chatter* adalah adanya *stiffness* atau *damping* pada alat, nilai dari *feeds* dan *depths*, bentuk dari *cutter* yang digunakan, dan geometri dari benda kerja (Groover, 2010, p.591). Ada dua macam bentuk getaran pada mesin yaitu:

1. *Forced Vibration* (Getaran Paksa)

Getaran paksa yang terjadi karena adanya beberapa gaya periodik yang muncul pada pahat, yang berasal dari kontak antar roda gigi, ketidakseimbangan komponen *machine tool*, *misalignment*, maupun dari motor. Pada proses *milling*, getaran paksa terjadi diakibatkan oleh kontak yang terjadi antara pahat potong dengan benda kerja secara periodik.

Jika frekuensi getaran yang terjadi mendekati atau bertepatan dengan frekuensi natural dari *machine-tool system*, maka salah satu frekuensi harus dinaikkan atau diturunkan. Untuk mengurangi amplitudo getaran, maka perlu meningkatkan kekakuan sistem atau dengan meningkatkan sistem peredaman. Pemilihan parameter permesinan yang tepat juga akan mengurangi getaran paksa yang terjadi (Kalpakjian & Schmid, 2009, p.707)

2. *Self-excited Vibration* (Getaran Tereksitasi Diri)

Self-excited vibration umumnya disebut juga dengan *chatter*, dimana getaran ini terjadi akibat interaksi dari proses *chip-removal* dengan struktur dari pahat. *Self-excited vibration* biasanya memiliki amplitudo yang sangat tinggi. *Chatter* biasanya dimulai dengan gangguan yang terjadi pada area pemotongan. Penyebab yang memungkinkan terjadinya *chatter* adalah jenis geram yang dihasilkan, inhomogenitas permukaan benda kerja, dan perbedaan kondisi gesekan pada *tool-chip interface*.

Jenis *self-excited vibration* yang paling penting adalah *regenerative chatter*, dimana disebabkan ketika pahat memotong permukaan yang memiliki kekasaran ataupun geometri yang kurang baik yang terjadi pada pemotongan sebelumnya. Proses ini berlanjut dan berulang-ulang (Kalpakjian & Schmid, 2009, p.707). 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

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

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

Keterangan :

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

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

Keterangan :

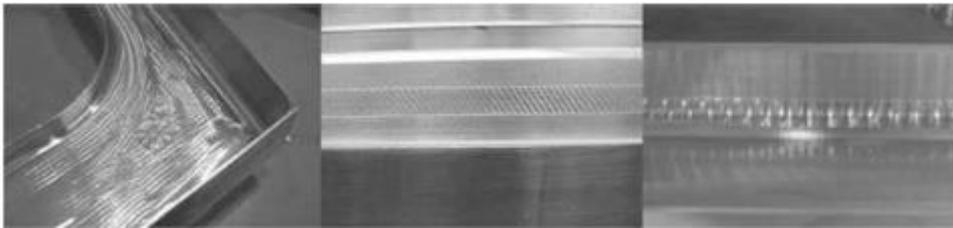
f_z = *Feed per tooth* (mm/tooth)

θ = 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*.



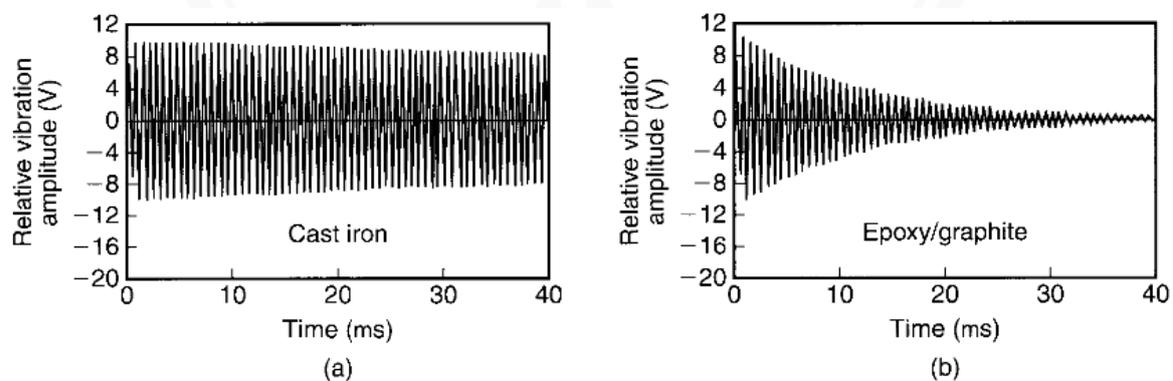
Gambar 2.14 Ciri-ciri benda kerja hasil *milling* yang mengalami *chatter vibration*
Sumber : Davim (2011, p.283)

2.6.1 Peredaman (*Damping*)

Peredaman (*damping*) dapat diartikan laju hilangnya getaran adalah faktor penting untuk menghilangkan atau mengurangi *vibration dan chatter* pada mesin. Pada dasarnya *damping* dipengaruhi oleh material apa yang digunakan dan juga jumlah sambungan (*joints*) pada struktur mesin (Kalpakjian & Schmid, 2009, p.704 & 708). *Damping* terdiri dari macam yaitu:

1. *Internal Damping*

Internal damping dihasilkan dari energi yang hilang pada material benda kerja saat terjadi getaran. Contohnya, material komposit memiliki kapasitas *damping* lebih tinggi daripada *gray cast iron* (Kalpakjian & Schmid, 2009, p.709).



Gambar 2.15 Kapasitas relatif *damping* dari (a) *gray cast iron* (b) *epoxy-graphite composite*

Sumber : Kalpakjian & Schmid (2011, p.708)

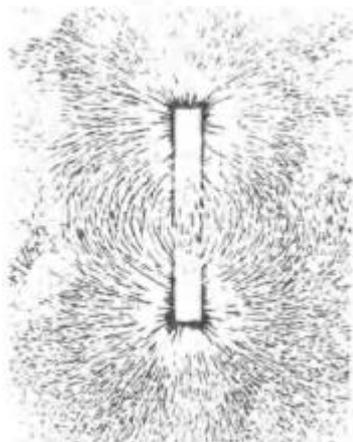
2. *External damping*

Merupakan peredaman yang didapat dari luar. Contohnya adalah pemasangan mesin pada lantai dan pondasi sedemikian rupa untuk mengurangi getaran paksa (Kalpakjian & Schmid, 2009, p.709). Contoh lain dari peredaman eksternal adalah memanfaatkan medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen untuk mereduksi *chatter* (Sulaiman, 2012).

2.7 Medan Magnet

Medan magnet adalah sebuah medan yang dihasilkan dalam suatu volume ruang, dimana adanya perubahan energi dari volume tersebut, dan adanya gradien energi sehingga sebuah gaya dihasilkan yang dapat dilihat dari adanya percepatan muatan listrik yang bergerak dalam medan tersebut (Jiles, 1991, p.1).

Medan magnet dihasilkan dari setiap adanya pergerakan suatu muatan listrik. Medan magnet juga dapat diproduksi dari magnet permanen dalam hal ini tidak ada arus listrik konvensional, namun ada gerakan orbital dan putaran elektron (yang disebut 'Amperian currents') di dalam bahan magnet permanen yang menyebabkan magnetisasi di dalam material dan medan magnet di luar. Medan magnet memberikan gaya pada kedua konduktor pembawa arus dan magnet permanen (Jiles, 1991, p.2).

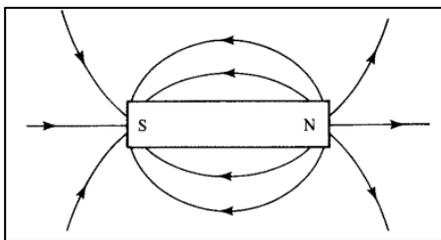


Gambar 2.16 Medan magnet pada magnet batang
Sumber : Cullity (2009, p.5)

Gambar 2.16 di atas memperlihatkan sifat-sifat dari garis gaya magnet, yaitu :

- Garis-garis gaya magnet semakin rapat pada kutub-kutub magnet. Hal ini menunjukkan bahwa medan magnet paling kuat berada pada kutub magnet.
- Garis-garis gaya magnet yang dihasilkan tidak saling betpotongan

Selain itu, sifat lain dari garis-garis gaya magnet adalah keluar dari kutub utara dan masuk menuju kutub selatan. Hal ini dapat ditunjukkan pada gambar 2.17 di bawah.

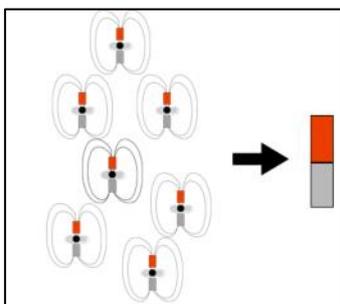


Gambar 2.17 Arah garis-garis gaya magnet
Sumber : Cullity (2009, p.4)

2.7.1 Magnet Permanen

Magnet permanen adalah objek yang dibuat dari material yang telah dimagnetisasi dan dapat menghasilkan medan magnet yang tetap. Sumber kemagnetan dari magnet permanen adalah tidak terisinya elektron pada kulit atom serta akibat rotasi elektron di sekitar inti. Kulit atom tidak yang terisi akan meningkatkan timbulnya medan magnet karena perputaran elektron. Kulit atom yang terisi akan memiliki jumlah elektron yang seimbang, sehingga tidak ada medan magnet yang timbul. Tidak terisinya kulit atom pada tangan atom yang lain, akan memberikan kontribusi kecil kemagnetan dari elektron yang mengorbit.

Melihat pada skala yang lebih besar, material akan menyusun atom dan bagian atom dengan cara yang berbeda, yaitu dari yang membutuhkan energi lebih rendah. Karena setiap atom yang kulitnya tidak terisi menimbulkan medan magnet kecil, maka dapat dianggap atom sendiri adalah magnet batang kecil. Ketika “magnet-magnet kecil” tersebut tersusun secara acak, maka akan menghasilkan medan magnet yang lemah, namun ketika tersusun rapi maka akan menghasilkan medan magnet yang kuat.



Gambar 2.18 Beberapa atom diilustrasikan sebagai “magnet kecil” (kiri), ketika “magnet-magnet kecil” tersusun dengan arah yang sama, maka akan menghasilkan medan magnet.
Sumber : Ostman (2014, p.3)

2.7.2 Gaya Tolak Antara Dua Magnet Permanen

Magnetic damping merupakan salah satu dari macam system peredaman getaran. Peredaman ini menggunakan cara yaitu dua buah magnet permanen yang saling berhadapan dengan kutub yang sama sehingga akan menghasilkan gaya tolak menolak (*repulsion force*). Gaya tolak antara dua magnet tersebut dapat di hitung dengan persamaan berikut :

$$F = \frac{B_0^2 (AB)^2}{4\pi\mu_0 \left(0,5\pi - \tan^{-1} \frac{AB}{2L\sqrt{4L^2 + A^2 + B^2}}\right)^2} \left(-\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x+2L)^2} + \frac{2}{(x+L)^2}\right) \dots\dots\dots (2-8)$$

Keterangan :

F = Gaya tolak antara dua magnet (N)

B_0 = Induksi magnet pada permukaan magnet permanen (Tesla)

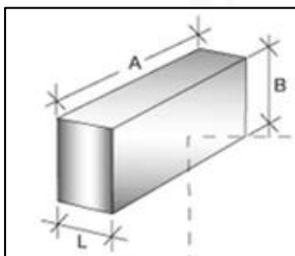
x = jarak antara 2 magnet permanen (m)

μ_0 = permeabilitas ruang hampa (N/A²)

A = panjang magnet permanen batang

B = tinggi magnet permanen batang

L = tebal magnet permanen batang



Gambar 2.19 Dimensi magnet permanen batang

Untuk mengetahui induksi magnet pada permukaan magnet permanen, maka diperlukan persamaan berikut :

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

Keterangan :

B_r = residual induction

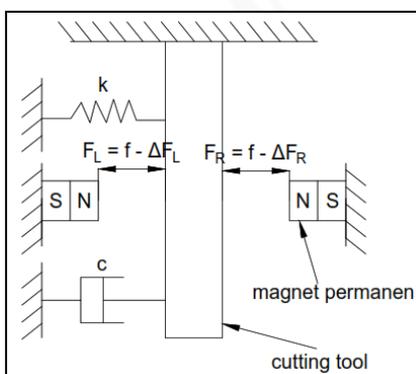
Untuk nilai x dapat ditentukan terlebih dahulu, peletakan kedua magnet perlu diletakkan sedekat mungkin dengan pahat tetapi tidak menempel. (Sulaiman, 2012). Nilai x atau jarak antara magnet dengan pahat pada penelitian kali ini digunakan 25mm. Jarak ini adalah jalah aman terhadap pahat namun aman pada saat proses permesinan. Berdasarkan dari perhitungan persamaan 2-8 nilai gaya tolak antara dua magnet didapatkan sebesar 6,7 N dengan kedua magnet permanen memiliki kekuatan 12000 Gauss.

2.7.3 Medan Magnet sebagai Peredam *Chatter*

Besarnya gaya tolak yang dimiliki magnet permanen memiliki hubungan terhadap peredaman getaran, melalui permodelan *single degree of freedom system* dapat diketahui persamaan berikut

$$kx + c\dot{x} + m\ddot{x} = F_0 \cos \omega t \dots \dots \dots (2-10)$$

Dimana k adalah konstanta pegas, x adalah amplitudo getaran, c adalah konstanta peredaman, m adalah massa, F_0 adalah gaya yang mengeksitasi (*cutting force*) dan ωt adalah frekuensi angular dari gaya harmonik eksternal dengan satuan rad/s (Rao, 2011, p.271).. Permodelan SDOF *system* diterapkan pada penelitian ini dengan magnet sebagai peredam menghasilkan *free body diagram* sebagai berikut:



Gambar 2.20 Permodelan getaran dan peredaman

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

$$F_L = f - \Delta F_L \dots\dots\dots (2-11a)$$

$$F_R = f - \Delta F_R \dots\dots\dots (2-11b)$$

$$F_{\text{repulsive}} = f - (\Delta F_L + \Delta F_R) \dots\dots\dots (2-12)$$

Dimana F_L dan F_R secara berturut-turut adalah gaya yang dihasilkan magnet di sebelah kiri dan kanan pahat, dan f adalah defleksi *cutting tool* (Bolsunovsky, 2013, p.235).

Nilai amplitudo getaran dapat diperoleh berdasarkan permodelan SDOF dengan magnet sebagai peredam dengan rumus:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = (F_0 - F_{\text{repulsive}}) \cos \omega t \dots\dots\dots (2-13)$$

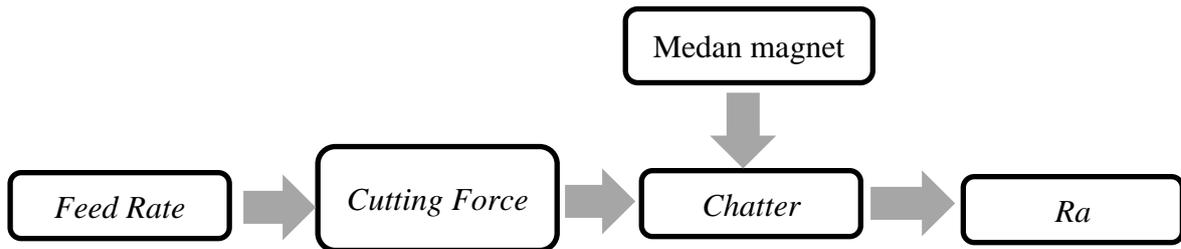
$$X = \frac{F_0 - F_{\text{repulsive}}}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{1/2}} \dots\dots\dots (2-14)$$

Persamaan 2-14 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 Pemikiran

Dari tinjauan pustaka sudah dijelaskan bahwa *feed rate* dapat mempengaruhi gaya pemotongan (*cutting force*) pada proses permesinan, sehingga dapat menimbulkan *chatter* yang akan mempengaruhi nilai kualitas produk terutama pada kekasaran permukaan suatu produk atau benda kerja.

Untuk mendapatkan kualitas produk yang bagus makan *chatter* yang timbul harus diredam. Peredaman *chatter* menggunakan cara *magnetic damping*, dimana magnet yang tolak menolak diposisikan menggapit pahat. Hal ini bertujuan agar dapat meredam getaran pada pahat. Sehingga akan berpengaruh juga pada kualitas permukaan dari permesinan.



Gambar 2.21 Alur Kerangka Berpikir

2.9 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dibuat maka dapat ditarik hipotesis penelitian sebagai berikut:

1. Kekasaran permukaan pada proses *slot milling* dengan dan tanpa menggunakan medan magnet akan terjadi perbedaan nilai.
2. Kekasaran permukaan akan semakin menurun seiring menurunnya *feed rate* dengan penggunaan medan magnet.
3. Kekasaran permukaan akan semakin menurun seiring menurunnya *feed rate*.

