

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Alfatih (2010) pengaruh parameter pemotongan terhadap kekasaran permukaan pada proses *up* dan *down milling* dengan pendekatan *vertical milling*. Dari penelitian ini kecepatan potong (V_c), kecepatan pemakanan (V_t) dan kedalaman pemotongan (a) mempunyai pengaruh terhadap kekasaran permukaan benda kerja hasil dari proses *milling*, kedalaman pemotongan dan kecepatan pemakanan mempunyai pengaruh yang positif terhadap kekasaran permukaan, sedangkan kecepatan potong berpengaruh negatif, dan juga proses *down milling* menghasilkan permukaan benda kerja lebih halus dari pada proses *up milling*.

Salman (2016) pengaruh variasi *end mill cutter* terhadap tingkat kerataan permukaan dan bentuk geram kuningan dan alumunium 6061 pada mesin CNC- TU 3A dengan kode program G 01. Penelitian ini menjelaskan bahwa terdapat pengaruh antara pahat nachi dan pahat asahi terhadap hasil tingkat kerataan alumunium dan kuningan.

Hadi (2008) hubungan antara rasio L/D pahat terhadap kekasaran permukaan pada pengaplikasian *endmill*. Dari penelitian tersebut dapat membuktikan bahwa pada pahat yang memiliki rasio L/D yang lebih kecil akan mendapatkan hasil kekasaran permukaan yang semakin kecil dibanding dengan rasio L/D yang lebih besar pada Alumunium dan EN24.

2.2 Proses Manufaktur

Proses manufaktur adalah salah satu bagian dari proses produksi dimana bahan mentah atau bahan setengah jadi dirubah menjadi bentuk lain yang memiliki nilai tambah menggunakan mesin, *tools*, *methods*, dan manusia.

Proses manufaktur meliputi penambahan dan pengaplikasian bahan fisik maupun kimia untuk merubah bentuk geometri bahan atau penampilan permukaan dalam pembuatan komponen suatu produk. Proses manufaktur membutuhkan komponen-komponen sederhana untuk diproses sehingga menjadi barang yang lebih kompleks. Misalnya komponen seperti baut, mur, plat besi dan lain-lain yang merupakan komponen dasar yang dapat dirakit menjadi komponen lebih rumit dan mempunyai nilai yang lebih besar dan berguna.

Manufaktur merupakan suatu industri dimana dalam prosesnya mengubah bahan mentah menjadi bahan jadi untuk dijual. Dan dalam produksinya membutuhkan integrasi komponen-komponen suatu produk.

2.3 Material Removal Process

Material removal process adalah proses lepasnya material dari benda kerja hingga akhirnya terbentuklah *chip*. Ada beberapa hal yang mempengaruhi *material removal process* diantaranya adalah:

1. Jenis Kondisi Pemesinan

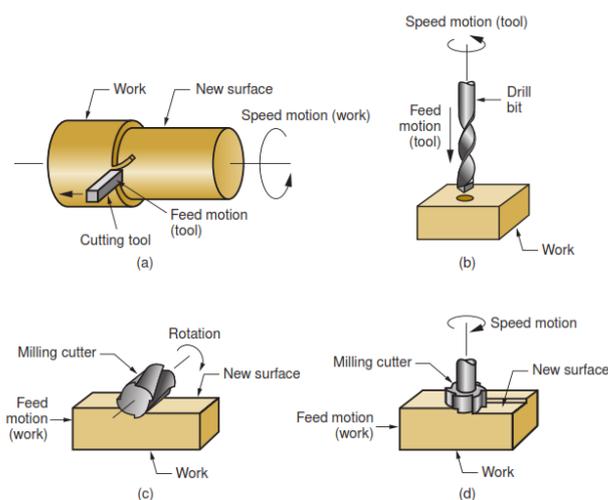
Kondisi pemesinan memegang peran penting pada *material removal process* dikarenakan perbedaan kondisi pemesinan akan mempengaruhi bentuk dan geometri benda kerja itu sendiri. Berikut beberapa jenis kondisi pemesinan:

2. Cutting Tool

Cutting tool termasuk faktor yang mempengaruhi *material removal process*. Dengan kondisi pemesinan yang sama namun menggunakan *cutting tool* yang berbeda *material removal process* akan berbeda pula tergantung *tool* yang digunakan pada saat pemesinan.

3. Kondisi Pemotongan (*Cutting Condition*)

Kondisi pemotongan adalah parameter pemotongan yang digunakan selama proses pemesinan. Terdapat banyak parameter pemesinan yang nanti akan di jelaskan pada sub-bab parameter pemesinan.



Gambar 2.1 Proses Material Removal a) Turning, b) Drilling, c) Slab milling, d) Face milling

Sumber: Groover (2013:525)

2.4 Mesin Milling CNC TU-3A

Mesin *milling* adalah jenis mesin pemotong yang melakukan pemotongan logam dengan *cutting tool* bergigi banyak (*Multiple Tooth Cutting Tool*) yang disebut *milling cutter*/pisau frais.

Mesin *milling* CNC adalah salah satu mesin *milling* yang dimana gerakan pemotongan diatur oleh data numerik bukan dengan perintah secara manual. Mesin *milling* CNC biasanya digunakan untuk profil *milling*, *pocket milling*, meratakan permukaan, dan lain-lain yang operasinya menggunakan dua atau tiga *axis* dari gerakan pemakanan (Groover, 2012).

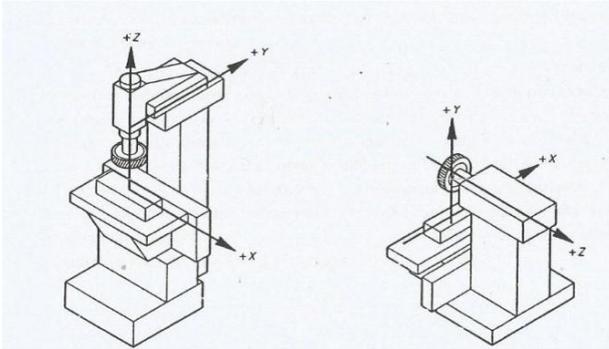


Gambar 2.2 Mesin Milling TU – 3A

Sumber: Laboratorium Otomasi Manufaktur Universitas Brawijaya

Pada dasarnya mesin *milling* CNC TU-3A menggunakan sistem persumbuan *cartesius*. Yaitu meja kerja bergerak melintang dan horizontal sedangkan pahat berputar dan bergerak keatas 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.



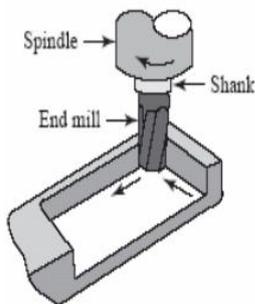
Gambar 2.3 Sistem Persumbuan Mesin *Milling*
Sumber: Holebrandse (1993,p.277)

2.4.1 Macam Pemakanan pada Mesin *Milling*

Untuk dasar pemakanan pada mesin *milling* ada 3, yaitu :

1. *End milling*

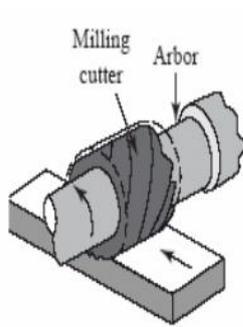
Adalah pisau pada proses frais jari yang biasanya berputar pada sumbu yang tegak lurus permukaan benda kerja. Pisau dapat digerakkan menyudut untuk menghasilkan permukaan menyudut. Gigi potong pisau terletak pada selubung pisau dan ujung badan pisau (Taufiq Rochim:1985:16).



Gambar 2.4 *End milling*
Sumber: Paryanto (2014 : 4)

2. *Slab milling*

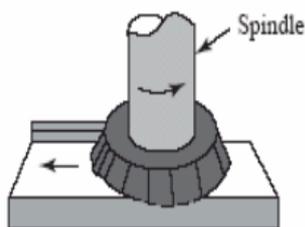
Adalah proses dimana permukaan frais yang dihasilkan oleh gigi pisau terletak pada permukaan luar badan alat potongnya. Sumbu dari putaran pisau biasanya pada bidang yang sejajar dengan permukaan kerja yang disayat (Taufiq Rachim 1985:16).



Gambar 2.5 Slab milling
 Sumber: Paryanto (2014 : 4)

3. Face Milling

Adalah proses dimana pisau dipasang pada spindel yang memiliki sumbu putar tegak lurus terhadap permukaan benda kerja. Pada proses ini permukaan hasil frais dihasilkan dari hasil penyayatan oleh ujung dan selubung pisau (Taufiq Rachim 1985:16).

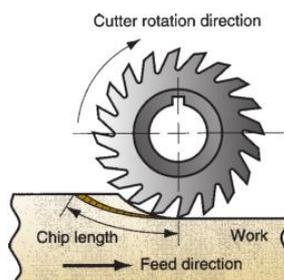


Gambar 2.6 Face Milling
 Sumber: Paryanto (2014 : 4)

2.4.2 Arah Pemotongan Mesin Milling

Menurut arah pemakanan dengan arah *cutter teeth* pada proses *milling* dibagi menjadi 2, 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 2.7 Up Milling atau Conventional Milling
 Sumber : Groover (2013 : 568)

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

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

Keterangan:

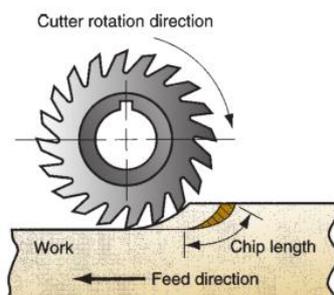
t_o = tebal *chip*

f_t = *feed per tooth*

Φ = *cutting effective angle*

α = *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 2.8 *Down Milling* atau *Climb Milling*

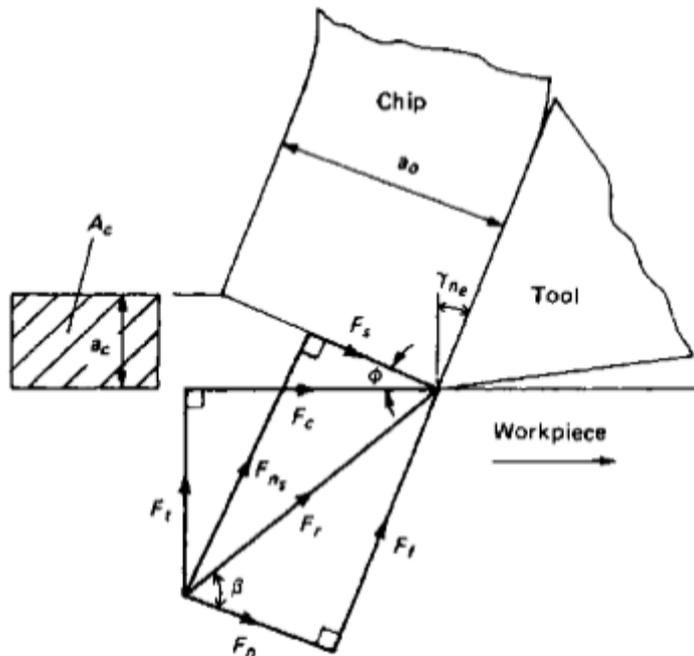
Sumber : Groover (2013 : 568)

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

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

Arah pemotongan yang berbeda akan menghasilkan geometri pemotongan yang 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).

2.4.3 Gaya Pemotongan



Gambar 2.9 Diagram Gaya pada *Orthogonal Cutting*
Sumber: Boothroyd (1981, p.91)

Gaya pemotongan akan mempengaruhi besarnya amplitudo getaran yang terjadi selama proses permesinan berlangsung. Besarnya amplitudo getaran dapat mempengaruhi kualitas permukaan. Hubungan gaya pemotongan dengan amplitudo dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$a_v = \frac{F_c}{\sqrt{4C_c^2 \omega_f^2 - (\omega_n^2 - \omega_f^2)^2}} \dots \dots \dots (2-3)$$

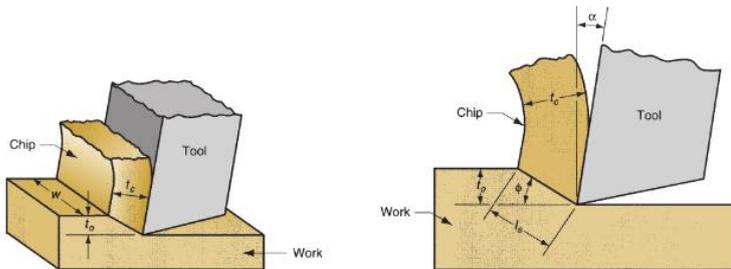
Keterangan:

- a_v : amplitudo getaran (m)
- F_o : gaya pemotongan (N)
- ω_n : frekuensi gaya *angular* (rad/s)
- ω_f : frekuensi *angular natural* dari sistem (rad/s)
- C_c : koefisien redaman

2.5 Pembentukan *Chip Formation*

Proses pembentukan *chip formation* adalah hasil *material removal* yaitu geometri. Pada mulanya chip terbentuk karena adanya retak mikro (*micro crack*) yang timbul pada

benda kerja tepat diujung pahat pada saat pemotongan dimulai. Dengan bertambahnya tekanan pahat, retak tersebut menjalar kedepan sehingga terbentuklah *chip* (Rochim, 1993). Geometri hasil pemotongan adalah sesuatu yang kompleks, namun kita dapat memahaminya dengan bantuan model pemotongan ortogonal (*orthogonal cutting model*). Pada proses pemesinan pembentukan *material removal* terbentuk pada bidang 3 dimensi, dengan bantuan model pemotongan ortogonal membentuknya dalam bidang 2 dimensi.



Gambar 2.10 Orthogonal Cutting Model sebagai Model 3 Dimensi dan Sebagai Model 2 Dimensi

Sumber : Groover (2013:528)

2.6 Parameter Pemotongan

2.6.1 Kecepatan Pemakanan (*Feed Rate*)

Kecepatan pemakanan adalah kecepatan makan benda kerja oleh *cutting tool* dalam suatu proses *machining*, satuan *feed rate* mm/menit. Diameter pahat dan kecepatan pemakanan yang digunakan akan menentukan putaran mesin *milling*. Kecepatan pemakanan di pengaruhi oleh nilai kekasaran material benda kerja, geometri pahat, material pahat yang digunakan, dan tingkat kehalusannya. Dalam pemilihan parameter kecepatan pemakanan untuk pahat HSS dan karbida dijelaskan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kecepatan Potong Bahan Teknik

No	Bahan Benda Kerja	Vf (mm/min)
1	Kuningan, perunggu keras	30-45
2	Besi tuang	14-21
3	Baja>St 70	10-14
4	Baja St5 0-70	14-21
5	Baja St 34-35	20-30
6	Tembaga< perunggu lunak	40-70
7	Alumunium murni	300-500

Sumber: (Rao: 2009)

Maka untuk *feed Rate* dapat dirumuskan:

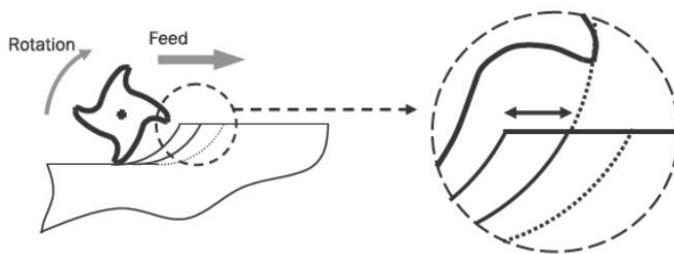
$$Fr = f \times n \dots\dots\dots (2-4)$$

Keterangan:

Fr : *feed rate* (mm/min)

F : *feed* (mm/rev)

n : putaran spindel (rev/min)



Gambar 2.11 Ilustrasi *Feed per Tooth* pada Proses *Milling*
Sumber : Davim (2011, p.223)

2.6.2 Kecepatan Spindel (*Spindel Speed*)

Spindel mesin *milling* adalah bagian dari sistem utama mesin *milling* yang bertugas untuk memegang dan memutar *cutter* hingga menghasilkan putaran atau gerakan pemotongan. Kecepatan spindel sendiri adalah kecepatan putar pada *cutter* yang memiliki satuan rpm. Untuk pemilihan besarnya kecepatan spindel berdasarkan kecepatan pemakanan dan diameter pahat dapat dilihat seperti dalam rumus:

$$n = \frac{V_f \times 1000}{\pi \times D} \dots\dots\dots (2-5)$$

Keterangan:

n : kecepatan putar spindel (rpm)

Vf : kecepatan potong (m/menit)

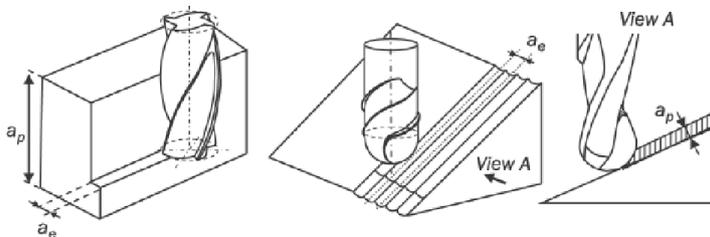
D : diameter *cutter* (mm)

Kecepatan spindel yang tinggi akan menghasilkan benda kerja yang tinggi (halus). Hal ini dikarenakan kecepatan spindel yang tinggi mengakibatkan pahat/*cutter* semakin cepat berputar dan semakin sering melakukan penyayatan, sehingga benda kerja sering terkikis dan menyebabkan permukaan menjadi semakin halus. Putaran spindel yang tinggi

menyebabkan benda kerja berputar stabil sehingga penyayatan menjadi stabil dan halus (Yunus, 2014).

2.6.3 Kedalaman Pemotongan (*depth of cut*)

Depth of cut adalah dalamnya pahat menusuk benda kerja saat penyayatan atau tebal total bekas penyayatan atau pemotongan. Semakin besar nilai *depth of cut* maka kedalaman 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.



Gambar 2.12 Axial Depth Of Cut (a_p) dan Radial Depth Of Cut (a_e)
Sumber : Davim (2011, p.225)

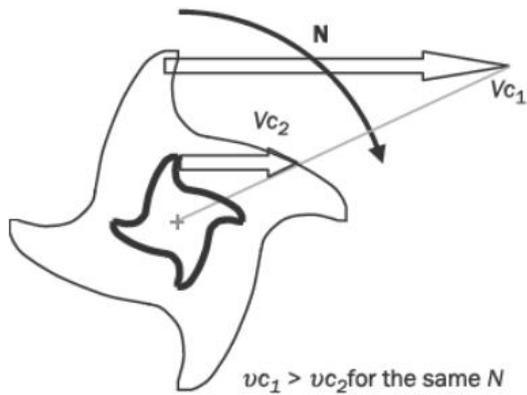
Dalam pemilihan putaran mesin sudah dijelaskan bahwa, dipengaruhi oleh kecepatan potong, dan diameter pahat. Sedangkan dalam pemilihan kecepatan pemotongan (*feeding*) ditentukan oleh jenis bahan yang dipotong dan bahan alat potong yang digunakan. Kedalaman pemakanan akan mempengaruhi kecepatan pemotongan. Kecepatan pemotongan dapat stabil jika mengoperasikan mesin secara otomatis (Saffar, 2009).

2.6.4 Kecepatan Pemotongan (*Cutting Speed*)

Adalah suatu harga yang diperlukan dalam menentukan kecepatan pada proses penyayatan atau pemotongan benda kerja, harga kecepatan potong ditentukan oleh jenis alat potong dan jenis benda yang di potong. Untuk menentukan kecepatan pemotongan yang diinginkan dapat menggunakan rumus berikut:

$$v = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \text{ (mm/min)} \dots\dots\dots (2-6)$$

Sumber : Rochim (1993:19)



Gambar 2.13 Ilustrasi kecepatan pemotongan pada 2 buah pahat dengan diameter berbeda
Sumber: Davim (2011,p.223)

2.7 Material Benda Kerja

2.7.1 Alumunium 6061

Alumunium memiliki jumlah yang sangat banyak, lebih dari 300 komposisi unsur paduan pada paduan alumunium. Semua jenis alumunium mengandung dua atau lebih unsur kimia yang mempengaruhi sifat mekanik dari paduan tersebut. Alumunium 6061 merupakan paduan dari Alumunium- Magnesium- Silikon, yang memiliki sifat mampu potong yang baik, material ini memiliki daya tahan terhadap korosi yang cukup baik, konduktivitas thermal dan elektik yang cukup baik. Biasanya material ini diaplikasikan untuk automotif, alat-alat konstruksi dan komponen pesawat terbang (ASM Metal Handbook Volume 9, 2004).

Tabel 2.2 Seri Aluminium

Series Number	Primary Alloying Element	Relative Corrosion Resistance
1xxx	none	excellent
2xxx	copper	fair
3xxx	manganese	good
4xxx	silicon	-
5xxx	magnesium	good
6xxx	magnesium and silicon	good
7xxx	zinc	fair

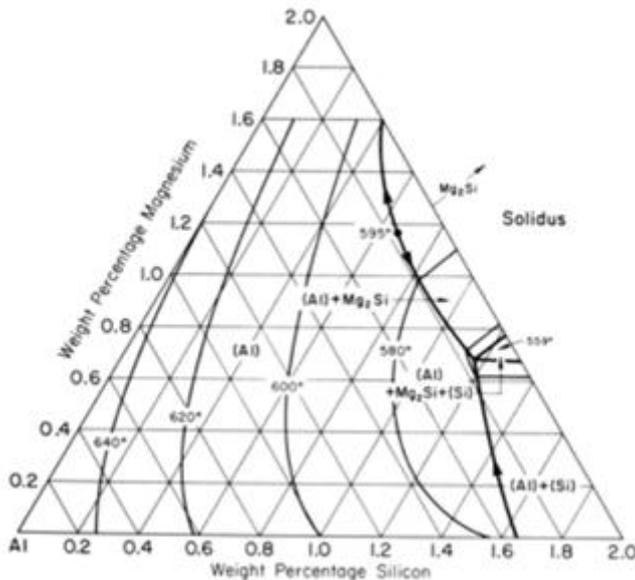
Sumber: ASM Metal Handbook Volume 9 (2004)

Tabel 2.3 Komposisi Kimia Al-Mg-Si

Paduan	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Cu	Cr	Ti	Kandungan Lainnya (%)
6061	95,8-98,6	0,80-1,2	0,40-0,80	Max 0,7	Max 0,15	Max 0,25	0,15-0,40	0,04-0,35	Max 0,15	Max 0,15

Sumber: ASM (Aero Space Metal inc.) dalam Sofyan B. T. (2010:p65)

Paduan aluminium seri 6061 berdasarkan tabel 2.3 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 2.14 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 β -AlFeSi, α -Al(FeSi) dan Mg_2Si .

Alloy	Phase constituents ^(a)	
	Rough state	Treated state
Wrought alloys		
1xxx (Al > 99.00%), Al-Fe-Si, Al-Cu	Al ₃ Fe, α -Al(FeSi)	Al ₆ Mn, α -Al(FeSi)
2xxx (Cu), Al-Si-Cu-Mn-Mg, Al-Si-Cu-Mn, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Ni, Al-Cu-Mn-Ti-V-Zr, Al-Cu-Mg-Ni-Fe-Ti	Al ₂ Cu, Al ₂ CuMg, Al ₂₀ Cu ₂ Mn ₃ , α -Al(FeMnSi), Al ₃ FeMn, Al ₆ MnFe, Al ₇ Cu ₂ Fe, Mg ₂ Si, Al ₃ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆	Al ₂ Cu, Al ₂ CuMg, Al ₂₀ Cu ₂ Mn ₃ , α -Al(FeMnSi), Al ₇ Cu ₂ Fe, Al ₁₂ Mn ₃ Si
3xxx (Mn), Al-Cu-Mn, Al-Fe-Si-Mg-Mn, Al-Si-Mn-Fe	α -Al(FeMnSi), Al ₆ MnFe	α -Al(FeMnSi), Al ₆ MnFe

4xxx (Si)	β -AlFeSi	...
5xxx (Mg), Al-Mn-Mg-Cr, Al-Mn-Mg-Cr, Al-Mn-Mg, Al-Mg	Mg ₂ Si, Al ₁₈ Mg ₃ Cr ₂ , Al ₆ Mn	Mg ₂ Si, Al ₃ Ni
6xxx (Mg, Si), Al-Si-Cu-Mg-Cr, Al-Si-Mg, Al-Si-Mg-Cr, Al-Si-Mn-Mg	β -AlFeSi, Mg ₂ Si, α -Al(FeSi)	Mg ₂ Si

Gambar 2.15 Unsur Paduan Aluminium 6061

Sumber: ASM Metal Handbook Volume 9 (2004)

Magnesium dan silica menjadi unsur paduan yang sangat penting bagi paduan aluminium seri 6061 karena magnesium dan silica akan membentuk karbida Mg₂Si 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 α dan β 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 HNO₃ + 190 ml H₂O.

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.

Aluminium 6061 mempunyai kekuatan tarik 12,6 kgf/mm, titik cair (*melting point*) 660° C, berat jenis (*density*) 2,70 g/cm³, ekspansi thermal (*linier coefficient of thermal*) 13,1.10⁻⁶ in/in/°F dan *thermal conductivity* pada 25° C, 23 w/cm/°C (Schwartz, 1992).

2.8 End Mill Cutter

Pisau jari *end mill* merupakan salah satu jenis *cutter* mesin *milling* yang banyak digunakan. Ukuran *cutter* jenis ini sangat bervariasi, mulai ukuran kecil sampai ukuran besar. Biasanya *cutter* ini terbuat dari baja berkecepatan tinggi (HSS) atau karbida, dan memiliki satu atau lebih alur (*flute*). *Cutter* ini dibuat untuk membuat alur pada bidang datar atau pasak dan umumnya di pasang pada posisi tegak (*vertical*), namun pada kondisi tertentu dapat dipasang pada posisi *horizontal*.

Pahat *end mill* ini digunakan untuk pengefraisan muka, *horizontal*, *vertical*, menyudut atau melingkar. Bentuk pahat *end mill* dapat melakukan pemakanan dengan berbagai jenis bentuk permukaan. Setiap jenis *end mill* masing–masing digunakan berdasarkan tipe pemakanan dalam operasi mesin antara lain:

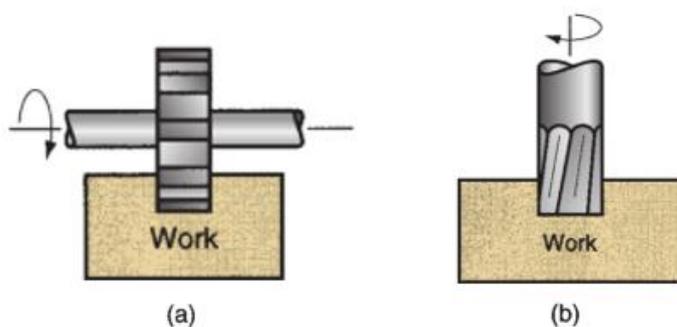
- Pahat *end mill* dengan ujung mata pahat yang rata, digunakan dalam operasi pemakanan permukaan yang datar dengan sudut tajam antara permukaan bawah dan dinding
- Pahat *end mill* dengan ujung pahat setengah lingkaran, digunakan untuk *3D machining* dengan variasi permukaan
- Pahat *end mill* dengan radius sudut, digunakan dalam pemakanan permukaan yang datar yang membutuhkan sudut antara dinding dan bagian bawah.

2.9 Slot Milling

Merupakan proses pembuatan celah pada material. Pembuatan *slot* hanya dapat dikerjakan jika ukuran pahat tidak lebih besar dari pada ukuran benda kerja (Groover, 2013).

Menurut cara pengerjaannya, pembuatan *slot milling* dibagi menjadi 2 yaitu:

1. Pembuatan *slot* dengan metode *slab milling*
2. Pembuatan *slot* dengan metode *end milling*



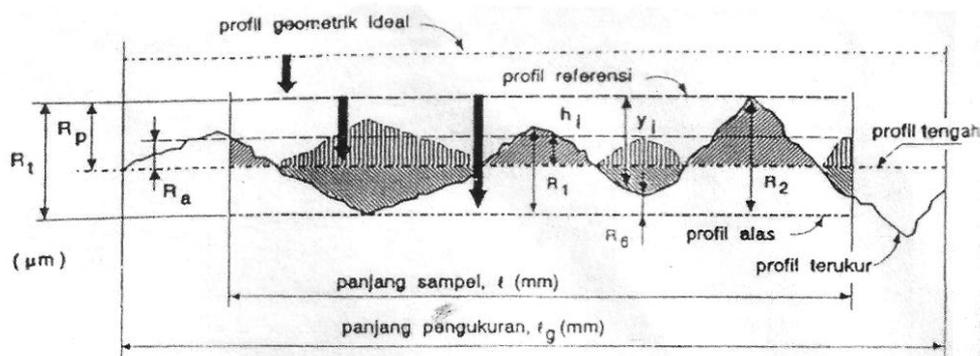
Gambar 2.16 Metode Pembuatan Slot dengan Metode (a) Slab Milling (b) End Milling
Sumber: Groover (2013 : 567, 569)

2.10 Kekasaran permukaan

Kekasaran permukaan adalah salah satu bentuk dari ketidakrataan suatu permukaan yang kemungkinannya dapat berupa goresan atau lekukan-lekukan kecil pada suatu permukaan.

Nilai kekasaran permukaan berpengaruh terhadap kualitas suatu benda kerja yang dihasilkan dari proses permesinan, karena nilai kekasaran dapat mempengaruhi benda kerja pada waktu terjadinya korosi permukaan.

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



Gambar 2.17 Profil Kekasaran Permukaan

Sumber: Rochim (1993:56)

Keterangan gambar:

- Profil geometri ideal (*geometrically ideal profil*): merupakan profil permukaan geometris ideal yang dapat berupa garis lurus ataupun garis lengkung.
- Profil terukur (*measured profile*): merupakan profil permukaan yang lurus atau garis terukur oleh alat ukur.
- Profil referensi (*reference profile*): merupakan profil yang di gunakan sebagai referensi untuk menganalisa ketidakrataan konfigurasi permukaan. Profil ini dapat berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometri ideal, menyinggung puncak tertinggi dari profil geometri ideal, serta menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dari suatu panjang sampel. Profil referensi biasa disebut sebagai profil puncak (*custline*).
- Profil dasar (*root profile*) merupakan profil yang di geser ke bawah (arah tegak lurus terhadap profil geometris ideal pada suatu panjang sampel) hingga menyinggung titik terendah dari profil terukur.

- Profil tengah (*center profile*) : merupakan profil referensi yang di geser kebawah sedemikian rupa, sehingga jumlah luas dari daerah-daerah diatas profil tengah sampai ke profil terukur adalah sama dengan jumlah luas dari daerah dibawah profil tengah sampai ke profil terukur. Pada gambar di tunjukkan oleh daerah yang diarsir tegak dan datar.

Beberapa parameter permukaan lain yaitu :

- Kedalaman total (*peak to valley height*), R_t : jarak rata-rata antara profil referensi dan profil dasar.
- Kedalaman perataan (*peak to mean line*), R_p : jarak rata-rata antara profil referensi dengan profil terukur atau R_p ini juga sama dengan jarak profil referensi ke profil tengah.
- Kekasaran rata-rata aritmetis (*mean roughnes indeks*), R_a : harga rata-rata aritmetis dari harga absolut antara profil terukur dengan profil tengah.
- Kekasaran rata- rata kuadrat (*root mean square hight*), R_g : akar dari jarak kuadrat rata-rata antara profil terukur dengan profil tengah.

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

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

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

1. Tingkatan pertama adalah ketidakteraturan makrogeometri yang berupa kesalahan bentuk (*form error*). Hal tersebut disebabkan oleh adanya lenturan yang terjadi pada mesin perkakas maupun benda kerja serta kesalahan posisi pada pencekaman benda kerja.
2. Tingkatan kedua adalah ketidakteraturan yang menyerupai gelombang (*waviness*). Hal ini disebabkan oleh terjadinya getaran suatu pemotongan. Kemungkinan terjadi ketidakteraturan ini karena kesalahan bentuk perkakas, kesalahan penteteran perkakas dan terjadinya getaran pada saat proses pemotongan.
3. Tingkatan ketiga, disebut sebagai alur (*grooves*), adalah ketidakteraturan permukaan karena adanya guratan yang disebabkan adanya jejak dari pahat.
4. Tingkat keempat adalah serpihan (*flake*) yang terjadi karena proses pembentukan geram.
5. Tingkatan kelima merupakan kombinasi dari ketidakteraturan dari tingkatan 1-4.

Persaman nilai kekasaran permukaan:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l [hi] dx \dots\dots\dots (2-7)$$

Keterangan:

Ra : kekasaran permukaan rata-rata (μm)

L : Panjang lengan (mm)

Hi : Profil referensi

Tabel 2.4 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 (1993:76)

Pada tabel 2.4 merupakan nilai interval kekasaran permukaan proses pemotongan dari beberapa permesinan. Dan nilai kekasaran tersebut bisa di jadikan acuan dalam memproduksi suatu barang. Dan dalam tabel 2.5 akan dijelaskan tentang kemampuan proses permesinan dalam menghasilkan nilai kekasaran pada benda hasil proses permesinan.

Tabel 2.5 Kemampuan Proses Mesin untuk Kekasaran Permukaan

Operation	Kekasaran permukaan (mikron)											
	25	12.5	6.25	3.2	1.6	0.8	0.4	0.20	0.10	0.05	0.025	
Gergaji, Pemotongan las	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Gerinda tangan	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pengikiran, amplas	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bubut, Shaping, Milling	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pengeboran	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Surface grinding	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cylindrical Grind.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Honing, Lapping	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Polishing	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Super Finishing	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bulfin	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Sumber: (Rao, 2009:79)

2.11 Getaran pada Proses *Milling*

Getaran yang terjadi pada proses *milling* akan mempengaruhi kualitas suatu produk dan operasi permesinan, seperti permukaan yang kasar, akurasi dan dimensi produk yang tidak sesuai, pahat menjadi mudah aus, dan dapat menimbulkan kerusakan pada komponen mesin. Untuk itu, getaran pada proses *milling* harus dihindari.

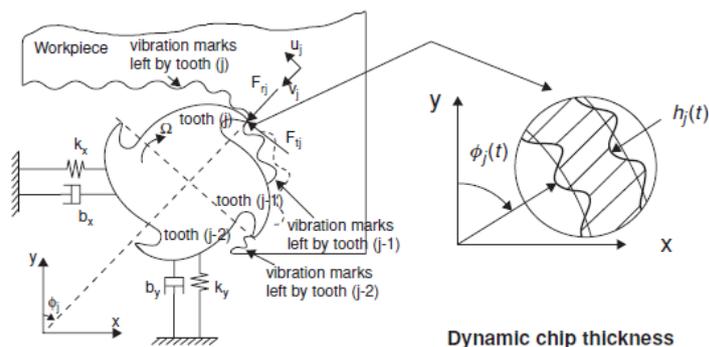
Getaran pada proses *milling* terbagi menjadi dua macam, yaitu:

1. *Forced vibration* (Getaran Paksa)

Getaran paksa pada proses *milling* terjadi karena adanya rangsangan gaya pada saat proses permesinan berlangsung, dimana gaya tersebut beresilasi sehingga sistem dipaksa bergetar pada frekuensi rangsangan. Getaran paksa dapat disebabkan karena ketidakseimbangan atau cacat pada komponen mesin, adanya getaran pada mesin lain yang ditransmisikan melalui lantai area kerja, adanya *misalignment* pada komponen mesin, dan lain-lain.

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

Self-excited vibration terjadi akibat adanya gaya yang mengeksitasi sistem sehingga sistem dapat bergetar, namun gaya tersebut muncul karena mekanisme gerak dari sistem itu sendiri. Pada proses *milling*, *tooth* pada pahat akan memotong permukaan yang sebelumnya telah terpotong oleh *tooth* sebelumnya. Ketebalan *chip* yang sebenarnya yang dipotong oleh *tooth* sebelumnya bergantung pada posisi *tooth* saat itu. Ketebalan *chip* akan mempengaruhi gaya pemotongan. Jika gaya pemotongan yang terjadi beresilasi, maka *tool* akan tereksitasi untuk mengalami getaran yang mendekati frekuensi natural dari sistem. Getaran semacam ini disebut sebagai *chatter*.



Gambar 2.18 Permodelan *chatter* pada proses *milling*
 Sumber: Altintas (2012,p.150)

2.12 Chatter

Chatter merupakan getaran yang terjadi akibat gerakan yang dihasilkan oleh komponen mesin itu sendiri. *Chatter* biasanya memiliki amplitudo yang sangat tinggi dan dimulai dengan adanya gangguan di zona pemotongan, penyebabnya adalah (a) jenis *chip* yang dihasilkan, (b) bahan benda kerja, dan (c) variasi dalam kondisi gesekan pada antarmuka *tool-chip*. *Chatter* dapat dikendalikan dengan meningkatkan kekakuan pada *tools*, dan penggunaan peredam (damping).

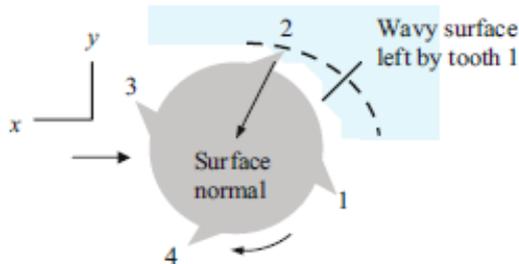
Dalam menggambarkan proses pemesinan dan peralatan mesin, kekakuan pahat merupakan hal yang penting sebagai parameter dalam pemesinan. Kekakuan *tool* yang rendah dapat menyebabkan getaran dan *chatter* dari alat pemotong dan komponen mesin, dengan demikian memiliki efek buruk pada kualitas produk. Getaran yang tidak terkontrol dan *chatter* dapat mengakibatkan masalah berikut:

1. Hasil permukaan yang kurang baik
2. Kurangnya akurasi dimensi benda kerja
3. Pahat cepat aus
4. Kemungkinan kerusakan pada komponen mesin/alat yang berlebihan dari getaran
5. Menimbulkan kebisingan, terutama pada frekuensi tinggi.

2.12.1 Regenerative Chatter

Regenerative chatter merupakan jenis getaran tereksitasi (*self-excited vibration*), terjadi ketika *tooth* memotong permukaan yang sebelumnya telah terpotong oleh *tooth* yang lain. Jika *tooth* yang sebelumnya bergetar, maka permukaan benda kerja akan bergelombang, sehingga *tooth* yang berikutnya akan menghasilkan ketebalan *chip* yang berbeda dan gaya pemotongan yang berbeda-beda akan dihasilkan selama proses pemesinan berlangsung. Gaya pemotongan yang berbeda-beda ini akan mengeksitasi sistem, meningkatkan getaran

dan permukaan yang dihasilkan akan bergelombang. Mekanisme seperti ini akan menghasilkan suatu siklus yang menyebabkan peningkatan ketebalan *chip* dan getaran yang disebut mekanisme *regenerative* (Davim, 2011).



Gambar 2.19 Ilustrasi proses pemotongan yang menyebabkan *regenerative chatter*.
 Sumber: Schmitz (2009,p.114)

2.13 Kerangka Pemikiran

Dari tinjauan pustaka didapatkan bahwa parameter pemotongan *depth of cut* pada proses *up milling* berpengaruh terhadap kekasaran permukaan yang dihasilkan. Dimana kualitas permukaan pada proses permesinan *depth of cut* proses *up milling* mempengaruhi gaya pemotongan (*cutting force*) sehingga akan berpengaruh pada timbulnya *chatter*. *Chatter* sendiri akan berpengaruh pada proses permesinan, terutama pada kekasaran permukaan dari benda kerja yang dihasilkan. Selain dari parameter pemotongan *dept of cut*, hubungan antara ratio *L/D*, *tool overhang*, dan kekakuan pahat (*K*) yang berbanding lurus didapatkan persamaan kekakuan (Hadi, 2008):

$$K = \frac{3EI}{l^3} \dots\dots\dots (2-8)$$

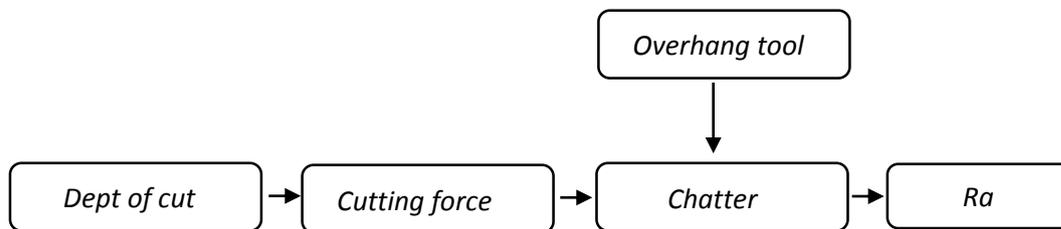
$$I = \frac{\pi d^4}{64} \dots\dots\dots (2-9)$$

$$K = \frac{3E\pi d^4}{64l^3} \dots\dots\dots (2-10)$$

Jadi jika semakin pendek *tool overhang* maka kekakuan yang didapatkan akan semakin besar dan rasio *L/D* akan semakin kecil. Dimana perpindahan pahat transversal akan semakin kecil jika kekakuan (*K*) besar, juga akan membuat *chatter* semakin kecil sehingga hasil dari geometri sesuai dan kekasaran permukaan yang dihasilkan kecil.

Dalam meningkatkan kualitas permukaan benda kerja hasil pengujian maka dalam pengujian ini digunakan pemanfaatan jarak antara *tool holder* ke benda kerja, dimana pada diameter pahat *end mill* 8 mm diatur dan disesuaikan untuk menstabilkan atau mengurangi

chatter, yaitu dengan memperpendek *overhang tool* agar dapat menghasilkan kekasaran permukaan yang baik.



Gambar 2.20 Alur Kerangka Pemikiran

2.14 Hipotesis

Pada penulisan skripsi ini hipotesis yang dapat diambil adalah:

1. Semakin kecil nilai kedalaman pemotongan (*depth of cut*) dan rasio L/D, maka kekasaran permukaan pada proses *up milling* akan menurun dengan memperpendek *overhang tool* untuk mengurangi terjadinya *chatter*.
2. Semakin tinggi nilai kedalaman pemotongan (*depth of cut*) dan rasio L/D, maka nilai kekasaran permukaan akan meningkat, namun akan terjadi perbedaan semakin meningkatnya kekasaran permukaan pada proses *up milling* dengan memperpendek *overhang tool*.

