

**PENGARUH VARIABEL PERMESINAN  
TERHADAP UMUR PAHAT *ENDMILL CUTTER TWO FLUTE*  
PADA PROSES PELUBANGAN BESI COR**

*THE EFFECT OF MACHINING VARIABLES  
TO TOOL LIFE OF ENDMILL CUTTER TWO FLUTE  
IN CAST IRON PERFORATION PROCESS*

**LUKMAN KASIM**



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK  
SEKOLAH PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2018**



Optimization Software:  
[www.balesio.com](http://www.balesio.com)

**PENGARUH VARIABEL PERMESINAN  
TERHADAP UMUR PAHAT *ENDMILL CUTTER TWO FLUTE*  
PADA PROSES PELUBANGAN BESI COR**

Tesis  
Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi  
Magister Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

Lukman Kasim  
P2202214005

Kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2018**



# TESIS

## PENGARUH VARIABLE PERMESINAN TERHADAP UMUR PAHAT *ENDMILL CUTTER TWO FLUTE* PADA PROSES PELUBANGAN BESI COR

Disusun dan diajukan oleh

Lukman Kasim

Nomor Pokok P2202214005

Telah dipertahankan didepan Panitia Ujian Tesis  
pada tanggal 28 Desember 2018  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui

Komisi Penasehat,



Dr. Ir. A. Yusran Aminy, MT.

Ketua



Dr. Muhammad Syahid, ST., MT.

Anggota

Ketua Program Studi Magister

Teknik Mesin,



Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T.

Dekan Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin,



Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.



## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Lukman Kasim  
No. Pokok : P2202214005  
Program Studi : Magister Teknik Mesin  
Konsentrasi : Konstruksi Mesin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya siap menerima sanksi sesuai dengan ketentuan-ketentuan yang berlaku.

Makassar, Desember 2018

Mahasiswa,



Lukman Kasim



## ABSTRAK

**Lukman Kasim** (P2202214005). Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Pengaruh Variabel Permesinan Terhadap Umur Pahat Endmill Cutter Two Flute pada Proses Pelubangan Besi Cor, Tahun 2018. Dibimbing oleh Dr. Ir. H. A. Yusran Aminy, M.T. dan Dr. Muhammad Syahid, S.T, M.T.

Mesin frais adalah mesin yang digunakan secara akurat untuk menghasilkan satu atau lebih pengerjaan permukaan benda dengan menggunakan satu atau lebih alat potong. Benda kerja dipegang dengan aman pada meja benda kerja dari mesin atau dalam sebuah alat pemegang khusus yang dijepit atau dipasang pada meja mesin. Selanjutnya benda kerja dikontakkan dengan pemotong yang bergerak maju mundur. Mesin frais merupakan mesin potong yang dapat digunakan untuk berbagai macam operasi seperti pengoperasian benda datar dan permukaan yang memiliki bentuk yang tidak beraturan, roda gigi dan kepala baut, boring, reaming. Kemampuan untuk melakukan berbagai macam pekerjaan membuat mesin frais merupakan salah satu mesin yang sangat penting dalam bengkel kerja.

Pada Penelitian ini proses pengefraisan Besi Cor dilakukan pada beberapa tingkat level parameter yaitu kecepatan potong dengan variasi ( $V_c$ ) 30,14 m/min, 46,16 m/min, 67,82 m/min, gerak makan 0,035 mm/rev; 0,070 mm/rev dan 0,14 mm/rev. Pengambilan data keausan pahat dilakukan menggunakan microscope dengan pembesaran 1600x. Data keausan pahat dicatat setiap 3 menit dilakukan proses pelubangan benda kerja dan pemesinan akan dihentikan apabila aus mata pahat ( $V_B$ ) telah mencapai 0,4 mm.

umur pahat tertinggi diperoleh pada kecepatan potong 30,14 m/min gerak makan 0,035 mm/rev yaitu selama 108 menit, sedangkan umur



pahat terendah pada kecepatan potong 67,82 m/min dengan gerak makan 0,14 mm/rev yaitu selama 42 menit.

Kesimpulan yang diambil pada penelitian ini adalah Semakin besar kecepatan potong ( $V_c$ ) yang diberikan pada proses pemesinan maka semakin cepat laju keausan pahat frais yang terjadi, hal ini di sebabkan karena besarnya gesekan yang terjadi antara pahat dan benda kerja yang dapat mengakibatkan perubahan ukuran geometri pada pahat, ditambah lagi dengan besarnya gerak pemakanan yang diberikan sehingga menambah beban pemotongan pada pisau terhadap benda kerja.

**Kata kunci :** *Umur Pahat,Keausan pahat, Besi Cor, Pisau Jari, Mesin Frais.*



## ABSTRACT

**Lukman Kasim** (P2202214005). Magister Program of Faculty of Engineering, University of Hasanuddin. *Effect of Machinery Variables in tool life of endmill cutter two flute in Cast iron perforation process*,2018. Consouller by Dr. Ir. H. A. Yusran Aminy,M.T. and Dr. Muhammad Syahid,S.T,M.T.

The milling machine is a machine that is used accurately to produce one or more work surfaces using one or more cutting tools. The workpiece is held securely on the workpiece table from the machine or in a special holder that is clamped or mounted on the machine table. Then the workpiece is contacted with the cutter moving back and forth. The milling machine is a cutting machine that can be used for a variety of operations such as the operation of flat objects and irregularly shaped surfaces, gears and bolt heads, boring, reaming. The ability to do various kinds of work making milling machines is one of the most important machines in a workshop.

In this study the Cast Iron extraction process was carried out at several level parameters, namely cutting speed with variation ( $V_c$ ) 30.14 m/min,46.16 m/min,67.82 m/min, feeding motion 0.035 mm/rev; 0.070 mm/rev and 0.14 mm/rev. Data retrieval of tool wear was carried out using a microscope with 1600x magnification. The tool wear data is recorded every 3 minutes when the workpiece perforation process is done and the machining will be stopped if the tool wear ( $V_B$ ) has reached 0.4 mm.

The highest tool life was obtained at cutting speed of 30.14 m / min with a feeding motion of 0.035 mm/rev which was for 108 minutes, while the lowest tool life at cutting speed was 67.82 m/min with a feed motion of 0.14 mm/rev which was for 42 minutes.

The conclusions taken in this study are that the greater the cutting speed then to the machining process, the faster the rate of milling tool wear this is caused by the large amount of friction that occurs between the workpiece which can cause changes in geometry size at chisel,



coupled with the magnitude of the feeding motion given so that it adds to the cutting load on the knife to the workpiece.

**Keywords:** *Tool Life, Tool Wear, Cast Iron, Endmill Cutter, Milling Machine.*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah serta karunia-Nya yang tidak ternilai harganya dan tak akan mampu terbalas dengan apapun juga. Salam dan shalawat tak lupa pula penulis haturkan kepada junjungan Rasulullah SAW atas semua hadits dan sunah – sunahnya yang masih sering penulis ingkari.

Sembah sujud dan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada kedua orang tua kami yang telah memberikan kasih sayang tulus dan tanpa pamrih. Karya ini kami persembahkan kepada kedua orang tua kami sebagai wujud bakti kami kepada mereka. Pada kesempatan ini, penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua Orang Tua dan Seluruh keluarga besar yang selalu memberikan motivasi selama proses penyelesaian studi di Fakultas Teknik Unhas.
2. Bapak Dr.Ir. Ahmad Yusran Aminy,M.T. selaku Pembimbing I dan Bapak Dr. Muhammad Syahid,S.T.,M.T. selaku Pembimbing II.
3. Bapak Dr. Ir. Ilyas Renreng,M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin FT-UH.
4. Seluruh dosen di Departemen Teknik Mesin FT-UH atas ilmu yang telah mereka berikan yang akan menjadi bekal kami untuk menatap masa depan.
5. Bpk. Yasmin, Ilham,ST., Indra Prasetya Abduh,S.T, Novi Angraini, Mochsinil Haq, Hakim Kasim, dan Baharuddin Kasim yang telah



banyak membantu dalam penyelesaian penelitian dan penyusunan Tesis ini.

6. Seluruh teman – teman UKM yang ada di pusat kegiatan mahasiswa unhas.
7. Semua pihak yang telah membantu yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Kami sangat menyadari masih banyak kekurangan dalam tugas akhir ini yang terjadi di luar kesengajaan kami sehingga kami sangat mengharapkan adanya kritikan yang membangun dari semua pihak. Akhir kata, semoga tugas akhir kami bisa bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkannya.

Makassar, Desember 2018

Penulis



## Daftar Gambar

Nomor	Halaman
Gambar 1. Klasifikasi Proses Manufaktur .....	4
Gambar 2. Klasifikasi Proses Pemesinan .....	5
Gambar 3. Jenis-jenis proses pemesinan .....	6
Gambar 4. Diagram energi dan input output material proses manufaktur .....	8
Gambar 5. Diagram alir konsumsi daya mesin perkakas .....	8
Gambar 6. Grafik daya pemesinan terhadap waktu .....	12
Gambar 7. Grafik proses pemesinan terhadap waktu .....	12
Gambar 8. Bentuk komponen hasil pemesinan frais .....	16
Gambar 9. Pisau frais identik dengan beberapa pahat bubut .....	17
Gambar 10. Proses Frais Periperal .....	18
Gambar 11. Proses Frais Muka .....	18
Gambar 12. Proses Frais Jari .....	19
Gambar 13. Proses Frais naik .....	20
Gambar 14. Proses Frais turun.....	21
Gambar 15. Mesin Frais Horizontal .....	22
Gambar 16. Mesin Frais Vertikal .....	24
Gambar 17. Komponen utama mesin frais column and knee.....	27
Gambar 18. Proses Frais Horizontal.....	28
19. Jalur pisau Frais .....	30
20. Proses kerja Slab Milling, Face Milling, dan End Milling .....	31



Gambar 21. Proses Kerja Frais Miring.....	32
Gambar 22. Proses Pelubangan menggunakan mesin frais .....	33
Gambar 23. Proses Frais Radius.....	33
Gambar 24. Proses Frais Roda Gigi.....	34
Gambar 25. Proses Frais Alur Ekor Burung.....	35
Gambar 26. Proses Frais Alur T .....	35
Gambar 27. Pisau Frais Mantel .....	37
Gambar 28. Pisau Frais Alur .....	38
Gambar 29. Pisau Frais Gigi .....	38
Gambar 30. Pisau Frais Radius Cekung.....	39
Gambar 31. Pisau Frais Radius Cembung .....	39
Gambar 32. Pisau Frais Alur T .....	40
Gambar 33. Pisau Frais Ekor Burung atau Frais Sudut .....	40
Gambar 34. Pisau Jari.....	41
Gambar 35. Pisau Frais Muka dan Sisi.....	41
Gambar 36. Pisau Frais Pengasaran.....	42
Gambar 37. Pisau Frais Gergaji .....	42
Gambar 38. Bentuk dan nama-nama bagian pisau frais datar .....	43
Gambar 39. Pisau Frais dengan lapisan Titanium Nitrit .....	50
Gambar 40. Pisau Frais dengan lapisan Titanium Carbonitride .....	50
Gambar 41. Pisau Frais dengan lapisan Aluminum Nitride .....	51
42. Keausan Crater dan Keausan Flank .....	53
43. Metode Keausan Abrasif.....	54



Gambar 44. Temperatur pada proses pemotongan .....	56
Gambar 45. Tekanan permukaan ujung pahat pada benda kerja .....	57
Gambar 46. Plot mekanisme keausan dan daerah pengoperasian yang aman untuk proses pemotongan .....	58
Gambar 47. Mekanisme Keausan Oksidasi .....	61
Gambar 48. Pertumbuhan keausan tepi untuk gerak makan tertentu dan kecepatan potong yang berbeda .....	65
Gambar 49. Endmill Cutter 2 Flute Carbide .....	72
Gambar 50. Digital Microscope .....	72
Gambar 51. Mesin Frais Vertikal .....	73
Gambar 52. Ukuran Benda Kerja .....	73
Gambar 53. Diagram Alir Penelitian .....	75
Gambar 54. Hubungan laju keausan pahat terhadap waktu pada gerak makan ( $f=0,035$ mm/rev) dengan variasi tingkat kecepatan potong ( $V_c$ ) .....	79
Gambar 55. Hubungan laju keausan pahat terhadap waktu pada gerak makan ( $f=0,070$ mm/rev) dengan variasi tingkat kecepatan potong ( $V_c$ ) .....	80
Gambar 56. Hubungan laju keausan pahat terhadap waktu pada gerak makan ( $f=0,140$ mm/rev) dengan variasi tingkat kecepatan potong ( $V_c$ ) .....	81



Gambar 57. Hubungan laju keausan pahat terhadap waktu pada kecepatan pemotongan ( $V_c=30,14$ m/min) dan variasi tingkat gerak makan.....	82
Gambar 58. Hubungan laju keausan pahat terhadap waktu pada kecepatan pemotongan ( $V_c=46,16$ m/min) dan variasi tingkat gerak makan.....	83
Gambar 59. Hubungan laju keausan pahat terhadap waktu pada kecepatan pemotongan ( $V_c=67,82$ m/min) dan variasi tingkat gerak makan.....	84
Gambar 60. Kondisi pahat yang mengalami aus .....	85



## DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel 1. Batas keausan kritis.....	64
Tabel 2. Variasi kecepatan pemotongan.....	76
Tabel 3. Waktu pelubangan aktual untuk tiap variasi pemesinan.....	77
Tabel 4. Data hasil pengukuran laju keausan pada $f=0,14$ mm/rev .....	77
Tabel 5. Data hasil pengukuran laju keausan pada $V_C=67,82$ m/min .....	78



## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
LEMBAR PERNYATAAN.....	iv
ABSTRAK .....	v
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR ISI .....	xvi
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
A. Latar Belakang .....	1
B. Perumusan Masalah .....	3
C. Tujuan Penelitian .....	3
D. Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II. LANDASAN TEORI</b> .....	<b>4</b>
A. Defenisi Manufaktur .....	4
B. Pemesinan .....	5
C. Mesin Perkakas .....	7
D. Konsumsi Energi Mesin Perkakas .....	7
E. Temperatur Pemesinan .....	12
Daya Pemesinan .....	13
Mesin Frais .....	16
	xvi



1. Proses Frais .....	16
2. Klasifikasi Mesin Frais .....	17
3. Komponen Utama Mesin Frais .....	24
4. Paramater Proses Frais .....	28
5. Pengerjaan benda kerja dengan Mesin Frais .....	31
H. Pisau Frais .....	36
1. Klasifikasi Pisau Frais .....	36
2. Geometri Pisau Frais .....	43
3. Material Pisau Frais .....	46
4. Kerusakan dan Keausan Pisau .....	51
5. Mekanisme Keausan Pahat .....	53
6. Umur Pahat .....	63
7. Pengaruh Cairan Pendingin terhadap Umur Pahat .....	67
I. Material Besi Cor .....	70
<b>BAB III. METODOLOGI .....</b>	<b>72</b>
A. Waktu Dan Tempat .....	72
B. Alat dan Bahan .....	72
C. Desain Benda Kerja Penelitian .....	73
D. Variabel Penelitian .....	74
E. Metode Pengambilan Data .....	74
F. Alur Data Penelitian .....	75
<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>76</b>
Data Hasil Penelitian .....	76
Pengaruh Perubahan Kecepatan Potong ( $V_c$ ) Terhadap	



Laju Keausan Pahat ( $V_B$ ).....	78
C. Pengaruh Perubahan Gerak Makan ( $f$ ) Terhadap	
Laju Keausan Pahat ( $V_B$ ).....	82
D. Foto Keausan pada Pisau Pahat.....	85
<b>BAB V. PENUTUP</b> .....	86
A. Kesimpulan.....	86
B. Saran .....	86

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN



# BAB I

## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Mesin frais adalah tools yang digunakan secara akurat untuk menghasilkan satu atau lebih pengerjaan permukaan benda dengan menggunakan satu atau lebih alat potong. Benda kerja dipegang dengan aman pada meja benda kerja dari mesin atau dalam sebuah alat pemegang khusus yang dijepit atau dipasang pada meja mesin. Selanjutnya benda kerja dikontakkan dengan pemotong yang bergerak maju mundur. Mesin frais merupakan salah satu mesin perkakas yang dapat digunakan untuk berbagai macam operasi seperti pengoperasian benda datar dan permukaan yang memiliki bentuk yang tidak beraturan, roda gigi dan kepala baut, boring, reaming. Kemampuan untuk melakukan berbagai macam pekerjaan membuat mesin frais merupakan salah satu mesin yang sangat penting dalam dunia manufaktur.

Mesin frais juga paling mampu melakukan banyak tugas dari segala mesin perkakas. Permukaan yang datar maupun berlekuk dapat dikerjakan dengan penyelesaian dan ketelitian istimewa. Pemotong sudut, celah, roda gigi dan ceruk dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai pemotong. Pahat frais dan pelumas lubang

at dipegang dalam *socket arbor* dengan melepaskan pemotong dan  
r. Karena semua gerakan meja mempunyai penyetelan



mikrometer, maka pembuatan lubang dan pemotongan yang lain dapat diberi jarak dengan tepat. Operasi yang pada umumnya dilakukan oleh mesin *sekrup*, *gurdi*, mesin pemotong roda gigi dan mesin pelumas lubang dapat dilakukan juga oleh mesin frais dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Dalam kasus pada umumnya, benda kerja diselesaikan dalam satu hantaran dari meja. Keuntungan ini ditambah dengan ketersediaan dari pemotongan yang sangat beraneka ragam yang membuat mesin frais sangat penting dalam bengkel dan ruang perkakas.

Dalam proses pemesinan logam, umur pahat dipengaruhi oleh keausan mata potong pahat yang terjadi akibat gesekan antara mata pahat dan benda kerja. Keausan pahat ini akan semakin besar sampai batas tertentu, sehingga pahat tidak dapat digunakan lagi. Lamanya waktu mencapai batas keausan ini didefinisikan sebagai umur pahat (*tool life*).

Umur pahat tidak hanya dipengaruhi oleh geometri pahat, melainkan juga oleh semua faktor yang berkaitan dengan proses permesinan seperti jenis material benda kerja dan pahat, kondisi pemotongan (kecepatan potong, kedalaman potong, gerak makan dan waktu makan) juga akan mempengaruhi keausan pahat.



## B. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Bagaimanakah pengaruh perubahan kecepatan potong terhadap laju keausan pahat.
2. Bagaimanakah pengaruh perubahan gerak makan terhadap laju keausan pahat.

## C. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui pengaruh perubahan kecepatan potong terhadap laju keausan pahat.
2. Untuk mengetahui pengaruh perubahan gerak makan terhadap laju keausan pahat.

## D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat diterapkan dan memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Hasil penelitian ini dapat memperkaya basis data dan pengetahuan pihak peneliti atau industri tentang pengaruh variabel permesinan dengan menggunakan *Endmill Cutter*.
2. Sebagai bahan panduan praktik bagi semua pihak tentang penentuan variabel permesinan yang berpengaruh terhadap

keausan pahat *Endmill Cutter*.

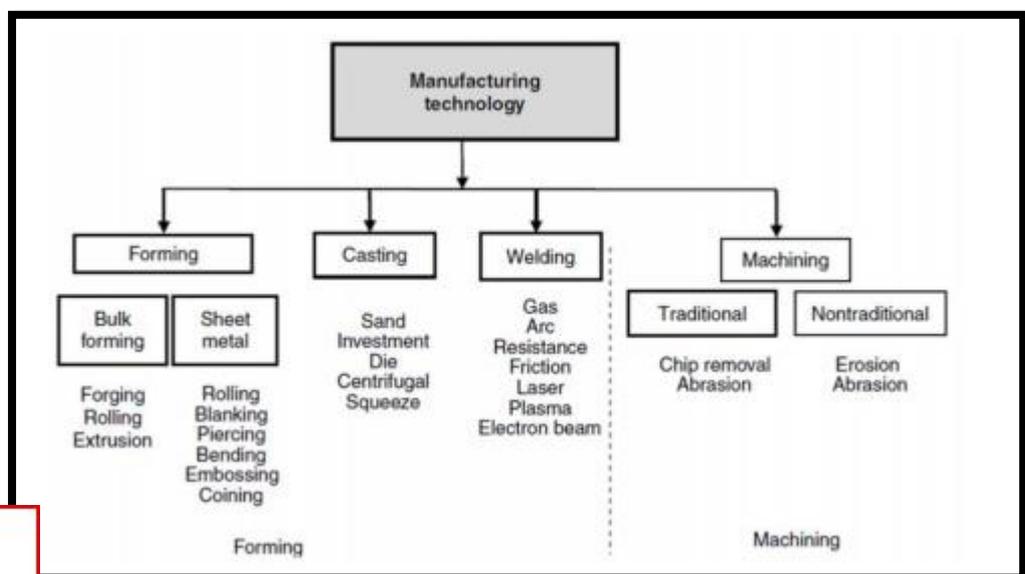


## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### A. Definisi Manufaktur

Manufaktur berasal dari bahasa latin *Manufactus*, yang berarti mengerjakan dengan tangan atau proses pembuatan produk dengan tangan/manual. Dalam definisi modern manufaktur dapat diartikan sebagai proses pembuatan produk dari bahan baku dengan berbagai proses dengan menggunakan perkakas tangan, bantuan mesin atau komputer yang dikerjakan secara otomatis penuh tetapi tetap melalui pengawasan secara manual (Singh, 2006). Proses Manufaktur adalah suatu aktivitas industri yang mengubah bentuk bahan mentah (raw materials) menjadi produk. Gambar 1 menunjukkan beberapa teknologi dalam pembuatan produk manufaktur diantaranya yaitu *plastic forming*, *casting*, *welding*, dan *machining technologies*. (Youssef, 2008).



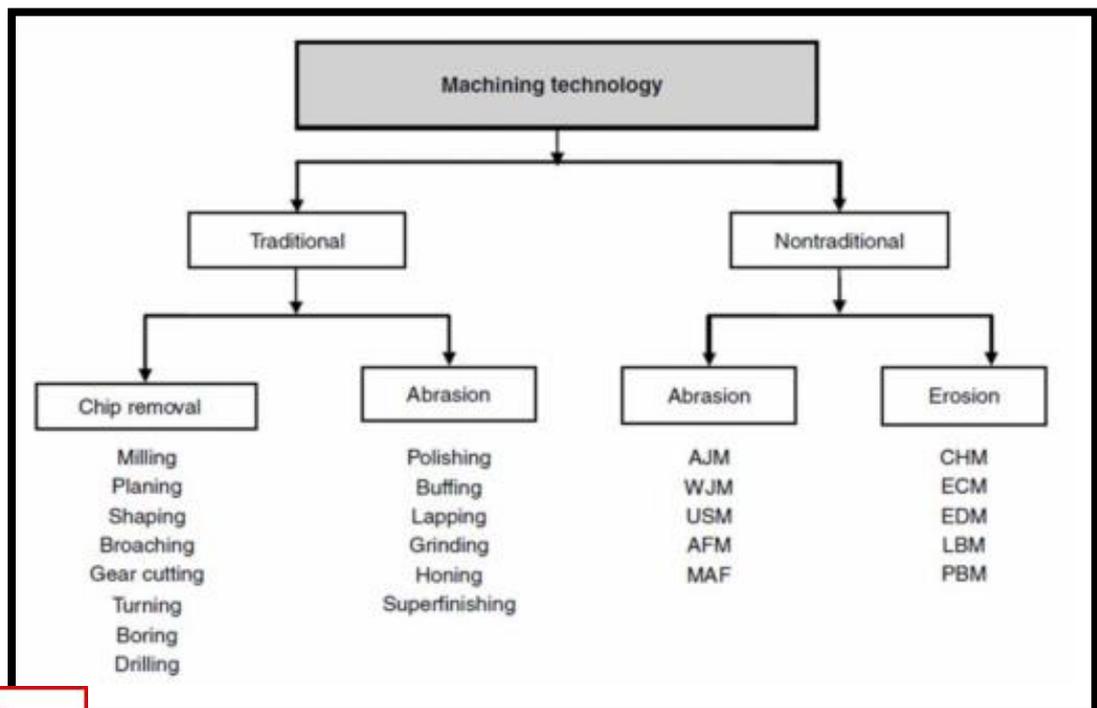
Gambar 1. Klasifikasi Proses Manufaktur (Youssef, 2008)



## B. Pemesinan

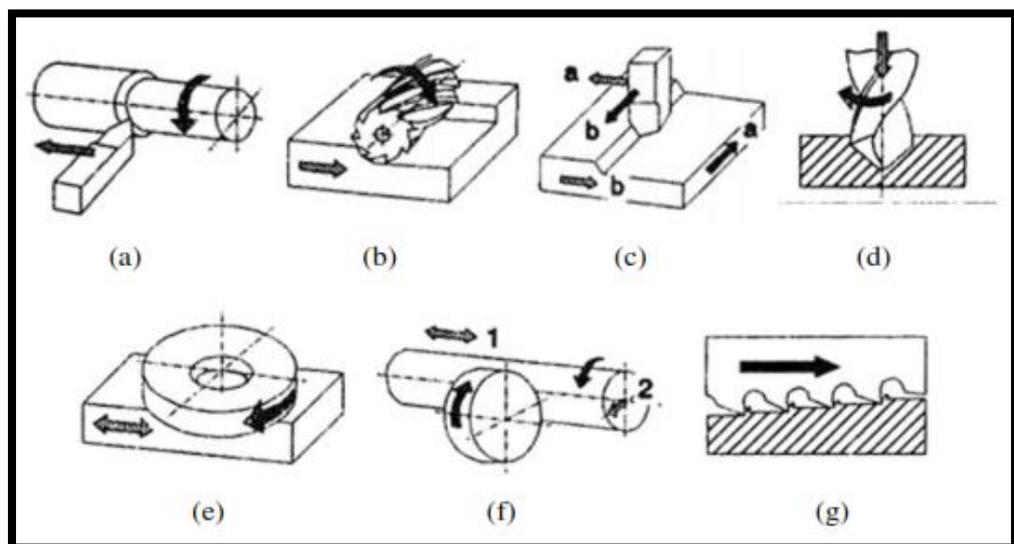
Pemesinan adalah suatu proses produksi dengan menggunakan mesin perkakas dengan memanfaatkan gerakan relatif antara pahat dengan benda kerja sehingga menghasilkan suatu produk sesuai dengan hasil geometri yang diinginkan. Pada proses ini terdapat sisa dari pengerjaan produk yang biasa disebut geram (Widarto,2008).

Proses pemesinan dilakukan dengan berbagai mesin perkakas untuk tujuan umum pengerjaan yang melibatkan banyak operasi, termasuk pembuangan geram dan teknik abrasi dengan teknik tradisional maupun nontradisional. Gambar 2 merupakan klasifikasi teknologi proses pemesinan dalam manufaktur (Youssef, 2008).



Gambar 2. Klasifikasi Proses Pemesinan (Youssef, 2008)

Proses pemesinan dapat diklasifikasikan dalam dua klasifikasi besar yaitu proses pemesinan untuk membentuk benda kerja silindris atau konis dengan benda kerja atau pahat berputar, dan proses pemesinan untuk membentuk benda kerja permukaan datar tanpa memutar benda kerja seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Klasifikasi yang pertama meliputi proses bubut dan variasi proses yang dilakukan dengan menggunakan mesin bubut, mesin gurdi (*drilling machine*), mesin frais (*milling machine*), mesin gerinda (*grinding machine*). Klasifikasi kedua meliputi proses sekrap (*shaping planing*), proses slot (*slotting*), proses menggergaji (*sawing*), dan proses pemotongan roda gigi (*gear cutting*) (Widarto, 2008).



Gambar 3. Jenis-jenis proses pemesinan : (a) Bubut (*Turning/Lathe*); (b) Frais (*Milling*);(c) Sekrap (*Planing, Shaping*); (d) Gurdi (*Drilling*); (e) Gerinda Permukaan (*Surface Grinding*); (f) Gerinda silindrik; (g) Gergaji (Widarto, 2008)



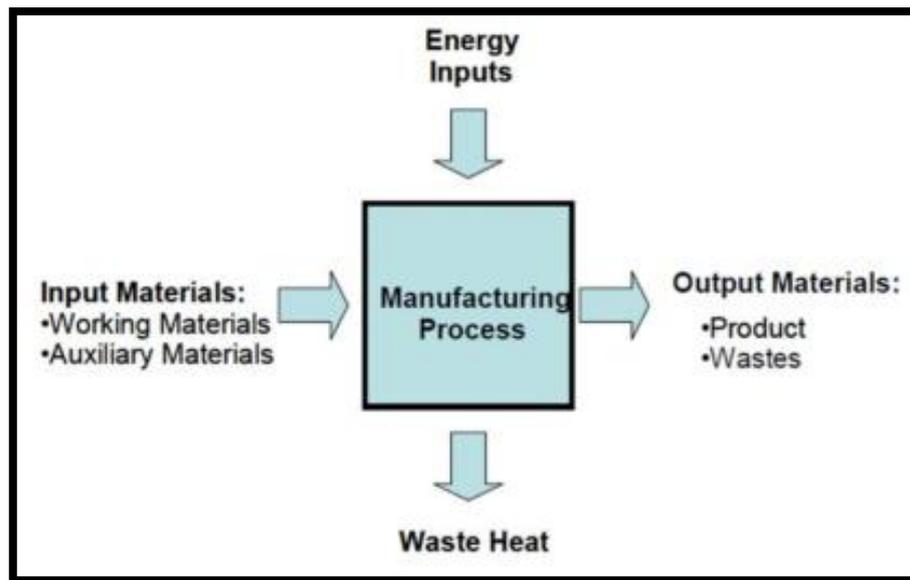
### **C. Mesin Perkakas**

Mesin perkakas adalah peralatan pabrik yang digunakan untuk memproduksi mesin, instrumen, alat, dan segala macam suku cadang. Setiap mesin perkakas mampu melakukan beberapa operasi mesin untuk menghasilkan bagian yang diperlukan dengan akurasi dan integritas permukaan tertentu. Selain itu, mesin perkakas juga digunakan khusus untuk membuat roda gigi mesin, dan bentuk tidak teratur lainnya (Widarto, 2008)

### **D. Konsumsi Energi Mesin Perkakas**

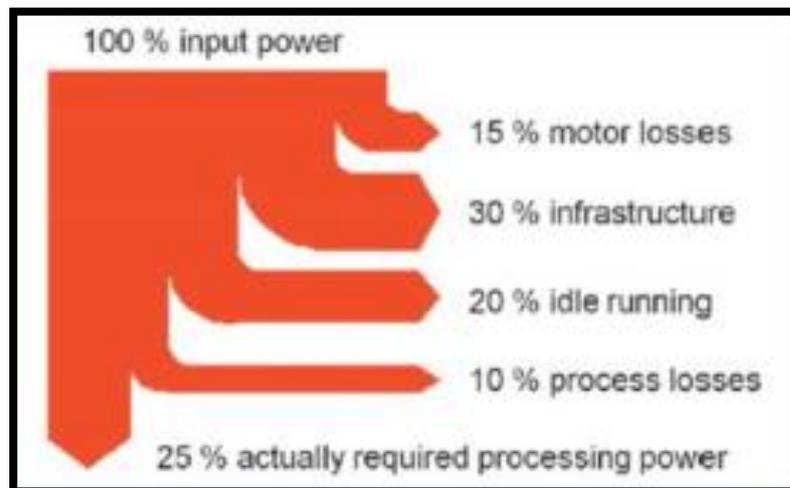
Proses manufaktur terdiri dari banyak jenis operasi salah satunya yaitu pemesinan (machining). Pemesinan dengan menggunakan mesin perkakas membutuhkan input energi dalam prosesnya (terutama energi listrik). Secara garis besar energi input tersebut ditransformasikan menjadi kerja berguna, beberapa dalam perwujudan bentuk komposisi produk, limbah serta panas buang (Gutwoski, 2004). Energi Input memerlukan bahan bakar dan menghasilkan emisi. Untuk Energi input listrik hal tersebut terjadi pada pembangkit energi. Diagram Alir Energi dalam proses manufaktur untuk pengerjaan material ditunjukkan pada Gambar 4 berikut ini.





Gambar 4. Diagram energi dan input output material proses manufaktur (Gutowski, 2006)

Pada Gambar 5 di bawah ini menunjukkan bahwa hanya sekitar 25% daya aktual dari 100% daya masukan (input power) yang diberikan dikonsumsi oleh mesin perkakas untuk melakukan pemotongan saat proses pemesinan berlangsung.



Gambar 5. Diagram alir konsumsi daya mesin perkakas (Ravel/bfk 2000).



Dalam penelitian yang dilakukan oleh Dahmus dan Gutowski (2004), menyatakan bahwa mesin perkakas dengan peningkatan level otomasi menunjukkan konsumsi energi dasar yang lebih tinggi sebagai hasil dari jumlah komponen tambahan terintegrasi pada mesin. Besarnya energi pemotongan spesifik yang dikonsumsi mesin perkakas moderen otomatis yaitu kurang dari 15% dari total energi yang dikonsumsi selama proses pemesinan. Hal tersebut menunjukkan bahwa konsumsi energi tidak hanya ditentukan oleh operasi pemotongan namun didominasi oleh komponen yang mengkonsumsi daya utama.

Sebagian besar energi dikonsumsi oleh Sistem penggerak (*drive system*). *Drive system* tersebut terdiri dari unit penggerak gerakan-grakan utama (*drive units main motions /spindles*), Unit penggerak pemakanan (*feed drive units*, Pahat (*tool*), *workpiece changing* dan *fixing units positioning drive units*. Oleh Karena itu , konsumsi energi selama waktu non-produksi juga dapat menjadi besar dan harus diminimalisir. Terdapat banyak variabel yang mempengaruhi konsumsi energi aktual seperti jenis proses manufaktur, parameter proses dan struktur/komponen dan kontrol dari mesin. Oleh sebab itu, peningkatan efisiensi energi mesin perkakas pada dasar yang luas memerlukan banyak pengukuran untuk bermacam-macam proses dan parameter

gan pemodelan yang benar untuk memprediksi konsumsi energi proses pemesinan yang spesifik ( Hermann, 2007).



Daya listrik (*electric power*) tidak hanya digunakan untuk menyuplai proses pemesinan dan seluruh unit transmisi tenaga dari motor ke unit pemotongan benda kerja, akan tetapi juga digunakan untuk seluruh peralatan pendukung lainnya seperti unit komputer (*computers and fans*), servo (*servos*), pompa cairan pendingin (*coolant pump*), pengunci spindel (*spindle key*), serta motor tanpa pembebanan (*unloaded motors*) (Skoczynski, 2013).

Selain peralatan pendukung tersebut terdapat juga parameter-parameter yang dapat mempengaruhi besarnya nilai konsumsi energi saat proses pemesinan berlangsung. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui parameter-parameter yang paling berpengaruh terhadap konsumsi energi mesin perkakas dengan berbagai teknik analisa. Menurut Kalla (2009), dalam thesisnya yang berjudul *Unit Process Life Cycle Inventory*, Kalla memberikan beberapa parameter yang paling mempengaruhi besarnya konsumsi energi dalam suatu proses pemesinan diantaranya yaitu :

1. Komposisi material benda kerja (*workpiece material properties*)
2. Gerak makan (*feed rate*)
3. Kecepatan pemotongan (*cutting speed*)
4. Diameter pahat (*cutter diameter*)
5. Waktu pemesinan frais (*milling time*)

Kedalaman pemotongan (*depth of cut*)

Cairan pendingin (*coolant*)



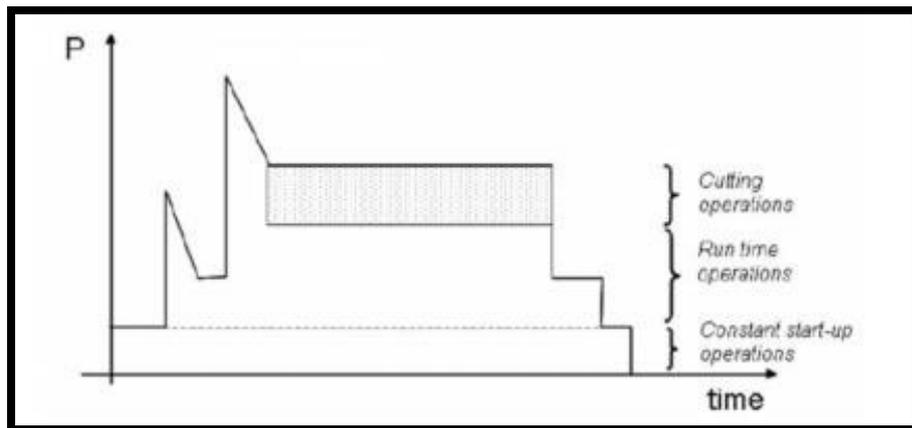
8. Pencekam benda kerja (Part holding fixture)
9. Keausan pahat (tool wear)
10. Geometri dan proses *set-up* (*geometry and set-up*)

Seluruh parameter tersebut dipertimbangkan dalam suatu proses pemesinan tunggal untuk mendapatkan parameter terbaik dengan konsumsi energi minimum sehingga biaya konsumsi energi listrik dapat diminimalisir. Untuk mengetahui besarnya konsumsi energi (Kalla, 2009), menerapkan metode *life cycle inventory* atau biasa juga disebut *life cycle analysis*. Metode tersebut merupakan metode perhitungan konsumsi energi dalam suatu proses pemesinan tunggal (*single machining process*) dalam satuan waktu siklus pemesinan. Energi dalam suatu proses pemesinan frais dibagi menjadi tiga yaitu *idle energy/constant start-up operations*, *basic energy/run time operations* dan *milling energy/material removal operations*. Maka energi total dapat dihitung dengan persamaan berikut: (Kalla, 2009)

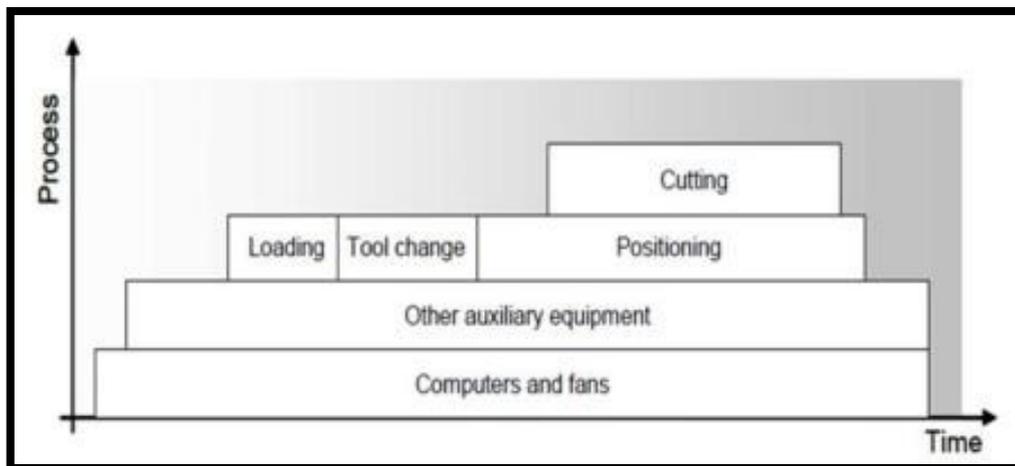
$$E_{total} = (P_{basic} \cdot t_{basic}) + (P_{idle} \cdot t_{idle}) + (P_{milling} \cdot t_{milling}) \dots \dots \dots (1)$$

Secara garis besar energi total yang merupakan penjumlahan dari ketiga jenis energi tersebut dapat digambarkan dalam sebuah grafik pengaruh daya pemesinan (*power*) terhadap waktu (*time*) oleh Gonzalez (2007), sebagai berikut :





Gambar 6. Grafik daya pemesinan terhadap waktu (Gonzales,2007).



Gambar 7. Grafik proses pemesinan terhadap waktu (Gonzales,2007).

### E. Temperatur Pemesinan

Mesin yang berputar ataupun berosilasi seperti turbin, motor bakar, mesin perkakas dan motor listrik adalah yang paling banyak digunakan di industri. Mesin-mesin tersebut mempunyai bagian yang biasanya menjadi sumber utama terjadinya getaran dan panas. Getaran yang berlebih dan panas yang tinggi bisa menjadi indikasi

nya kerusakan mesin. (Huda, 2010)



Penggunaan terus-menerus dari mesin perkakas selama proses produksi menyebabkan panas yang dihasilkan pada elemen yang bergerak, sehingga menyebabkan distorsi struktur mesin. Efek ini, yang dikenal sebagai *termal error*. Pada mesin perkakas efek yang tidak diinginkan dari peningkatan kecepatan mesin adalah peningkatan suhu dari mesin perkakas, seperti deformasi *thermoelastic* yang dihasilkan menyebabkan penurunan akurasi pada mesin perkakas. Penyimpangan yang disebabkan panas adalah salah satu masalah yang paling penting untuk akurasi mesin perkakas modern (Franke, 2011). Model termal sangat tergantung pada beban dan kondisi batas yang diterapkan. Pentingnya perilaku termal mesin perkakas telah menerima perhatian yang signifikan selama beberapa tahun terakhir, yang disebabkan oleh meningkatnya permintaan untuk produk-produk berkualitas tinggi termasuk persyaratan presisi tinggi. Hingga 70% dari penyimpangan benda kerja dalam industri pemotongan disebabkan oleh pemanasan dan panas dilatasi mesin perkakas, pahat dan benda kerja. (Clough, 2012)

#### F. Daya Pemesinan (*Machining Power*)

Gutowski et al menyatakan bahwa energi yang dibutuhkan dalam proses *Material removal* dapat sangat kecil dibandingkan dengan energi total untuk operasi mesin perkakas. Beberapa proses

pemesinan hanya dibutuhkan untuk pemotongan yang tipis dimana sebenarnya mesin memiliki kebutuhan daya yang besar. Sehingga



konsumsi energi selama non production time juga dapat menjadi besar dan harus diminimalisir (Rajemi, 2010). Daya yang dibutuhkan oleh mesin perkakas terbatas berdasarkan kemampuan pemotongan yang dapat dilakukan. Ketika banyak logam yang harus dibuang dari benda kerja maka peningkatan konsumsi daya mesin akan mencapai maksimal sehingga perlu diperhitungkan. Oleh karena itu pengetahuan kebutuhan daya operasi pemesinan sangat berguna dalam perancangan, pengoptimalan operasi pemesinan, serta pengembangan spesifikasi mesin perkakas (Machinery's Handbook, 2004).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Gutowski, Kebutuhan daya listrik,  $P$  untuk pemesinan dapat dihitung dengan persamaan 2 berikut :

$$P = P_0 + k \dot{V} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana,  $P$  adalah daya (W) yang dikonsumsi oleh proses pemesinan,  $P_0$  adalah daya (W) yang dikonsumsi oleh seluruh komponen mesin saat operasi pada *Zero Load / idle* (tidak melakukan pemotongan),  $k$  adalah kebutuhan energi spesifik ( $W_s/mm^3$ ) saat operasi pemotongan dan  $\dot{V}$  adalah *Material Removal Rate* atau MRR ( $mm^3/s$ ). Berdasarkan Persamaan (2), kebutuhan energi untuk proses pemesinan bergantung pada konsumsi daya dan energi spesifik dalam operasi pemotongan.

Daya total untuk pemesinan dibagi menjadi dua yaitu *idle power* ( $P_0$ ) dan *machining power* ( $k \dot{V}$ ). *Idle Power* adalah daya yang diperlukan



untuk fitur komponen mesin , sebagai contoh daya untuk menghidupkan komputer dan kipas, motor, coolant pump dll. Daya yang konsumsi mesin perkakas menggunakan motor listrik tiga Fasa dapat dihitung dengan persamaan (3).

$$P = V.I.\sqrt{3}..... (3)$$

Dimana  $V$ , adalah tegangan dan  $I$  adalah arus (A).

Energi yang dibutuhkan untuk proses pemesinan , (E) dapat disimpulkan dari konversi persamaan (2) (daya) kedalam persamaan 4 (energi) (Rajemi, 2010).

$$E = (P_0 + k \dot{V}). t ..... (4)$$

Dimana  $t$  adalah waktu pemesinan dalam satuan detik (s). Mesin perkakas mentransmisikan daya dari motor penggerak ke benda kerja dimana digunakan untuk memotong bahan. Persamaan 6 dapat digunakan untuk menghitung Konsumsi Daya motor dalam inch atau SI (*Machinery's Handbook*, 2004)

$$P_c = (K_p C Q W) ..... (5)$$

$$P_m = \frac{P_c}{E} = \frac{K_p C Q W}{E} ..... (6)$$

Dimana :

$P_c$  = Daya (*Power*) Pahat ; hp atau kW

$P_m$  = Daya (*Power*) Motor ; hp atau kW

$K_p$  = Daya konstan

$Q$  = *Metal removal rate* (MRR); inch<sup>3</sup>/min atau cm<sup>3</sup>/s

$C$  = Faktor pemakanan untuk daya konstan

$W$  = Faktor keausan pahat

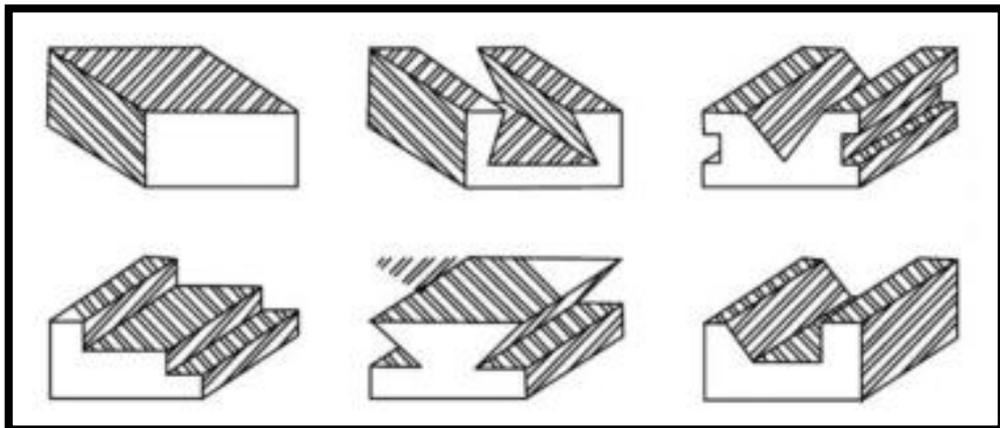
$E$  = Faktor efisiensi mesin perkakas



## G. Mesin Frais

### 1. Proses Frais

Mesin frais merupakan salah satu mesin perkakas yang digunakan untuk pengerjaan proses pemesinan. Secara umum mesin frais didefinisikan sebagai mesin perkakas yang berfungsi untuk pengerjaan datar atau perataan benda kerja. Proses frais (*milling*) adalah proses penyayatan benda kerja menggunakan alat potong dengan mata pisau jamak yang berputar. Mata pisau jamak tersebut berputar pada kecepatan tinggi melawan benda kerja dan membuang logam (geram) sangat cepat dengan banyak variasi sudut pemotongan. Proses penyayatan dengan gigi potong yang banyak tersebut dapat menghasilkan proses pemesinan yang lebih cepat, sehingga proses frais banyak di aplikasikan dalam proses produksi. Jenis komponen hasil pemesinan frais ditunjukkan pada gambar 8.

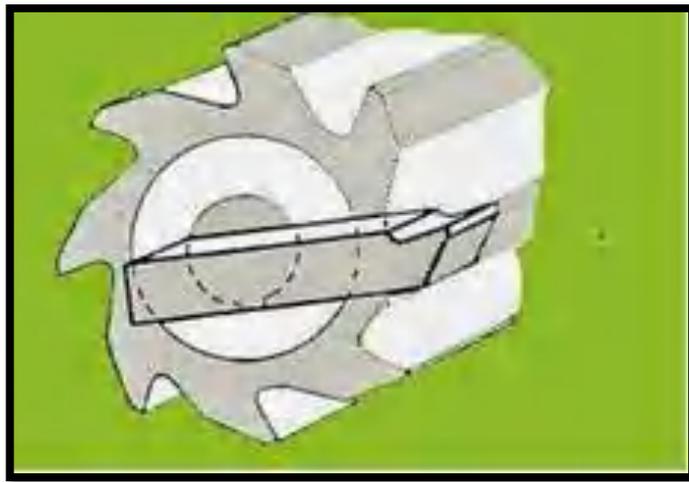


Gambar 8. Bentuk komponen hasil pemesinan frais (Singh, 2006)

Proses pemesinan dengan Mesin Frais merupakan proses penyayatan benda kerja yang sangat efektif, karena pisau frais



memiliki sisi potong jamak. Apabila dibandingkan dengan pisau pada mesin bubut, maka pisau frais analog dengan beberapa buah pisau bubut (Gambar 9). Pisau frais dapat melakukan penyayatan berbagai bentuk benda kerja, sesuai dengan pisau yang digunakan. Proses meratakan bidang, membuat alur lebar sampai dengan membentuk alur tipis bisa dilakukan oleh pisau frais (Widarto,2008)



Gambar 9. Pisau frais identik dengan beberapa pahat bubut  
(widarto, 2008)

## 2. Klasifikasi pada mesin Frais

### a. Berdasarkan posisi *cutter* terhadap benda kerja

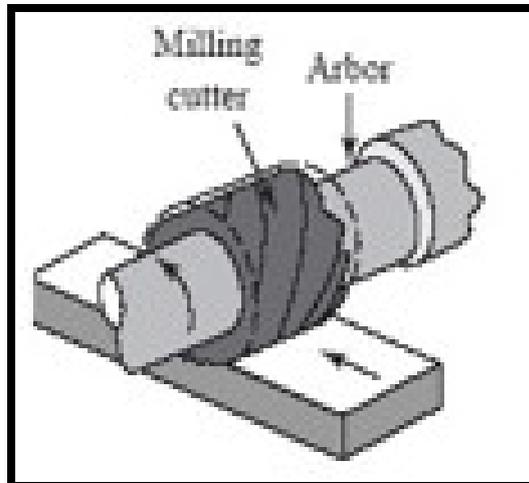
Operasi mesin frais dapat diklasifikasikan menjadi 3 yaitu  
(Widarto,2008) :

#### 1. Frais Periperal (*Slab Milling*)

Proses frais ini disebut juga *slab milling*, permukaan yang difrais dihasilkan oleh gigi pisau yang terletak pada permukaan luar badan alat potongnya. Sumbu dari putaran



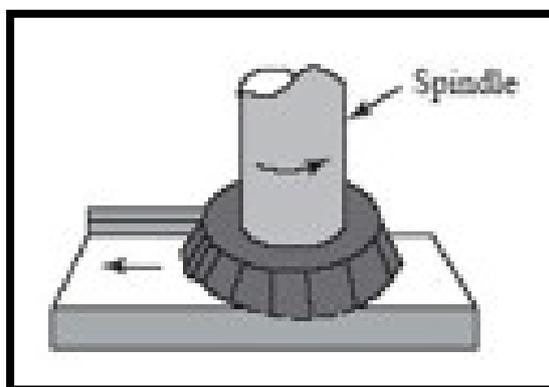
pisau biasanya pada bidang yang sejajar dengan permukaan benda kerja yang disayat.



Gambar 10. Proses Frais Periperal (widarto, 2008)

## 2. Frais Muka (*Face Milling*)

Pada frais muka, pisau dipasang pada spindel yang memiliki sumbu putar tegak lurus terhadap permukaan benda kerja. Permukaan hasil proses frais dihasilkan dari hasil penyayatan oleh ujung dan selubung pisau.

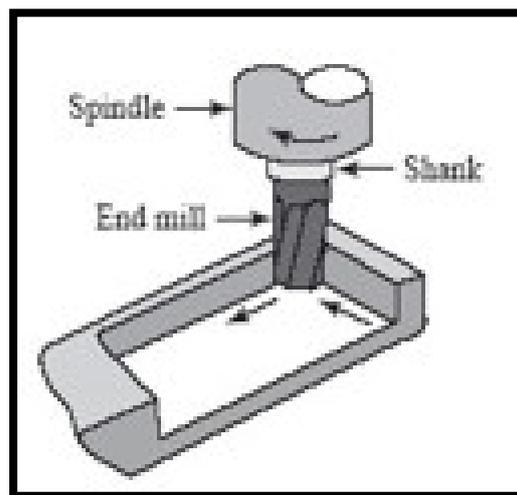


Gambar 11. Proses Frais Muka (widarto, 2008)



### 3. Frais Jari (*End Milling*)

Pisau pada proses frais jari 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.



Gambar 12. Proses Frais Jari (widarto, 2008)

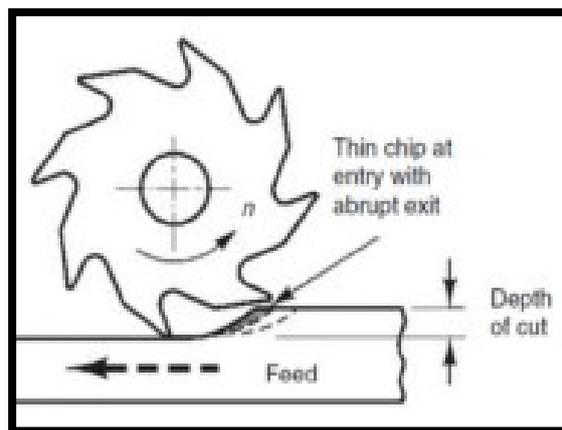
b. Berdasarkan rotasi *cutter* terhadap pergerakan benda kerja, *slab milling* diklasifikasikan menjadi (Youssef,2008):

#### 1. Frais Naik (*Up-Milling*)

Frais naik biasanya disebut frais konvensional (*conventional milling*). Gerak dari putaran pisau berlawanan arah terhadap gerak makan meja Mesin Frais. Sebagai contoh, pada proses frais naik apabila pisau berputar searah jarum jam, benda kerja disayat ke arah kanan. Penampang



melintang bentuk beram (*chips*) untuk proses frais naik adalah seperti koma diawali dengan ketebalan minimal kemudian menebal. Proses frais ini sesuai untuk Mesin Frais konvensional/manual, karena pada mesin konvensional *backlash* ulir transportirnya relatif besar dan tidak dilengkapi *backlash compensation*.



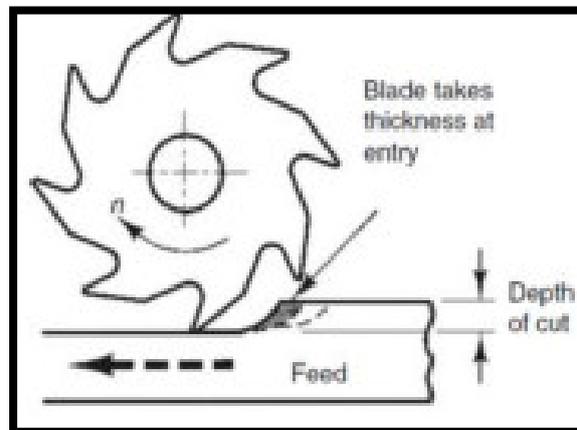
Gambar 13. Proses Frais naik (Youssef, 2008)

## 2. Frais Turun (*Down-Milling*)

Proses frais turun dinamakan juga *climb milling*. Arah dari putaran pisau sama dengan arah gerak makan meja Mesin Frais. Sebagai contoh jika pisau berputar berlawanan arah jarum jam, benda kerja disayat kekanan. Penampang melintang bentuk beram (*chips*) untuk proses frais naik adalah seperti koma diawali dengan ketebalan maksimal kemudian menipis. Proses frais ini sesuai untuk Mesin Frais CNC, karena pada mesin CNC gerakan meja dipandu oleh ulir dari bola baja, dan dilengkapi *backlash compensation*.



Untuk Mesin Frais konvensional tidak direkomendasikan melaksanakan proses frais turun, karena meja Mesin Frais akan tertekan dan ditarik oleh pisau.



Gambar 14. Proses Frais turun (Youssef,2008)

c. Berdasarkan jenis *column and knee* mesin frais.

Dilihat dari jenis *column and knee*, mesin frais dapat diklasifikasikan menjadi :

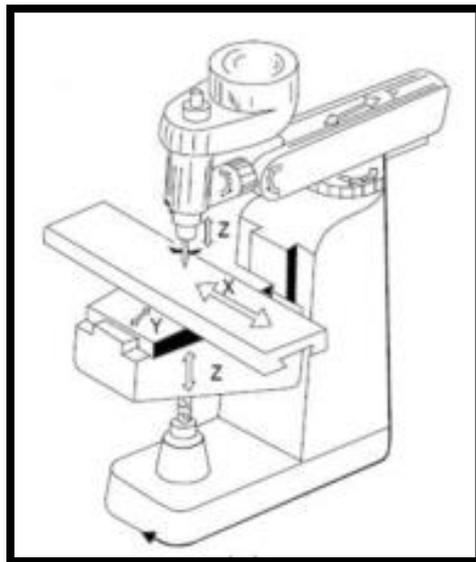
1. *Horizontal column and knee type milling machine*

Mesin frais horizontal adalah mesin yang dipasang dengan spindle yang terpasang horizontal. Mesin ini bertipe *knee*, dan pada umumnya bentuknya sama dengan mesin universal atau tipe *bed*. Kedua tipe mesin ini digunakan untuk frais datar dan frais alur. Mesin ini dibentuk sedemikian rupa sehingga meja kerja dapat digerakkan longitudinal maju mundur, secara manual maupun otomatis. Kedudukan sumbunya (*spindel*) kearah datar (*horizontal*).



Mesin frais horizontal, alasnya (*base*) dari besi tuang kelabu, yang mendukung seluruh komponen dan dibuat fondasi serta berfungsi untuk menampung cairan pendingin yang mengalir ke bawah, dimana di dalam *column* terdapat mesin pompa yang memompa cairan tersebut untuk kemudian disirkulasi lagi ke atas meja mesin.

Pada bagian *column* yang mendukung seluruh rangka terdapat kotak roda gigi kecepatan, motor dengan sabuk transmisi. *column* ini merupakan komponen utama mesin frais yang berbentuk *box* dimana lengan mesin (*overarm*) dan spindel tempat memasang poros arbor.



Gambar 15. Mesin Frais Horizontal (Singh,2006)

## 2. *Vertical column and knee type milling machine*

Sesuai dengan namanya, yang dimaksud vertical sebenarnya adalah poros spindelnya yang dikonstruksikan

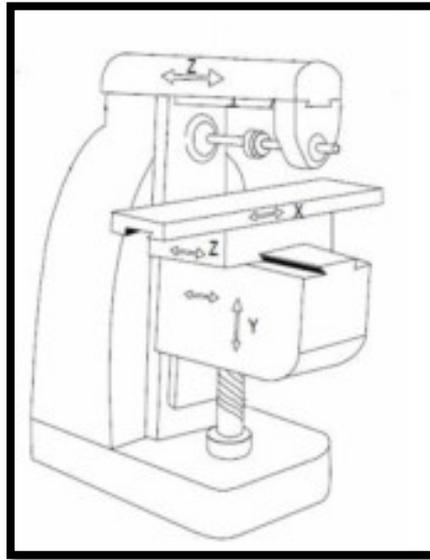


dalam posisi tegak. Semua bagian yang terdapat pada mesin frais tegak sama seperti pada mesin frais horizontal hanya saja posisi spindelnya tegak.

Kepala mesin yang tegak dapat diputar kekiri atau ke kanan serta dapat digerakkan naik, sehingga mesin dapat digunakan untuk membuat benda kerja yang tidak dapat dilakukan dengan mesin freis datar. Mesin freis jenis sangat sesuai untuk membuat bentuk alur ekor burung (*dovetail*), alur tanpa ujung (*blind slot*), dan alur T.

Mesin frais vertikal mempunyai spindle vertikal yang dipasang pada kepala tetap, kepala bergerak atau kepala yang bisa dimiringkan. Kombinasi dari dua tipe terakhir ini memungkinkan mendapatkan bermacam-macam sudut dengan sekali penyetelan dalam pengerjaan benda kerja. Proses pemesinannya biasa menggunakan pahat frais jari. Mesin frais vertikal ada 2 tipe yakni tipe *knee* dan tipe *bed*. Mesin ini dapat diubah-ubah sesuai dengan keperluan sama seperti halnya mesin frais universal karena sering digunakan untuk membuat *dies*.





Gambar 16. Mesin Frais Vertikal (Singh,2006)

- d. Mesin frais juga diklasifikasikan berdasarkan *bed type*, *planer-type milling machines* dan *Rotary-table milling machine*.
- e. Berdasarkan kendali operasinya Mesin Frais dapat dikendalikan secara mekanis (konvensional manual) dan ada yang dengan bantuan CNC. Mesin konvensional manual posisi spindelnya ada dua macam yaitu horisontal dan vertikal. Sedangkan Mesin Frais dengan kendali CNC hampir semuanya adalah mesin frais vertikal (Widarto, 2008).

### 3. Komponen Utama Mesin Frais

Berikut adalah beberapa komponen utama mesin frais *type Column and Knee*:

#### a. Base

Base merupakan pondasi yang menopang badan/tiang serta seluruh komponen mesin frais. Pada beberapa mesin, base memiliki rongga sebagai tempat fluida pemotongan.



b. *Column* (Tiang)

*Column* merupakan dudukan utama atau badan mesin dimana komponen mesin frais yang terpasang secara vertikal dari *base* sekaligus rumah dari mekanisme penggerak untuk *spindle* dan *table feed*. *Column* membentuk bagian utama dari mesin frais, memberikan dukungan untuk bagian lain seperti *knee*, *sadle* dan meja.

c. *Knee*

Merupakan bagian mesin untuk menopang / menahan meja yang memiliki mekanisme gerak pemakanan (*feed*) mesin. *Knee* terpasang di depan *Column* dan dirancang untuk dapat dipindahkan ke atas atau bawah dengan cara digeser melalui sebuah sekrup.

d. *Saddle*

*Saddle* terletak diatas *knee* dan dapat bergeser 90° dari *column* (tiang) yang berfungsi sebagai jalur gerak meja.

e. *Table* (Meja)

Meja melekat di bagian atas *saddle*. Meja dapat dipindahkan dari kiri ke kanan, maju dan mundur. Pada mesin frais universal, meja juga dapat berputar 450 ke kiri atau kanan. Meja digunakan untuk memegang benda kerja saat sedang dilakukan proses pemesinan. Benda kerja dapat dijepit langsung ke permukaan meja atau dengan menggunakan perangkat lain yang telah



melekat pada meja. Pada permukaan meja ada tee-slot yang digunakan untuk menjepit perangkat penggenggam benda kerja, seperti *fixtures*, kepala pembagi dll. Meja terbuat dari besi cor.

f. *Spindel*

*Spindle* digunakan untuk menahan, dan mendorong pahat atau benda kerja serta memiliki kekakuan, akurasi rotasi, dan ketahanan aus tingkat tinggi. Baja karbon sedang mengandung 0,5% C digunakan untuk membuat spindle dengan kekerasan permukaan sekitar 40 *Rockwell* (HRC). Spindle biasanya dibuat berongga dan dilengkapi dengan internal lancip di ujung untuk mengakomodasi pusat dari pahat.

g. Motor Penggerak

Motor berfungsi menggerakkan sistem penggerak seperti *spindle* utama, meja (*feeding*) dan pompa pendingin (*cooling*). Pada mesin frais manual sedikitnya terdapat 3 buah motor, yaitu :

1. Motor spindle utama (*main motor spindle*)
2. Motor gerakan pemakanan (*feeding*)
3. Motor pendingin (*cooling*).

Sebagian besar motor mesin perkakas beroperasi pada tiga fase standar 50 Hz, 400/440 V suplai AC. Motor listrik yang digunakan pada mesin perkakas memiliki kriteria yang sesuai dengan fungsi serta kebutuhan sistem mesin perkakas. Kriteria tersebut



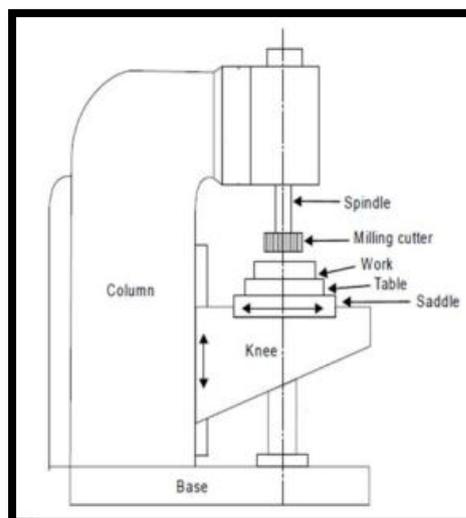
meliputi *power supply* yang digunakan (AC/DC), karakteristik kelistrikan motor, fitur mekanis yang meliputi pemasangan, *transmisi drive*, tingkat kebisingan, jenis pendinginan, dan kapasitas *Overload*.

h. Transmisi

Merupakan bagian mesin yang menghubungkan motor penggerak dengan yang digerakkan. Berdasarkan bagian yang digerakkan dibedakan menjadi dua macam yaitu transmisi *spindle* utama dan Transmisi *feeding*. Berdasarkan sistem transmisinya dibedakan menjadi dua macam yaitu transmisi *gear box* dan Transmisi *v-belt*.

i. Sistem Kendali

Merupakan pengatur dari bagian – bagian mesin yang bergerak. Ada dua sistem Panel kendali yaitu mekanik dan elektrik



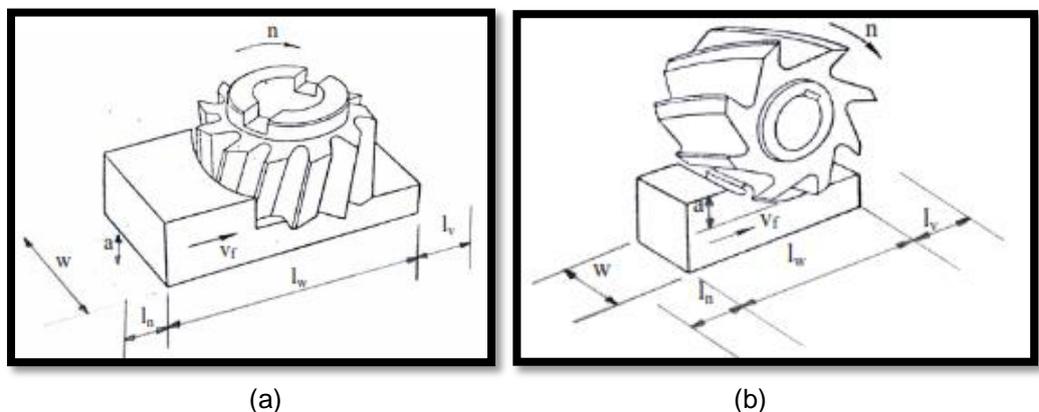
Gambar 17. Komponen utama mesin frais *column and knee*

(Singh, 2006)

#### 4. Paramater pada Proses Frais

Maksud dari parameter yang dapat diatur adalah parameter yang dapat langsung diatur oleh operator mesin ketika sedang mengoperasikan Mesin Frais. Seperti pada Mesin Bubut, maka parameter yang dimaksud adalah putaran spindel ( $n$ ), gerak makan ( $f$ ), dan kedalaman potong ( $a$ ). Putaran spindel bisa langsung diatur dengan cara mengubah posisi handle pengatur putaran mesin. Gerak makan bisa diatur dengan cara mengatur handle gerak makan sesuai dengan tabel  $f$  yang ada di mesin. Gerak makan pada proses frais ada dua macam yaitu gerak makan per gigi ( $\text{mm/gigi}$ ), dan gerak makan per putaran ( $\text{mm/putaran}$ ). Kedalaman potong diatur dengan cara menaikkan benda kerja, atau dengan cara menurunkan pisau.

Elemen dasar proses frais hampir sama dengan elemen dasar proses bubut. Elemen diturunkan berdasarkan rumus dan Gambar 18 berikut ini.



Gambar 18. (a) Skematis Proses Frais Vertikal; (b) Skematis Proses Frais Horizontal (Widarto, 2008)

Keterangan :

o Benda Kerja :

- $W$  = lebar pemotongan (mm)
- $l_w$  = Panjang pemotongan (mm)
- $l_t = l_v + l_w + l_n$  (mm)
- $a$  = kedalaman potong (mm)

o Pisau Frais :

- $d$  = diameter pisau (mm)
- $z$  = jumlah gigi/mata potong
- $X_r$  = sudut potong utama ( $90^0$ ) untuk frais selubung

o Mesin Frais

- $n$  = putaran poros utama (rad/menit)
- $V_f$  = Kecepatan potong (mm/rev)

Putaran spindel ( $n$ ) ditentukan berdasarkan kecepatan potong. Kecepatan potong ditentukan oleh kombinasi material pisau dan material benda kerja. Kecepatan potong adalah jarak yang ditempuh oleh satu titik (dalam satuan meter) pada selubung pisau dalam waktu satu menit. Rumus kecepatan potong identik dengan rumus kecepatan potong pada mesin bubut. Pada proses frais besarnya diameter yang digunakan adalah diameter pisau. Rumus kecepatan potong (Widarto,2008) :

$$V_C = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana :

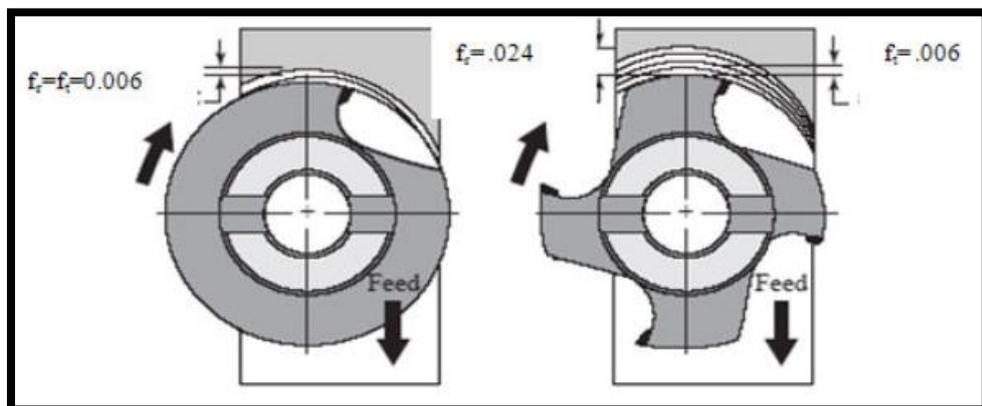
- $V_c$  = Kecepatan Potong (m/menit)
- $d$  = diameter pisau (mm)
- $n$  = putaran mesin (rpm)



Setelah kecepatan potong diketahui, maka gerak makan harus ditentukan. Gerak makan ( $f$ ) adalah jarak lurus yang ditempuh pisau dengan laju konstan relatif terhadap benda kerja dalam satuan waktu, biasanya satuan gerak makan yang digunakan adalah mm/menit.

$$f_z = \frac{V_f}{z.n} \dots\dots\dots (8)$$

Kedalaman potong ( $a$ ) ditentukan berdasarkan selisih tebal benda kerja awal terhadap tebal benda kerja akhir. Untuk kedalaman potong yang relatif besar diperlukan perhitungan daya potong yang diperlukan untuk proses penyayatan. Apabila daya potong yang diperlukan masih lebih rendah dari daya yang disediakan oleh mesin (terutama motor listrik), maka kedalaman potong yang telah ditentukan bisa digunakan.



Gambar 19. Gambar jalur pisau frais menunjukkan perbedaan antara gerak makan per gigi ( $f_t$ ) dan gerak makan per putaran ( $f_r$ ) (Widarto, 2008)

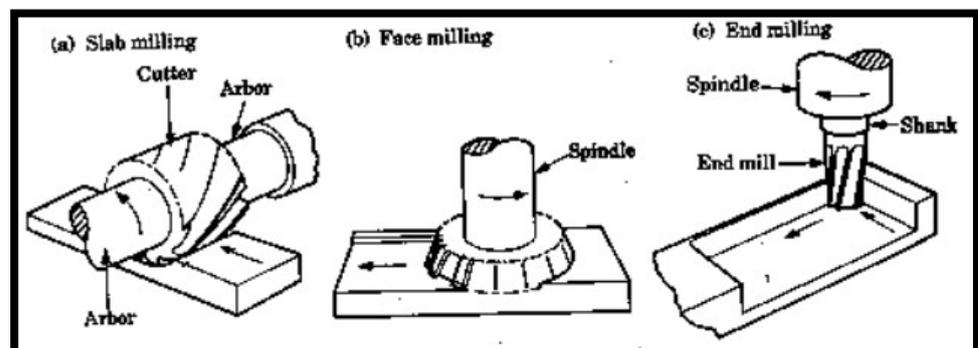


## 5. Pengerjaan Benda Kerja dengan Mesin Frais

Beberapa variasi bentuk benda kerja bisa dikerjakan dengan Mesin Frais. Perencanaan proses frais dibahas satu kesatuan dengan beberapa pengerjaan proses frais. Mesin frais umumnya digunakan untuk memproses benda benda balok. namun dalam hal lain dapat digunakan untuk memproses bentuk silindris. Berikut ini adalah beberapa variasi bentuk benda kerja yang bisa dikerjakan dengan menggunakan Mesin frais (Kristo,2004):

### a. Frais Datar (*face milling*)

Frais datar merupakan adalah proses untuk mengurangi permukaan sebuah benda kerja untuk mendapatkan ukuran ketebalan tertentu. Pada mesin frais horizontal, umumnya digunakan pisau frais mantel (*slab mill*) sedangkan pada mesin frais vertikal untuk memfrais permukaan yang lebar digunakan *face mill*, walaupun terkadang menggunakan end mill (pisau ujung / pisau jari) dan pisau keong (*shell end mill*).



Gambar 20. Proses Kerja (a). Slab Milling;(b) Face Milling; (c) EndMilling (Widarto, 2008)

b. Frais Bertingkat (*Shoulder Milling*)

Proses pengefraisan bertingkat merupakan proses pengefraisan suatu bidang berundak menyerupai tangga dengan ukuran tertentu.

c. Frais Bidang Miring (*Inclination Milling*)

Merupakan proses untuk membuat bidang dengan kemiringan tertentu, ada beberapa proses yang dapat dilakukan, yang pertama dengan memiringkan spindle dan yang kedua dengan cara memiringkan benda kerja secara langsung atau dengan bantuan *jig/fixture*/dudukan miring atau dengan memiringkan ragum yang dapat disetel kemiringannya



Gambar 21. Proses Kerja Frais Miring  
(sumber : <http://machiningtool.blogspot.com>)

d. Proses Pelubangan dan Pengetapan (*Drilling and Tapping*)

Dikarenakan mesin frais berbentuk menyerupai mesin bor koordinat sehingga untuk pengeboran dan pengetapan dapat dilakukan langsung di mesin frais, sehingga akan mendapatkan



hasil yang presisi. alat bantu untuk pengaturan jarak lubang dapat dengan bantuan *dowel pin* atau *centerfix*



Gambar 22. Proses Pelubangan menggunakan mesin frais  
(sumber : <http://machiningtool.blogspot.com>)

e. Proses Frais Radius

Pada proses ini terdapat beberapa bentuk radius yaitu berbentuk cekungan di tengah dan cekungan di siku dalam atau disebut radius dalam dan bentuk radius di siku luar benda kerja. pembuatan profil radius dapat dilakukan dengan menggunakan pisau khusus radius dengan ukuran tertentu. untuk radius luar dengan ukuran luar yang besar hanya bisa dilakukan dengan bantuan meja putar (rotary table)



Gambar 23. Proses Frais Radius  
(sumber : <http://machiningtool.blogspot.com>)



f. Proses Frais Profil Roda Gigi (*gear cutting*)

Roda gigi merupakan batang bulat yang mempunyai gigi-gigi hasil dari pemotongan. Roda gigi dipasangkan pada sebuah poros yang akan mentransmisikan gerak tersebut kepada poros kedua dan selanjutnya. Roda gigi dapat pula digunakan untuk merubah arah putaran/gerakan, meningkatkan kecepatan artau menurunkan kecepatan.

Untuk bentuk profil roda gigi menggunakan pisau khusus roda gigi atau sering disebut pisau frais modul. selain dengan pisau frais modul pembuatan roda gigi biasanya dengan bantuan kepala pembagi (*dividing head*)

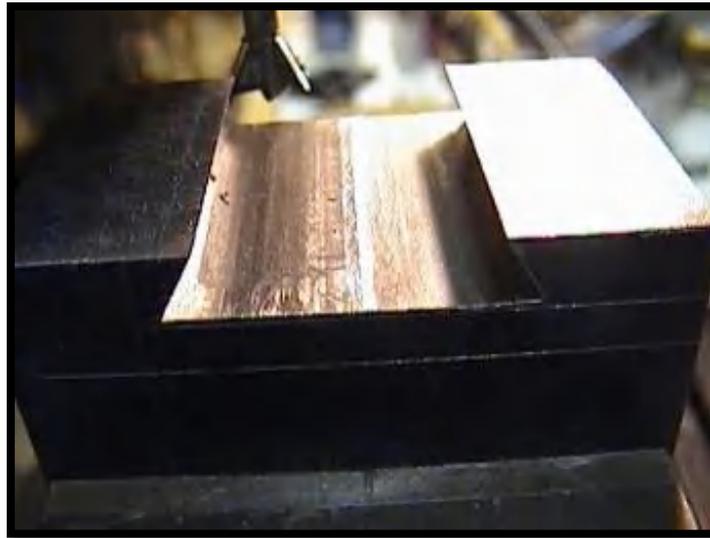


Gambar 24. Proses Frais Roda Gigi  
(sumber : <http://machiningtool.blogspot.com>)

g. Frais alur ekor burung (*dove tail cutting*)

Pada pengefraisan alur ekor burung dapat dilakukan dengan pisau frais ekor burung, alur ekor burung sanyat banyak digunakan pada komponen-komponen pemesinan.

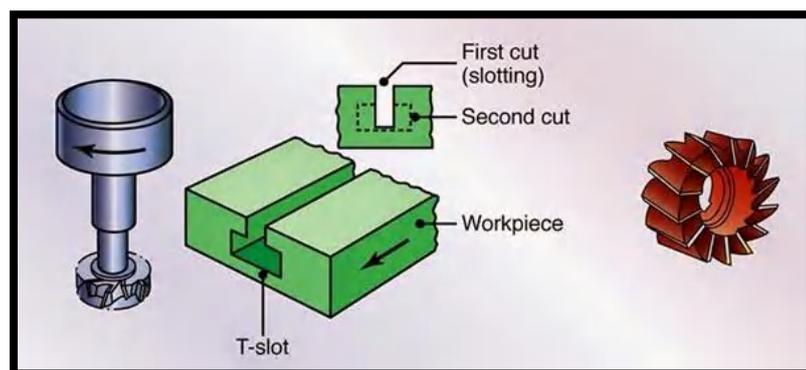




Gambar 25. Proses Frais Alur Ekor Burung  
(sumber : <http://machiningtool.blogspot.com>)

h. Frais alur T (*Tee Slot cutting*)

Alur T banyak dipakai pada komponen komponen pemesinan, pembuatan alur ini dapat dilakukan dengan pisau frais alur T.



Gambar 26. Proses Frais Alur T  
(sumber : <http://machiningtool.blogspot.com>)



## H. Pisau Frais

### 1. Klasifikasi Pisau Frais

Untuk melaksanakan berbagai operasi pengerjaan benda kerja pada mesin frais digunakan suatu alat potong yang sering disebut sebagai pisau frais atau *milling cutter*. Tidak seperti pahat pada mesin bubut atau mesin sekrap yang memiliki satu mata pemotong, pisau frais pada umumnya memiliki mata pemotong jamak. 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 benda kerja dan beram atau tatal hasil penyayatan akan keluar dari pisau frais melalui galur.

Pisau frais biasanya mempunyai satu gigi atau lebih, di mana pisau frais yang memiliki 2, 3 atau 4 gigi merupakan pisau frais yang banyak digunakan. Pisau frais dengan gigi lebih banyak akan menyayat benda kerja lebih cepat dibandingkan pisau frais dengan gigi lebih sedikit. Bentuk galur atau *flute* pisau frais biasanya dibuat berbentuk heliks, karena jika galur pisau frais dibuat lurus, maka ketika pisau frais digunakan untuk menyayat benda kerja pada satu saat seluruh panjang gigi akan menumbuk benda kerja. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya getaran, memperkecil ketelitian

pengfraisan dan permukaan hasil penyayatan yang kasar. Oleh karena itu, dengan membuat galur pisau frais berbentuk heliks akan

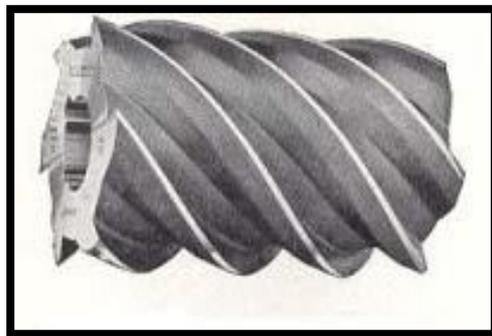


membuat gigi pisau frais menyayat benda kerja secara bertahap sehingga memperkecil getaran dan meningkatkan ketelitian.

Pisau frais umumnya berbentuk bulat panjang atau bulat pipih yang disekelilingnya terdapat gigi-gigi pemotong. Diameter pisau frais diukur antara puncak gigi pemotong yang satu dengan yang lainnya yang letaknya bersebrangan. Tebal atau lebar pisau frais diukur pada permukaan yang sejajar dengan sumbu pisau frais. Ukuran pisau frais biasanya dicantumkan pada bagian mukanya yang menunjukkan ukuran diameter pisau, tebal pisau dan diameter lubangnya. Berikut diuraikan beberapa jenis pisau frais yang sering digunakan di perusahaan manufaktur:

a. Pisau Mantel (*Helical Milling Cutter*)

Pisau jenis ini dipakai pada mesin frais horizontal. Biasanya digunakan untuk pemakanan permukaan kasar (*Roughing*) dan lebar.



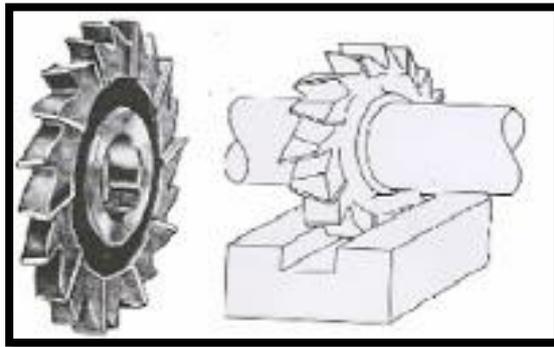
Gambar 27. Pisau Frais Mantel

(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)



b. Pisau Alur (*Slot Milling Cutter*)

Pisau alur berfungsi untuk membuat alur pada bidang permukaan benda kerja. Jenis pisau ini ada beberapa macam yang penggunaannya disesuaikan dengan kebutuhan. Dipakai untuk mesin frais horisontal.



Gambar 28. Pisau Frais Alur

(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)

c. Pisau Modul atau Pisau Frais Gigi (*Gear Cutter*)

Pisau frais gigi ini digunakan untuk membuat roda gigi



Gambar 29. Pisau Frais Gigi

(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)



d. Cutter Radius Cekung (*Convex Cutter*)

Pisau jenis ini digunakan untuk membuat benda kerja yang bentuknya memiliki radius dalam (cekung).



Gambar 30. Pisau Frais Radius Cekung  
(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)

e. Cutter Radius Cembung (*Concave Cutter*)

Cutter ini dipakai untuk membuat benda kerja yang bentuknya memiliki radius luar (cembung)

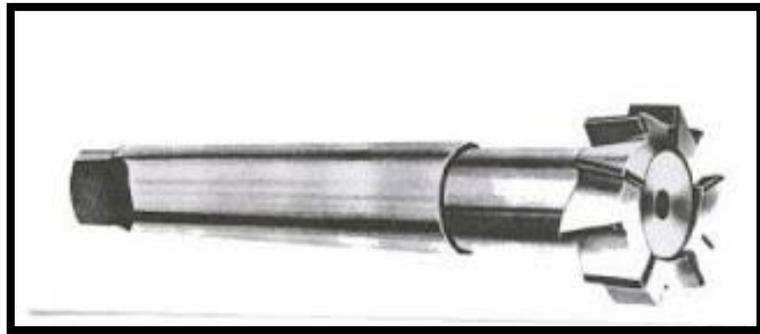


Gambar 31. Pisau Frais Radius Cembung  
(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)



f. Cutter Alur T (T Slot Cutter)

Cutter ini dipakai untuk membuat alur berbentuk “T” seperti halnya pada meja mesin frais.



Gambar 32. Pisau Frais Alur T

(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)

g. Cutter Ekor burung atau pisau frais sudut

Pisau jenis ini digunakan untuk membuat alur berbentuk sudut yang hasilnya sesuai dengan sudut pisau yang digunakan. Pisau jenis ini memiliki sudut-sudut yang berbeda di antaranya: 30°, 45°, 50°, 60°, 70°, dan 80°.



Gambar 33. Pisau Frais Ekor Burung atau Frais Sudut

(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)



h. Pisau Jari (*Endmill Cutter*)

Ukuran pisau jenis ini sangat bervariasi mulai ukuran kecil sampai ukuran besar. Cutter ini biasanya dipakai untuk membuat alur pada bidang datar atau pasak dan jenis pisau ini pada umumnya dipasang pada posisi tegak (mesin frais vertikal).

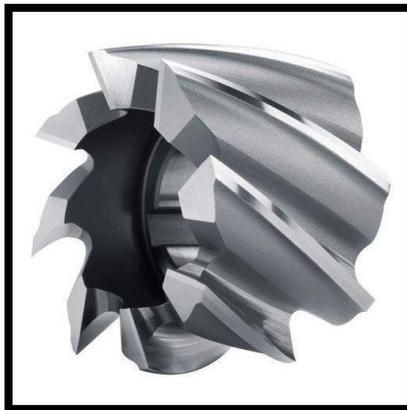


Gambar 34. Pisau Jari

(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)

i. Pisau Frais Muka dan Sisi (*Shell Endmill Cutter*)

Jenis pisau ini memiliki mata sayat di muka dan di sisi, dapat digunakan untuk mengefrais bidang rata dan bertingkat.



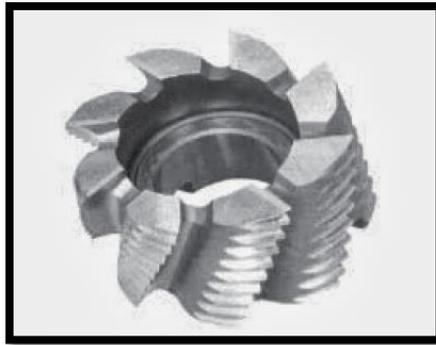
Gambar 35. Pisau Frais Muka dan Sisi

(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)



j. Pisau Frais Pengasaran (*Heavy Duty Endmill Cutter*)

Pisau jenis ini mempunyai satu ciri khas yang berbeda dengan cutter yang lain. Pada sisinya berbentuk alur helik yang dapat digunakan untuk menyayat benda kerja dari sisi potong cutter, sehingga cutter ini mampu melakukan penyayatan yang cukup besar.

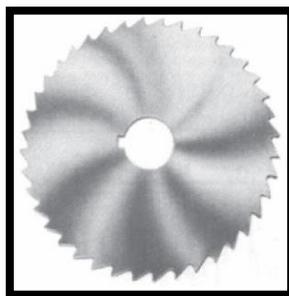


Gambar 36. Pisau Frais Pengasaran

(sumber : <http://teknikpemesinan01.blogspot.com>)

k. Pisau Frais Gergaji (*Slitting saw*)

Pisau frais jenis ini digunakan untuk memotong atau membelah benda kerja. Selain itu, juga dapat digunakan untuk membuat alur yang memiliki ukuran lebar kecil.



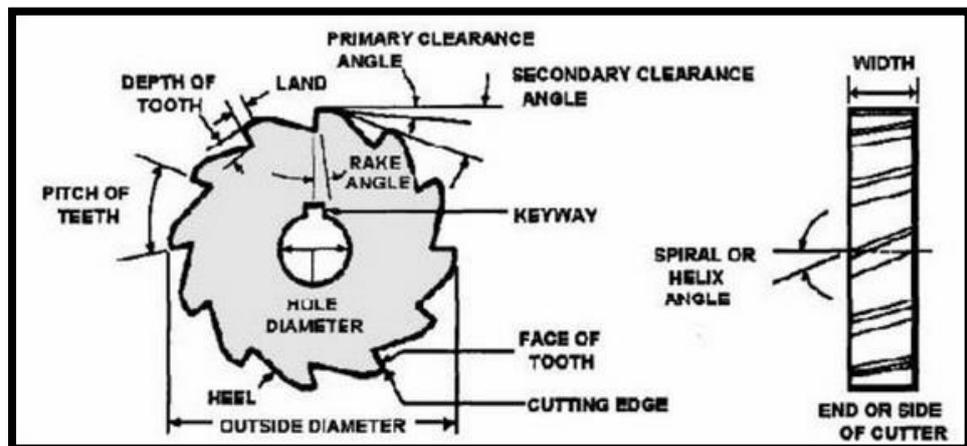
Gambar 37. Pisau Frais Gergaji

(sumber : <http://pusat-lingkaran.blogspot.com>)



## 2. Geometri Pisau Frais

Pada dasarnya bentuk pisau frais adalah identik dengan pisau bubut. Dengan demikian nama sudut atau istilah yang digunakan juga sama dengan pisau bubut. Nama-nama bagian pisau frais rata dan geometri gigi pisau frais rata ditunjukkan pada gambar 38. Pisau frais memiliki bentuk yang rumit karena terdiri dari banyak gigi potong, karena proses pemotongannya adalah proses pemotongan dengan mata potong majemuk. Jumlah gigi minimal adalah dua buah pada pisau frais ujung (widarto,2008).



Gambar 38. Bentuk dan nama-nama bagian pisau frais datar  
(widarto,2008)

Pisau frais mempunyai bagian-bagian yang masing-masing memiliki nama yang telah diidentifikasi. Nama bagian-bagian pisau frais ini adalah umum untuk semua jenis pisau frais.



a. Jarak Bagi (*Pitch*)

Jarak bagi atau pitch merupakan jarak angular antara gigi-gigi yang berdekatan. Jarak bagi ditentukan oleh jumlah atau banyaknya gigi pada sebuah pisau frais.

b. Muka Gigi (*Face of tooth*)

Muka gigi adalah permukaan bagian depan gigi yang membentuk tepi pemotong.

c. Tepi Pemotong (*Cutting Edge*)

Tepi pemotong merupakan sudut pada masing-masing gigi yang melaksanakan penyayatan dari sebuah pisau frais.

d. Pendarat (*Land*)

Pendarat atau land adalah permukaan sempit yang letaknya berada di belakang tepi pemotong dari masing-masing gigi pisau frais.

e. Sudut tatal (*Rake Angle*)

Sudut tatal atau rake angle adalah sudut yang terbentuk antara muka gigi dan garis tengah pisau. Sudut tatal menetapkan tepi pemotong (*cutting edge*) dan memberikan jalan kecil untuk tatal (beram) yang terpotong dari benda kerja.

f. Sudut Bebas Primer (*Primary clearance angle*)

Sudut bebas primer merupakan sudut kemiringan dari land masing-masing gigi. Sudut ini diukur dari garis singgung ke garis tengah pisau pada tepi pemotong. Dengan adanya sudut bebas



primer ini akan mencegah gigi-gigi pisau frais menggesek benda kerja setelah melakukan penyayatan.

g. Sudut Bebas Sekunder (*Secondary clearance angle*)

Sudut bebas sekunder merupakan sudut yang menetapkan land dari masing-masing gigi dan memberikan kebebasan tambahan untuk laluan cairan pendingin dan tatal atau beram.

h. Sudut Heliks (*Helix Angle*)

Sudut heliks merupakan sudut yang terbentuk antara gigi pemotong dengan sumbu utama pisau frais. Sudut heliks yang besar digunakan untuk mengefrais material yang lunak sedangkan sudut heliks yang lebih kecil dipakai untuk mengefrais material yang keras.

i. Alur Pasak (*Keyway*)

Alur pasak terdapat pada semua jenis pisau frais yang pemasangannya pada arbor. Alur pasak merupakan tempat kedudukan pasak yang akan mengikat atau mengunci pisau frais pada arbor.

j. Diameter Lubang (*Hole Diameter*)

Diameter lubang pisau frais menentukan ukuran diameter arbor di mana pisau frais akan dipasang. Pada lubang pisau frais ini terdapat alur pasak.



### 3. Material Pisau Frais

Dalam proses permesinan pahat memegang peranan penting dalam pembubutan. Pemilihan material yang benar akan memperpanjang umur pahat dan menentukan hasil suatu proses. Untuk membuat bearing tentu membutuhkan jenis pahat yang berbeda dengan membuat shaft pompa sentrifugal dan lain sebagainya. Oleh karena itu dikenal berbagai material penyusun pahat.

Proses pembentukan geram dengan cara permesinan berlangsung dengan mempertemukan dua jenis material. Untuk menjamin kelangsungan proses ini maka jelas diperlukan material pahat yang lebih unggul daripada material benda kerja. Keunggulan tersebut dilihat dari segi (Rochim, 1993) :

- a. Kekerasan: Melebihi kekerasan benda kerja tidak saja pada temperatur ruang melainkan juga pada temperatur tinggi saat proses pembentukan gera berlangsung.
- b. Keuletan: Cukup untuk menahan beban kejut yang terjadi sewaktu permesinan dengan interupsi maupun sewaktu memotong benda kerja yang mengandung partikel/bagian yang keras.
- c. Ketahanan beban kejut termal: Keunggulan yang dibutuhkan jika terjadi perubahan temperatur yang cukup besar secara berkala.



- d. Sifat adhesi yang rendah: Sifat ini mengurangi afinitas benda kerja terhadap pahat, mengurangi laju keausan, serta penurunan gaya pemotongan.
- e. Daya larut elemen / komponen material pahat yang rendah: Kemampuan yang dibutuhkan demi memperkecil keausan akibat mekanisme difusi.

Kekerasan yang rendah dan daya adhesi yang tinggi tidak diinginkan sebab mata potong akan terdeformasi, terjadi keausan flank dan crater yang besar. Keuletan yang rendah serta ketahanan beban kejut termal yang kecil mengakibatkan rusaknya mata potong maupun retak mikro yang menimbulkan kerusakan fatal.

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

Karbida merupakan material yang umum digunakan sebagai bahan pembuat alat potong pada industri-industri sekarang ini. 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). Karbida merupakan material yang kaku di mana pisau frais karbida dapat dipakai untuk menyayat benda kerja yang terbuat dari material yang keras. 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 mengefrais 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).

1. Titanium Nitrit(TiN)

Dengan menggunakan pelapis Titanium Nitride pada pisau frais, maka umur pisau frais tersebut bisa menjadi lebih panjang. Pisau frais dengan pelapis TiN ini bisa digunakan untuk mengefrais benda kerja yang terbuat dari baja paduan dan yang terbuat dari material aluminium. Suhu kerja maksimum pisau frais dengan pelapis TiN ini adalah 1100° F. Pelapis TiN mempunyai warna emas.





Gambar 39. Pisau Frais dengan lapisan Titanium Nitrit  
(sumber : <http://pusat-lingkaran.blogspot.com>)

## 2. Titanium Carbonitride (TiCN)

Titanium Carbonitride adalah pelapis yang memiliki sifat tahan aus yang lebih baik daripada Titanium Nitride (TiN). Pisau frais dengan pelapis Titanium Carbonitride cocok digunakan untuk mengefrais benda kerja yang terbuat dari bahan besi cor, stainless steel, dan aluminium. Suhu kerja maksimum pisau frais dengan pelapis TiCN sekitar 750° F. Pelapis Titanium Carbonitride memiliki warna abu-abu kebiruan.



Gambar 40. Pisau Frais dengan lapisan *Titanium Carbonitride*  
(sumber : <http://pusat-lingkaran.blogspot.com>)



### 3. Titanium Aluminum Nitride (TiAlN)

Titanium Aluminum Nitride merupakan pelapis pisau frais yang baik digunakan untuk pengefraisan pada kecepatan yang sangat tinggi dan suhu kerja yang tinggi. Pisau frais dengan pelapis TiAlN cocok dipakai untuk mengefrais benda kerja yang terbuat dari besi cor, stainless steel, nikel paduan, dan titanium. Tetapi tidak cocok digunakan untuk mengefrais benda kerja dari aluminium. Pisau frais dengan pelapis TiAlN memiliki suhu kerja maksimum sekitar 1470° F, dan memiliki warna abu-abu ungu.



Gambar 41. Pisau Frais dengan lapisan *Aluminum Nitride*

(sumber : <http://pusat-lingkarang.blogspot.com>)

### 4. Kerusakan dan Keausan Pisau

Selama proses pembentukan geram berlangsung, pahat dapat mengalami kegagalan dari fungsinya karena berbagai sebab antara lain (Rochim, 1993) :



- Keausan yang secara bertahap membesar (tumbuh) pada bidang aktif pahat.
- Retak yang menjalar sehingga menimbulkan patahan pada mata potong pahat.
- Deformasi plastik yang akan mengubah bentuk/geometri pahat.

Jenis kerusakan yang terakhir diatas jelas disebabkan tekanan temperatur yang tinggi pada bidang aktif pahat dimana kekerasan dan kekuatan material pahat akan turun bersama dengan naiknya temperatur. Keausan dapat terjadi pada bidang geram dan /

atau pada bidang utama pahat. Karena bentuk dan letaknya yang spesifik, keausan pada bidang geram disebut dengan keausan kawah (*crater wear*) dan keausan pada bidang utama dinamakan sebagai keausan tepi (*flank wear*).

a. Keausan Kawah (*Crater Wear*)

Crater merupakan keausan pahat yang berbentuk seperti kawah atau lubang, lokasinya dimulai dari beberapa jarak dari tepi potong sampai area kontak geram. Jika keausan ini semakin lama semakin bertambah, crater menjadi makin lebar, panjang, dan dalam, bahkan bisa mencapai tepi pahat. Crater menyebabkan tepi potong pahat menjadi lemah dan rusak.

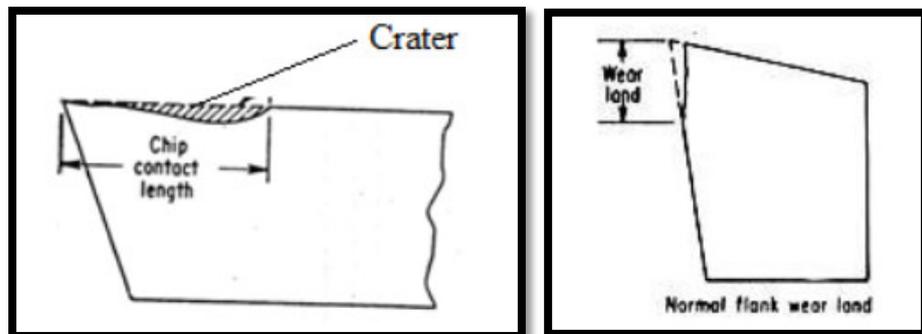
Keausan jenis ini lebih cepat terjadi pada pahat dengan material



ulet, gambar 42 menunjukkan lokasi keausan tersebut (Viktor, 2008).

b. Keausan Tepi (*Flank Wear*)

Salah satu kegagalan pahat adalah keausan flank. Flank merupakan sisi samping muka pahat potong dimana terletak tepi potong utama. Ini merupakan bagian pahat yang berkontak langsung dengan benda kerja dan menahan gaya pemakanan. Keausan ini bermula dari tepi potong dan terus melebar. Pelebaran area kontak geram disebut dengan wear land (Viktor, 2008) .



(a)

(b)

Gambar 42. (a) Keausan Crater;(b) Keausan Flank (Viktor,2008)

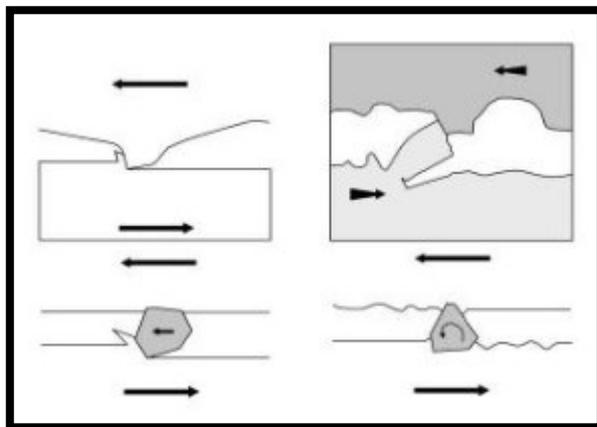
## 5. Mekanisme Keausan Pahat

Berdasarkan hasil-hasil penelitian mengenai keausan dan kerusakan pahat dapat disimpulkan bahwa penyebab keausan dan kerusakan pahat dapat merupakan suatu faktor yang dominan atau gabungan dari beberapa faktor yang tertentu. Faktor-faktor penyebab tersebut antara lain: (Rochim, 1993)



a. Proses Abrasif

Permukaan dapat rusak atau aus karena adanya partikel yang keras pada benda kerja yang menggesek bersama-sama dengan aliran material benda kerja pada bidang geram dan bidang utama pahat. Partikel-partikel keras dalam struktur besi tuang yang berupa karbida, oksida ataupun nitrida (juga dalam struktur baja paduan Ni) akan mampu merusakkan permukaan pahat HSS yang sebagian besar strukturnya terdiri atas martensit atau pahat karbida dengan prosentase pengikat Cobalt yang cukup besar. Proses abrasif merupakan faktor dominan sebagai penyebab keausan pada pahat HSS dengan kecepatan potong yang relatif rendah (sekitar 10 s.d. 20 m/min). Bagi pahat karbida pengaruh proses abrasif ini tidak begitu mencolok karena sebagian besar struktur pahat karbida merupakan karbida-karbida yang sangat keras.



Gambar 43. Metode Keausan Abrasif

(Sumber : <https://dlscrib.com>)



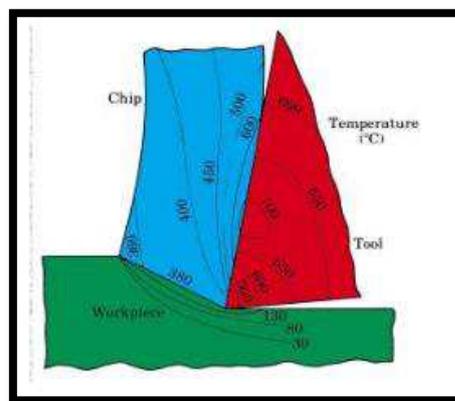
Faktor yang berperan dalam kaitannya dengan ketahanan material terhadap keausan abrasif (*abrasive wear*) antara lain :

- a. Kekerasan material (hardness)
  - b. Kondisi struktur mikro
  - c. Ukuran abrasif
  - d. Bentuk abrasif
- b. Proses Kimiawi

Dua permukaan yang saling bergesekan dengan tekanan yang cukup besar beserta lingkungan kimiawi yang aktif (udara maupun cairan pendingin dengan komposisi tertentu) dapat menyebabkan interaksi antara material pahat dengan benda kerja. Permukaan material benda kerja yang baru saja terbentuk (permukaan geram dan permukaan benda kerja yang telah terpotong) sangat kimiawi aktif sehingga mudah bereaksi kembali dan menempel pada permukaan pahat. Pada kecepatan potong yang rendah, oksigen dalam udara pada celah–celah diantara pahat dengan geram atau benda kerja mempunyai kesempatan atau peluang untuk bereaksi dengan material benda kerja sehingga akan mengurangi derajat penyatuan (*afinitas*) dengan permukaan pahat. Akibatnya daerah kontak dimana pergeseran antara metal dengan metal (pahat dengan geram/benda kerja) akan lebih luas sehingga proses keausan karena gesekan akan terjadi lebih cepat. Pada



kecepatan potong yang rendah, temperatur pemotongan masih cukup tinggi untuk mengubah air atau cairan pendingin atau pelumas menjadi uap yang dapat berfungsi sebagai oksigen sebagaimana yang dibahas diatas. Dengan demikian, pelumas amat diperlukan untuk mengurangi kontak antara metal dengan metal (*boundary lubrication*).



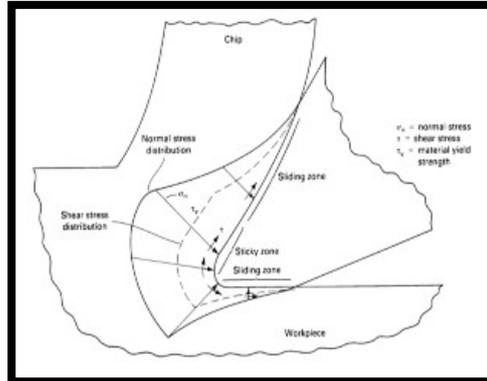
Gambar 44. Temperatur pada proses pemotongan  
(Kalpakjian, 1992)

### c. Proses Adhesi

Pada tekanan dan temperatur yang relatif tinggi, permukaan metal yang baru saja terbentuk akan menempel (bersatu seolah-olah dilas) dengan permukaan metal yang lain. Proses adhesi tersebut terjadi disekitar mata potong pada bidang geram dan bidang utama pahat. Dengan demikian permukaan bidang geram dan bidang utama didekat mata potong tidak pernah mengalami gesekan langsung dengan aliran material benda kerja (geram). Kontak hanya mungkin



terjadi pada daerah disebelah belakang daerah penempelan tersebut.



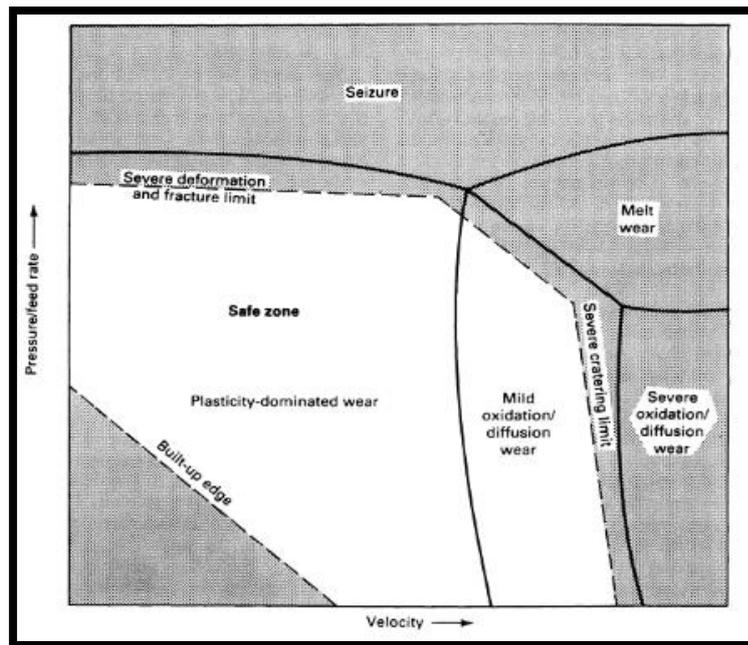
Gambar 45. Tekanan permukaan ujung pahat pada benda kerja (ASM Handbook, Vol. 16, 1995)

Karena aliran metal yang kurang teratur pada kecepatan potong yang rendah dan bila daya adhesi atau afinitas antar material benda kerja dan material pahat cukup kuat maka akan terjadi proses penumpukan lapisan material benda kerja pada bidang geram di daerah dekat mata potong. Penumpukan lapisan material tersebut dalam proses permesinan terkenal dengan nama BUE (*Built Up Edge*) yang mengubah geometri pahat (sudut geram  $\gamma_0$ ) karena berfungsi sebagai mata potong yang baru dari pahat yang bersangkutan.

BUE merupakan struktur yang dinamik, sebab selama proses pemotongan pada kecepatan potong rendah berlangsung, BUE akan tumbuh dan pada suatu saat lapisan atas atau seluruh BUE akan tergeser atau terkelupas dan berulang dengan proses penumpukan lapisan metal yang baru. BUE yang terkelupas sebagian akan terbawa geram dan



sebagian lain akan menempel pada benda kerja pada bidang transien (yang akan terpotong pada langkah/siklus berikutnya) serta pada bidang yang telah terpotong (*machined surface*). Permukaan (*surface finish*) akan menjadi lebih kasar dengan adanya penempelan serpihan BUE yang relatif keras tersebut.



Gambar 46. Plot mekanisme keausan dan daerah pengoperasian yang aman untuk proses pemotongan (ASM Handbook, Vol. 16, 1995)

Ditinjau dari kekerasan permukaan hasil pemotongan, jelas BUE akan merugikan. Dalam proses pemotongan terputus atau bila getaran cukup besar, pada saat beban kejut terjadi seluruh struktur BUE dapat terkelupas dan akan membawa sebagian lapisan terluar material pahat yaitu pada batas butir Martensit (pahat HSS) atau butir Karbida (pahat karbida). Proses pertumbuhan dan pengelupasan BUE tersebut terjadi secara



periodik sehingga mata potong pahat akan cepat aus dan pada suatu saat ujung pahat tidak kuat lagi untuk menahan gaya pemotongan yang makin membesar sehingga terjadi kerusakan fatal. Untuk proses pemotongan dengan kecepatan rendah dengan kondisi tanpa beban kejut, BUE akan lebih stabil.

Pengelupasan hanya terjadi pada lapisan atas BUE sehingga permukaan pahat justru akan terlindungi. Jikalau geram mempunyai bentuk serpihan (pemotongan besi tuang) dengan adanya BUE yang stabil umur pahat akan sangat panjang dan hal ini kadangkala dimanfaatkan dalam praktek terutama dalam proses permesinan (proses pengasaran) dengan mesin perkakas otomatis dimana ongkos perkakas (*tooling cost*, termasuk pengasaran atau penyetelan pahat) relatif mahal. Untuk geram yang kontinu, sedapat mungkin proses permesinan direncanakan pada kondisi dimana BUE tidak terbentuk, sebab kekasaran permukaan dan keausan karena abrasi akan menjadi dominan (adanya gerakan relatif atau gesekan metal dengan metal) (Oberg, 2008).

#### d. Proses Difusi

Pada daerah dimana terjadi pelekatan (adhesi) antara material benda kerja dengan pahat dibawah tekanan dan temperatur yang tinggi serta adanya aliran metal (geram dan permukaan terpotong relatif terhadap pahat) akan



menyebabkan timbulnya proses difusi. Dalam hal ini terjadi perpindahan atom metal dan karbon dari daerah dengan konsentrasi tinggi menuju daerah dengan konsentrasi rendah.

Kecepatan keausan karena proses difusi tergantung pada beberapa faktor, antara lain:

4. Daya larut (*solubility*) dari berbagai fasa dalam struktur pahat terhadap material benda kerja
5. Temperatur, dan
6. Kecepatan aliran metal yang melarutkan.

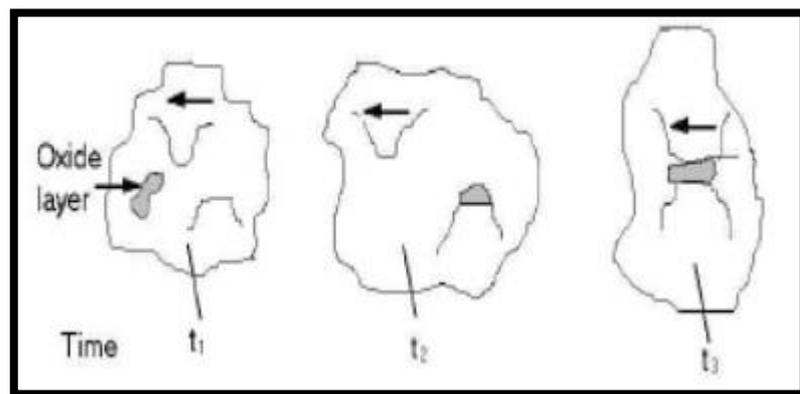
Untuk pahat HSS, atom besi dan karbon terdifusi sehingga butir karbidanya akan kehilangan pegangan dan terkelupas terbawa oleh gesekan metal benda kerja yang melekat karena adanya tegangan geser yang tinggi. Pada pahat karbida (*Cemented Carbide*) Cobalt sebagai pengikat butiran karbida akan terdifusi, akan tetapi butiran karbida tidak mudah terkelupas. Hal ini disebabkan oleh dua faktor, pertama karena ikatan antara butiran karbida cukup kompak (80% volumenya terdiri atas butiran karbida) dan kedua karena atom besi dari benda kerja akan terdifusi kedalam struktur pahat sehingga menggantikan Cobalt sebagai pengikat.

e. Proses Oksidasi

Pada kecepatan potong yang tinggi (temperatur yang tinggi) ketahanan karbida atas proses oksidasi akan menurun.



Karbida dapat teroksidasi bila temperaturnya cukup tinggi dan tidak ada perlindungan terhadap serangan oksigen dalam atmosfer. Akibatnya struktur material pahat akan lemah dan tidak tahan akan deformasi yang disebabkan oleh gaya pemotongan. Cairan pendingin dalam batas-batas tertentu mampu mencegah terjadinya proses oksidasi.



Gambar 47. Mekanisme Keausan Oksidasi

(sumber : [www.scribd.com](http://www.scribd.com))

f. Proses Deformasi Plastik

Kekuatan pahat untuk menahan tegangan tekan (*compressive stress*) merupakan sifat material pahat yang dipengaruhi oleh temperatur. Hal inilah yang merupakan faktor utama yang membatasi kecepatan penghasilan geram bagi suatu jenis pahat. Penampang geram harus direncanakan supaya tekanan yang diderita ujung atau pojok pahat tidak melebihi batas kekuatan pahat untuk menghindari terjadinya proses deformasi plastik. Pahat HSS jauh lebih lemah dibandingkan dengan pahat



karbida, sehingga kekerasan benda kerja yang dapat dipotong dengan HSS umumnya tidak lebih dari 350 HV (mungkin juga sampai 450 HV asalkan kecepatan potong dan penampang geram diperkecil). Pojok pahat harus diberi radius yang disesuaikan dengan besarnya penampang geram, sebab deformasi akibat tegangan akan dimulai pada pojok pahat.

g. Proses Keretakan dan Kelelahan

Umur pahat mungkin sangat singkat karena diakibatkan oleh patahnya pojok pahat sebelum timbul tanda terjadinya keausan. Hal ini umumnya terjadi bila pojok pahat menderita beban kejut (*impact load*) seperti halnya yang sering terjadi pada proses permulaan pemotongan dengan gerak makan atau kedalaman potong yang besar. Untuk itu perlu dipilih pahat dari jenis yang lebih ulet (*ductile*, misalnya pahat karbida dengan prosentasi Co yang besar atau dipilih pahat HSS) atau digunakan geometri yang cocok (sudut penampang dan atau sudut miring yang besar dengan sudut potong utama yang kecil dan radius pojok yang besar).

Retak yang sangat lembut (*micro crack*, retak rambut) dapat terjadi pada mata potong atau pojok pahat. Retak tersebut makin lama makin besar (menjalar) sampai akhirnya terjadi konsentrasi tegangan (*stress concentration*) yang sangat besar sehingga pahat akan patah. Gejala ini sering disebut sebagai



kelelahan (*fatigue*). Kelelahan dapat dianggap sebagai kelelahan mekanik atau kelelahan termik ataupun gabungan dari kedua hal tersebut. Kelelahan mekanik disebabkan oleh beban yang berfluktuasi misalnya dalam proses freis atau proses bubut dengan permukaan benda kerja yang tidak rata (hasil tuang atau tempa). Kelelahan termik terjadi karena tegangan yang berfluktuasi yang disebabkan oleh variasi temperatur (proses ekspansi dan kontraksi). Mata potong tersebut akan sangat panas sewaktu memotong dan mendingin dengan cepat sewaktu meninggalkan permukaan benda kerja untuk kemudian memanaskan kembali sesuai dengan siklus pemotongan. Dengan demikian, pemakaian cairan pendingin dalam proses freis perlu dipertimbangkan dengan betul (mungkin perlu mungkin juga tidak tergantung pada faktor mana yang paling dominan sebagai penyebab keausan/kerusakan suatu jenis pahat).

## 6. Umur Pahat

Umur pahat dapat didefinisikan sebagai lamanya waktu yang diperlukan untuk mencapai batas keausan yang ditetapkan. Keausan pahat akan menimbulkan efek samping diantaranya yaitu  
:(Rochim, 1993)



Adanya kenaikan gaya potong,  
Terjadinya getaran/chatter,

- c. Penurunan kehalusan permukaan hasil permesinan
- d. Perubahan dimensi/geometri produk.

Semakin besar keausan pahat maka kondisinya akan semakin kritis. Jikalau pahat tersebut masih tetap digunakan maka pertumbuhan keausan akan semakin cepat dan pada suatu ujung pahat sama sekali rusak. Kerusakan fatal seperti ini tidak boleh terjadi sebab gaya pemotongan akan sangat tinggi sehingga dapat merusak seluruh pahat, mesin perkakas, benda kerja, dan dapat membahayakan operator. Untuk menghindari hal tersebut ditetapkan suatu batas harga keausan yang dianggap sebagai batas kritis dimana pahat tidak boleh digunakan. Berdasarkan pengalaman batas keausan yang diijinkan bagi suatu jenis pahat yang digunakan untuk memotong suatu jenis benda kerja adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Batas Keausan Kritis (Rochim, 1993)

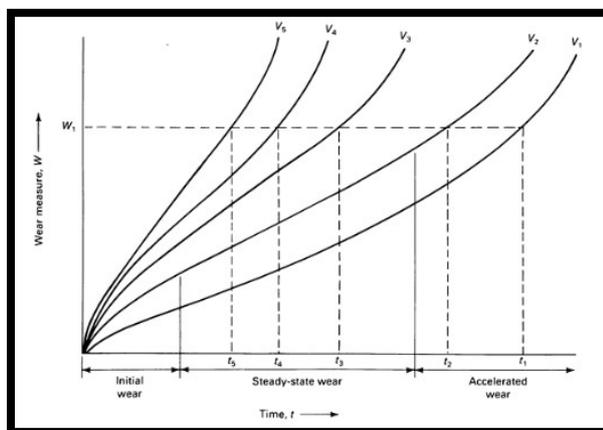
Pahat	Benda Kerja	VB (mm)	K
HSS	Baja dan besi tuang	0,3 – 0,8	-
Karbida	Baja	0,2 – 0,6	0,3
Karbida	Besi tuang dan non ferro	0,4 – 0,6	0,3
Keramik	Baja dan besi tuang	0,3	-

Dengan menentukan kriteria saat habisnya umur pahat seperti batas, maka umur pahat dapat ditentukan yaitu mulai dengan pahat baru (setelah diasah atau *insert* telah diganti) sampai pahat yang bersangkutan dianggap tidak bisa digunakan lagi.



Dimensi umur dapat merupakan besaran waktu, yang dapat dihitung secara langsung maupun secara tidak langsung dengan mengkorelasikan terhadap besaran lain. Hal tersebut dimaksudkan untuk mempermudah prosedur perhitungan sesuai dengan jenis pekerjaan yang dilakukan.

Pada dasarnya dimensi keausan menentukan batasan umur pahat. Dengan demikian kecepatan pertumbuhan keausan menentukan laju saat berakhirnya masa guna pahat. Pertumbuhan keausan tepi (*flank wear*) pada umumnya mengikuti bentuk, yaitu dimulai dengan pertumbuhan yang relative cepat sesaat setelah pahat digunakan diikuti pertumbuhan yang linier setaraf dengan bertambahnya waktu pemotongan dan kemudian pertumbuhan yang cepat terjadi lagi. Saat dimana pertumbuhan keausan cepat mulai berulang lagi dianggap sebagai batas umur pahat, dan hal ini umumnya terjadi pada harga keausan tepi ( $V_B$ ) yang relatif sama untuk kecepatan potong yang berbeda.



Gambar 48. Pertumbuhan keausan tepi untuk gerak makan tertentu dan kecepatan potong yang berbeda (Stephenson, 2006)



Sampai saat batas ini, keausan tepi (VB) dapat dianggap merupakan fungsi pangkat (*power function*) dari waktu pemotongan (t) dan bila digambarkan pada skala *dobel logaritma* maka mempunyai hubungan linier.

Persamaan yang menunjukkan hubungan kecepatan potong dengan umur pahat pertama kali dikemukakan oleh F.W Taylor pada tahun 1907. Untuk harga yang tetap bagi batas dimensi keausan serta kombinasi pahat dan benda kerja tertentu, maka hubungannya sebagai berikut: (Braucke, 2004)

$$V_c \cdot T^n = C \dots\dots\dots(9)$$

Dimana :

$V_c$  = Kecepatan Potong

$C$  = Konstanta Umur Pahat Taylor

$n$  = Harga Eksponen

$T$  = Umur Pahat (Menit)

Persamaan di atas dikenal dengan nama Persamaan Umur Pahat Taylor. Harga Konstanta  $C$  dan eksponen  $n$  diperoleh dengan melakukan praktek pemotongan/pemesinan material benda kerja. Semakin kecil harga eksponen  $n$ , maka umur pahat yang bersangkutan sangat dipengaruhi oleh kecepatan potong.

Untuk nilai  $n$  pada persamaan (9) dapat ditentukan melalui

persamaan berikut ini (Apri Nuryanto & Sutopo,2006):

$$n = \frac{\log V_2 - \log V_1}{\log T_1 - \log T_2} \dots\dots\dots(10)$$



## 7. Pengaruh Cairan Pendingin terhadap Umur Pahat

Dalam proses permesinan dikenal adanya dua macam kondisi pemotongan yaitu kondisi kering atau dry machining dan kondisi basah atau wet machining. Pada permesinan kering proses pemotongan benda kerja dilakukan dengan tanpa menggunakan cairan pendingin. Sedangkan pada proses basah proses pemotongan dilakukan dengan penambahan cairan pendingin pada permukaan pahat dan benda kerja. Secara umum fungsi utama dari cairan pendingin adalah untuk menurunkan temperatur pemotongan, pelumasan dan membersihkan permukaan benda hasil pemotongan dari sisa geram yang dapat merusak permukaan hasil pemotongan (Cakir,2007).

Penggunaan cairan pendingin pada proses permesinan akan menurunkan laju keausan pahat karena cairan pendingin ini dapat berfungsi sebagai pembersih geram, mengurangi gesekan sehingga temperatur yang terjadi pada bidang aktif pahat juga akan berkurang. Dengan demikian pahat tidak akan cepat aus dibanding dengan proses permesinan secara kering atau tanpa menggunakan cairan pendingin. Di bawah ini adalah fungsi cairan pendingin, yaitu :

- a. Menurunkan gaya potong
- b. Melumasi elemen pembimbing

Memperhalus kualitas permukaan hasil permesinan

Membersihkan geram dan bidang geram pada saat pemotongan



e. Proteksi korosi pada permukaan benda kerja yang baru terbentuk

Proses permesinan saat ini memiliki kecenderungan menggunakan proses kering dan menggunakan udara sebagai media pendingin. Jenis cairan pendingin yang sekarang ini banyak digunakan adalah :

a. Minyak bumi

Merupakan cairan yang terbuat dari 100% bahan minyak bumi dan tidak mengandung air sama sekali. Keuntungan penggunaan cairan jenis ini adalah sifat pelumasan yang baik, ketahanan korosi yang baik, mudah dalam perawatannya. Sedangkan kekurangan cairan pendingin ini adalah transfer panas rendah, dapat terbakar, berasap, mengakibatkan adanya lapisan oli pada lapisan benda kerja dan penggunaannya terbatas pada permesinan dengan kecepatan rendah.

b. Minyak yang dapat larut (*soluble oils*)

Merupakan perbandingan 60-90% minyak bumi, pengemulsi (*emulsifier*) dan zat aditif lainnya. Didalam penggunaannya zat ini dicampur dengan air dengan komposisi tertentu sebelum digunakan. Saat dicampur zat pengemulsi akan membuat oli bercampur dengan air. Keuntungan dari penggunaan cairan jenis ini adalah memiliki sifat pelumasan yang baik, sifat pendinginan yang baik dan dapat digunakan hampir semua proses permesinan dari pekerjaan berat sampai finishing.



Sedangkan kekurangan dari cairan pendingin ini adalah material akan lebih mudah terkena karat, berbahaya bagi kesehatan operator, mudah menguap dan meningkatkan biaya perawatan.

c. Sintetik

Merupakan cairan pendingin yang tidak mengandung minyak bumi sama sekali, dan juga merupakan cairan kimia yang dicampur dengan air. Keuntungan dari penggunaan cairan jenis ini adalah memiliki ketahanan yang baik terhadap mikroba, relatif tidak beracun, transparan, tidak mudah terbakar, ketahanan korosi yang baik, cairan pendingin yang baik, mudah perawatan dan memiliki umur yang panjang. Sedangkan kekurangan cairan pendingin ini adalah pelumasan yang kurang baik pada benda kerja, berbusa, mudah terkontaminasi oleh cairan lain.

d. Semi Sintetik

Merupakan cairan pendingin yang masih mengandung 2-30% minyak bumi. Didalam penggunaannya cairan jenis ini juga masih harus dicampur dengan air. Keuntungan dari cairan pendingin ini adalah relatif tidak beracun, transparan, tidak mudah terbakar, ketahanan terhadap korosi yang baik, memiliki sifat pendinginan dan pelumasan yang baik, waktu penggunaan lama, dapat digunakan di hampir semua proses permesinan. Sedangkan kekurangan cairan pendingin ini adalah menghasilkan efek kabut, berbusa, mudah terkontaminasi oleh cairan lain.



## I. Material Besi Cor

Besi cor adalah paduan golongan besi dengan karbon diatas 2,14 %wt, pada umumnya besi cor memiliki 3,0 sampai 4,5 % wt C, dan unsur paduan lainnya. Suhu pencairan besi cor antara 1150 °C sampai 1300 °C jauh lebih rendah dari pada baja (*Callister, 2007*). Hal ini menguntungkan karena mudah dicairkan, bahan bakar lebih irit dan dapur peleburan lebih sederhana. Besi cor cair selain mudah mengisi cetakan yang rumit, material ini harganya murah dan serba guna bila ditinjau dari segi desain produk.

Secara umum besi cor dapat dikelompokkan berdasarkan keadaan dan bentuk karbon yang terkandung di dalamnya menjadi empat golongan di bawah ini :

- a. Besi cor kelabu (*grey cast iron*), karbonnya berupa grafit berbentuk *flake* (serpih) dengan matriks *ferritik* atau *perlitik*.
- b. Besi cor nodular (*nodular cast iron / ductile cast iron*), karbonnya berupa nodular graphite (grafit nodular, berbentuk bola) dengan matriks *ferritik* atau *perlitik*.
- c. Besi cor putih (*white cast iron*), seluruh karbon dalam besi cor berupa sementit.
- d. Besi cor mampu tempa (*malleable cast iron*), karbonnya berupa temper karbon dengan matriks *perlitik* atau *ferritik*.

Perbedaan pembentukan grafit dipengaruhi oleh komposisi material pendinginan. Pembentukan grafit dipengaruhi oleh silikon dalam



konsentrasi lebih besar dari 1%. Juga, tingkat pendinginan lebih lambat selama mendukung pembentukan grafit. Untuk besi cor kebanyakan, karbon berbentuk grafit, mikro dan sifat mekanik tergantung pada komposisi dan perlakuan panas.

