

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Wahyu Wibowo (2000) melakukan penelitian tentang bagaimana pengaruh dari kedalaman pemotongan (*depth of cut*) dan *feeding* terhadap besar dari amplitudo getaran pahat yang terjadi selama proses pembubutan. Dan dari penelitian ini didapatkan bahwa variasi dari besar kedalaman pemotongan serta *feeding* berpengaruh terhadap besar amplitudo getaran pahat dengan nilai yang berbanding lurus terhadap kedua variabel tersebut.

Luke Huang dan Joseph C. Chen (2001) melakukan penelitian eksperimen untuk mengembangkan model multipel regresi mengenai kekasaran permukaan yang dipengaruhi oleh kondisi-kondisi pemotongan termasuk memasukkan informasi getaran yang terjadi selama proses pembubutan. Analisis model multipel regresi dengan menggunakan *software* SPSS 8.0 menghasilkan urutan faktor-faktor kondisi pemotongan yang berpengaruh terhadap kekasaran permukaan dari yang paling berpengaruh sampai dengan yang mempunyai pengaruh berbanding terbalik terhadap kekasaran permukaan yaitu *feeding*, getaran, kedalaman potong, dan kecepatan spindel.

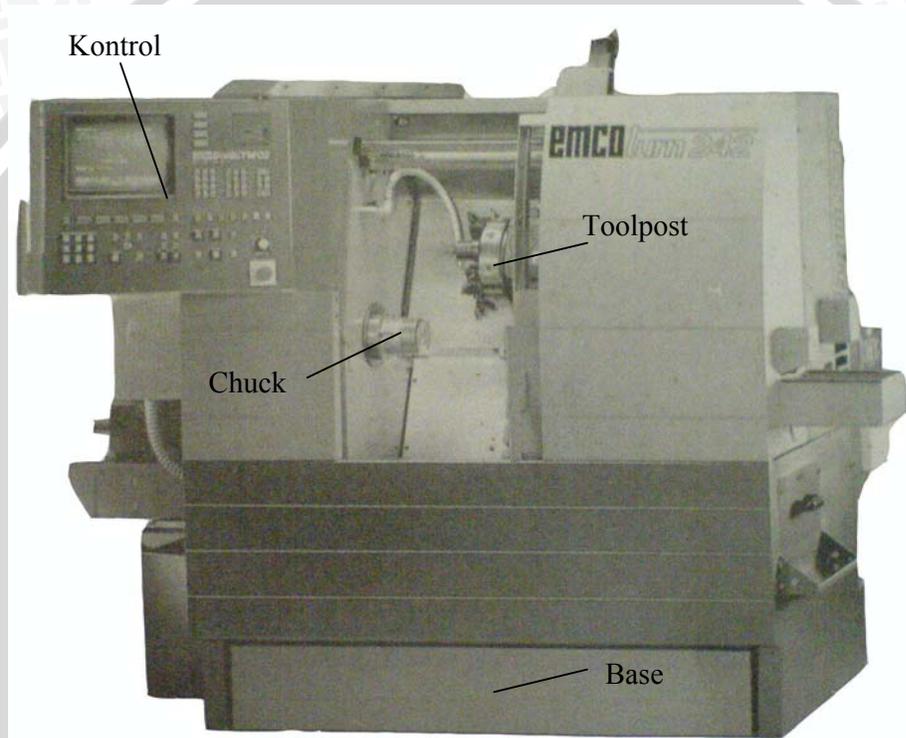
Kusdi (2003) melaksanakan penelitian dengan pemodelan matematis dan eksperimental mengenai kekasaran permukaan yang dipengaruhi oleh berbagai kondisi pemotongan termasuk terjadinya getaran yang sulit sekali dihindari pada setiap proses pembubutan. Melalui penelitian ini disimpulkan bahwa variasi nilai parameter-parameter pemotongan yaitu kedalaman potong, kecepatan pemakanan, dan kecepatan putaran spindel berpengaruh terhadap kekasaran permukaan dengan memperhitungkan pula faktor getaran benda kerja.

#### 2.2 Proses Pemotongan Pada Mesin Bubut

Mekanisme mesin bubut secara sederhana dapat dijelaskan sebagai berikut. Benda kerja yang berbentuk silindris dipasang pada pencekam yang terletak di ujung poros utama (spindel). Saat benda kerja berputar dengan kecepatan putar yang dapat diatur, secara bersamaan pahat yang diletakkan pada kedudukan pahat bergerak translasi dengan kecepatan yang dapat diatur pula, sehingga pada saat inilah terjadi kontak antara ujung mata pahat dengan benda kerja. Kedudukan pahat terhadap benda kerja dapat

diatur sedemikian rupa sehingga kedalaman pemakanan pahat terhadap benda kerja dapat diatur.

Seperti yang telah penulis uraikan pada bab sebelumnya bahwa penelitian kali ini akan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* komputer. Untuk itu sebelumnya kita harus mengetahui hubungan secara teoritis antara kedalaman potong, getaran yang terjadi pada saat proses pembubutan, serta kekasaran permukaan. Pada subbab-subbab selanjutnya akan penulis jelaskan hubungan dari kondisi-kondisi tersebut.



Gambar 2.1 Mesin Bubut CNC ET-242  
(Sumber: EMCO CNC ET-242 Manual Book, 1991: 1)

### 2.2.1 Sistem Pemotongan Pada Proses Pembubutan

Secara garis besar sistem pemotongan pada proses pembubutan dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu:

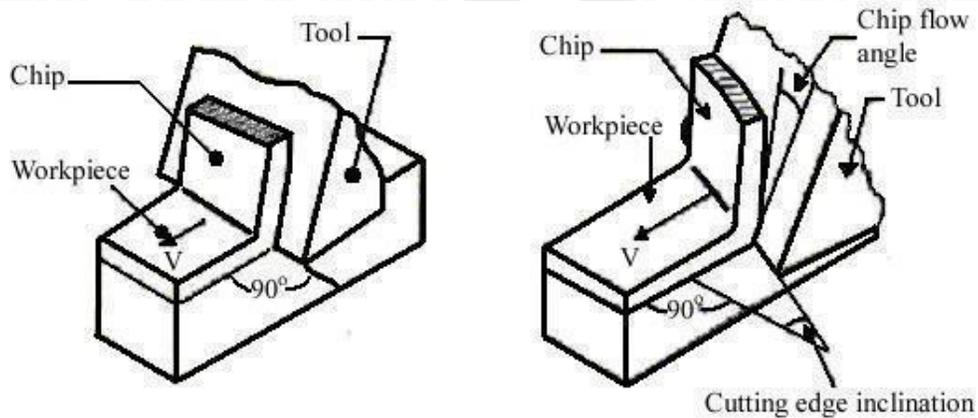
1. Sistem Pemotongan Tegak (*Orthogonal Cutting*)

Sistem pemotongan tegak terjadi apabila sudut potong utama ( $k_r$ ) =  $90^\circ$  dan sudut miring ( $\lambda_s$ ) =  $0^\circ$ .

## 2. Sistem Pemotongan Miring (*Oblique Cutting*)

Sistem pemotongan miring terjadi apabila sudut potong utama ( $k_r$ )  $< 90^\circ$  dan sudut miring ( $\lambda_s$ )  $\neq 0^\circ$ .

Untuk lebih jelasnya, sistem pemotongan tegak dan miring dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut.

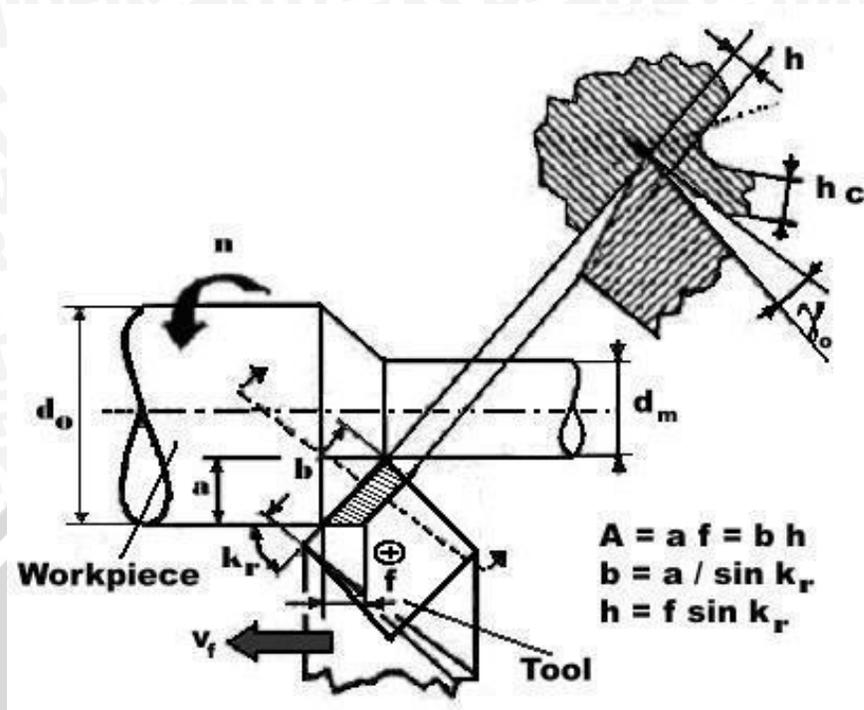


Gambar 2.2. Sistem Pemotongan Tegak (a) dan sistem pemotongan miring (b)  
(Sumber : Boothroyd, 1985: 63)

### 2.2.2 Elemen Dasar Proses Pembubutan

Sesuai dengan gambar 2.3, kondisi pemotongan pada proses pembubutan ditentukan sebagai berikut (Taufiq Rochim, 1981: 14):

1. Benda kerja :  $d_o$  = diameter mula (mm)  
 $d_m$  = diameter akhir (mm)  
 $l_t$  = panjang permesinan (mm)
2. Pahat :  $k_r$  = sudut potong utama ( $^\circ$ )  
 $\gamma_o$  = sudut geram ( $^\circ$ )
3. Mesin bubut :  $a$  = kedalaman potong (mm)  
$$= \frac{(d_o - d_m)}{2} \quad (\text{mm})$$
  
 $f$  = gerak makan (mm/rev)  
 $n$  = putaran spindel (rev/min)



Gambar 2.3. Proses pembubutan  
(Sumber : Taufiq Rochim, 1993: 15)

Pada gambar 2.3 diperlihatkan sudut potong utama ( $k_r$ ) yang merupakan sudut antara mata potong mayor dengan kecepatan makan ( $v_f$ ). Besar dari sudut tersebut ditentukan oleh geometri pahat yang digunakan serta cara pemasangannya. Untuk harga  $a$  dan  $f$  yang tetap, maka harga dari sudut ini menentukan besar dari lebar pemotongan serta tebal geram sebelum terpotong dengan rumus sebagai berikut (Taufiq Rochim, 1993: 15):

- lebar pemotongan: 
$$b = \frac{a}{\sin k_r} \text{ (mm)} \quad (2-1)$$

- tebal geram sebelum terpotong: 
$$h = f \sin k_r \text{ (mm)} \quad (2-2)$$

Dan untuk elemen dasar dari proses pembubutan dapat dihitung dari rumus-rumus berikut (Taufiq Rochim, 1993: 14):

1. Kecepatan potong:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (2-3)$$

dimana  $d$  = diameter rata-rata, yaitu:

$$d = \frac{(d_o + d_m)}{2} \text{ (mm)}$$

2. Kecepatan makan:

$$V_f = f \cdot n \quad (\text{mm}) \quad (2-4)$$

3. Waktu pemotongan:

$$t_c = \frac{l_t}{V_f} \quad (\text{min}) \quad (2-5)$$

4. Kecepatan penghasilan geram:

$$Z = f \cdot a \cdot V \quad (\text{cm}^3/\text{min}) \quad (2-6)$$

### 2.2.3 Komponen Gaya Pembentukan Geram

Suatu analisis pembentukan geram telah dikemukakan oleh Merchant, yang mendasarkan teorinya pada proses pemotongan sistem tegak (sistem *orthogonal*).

Analisis yang dikemukakannya menggunakan beberapa asumsi yaitu :

- Mata potong pahat dianggap sangat tajam sehingga tidak menggosok atau menggaruk benda kerja.
- Deformasi terjadi hanya dalam dua dimensi.
- Distribusi tegangan yang merata pada bidang geser.
- Gaya aksi dan reaksi pahat terhadap bidang geram adalah sama besar dan segaris (tidak menimbulkan momen kopel).

Karena gaya pada pemodelan yang dikemukakan Merchant hanya dipandang pada sisi satu bidang, maka gaya tersebut dapat diuraikan menjadi dua komponen gaya. Berdasarkan cara penguraiannya, ada tiga macam cara yaitu:

1. Gaya total ( $F$ ), ditinjau dari proses deformasi material, dapat diuraikan menjadi dua komponen yaitu:

$F_s$  : gaya geser yang mendeformasikan material pada bidang geser sehingga melampaui batas elastik.

$F_{sn}$  : gaya normal pada bidang geser yang menyebabkan pahat tetap menempel pada benda kerja.

2. Gaya total ( $F$ ) dapat diketahui arah dan besarnya dengan menggunakan alat dinamometer untuk mengukur dua komponen gaya yaitu:

$F_v$  : gaya potong, searah dengan kecepatan potong.

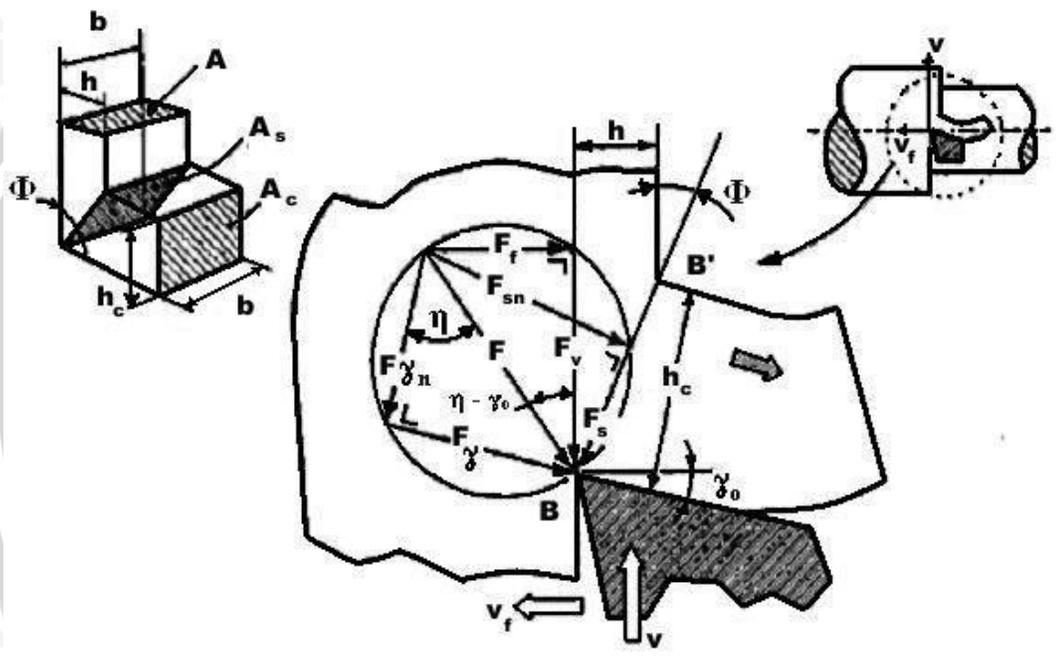
$F_f$  : gaya makan, searah dengan kecepatan makan.

3. Gaya total ( $F$ ) yang bereaksi pada bidang geram diuraikan menjadi dua komponen yang dapat digunakan untuk menentukan koefisien gesek geram terhadap pahat:

$F_\gamma$  : gaya gesek pada bidang geram.

$F_{\gamma n}$  : gaya normal pada bidang geram.

Karena penguraian gaya di atas berasal dari satu gaya yang sama maka mereka dapat dilukiskan menjadi sebuah lingkaran dengan diameter yang sama yang disebut dengan lingkaran Merchant (Gambar 2.4). lingkaran tersebut digambar tepat pada ujung pahat sehingga masing-masing komponen gaya menempati lokasi seperti yang dimaksud di atas. Gambar ini merupakan sistem gaya pada pemotongan orthogonal dan dalam prakteknya dapat didekati dengan menggunakan pahat dengan sudut potong utama ( $k_r$ ) = 90° dan sudut miring ( $\lambda_s$ ) = 0°.



Gambar 2.4. Lingkaran Merchant  
(Sumber: Taufiq Rochim, 1993: 27)

Berdasarkan analisis geometrik dari lingkaran gaya di atas, dapat diturunkan rumus gaya potong  $F_v$  (Taufiq Rochim, 1981: 28):

$$F_v = \tau_s \cdot b \cdot h \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi - \eta - \gamma_0)} \quad (2-7)$$

Dimana :  $F_v$  = Gaya potong (N)

$\tau_s$  = Tegangan geser pada bidang geser (N/mm<sup>2</sup>)

$b$  = lebar pemotongan (mm)

$h$  = tebal geram sebelum terpotong (mm)

$\eta$  = Sudut gesek

$\gamma_o$  = Sudut geram

$\Phi$  = Sudut geser

Dari rumus (2-7) di atas dapat disimpulkan faktor-faktor yang mempengaruhi besar dari gaya potong, yaitu :

1. Kekuatan dari benda kerja menentukan besar dari gaya potong, ditunjukkan dengan faktor ( $\tau_s$ ) di atas. Maka semakin tinggi kekuatan benda kerja, maka semakin besar pula gaya potong yang terjadi.
2. Semakin besar tebal geram sebelum terpotong (*undeformed chip tickness*), maka semakin besar pula gaya potong. Hal ini menunjukkan bahwa besar dari kedalaman pemotongan berpengaruh secara langsung terhadap besar gaya potong.
3. Yang terakhir adalah besar dari sudut geram ( $\gamma_o$ ), sudut geser ( $\Phi$ ), dan sudut gesek ( $\eta$ ) menentukan besar gaya potong.

#### 2.2.4 Tipe Geram

Tipe geram yang terbentuk dari hasil proses pembubutan sangat mempengaruhi kualitas permukaan benda kerja yang dihasilkan. Jenis geram dibagi menjadi tiga sebagai berikut :

1. Geram kontinyu (*continuous chip*)

Geram kontinyu dihasilkan ketika material di depan pahat terdeformasi tanpa patah dan mengalir di atas mata potong dalam bentuk pita. Dapat diasumsikan bahwa tiap lapisan material melekat (seperti dilas) pada lapisan sebelumnya akibat temperatur tinggi sehingga menghasilkan geram kontinyu. Geram ini dihasilkan saat melakukan permesinan baja atau logam ulet pada kecepatan potong tinggi. Walaupun umumnya geram jenis ini menghasilkan permukaan akhir yang baik, geram kontinyu tidak selalu diinginkan terutama pada mesin perkakas otomatis karena cenderung melilit pada *tool holder*. Sehingga operasi harus dihentikan untuk membuangnya. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan *chip breaker* pada pahat. Bentuk geram ini terlihat pada gambar 2.5 (a).

2. Geram kontinyu dengan *Build-up Edge (BUE)*

Jenis geram ini mirip dengan geram kontinyu hanya saja sebuah *BUE* terbentuk pada ujung pahat. *BUE* terbentuk akibat adanya pengelasan material geram pada mata potong karena besarnya gesekan antara geram dan mata

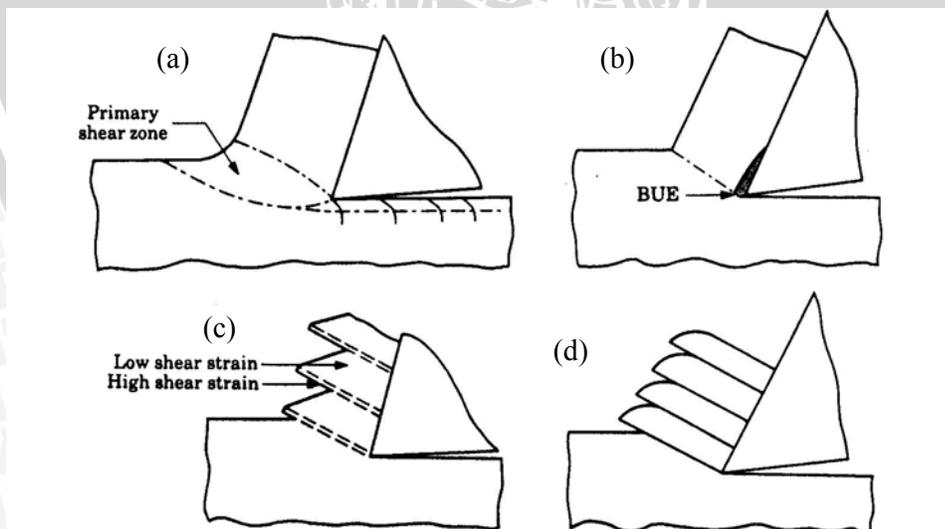
potong. Adanya pengelasan ini semakin meningkatkan gesekan yang mengakibatkan terbentuknya *BUE* berlapis pada mata potong. Seiring bertambahnya *BUE*, aliran geram terpecah menjadi dua bagian. Sebagian menempel pada ujung pahat dan sebagian terbawa geram. Geram seperti ini biasanya muncul ketika memotong material ulet pada kecepatan potong rendah. Geram dengan *BUE* tidak diharapkan karena menimbulkan konsumsi daya tinggi, permukaan akhir buruk dan keausan pahat yang lebih tinggi. Bentuk geram ini terlihat pada gambar 2.5 (b).

3. Geram bersegmen (*segmented chip*)

Geram bersegmen merupakan geram semi-kontinyu. Geram ini dihasilkan ketika melakukan permesinan material yang getas atau ketika memotong material ulet pada kecepatan potong rendah dan kedalaman pemotongan yang besar. Bentuk geram ini terlihat pada gambar 2.5 (c).

4. Geram diskontinyu (*discontinuous chip*)

Geram diskontinyu terdiri dari segmen-segmen yang terpisah satu sama lain. Geram ini dihasilkan ketika melakukan permesinan material yang getas, proses pemotongan dengan kecepatan pemotongan terlalu tinggi atau rendah, kedalaman pemotongan besar dan sudut geram kecil, kekakuan alat potong yang rendah, serta efektifitas penggunaan cairan pendingin yang rendah. Bentuk geram ini terlihat pada gambar 2.5 (d).



Gambar 2.5. Tipe bentuk geram. (a) Geram kontinyu. (b) Geram kontinyu dengan *BUE*. (c) Geram bersegmen. (d) Geram diskontinyu (Sumber: Kalpakjian, 1990: 478)

### 2.3 Getaran Pada Proses Pembubutan

Secara garis besar, getaran yang timbul pada saat proses pemotongan dikelompokkan menjadi dua, yaitu: getaran paksa (*Forced Vibration*) dan *chatter* (*Self Excited Vibrations*).

#### 2.3.1 Getaran Paksa (*Forced Vibrations*)

Terjadinya getaran antara pahat dan benda kerja pada saat proses permesinan selalu menimbulkan efek yang merugikan. Dari segi produk yang dihasilkan, getaran dapat menyebabkan rendahnya kualitas permukaan (terlalu kasar), dan terjadinya kesalahan bentuk atau ukuran pada benda kerja. Selain itu timbulnya getaran juga dapat mempercepat laju keausan pahat, memperpendek umur komponen-komponen mesin perkakas, yang pada akhirnya akan menurunkan tingkat kecepatan produksi.

Getaran yang terjadi pada proses permesinan dapat berupa getaran paksa, yaitu getaran yang disebabkan oleh eksitasi getaran dari luar. Penyebabnya antara lain karena adanya cacat pada komponen mesin yang melakukan gerak rotasi, getaran dari bagian-bagian penumpu (misal: pondasi mesin perkakas), getaran akibat proses pemotongan terputus (seperti pada proses permesinan freis), dan lain-lain.

#### 2.3.2 *Chatter* (*Self Excited Vibrations*)

*Self Excited Vibration* (*chatter*) adalah getaran eksitasi diri yang energi eksitasinya berasal dari proses pemotongan itu sendiri. *Self Excited Vibration* umumnya memiliki amplitudo yang cukup besar. *Chatter* dapat terjadi dengan dua cara. Pertama, pada kondisi tertentu proses pemotongan yang cenderung tidak stabil menyebabkan perpindahan secara berulang-ulang posisi pahat relatif terhadap benda kerja sehingga menimbulkan getaran dengan amplitudo besar. Kedua, *chatter* biasanya dimulai dengan adanya gangguan pada area pemotongan. Gangguan yang dimaksud misalnya adalah kondisi homogenitas dari material benda kerja atau kondisi permukaannya, perubahan tipe dari geram yang terbentuk, dan juga perubahan kondisi gesekan pada bidang kontak antara pahat-geram yang juga dipengaruhi oleh jenis *cutting fluid* (fluida pendingin).

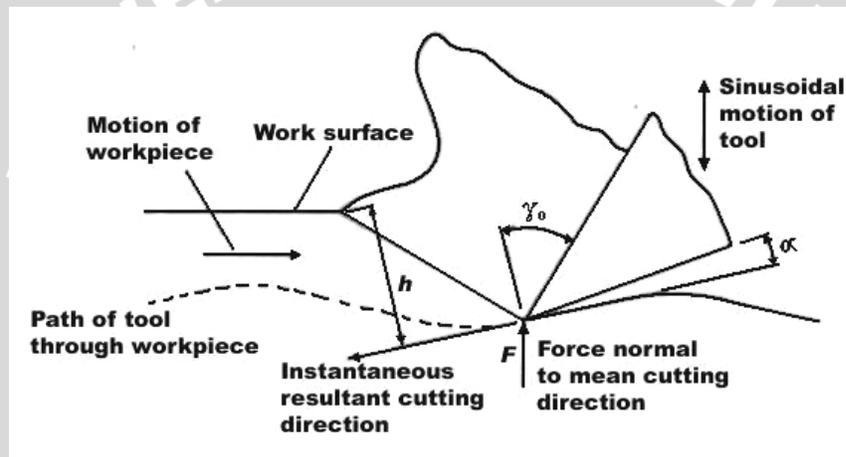
Pada kondisi pemotongan tertentu terutama pada pemotongan dengan lebar geram kecil, maka amplitudo getaran yang timbul relatif kecil dan proses pemotongan stabil. Peningkatan lebar geram pada harga tertentu akan menimbulkan amplitudo getaran yang besar sehingga proses pemotongan menjadi tidak stabil. Terlampauinya batas kestabilan pemotongan ditandai dengan membesarnya amplitudo getaran secara

tiba-tiba pada suatu harga frekuensi tertentu dan timbulnya suara yang melengking serta terjadinya permukaan produk yang bergelombang.

Untuk lebih memahami fenomena terjadinya *chatter* pada proses pemotongan, perlu kita tinjau dinamika pemotongan logam.

### 2.3.3 Dinamika Pemotongan Logam

Selanjutnya akan dibahas mengenai model getaran yang terjadi yang mengakibatkan pergeseran posisi pahat yang arahnya normal terhadap arah pemotongan. Dapat dilihat pada gambar 2.6 bahwa gerakan sinusoidal dari pahat mengakibatkan besar dari tebal geram sebelum terpotong ( $h$ ), sudut geram ( $\gamma_0$ ), dan sudut *clearance* ( $\alpha$ ) menjadi terus-menerus bervariasi.



Gambar 2.6. Gerakan sinusoidal dan gaya yang terjadi  
(Sumber: Boothroyd, 1981: 204)

Apabila  $F$  merupakan resultan dari gaya-gaya yang terjadi yang arahnya tegak lurus terhadap arah pemotongan, maka dari gambaran di atas dapat dibuat persamaan gerak dari getaran yang terjadi (Boothroyd, 1981:204):

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = F \quad (2-8)$$

Dimana :  $x$  = perpindahan normal benda kerja terhadap arah potong, didapatkan dari posisi ekuilibrium dari benda kerja pada pemotongan *steady state* (m)

$\dot{x}$  = turunan pertama dari  $x$  terhadap waktu (m/s)

$\ddot{x}$  = turunan kedua dari  $x$  terhadap waktu (m/s<sup>2</sup>)

$m$  = massa ekuivalen (kg)

$c$  = konstanta peredaman (kg/s)

$k$  = konstanta pegas (kg/s<sup>2</sup>)

Selanjutnya dengan melakukan analisis dari pengaruh besar tebal geram sebelum terpotong, sudut geram, serta sudut *clearance* yang bervariasi, didapatkan persamaan berikut (Boothroyd, 1981:215):

$$F = X \ddot{x} + Y \dot{x} + Z \quad (2-9)$$

Dimana besar  $X$  dapat ditentukan melalui rumus berikut (Boothroyd, 1981: 215):

$$X = \frac{bh_{av}}{v} \left[ \frac{\tau_s C}{Q'} (1 + \cot^2 \Phi_{av}) - \tau_s \left( \frac{\sin \gamma_0 \{ \cot \Phi_{av} + [(1+C) \tan(\gamma_0 - \Phi_{av})] \} + \cos \gamma_0}{\sin \Phi_{av} \cos(\gamma_0 - \Phi_{av})} \right) - q_t \right] \quad (2-10)$$

Dimana :  $h_{av}$  = nilai rata-rata dari tebal geram sebelum terpotong (mm)

$C$  = parameter yang menunjukkan besar pengaruh dari variasi tebal geram sebelum terpotong

$\Phi_{av}$  = sudut geser rata-rata (°)

$q_t$  = Besar *slope* dari kurva sudut geram – gaya potong (N/mm<sup>2</sup>)

$$Q' = \frac{\tau_s}{\tau_f K}$$

$\tau_f$  = tegangan geser di area *sticking* bidang kontak pahat-geram (N/mm<sup>2</sup>)

$$K = \frac{l_{st}}{h_c}$$

$l_{st}$  = panjang area *sticking* (mm)

Selanjutnya persamaan (2-9) disubstitusikan ke persamaan umum getaran (2-8) dan didapatkan (Boothroyd, 1981: 215):

$$m \ddot{x} + (c - X) \dot{x} + (k - Y) x = Z \quad (2-11)$$

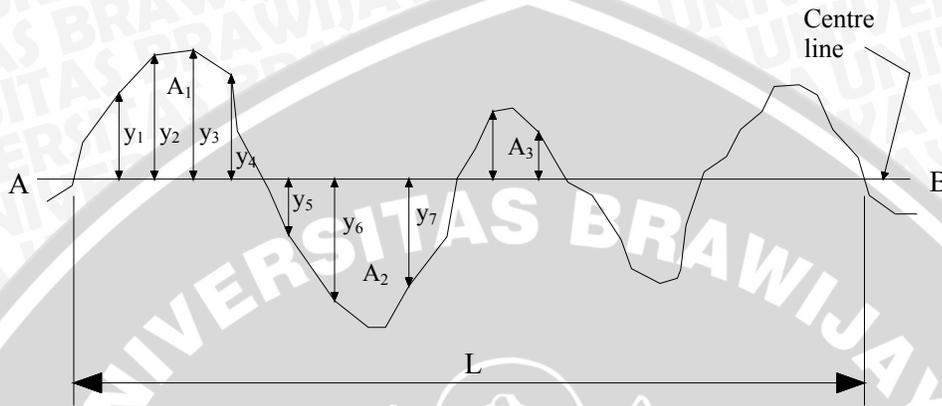
Dengan syarat stabilitas (Boothroyd, 1981: 215):

$$c - X > 0 \quad (2-12)$$

Dengan kata lain apabila nilai  $X$  yang diberikan oleh persamaan (2-10) lebih besar daripada nilai konstanta peredam cairan ( $c$ ) dari sistem pahat yang ada, getaran eksitasi sendiri (*self excited vibration*) akan terjadi.

**2.4 Kekasaran Permukaan**

Kekasaran permukaan adalah ketidakteraturan kehalusan permukaan pada suatu permukaan (Degarmo, et al., 1988). Secara teoritis untuk menentukan besar  $R_a$  adalah berdasarkan gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.7. Kekasaran permukaan  
(Sumber: Sharma, 2001: 375)

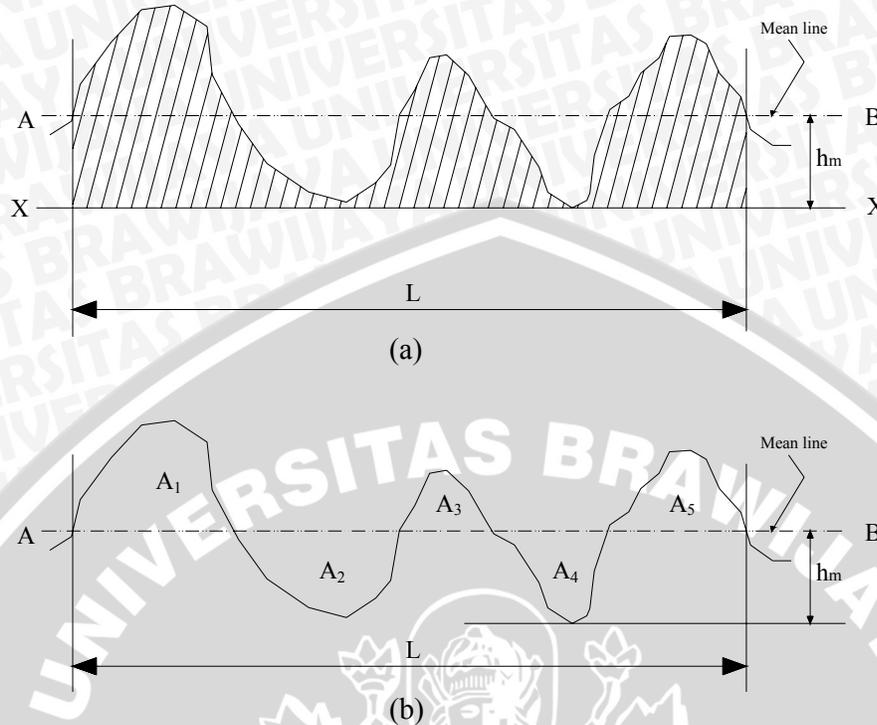
Berdasarkan gambar 2.7 di atas, rumus untuk menentukan besar kekasaran permukaan adalah (Sharma, 2001: 375):

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \tag{2-13}$$

Atau dengan rumus pendekatan (Sharma, 2001: 376):

$$R_a = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots}{L} \tag{2-14}$$

- Dimana :  $R_a$  = Kekasaran permukaan ( $\mu\text{m}$ )
- $L$  = Panjang sampling, yang besarnya untuk proses pembubutan (Sharma, 2001:379) = 0,8 mm =  $8 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$
- $A_{1,2,3,\dots}$  = Luas area 1, 2, 3, dan seterusnya ( $\mu\text{m}$ )



Gambar 2.8. Menentukan garis rata-rata kekasaran permukaan  
(Sumber: Sharma, 2001: 376)

Sesuai dengan gambar 2.8 di atas, untuk mencari nilai kekasaran permukaan ( $R_a$ ) pertama-tama yang harus dilakukan adalah menentukan garis rata-rata (*mean line*) yaitu dengan cara sebagai berikut (Sharma, 2001: 377):

1. Memilih panjang sampel yang sesuai.
2. Menggambar garis X-X yang paralel terhadap arah konfigurasi permukaan dan menyinggung lembah yang paling rendah.
3. Hitung luas area yang diarsir seperti yang ditunjukkan gambar 2.8 (a).
4. Selanjutnya panjang garis pusat atau garis rata-rata A-B dari garis X-X, adalah :

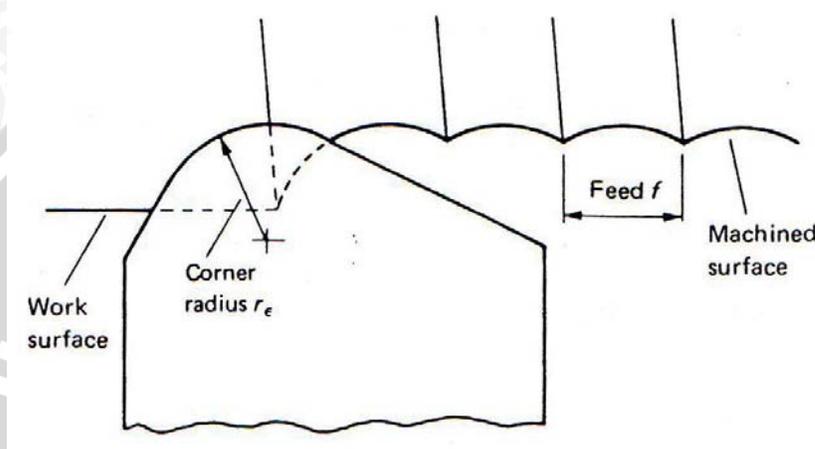
$$h_m = \frac{\text{Luas area di dalam kurva}}{L} \quad (2-15)$$

Secara umum kekasaran permukaan yang dihasilkan oleh suatu proses permesinan dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu:

1. Kekasaran permukaan ideal, yang dihasilkan oleh geometri dari pahat dan *feeding* atau kecepatan pemakanan.
2. Kekasaran permukaan natural, yang dihasilkan oleh berbagai macam faktor yang sulit diprediksi pada proses pemotongan.

### 2.4.1 Kekasaran Permukaan Ideal

Kekasaran permukaan ideal merupakan suatu model pendekatan yang dipengaruhi oleh geometri pahat dan *feeding*, dan hanya dapat dilakukan apabila *chatter*, ketidakakuratan dari gerakan pahat, dan lain-lain diabaikan. Kekasaran permukaan ideal (yang didapatkan pada kondisi ideal) pada proses pembubutan dimana ujung pahat membentuk radius ditunjukkan oleh gambar 2.9.



Gambar 2.9. Model kekasaran permukaan ideal  
(Sumber: Boothroyd, 1981: 138)

Dari gambar 2.9 didapatkan suatu model matematis sebagai berikut (Boothroyd, 1981:138):

$$R_a = \frac{0,0321 f^2}{r_e} \quad (2-16)$$

Dimana  $f$  adalah besar *feeding* yang digunakan, dan  $r_e$  adalah radius ujung pahat.

### 2.4.2 Kekasaran Permukaan Natural

Pada prakteknya, tidak selalu kita dapatkan kekasaran permukaan yang sesuai dengan teori di atas. Salah satu faktor yang cukup mempengaruhi kekasaran permukaan adalah besar dari sudut pelepasan geram (*built-up edge*) pada ujung pahat. Semakin besar nilai sudut ini, maka akan semakin kasar permukaan benda kerja yang dihasilkan, begitu pula sebaliknya. Faktor-faktor lain yang juga cukup berpengaruh terhadap kekasaran permukaan antara lain:

1. Timbulnya getaran (*chatter*) pada proses permesinan.

2. Tidak akuratnya pergerakan dari mesin, seperti gerakan dari kereta luncur pahat pada mesin bubut.
3. Ketidaktepatan pada mekanisme pemakanan.
4. Cacat pada struktur material benda kerja.
5. Jenis geram yang dihasilkan yaitu *discontinuous* pada pemrosesan benda kerja yang sifatnya getas (*brittle*).
6. Terjadi sobekan (*tearing*) pada material benda kerja yang mempunyai sifat ulet (*ductile*) yang dipotong dengan kecepatan rendah.
7. Kerusakan permukaan akibat aliran geram, dan lain-lain.

## **2.5 Pendekatan Metode Elemen Hingga**

### **2.5.1 Definisi Metode Elemen Hingga**

Larry J. Segerlind (1984) menyatakan bahwa metode elemen hingga adalah suatu prosedur numerik untuk menyelesaikan persoalan fisika melalui sebuah persamaan diferensial atau juga teorema energi. Daryl L. Logan (1992) menyatakan bahwa metode elemen hingga adalah suatu metode numerik untuk menyelesaikan persoalan-persoalan *engineering* dan fisika matematis. Sedangkan Saeed Moaveni (1999) menjelaskan bahwa metode elemen hingga adalah suatu prosedur numerik untuk mendapatkan solusi dari berbagai permasalahan *engineering*, seperti analisis tegangan, perpindahan panas, elektromagnetik, dan aliran fluida.

Dari beberapa pendefinisian mengenai metode elemen hingga di atas, maka dapat ditarik sebuah kesimpulan bahwa metode elemen hingga adalah suatu prosedur numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan di bidang *engineering* maupun bidang fisika matematis melalui sebuah persamaan diferensial atau juga teorema energi. Berbagai persoalan *engineering* dapat diselesaikan dengan menggunakan metode elemen hingga. Seperti persoalan analisis tegangan, perpindahan panas, aliran fluida, dan juga keelektromagnetisan.

### **2.5.2 Metode Elemen Hingga Untuk Proses Pemotongan**

Analisis proses pemotongan logam dengan menggunakan metode elemen hingga termasuk dalam jenis analisis nonlinier geometri. Dimana analisis ini melibatkan perpindahan, regangan, dan rotasi yang besar pada elemen. Dengan tujuan akhir adalah menentukan posisi ekuilibrium dan konfigurasi dari elemen.

### 2.5.2.1 Persamaan Kesetimbangan Analisis Nonlinier

Persamaan kesetimbangan analisis nonlinier dengan menggunakan formulasi *Update Lagrangian* dirumuskan sebagai berikut (K.J. Bathe, 1996: 541):

$$({}^t\mathbf{K}_L + {}^t\mathbf{K}_{NL})\mathbf{u} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^t\mathbf{F} \quad (2-17)$$

Dimana :  ${}^t\mathbf{K}_L$  = Matrik kekakuan linier

$$= \int_{0^V} {}^t\mathbf{B}_L^T {}^t\mathbf{C} {}^t\mathbf{B}_L d^tV$$

${}^t\mathbf{K}_{NL}$  = Matrik kekakuan nonlinier

$$= \int_{0^V} {}^t\mathbf{B}_{NL}^T {}^t\tau {}^t\mathbf{B}_{NL} d^tV$$

$\mathbf{u}$  = Matrik transformasi perpindahan

${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}$  = Vektor beban eksternal pada nodal, pada waktu  $t + \Delta t$ .

$$= \int_{0^S} \mathbf{H}^{ST} {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}^S d^0S + \int_{0^V} \mathbf{H}^T {}^{t+\Delta t}\mathbf{f}^B d^0V$$

${}^t\mathbf{F}$  = Vektor gaya pada nodal ekivalen terhadap tegangan elemen pada waktu  $t$ .

$$= \int_{{}^tV} {}^t\mathbf{B}_L^T {}^t\hat{\tau} d^tV$$

${}^t\mathbf{C}$  = Matrik konstitutif material.

$\mathbf{H}^S$  = Matrik interpolasi *surface-displacement*.

$\mathbf{H}$  = Matrik interpolasi *volume-displacement*.

${}^{t+\Delta t}\mathbf{f}^S$  = Vektor gaya permukaan terhadap elemen.

${}^{t+\Delta t}\mathbf{f}^B$  = Vektor gaya bodi terhadap elemen.

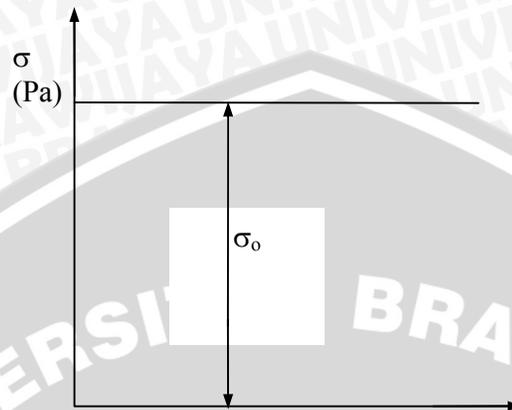
### 2.5.2.2 Model Material

Pemodelan material berfungsi untuk memudahkan penyelesaian dari suatu persoalan matematis material tanpa harus meninggalkan kondisi yang sebenarnya terlalu jauh. Model material yang digunakan pada penelitian ini yaitu model material *rigid* dan *piecewise-linear plasticity model*.

#### 1. Model Material Rigid

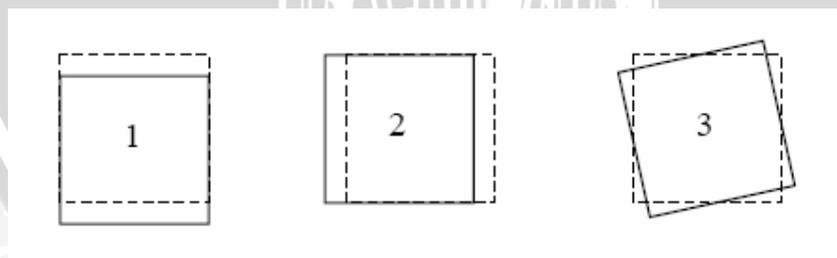
Model material *rigid* disebut juga model material plastik ideal. Dimana untuk material ideal ini besar regangan elastis dari spesimen yaitu sama dengan nol (*rigid* / kaku sempurna) sampai nilai dari tegangan material mencapai besar  $\sigma_0$ , kemudian aliran

regangan plastis dari material terjadi dengan besar tegangan konstan. Pemodelan tipe ini cocok digunakan untuk melakukan pendekatan pada material logam kaku yang dalam kondisi perlakuan dingin.



Gambar 2.10. Model material *Rigid*  
(Sumber: Dieter, 1992: 57)

Menggunakan model material *rigid* untuk menentukan suatu elemen kaku dapat mengurangi waktu perhitungan suatu analisis menggunakan metode elemen hingga. Pada saat material *rigid* dipilih, maka setiap nodal hanya memiliki enam derajat kebebasan yaitu perpindahan pada sumbu X, Y, Z, dan rotasi pada sumbu X, Y, dan Z. Secara standar pada *software* ANSYS, massa, pusat massa, dan inersia pada elemen *rigid*, dihitung berdasarkan volume elemen dan massa jenisnya. Gaya dan momen yang bekerja pada elemen dijumlahkan dari gaya-gaya dan momen-momen yang bekerja pada nodal.



Gambar 2.11. Model derajat kebebasan model material *rigid*  
(Sumber: Some Theoretical Aspects of FEM: 5)

## 2. Model Material *Piecewise-linear Plasticity*

Model ini sangat umum digunakan, terutama untuk memodelkan material baja.

Dimana model ini melakukan pendekatan multilinier pada kurva tegangan regangan

suatu material berdasarkan model *Cowper-Symonds* (ANSYS Documentation, ANSYS LS-DYNA User's Guide: 7.2.3.11):

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{\varepsilon}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \quad (2-18)$$

Dimana :  $\sigma$  = tegangan plastis (N/m<sup>2</sup>)

$\sigma_0$  = tegangan yield (N/m<sup>2</sup>)

$\varepsilon$  = regangan plastis

$C$  = konstanta

$P$  = konstanta

## 2.6 ANSYS LS-DYNA

ANSYS LS-DYNA merupakan *software* simulasi struktural eksplisit nonlinier hasil kolaborasi antara ANSYS, Inc. dan Livermore Software Technology Corporation (LSTC). *Software* ini sangat cocok digunakan untuk mensimulasikan kejadian singkat (seperti tumbukan hebat) maupun lama dan juga untuk fenomena deformasi permanen (seperti proses pembentukan pada industri permesinan).

ANSYS LS-DYNA adalah gabungan antara teknologi penyelesaian dinamik eksplisit dari LS-DYNA hasil pengembangan LSTC dengan teknologi *preprocessing-postprocessing* pada *software* ANSYS. Kombinasi teknologi ini sangat membantu para *engineer* dalam menganalisis berbagai fenomena nonlinier yang dapat ditemukan pada uji tabrakan, pembentukan logam, dan juga kerusakan pada bencana besar. Karena ANSYS LS-DYNA dibuat dengan teknologi yang sama dengan ANSYS Multiphysics, maka sangat mudah apabila dikombinasikan dengan produk ANSYS lain yang kita butuhkan.

Kelebihan dari penggunaan *software* ANSYS antara lain:

1. Memiliki kemampuan untuk mendiskritisasi model dengan sangat halus
2. Mampu bekerja dengan elemen yang lebih banyak
3. Menghasilkan output dengan ketelitian yang tinggi
4. Dapat melakukan analisis struktural, analisis termal, analisis elektris, analisis magnetis, dan analisis fluida.

### 2.6.1 Langkah-langkah Analisis Menggunakan ANSYS

Secara umum langkah-langkah analisis dengan menggunakan *software* ANSYS dibagi menjadi tiga, yaitu :

#### 1. *Preprocessing* (Proses awal)

Tahap-tahap penting dalam *preprocessing* antara lain:

- Pemodelan geometri: di sini dilakukan proses pemodelan geometri baik 1D, 2D, maupun 3D.
- Pemilihan tipe elemen: digunakan untuk mendiskritisasikan model yang dibuat.
- Material properti: memasukkan input data dari material yang digunakan.
- *Meshing*: pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil (elemen diskrit).

#### 2. *Solution* (Proses Solusi)

Tahap-tahap penting dalam proses solusi yaitu:

- Mendefinisikan analisis solusi yang dipakai (*Analysis Type*).
- Memasukkan kondisi batas (*constraint*).
- Menerapkan pembebanan.
- Penyelesaian (*Solving*).

#### 3. *General Postprocessing* (Proses Pembacaan Hasil)

Hasil analisis dari proses solusi dapat ditampilkan dalam bentuk tabel maupun dalam bentuk *plot result* dan *list result*.

##### - *Plot result*

Dengan menggunakan *contour plot* akan tampak distribusi tegangan atau variabel lain pada model sehingga mudah dalam menginterpretasikan informasi yang disajikan. Di sini model digambarkan dengan sebaran warna yang menunjukkan besarnya tegangan yang terjadi.

##### - *List result*

Hasil analisis dalam bentuk *list result* berupa tabel yang memberikan informasi secara detail nilai perpindahan, tegangan dan regangan yang terjadi pada tiap node maupun elemennya.

##### - Animasi

Hasil analisis yang diperoleh juga ditampilkan dalam bentuk simulasi (animasi).

### 2.6.2 Aplikasi ANSYS

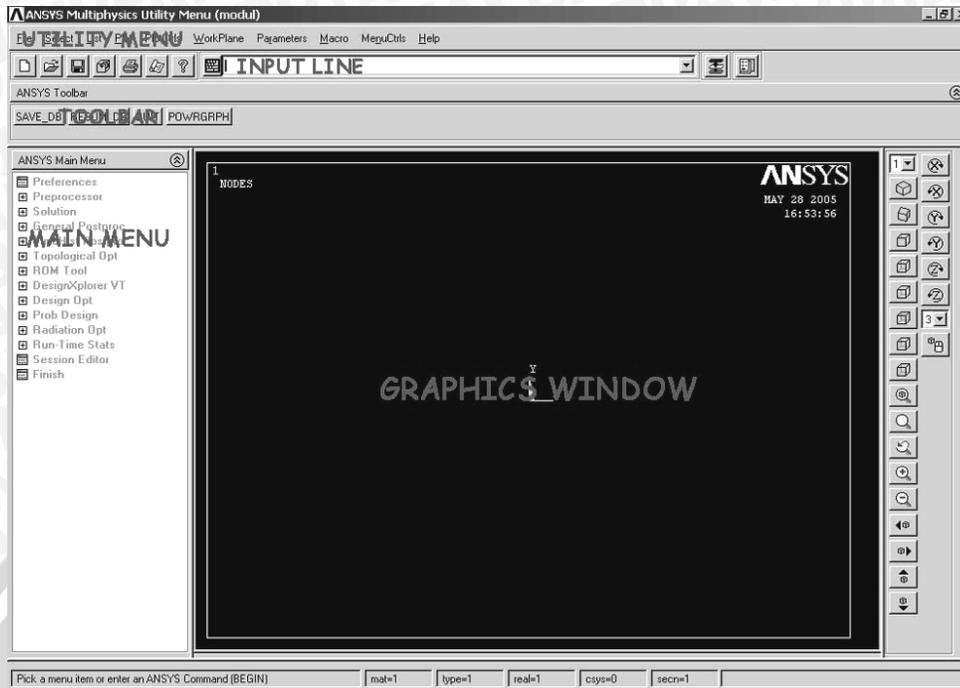
Beberapa aplikasi dari ANSYS adalah untuk menyelesaikan persoalan-persoalan metode elemen hingga diantaranya yaitu:

1. Analisis struktural, termasuk di dalamnya *Modal Analysis* (analisis getaran), analisis statik, *transient analysis*, dan lain-lain.
2. Analisis mekanika fluida, seperti analisis aerodinamika pada sayap pesawat, aerodinamika mobil, aliran air pada pipa, aliran fluida pada knalpot kendaraan, aliran udara pada pegunungan, dan lain-lain.
3. Analisis termal, seperti perpindahan panas pada aliran fluida, perpindahan panas pada logam, dan lain sebagainya.
4. Analisis kelistrikan.
5. Analisis medan magnet.
6. Dan juga analisis gabungan (*Coupled-field Analysis*) yang merupakan gabungan dari beberapa analisis yang digunakan untuk menganalisis suatu fenomena.

### 2.6.3 Operasional ANSYS

Cara paling mudah untuk pengoperasionalan ANSYS adalah dengan memanfaatkan fasilitas *Graphical User Interface* (GUI), dengan menggunakan fasilitas ini kita tidak perlu menghafalkan dan menuliskan perintah (*Command*). Berikut adalah bagian-bagian utama pada ANSYS GUI:

1. *Utility Menu* : Terdiri dari fungsi-fungsi utilitas, seperti *file control*, *selecting*, dan *graphic control*. Juga dapat keluar dari ANSYS melalui fasilitas ini.
2. *Main Menu* : Terdiri dari fungsi-fungsi utama ANSYS, fungsi-fungsi ini termasuk diantaranya *preprocessor*, *solution*, *general postprocessor*, *design optimizer*, dan lain-lain.
3. *Toolbar* : Terdiri dari tombol-tombol untuk memudahkan pemakai, misalnya untuk penyimpanan (*saving*), *quit*, dan lain-lain.
4. *Input Window* : Digunakan apabila kita menggunakan *command* (perintah).
5. *Graphic Window* : Sebuah window dimana grafik ditampilkan.



Gambar 2.12. ANSYS GUI  
(Sumber: [www.mece.ualberta.ca](http://www.mece.ualberta.ca))

## 2.7 Hipotesis

Berdasarkan kajian pustaka yang telah dilaksanakan, maka dapat ditarik hipotesis yaitu semakin besar kedalaman potong maka akan menghasilkan kekasaran permukaan akibat getaran pahat yang semakin besar pula.