

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Proses permesinan merupakan proses yang paling banyak dilakukan dalam pembuatan komponen mesin terutama yang terbuat dari logam. Oleh sebab itu, pengetahuan mengenai sifat kemampumesinan (*machineability*) dari berbagai benda kerja merupakan hal sangat penting bagi industri permesinan.

Pada suatu proses produksi dengan mesin bubut parameter pemotongan akan mempengaruhi tingkat produktivitas. Produktivitas merupakan hal yang sangat penting dalam industri permesinan karena akan berdampak terhadap profit perusahaan. Pemilihan nilai parameter pemotongan yang tepat akan berpengaruh pada kualitas hasil pembubutan dan kondisi permesinan yang lebih optimal.

Untuk mengetahui parameter permesinan yang optimal, perlu dilakukan penelitian mengenai hal-hal yang mempengaruhi proses permesinan tersebut. Pada proses bubut, gaya pemotongan yang terjadi selama pembubutan berlangsung menjadi hal yang cukup dipertimbangkan, karena akan mempengaruhi besarnya daya pemotongan yang dibutuhkan. Hal ini menjadi sangat penting karena tiap-tiap mesin bubut memiliki batas daya pemotongan.

Kecepatan pemotongan (*cutting speed*), pemakanan (*feed*), dan kedalaman pemotongan (*depth of cut*) merupakan parameter pemotongan yang harus ditentukan dalam setiap proses pembubutan. Hal ini tentu mempengaruhi besarnya gaya potong dalam pembubutan. Pada industri pemotongan logam, seringkali melakukan percobaan pembubutan untuk mendapatkan parameter permesinan yang optimal dan ini tentunya tidak murah memakan banyak waktu.

Analisis gaya potong yang terjadi pada proses bubut dapat dilakukan secara simulasi menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat komputer. Salah satu perangkat lunak yang sering digunakan untuk memodelkan suatu proses permesinan adalah DEFORM 3D. DEFORM 3D merupakan *engineering software* yang diciptakan untuk memodelkan deformasi khususnya

pada logam. Dengan memanfaatkan metode modeling, dapat mengurangi biaya untuk proses *trial and error* pembuatan *prototype* benda kerja aktual dan dapat pula mengurangi banyaknya eksperimen yang dibutuhkan pada proses manufaktur. Selain itu dengan metode simulasi dapat dicapai kondisi permesinan tertentu yang sulit dicapai pada eksperimen secara langsung.

## 1.2 RUMUSAN MASALAH

Dari latar belakang permasalahan di atas dapat dirumuskan permasalahan yang ada, yaitu :

“Bagaimana hasil analisis pengaruh *cutting speed*, *feed*, dan *depth of cut* terhadap gaya potong pada proses pembubutan Titanium Ti-6Al-4V dengan simulasi metode elemen hingga?”

## 1.3 BATASAN MASALAH

Agar dalam pembahasan menjadi lebih terarah dalam pokok permasalahan maka diperlukan beberapa batasan masalah sebagai berikut :

1. Parameter pemotongan yang digunakan adalah:

*Cutting Speed* ( $V_c$ ) = 45, 60, dan 75 m/menit.

*Feed* ( $f$ ) = 0.25, 0.30, dan 0.35 mm/rev.

*Depth of cut* ( $a$ ) = 0.5, 1.0, dan 1.5 mm.

2. Simulasi dengan metode elemen hingga, menggunakan perangkat lunak DEFORM 3D, dengan ketentuan:

Model material : Titanium alloy (Ti-6Al-4V)

Model pahat : pahat insert tipe TNMA332

3. Analisa gaya potong dipandang menurut sistem orthogonal.

## 1.4 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian yang ingin dicapai adalah untuk mengetahui pengaruh *cutting speed*, *feed*, dan *depth of cut* terhadap gaya potong pada proses pembubutan Titanium Ti-6Al-4V dengan simulasi metode elemen hingga.

### 1.5 MANFAAT PENELITIAN

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Sebagai referensi bagi industri permesinan untuk peningkatan produktivitas dan kualitas produk yang dihasilkan.
2. Dapat dijadikan sebagai referensi tambahan bagi mahasiswa teknik mesin pada khususnya dalam penelitian – penelitian selanjutnya tentang pemotongan logam.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

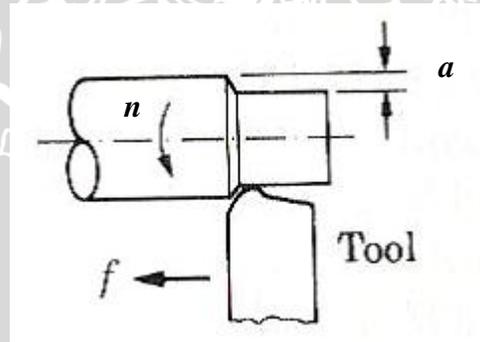
1. **Soegiharjo (2002)** melakukan simulasi komputer untuk memprediksi besarnya daya pemotongan pada proses *cylindrical turning* berdasarkan parameter *undeformed chip thickness*. Simulasi dilakukan menggunakan program Fortran 77 dengan berdasarkan perhitungan rumus daya pemotongan. Dalam penelitian ini tidak dilakukan validasi dengan hasil eksperimen.
2. **Villumsen (2005)** telah melakukan penelitian mengenai analisis gaya pemotongan pada proses pembubutan menggunakan simulasi metode elemen hingga. Perangkat lunak yang digunakan adalah ANSYS LS-DYNA, dan simulasi dilakukan secara 2D. Hasil simulasi kemudian divalidasi dengan eksperimen namun perbedaan nilai gaya potong cukup besar yaitu 59,9%.
3. **Kosaraju, et.al. (2012)** melakukan eksperimen untuk mengetahui pengaruh parameter permesinan pada proses pembubutan titanium Ti-6Al-4V. Penelitian dilakukang dengan metode Taguchi, kemudian dianalisa dengan ANOVA.

#### 2.2 Pemotongan Logam dengan Mesin Bubut

Proses pemotongan logam merupakan suatu proses yang digunakan untuk mengubah bentuk suatu produk dari logam (komponen mesin) dengan cara memotong. Selain itu Proses pemotongan logam merupakan kegiatan terbesar yang dilakukan pada industri manufaktur. Prinsip pemotongan logam dapat defenisikan sebagai sebuah aksi dari sebuah alat potong yang dikontakkan dengan sebuah benda kerja untuk membuang permukaan benda kerja tersebut dalam bentuk geram.

Salah satu proses pemesinan yang digunakan pada pemotongan logam adalah proses bubut. Proses ini bertujuan untuk membuang material dimana benda kerja dicekam menggunakan sebuah chuck atau pencekam dan berputar pada sebuah sumbu, alat potong bergerak arah aksial dan radial terhadap benda kerja sehingga terjadi pemotongan dan menghasilkan permukaan yang konsentris dengan sumbu putar benda kerja.

Mesin bubut atau *lathe machine* merupakan mesin perkakas untuk tujuan proses pemotongan logam. Operasi dasar dari mesin bubut adalah melibatkan benda kerja yang berputar dan cutting tool-nya bergerak linier. Kekhususan operasi mesin bubut adalah digunakan untuk memproses benda kerja dengan hasil/bentuk penampang lingkaran atau benda kerja silinder. Gambar 2.1 adalah skematis dari sebuah proses bubut dimana  $n$  adalah putaran poros utama,  $f$  adalah laju pemakanan, dan  $a$  adalah kedalaman potong.



Gambar 2.1 Proses Pembubutan

Sumber : Paul D.G., *Material and Processes in Manufacturing*, 1990

Ada tiga parameter utama yang berpengaruh terhadap gaya potong, keausan pada pahat, dan kekasaran permukaan benda kerja yang dihasilkan. Ketiga parameter itu adalah kecepatan potong ( $v$ ), pemakanan ( $f$ ), dan kedalaman potong ( $a$ ).

### 2.3 Parameter Pemotongan

Untuk menghasilkan mutu suatu produk yang baik dalam proses pemesinan sangat dipengaruhi oleh parameter pemotongan. Elemen dasar parameter pemotongan pada proses bubut adalah sebagai berikut :

#### 2.3.1 Kecepatan potong (*cutting speed*)

Kecepatan potong adalah kecepatan keliling dari benda kerja melintasi ujung pahat, kecepatan potong umumnya dinyatakan dalam satuan meter per menit (m/min).

Pemilihan kecepatan potong yang benar adalah harus disesuaikan dengan material dari benda kerja yang akan dibubut dan material pahat yang digunakan. Pemilihan kecepatan potong yang terlalu tinggi menyebabkan ujung pahat akan mudah tumpul dan aus sehingga akan banyak waktu yang terbuang untuk mengasah/menggerinda atau mengganti pahat tersebut, bila pemilihan kecepatan potong terlalu rendah maka efisiensi kerjanya rendah.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \quad \text{(Rochim, 1993:14)} \quad (2-1)$$

n = putaran spindel (rpm)  
d = diameter rata – rata (mm)

$$d = \frac{(d_o + d_m)}{2} \text{ (mm)} \quad \text{(Rochim, 1993:14)} \quad (2-2)$$

Pada sebagian besar material benda kerja (*workpiece*) telah dilakukan penelitian tentang besarnya kecepatan potong yang sebaiknya digunakan sesuai dengan sifat material tersebut. Dari nilai kecepatan potong yang disarankan ini dapat ditentukan putaran *spindel* (n) yang sebaiknya akan digunakan.

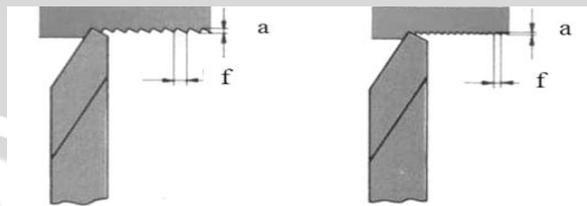
$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot d} \text{ (rpm)} \quad \text{(Rochim, 1993:14)} \quad (2-3)$$

Kecepatan potong yang akan digunakan dapat ditentukan berdasarkan material benda kerja dan material pahat yang digunakan. Untuk material benda kerja yang semakin keras maka kecepatan potong harus dipilih yang rendah agar pahat tidak cepat aus. Sedangkan jika material pahat yang digunakan keras seperti pahat karbida maka dipilih kecepatan yang tinggi untuk meningkatkan efisiensi kerja pembubutan.

Pada kecepatan potong rendah kecepatan aliran geram juga rendah sehingga proses pelepasan panas akan lambat yang apabila daya lekat antara material benda kerja dengan pahat cukup kuat maka akan terjadi proses penumpukan lapisan material benda kerja pada ujung mata potong pahat. Penumpukan lapisan material benda kerja ini biasa disebut dengan *Built Up Edge (BUE)*. Proses penumpukan material ini juga dipengaruhi oleh temperatur pemotongan. *BUE* akan menempel pada ujung pahat sehingga akan merubah geometri pahat tersebut dan akan mempengaruhi hasil proses pembubutan.

### 2.3.2 Pemakanan (*feed*)

Pemakanan adalah jarak yang ditempuh oleh pahat potong untuk memotong benda kerja dalam satu putaran benda kerja. Contoh : apabila suatu pembubutan kecepatan pemakanannya diatur 0,4 mm maka pahat potong akan menempuh jarak 0,4 mm dalam setiap putaran benda kerja. Proses pemakanan benda kerja dengan variasi *feed* yang berbeda dapat dilihat pada gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2.2 Variasi *feed* pada proses pemakanan benda kerja.

Sumber : Suharyono. 2010. *Buku 2 Permesinan*.

Dalam proses pembubutan dikenal dua jenis pemotongan, yaitu pemotongan kasar (*roughing cut*) dan pemotongan akhir (*finishing cut*). Pada pemotongan kasar pengurangan benda kerja dilakukan tanpa mempertimbangkan kualitas permukaan hasil pembubutan, sehingga dapat dipilih kecepatan pemakanan yang tinggi. Sedangkan pada proses *finishing* ditujukan untuk mendapatkan hasil akhir permukaan dengan nilai kekasaran yang baik sehingga kecepatan pemakanan yang digunakan adalah yang rendah.

Dalam pembuatan bentuk ulir, *pitch* yang ditentukan juga merupakan besarnya *feed*. Sehingga dalam pembuatan bentuk ulir *feed* yang dijalankan harus tetap atau konstan hingga akhir pengerjaan ulir.

### 2.3.3 Kedalaman pemotongan (*depth of cut*)

Kedalaman pemotongan adalah ketebalan geram (*chip*) yang akan dilepaskan oleh pahat dari benda kerja. Untuk proses pembubutan dengan pengurangan diameter yang besar kedalaman pemotongan dilakukan dengan cara bertahap, yaitu proses pengasaran (*roughing*) dan proses pemotongan akhir (*finishing*). Pada proses pengasaran digunakan kedalaman pemotongan yang cukup tinggi karena pada proses tersebut tidak memperhatikan kualitas permukaan hasil pemotongan dan selain itu untuk efisiensi proses pemotongan. Sedangkan pada proses pemotongan akhir digunakan kedalaman pemotongan yang rendah agar didapatkan kualitas permukaan yang baik.

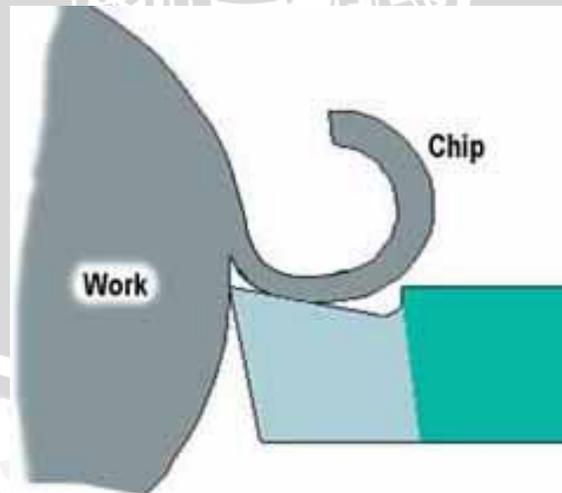
## 2.4 Tipe Geram

Tipe geram yang terbentuk saat proses pembubutan sangatlah berpengaruh terhadap kualitas hasil pembubutan atau kualitas pada permukaan hasil bubutan. Sehingga dalam praktiknya pembentukan geram

ini harus diperhatikan agar dapat meningkatkan kualitasnya. Ada empat jenis geram menurut pembentukanya, antara lain:

1. Geram kontinyu (*continuous chip*)

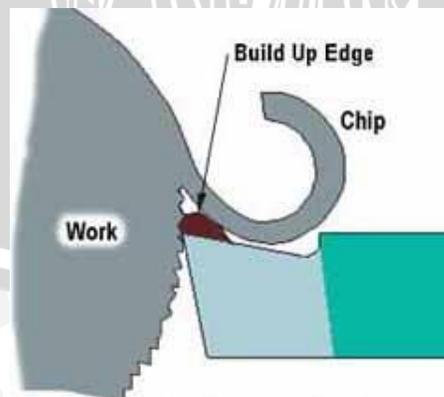
Geram kontinyu dihasilkan ketika material terdeformasi tanpa patah dan mengalir diatas mata potong seperti pita. Dapat dikatakan material yang telah terdeformasi melekat dengan material lain hingga terbentuk geram yang kontinyu. Ini dikarenakan material yang terdeformasi terjadi gesekan antara material dengan pahat hingga menghasilkan panas dan karena panas yang dihasilkan tersebut maka geram hasil pemotongan menyatu tanpa terputus. Geram jenis ini dihasilkan dari pemotongan material yang ulet dan dengan kecepatan pemotongan yang tinggi. Meskipun umumnya geram jenis ini menghasilkan permukaan yang halus, tetapi tidak semua menginginkanya, karena bentuk geramnya yang panjang bisa melilit holder dan untuk membersihkannya harus menghentikan proses sehingga terjadi pemborosan waktu. Hal ini biasanya dapat diatasi dengan bantuan chip breaker pada pahat itu sendiri. Bentuk geram jenis ini dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Geram kontinyu  
Sumber : mmu.ic.polyu.edu.hk

2. Geram kontinyu dengan *built-up edge (BUE)*

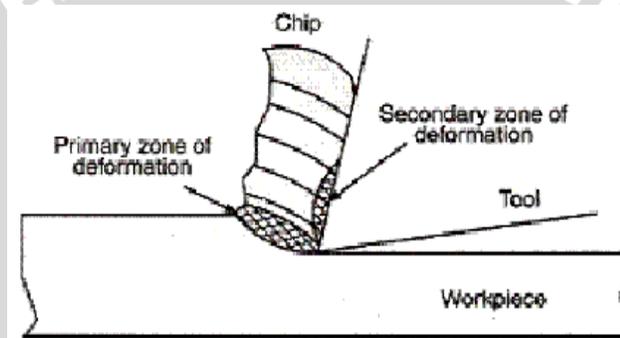
Jenis geram ini sebenarnya mirip dengan geram kontinyu, hanya saja ada *BUE* yang terbentuk pada ujung mata pahat. *BUE* terbentuk akibat gesekan antara material pahat dengan benda kerja, hingga menghasilkan panas, geram yang tertinggal pada mata pahat menjadi sangat lengket hingga seperti dilaskarena panas yang dihasilkan oleh gesekan pahat dengan benda kerja tersebut. Seiring dengan bertambahnya *BUE* maka akan terjadi perpecahan aliran geram menjadi dua. Apabila terjadi peningkatan tegangan geser maka *BUE* akan hilang ikut aliran, tetapi segera akan digantikan dengan *BUE* lagi yang baru terpotong, begitu seterusnya. Pada saat *BUE* terlepas dari pahat maka akan membawa sebagian kecil material pahat, jika terus berlanjut maka pahat akan mengalami keausan. Geram jenis ini biasanya muncul ketika memotong material yang ulet dengan kecepatan potong yang relatif rendah. Geram dengan *BUE* ini tidak diharapkan, karena menghasilkan permukaan yang kasar, meningkatkan konsumsi daya dan menyebabkan pahat lebih mudah aus. Bentuk dari geram jenis ini dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Geram kontinyu dengan *BUE*  
Sumber : mmu.ic.polyu.edu.hk

3. Geram bersegmen (*segmented chip*)

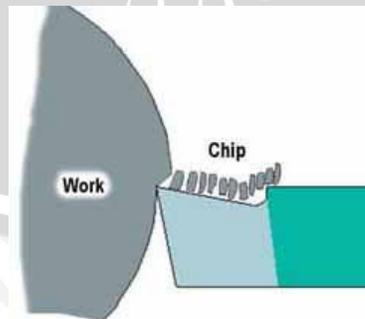
Geram bersegmen merupakan geram semu kontinyu, karena menghasilkan geram yang tidak pasti, kadang panjang kadang juga pendek. Geram jenis ini dihasilkan ketika memotong material yang ulet dengan kecepatan potong yang rendah serta kedalaman pemotongan yang besar. Bentuk geram ini dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Geram bersegmen  
Sumber : mmu.ic.polyu.edu.hk

4. Geram diskontinyu (*discontinuous chip*)

Geram diskontinyu terdiri dari bersegmen – segmen yang terpisah antara satu dengan yang lainnya.



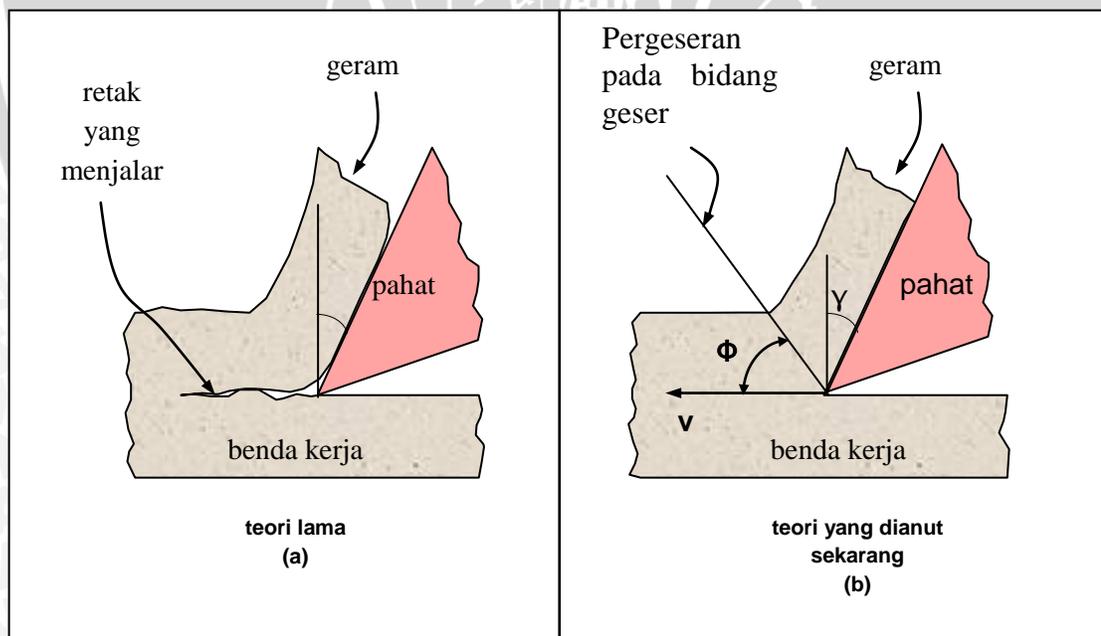
Gambar 2.6 Geram diskontinyu

Sumber : mmu.ic.polyu.edu.hk

Geram ini dihasilkan ketika melakukan proses pemotongan dengan kecepatan terlalu rendah atau terlalu tinggi dan dengan kedalaman pemotongan yang besar serta sudut geram yang terlalu kecil. Material yang digunakan hingga menyebabkan geram diskontinyu adalah material yang getas, kekakuan alat potong yang rendah juga akan mengakibatkan terjadinya diskontinyu geram serta efektivitas penggunaan cairan pendingin yang masih kurang, sehingga menghasilkan permukaan yang kasar. Geram bentuk ini terlihat pada gambar 2.6.

## 2.5 Mekanisme Pembentukan Geram

Pada mulanya diperkirakan bahwa geram terbentuk karena adanya retak rambut (*micro crack*) yang timbul pada benda kerja tepat diujung pahat pada saat pemotongan dimulai. Dengan bertambahnya tekanan pahat, retak rambut tersebut menjalar kedepan sehingga terjadilah geram, seperti ditunjukkan gambar 2.7(a).



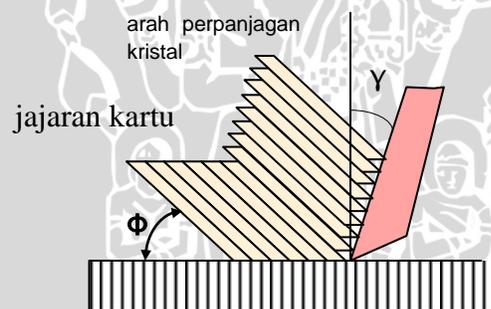
Gambar 2.7 Teori tentang pembentukan geram.

Sumber : www.scribd.com (modul 5 CNC Nutranta, R. 2010)

Anggapan ini sekarang sudah ditinggalkan berkat hasil berbagai penelitian dalam mempelajari mekanisme pembentukan geram. Logam yang pada umumnya bersifat ulet (*ductile*) apabila mendapat tekanan akan timbul tegangan (*stress*) didaerah sekitar konsentrasi gaya penekanan dari pahat.

Tegangan pada logam (benda kerja) tersebut mempunyai orientasi yang kompleks dan pada salah satu arah akan terjadi tegangan geser (*shearing stress*) yang maksimum. Apabila tegangan geser ini melebihi kekuatan logam yang bersangkutan maka akan terjadi deformasi plastis yang menggeser dan memutuskan material benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser (*shear plane*) sebagaimana gambar 2.7(b).

Bidang geser mempunyai lokasi tertentu yang membuat sudut terhadap vektor kecepatan potong, dan dinamakan dengan sudut geser (*shear angle*,  $\Phi$ ). Proses terbentuknya geram tersebut dapat dianalogikan dengan tumpukan kartu sebagai berikut :



Gambar 2.8 Pembentukan geram dan deformasi bahan.  
Sumber: www.scribd.com (modul 5 CNC Nutranta, R. 2010)

Bila setumpuk kartu dijajarkan dan diatur dengan sedikit miring (sesuai dengan sudut geser,  $\Phi$ ) kemudian didorong dengan papan atau penggaris yang membuat sudut terhadap garis vertikal (sesuai dengan sudut geram,  $\gamma_0$ ) maka kartu diujung papan akan tergeser keatas relatif terhadap kartu dibelakangnya. Pergeseran itu berlangsung secara berurutan dan kartu terdorong melewati bidang atas papan, (gambar 2.8). Analogi kartu tersebut menerangkan keadaan

sesungguhnya dari kristal logam yang terdeformasi sehingga merupakan lapisan tipis yang tergeser pada bidang geser.

## 2.6 Komponen Gaya Pembentukan Geram

Suatu analisis mekanisme pembentukan geram yang dikemukakan oleh Merchant berdasarkan teorinya atas model pemotongan sistem tegak (*orthogonal system*). Sistem pemotongan tegak merupakan penyederhanaan dari sistem pemotongan miring (*oblique system*) dimana gaya dan komponennya hanya dianalisa pada suatu bidang. Beberapa asumsi yang digunakan dalam menganalisa model adalah :

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

Karena sistem gaya dipandang hanya pada satu bidang (bukan ruang), maka gaya total dapat dipecahkan menjadi dua komponen gaya yang saling tegak lurus. Tergantung dari cara pemisahan komponen, dalam hal ini dapat dikemukakan tiga cara yaitu :

1. Gaya total (F) ditinjau terhadap proses deformasi material, dapat dipecahkan kedalam 2 komponen :
  - $F_s$  = gaya geser yang mendeformasikan material pada bidang geser sehingga melampaui batas elastis (N)
  - $F_{sn}$  = gaya normal pada bidang geser yang menyebabkan pahat tetap menempel pada benda kerja (N)
2. Gaya total (F) dapat diketahui arah dan besarnya dengan cara membuat dinamometer (alat ukur gaya, dimana pahat dipasang padanya dan alat

tersebut dipasang pada mesin perkakas) yang mengukur 2 komponen gaya :

-  $F_v$  = gaya potong, searah dengan kecepatan potong (N)

-  $F_f$  = gaya makan, searah dengan kecepatan makan (N)

3. Gaya total ( $F$ ) yang bereaksi pada bidang geram (bidang pada pahat dimana geram mengalir) dibagi menjadi dua komponen untuk menentukan koefisien gesek dari geram terhadap pahat :

-  $F_\gamma$  = gaya gesek pada bidang geram (N)

-  $F_{\gamma n}$  = gaya normal pada bidang geram (N)

Karena berasal dari satu gaya yang sama mereka dapat dilukiskan pada suatu lingkaran dengan diameter sama dengan gaya total ( $F$ ), sebagaimana gambar 2.9. Lingkaran tersebut digambarkan persis diujung pahat sedemikian rupa sehingga semua komponen gaya menempati lokasi seperti yang dimaksud. Gambar ini merupakan sistem gaya pada pemotongan orthogonal dan dalam prakteknya dapat didekati dengan menggunakan pahat dengan sudut  $K_r = 90^\circ$  dan sudut  $s = 0^\circ$  dengan kecepatan potong jauh lebih tinggi dari pada kecepatan makan.

Sewaktu pemotongan mulai berlangsung, gaya potong  $F_v$  akan membesar. Daerah dimuka mata potong akan mengalami tegangan geser dengan orientasi dan harga yang bervariasi. Salah satu bidang akan mengalami tegangan geser yang terbesar, dan dengan naiknya gaya potong maka tegangan geser pada bidang tersebut (bidang geser) akan melampaui batas elastis (*yield*) sehingga terjadi deformasi plastis yang menyebabkan terbentuknya geram. Bila hal ini telah terjadi maka gaya potong telah mencapai harga maksimum. Berdasarkan analisis geometrik dari lingkaran gaya, gaya potong  $F$  dapat diturunkan rumus berdasarkan lingkaran gaya pemotongan sebagai berikut :



Maka dengan demikian persamaan gaya potong :

$$F_v = \tau_{shi} \cdot b \cdot h \frac{\cos(\eta - \gamma_o)}{\sin \Phi \cdot \cos(\Phi + (\eta - \gamma_o))} \quad (N) \quad (2-5)$$

(Rochim, 1993:28) (2-5)

dari rumus (2-5) dapat disimpulkan beberapa variabel yang mempengaruhi gaya pemotongan sebagai berikut :

1. Tegangan geser (dinamis) menentukan besarnya gaya potong, dengan demikian kekuatan benda kerja merupakan faktor penentu dalam proses pemesinan. Dalam praktek telah diketahui bahwa untuk benda kerja aluminium lebih rendah dari pada gaya potong benda kerja baja. Dalam hal ini perlu dicatat bahwa tegangan geser tersebut harganya tidak dapat diukur secara langsung melalui percobaan tarik yang umum dilakukan bagi test kekuatan logam, sebab kecepatan regangnya yang terjadi dalam proses pemesinan sangat tinggi.
2. Semakin besar penampang geram, gaya potong akan semakin besar.
3. Sudut geram dan sudut geser menentukan besarnya gaya potong.

## 2.7 Pahat

### 2.7.1 Material Pahat

Proses pembentukan geram dengan cara permesinan melibatkan pertemuan antara dua jenis material pahat dan benda kerja. Untuk menjamin proses ini berjalan dengan baik maka diperlukan material pahat yang lebih unggul daripada material benda kerja. Keunggulan yang dimaksud meliputi sebagai berikut:

- Kekerasan

Kekerasan yang cukup tinggi melebihi kekerasan benda kerja, baik pada temperatur ruang maupun pada temperatur tinggi.

- Keuletan

Keuletan yang cukup besar, untuk menahan beban kejut yang terjadi selama proses permesinan.

- Sifat adhesi rendah

Hal ini sangat penting untuk mengurangi afinitas benda kerja terhadap pahat, mengurangi laju keausan, serta penurunan gaya pemotongan.

Pada saat proses penghasilan geram berlangsung, pahat dan benda kerja akan mengalami gaya gesek yang akan menimbulkan panas. Selain itu tekanan pada benda kerja terhadap pahat juga akan mempengaruhi keausan pada bidang-bidang utama pahat (bidang muka pahat dan bidang potong utama).

Proses keausan ini dapat berlangsung terus-menerus sehingga bisa mengubah bentuk dari mata potong. Karena perubahan bentuk ini permukaan benda kerja menjadi kasar. Untuk memperpanjang daya tahan pahat, maka material dari pahat harus mempunyai sifat cukup kuat dan keras untuk menahan tekanan dan temperatur tinggi akan tetapi tidak boleh terlalu rapuh serta memiliki ketahanan aus yang baik.

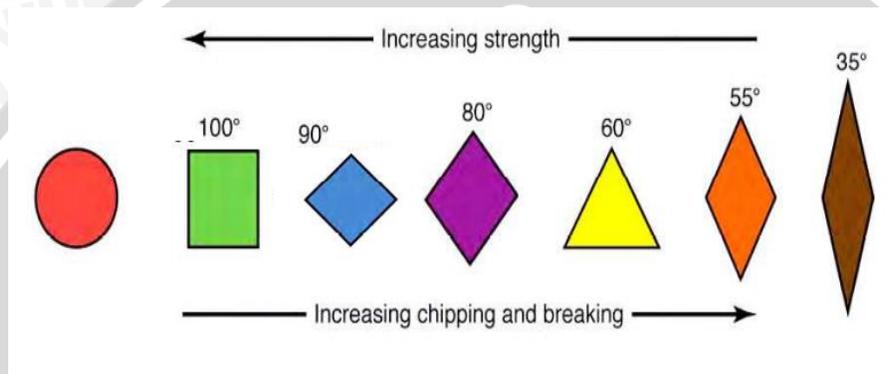
### 2.7.2 Pahat *Insert*

Pahat *insert* merupakan bagian dari alat potong yang biasa digunakan pada proses pemesinan. *Insert* ini dapat dipasang dan dilepas sesuai dengan kebutuhan. Bentuk dan ukurannya bermacam-macam, ada yang segi empat, segitiga, bulat atau bentuk lain yang disesuaikan dengan kebutuhan pemotongan. Pada gambar 2.4 merupakan salah satu contoh dari pahat *insert*.



Gambar 2.10 Pahat bubut sisipan (*inserts*)  
Sumber: *Korloy Technical Guide*

Geometri *insert* berpengaruh dalam proses pemotongan material. Bentuk sudut pada *insert* berpengaruh pada kekuatan, temperatur, ketahanan pemotongan, kemampuan pemotongan, *tool life*, *finishing* permukaan, *chatter* dan arah pembuangan *chip*. Pada gambar 2.11 ditunjukkan pengaruh dari beberapa geometri pahat *insert* terhadap kekuatan pahat itu dan kemampuan pelepasan geramnya.



Gambar 2.11 Berbagai geometri pahat dan kemampuannya.  
Sumber: *Korloy Technical Guide*

Pahat *insert* sangat banyak ragam/variasi berdasarkan fungsi, jenis material pahat dan kemampuan pahat tersebut. *Insert* sendiri dalam aplikasinya memiliki beberapa tipe yang berbeda-beda sesuai dengan bentuk dan ukuran. Tiap-tiap produsen pahat memiliki sistem penomorannya sendiri, namun pada umumnya pahat *insert* memiliki 4 huruf kapital di awal nomer serinya. Misalkan TNMA, maksudnya adalah :

- T = menunjukkan bentuk insert ( T = *Triangle 60°*)
- N = menunjukkan sudut bebas orthogonal ( N =  $0^\circ$ )
- M = menunjukkan toleransi insert
- A = menunjukkan konfigurasi lubang insert dan *chip breaker*

### 2.7.3 Geometri Pahat

Geometri pahat terdiri dari tiga bagian penting, yaitu:

1. Elemen pahat
  - a. Badan (*body*) : bagian pahat yang dibentuk menjadi mata potong.
  - b. Pemegang (*shank*) : bagian pahat untuk dipasangkan pada mesin perkakas.
  - c. Dasar (*base*) : bidang rata pada pemegang untuk meletakkan pahat.
2. Bidang pahat merupakan permukaan aktif dan selalu ada pada setiap pahat. Ada tiga bagian penting bidang pahat, yaitu:
  - a) Bidang geram (*face*) : bidang dimana geram mengalir.
  - b) Bidang utama (*major flank*) : bidang yang menghadap permukaan benda kerja. Permukaan benda kerja akan terpotong akibat gerakan pahat relatif terhadap benda kerja.
  - c) Bidang bantu (*minor flank*) : bidang yang menghadap permukaan potong dari benda kerja.

3. Mata potong

Mata potong yakni tepi dari bidang geram yang aktif memotong. Mata potong dari pahat tersebut adalah:

- Mata potong utama (*major cutting edge*) :  
Garis perpotongan antara bidang geram dengan bidang utama.
- Mata potong bantu (*minor cutting edge*) :  
Garis perpotongan antara bidang geram dengan bidang bantu.

Pada umumnya terdapat tiga jenis geometri pahat potong berdasarkan bentuk ujung pahat yang sering digunakan yaitu:

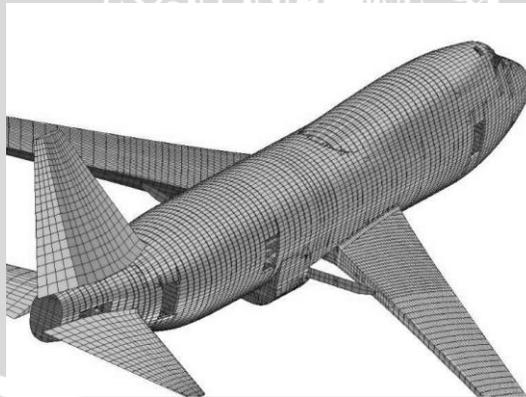
1. Mata potong pahat tajam (*up-sharp edge*)
2. Mata potong pahat membentuk radius (*hone or round edge*)
3. Mata potong pahat camfer (*chamfer edge*)

Desain dari geometri mata pahat potong ini berpengaruh terhadap parameter proses seperti ketahanan aus pahat.

## 2.8 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk memprediksi respon-respon sistem teknik yang mengalami kasus-kasus tertentu. Pada awal perkembangannya, metode elemen hingga dirancang untuk mendapatkan respon tegangan pada struktur, tetapi saat ini metode elemen hingga telah dikembangkan untuk berbagai respon teknik lainnya seperti medan tekanan, kecepatan aliran, distribusi temperatur, pemotongan logam, maupun perpindahan panas. Pada dasarnya metoda elemen hingga mencari solusi dari perpindahan, kecepatan dan temperatur.

Metode elemen hingga menggunakan pendekatan numerik untuk memperoleh suatu solusi dari bentuk geometri yang sederhana sampai yang rumit. Akurasi yang didapatkan tergantung kepada model yang dibuat. Metode elemen hingga dapat menyelesaikan masalah struktur yang memiliki geometri yang rumit dengan pendekatan diskrit, yaitu membagi-bagi geometri model menjadi elemen-elemen sederhana seperti tampak pada gambar 2.12 di bawah ini.

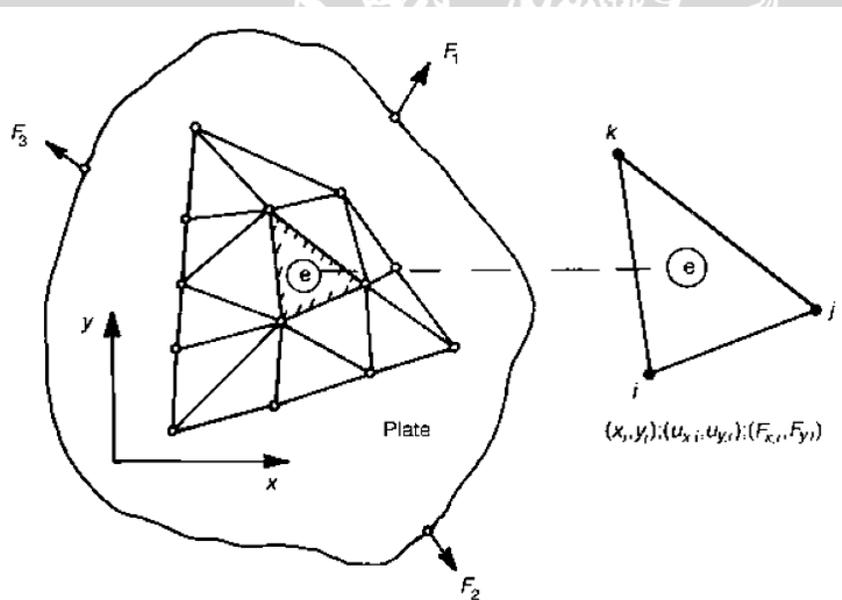


Gambar 2.12 Pemodelan suatu bangun dengan metode elemen hingga.

Sumber : <http://anythingeverything4.com/finite-element-analysis/>

Tiap ujung dari elemen tersebut memiliki nodal yang terhubung satu sama lain dengan nodal dari elemen-elemen lainnya. Setiap nodal memiliki suatu parameter yang memiliki nilai tertentu seperti perpindahan untuk kasus struktur, tekanan untuk kasus fluida, atau temperatur untuk kasus perpindahan panas. Dari nilai kuantitas tersebut dapat diturunkan persamaan-persamaan yang diikuti dengan perhitungan numerik untuk mendapatkan solusi yang ingin dicari.

Misalkan salah satu contoh suatu bangun elastik pada gambar 2.10 menerima beban pada tiga arah gaya  $F_1$ ,  $F_2$ , dan  $F_3$ . Bangun tersebut kemudian dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil agar lebih mudah di analisa. Tiap-tiap elemen tersebut ( $e$ ) terdiri dari tiga node dengan posisinya,  $(x_i, y_i)$  untuk node  $i$  dan demikian pula untuk node  $j$  dan  $k$ . Beban eksternal menyebabkan perpindahan posisi node pada bidang kartesius  $(u_{xi}, u_{yi})$  pada node  $i$  dan demikian juga pada node  $j$  dan  $k$ . Elemen tersebut kemudian akan mentransmisikan gaya eksternal ini pada sisi elemen, ekuivalen dengan gaya  $(F_{xi}, F_{yi})$ ,  $(F_{xj}, F_{yj})$ , dan  $(F_{xk}, F_{yk})$  pada masing-masing node.



Gambar 2.13 Ilustrasi pada metode elemen hingga.  
Sumber : *Finite Element Methods*, Child Thomas. hal 200

Jika suatu perpindahan pada elemen didefinisikan sebagai berikut,

$$u_x = a_1 + a_2x + a_3y \quad u_y = a_4 + a_5x + a_6y \quad (2-4)$$

dari definisi regangan sebagai rasio perpindahan terhadap posisi, maka dari persamaan (2-4), perpindahan node untuk masing-masing koefisien  $a_1$  sampai  $a_6$  adalah:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} = a_2 = \frac{(y_j - y_k)u_{x,i} + (y_k - y_i)u_{x,j} + (y_i - y_j)u_{x,k}}{2\Delta} \quad (2-5)$$

Dengan  $\Delta$  adalah luasan elemen; dan  $\epsilon_{xx}$  adalah regangan pada sumbu-x, demikian pula pada regangan lainnya  $\epsilon_{yy}$  (regangan pada sumbu-y) dan  $\gamma_{xy}$  (regangan geser), sehingga jika masing-masing persamaan regangan ini disajikan secara matriks maka didapatkan,

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} y_j - y_k & 0 & y_k - y_i & 0 & y_i - y_j & 0 \\ 0 & x_k - x_j & 0 & x_i - x_k & 0 & x_j - x_i \\ x_k - x_j & y_j - y_k & x_i - x_k & y_k - y_i & x_j - x_i & y_i - y_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{x,i} \\ u_{y,i} \\ u_{x,j} \\ u_{y,j} \\ u_{x,k} \\ u_{y,k} \end{Bmatrix} \quad (2-6)$$

atau dapat disederhanakan sebagai berikut,

$$\{\epsilon\}_{\text{elemen}} = [B]_{\text{elemen}} \{u\}_{\text{elemen}} \quad (2-7)$$

$[B]_{\text{elemen}}$  disebut juga sebagai matriks-[B], dan merupakan matriks koefisien regangan, sebagaimana terdapat pada persamaan (2-6), nilainya tergantung dari bentuk geometri elemen.  $\{u\}_{\text{elemen}}$  adalah vektor perpindahan (*displacement*) yang terjadi.

Tegangan pada bidang ini, menurut hukum Hooke dapat dituliskan,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{atau} \quad \{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2-8)$$

Dengan  $\{\sigma\}$  adalah vektor tegangan, E adalah modulus elastisitas (*Young's modulus*),  $\nu$  merupakan *Poisson's ratio*, dan matriks [D] pada persamaan (2-

8) menunjukkan matriks elastisitas, nilainya tergantung pada sifat material elemen.

Sehingga substitusi persamaan (2 – 7) dan (2 – 8) didapatkan,

$$\{\sigma\}_{\text{elemen}} = [D][B]_{\text{elemen}}\{u\}_{\text{elemen}} \quad (2 - 9)$$

Persamaan gaya pada masing-masing *node* berdasarkan tegangan yang terjadi pada elemen dapat diperoleh dengan menerapkan prinsip usaha virtual, sehingga diperoleh,

$$\{F\}_{\text{elemen}} = t_h \Delta_{\text{elemen}} [B]_{\text{elemen}}^T [D]_{\text{elemen}} [B]_{\text{elemen}} \{u\}_{\text{elemen}} \quad (2 - 10)$$

Dengan  $t_h$  adalah ketebalan elemen, Persamaan di atas kemudian untuk tiap-tiap elemen digabungkan sehingga didapat hubungan global antara gaya dan perpindahan secara global untuk semua *node* dalam bidang,

$$\{F\}_{\text{global}} = [K]\{u\}_{\text{global}}, \quad \text{atau lebih singkatnya,} \\ \{F\} = [K]\{u\} \quad (2 - 11)$$

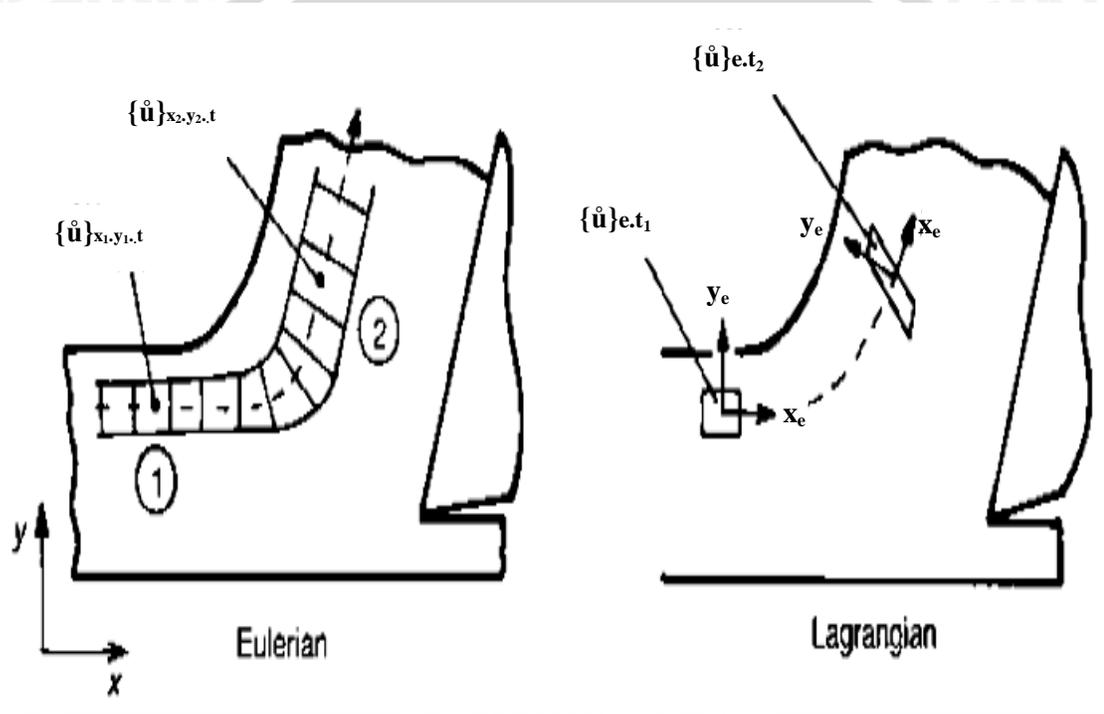
$[K]$  adalah matriks kekakuan global, dan

$$[K] = t_h \Delta_{\text{elemen}} [B]_{\text{elemen}}^T [D]_{\text{elemen}} [B]_{\text{elemen}}$$

Pada contoh ini, vektor kolom  $\{F\}$  adalah besaran yang diketahui nilainya, sedangkan  $\{u\}$  adalah besarnya perpindahan yang belum diketahui. Setelah mendapatkan nilai untuk  $\{u\}$  kemudian dapat dicari regangan dan tegangan pada elemen berdasarkan persamaan yang telah dibahas di atas.

Pada proses pemotongan logam, material dimodelkan mengalami aliran. Terdapat dua jenis aliran elemen pada pemodelan material, yaitu menurut *Eulerian* atau menurut *Lagrangian*. Menurut *Eulerian*, elemen ditetapkan pada ruang (*space*) dan material dapat mengalir melaluinya. Bentuk dari elemen tidak berubah terhadap waktu sehingga koefisien matriks- $[B]$ , yang tergantung berdasarkan bentuk elemen, cukup dihitung satu kali. Pada pemotongan logam, penentuan posisi elemen pada *chip* atau geram merupakan permasalahan yang harus diselesaikan, akan menjadi tidak jelas dimana elemen

harus digambarkan. Permasalahan lain adalah bagaimana menentukan perubahan konveksi *properties* material, seperti *strain hardening* dari elemen ke elemen. Analisis *Eulerian* lebih banyak diterapkan pada *fluid mechanics* karena sifat fluida berubah relatif kecil akibat deformasi dibandingkan pada *solids*.



Gambar 2.14 Metode Eulerian dan Lagrangian pada aliran elemen  
 Sumber : *Finite Element Methods*, Child Thomas. hal 203

Menurut metode *Lagrangian*, elemen ditetapkan pada material yang mengalir, sehingga elemen tersebut ber-konveksi dengan material. Keadaan atau *state* material telah ditetapkan dalam elemen. Namun, elemen mengalami perubahan bentuk selama aliran, sehingga matriks-[B] harus selalu diperbarui (*Updated Lagrangian*). Hal ini menyebabkan *non-linearities* geometri sehingga

material juga akan menjadi non-linier pada persamaan elemen hingga. Pada beberapa keadaan, perlu untuk dilakukan penyederhanaan bentuk elemen yang terdistorsi dengan *remeshing*. Selain itu, elemen juga cenderung mengalami rotasi dan distorsi sekaligus ketika mengalir (gambar 2.14). Sehingga sistem koordinat lokal harus selalu di-*update*, demikian pula perlu untuk melakukan *update* pada matriks-[B] berulang-ulang. Pada metode elemen hingga dengan bantuan komputasi komputer, atau pada penggunaan *software*, merupakan hal yang penting untuk menggunakan mesh yang kecil (*fine mesh*) pada ujung pahat, dimana aliran material benda kerja terbelah menjadi aliran di bawah mata pahat potong dan aliran material yang menjadi *chip*.

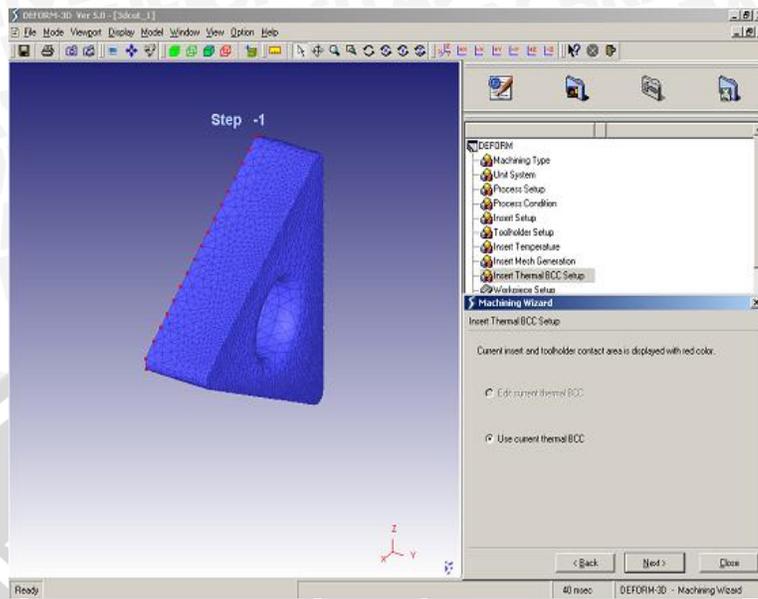
## 2.9 Software DEFORM

DEFORM adalah salah satu perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang biasa digunakan untuk memodelkan atau mensimulasikan proses-proses permesinan. Dengan mensimulasikan proses manufaktur pada komputer, akan diperoleh beberapa keuntungan, diantaranya :

- Mengurangi biaya pada proses percobaan dan desain ulang.
- Mengoptimalkan desain *tool* dan *die* sehingga memungkinkan untuk meminimalisir biaya manufaktur.

*Software* DEFORM dibuat khusus untuk memodelkan proses deformasi material. Dengan *user interface* yang bersahabat, memudahkan pengguna untuk meng-*entry*-kan data dan juga memudahkan analisa proses deformasi tersebut. Komponen utama dari perangkat lunak ini adalah kemampuannya dalam mengoptimalkan *remeshing* yang dibuat khusus untuk memodelkan proses-proses deformasi.

DEFORM juga menyediakan fasilitas khusus untuk proses permesinan (*machining*). Hanya dengan meng-klik satu tombol kita akan dibawa pada jendela proses permesinan. Proses-proses permesinan yang dapat dilakukan dengan DEFORM meliputi *turning*, *boring*, *milling*, dan *drilling*.



Gambar 2.15 Tampilan *Pre Processor* pada DEFORM 3D V5.0

Didalam perangkat lunak ini juga telah tersedia *library* untuk berbagai material untuk *die* dan juga *tool*-nya. Untuk dimensi *die* dan *tool* kita dapat meng-*import* bentuk yang telah kita buat dengan *software* lain seperti AutoCAD maupun CATIA dengan format *file* berekstensi *.stl* dari *software* tersebut. Dalam penelitian ini pemodelan geometri pahat TNMAdibuat dengan menggunakan *software* open source BLENDER dan kemudian di *export* ke dalam bentuk *file* berekstensi *.stl* karena blender memiliki sistem penyimpanan dengan jenis *file* *.blend* untuk default-nya.

DEFORM juga menyediakan tampilan grafik setelah proses simulasi selesai dilakukan. Grafik ini meliputi grafik gaya, temperatur, *displacement*, dan lainnnya. Kita juga dapat meng-*export* data grafik dari DEFORM untuk kemudian diolah dengan program perhitungan atau analisis data seperti Microsoft Excel ataupun Minitab.

## 2.10 Langkah-langkah Simulasi Menggunakan DEFORM 3D

Secara umum langkah-langkah simulasi dengan menggunakan *software* DEFORM 3D adalah:

### 1. *Pre-processing*

Tahap-tahap penting dalam *pre-processing* antara lain:

- deskripsi objek : meliputi geometri, *mesh*, kondisi batas, pergerakan (*movement*), kondisi awal, dan *material properties*.
- Kontrol simulasi : meliputi perintah metode DEFORM dalam menyelesaikan *problem*, kondisi sistem, dan jumlah langkah yang akan dilakukan pada proses *running*.
- *Generate database* : merupakan tahap pengecekan terhadap *input* dan *setting* data sebelum dilakukan proses *running* simulasi.

Persiapan pada langkah *pre-processing* ini sangat penting karena akan mempengaruhi seluruh hasil dari simulasi yang dilakukan. Oleh karena itu sebaiknya parameter-parameter yang di-*entry*-kan harus sudah sesuai dengan kondisi permesinan yang akan disimulasikan.

### 2. *Running (solving)*

Tahap-tahap penting dalam proses ini yaitu:

- Memilih solusi yang akan dipakai (*conjugate gradient* atau *direct method*)
- Memulai proses *running* (perhitungan/penyelesaian).

### 3. *Post-processing*

Hal yang dapat diketahui ketika proses ini adalah:

- Geometri deformasi, termasuk pergerakan pahat dan deformasi yang terjadi pada masing-masing *step*.
- *Plot result*, ada 2 *plot* yang bisa ditampilkan pada DEFORM, yaitu *contour plot* dan *vector plot*.
- Pada bagian ini kita juga dapat melihat hasil dari proses simulasi yang berupa grafik, *point tracking*, dan *histogram plot* yang dapat dibuat untuk menunjukkan distribusi variabel-variabel yang diinginkan.

- Tampilan animasi dari proses simulasi juga diperoleh dari tahap *post-processing* ini.

## 2.11 Model Material

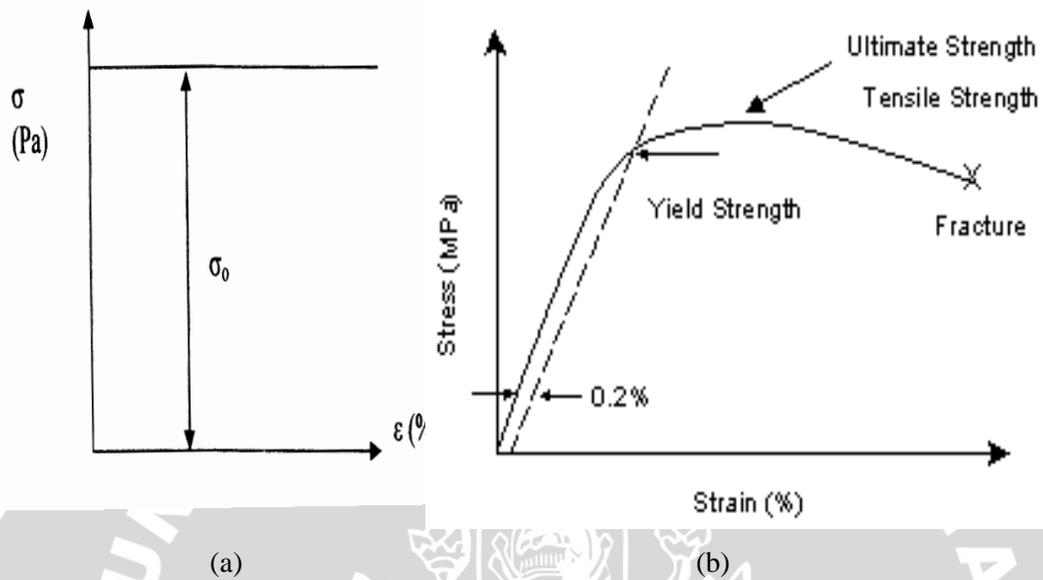
Dalam pembuatan simulasi untuk pembubutan ini dibuat suatu pemodelan baik benda kerja maupun pahat sehingga memiliki sifat menyerupai keadaan sebenarnya. Model material yang digunakan dalam penelitian ini yaitu model material *rigid* dan model material *plastic*.

### 2.11.1 Model Material *Rigid*

Gambar 2.10a menunjukkan suatu kurva tegangan-regangan untuk material *rigid*. Untuk material ideal ini besar regangan elastic specimen yaitu sama dengan nol (kaku sempurna) sampai nilai dari tegangan material mencapai besar  $\sigma_0$ , kemudian regangan pada material terjadi walaupun besarnya tegangan tidak bertambah (konstan). Ketika beban dihilangkan, material *rigid* akan mengalami deformasi permanen tanpa *elastic recovery* sehingga model material rigid ini sangat cocok untuk pemodelan material pahat.

### 2.11.2 Model Material *Plastic*

Gambar 2.10b menunjukkan suatu kurva tegangan-regangan. Pada gambar tersebut terlihat titik P yang biasa disebut batas proporsional sehingga garis OP disebut juga garis proporsional. Bila beban dihilangkan maka panjang specimen akan kembali ke panjang semula. Namun setelah tegangan diberikan pada benda melewati tegangan Y, maka material akan mengalami pertambahan panjang secara tetap. Sifat material yang demikian sangat cocok jika digunakan sebagai model material benda kerja untuk simulasi proses pemotongan logam. Pada proses pemotongan logam material benda kerja akan terdeformasi menjadi geram setelah terlebih dahulu bersinggungan dan terpotong oleh pahat potong.



Gambar 2.10 Kurva tegangan-regangan model material *rigid*(a) dan *plastic*(b).

Sumber : <https://www.efatigue.com/glossary/>

Sehingga kurva yang dibentuk mulai titik awal O sampai Y disebut garis *elastic* dan titik Y biasa disebut titik *yield* atau titik batas elastis. Tegangan *yield* ditetapkan bila specimen mengalami regangan tetap setelah beban tarik dihilangkan sebesar 0,2%.

Pada gambar tersebut juga ditunjukkan titik U (*ultimate*). Dimana kondisi tersebut specimen mengalami tanda-tanda retak akibat tegangan yang diberikan terus ditambah. Material akan sampai pada kekuatan tarik maksimalnya (*ultimate tensile strength*) sampai kemudian kekuatannya akan menurun. Jika pembebanan diteruskan, pada titik B (*breaking point*) specimen akan patah. Model material *plastic* ini sangat cocok untuk pemodelan material benda kerja.

## 2.9 Hipotesis

Pada proses pembubutan, jika kecepatan pemotongan semakin ditingkatkan, maka gaya potong akan meningkat, dikarenakan semakin tingginya kecepatan pemotongan semakin tinggi pula tegangan geser yang terjadi. *Feed rate* dan *depth of cut* akan mempengaruhi luasan bidang geser, sehingga jika semakin luas bidang geser maka gaya pemotongan juga akan meningkat

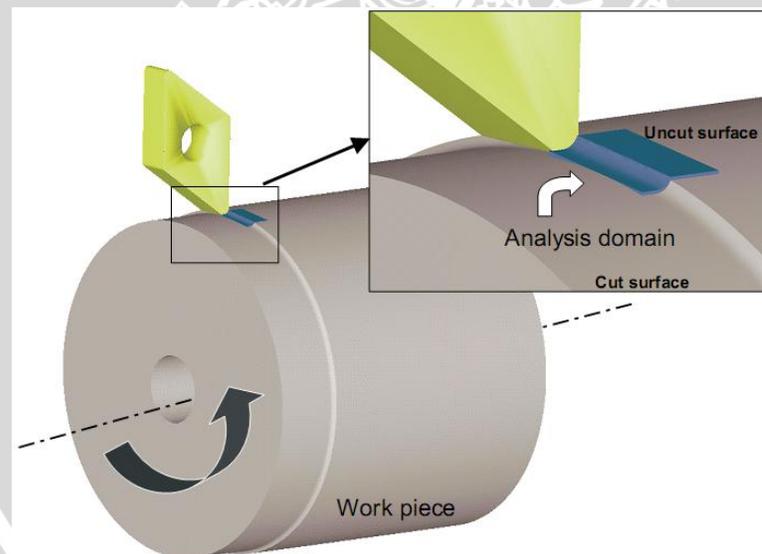
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam menyelesaikan masalah dalam penelitian ini adalah eksperimental semu yaitu melakukan simulasi program DEFORM 3D yang berbasis metode elemen hingga. Grafik gaya pemotongan didapatkan setelah melalui proses running dari *software* DEFORM 3D. Dilakukan beberapa kali proses running dengan kondisi pemotongan yang berbeda. Dalam penelitian ini dilakukan input kecepatan pemotongan yang bervariasi sehingga akan diketahui pengaruh kecepatan potong terhadap gaya potong. Disamping itu juga dilakukan studi literatur untuk memperoleh informasi tambahan berkenaan dengan penelitian yang dilakukan.



Gambar 3.1 Gambar area simulasi *turning* dari DEFORM 3D  
Sumber: DEFORM 3D Manual

### 3.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang akan digunakan dalam simulasi disesuaikan dengan data eksperimen yang telah dilakukan oleh Kosaraju, S. dkk (2012):

a) Variabel bebas :

Tabel 3.1 Parameter pemotongan pada simulasi.

parameter	satuan	faktor level		
		1	2	3
<i>cutting speed</i> ( $V_c$ )	m/min	45	60	75
<i>feed</i> ( $f$ )	mm/rev	0.25	0.30	0.35
<i>depth of cut</i> ( $a$ )	mm	0.5	1.0	1.5

b) Variabel terikat :

- Gaya potong,  $F_c(N)$

### 3.3 Spesifikasi Model Material Benda Kerja dan Pahat

keterangan	eksperimen	simulasi
Jenis pahat	TNMA 332	TNMA 332
<i>Rake angle</i> ( $^\circ$ )	-6	-6
Material pahat	WC	WC
Material benda kerja	Titanium Ti-4Al-6V	Titanium Ti-4Al-6V
<i>Poisson's ratio</i>	0,342	0,342
Konduktivitas termal ( $W/m^\circ C$ )	6,7	6,7
Densitas ( $g/cm^3$ )	4,42	4,42
<i>Tensile strength</i> (MPa)	950	950
<i>Cutting Speed</i> (m/min)	45, 60, 75	45, 60, 75
<i>Feed</i> (mm/rev)	0,25, 0,30, 0,35	0,25, 0,30, 0,35
<i>Depth of Cut</i> (mm)	0,5, 1,0, 1,5	0,5, 1,0, 1,5

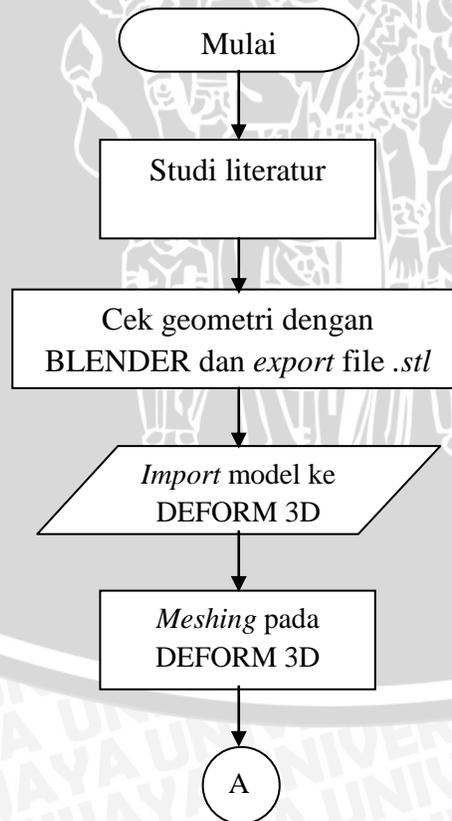
### 3.4 Pemodelan

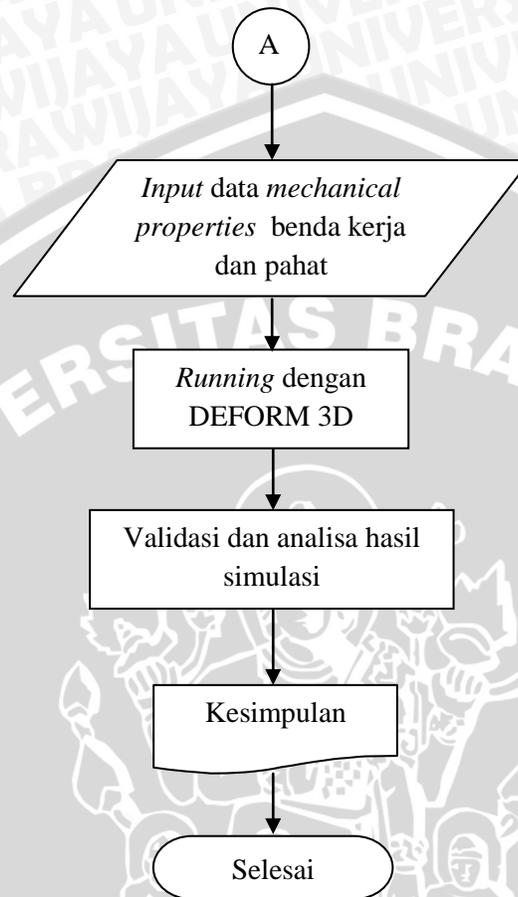
Benda kerja dan pahat dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* DEFORM 3D. Pemodelan dilakukan dengan membuat geometri pahat dan benda kerja dimana pahat dimodelkan sebagai material *rigid*, sedangkan benda kerja dimodelkan sebagai material *plastic*.

Model benda kerja dan pahat pada simulasi disesuaikan dengan eksperimen yang dilakukan oleh Kosaraju, S. dkk (2012). Material benda kerja merupakan Titanium Ti-6Al-4V yang memiliki sifat mekanik dan susunan kimia sesuai dengan tabel 3.2. Dimensi dan material pahat juga dimodelkan sesuai dengan geometri dan susunan kimianya.

Software DEFORM 3D sendiri memiliki *library* untuk benda kerja dan pahat yang beragam. Tidak terbatas untuk proses *turning* namun juga untuk proses *drilling* dan *cold forming*. Jika model benda kerja maupun material tidak terdapat dalam *library* DEFORM 3D, kita dapat memasukkan parameter-parameter untuk material baru secara manual sesuai dengan *properties* material sebenarnya.

### 3.5 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

### 3.6 Parameter Permesinan Untuk Proses Simulasi

Simulasi dilakukan menurut parameter yang telah dilakukan oleh Kosaraju, S. dkk (2012). Dari variable bebas yang ada kemudian dibuat tabel untuk merencanakan dan merekam hasil dari simulasi, serta digunakan juga sebagai pembanding antara hasil simulasi dan eksperimen sebenarnya.

Tabel 3.3 Parameter yang digunakan dalam simulasi pembubutan

No.	Vc (m/min)	F (mm/rev)	a (mm)	F <sub>c</sub> (N) simulasi	F <sub>c</sub> (N) eksperimen
1	45	0.25	0.5		
2	45	0.25	1		
3	45	0.25	1.5		
4	45	0.3	0.5		
5	45	0.3	1		
6	45	0.3	1.5		
7	45	0.35	0.5		
8	45	0.35	1		
9	45	0.35	1.5		
10	60	0.25	0.5		
11	60	0.25	1		
12	60	0.25	1.5		
13	60	0.3	0.5		
14	60	0.3	1		
15	60	0.3	1.5		
16	60	0.35	0.5		
17	60	0.35	1		
18	60	0.35	1.5		
19	75	0.25	0.5		
20	75	0.25	1		
21	75	0.25	1.5		
22	75	0.3	0.5		
23	75	0.3	1		
24	75	0.3	1.5		
25	75	0.35	0.5		
26	75	0.35	1		
27	75	0.35	1.5		

### 3.7 Prosedur Penelitian

Langkah – langkah yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah :

1. Dilakukan studi literatur yang diperlukan untuk penelitian.
2. Dilakukan pengecekan geometri model pahat pada BLENDER.

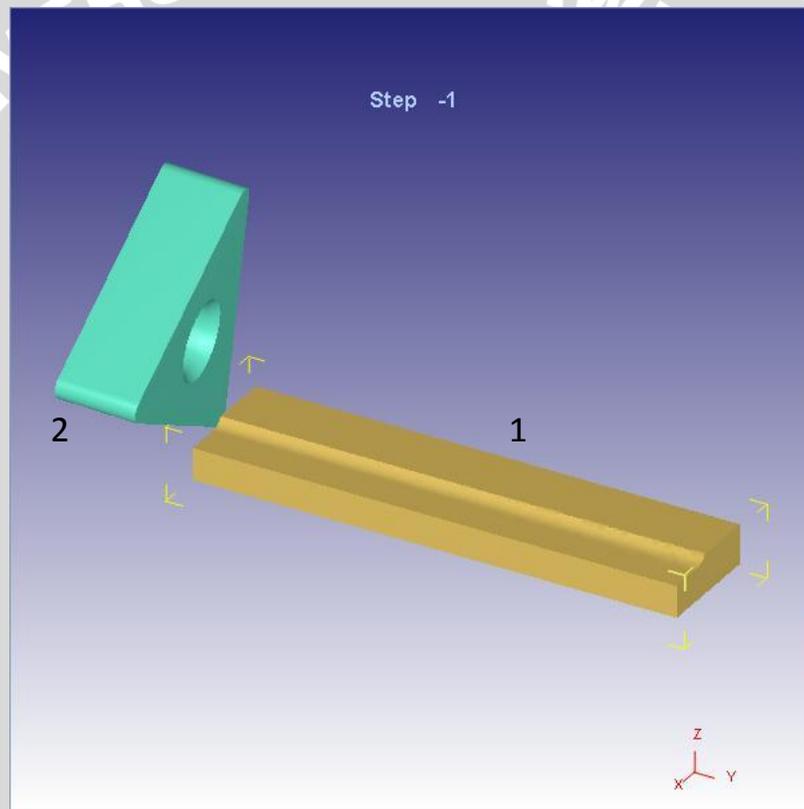
3. Meng-*export* geometri model dengan ekstensi *.stl*.
3. *Import* model geometri ke DEFORM 3D.
4. Dilakukan *meshing* pada DEFORM 3D.
5. *Input data mechanical properties* benda kerja dan pahat.
6. *Running (solving)* dengan DEFORM 3D.
7. Dilakukan pembacaan hasil.
8. Validasi hasil simulasi dengan hasil eksperimen.
9. Analisa hasil simulasi.
10. Dilakukan pembahasan dan menarik kesimpulan.



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Penelitian

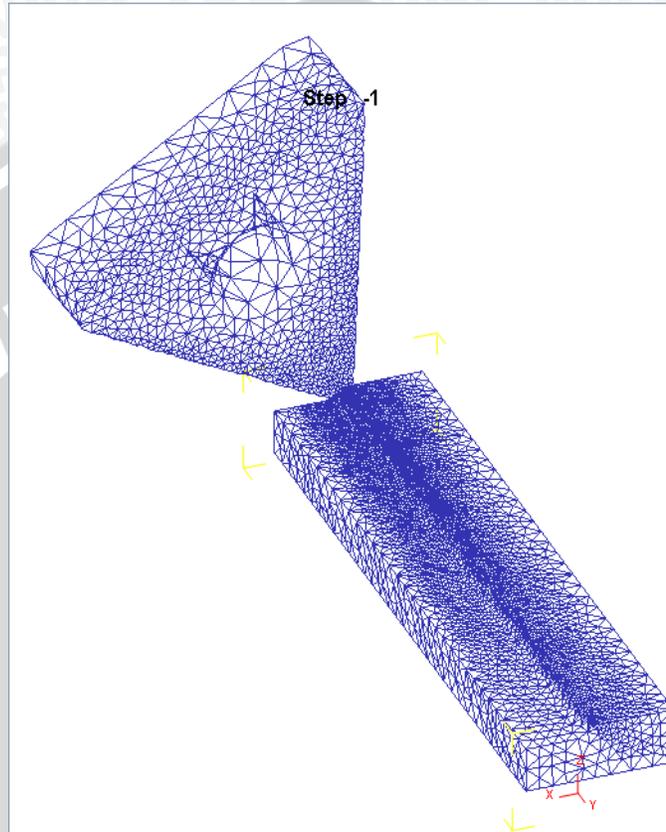
Proses pembubutan dimodelkan secara tiga dimensi. Jumlah objek ditentukan yaitu 1 benda kerja (*workpiece*) dan satu pahat (*insert*). Model material benda kerja yang digunakan adalah Titanium TI-6Al-4V dan pahat *insert* TNMA332. Pahat dimodelkan sebagai *rigid material* dan benda kerja sebagai *plastic material*.



Gambar 4.1 Pemodelan komponen simulasi, (1)benda kerja dan (2)pahat.

Pembagian elemen (*meshing*) untuk benda kerja adalah 40000 dan untuk pahat 12000. Semakin banyak *meshing* untuk benda kerja dan pahat akan membutuhkan waktu *running* simulasi yang lebih lama dan beban komputer juga akan semakin berat karena penggunaan memori semakin besar.

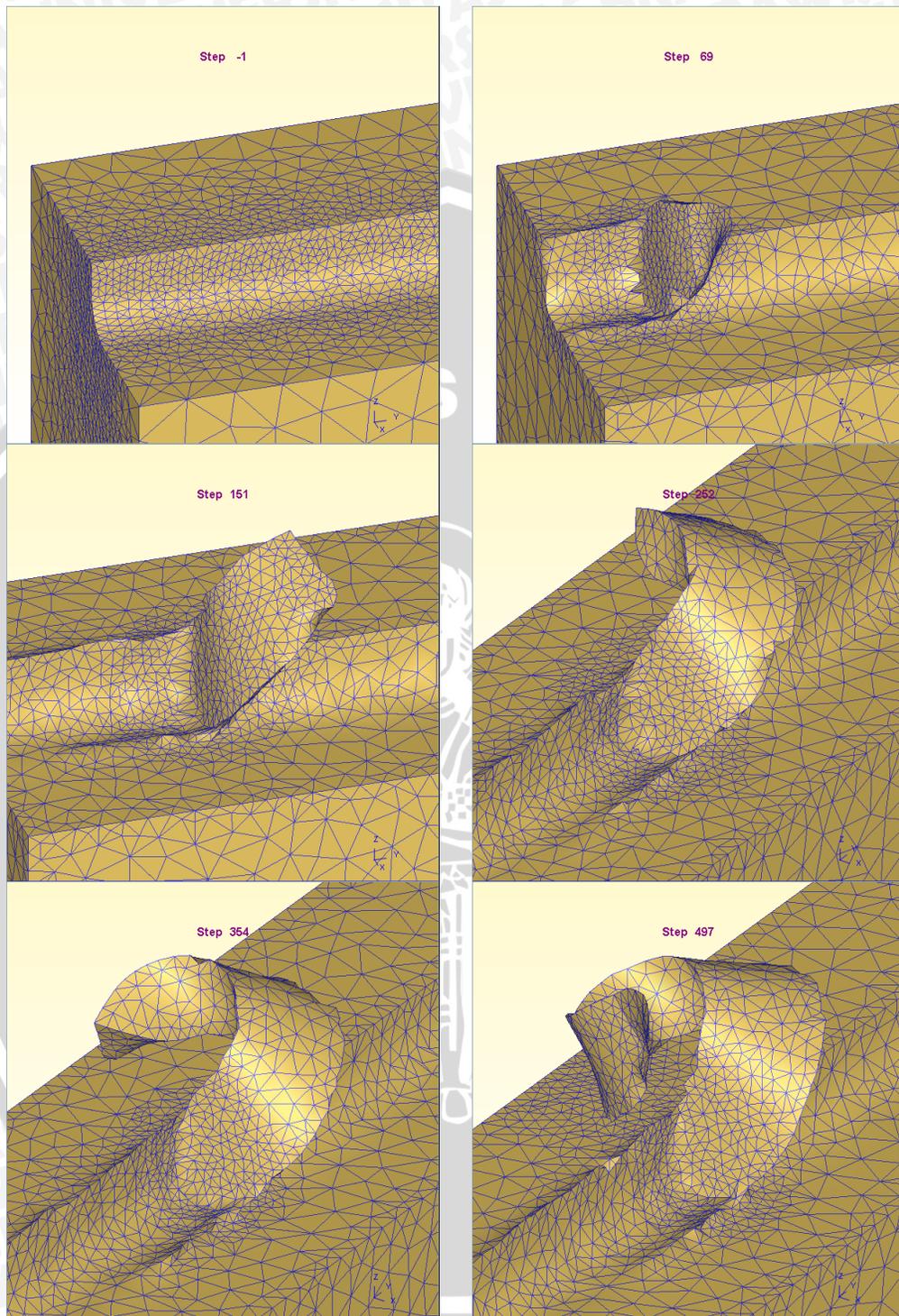
Oleh karena itu *setting meshing* harus disesuaikan dengan kemampuan komputer.



Gambar 4.2 Hasil *meshing* benda kerja dan pahat pada DEFORM 3D.

Setelah proses *setting* pada pre-processor selesai dan running telah dijalankan, selanjutnya menunggu hingga selesainya running yang dilakukan DEFORM 3D. Hasil dari proses running ini kemudian di analisa hasilnya pada menu *post-processor*.

Dari jendela *post-processor* dapat diperoleh keluaran (*output*) berupa gaya pemotongan maupun temperatur yang terjadi selama proses simulasi. Hasil simulasi dari proses ini akan dibandingkan dengan hasil penelitian. Animasi dari proses ini dapat dilihat dari post-processor, seperti pada gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Hasil simulasi dari *step* 1 hingga *step* 497.

## 4.2 Proses Verifikasi dan Validasi Simulasi dengan Eksperimen

Proses verifikasi dilakukan untuk mengetahui kesamaan kondisi permesinan antara penelitian ekperimental semu (simulasi) dengan eksperimen nyata. Eksperimen nyata telah dilakukan oleh Kosaraju, S. dkk dengan material benda kerja Titanium Ti-6Al-4V dengan susunan kimia sebagai berikut.

Tabel 4.1 Unsur kimia Titanium Ti-6Al-4V

Unsur	Kandungan
C	<0.08%
Fe	<0.25%
N <sub>2</sub>	<0.05%
O <sub>2</sub>	<0.2%
Al	5.5-6.76%
V	3.5-4.5%
H <sub>2</sub>	<0.0125%
Ti	(menyesuaikan)

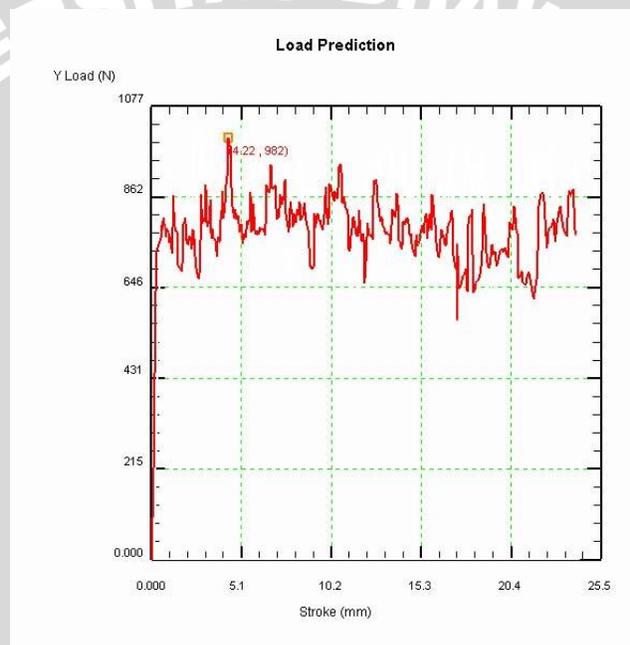
Verifikasi pada penelitian ini meliputi parameter sebagai berikut sebagaimana pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Verifikasi parameter simulasi dengan eksperimen.

keterangan	eksperimen	simulasi
Jenis pahat	TNMA 332	TNMA 332
<i>Rake angle</i> (°)	-7	-7
Material pahat	WC	WC
Material benda kerja	Titanium Ti-4Al-6V	Titanium Ti-4Al-6V
<i>Poisson's ratio</i>	0,342	0,342
Konduktivitas termal (W/m°C)	6,7	6,7
Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	4,42	4,42
<i>Tensile strength</i> (MPa)	950	950
<i>Cutting Speed</i> (m/min)	45, 60, 75	45, 60, 75
<i>Feed</i> (mm/rev)	0,25, 0,30, 0,35	0,25, 0,30, 0,35
<i>Depth of Cut</i> (mm)	0,5, 1,0, 1,5	0,5, 1,0, 1,5

Proses validasi dilakukan untuk mengetahui apakah data simulasi ini hasilnya akurat jika dibandingkan dengan data hasil eksperimen yang sudah dilakukan.

Berikut adalah grafik gaya potong yang diperoleh pada pada jendela *post processor* DEFORM 3D. Tampak pada grafik bahwa gaya potong yang terjadi naik hingga *stroke* tertentu, kemudian cenderung stabil dan tidak mengalami kenaikan yang lebih tinggi lagi setelah melampaui titik tersebut. Titik ini yang kemudian digunakan sebagai gaya potong pada simulasi dalam penelitian ini.



Gambar 4.4 Grafik gaya potong yang didapat setelah simulasi pada  $V_c = 60$  m/min,  $f = 0,3$  mm/rev, dan  $a = 1,5$  mm.

Tabel 4.2 berikut digunakan untuk mengetahui besarnya perbedaan antara hasil simulasi dengan hasil pada eksperimen nyata yang dilakukan oleh Kosaraju, S. *et al.* (2012).

Dari tabel 4.2 dapat diketahui bahwa persentase perbedaan antara hasil simulasi dengan hasil dari eksperimen sebesar antara 5-8%. Jika dihitung rata-rata persentasenya didapat besarnya perbedaan tersebut adalah 6,7%.

Tabel 4.3 Validasi hasil simulasi dengan hasil eksperimen

<i>Cutting speed, (Vc)</i> (m/min)	<i>Feed, (f)</i> (mm/rev)	<i>Depth of Cut, (a)</i> (mm)	F <sub>c</sub> simulasi (N)	F <sub>c</sub> eksperimen (N)	Selisih (%)
<b>45</b>	<b>0.25</b>	<b>0.5</b>	<b>602</b>	<b>560</b>	<b>7,5</b>
45	0.25	1	767	-	
45	0.25	1.5	844	-	
45	0.3	0.5	675	-	
<b>45</b>	<b>0.3</b>	<b>1</b>	<b>732</b>	<b>687</b>	<b>6,55</b>
45	0.3	1.5	856	-	
45	0.35	0.5	724	-	
45	0.35	1	781	-	
<b>45</b>	<b>0.35</b>	<b>1.5</b>	<b>829</b>	<b>762</b>	<b>8,79</b>
60	0.25	0.5	789	-	
<b>60</b>	<b>0.25</b>	<b>1</b>	<b>830</b>	<b>769</b>	<b>7,93</b>
60	0.25	1.5	933	-	
60	0.3	0.5	875	-	
60	0.3	1	927	-	
<b>60</b>	<b>0.3</b>	<b>1.5</b>	<b>982</b>	<b>891</b>	<b>6,85</b>
<b>60</b>	<b>0.35</b>	<b>0.5</b>	<b>920</b>	<b>873</b>	<b>5,38</b>
60	0.35	1	987	-	
60	0.35	1.5	1032	-	
75	0.25	0.5	826	-	
75	0.25	1	891	-	
<b>75</b>	<b>0.25</b>	<b>1.5</b>	<b>1012</b>	<b>925</b>	<b>5,08</b>
<b>75</b>	<b>0.3</b>	<b>0.5</b>	<b>912</b>	<b>820</b>	<b>5,12</b>
75	0.3	1	962	-	
75	0.3	1.5	1183	-	
75	0.35	0.5	956	-	
<b>75</b>	<b>0.35</b>	<b>1</b>	<b>974</b>	<b>890</b>	<b>7,19</b>
75	0.35	1.5	1261	-	

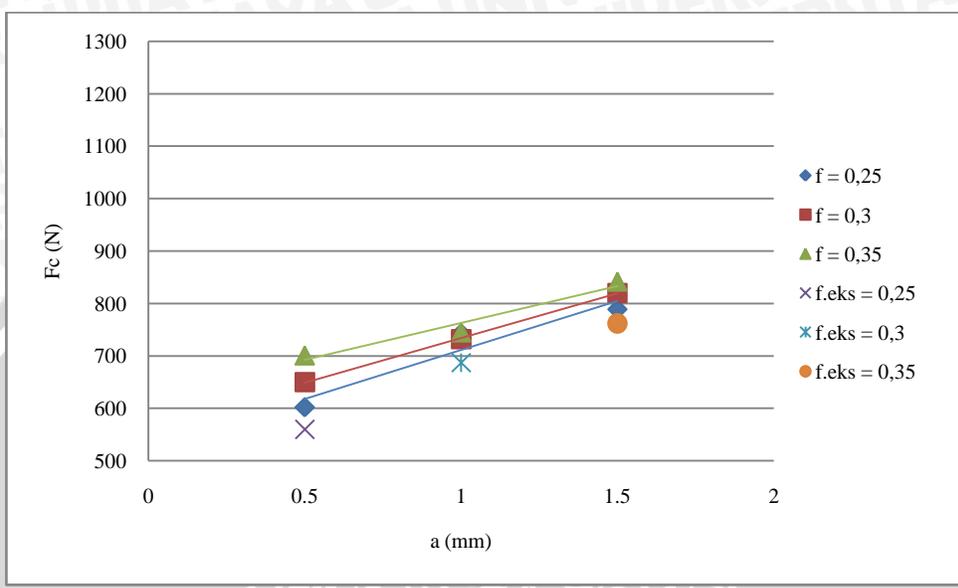
Keterangan:

$$\text{Selisih} = \frac{F_c \text{ simulasi} - F_c \text{ eksperimen}}{F_c \text{ eksperimen}} \times 100\%$$

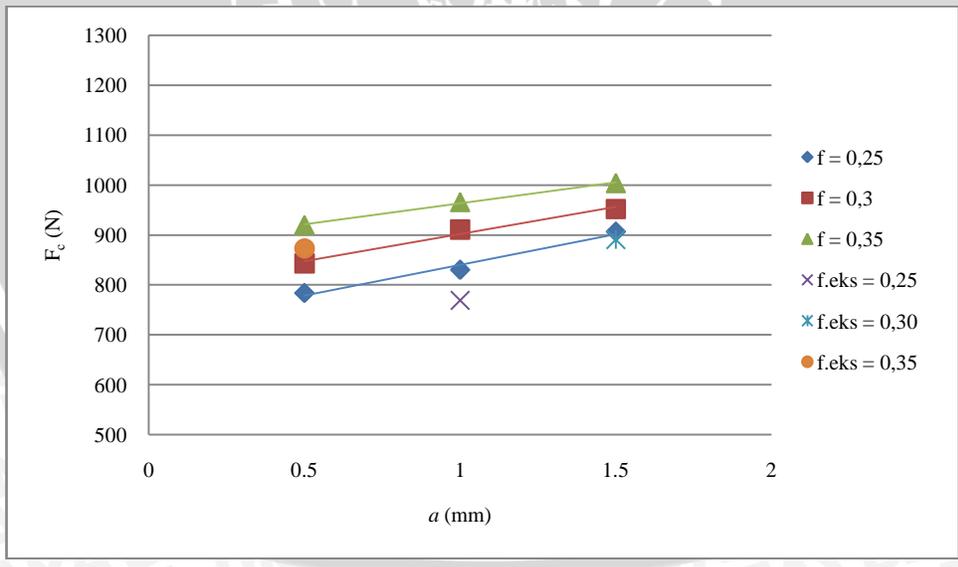
### 4.3 Pembahasan

#### 4.3.1 Analisa grafik

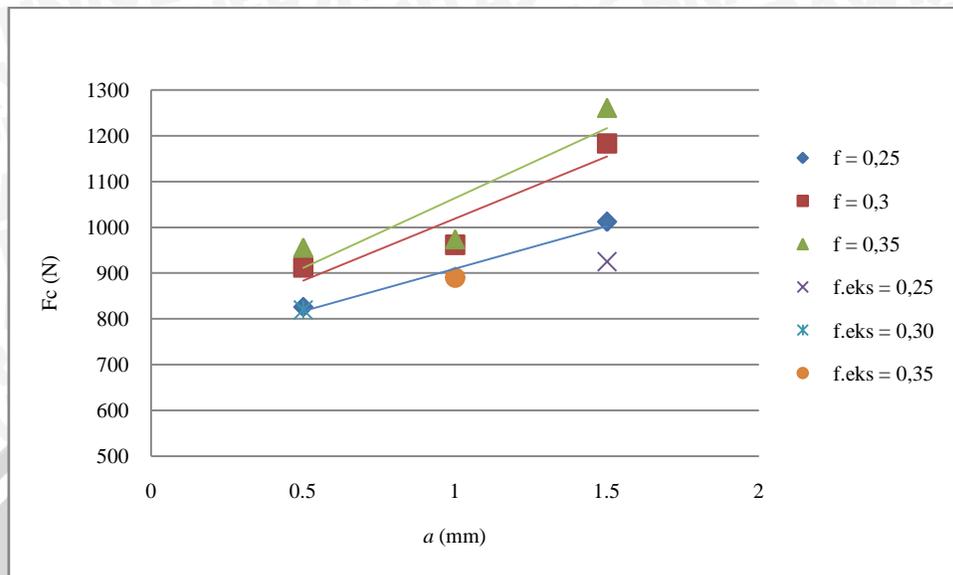
Dari hasil simulasi dibuat grafik sebagai berikut.



Gambar 4.5 Grafik hubungan *depth of cut* dan *feed* terhadap gaya potong untuk  $V_c = 45$  m/min.



Gambar 4.5 Grafik hubungan *depth of cut* dan *feed* terhadap gaya potong untuk  $V_c = 60$  m/min.



Gambar 4.6 Grafik hubungan *depth of cut* dan *feed* terhadap gaya potong untuk  $V_c = 75$  m/min.

#### A. Pengaruh *Depth of Cut* ( $a$ ) terhadap Gaya Potong ( $F_c$ )

Dari gambar 4.4 sampai 4.6 di atas terlihat bahwa grafik memiliki kecenderungan naik secara linier dengan kemiringan positif. Dari gambar dapat diketahui bahwa gaya potong  $F_c$  akan naik dengan semakin bertambahnya kedalaman pemotongan  $a$ . Hal ini menunjukkan bahwa kedalaman potong  $a$  berbanding lurus dengan gaya potong  $F_c$ . Besarnya kedalaman potong berpengaruh terhadap luasan penampang bidang geser. Sebagaimana diketahui di depan bahwa luas penampang bidang geser adalah luas penampang geram sebelum terpotong yang dihitung terhadap sudut geram. Semakin besar kedalaman potong, luas penampang bidang geram sebelum terpotong semakin luas, sehingga luas penampang bidang geser juga semakin besar, dan menyebabkan gaya potong akan semakin besar.

B. Pengaruh *Feed* ( $f$ ) terhadap Gaya Potong ( $F_c$ )

Dari gambar 4.5 dapat diketahui pada kedalaman potong ( $a$ ) yang sama, yaitu 0,5 mm gaya potong  $F_c$  semakin besar dengan bertambahnya nilai pemakanan  $f$ , yaitu sebesar 789 N pada  $f$  0,25 mm/rev, 875 N pada  $f$  0,30 mm/rev, dan 920 N pada  $f$  0,35 mm/rev. Hal ini juga terjadi pada setiap grafik pada gambar 4.4 dan 4.6 di atas. Besarnya pemakanan bersama-sama dengan kedalaman pemotongan mempengaruhi luasan penampang bidang geram sebelum terpotong. Sebagaimana telah dijelaskan di atas, luas bidang geser merupakan luas bidang geram sebelum terpotong yang telah mengalami perpanjangan pada salah satu sisinya akibat sudut geser yang terjadi selama pembubutan. Semakin besar pemakanan (*feed*), luas penampang bidang geser semakin besar, sehingga gaya potong akan semakin besar.

C. Pengaruh *Cutting Speed* ( $V_c$ ) terhadap Gaya Potong ( $F_c$ )

Dari gambar 4.4 sampai 4.6 jika diperhatikan pada masing-masing titik akan terlihat bahwa semakin besar kecepatan pemotongan, semakin naik pula grafiknya. Dengan  $f = 0,30$  mm/rev pada setiap grafik dapat dilihat bahwa pada kecepatan potong  $V_c = 45$  m/min memiliki gaya potong antara 675-856 N, pada  $V_c = 60$  m/min gaya potong yang terjadi antara 875-952 N, dan pada  $V_c = 75$  m/min gaya potong berada dalam range 912-1183 N. Kecenderungan ini juga terjadi pada pemakanan  $f = 0,5$  mm/rev dan  $f = 0,35$  mm/rev. Hal ini menunjukkan bahwa setiap peningkatan kecepatan pemotongan akan meningkatkan gaya potong. Kecepatan pemotongan bersama-sama dengan sifat mekanik material yang dibubut akan mempengaruhi besarnya tegangan geser. Semakin besar kecepatan pemotongan akan memperbesar tegangan geser pada bidang geser selama proses pembubutan.

### 4.3.2 Analisa Statistik ANOVA

Dari tabel nilai  $F_c$  hasil simulasi pada tabel 4.2 di atas dilakukan analisa statistik ANOVA untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari masing-masing variabel bebas ( $V_c$ ,  $f$ , dan  $a$ ) terhadap variabel terikat  $F_c$ .

Tabel 4.4 Tabel ANOVA untuk gaya potong  $F_c$

Varian	SS	DoF	MS	$F_{hitung}$	Contrib. (%)
$V_c$	278656	2	139328	55.59	52.166
$f$	55267	2	27633	11.03	10.346
$a$	150124	2	75062	29.95	28.104
Error	50125	20	2506		9.384
total	534172	26			100

Keterangan:

SS (*sum of square*) = jumlah kuadrat setiap nilai varian.

DoF (*degree of freedom*) = derajat kebebasan varian.

$$MS \text{ (mean square)} = \frac{SS}{DoF}$$

$$F_{hitung} = \frac{MS_{varian}}{MS_{error}}$$

Tabel ANOVA diatas dibuat dengan  $\alpha = 5\%$  menggunakan program statistik Minitab 16. Nilai dari  $F_{tabel}$  dari masing-masing varian ( $F(0,05, 2, 20)$ ) adalah 3,49 sehingga diketahui bahwa nilai  $F_{tabel}$  kurang dari  $F_{hitung}$  pada semua varian. Nilai ini menunjukkan bahwa memang ada pengaruh yang signifikan dari  $V_c$ ,  $f$ , dan  $a$  terhadap gaya potong  $F_c$ .

Nilai-nilai pada tabel 4.4 di atas diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut berdasarkan nilai  $F_c$  pada tabel 4.2.

Tabel 4.5 Perhitungan *Total Sum of Square*

Fc ( x )	( x <sub>r</sub> - x )	( x <sub>r</sub> - x ) <sup>2</sup>
602	290.66667	84487.11
767	125.66667	15792.11
844	48.66667	2368.444
675	217.66667	47378.78
732	160.66667	25813.78
856	36.66667	1344.444
724	168.66667	28448.44
781	111.66667	12469.44
829	63.66667	4053.444
799	93.66667	8773.444
830	62.66667	3927.111
933	-40.33333	1626.778
875	17.66667	312.1111
927	-34.33333	1178.778
982	-89.33333	7980.444
920	-27.33333	747.1111
987	-94.33333	8898.778
1032	-139.33333	19413.78
826	66.66667	4444.444
891	1.66667	2.777778
1012	-119.33333	14240.44
912	-19.33333	373.7778
962	-69.33333	4807.111
1183	-290.33333	84293.44
986	-93.33333	8711.111
974	-81.33333	6615.111
<b>Total</b>	24102	<b>534172</b>
Rata-rata (x <sub>r</sub> )	892.667	

<< total sum of square

Nilai untuk jumlah kuadrat pada masing-masing varian dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$SS_{(variable)} = \sum n_i (y_i - y_{..})^2$$

keterangan :

n<sub>i</sub> = banyaknya data pada faktor level i

y<sub>i</sub> = rata-rata data pada faktor level i

y<sub>..</sub> = rata-rata data total

Tabel 4.6 Perhitungan *Sum of Square* untuk  $V_c$

	$V_c = 45$ m/min	$V_c = 60$ m/min	$V_c = 75$ m/min	
	602	799	826	
	767	830	891	
	844	933	1012	
	675	875	912	
	732	927	962	
	856	982	1183	
	724	920	986	
	781	987	974	
	829	1032	1261	
<b>Total</b>	<b>6810</b>	<b>8285</b>	<b>9007</b>	
<b>Rata-rata (<math>\bar{x}_v</math>)</b>	<b>756,667</b>	<b>920,5556</b>	<b>1000,778</b>	
<b><math>(\bar{x}_r - \bar{x}_v)^2</math></b>	<b>18496</b>	<b>777,7901</b>	<b>11688,01</b>	<b><math>SS_{v_c}</math></b>
<b><math>n(\bar{x}_r - \bar{x}_v)^2</math></b>	<b>166464</b>	<b>7000,111</b>	<b>105192,1</b>	<b>278656</b>

Tabel 4.7 Perhitungan *Sum of Square* untuk  $f$

	$f = 0,25$ mm/rev	$f = 0,30$ mm/rev	$f = 0,35$ mm/rev	
	602	675	724	
	767	732	781	
	844	856	829	
	799	875	920	
	830	927	987	
	933	982	1032	
	826	912	986	
	891	962	974	
	1012	1183	1261	
<b>Total</b>	<b>7504</b>	<b>8104</b>	<b>8494</b>	
<b>Rata-rata (<math>\bar{x}_v</math>)</b>	<b>833,778</b>	<b>900,444</b>	<b>943,778</b>	
<b><math>(\bar{x}_r - \bar{x}_v)^2</math></b>	<b>3467,940</b>	<b>60,4886</b>	<b>2612,3116</b>	<b><math>SS_f</math></b>
<b><math>n(\bar{x}_r - \bar{x}_v)^2</math></b>	<b>31211,5</b>	<b>544,398</b>	<b>23511</b>	<b>55267</b>

Tabel 4.8 Perhitungan *Sum of Square* untuk  $a$ 

	$a = 0,5 \text{ mm}$	$a = 1,0 \text{ mm}$	$a = 1,5 \text{ mm}$	
	602	767	844	
	675	732	856	
	724	781	829	
	799	830	933	
	875	927	982	
	920	987	1032	
	826	891	1012	
	912	962	1183	
	986	974	1261	
Total	7319	7851	8932	
Rata-rata ( $\bar{x}_v$ )	813.222	872.333	992.444	
$(x_r - \bar{x}_v)^2$	6311.42	413.444	9955.605	$SS_a$
$n(x_r - \bar{x}_v)^2$	56803.778	3721	89600.444	150124

Dari tabel hasil perhitungan dari ANOVA dapat diketahui persentase kontribusi dari masing-masing variabel bebas ( $V_c$ ,  $f$ , dan  $a$ ) terhadap perubahan nilai dari gaya potong  $F_c$ . Tampak bahwa kecepatan potong memiliki pengaruh paling besar terhadap gaya potong. Kecepatan pemotongan memiliki kontribusi sebesar 52,17% terhadap besarnya gaya potong. Faktor ke-dua yang mempengaruhi gaya potong adalah kedalaman potong ( $a$ ). Kedalaman potong memiliki kontribusi sebesar 28,1%. Sementara itu kecepatan pemakanan atau *feed* memiliki kontribusi paling kecil dengan 10,3%.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada pembubutan Titanium Ti-6Al-4V, besarnya gaya potong akan semakin meningkat seiring dengan semakin besarnya parameter permesinan dalam *range*: kecepatan potong 45-75 m/min, kedalaman potong 0,5-1,5 mm, dan kecepatan pemakanan 0,25-0,35 mm/rev. Kecepatan pemotongan paling berpengaruh terhadap besarnya gaya potong dibandingkan dengan variabel lainnya. Sedangkan pemakanan

memiliki signifikansi paling kecil dari ketiga variabel yang diteliti, hal ini menunjukkan bahwa urutan faktor atau variabel dari yang paling berpengaruh terhadap besarnya gaya potong adalah kecepatan potong, kemudian kedalaman pemotongan, lalu pemakanan atau *feed*. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya (Kosaraju, 2012).



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

- Pada pembubutan Titanium Ti-6Al-4V, gaya potong meningkat dengan bertambahnya kecepatan pemotongan. Kecepatan pemakanan juga mempengaruhi besarnya gaya pemotongan yang terjadi, dimana setiap peningkatan kecepatan pemakanan akan meningkatkan gaya pemotongan. Kedalaman pemotongan yang semakin besar juga semakin meningkatkan gaya pemotongan.
- Setiap parameter pemotongan memiliki pengaruh terhadap besarnya gaya potong dengan urutan mulai dari yang paling berpengaruh adalah kecepatan pemotongan, kedalaman pemotongan, dan kemudian kecepatan pemakanan.

#### 5.2 Saran

1. Sebaiknya dilakukan penelitian lebih mendalam mengenai pengaruh setiap sudut pemotongan terhadap gaya potong yang terjadi selama pemotongan.
2. Perlu untuk melakukan penelitian nyata untuk mengetahui besarnya pengaruh geometri pahat potong terhadap gaya pemotongan yang terjadi.