

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Forging*

Istilah *metal forming* adalah merujuk kepada sekelompok metode manufaktur yang diberlakukan pada suatu material-biasanya material tak berbentuk /berbentuk sederhana-yang akan dirubah menjadi sebuah produk yang bermanfaat tanpa adanya perubahan massa atau komposisi material. Produk yang baru terbentuk ini biasanya memiliki geometri yang lebih kompleks yang didefinisikan dalam hal (a) bentuknya (b) ukurannya (c) akurasi dan toleransinya (d) penampilannya dan (e) sifat-sifatnya.

Dalam dunia proses manufaktur, teknologi *metal forming* mendapatkan tempat yang spesial karena proses ini dapat memproduksi komponen-komponen yang memiliki sifat-sifat mekanik yang superior dengan meminimalkan material yang terbuang.

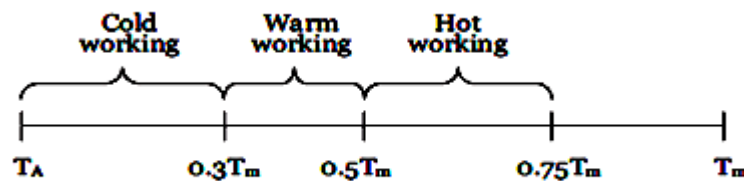


Gambar 2.1. Produk komponen mini-mico dari proses forging (Volersten, 2001)

Forging adalah bagian dari sebuah proses *metal forming* /pembentukan logam yang memiliki banyak keuntungan seperti meningkatkan kekuatan material, struktur lebih menyatu dan seragam, mengurangi proses permesinan lanjut, dan akan menghemat material karena mengurangi material sisa. Hal ini tentu saja menjadikan *forging* meskipun teknologi yang sudah ada sejak lama, berpotensi menjadi alternatif proses pembentukan yang mengarah ke konsep teknologi ramah

lingkungan, terlebih lagi konsep *forging* untuk pembuatan komponen-komponen mikro (*micro forging*) untuk menunjang proses miniaturisasi produk, seperti terlihat pada gambar 2.1.

Forging sebagai salah satu bagian dari proses *metal forming* dibagi dalam tiga kategori berdasarkan temperatur pengerjaannya yaitu proses *cold*, *warm* dan *hot forging* dimana parameter dasarnya adalah temperatur rekristalisasi. (Gambar 2.2).



Gambar 2.2. Klasifikasi *Cold*, *Warm* dan *hot working*

Keuntungan atau efek yang ditimbulkan oleh pengerjaan dingin (*cold working*) adalah adanya penurunan tingkat keuletan, namun diiringi dengan naiknya kekuatan dan kekerasan pada sifat materialnya. Hal ini disebabkan karena adanya efek *strain hardening*. Disamping itu juga terjadi perubahan struktur mikro, dimana butir-butirnya akan memanjang dan merapat searah dengan arah deformasi yang dominan serta memiliki tingkat ketelitian yang lebih baik. Namun proses pengerjaan dingin memerlukan energi pembentukan yang lebih besar untuk proses deformasinya.

Sementara itu, proses pengerjaan panas (temperatur kerja diatas temperatur rekristalisasi) juga memiliki keuntungan salah satunya adalah energi pembentukannya relatif lebih kecil bila dibandingkan dengan proses pengerjaan dingin pada material yang sama. Hal ini di sebabkan karena terjadinya penurunan tegangan alir, sehingga tegangan *tool* dan beban tempa berkurang. Selain itu dengan adanya panas tingkat keuletan material akan lebih terjaga. Kelemahan proses ini diantaranya adalah biaya produksi tinggi, ketelitian (*accuracy*) dan kondisi permukaan kurang baik serta umur *tool* relatif pendek.

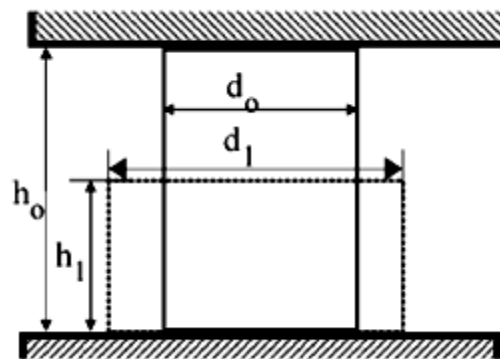
Pada proses tempa *warm forming* dimana temperatur pengerjaan di atas suhu ruangan dan di bawah temperatur rekristalisasi (di atas $0,3 \times$ temperatur

rekristalisasi hingga di bawah suhu rekristalisasi material), memiliki keunggulan adalah beban tempa yang rendah, keuletan dan ketangguhan (*toughness*) lebih besar dibanding proses dingin, ketelitian (*accuracy*) meningkat dibandingkan tempa panas. Sedangkan kelemahannya adalah memerlukan determinasi temperatur tempa yang optimum serta pemilihan pelumas yang sulit.

2.2 Upset Forging

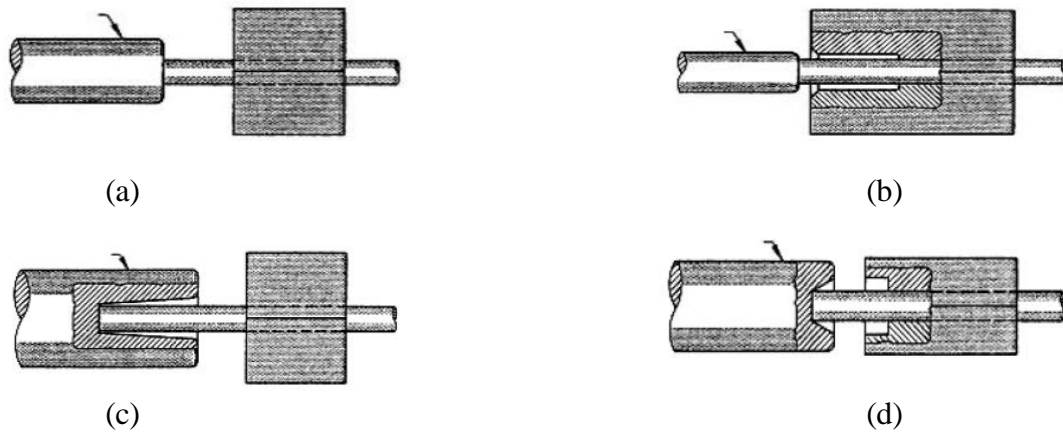
Upsetting / upset forging sering didefinisikan sebagai proses “*free forming*” dimana material benda kerja akan dikurangi ketinggiannya dengan menekan dua bidang yang sejajar /pararel. Ilustrasi proses ini bisa dilihat di gambar 2.3. *Upset forging* yang bercirikan arah material logam yang dideformasikan tegak lurus dengan arah gerak cetakan. Proses *upset forging* terkadang digunakan sebagai proses awalan sebelum proses forming lanjutan namun sering juga digunakan sebagai proses inti.

Upsetting adalah proses deformasi dasar yang bisa divariasikan dengan berbagai macam jenis seperti pada gambar 2.4. *Upsetting* di aplikasikan di industri masal seperti untuk pembuatan baut, dan paku keling, *valve lifters*



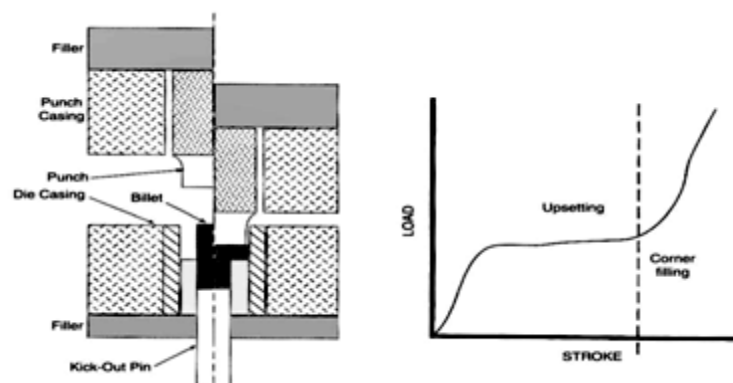
Gambar 2.3. Sketsa proses upset forging (Lange dkk., 1985)

Suksesnya sebuah proses upsetting sangat tergantung kepada dua hal, pertama *Upset ratio* (R_u atau s) yang menentukan batas forming /sifat mampu tempa (*forgeability*) suatu material (Pers 2.1). Yang kedua adalah *upset strain /principle strain*. Parameter ini yang menentukan batas kemungkinan terjadinya buckling (Pers 2.2).



Gambar 2.4. Berbagai macam teknik upsetting, Benda kerja tidak ada rongga penopang (a), rongga penopang ada di cetakan bawah (b), rongga penopang ada dicetakan atas (c), rongga penopang dicetakan atas dan bawah (d) (ASM., 1970).

Dalam proses *upset forging*, parameter yang penting diantaranya adalah dimensi benda kerja, kekuatannya, sifat mampu bentuknya, nilai *upset ratio*, keakurasian yang ingin dicapai, dan kualitas permukaan. Ketika proses pembentukan dilakukan dalam beberapa tahap, desain dari perlakuan awal proses *heading* akan berpengaruh pada bentuk akhir. Karena itu proses perlakuan awal untuk *upset forging* yang dilakukan lebih dari satu tempaan harus dibentuk dengan cara sedemikian rupa sehingga benda kerja akan diarahkan secara benar pada setiap tahapnya sehingga akan menghindari terjadinya *buckling* (tekukan) dan *folding* (lipatan). (Lange dkk, 1985)



Gambar 2.5 Peralatan untuk *flashless cold upset forging* dan kurva *load-stroke* (Altan dkk, 1996)

Untuk energi pembentukan pada proses *upset forging* ada kondisi ekstrim dalam peningkatan nilai gaya *upsetting (Load)* saat proses mengarah pada pemenuhan isi cetakan pada sudut-sudutnya sebagaimana terlihat pada gambar 2.5. *Load* yang diperlukan untuk mengisi cetakan pada area sudut sangatlah tinggi yaitu sekitar tiga sampai sepuluh kali lipat dibandingkan proses *upset forging* yang sama namun tanpa pengisian area sudut (Lange dkk, 1985, Altan dkk, 1982)

Heinz Tschaetsch (2006) memberikan rumusan tentang perhitungan dalam proses *upset forging* seperti :

2.2.1 *Upset ratio* (R_u)

Upset Ratio R_u atau s , merupakan nilai batasan yang akan menentukan potensi terjadinya *buckling* pada benda kerja

$$R_u = s = \frac{h_o}{d_o} = \frac{h_{o_{hd}}}{d_o} \quad (\text{Pers. 2.1})$$

Dimana:

$R_u = s = \text{Upset ratio}$

h_o = Tinggi awal benda kerja pada *free upsetting* (mm)

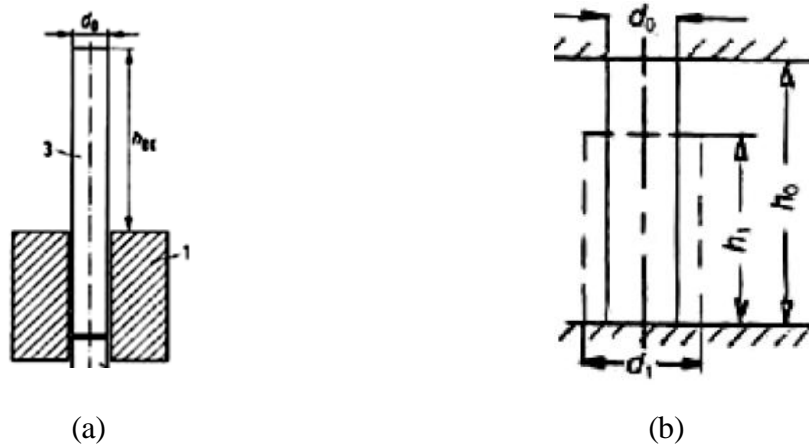
$h_{o_{hd}}$ = Tinggi awal benda kerja yang tidak dijepit di cetakan (mm)

d_o = Diameter awal benda kerja (mm)

Batas nilai *Upset ratio* sehingga proses masih aman / terhindar dari kemungkinan terjadi *buckling* jika dilakukan dalam langkah *single stroke process* adalah $s \leq 2,6$ (Tschaetsch, 2006)

Tabel 2.1. Nilai R_u untuk proses *cold upset forging* (Lange dkk, 1985)

Operation	R_u Value
One operation (single-stroke process)	≤ 2.3
Two operations (two-stroke process)	≤ 4.5
Three operations (three-stroke)	≤ 8.0
Multistroke (more than three) with whole die (limited by difficulties arising during ejection)	≤ 10.0
Multistroke (more than three) with split die	≤ 20.0



Gambar 2.6 *Inserted in the die* (a) *free upsetting* (b) (Tschaetsch, 2006)

2.2.2 Principle Strain (φ_p)

Batas maksimal rasio tinggi akhir dan tinggi awal untuk diijinkannya proses deformasi terhadap suatu material bisa dilakukan.

$$\varphi_p = \left(\ln \frac{h_1}{h_0} \right) \quad (\text{Pers. 2.2})$$

Dimana:

h_0 = Tinggi awal benda kerja (mm)

h_1 = Tinggi akhir benda kerja setelah proses deformasi (mm)

Sesuai dengan tabel 4.1 tentang *permissible deformation* untuk Al 99.88 untuk menghindari kemungkinan terjadinya buckling adalah 2,5.

Tabel 2.2. *Principle strain* pada berbagai material (Tschaetsch, 2006)

Material	φ_{perma}
Al 99.88	2.5
Al MgSil	1.5 – 2.0
Ms 63–85 CuZn 37–CuZn 15	1.2 – 1.4
Ck10–Ck 22 St 42–St 50	1.3 – 1.5

2.2.3 Diameter awal minimal benda kerja

Diameter awal minimal untuk benda kerja yang dapat dihitung dengan persamaan 2.3.

$$d_o = \sqrt[3]{\frac{4.V}{\pi.s}} = \sqrt[3]{\frac{4.\pi.r^2.h_1}{\pi.s}} \quad (\text{Pers. 2.3})$$

Dimana:

s = Upset ratio

h_1 = Tinggi akhir benda kerja (mm)

V = Volume head (mm³)

d_o = Diameter awal benda kerja (mm)

r = jari-jari head (mm)

2.2.4 Gaya Upsetting

Gaya upsetting yang diperlukan dirumuskan :

$$F = A_1 \cdot k_{str1} \left(1 + \frac{1}{3\sqrt{3}} \cdot \mu \frac{d_1}{h_1} \right) \quad (\text{Pers. 2.4})$$

Dimana:

F = Gaya upsetting (N)

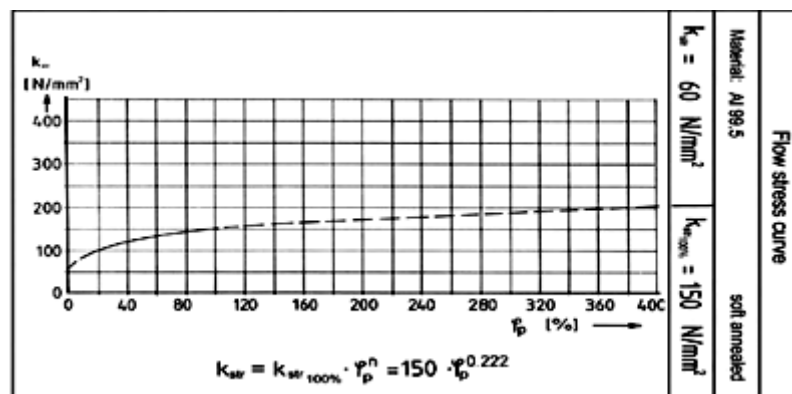
A_1 = Luas permukaan setelah *upset forging* (mm²)

k_{str1} = Flow stress di akhir *upset forging* (N/mm²), Al di tabel 4.1

μ = koefisien gesekan (0,1 – 0,15)

h_1 = Tinggi akhir benda kerja (mm)

d_1 = Diameter akhir benda kerja (mm)



Gambar 2.7 Kurva flow stress untuk Aluminium 99.5. (Tschachtsch, 2006)

2.2.5 Kerja *Upsetting*.

$$W = \frac{V \cdot K_{strm} \cdot \phi_p}{\eta_F} \quad (\text{Pers.2.5})$$

Dimana,

K_{strm} = *mean flow stress* yaitu $(K_{str0} + K_{str1})/2$.

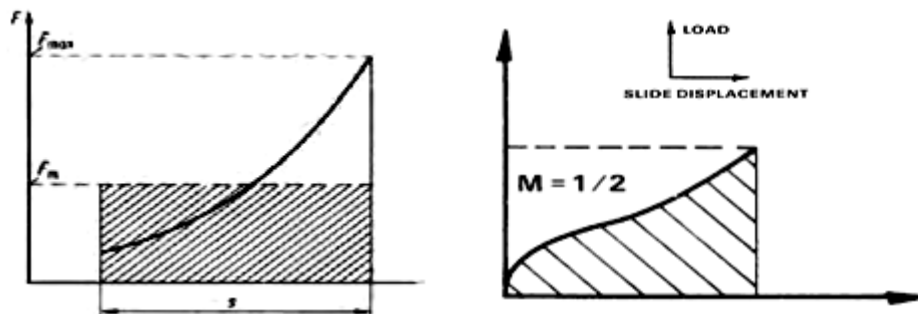
K_{str0} = *flow stress* pada principle strain 0

K_{str1} = *flow stress* pada principle strain maksimum

Atau bisa juga nilai W dihitung dengan rumus :

$$W = F \cdot s \cdot x = F(h_0 - h_1) \cdot x \quad (\text{Pers.2.6})$$

Dimana, $x = M$ = adalah faktor pengali sesuai dengan karakteristik kurva Load-stroke proses upset forging yang nilainya 0,5 – 0,6.



Gambar 2.8 Energi / Kerja *upsetting* = Load x displacement x (M atau x)
(Tschaetsch, 2006; Shirgaokar, 2005)

2.2.6 Toleransi

Toleransi untuk proses *upsetting* didasarkan pada dimensi utama baik itu tebal maupun diameter *head*. Toleransi dimensi yang di berikan untuk produk *upsetting* dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Toleransi dimensi untuk proses *upsetting* (Tschaetsch, 2006)

Nominal size in mm	5	10	20	30	40	50	100
Head height tolerance in mm	0,18	0,22	0,28	0,33	0,38	0,42	0,5
Head \varnothing tolerance in mm	0,12	0,15	0,18	0,20	0,22	0,25	0,3

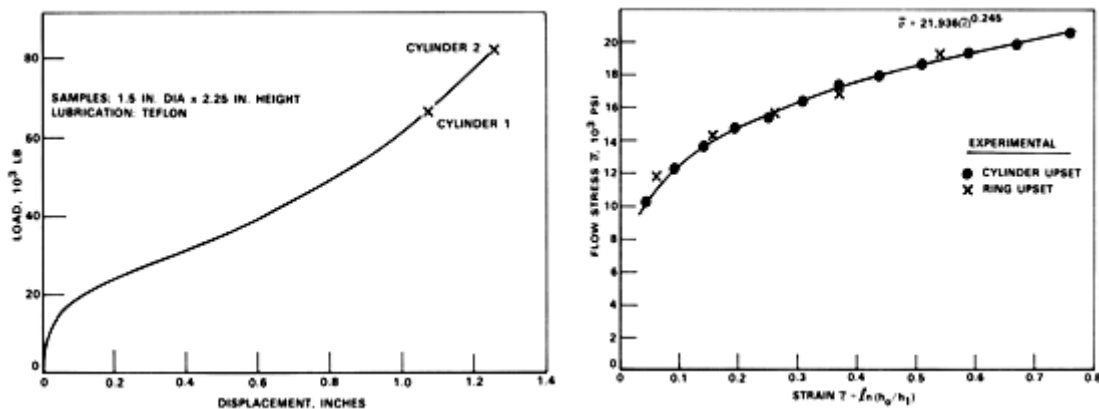
Secara umum toleransi geometri yang diberikan berkisar antara 1,5% - 3% dari dimensi inti

2.3 Penelitian Proses *Upset Forging*

Beberapa penelitian tentang *upset forging* yang telah dilakukan diantaranya adalah :

2.3.1 Lee, dkk (1972)

Lee melakukan penelitian proses *free upsetting* terhadap aluminium 1100 silinder yang berdimensi 1,5 inci pada diemeternya dan tinggi 2,25 inci. Eksperimen dilakukan dengan proses *uniform upsetting silinder* dan *ring upsetting*. Hasil yang diperoleh adalah grafik *Load-displacement*, grafik *Flow stress-strain* serta formula *flow stress-strain* dari Aluminium 1100



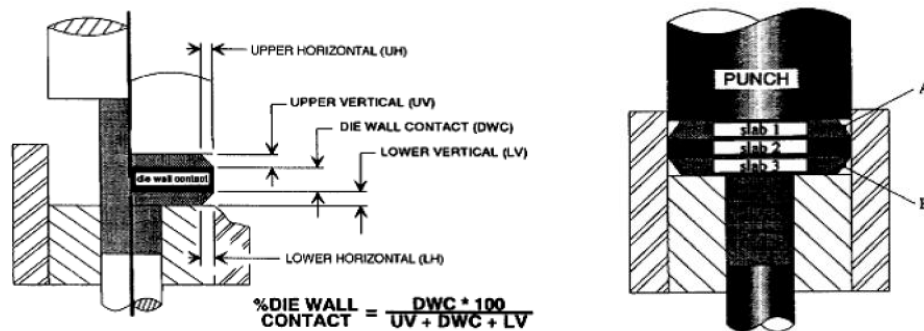
Gambar 2.9 Kurva *Load vs Displacement* (a) Kurva *Flow stress-strain* dan formulanya (b) (Lee dkk, 1972).

2.3.2 Lange dkk, (1985)

Lange melakukan proses eksperimen *cold upsetting* dengan berbagai macam material dengan memvariasikan jumlah proses tempa yang dilakukan untuk mereduksi ketinggian produk pada tingkatan tertentu yang sama. Dari hasil eksperimen yang dilakukan Lange memberikan rekomendasi besaran nilai R_u (*Upset ratio*) untuk proses *cold upsetting* dengan berbagai jumlah operasi tempanya (*stroke*). Rekomendasi Lange seperti tertera dalam Tabel 2.1

2.3.3 Altan dkk, (1996)

Altan melakukan penelitian pada proses *Closed –Die upsetting* untuk menemukan formula / rumus untuk memprediksikan lebih akurat besarnya *Load / Gaya upsetting* yang diperlukan berdasarkan sifat material dan geometri proses. Altan menggunakan metode Slab- analisis untuk menemukan formula tersebut. Metode ini membagi zona hasil *upset forging* menjadi 3 bagian berdasarkan barreling yang terjadi.



Gambar 2.10 Pembagian lapisan untuk proses modifikasi metode slab analisis (Altan dkk, 1972).

Rumus maksimum *Load / Gaya upsetting* yang dikemukakan oleh Altan adalah :

$$L = \frac{\pi}{4} d_1^2 \sigma_f \left(1 + \frac{md_1}{3\sqrt{3}h_1} \right) \quad (\text{Pers. 2.7})$$

Sedangkan rumus hasil modifikasi untuk *closed-die upsetting* adalah :

$$L = \frac{\pi}{4} d_1^2 \sigma_f \left(1 + \frac{md_1}{3\sqrt{3}2h_1'} \right) \quad (\text{Pers. 2.8})$$

Dimana:

L = *Load* maksimum pada *tool*

d_1 = Diameter akhir dari head hasil *upsetting*

σ_f = *Flow stress* material , $\sigma_f = K(\ln h_0/h_1)^n$, modifikasi $\sigma_f = K(\ln 2h_0'/2h_1')^n$

m = Koefisien gesekan

h_1 = Ketinggian akhir dari *head*

h_0 = Ketinggian awal benda kerja

- K = Koefisien kekuatan material
 n = exponent *strain hardening* material
 h_0' = Ketinggian akhir pada lapisan 1 (atau 3) Gambar 2.10b.
 h_1' = Ketinggian awal berdasarkan ketinggian akhir pada lapisan 1 (atau 3) Gambar 2.10b.

2.3.4 Dixiet dkk, (2002)

Dixiet melakukan eksperimen *upsetting* dan simulasi FEM untuk menentukan tingkat *error flow stress* yang terjadi antara hasil simulasi dan eksperimen. Hasil yang didapatkan Dixiet merumuskan metode memanfaatkan *barreling* sebagai parameter mengukur tingkat *error flow stress* antara hasil pengukuran pada eksperimen dan simulasi FEM.

Metode yang digunakan adalah dengan memvariasikan berbagai nilai faktor gesekan pada *strain* 1,0 , kemudian memanfaatkan *barreling* yang terjadi dimana besarnya digunakan sebagai referensi tingkat persentase besaran *error flow stress* yang terjadi pada hasil simulasi. Syarat dari metode yang dilakukan adanya data kurva *Load vs displacement* harus didapat dari pengukuran *Load* secara langsung pada mesin eksperimen.

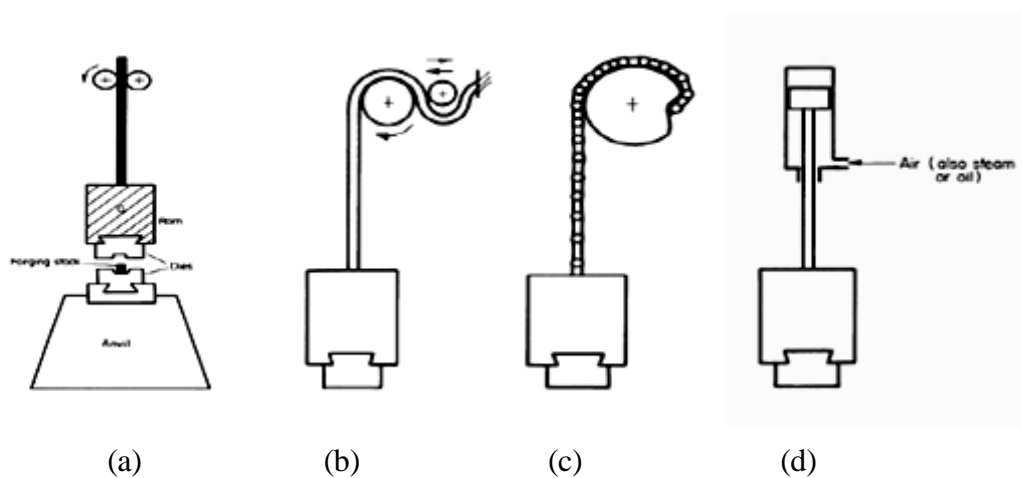
2.4 Drop Hammer Forging

Hammer forging adalah salah satu diantara tipe mesin *forging* yang cukup mahal dan tipe peralatan yang paling mumpuni dalam merubah gaya dan energi untuk melakukan proses *forming*. *Hammer forging* sangat sering di gunakan dalam proses *hot forging* untuk *coining*. *Hammer forging* memiliki reputasi yang sangat baik untuk meningkatkan sifat-sifat metalurgi dari berbagai macam material termasuk untuk jenis *high-performance material* seperti Waspaloy, yaitu superalloy berbasis nikel yang digunakan untuk berbagai aplikasi pada *disc turbine*.

Salah satu hal terpenting dalam *hammer forging* adalah lebih diutamakan menyatakan kemampuan mesin dalam konteks spesifikasi besaran energi yang bisa diberikan selama proses, dan diabaikannya spesifikasi mesin berdasarkan berat ram/beban yang dimiliki mesin (Shirgaokar, 2005).

Ada dua tipe sistem *drop hammer* yaitu *gravity drop hammer* dan *power drop hammer*. Untuk *gravity drop hammer* sistem bergantung pada besaran energi pembentukan yang bisa dikontrol dari dua variabel yaitu berat ram dan ketinggian jatuh ram tersebut. Untuk koneksi yang digunakan ada yang menggunakan batang kaku, *belt*, rantai dan piston, gambar 2.11.

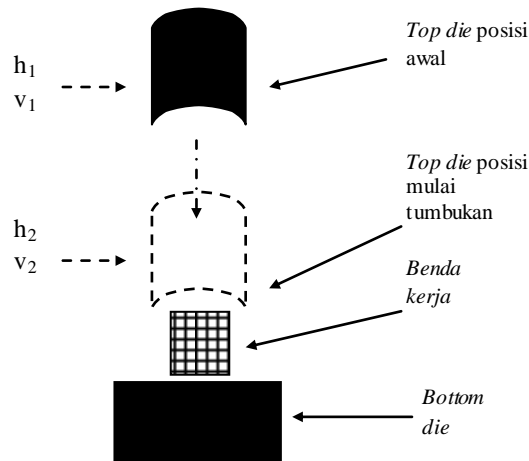
Pada *power drop hammer* konstruksi yang digunakan mirip seperti pada *air drop hammer* pada gambar 2.5d, dimana kecepatan jatuh selain menggunakan gravitasi juga dipercepat dengan menggunakan uap panas (*steam*), udara dingin, dan tekanan udara panas.



Gambar 2.11 Prinsip dari berbagai jenis model *gravity drop hammer* batang kaku (a), *belt* (b), rantai (c), udara-piston (d). (Shirgaokar, 2005).

Saat ini sebagian besar model drop hammer adalah menggunakan tipe *power/pressure drive drop hammer*, dimana tekanan dan ketinggian jatuh ram dicontrol dan dukur secara elektronik dan sebagai hasil outputnya energi per tempaan akan bisa tercatat secara otomatis.

Pada sistem *drop hammer* berkaitan efisiensi energi untuk energi pembentukan (*blow efficiency*) ada dua pendekatan yang bisa dipakai. *Blow efficiency* adalah energi terpakai dibagi dengan energi maksimum dari mesin, dimana nilainya adalah sebesar 0,8 – 0,9 untuk kategori *soft blows* (Gaya/Load kecil dan *displacement* besar), dan 0,2 – 0,5 untuk kategori *hard blows* (Gaya / Load besar dan *displacement* kecil) (Shirgaokar, 2005).



Gambar 2.12 Skema proses *gravity drop hammer*

Besarnya energi yang diberikan ram (*top die*) senilai dengan Energi Potensial atau Energi Kinetiknya seperti dalam perumusan berikut ini :

$$E_p = mgh_1 \quad (\text{Pers. 2.8})$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (\text{Pers. 2.9})$$

Dimana :

E_p = Energi Potensial (Nm)

E_k = Energi kinetik (Nm)

m = massa (kg)

g = gravitasi (m/s^2)

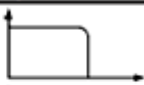
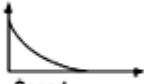

h = ketinggian jatuh (m)

v = kecepatan (m/s)

Salah satu karakteristik penting dalam spesifikasi mesin *forging* adalah variabel kecepatan. Seperti halnya pada mesin *drop hammer*, antara *gravity-power drop hammer* ternyata memiliki karakteristik kecepatan untuk memberikan tumbukan yang berbeda.

Altan tahun 1973 telah melakukan eksperimen dan hasilnya dia merekomendasikan besaran nilai kecepatan kerja dan grafik karakteristik *speed-stroke* pada tipe dan jenis-jenis mesin *forging* yang ada (lihat tabel 2.4).

Tabel 2.4 Rekomendasi nilai kecepatan kerja mesin forging (Altan dkk, 1973)

Forging machine	Speed range		Speed-stroke behavior
	ft/s	m/s	
Hydraulic press	0.2-1.0(a)	0.06-0.30(a)	
Mechanical press	0.2-5	0.06-1.5	
Screw press	2-4	0.6-1.2	
Gravity drop hammer	12-16	3.6-4.8	
Power drop hammer	10-30	3.0-9.0	
Counterblow hammer (total speed)	15-30	4.5-9.0	
HERF machines	20-80	6.0-24.0	
Low-speed Petroforge	8-20	2.4-6.0	

Source: [Altan et al., 1973]

2.5 Cacat Pada Proses Tempa (*Forging*)

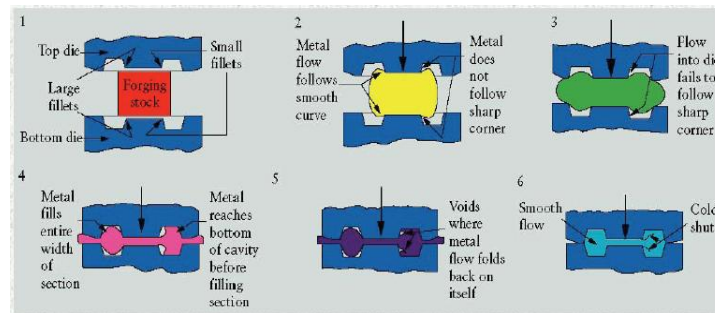
Kegagalan, disamping membuang biaya yang cukup besar juga memakan waktu perencanaan produksi yang dapat mengganggu jadwal (*time schedule*) produk lainnya. Dalam perancangan dengan menggunakan konsep metode klasik umumnya mempunyai tingkat kegagalan yang cukup tinggi dan membutuhkan biaya yang cukup besar karena dibutuhkan *trial and error*. Kegagalan ini dapat diperkecil apabila keahlian, pengalaman, intuisi, kreatifitas yang dimiliki oleh perencana tinggi dan melakukan prosedur-prosedur iterasi yang melibatkan usaha percobaan yang ekstensif.

Secara garis besar kegagalan dibagi menjadi 2 yaitu kegagalan produk dan kegagalan cetakan yang mempunyai keterkaitan baik langsung maupun tidak langsung. Contoh kegagalan tidak langsung adalah produk gagal karena volume *raw materialnya* kurang, demikian juga gagal karena kesalahan penyetelan (*bad setting*) yang memungkinkan terjadinya benturan.

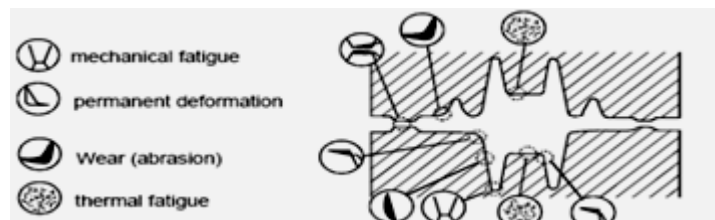
Cacat produk (*defect*) ada 6 jenis yaitu Cacat lipatan (*folds*), Cacat geser (*shear defect*), Retak (*cracks*), Cacat permukaan (*surface defect*), Cacat bentuk (*form defect*), Cacat struktur (*structural defect*).

Kemungkinan-kemungkinan penyebab dari cacat tersebut khusus terkait cetakan (*die/tool*), cacat pada produk dapat disebabkan karena geometri, kondisi, permukaan dan material dari cetakan. Sedangkan kegagalan cetakan bisa dikarenakan karena proses pembuatan yang kurang baik seperti tingkat ketelitian

geometri serta proses lanjut yang kurang/salah seperti tidak adanya proses pengerasan / proses meningkatkan ketangguhan cetakan.



(a)



(b)

Gambar 2.13 Kegagalan dalam proses *forging* (a) Cacat pada cetakan (b) (Shirgaokar, 2005).

Selain faktor kesalahan dalam proses desain dan pembuatan cetakan, cetakan juga bisa mengalami kegagalan setelah digunakan untuk proses *forming*. Penyebab utama kegagalan/cacat pada cetakan bisa disebabkan oleh beberapa faktor.

2.5.1 Temperatur

Dengan bertambah tingginya temperatur maka kekuatan cetakan akan makin rendah, terjadi penurunan nilai kekerasan, sehingga kegagalan terhadap keausan akan makin mudah terjadi.

Kegagalan keausan dibedakan menjadi 3 yaitu *abrasive wear*, *adhesive wear*, dan *plastic deformation*. *Abrasive Wear* merupakan keausan yang diawali dengan perpindahan material secara perlahan karena adanya ruang aliran yang kecil, material alir keras dan partikel tajam diantara cetakan dan material benda kerja yang mengakibatkan ruang cetakan bertambah besar.

Adhesive wear, merupakan keausan karena adanya luluh/peleburan (*melting*) dan sifat pengelasan (*welding*) pada permukaan daerah kontak local antara cetakan dengan benda kerja dan sebagai akibatnya ruang cetakan akan bertambah sempit.

Plastic deformation, merupakan perpindahan material secara permanen akibat adanya tekanan dan temperatur lokal yang tinggi.

Dalam proses *forming*, deformasi plastis dan gesekan memberikan kontribusi yang besar dalam peningkatan nilai panas yang terjadi dalam proses. Hampir 90-95% energi mekanis yang terlibat dalam proses akan dirubah menjadi panas [*Faren dkk, 1925*]

2.5.2 Tekanan

Kontinuitas penempaan dalam waktu yang cukup lama dapat menyebabkan kelelahan pada cetakan. Bila profil yang dimiliki cetakan cukup rumit akan dapat memperbesar probabilitas kegagalan karena adanya kemungkinan daerah-daerah lokal tempat konsentrasi tegangan terjadi lebih besar. Akan berbeda halnya bila profil cetakan datar, hanya mengalami tegangan tekan yang mempunyai probabilitas kegagalan cukup kecil. Munculnya kelelahan ini akan dapat menimbulkan daerah plastis (*plastic zone*) yang dapat memunculkan keausan dan bila terdapat konsentrasi tegangan maka kegagalan retak akan terjadi.

2.5.3 Kecepatan

Faktor kecepatan yang dimaksud disini adalah hasil dari proses pemukulan mesin tempa (*forging*) yang berakibat langsung dengan aliran material (*billet*) dengan cetakan. Keausan akan cepat terjadi bila pada daerah tersebut mempunyai kecepatan aliran benda kerja, temperatur cetakan, dan tekanan yang diterima cetakan masing-masing bernilai tinggi.

2.5.4 Pelumasan

Dalam proses tempa pelumasan merupakan variabel yang berperan untuk mengurangi atau menghambat peningkatan panas pada cetakan, mengurangi efek gesekan antara cetakan dengan benda kerja, dan menjaga agar benda kerja tidak melekat pada cetakan. Pada proses *warm forging*, umur cetakan pada *punch backward extrusion* dipengaruhi oleh *heat crack* dan penipisan lapisan permukaan. Untuk meningkatkan umur cetakan, penting akan adanya pelekatan

lapisan pelumas dengan merata yang melindungi atau membalut secara kuat dari cetakan tersebut (Volertsen, 2004).

2.6 Aluminium

Semua logam yang memiliki keuletan pada kondisi temperatur ruang pada prinsipnya semua bisa dilakukan proses *cold forging*. Aluminium merupakan logam ringan mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat baik lainnya sebagai sifat logam. Material ini sangat banyak penggunaannya bukan saja untuk peralatan rumah tangga tapi juga dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi dan sebagainya.

Beberapa contoh aluminium yang umum dijadikan material kerja proses *cold forging* adalah [ICFG, 2002]:

1. Jenis *Pure / nearly pure aluminium alloys* : 1285, 1070, 1050, dan 1100
2. *Nonhardenable aluminium alloys* : 3003, 5152 dan 5052
3. *Hardenable aluminium alloys* : 6063, 6053, 6066, 2017, 2024 dan 7075

Aluminium bisa digunakan sebagai alternatif dari baja dimana potensi material yang lebih ringan yang mana berat kadang jadi permasalahan untuk penggunaan baja. Tabel 2.3 menggambarkan sifat-sifat aluminium yang cocok untuk *proses cold forging*.

Tabel 2.5 Sifat material aluminium yang cocok untuk proses *cold forging* (ICFG, 2002)

Aluminium Alloy	Heat Treatable	Strength	Elongation	Corrosion resistance	Machinability	Weldability
1050	No	*	****	****	*	****
3103	No	**	*	****	*	****
5056	No	***	**	****	**	**
2014	Yes	***	**	*	***	*
6061	Yes	***	***	***	**	****
7075	Yes	****	**	**	***	*
Note : * = Poor, **** = Best						

2.7 Pemodelan dengan Metode Elemen Hingga

Dilihat dari sejarahnya, perkembangan simulasi proses forging menggunakan *Finite-Element Method (FEM)* / Metode Elemen Hingga yang mana

merupakan bagian dari proses analisa secara numerik, sudah diawali pada tahun 1970-an. Namun pada saat itu *remeshing* secara otomatis belum ada. Namun dengan perkembangan waktu serta teknologi komputerisasi saat ini, telah tercipta banyak software komersial yang telah diterima oleh dunia industri termasuk industri *forging* yang bahkan telah menjadi bagian yang tak terpisahkan dalam mendesain dan mengembangkan proses *forging*

2.7.1 Tujuan utama desain proses secara numerik

Tujuan utama dari desain proses secara numerik dalam proses *forging* sebagaimana dideskripsikan oleh Vasquez (1990) adalah untuk:

- a. Mengembangkan desain *dies* yang memadai dan meningkatkan parameter proses yaitu dengan :
 1. Simulasi proses untuk memastikan *dies* akan penuh terisi
 2. Memprediksikan batasan proses sehingga tak akan terlewat sehingga bisa mencegah cacat internal maupun permukaan.
 3. Memprediksikan temperatur sehingga karakteristik part yang dibuat, kondisi gesekan, dan keausan cetakan dapat terkontrol.
- b. Meningkatkan kualitas produk dan kompleksitas profilnya namun tetap dapat mengurangi biaya manufaktur, yaitu dengan:
 1. Memprediksi dan meningkatkan aliran butir dan struktur mikro
 2. Mengurangi proses ujicoba cetakan dan waktu yang terbuang.
 3. Mengurangi *reject* dan meningkatkan keluluhan material
- c. Memperkirakan beban dan energi *forging* seperti tercermin pada tegangan pada *tools* dan temperatur sehingga :
 1. Kegagalan *tool* secara prematur dapat dihindari.
 2. Dapat memilih mesin *forging* yang tepat untuk aplikasi produk yang diinginkan.

Proses pemodelan *closed-die forging* menggunakan pemodelan elemen hingga (FEM) telah diterapkan dalam dunia penerbangan sekitar dua dekade. Tujuan dari penggunaan pemodelan dengan komputer dalam menganalisa *closed-die forging* adalah untuk meningkatkan pemahaman bagaimana memilih dan menentukan pemrosesan yang paling benar dan untuk meningkatkan performa dari komponen melalui pemahaman proses dan kontrol yang lebih baik. Pada awal

aplikasinya, proses pemodelan membantu para perancang untuk melihat aliran logam dan kemungkinan cacat yang akan terjadi dalam proses *forging*. Setelah simulasi proses *forging* dapat dilakukan, tampilan dari variabel seperti *effective strain* (Regangan efektif) dan temperatur pada saat kapanpun selama proses *forging* dapat dimunculkan. Shen pada tahun 1993 berhasil menyatakan kondisi rekam jejak aspek termodinamika pada titik-titik yang telah dipilih selama *forging* juga dapat dilacak.

Terintegrasi dengan pemodelan proses, pemodelan struktur mikro adalah area baru yang memiliki masa depan yang cerah. Pemodelan struktur mikro mengantarkan kepada tampilan-tampilan karakter metalurgi yang optimum yang paling tepat dari proses *forging* yang akan di tampilkan pada komputer. Aspek-aspek metalurgi diantaranya adalah ukuran butir dan perapatan butir dapat diprediksikan dengan akurat secara komputasional.

2.7.2 Simulasi proses *forging* yang telah dilakukan.

Beberapa proses simulasi yang telah dibuktikan secara aplikasi praktis terkait *closed die forging* seperti :

- a. Desain tahapan *forging* dalam *cold*, *warm*, dan *hot forging* termasuk didalamnya tentang prediksi dari gaya pembentukan, tegangan cetakan, dan bentuk yang dapat dibuat.
- b. Prediksi dan optimasi dari *flash dimention* dalam proses *hot forging* untuk proses pembentukan dari bahan lembaran atau serbuk.
- c. Prediksi tegangan cetakan, patah, dan keausan cetakan, meningkatkan variabel proses dan desain cetakan untuk mengurangi kegagalan.
- d. Memprediksi dan menghilangkan cacat permukaan atau patah seperti patah internal.
- e. Investigasi efek dari gesekan pada laju aliran logam.
- f. Prediksi dalam aspek mikrostruktur dan sifat-sifatnya. pemulihan elastis dan tegangan sisa.

Sejauh ini pemanfaatan FEM dengan maksud dan tujuan sebagaimana telah digambarkan sebelumnya telah banyak diaplikasikan secara luas untuk produk-produk *forging* ukuran besar atau makro. Untuk skala mikro, karena saat ini perkembangan produk mengarah kepada ukuran mikro, aspek simulasi untuk

menciptakan teknik yang optimal, cepat serta efisien namun performa produk bisa optimal terus dikembangkan dan masih sangat luas area yang akan di telitinya, karena tidak semua karakter dalam proses forging skala makro akan dapat dengan tepat atau bisa sama persis karakternya jika diterapkan dalam proses *microforming*.

Metode elemen hingga untuk simulasi proses *metal forming* dibagi menjadi dua kelompok yaitu untuk analisa hubungan *elastic-plastis* dan *rigid-plastis*. Untuk *elastic plastis* hasil yang didapatkan tidak hanya deformasi plastis saja namun deformasi elastis juga bisa terbaca. Sedangkan *rigid-plastis*, diasumsikan hanya ada deformasi plastis saja dan ini tentunya menguntungkan karena proses simulasi berlangsung lebih cepat.

Keakuratan proses simulasi dengan metode elemen hingga sangat bergantung pada keakuratan data masukan seperti *flow stress* sebagai fungsi perubahan *temperature*, *strain*, *strain rate*, struktur mikro dan karakteristik dan besaran gesekan yang terjadi.

Berkaitan dengan parameter geometri, agar lebih efisien dalam proses simulasi maka profil minor pada geometri bisa dihilangkan seperti radius yang kecil pada cetakan yang mana tidak memiliki efek yang significant pada laju aliran logam (Altan dkk, 1990). Namun pada beberapa kasus spesifik seperti dalam proses *microforming*, hal tersebut tidak boleh diabaikan atau dihilangkan, karena ukuran kecil tersebut sangat penting untuk dianalisa dalam proses simulasi (Messner dkk, 1994)