SIMULASI 3 DIMENSI PENGARUH LEBAR SIRIP (FLASH) DAN KECEPATAN PENEKANAN TERHADAP KEMAMPUAN PENGISIAN RONGGA CETAKAN PADA PROSES *IMPRESSION DIE FORGING*

SKRIPSI konsentrasi teknik produksi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik



DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL UNIVERSITAS BRAWIJAYA FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN MALANG 2007 SIMULASI 3 DIMENSI PENGARUH LEBAR SIRIP (FLASH) DAN KECEPATAN PENEKANAN TERHADAP KEMAMPUAN PENGISIAN RONGGA CETAKAN PADA PROSES *IMPRESSION DIE FORGING*

SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik



Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

UNL

Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng NIP. 132 233 147 Moch. Agus Choiron, ST., MT NIP. 132 259 061 SIMULASI 3 DIMENSI PENGARUH LEBAR SIRIP (FLASH) DAN KECEPATAN PENEKANAN TERHADAP KEMAMPUAN PENGISIAN RONGGA CETAKAN PADA PROSES *IMPRESSION DIE FORGING*

Disusun oleh :

<u>B R U L I M</u> NIM. 0210620028

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada

Tanggal 9 Agustus 2007

DOSEN PENGUJI

Skripsi I,

Skripsi II,

MUS

<u>Ir. Sentanu</u> NIP. 130 518 937 <u>Sugiarto, ST., MT.</u> NIP. 132 137 966

Komprehensif,

Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc NIP. 131 411 121

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. NIP. 132 159 708

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan dan Juruslamat Yesus Kristus, oleh karena kasih setia dan berkat-Nya yang tidak pernah berkesudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan banyak terima kasih atas bimbingan dan bantuan dalam menyusun skripsi ini kepada :

- Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
- Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang
- Bapak Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng. dan Bapak Moch. Agus Choiron, ST., MT. sebagai dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, masukan, dan kesabaran pada penulis dalam menyusun skripsi ini hingga selesai.
- 4. Bapak Moch. Agus Choiron, ST., MT. selaku Kepala Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menggunakan fasilitas Studio sebagai sarana penunjang dalam penyusunan skripsi ini.
- Seluruh keluarga, terutama Papaku Mambo G. dan Mamaku Lince M. sebagai orang tua yang selalu memberikan yang terbaik dalam kehidupan penulis.
- 6. Semua rekan-rekan mahasiswa khususnya Sobat Mesin "Oxygen" 2002, YHZQL'02, penghuni Lab. FDM dan Studio Perancangan, Harko P'RT-Kertas 73 dan Sumit P'RT-MI 35 yang telah banyak memberikan bantuan dan informasi yang sangat berguna hingga terselesaikannya skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari sempurna dan akan banyak mengandung kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi melengkapi skripsi ini.

Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua, Amin.

Malang, 4 Agustus 2007

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMBANG DAN SATUAN	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	x
DAFTAR TABEL DAFTAR GAMBAR DAFTAR LAMBANG DAN SATUAN DAFTAR LAMPIRAN RINGKASAN	v vi vii ix x

BAB I PENDAHULUAN

ASTAS BR	A hr.
I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	
1.3 Batasan Masalah	
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1	Penelitian sebelumnya	5
2.2	Dasar Teori	7
	2.2.1 Tempa (<i>Forging</i>)	7
	2.2.2 Kalsifikasi Proses Forging	7
	2.2.3 Pengoperasian <i>Forging</i>	7
	2.2.4 Impression Die Forging	9
	2.2.5 Penempaan Pada Regangan Bidang	12
	2.2.6 Tegangan Pada Penempaan Silinder Datar	14
	2.2.7 Sirip (Flash)	18
	2.2.8 Sudut Tirus (Draft Angle)	19
	2.2.9 Radius Fillet dan Radius Dies	20
	2.2.10 Parting Line	21
	2.2.11 Kecepaatan Penekanan	22
2.3	Ring Compression Test	23
2.4	Tinjauan Umum Metode Elemen Hingga	25

2.5 Software DEFORM	25
2.6 Kerangka Berpikir Teoritis	27
2.7 Hipotesa	28

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Yang Digunakan	29
3.2 Alat Yang Digunakan	29
3.3 Tempat dan Waktu Penelitian	29
3.4 Diagram Alir Penelitian	29
3.5 Verifikasi	30
3.5.1 Benda Kerja	31
3.5.2 Cetakan	32
3.5.3 Parameter Proses Verifikasi	32
3.5.4 Pemodelan Verifikasi	33
3.6 Variabel Penelitian	34
3.7 Pemilihan Model Benda Kerja	35
3.8 Benda Kerja	36
3.9 Cetakan	37
3.9.1 Preform I	37
3.9.2 Preform II	38
3.9.3 Preform III	39
3.9.4 Finishing (Impression Die Forging)	40
3.10 Pemodelan	42
3.11 Rancangan Penelitian	50

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses Verifikasi	51
4.1.1 Hasil Verifikasi	51
4.1.2 Pembahasan Verifikasi	52
4.2 Proses Preform dan Finishing (Impression Die Forging)	55
4.2.1 Hasil Preform dan Impression Die Forging	55
4.2.2 Pembahasan Impression Die Forging	58
4.2.2.1 Pengaruh Variasi Lebar Sirip (Flash) Terhadap	
Kekosongan Rongga Cetakan	61

4.2.2.2 Pengaruh Kecepatan Penekanan Terhadap Kekosongan	
Rongga Cetakan	64
4.2.2.3 Pengaruh Interaksi Lebar Sirip (Flash) dan Kecepatan	
Penekanan Terhadap Kekosongan Rongga Cetakan	67

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	69
TAR PUSTAKA	

DAFTAR PUSTAKA ERS

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sudut tirus (draft angle) pada beberapa material benda kerja	. 20
Tabel 2.2	Radius fillet dan radius sudut minimum	. 21
Tabel 3.1	Rancangan Percobaan	. 50
Tabel 4.1	Hasil Pengukuran Kekosongan Rongga Cetakan	. 61



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 1.1	Sirip (flash) pada Impression die forging	2
Gambar 2.1	Simulasi 2D closed die forging	6
Gambar 2.2	Penempaan dengan cetakan tertutup	9
Gambar 2.3	Terminologi Impression Die Forging	10
Gambar 2.4	Tegangan yang bekerja dengan kondisi regangan bidang	12
Gambar 2.5	Penempaan pada silinder datar	15
Gambar 2.6	Bukit gesekan untuk tekanan (kompresi) homogen	. 17
Gambar 2.7	Penampang sirip (<i>flash</i>)	. 18
Gambar 2.8	Kurva beban tempa terhadap langkah tempa untuk tempa	
	cetakan tertutup	. 19
Gambar 2.9	Penentuan sudut tirus cetakan	20
Gambar 2.10	Definisi radius <i>fillet</i> dan radius cetakan	21
Gambar 2.11	Grafik pengaruh strain rate terhadap flow stress pada baja	
	AISI 1045	. 22
Gambar 2.12	Tipe deformasi pada Ring Compression Test	. 24
Gambar 2.13	Kurva Kalibrasi Ring Compression Test	. 24
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	. 30
Gambar 3.2	Kurva Kalibrasi Ring Compression Test	31
Gambar 3.3	Dimensi dan bentuk 3D benda kerja ring compression test	31
Gambar 3.4	Dimensi dan bentuk 3D Punch dan Die ring compression test	. 32
Gambar 3.5	Pemodelan Benda Kerja Ring Compression Test	. 33
Gambar 3.6	Pemodelan proses Ring Compression Test	. 34
Gambar 3.7	Model Benda Kerja "Connecting Rod"	. 35
Gambar 3.8	Dimensi Model Benda Kerja "Connecting Rod"	36
Gambar 3.9	Benda kerja awal	. 36
Gambar 3.10	Dimensi cetakan Preform I	. 37
Gambar 3.11	Bentuk 3D cetakan Preform I	38
Gambar 3.12	Dimensi punch Preform II	38
Gambar 3.13	Cetakan Preform II	. 39
Gambar 3.14	Cetakan Preform III	40
Gambar 3.15	Cetakan Finishing	41

Gambar 3.16	Dimensi sirip (flash)	42
Gambar 3.17	Pemodelan benda kerja Preform I	43
Gambar 3.18	Pemodelan cetakan Preform I	43
Gambar 3.19	Pemodelan proses Preform I	44
Gambar 3.20	Pemodelan benda kerja Preform II	44
Gambar 3.21	Pemodelan cetakan Preform II	45
Gambar 3.22	Pemodelan proses Preform II	45
Gambar 3.23	Pemodelan benda kerja proses Preform III	46
Gambar 3.24	Pemodelan cetakan proses Preform III	47
Gambar 3.25	Pemodelan proses Preform III	48
Gambar 3.26	Pemodelan benda kerja proses Finishing	48
Gambar 3.27	Pemodelan cetakan proses Finishing	49
Gambar 3.28	Pemodelan proses Finishing	50
Gambar 4.1	Proses Ring Compression Test	51
Gambar 4.2	Hasil Simulasi Ring Compression Test	52
Gambar 4.3	Grafik Verifikasi Ring Compression Test	54
Gambar 4.4	Proses Preform I	55
Gambar 4.5	Proses Preform II	56
Gambar 4.6	Proses Preform III	57
Gambar 4.7	Proses Finishing	58
Gambar 4.8	Kekosongan Rongga Cetakan	59
Gambar 4.9	Bentuk Connecting Rod yang tidak sempurna	60
Gambar 4.10	Connecting rod tanpa sirip	60
Gambar 4.11	Hasil penempaan pada kecepatan 60 mm/s	62
Gambar 4.12	Grafik hubungan lebar sirip terhadap volume kekosongan	
	rongga cetakan	63
Gambar 4.13	Hasil penempaan pada lebar sirip 4 kali ketebalannya	65
Gambar 4.14	Grafik hubungan kecepatan penekanan terhadap volume	
	kekosongan rongga cetakan	66
Gambar 4.15	Grafik pengaruh lebar sirip dan kecepatan terhadap kekosongan	
	rongga cetakan	67

DAFTAR LAMBANG DAN SATUAN

Lambang	Arti	Satuan
Р	Gaya, beban tempa	N
p	tekanan	Pa
τ	Tegangan geser	Pa
E	Modulus elastisitas bahan	Gpa
ρ	Massa jenis (density)	Kg/m ³
v	Kecepatan penekanan	mm/s
e	Bilangan eksponensial	
V	Angka poison	
h	Tinggi penampang	mm
a	Jarak linier AD BRAN	mm
μ	Koefisien gesek	
C	Konstanta integrasi	
m	Faktor gesekan antar permukaan	
k	Tegangan luluh geser	Pa
θ	Sudut kemiringan	0
<i>R</i> , <i>r</i>	Jari-jari, jarak	mm
F	Gaya Gaya	Ν
φ	Strain rate (regangan alir)	1/s
σ	Tegangan	Pa
V	Volume	mm ³



DAFTAR LAMPIRAN

No.

Judul

Lampiran 1 Gambar Benda Kerja dan Cetakan

JVERS

Lampiran 2 Material Properties baja karbon 0,35% (AISI 1035) pada suhu 20⁰C

TAS

BRAWIUAL

Lampiran 3 Message proses *impression die forging* dengan lebar sirip 2 kali ketebalannya dan kecepatan penekanan 60 mm/s.

RINGKASAN

BRULIM, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2007, Simulasi 3 Dimensi Pengaruh Lebar Sirip (Flash) Dan Kecepatan Penekanan Terhadap Kemampuan Pengisian Rongga Cetakan Pada Proses Impression Die Forging, Dosen Pembimbing I : Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, ST.,M.Eng., Dosen Pembimbing II : Moch. Agus Choiron, ST., MT.

Salah satu permasalahan yang sering terjadi pada proses *impression die forging* adalah cetakan yang tidak terisi penuh. Tujuan penulisan skripsi ini adalah untuk mengetahui pengaruh lebar sirip (*flash*) dan kecepatan penekanan terhadap kemampuan pengisian rongga cetakan pada proses *impression die forging*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi komputer menggunakan *software* DEFORM-3D. Metode ini diharapkan akan menjadi solusi alternatif yang lebih hemat dalam segi waktu dan biaya jika dibandingkan dengan cara *trial-error*.

Proses penempaan dilakukan sebanyak 4 langkah (*Preform* I, II, III dan *Finishing*) dan dimodelkan secara 3 dimensi. Material benda kerja adalah baja karbon AISI 1045 dengan temperatur awal 1100° C dan dimodelkan *plastis*. *Dies* dimodelkan sebagai material *rigid* dengan temperatur awal 300° C. Lebar sirip (*flash*) divariasikan 2; 2,5; 3; 3,5 dan 4 kali dari ketebalannya, sedangkan kecepatan penekanan divariasikan 60; 120; 180; 240 dan 300 mm/s.

Untuk mengetahui keakuratan metode simulasi ini, maka terlebih dahulu dilakukan prosedur verifikasi yaitu dengan membandingkan kurva hasil simulasi *ring compression test* dengan kurva kalibrasi *ring compression test* analisis Avitzur.

Kesimpulan dari penelitian dengan simulasi komputer ini adalah dengan memperbesar lebar sirip (*flash*) dan meningkatkan kecepatan penekanan, maka kemampuan pengisian rongga cetakan semakin meningkat. Kemampuan pengisian rongga cetakan terbaik diperoleh pada kondisi lebar sirip (*flash*) 4 kali ketebalannya dan kecepatan penekanan 300 mm/s, yaitu dengan persentase kekosongan rongga cetakan sebesar 2,96%.

Kata Kunci : lebar sirip (*flash*), kecepatan penekanan, *impression die forging*, kekosongan rongga cetakan.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu proses pembentukan logam yang sering digunakan hingga saat ini adalah proses tempa (*forging*). Tempa adalah suatu operasi dimana logam dipanaskan dan kemudian diberi sebuah gaya untuk mengubah bentuk logam dengan cara tertentu sehingga diperoleh hasil akhir yang diinginkan (Rao, 1990 : 261). Salah satu jenis tempa adalah *closed die forging* (tempa cetakan tertutup), yaitu proses tempa yang dilakukan dalam cetakan tertutup. Contoh produk yang dihasilkan adalah suku cadang atau komponen mesin kendaraan seperti *connecting rod*, *landing gear* pesawat terbang, dan sebagainya.

Gambaran proses pembentukan yang terjadi pada *closed die forging* adalah bongkahan logam / benda kerja yang diletakkan di antara *dies* (cetakan), yaitu *up die / punch* dan *bottom die*, kemudian *up die / punch* diberi gaya untuk menekan benda kerja dengan tekanan tinggi dalam suatu rongga tertutup sehingga logam mengalir hingga benar-benar memenuhi rongga cetakan, dengan demikian dapat dihasilkan produk yang mempunyai toleransi dimensi yang ketat.

Berdasarkan pengalaman, kegagalan yang sering dihadapi pada proses ini adalah cetakan yang tidak terisi penuh *(lack of die fill)* dan kualitas produk (sifat mekanik yang tidak sesuai dengan keinginan atau standar produk yang ditetapkan). Untuk mengatasi masalah cetakan yang tidak terisi penuh *(lack of die fill)*, maka hal penting yang perlu diperhatikan adalah mengatur jumlah logam yang cukup. Karena sulit mengaturnya, maka jumlah logam dilebihkan sedikit sehingga kelebihan logam tertekan keluar cetakan dan membentuk sirip *(flash)*. Agar hal tersebut tercapai, maka diperlukan strategi dalam merancang sirip. Karena adanya sirip, maka istilah *closed die forging* merupakan istilah yang kurang tepat. Ungkapan yang lebih tepat untuk proses tersebut adalah *impression die forging* (tempa cetakan jejak) (Dieter, 1988: 179).

Strategi dalam merancang sirip adalah menentukan dimensi sirip yang tepat agar ekstrusi logam melalui celah sirip yang sempit lebih sulit daripada pengisian bagianbagian yang rumit dari cetakan. Tetapi, jangan sampai menimbulkan beban tempa yang sangat tinggi karena dapat menyebabkan cetakan mudah aus dan rusak. Tekanan tempa akan meningkat dengan berkurangnya ketebalan sirip dan bertambah lebarnya sirip (Dieter, 1988: 180). Sedangkan dimensi sirip yang terlalu besar mengakibatkan ketidaksesuaian terhadap bentuk akhir yang diinginkan serta pemborosan material. Rancangan bentuk cetakan merupakan tahapan yang paling sulit dan kritis. Rancangan yang tepat menjamin adanya aliran yang bebas cacat, pengisian cetakan secara sempurna, dan kerugian sirip minimal.



Gambar 1.1 Sirip (flash) pada Impression die forging Sumber : Dieter, 1988 : 566

Terdapat tiga cara yang bisa digunakan untuk menyelesaikan masalah dalam bidang *engineering*, yaitu menggunakan metode eksperimental, metode matematis dan metode numerik. Metode alternatif yang dapat digunakan dalam mendesain cetakan pada *impression die forging* ini adalah metode simulasi komputer, yang merupakan pengembangan dari metode numerik.

Sergio Tonini Button (2000) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa pemodelan dengan simulasi komputer pada proses pembentukan logam merupakan alat yang sangat bermanfaat karena hasil eksperimen dapat dibandingkan dengan hasil simulasi numerik, hal ini dibuktikannya dengan mensimulasikan cacat pengisian rongga cetakan pada proses *closed die forging*.

Ismi Choirotin (2006) dalam penelitiannya membahas pengaruh lebar celah sirip (*flash*) dan kecepatan penekanan terhadap kemampuan pengisian rongga cetakan pada proses *closed die forging* dengan simulasi komputer. Akan tetapi, pada penelitian ini proses tempa benda kerja dimodelkan 2 dimensi sehingga belum bisa menampilkan secara penuh proses tempa dan bentuk akhir benda kerja yang sebenarnya. Selain itu pemodelan 2 dimensi tidak dapat digunakan untuk mensimulasikan proses tempa benda kerja yang bentuk akhirnya lebih kompleks.

Dari latar belakang di atas, penulis akan mencoba mengembangkan simulasi 3 dimensi pengaruh lebar sirip *(flash)* dan kecepatan penekanan terhadap kemampuan

pengisian rongga cetakan pada proses *impression die forging*. Penggambaran model benda kerja dan cetakan menggunakan bantuan *software* CAD AutoCAD 2006. Untuk komputasi, simulasi ini menggunakan bantuan *software* DEFORM^{TM-}3D. Dengan penggunaan metode simulasi komputer ini, diharapkan dapat memberi solusi alternatif yang lebih efisien dalam hal waktu dan biaya, serta memberikan pemodelan yang lebih merepresentasikan kondisi aktual dari proses tempa. Untuk mengetahui keakuratan metode simulasi ini, diperlukan adanya verifikasi. Verifikasi yang digunakan adalah penelitian pada proses *ring compression test*.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini akan dirumuskan suatu permasalahan yang akan dibahas yaitu bagaimana pengaruh lebar sirip *(flash)* dan kecepatan penekanan terhadap kemampuan pengisian rongga cetakan pada proses *impression die forging*?

1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan dari permasalahan yang diteliti adalah :

- Software yang digunakan dalam penelitian ini adalah AutoCAD 2006 untuk penggambaran benda kerja dan DEFORM^{TM-}3D ver.5.0 (*service pack* 3) untuk komputasi simulasi.
- 2. Dies (top die / punch dan bottom die) dimodelkan sebagai material rigid, sedangkan benda kerja sebagai material plastis.
- 3. Material diasumsikan homogen dan isotropis.
- 4. Cacat dideteksi dengan melihat pada tidak terisi penuhnya cetakan (lack of die fill).
- 5. Koefisien gesek dianggap konstan di seluruh permukaan kontak.
- 6. Tidak membahas perpindahan panas yang terjadi.
- 7. Hanya membahas bentuk akhir benda kerja.

1.4 Tujuan

Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh lebar sirip *(flash)* dan kecepatan penekanan terhadap kemampuan pengisian rongga cetakan dalam pembentukan benda kerja 3 dimensi dengan proses *impression die forging*.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penulisan ini adalah :

NERSITAS

- 1. Memberikan gambaran mengenai proses tempa melalui simulasi komputer.
- 2. Memberikan metode alternatif untuk mengetahui parameter yang berpengaruh pada proses dan hasil tempa, dan untuk optimasi proses tempa yang lebih efisien dan ekonomis.

BRAWIUAL

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian sebelumnya

Catarina F. Castro, et all (2000) melakukan simulasi pembentukan dengan metode elemen hingga dan memungkinkan untuk memperkirakan harga dari variabelvariabel proses yang tidak dapat atau sulit diukur melalui eksperimen seperti kemampuan pengisian cetakan, tegangan kontak pada *dies*, distribusi aliran material benda kerja, distribusi tegangan dan temperatur. Penelitian ini menghasilkan kesimpulan bahwa variasi geometri *dies* (cetakan) pembentukan awal berpengaruh terhadap kemampuan pengisian rongga cetakan pada akhir pembentukan benda kerja. Dengan memvariasikan geometri cetakan maka kondisi optimum ditinjau dari kemampuan pengisian rongga cetakan dapat diperoleh dengan dua tahap cetakan.

Ismet Faradis (2004) melakukan simulasi komputer untuk mengetahui pengaruh kelonggaran celah (tebal) sirip *(flash)* dan kecepatan penekanan terhadap kemampuan pengisian rongga cetakan pada proses *closed die forging*. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan kelonggaran celah sirip 1-3%, dan kecepatan penekanan 0,06-0,3 m/s. Disimpulkan bahwa pada kondisi kecepatan penekanan yang sama, dengan semakin besarnya kelonggaran celah sirip *(flash)*, maka kemampuan pengisian rongga cetakan akan semakin menurun dan pada kelonggaran celah sirip *(flash)* yang sama, penambahan kecepatan penekanan akan cenderung meningkatkan kemampuan pengisian rongga cetakan.

Ismi Choirotin (2006) melakukan simulasi komputer untuk mengetahui pengaruh lebar celah sirip *(flash)* dan kecepatan penekanan terhadap kemampuan pengisian rongga cetakan pada proses *closed die forging*. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan lebar celah sirip 2-4 kali dari harga kelonggaran celah sirip, dan kecepatan penekanan 60-300 mm/s. Disimpulkan bahwa pada kecepatan penekanan yang sama, memperbesar lebar celah sirip *(flash)* akan menaikkan kemampuan pengisian rongga cetakan dan pada kondisi lebar celah sirip *(flash)* yang sama, memperbesar kecepatan penekanan akan meningkatkan kemampuan pengisian rongga cetakan. Hasil penelitian ini terlihat seperti pada Gambar 2.1 berikut ini :



Gambar 2.1 Simulasi 2D *closed die forging*, (a) pemodelan *closed die forging*,
(b) definisi kelonggaran dan lebar celah sirip, (c) hasil simulasi
Sumber : Ismi Choirotin, 2006 : 37

Pada penelitian di atas, proses tempa yang dilakukan dimodelkan secara 2 dimensi dan benda kerja *axysimetric*. Untuk lebih mendekati kondisi ideal, penulis mencoba memodelkan proses tempa dari benda kerja *non-axysimetric* secara 3 dimensi dengan variasi lebar sirip *(flash)* dan kecepatan penekanan pada proses *impression die forging*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Tempa (Forging)

Tempa *(forging)* adalah suatu operasi dimana logam dipanaskan dan kemudian diberi sebuah gaya untuk mengubah bentuk logam dengan cara tertentu sehingga diperoleh hasil akhir yang diinginkan (Rao, 1990 : 261).

Keuntungan dari pembentukan logam dengan proses tempa antara lain dapat meningkatkan kekuatan benda tempa, waktu pengerjaannya singkat, dan dapat menghemat material. Tetapi kerugiannya biasanya mesinnya berukuran besar (tidak efisien ruangan), dan harga *dies* (cetakan) yang mahal.

2.2.2 Klasifikasi proses forging

Proses *forging* dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *open die forging* (penempaan cetakan terbuka) dan *closed die forging* (penempaan cetakan tertutup). *Open die forging* dilakukan di antara dua cetakan datar atau cetakan dengan bentuk yang sederhana, biasanya dilakukan pada benda kerja yang besar dengan skala produksi yang kecil, dan digunakan sebagai pembentukan awal benda kerja untuk proses *closed die forging*. Sedangkan pada *closed die forging* pembentukan dilakukan di antara dua pasang cetakan dengan tekanan tinggi dalam rongga cetakan tertutup, proses ini menghasilkan produk dengan toleransi yang lebih ketat, dan pada umumnya skala produksinya besar untuk mengatasi biaya produksi yang mahal. *Impression die forging* merupakan proses *closed die forging* dengan sirip *(flash)*.

2.2.3 Pengoperasian forging

Beberapa macam pengoperasian pada proses *forging* dapat dijabarkan sebagai berikut :

1. Smith Forging

Smith forging merupakan penempaan dengan cetakan terbuka dengan pukulan hammer secara langsung ke benda kerja. Penempaan ini cocok untuk bentuk benda kerja yang sangat sederhana yang tidak memerlukan ketelitian tinggi dengan jumlah produksi yang sedikit. Misalnya pembuatan sabit dan pisau.

2. Drop Forging

Proses ini merupakan jenis *closed die forging* dimana benda kerja dibentuk dalam sebuah cetakan tertutup dengan gaya *impact*. Cocok untuk membuat bentuk benda kerja yang rumit, melalui beberapa tahap pengerjaan, dalam satu set cetakan. Contohnya pembuatan *wrench* (kunci pas).

3. Press Forging

Pada proses ini memberikan tekanan dalam waktu yang lebih lama dibanding kedua cara di atas, dengan demikian aliran logam lebih merata dalam rongga cetakan dan lebih ke dalam benda tempa (tidak bagian luar saja). Misalnya dalam pembuatan pintu-pintu mobil.

4. Roll Forging

Ini adalah jenis tempa yang menggunakan roll, pada roll itu terdapat *die*. Biasanya digunakan untuk benda-benda yang kecil, juga untuk mengurangi ketebalan benda kerja. Contoh pengerjaannya pada pembuatan cangkul.

5. Upset Forging

Proses ini digunakan untuk menambah diameter batang logam pada bagian tengah atau ujung. Kadang kala benda tempa mengalami beberapa tahap tempa dalam satu set cetakan. Contohnya pembuatan kepala-kepala baut.

Ada 3 tipe upset forging, yaitu :

- *full upsetting* (seluruh batang)
- central upsetting (bagian tengah), dan
- *heading* (bagian ujung)
- 6. Drawing Forging

Drawing forging merupakan kebalikan dari upset forging, yaitu untuk mengurangi diameter batang logam. Misalnya untuk forging shaft.

7. Swaging

Merupakan suatu proses tempa yang digunakan untuk mengurangi luas penampang lintang (memperkecil diameter) dengan tidak disertai penarikan *(drawing)*. Pengerjaan ini biasanya dikenakan pada bagian ujung benda pejal maupun tabung. Contoh pada proses pembuatan selongsong peluru dan bagian ujung tabung LPG.

2.2.4 Impression Die Forging

Impression die forging (tempa cetakan jejak) merupakan istilah untuk closed die forging with flash (penempaan cetakan tertutup dengan sirip). Closed die forging (penempaan cetakan tertutup) adalah proses pengerjaan plastis pada logam dengan cara memberi gaya tekan melalui pukulan atau tekanan yang dihasilkan oleh hammer, atau alat-alat mekanis lainnya dalam cetakan yang tertutup, bongkahan logam diletakkan antara 2 pasang cetakan (punch dan die) kemudian ditekan oleh punch (top die) hingga memenuhi rongga cetakan dan memberikan bentuk punch dan die pada bongkahan tersebut. Agar cetakan terisi penuh maka jumlah logam dilebihkan sedikit, sehingga kelebihan logam tertekan keluar cetakan dan membentuk sirip (flash). Karena adanya sirip, maka istilah yang lebih tepat untuk proses closed die forging tersebut adalah impression die forging (tempa cetakan jejak) (Dieter, 1988: 179).

Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.2. Benda kerja dibentuk di bawah tekanan tinggi dalam suatu rongga tertutup, dan dengan demikian dapat dihasilkan produk yang mempunyai toleransi dimensi yang ketat dengan menggunakan cetakan yang dikerjakan dengan teliti. Skala produksi yang besar biasanya dipakai untuk mengatasi biaya cetakan yang sangat mahal. Bila bentuk tempa rumit, perlu diusahakan proses penempaan secara bertahap dengan menggunakan bentuk cetakan yang bertahap pula.



Gambar 2.2 Penempaan dengan cetakan tertutup Sumber : Engineering and Physical Sciences Research Council, England, 1994 : 11 Merupakan hal yang penting untuk mempergunakan jumlah logam yang cukup, sehingga rongga cetakan terisi penuh. Karena sulit untuk mengatur jumlah logam yang tepat, biasanya logam dilebihkan sedikit. Ketika cetakan menyatu maka kelebihan logam tertekan keluar dari cetakan dan membentuk pita logam yang dinamakan sirip *(flash)*. Untuk mencegah pembentukan sirip yang berlebihan, maka digunakan perabung *(ridge)* yang dinamakan penampung sirip *(flash gutter)*. Tahap akhir dari proses tempa cetakan jejak adalah menghilangkan sirip dengan cetakan pemangkas *(trimming die)* (Dieter, 1988: 179). Selain itu cetakan tempa harus mempunyai sudut tirus *(draft angle)* untuk memudahkan pengeluaran benda jadi.

Istilah-istilah umum dalam proses *impression die forging* ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Terminologi *Impression Die Forging* Sumber : Kalpakjian, 1989 : 403

Rancangan benda tempa dengan cara impression die forging, meliputi :

- 1. Volume dan berat benda kerja
- 2. Jumlah tahapan pembentukan dan konfigurasinya
- 3. Dimensi sirip pada cetakan
- 4. Beban dan energi yang dibutuhkan untuk setiap langkah tempa

Aliran logam terdiri atas dua jenis yaitu, aliran dasar dan ekstrusi (aliran sejajar gerakan cetakan). Pada sebagian besar proses penempaan keduanya terjadi secara bersamaan. Suatu tahapan penting dalam memahami aliran logam adalah identifikasi permukaan netral. Aliran logam menjauhi permukaan netral pada arah tegak lurus arah gerakan cetakan.

Schey (Dieter, 1988 : 193) mengajukan rumusan empiris beban tempa pada penempaan cetakan tertutup seperti persamaan (2-1) berikut :

$$P = \sigma.At.C_1 \tag{2-1}$$

Dimana : P = beban tempa

- σ = tegangan normal
- At = luas penampang penempaan pada garis pemisah, termasuk siripnya
- C_1 = faktor kendala yang tergantung pada kerumitan penempaan
 - = 1,2 s/d 2,5 untuk "upsetting" silinder diantara plat datar
 - = 3 s/d 8 untuk tempa cetakan tertutup bentuk sederhana dengan sirip
 - = 8 s/d 12 untuk bentuk yang lebih rumit

Variabel-variabel yang berpengaruh dalam proses *closed die forging* antara lain variabel *friction* dan variabel kompresi.

Variabel *friction* adalah variabel yang dapat mempengaruhi besar gaya gesek statis maupun dinamis. Variabel ini bergantung pada pemberian pelumasan yang berfungsi untuk mengurangi gesekan, dan kondisi permukaan dari benda kerja dan cetakan, jika nilai kekasarannya tinggi, maka akan mengakibatkan gaya gesek yang tinggi.

Variabel kompresi adalah variabel yang menentukan besar gaya penekanan yang diperlukan untuk menekan benda kerja hingga dapat terekstrusi memenuhi rongga cetakan, yaitu :

1. Reduksi

Persentase reduksi dihitung menggunakan luasan benda kerja dan luasan rongga cetakan. Persentase ini memberikan nilai pendekatan terhadap pemampatan yang terjadi.

2. Kedalaman penekanan

Kedalaman penekanan atau tinggi dari benda kerja mengindikasikan tekanan yang diperlukan. Kedalaman yang lebih besar membutuhkan penekanan yang lebih besar pula.

3. Keuletan material

Keuletan yaitu suatu kemampuan material benda kerja untuk berubah bentuk tanpa patah

4. Kekuatan luluh material

Kekuatan luluh adalah kemampuan material untuk berubah bentuk secara permanen pada benda kerja. Kekuatan luluh yang rendah tidak harus diperlukan pada pengerjaan ini, karena pada proses ini jarang terjadi perobekan, berbeda dengan proses *deep drawing*.

5. Temperatur

Temperatur benda kerja yang cukup besar akan mengurangi beban penekanan, karena material benda kerja menjadi lunak.

Variabel-variabel yang sangat berpengaruh pada proses pembentukan *impression die forging* yaitu :

1. Dimensi celah dan lebar sirip (flash)

Adalah celah dan jalur antara *top die* dan *bottom die* tempat kelebihan logam tempa mengalir pada saat penempaan logam. Biasanya celah sirip dibuat pada *parting line* (bidang pertemuan) *top die* dan *bottom die*.

2. Kecepatan tempa

Kecepatan tempa adalah kecepatan *punch (top die)* saat terjadi kontak awal dengan benda kerja.

2.2.5 Penempaan pada Regangan Bidang

Tegangan-tegangan yang terjadi pada penempaan suatu pelat dengan tebalnya tetap dengan kondisi regangan bidang, diperlihatkan pada Gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Tegangan yang bekerja dengan kondisi regangan bidang Sumber : Dieter, 1988 : 184

Pada proses penempaan, aliran lateral tegak lurus penumbuk menimbulkan tegangan geser gesekan pada permukaan kontak cetakan yang mengarah ke pusat, melawan aliran logamnya. Timbulnya gesekan menyebabkan ketidakseimbangan gaya

Keseimbangan gaya dalam arah x menghasilkan persamaan 2-2 berikut :

$$h - (\sigma_x + d\sigma_x)h - 2\tau_{xy}dx = 0$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = -\frac{2\tau_{xy}}{h}$$
(Dieter, 1988 : 184) (2-2)

dimana : σ_x = tegangan lateral

 σ_x

 τ_{xy} = tegangan geser

h = tebal logam

Kriteria luluh von Mises untuk keadaan regangan bidang diberikan pada persamaan berikut :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_0 = \sigma'_0$$
 (Dieter, 1988 : 184) (2-3)

dimana : σ_0 = tegangan luluh atau kekuatan luluh

 $\sigma_0^{'}$ = tegangan luluh dalam keadaan regangan bidang

p = tekanan

dan kedua tegangan tekan utama p dan σ_x bernilai positif, jadi $p = \sigma_z$, maka persamaan akan menjadi persamaan 2-4 berikut :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_0 = p - \sigma_x$$
 (Dieter, 1988 : 185) (2-4)

Karena σ'_0 tidak berubah terhadap x, $\frac{dp}{dx} = \frac{d\sigma_x}{dx}$ dan dengan mensubtitusikannya kedalam persamaan (2-2), maka persamaan diferensial keseimbangan berubah menjadi persamaan berikut :

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{2\tau_{xy}}{h} \tag{2-5}$$

Jika terdapat hubungan antara tegangan geser dan tekanan normal sesuai Hukum Coulomb mengenai gesekan gelincir, $\tau_{xy} = \mu p$, maka persamaan (2-5) menjadi persamaan (2-6) berikut :

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2\mu}{h}dx$$
 (Dieter, 1988 : 185) (2-6)

dimana : μ = koefisien gesek

integrasi memberikan :

$$\ln p = -\frac{2\mu x}{h} + \ln C$$

Konstanta integrasi *C* ditentukan oleh persyaratan batas, dimana permukaan bebas x = a, tegangan lateral $\sigma_x = 0$ dan $p = \sigma'_0$. Karena itu, dihasilkan persamaan berikut :

$$\ln C = \ln \sigma'_{0} + \frac{2\mu a}{h} , \text{ sehingga}$$

$$p = \sigma'_{0} \exp\left[\frac{2\mu}{h}(a-x)\right] \qquad \text{(Dieter, 1988 : 185)} \qquad (2-7)$$

Karena μ biasanya kecil, maka dapat digunakan hubungan $e^{(y)} = 1 + y + \frac{y^2}{2!} + \frac{y^3}{3!} + \cdots$ untuk menyederhanakan persamaan di atas dan dihasilkan persamaan :

$$p = \sigma'_0 \left[1 + \frac{2\mu}{h} (a - x) \right]$$
 (Dieter, 1988 : 185) (2-8)

Tekanan tempa rata-rata adalah :

$$\overline{p} = \int_0^a \frac{p dx}{a} = \sigma'_0 \frac{e^{(2\mu a/h)} - 1}{2\mu a/h}$$
 (Dieter, 1988 : 185) (2-9)

Beban tempa total P dapat dihitung dengan menggunakan hubungan $P = \overline{p}(2a)w$

dimana *w* adalah lebar pada arah tegak lurus bidang gambar. Persamaan (2-7) dapat ditulis dengan lebih sederhana menjadi persaaman:

$$p = \sigma'_0 e^{\mu L/h(1-2x/L)}$$
 (Dieter, 1988 : 185) (2-10)
 $L = 2a$

dimana : L

Persamaan ini memperlihatkan bahwa apabila L/h bertambah besar, maka hambatan terhadap deformasi tekan, bertambah dengan cepat. Kenyataan ini dimanfaatkan untuk penempaan dengan cetakan tertutup, dimana hambatan deformasi sirip harus sangat tinggi sehingga tekanan dalam cetakan cukup tinggi dan menjamin pengisian rongga cetakan dengan sempurna. Gambar 2.4 memperlihatkan variasi p dan σ_x di sepanjang L = 2a. Garis pusat pelat dinyatakan sebagai permukaan netral logam yang tetap diam, aliran logam bergerak keluar menjauhi permukaan netral.

2.2.6 Tegangan Pada Penempaan Silinder Datar

Diberikan suatu silinder pejal yang ditekan secara merata. Diasumsikan tidak terjadi pembentukan tong *(barelling)* dan gaya tekan arah sumbu *z* konstan di seluruh ketebalan. Kondisi gesekan pada permukaan atas dan bawah, ditentukan dengan menggunakan koefisien gesekan Coulomb (Dieter, 1988 : 153), seperti pada persamaan 2-11.

$$\mu = \frac{\tau}{p} \tag{2-11}$$

dimana : τ = tegangan geser pada bidang permukaan antara

p = tegangan pada arah tegak lurus terhadap bidang permukaan antara

Aliran lateral logam ke arah luar yang terjadi, apabila logam tersebut ditekan, menimbulkan tegangan-tegangan geser pada permukaan kontak cetakan. Arah gesekan permukaan ini memusat, dan menentang aliran radial keluar. Tegangan geser gesekan tekan lateral pada bahan, yang bernilai nol pada sisi silinder dan mencapai nilai tertinggi pada pusat silinder. Keadaan tersebut seperti yang tergambar pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Penempaan pada silinder datar Sumber : Dieter, 1988 : 153

Pada gambar di atas, berdasarkan kesetimbangan gaya dalam arah radial, diperoleh persamaan :

$$\sigma_r \cdot h \cdot r \cdot d\theta - (\sigma_r + d\sigma_r) \cdot h \cdot (r + dr) d\theta + 2\sigma_\theta \cdot h \cdot dr \cdot \sin \frac{d\theta}{2} - 2 \cdot \tau \cdot r \cdot d\theta \cdot dr = 0$$
(Dieter, 1988 : 154) (2-12)

dengan pendekatan sin $(d\theta/2) \approx d\theta/2$, diperoleh bentuk yang lebih sederhana, seperti persamaan 2-13 berikut :

 $\sigma_r h dr + d \sigma_r r h - \sigma_{\theta} h dr + 2 \tau r dr = 0$ (Dieter, 1988 : 154) (2-13) berdasarkan simetri bentuk silinder diperoleh hubungan $d\varepsilon_{\theta} = d\varepsilon_r$, dan $\sigma_{\theta} = \sigma_r$. Dengan substitusi maka diperoleh persamaan 2-14.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\tau}{h} = 0$$
 (Dieter, 1988 : 154) (2-14)

dan dari hukum gesekan, $\tau = \mu p = \mu \sigma_z$, maka dihasilkan persamaan berikut :

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\mu p}{h} = 0$$
 (Dieter, 1988 : 154) (2-15)

Dengan mengasumsikan bahwa σ_z , σ_θ , dan σ_r adalah tegangan utama, dapat digunakan kriteria luluh von Mises untuk mengembangakan hubungan antara σ_r dan σ_z .

$$2\sigma_0^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2$$
$$2\sigma_0^2 = (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_r)^2$$
$$\sigma_\theta = \sigma_r$$
$$\sigma_0^2 = (\sigma_r - \sigma_z)^2$$

dan $\sigma_0 = (\sigma_r - \sigma_z)$

Kita definisikan *p* sebagai tegangan tekan *positif* tegak lurus pada permukaan antara, maka $p = -\sigma_z$, dan $\sigma_\theta = \sigma_r + p$, sehingga $d\sigma_r = -dp$. Dengan memasukkan hubungan ini ke persamaan (2-15), maka diperoleh persamaan 2-16.

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2\mu \, dr}{h}$$
 (Dieter, 1988 : 154) (2-16)

Integrasi persamaan (2-21) menghasilkan

$$\ln p = -\frac{2\mu r}{h} + C$$

Pada permukaan luar silinder, r = a; $\sigma_r = 0$ dan $p = \sigma_0$, sehingga

$$C = \ln \sigma_0 + 2\frac{\mu a}{h}$$

dan dihasilkan persamaan 2-17 dan persamaan 2-18.

$$\ln \frac{p}{\sigma_0} = \frac{2\mu}{h} (a - r)$$
 (Dieter, 1988 : 154) (2-17)

atau

$$p = \sigma_0 e^{\frac{2\mu}{h}(a-r)}$$
 (Dieter, 1988 : 155) (2-18)

Distribusi tekanan (*pressure*) simetris terhadap garis pusat dan meningkat tajam pada pusat piringan. Kenaikan tekanan deformasi terhadap jarak yang karakteristik ini, disebut bukit gesekan (*friction hill*). Pada Gambar 2.6 tampak regangan tekan aksial dari persamaan (2-18), sebagai fungsi diameter silinder.



Gambar 2.6 Bukit gesekan untuk tekanan (kompresi) homogen pada silinder gesekan Coulomb Sumber : Dieter, 1988 : 155

Tekanan deformasi rata-rata (tinggi rata-rata bukit gesekan) adalah seperti persamaan berikut :

$$\overline{p} = \frac{\int_0^a 2\pi p r \, dr}{\pi a^2} = \frac{\sigma_0}{2} \left(\frac{h}{\mu a}\right)^2 \left[e^{2\mu a/h} - \frac{2\mu a}{h} - 1\right] \qquad \text{(Dieter, 1988: 155)}$$
(2-19)

Pengaruh gesekan sangat penting bila nilai-nilai a/h cukup besar. Untuk a/h tertentu, kenaikan gesekan dengan mudah akan melipatkan tekanan deformasi. Hal ini berlaku untuk gesekan gelincir pada permukaan antara dengan kekuatan geser lapisan konstan τ_i . Sedangkan untuk gesekan lengket $\tau_i = \tau_0$, tegangan alir pada arah geser adalah (k). Dengan menggunakan kriteria luluh von Mises, koefisien gesek pada keadaan lekat adalah :

$$\mu = \frac{\tau_i}{p} = \frac{k}{\sigma_0} = \frac{\sigma_0/\sqrt{3}}{\sigma_0} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$
 (Dieter, 1988 : 156) (2-20)

Dengan menggunakan kondisi lekat $\tau = k = \sigma_0/\sqrt{3}$ dalam analisis tekanan (kompresi) silinder datar dihasilkan hubungan :

$$p = \sigma_0 \left[1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{(a-r)}{h} \right]$$
 (Dieter, 1988 : 156) (2-21)

Jadi, distribusi tekanan tetap mencapai puncak pada r = 0, tetapi sisi bukit gesekan merupakan garis lurus.

Analisis untuk kondisi *gesekan lekat*, benda kerja yang bersentuhan dengan perkakas dianggap bahan yang mempunyai kekuatan geser τ_i yang konstan. Untuk mempermudah perhitungan matematisnya digunakan *m* sebagai faktor gesekan antar

permukaan, dilain pihak m tidak tergantung pada tegangan normal pada permukaan antara.

$$m = \frac{\tau_i}{k} \tag{2-22}$$

BAVA

dimana :

 τ_i : kekuatan geser antar permukaan

k: tegangan luluh pada pergeseran

Nilai *m* bervariasi antara 0 (pergelinciran sempurna) hingga 1 (lekat). Jadi, jika pada analisis silinder yang ditekan digunakan *m*, menggantikan μ , maka persamaan (2-11), kita ganti $\tau = mk = m\sigma_0/\sqrt{3}$. Persamaan (2-11) berubah menjadi

$$h dp = -\frac{2m\sigma_0}{\sqrt{3}} dr$$
$$p = -\frac{2m\sigma_0}{\sqrt{3}} \frac{r}{h} + C$$

dan bila syarat batas dimasukkan, diperoleh bentuk yang lebih sederhana :

$$p = \sigma_0 \left(1 + \frac{2m}{\sqrt{3}} \frac{a - r}{h} \right)$$
 (Dieter, 1988 : 154) (2-23)

Hal serupa akan diperoleh dari persamaan (2-21) untuk gesekan lekat (m = 1).

2.2.7 Sirip (Flash)

Sirip mempunyai dua fungsi. Pertama, sebagai "katup pengaman" kelebihan logam pada rongga cetakan tertutup. Kedua, dan ini yang lebih penting, sirip mengatur logam-logam yang keluar, sirip yang tipis merupakan hambatan aliran sistem, sehingga terjadi tekanan yang tinggi yang menjamin bahwa logam akan mengisi seluruh rongga cetakan yang masih kosong. Umumnya tebal sirip dirumuskan (Schey, 1988 : 241) :

$$h = 0,015(A)^{\frac{1}{2}} mm$$
 (2-24)

dimana : A = luas daerah proyeksi penempaan (mm²)

Bentuk penampang sirip dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut ini.



Gambar 2.7 Penampang sirip (*flash*) Sumber : P.C. Sharma, 1981 : 136

Strategi dalam merancang sirip adalah menentukan dimensi sirip yang tepat agar ekstrusi logam melalui celah sirip yang sempit lebih sulit daripada pengisian bagianbagian yang rumit dari cetakan. Tetapi, jangan sampai menimbulkan beban tempa yang sangat tinggi karena dapat menyebabkan cetakan mudah aus dan rusak..

Gambar 2.8, memperlihatkan bentuk kurva beban tempa dengan langkah tekan untuk proses tempa cetakan tertutup.



Gambar 2.8 Kurva beban tempa terhadap langkah tempa untuk tempa cetakan tertutup Sumber : Dieter, 1988 : 179

Sedangkan dimensi sirip yang terlalu besar (longgar) mengakibatkan ketidaksesuaian terhadap bentuk akhir yang diinginkan. Rancangan yang ideal adalah rancangan dengan sirip yang paling kecil. Tekanan tempa meningkat dengan berkurangnya ketebalan sirip dan bertambah lebarnya sirip (Dieter, 1988: 180). Sedangkan lebar sirip ukuran yang dipakai yaitu sekitar tiga kali dari tebal sirip itu sendiri.

2.2.8 Sudut Tirus (Draft Angle)

Sudut tirus pada cetakan disini bertujuan untuk memudahkan benda kerja dipisahkan/dikeluarkan dari cetakan, semua garis tegak yang melukiskan profil tempaan digantikan dengan bentuk *slope* mewakili sudut tirus. Gambar 2.9 di bawah ini mempelihatkan sudut tirus dari benda tempaan.



Gambar 2.9 Penentuan sudut tirus cetakan Sumber : Engineering and Physical Sciences Research Council, England, 1994 : 8

Dalam beberapa hal boleh menetapkan lokasi sudut tirus untuk daerah tempaan yang spesifik. Gambar 2.9 di atas mempelihatkan bagaimana profil tempaan dibuat. Besar sudut tirus ini tergantung pada material benda kerja yang dipakai, masing-masing material akan memiliki spesifikasi sudut tirus berbeda-beda.

Sudut tirus dari beberapa macam material benda kerja adalah seperti yang diuraikan pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Sudut tirus	(draft angle)	pada beberapa	material	benda kerja.

- 「同」 / 、 / ワ	X Elsi		
Material	Draft Angle (°)		
Aluminum	0-2		
Copper Alloys (Brass)	0-3		
Steel	- U5-7		
Stainless Steel	5-8		

Sumber : <u>http://www.efunda.com/metal_processes/forging.cfm</u>.2005

2.2.9 Radius Fillet dan Radius Dies

Fillet dan radius cetakan harus dibuat untuk memudahkan material mengalir sepanjang proses tempaan. Sudut yang tajam terutama pada bagian-bagian pojok dari cetakan dapat meningkatkan tekanan tempa. Radius minimum yang direkomendasikan diuraikan di dalam Tabel 2.2 berikut.

Height or Depth mm (in)	Min. Corner Radius mm (in)	Min. Fillet Radius mm (in)
12.5	1.5	5
(0.5)	(0.06)	(0.2)
25	3	6.25
(1.0)	(0.12)	(0.25)
50	5	10
(2.0)	(0.2)	(0.4)
100	6.25	10
(4.0)	(0.25)	(0.4)
400	22	50
(16)	(0.875)	(2.0)

Tabel 2.2 Radius *fillet* dan radius sudut minimum

Sumber : http://www.efunda.com/metal_processes/forging.cfm.2005

Radius fillet dapat juga dicari dengan persamaan (Sharma, 1981 : 129) :

$$R_f = \frac{1}{3} \left(\frac{a+b}{2} \right)$$

dimana a dan b adalah tebal dari dua benda yang membentuk fillet.

Definisi dari fillet dan radius sudut ditunjukkan pada Gambar 2.10 di bawah ini



Gambar 2.10 Definisi radius *fillet* dan radius cetakan Sumber : Engineering and Physical Sciences Research Council, England, 1994 : 9

2.2.10 Parting Line

Parting line merupakan bidang pertemuan yang terbentuk akibat pertemuan dari kedua cetakan (top dies dan bottom dies) pada akhir proses penempaan. Parting line

(2-25)

repository.ub.ac.i

diusahakan berada pada satu bidang tunggal utama dan mengelilingi seluruh bagian sumbu datar utama dari produk jadi. Disini desain bentuk yang simetris dari benda kerja sangat dianjurkan.

2.2.11 Kecepatan Penekanan

 $\dot{\phi}$ =

Kecepatan penekanan dari *punch* berpengaruh pada aliran material (*material flow*), kerja, dan gaya penekanan cetakan. Kecepatan v yang diberikan dan tinggi benda kerja h pada proses penekanan akan menetukan besarnya nilai *strain rate* (regangan alir) $\dot{\phi}$ pada material benda kerja (Sharma, 1981 : 442). Hubungan ini dapat dilihat dari persamaan berikut :

$$=\frac{v}{h}$$
 SITAS BRA (2.26)

Dimana :

 $\dot{\phi} = Strain \ rate \ (1/s)$

v = Kecepatan penekanan (mm/s)

h = Tinggi benda kerja (mm)

Dengan mengetahui besarnya nilai *strain rate* $\dot{\phi}$ material benda kerja, maka kita dapat menentukan besarnya *flow stress* (tegangan alir) σ_f yang terjadi pada material. Pengaruh *strain rate* terhadap *flow stress* digambarkan pada grafik di bawah ini :



Gambar 2.11 Grafik pengaruh *strain rate* terhadap *flow stress* pada baja AISI 1045 ; (a) $\sigma_f = f(\varphi, T)$, (b) $\sigma_f = f(\dot{\varphi}, T)$ Sumber : Lange, 1985 : 11.17

Pada grafik di atas terlihat bahwa untuk regangan dan suhu yang sama, semakin besar strain rate $\dot{\phi}$ material maka semakin besar pula flow stress σ_f yang terjadi.

Besarnya gaya penekanan yang terjadi dipengaruhi oleh besarnya flow stress σ_f yang terjadi, seperti yang dirumuskan oleh Siebel (Lange, 1985 : 11.16) sebagai berikut

$$F = A_p \sigma_f \left(1 + \frac{1}{2} \mu \frac{l}{h} + \frac{1}{4} \frac{h}{l} \right)$$
(2.27)

Dimana :

F = Gaya penekanan (N)

BRAWIJA A_p = Luas penampang *punch* (mm²)

- $\sigma_f = Flow \ stress \ (N/mm^2)$
 - l = panjang punch (mm)
- μ = koefisien gesek
- h = Tinggi benda kerja (mm)

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa peningkatan kecepatan penekanan akan meningkatkan regangan alir atau kecepatan alir logam benda kerja awal serta gaya penekanan yang terjadi pada proses tempa. Menurut Wallace dan Schey, dengan meningkatkan kecepatan penekanan mulai 12,5 mm/s (presses) hingga 8 m/s (hammers), gaya penekanan total meningkat sebesar 25% (Lange, 1985 : 11.42). Untuk peralatan mesin hidrolis, kecepatan penekanan berkisar antara 0,06 hingga 0,3 m/s (Dieter, 1988 : 181).

2.3 **Ring Compression Test**

Ring compression test atau uji kompresi cincin telah digunakan sejak tahun 1960an, karena proses ini sederhana, murah dan handal untuk menguji pengaruh interfacial friction pada aplikasi proses forging, terutama pada pola aliran butir (grain flow paterns). Pada ring compression test ini, ring ditekan di antara dua pelat datar sehingga ring akan mengalami pengurangan tinggi (height reduction) dan diameter dalamnya juga akan mengalami perubahan, proses ini sangat sensitif terhadap besar interfacial friction factor. Besar pengurangan tinggi dan perubahan diameter dalam ring yang terjadi selama proses penekanan ring diukur dan nilainya diberikan dalam bentuk persentase dari tinggi dan diameter dalam ring sebenarnya. Nilai-nilai ini kemudian digambarkan menjadi grafik hubungan persen reduksi tinggi ring - persen reduksi diameter dalam ring.


Gambar 2.12 Tipe deformasi pada *ring compression test*, (a) gesekan kecil ; (b) gesekan besar Sumber : School of Mechanical Engineering : University of Bath, 1995 : 6

Pada pengujian ini umumnya digunakan cincin tipis dengan perbandingan dimensi diameter luar : diameter dalam : tebal sebesar 6 : 3 : 1. Perubahan diameter *ring* pada *ring compression test* digambarkan seperti pada Gambar 2.12, untuk nilai *m* (faktor gesekan antar permukaan) yang kecil, diameter dalam *ring* akan bertambah besar, sedangkan untuk nilai *m* yang lebih besar, diameter dalam *ring* akan mengecil. Melalui metode analisis Avitzur, diperoleh kurva kalibrasi antara persen reduksi tinggi *ring* - persen reduksi diameter dalam *ring* untuk harga *m*, seperti pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Kurva kalibrasi *Ring Compression Test* Sumber : Dieter, 1988 : 159

Persentase pengurangan tinggi ring dihitung menggunakan persamaan

Reduction in height =
$$\frac{h_1 - h_0}{h_0} \times 100\%$$
 (2-28)

dimana : h_1 = tinggi *ring* akhir (mm)

 $h_0 = \text{tinggi } ring \text{ awal (mm)}$

Persentase pengurangan diameter dalam ring dihitung menggunakan persamaan :

BRAWIJAYA

Decrease in inside diameter =
$$\frac{\phi_{I0} - \phi_{I1}}{\phi_{I0}} \times 100\%$$
(2-29)

dimana : ϕ_{I1} = diameter dalam *ring* akhir (mm)

 ϕ_{I0} = diameter dalam *ring* awal (mm)

2.4 Tinjauan Umum Metode Elemen Hingga

Berkembangnya metode numerik yang didukung oleh kemampuan komputasi ternyata makin menjadi alternatif dalam menyelesaikan kasus-kasus engineering. Salah satunya adalah metode elemen hingga yang merupakan solusi numerik dengan proses diskretisasinya, terutama penyelesaian yang menyangkut dimensi benda dan pembebanan yang komplek. Konsep diskretisasi adalah suatu pembagian suatu struktur menjadi bagian-bagian yang lebih kecil yang disebut elemen hingga. Dinamakan elemen hingga karena ukuran elemen kecil ini berhingga dan umumnya memiliki bentuk geometris yang lebih sederhana dibandingkan dengan kontinumnya. Dengan menggunakan metode elemen hingga kita dapat mengubah suatu masalah yang memiliki jumlah derajat kebebasan tak berhingga (infinite) menjadi suatu masalah dengan jumlah derajat kebebasan berhingga (finite), sehingga proses dalam penyelesaian masalah tersebut akan lebih sederhana. Pemakaian metode elemen hingga selama ini antara lain untuk menganalisa struktur, yang berada pada pengaruh pembebanan (gaya, tekanan), gradien temperatur yang akan memberikan akibat-akibat berupa deformasi, tegangan maupun perubahan temperatur yang dialami oleh struktur tersebut. Dimana tujuan utama metode ini adalah memperoleh nilai pendekatan tegangan dan perpindahan yang terjadi pada suatu struktur.

2.5 Software DEFORM

Dalam penelitian ini digunakan metode simulasi dengan memakai *software* DEFORM-3D. DEFORM merupakan *software* simulasi berbasis *Finite Element Method* (metode elemen hingga), yang didesain khusus untuk menganalisis bermacam-macam proses pembentukan dan perlakuan panas yang digunakan dalam pembentukan logam dan industri terkait. Beberapa kelebihan menggunakan metode simulasi dengan *software* ini adalah :

1. Mengurangi biaya *trial and error* dan desain ulang dari peralatan dan proses produksi.

- 2. Dapat digunakan untuk perencanaan optimasi produksi, sehingga dapat mengurangi ongkos produksi dan material.
- 3. Lebih efisien dalam segi waktu untuk menghasilkan suatu produk.

DEFORM-3D dibuat khusus untuk memodelkan deformasi 3 dimensi, dengan proses analisis dan persiapan data yang mudah maka fokus akan tertuju pada proses pembentukan.

Langkah-langkah simulasi menggunakan DEFORM-3D

Seperti *software* simulasi pada umumnya, langkah-langkah simulasi yang digunakan pada DEFORM-3D juga dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu :

1. *Pre-processor* (proses awal)

Pre processor merupakan tahap pemasukan data-data yang diperlukan dalam simulasi. Tahap-tahap pemasukan data pada bagian ini adalah :

- Deskripsi Objek ; meliputi pemasukan data geometri benda kerja dan cetakan, spesifikasi material, dan jumlah *mesh*.
- Kontrol Simulasi ; meliputi tipe simulasi yang digunakan (*type : incremental*), metode iterasi yang digunakan, pergerakan cetakan dan kondisi batas simulasi (temperatur, kecepatan penekanan, langkah cetakan, dan koefisien gesek).
- *Generate Data Base*; meliputi tahap pengecekan terhadap data yang telah dimasukkan pada kedua proses di atas dan tahap pembuatan *data base file* (*.DB)

2. Simulator

Simulator merupakan eksekutor program yang melakukan proses *running* atau eksekusi program yang telah dibuat pada tahap *pre processor* dan disimpan dalam *data base file* (*.DB). Pada tahap ini, kita dapat memonitor proses eksekusi yang sedang berjalan melalui informasi yang disampaikan program dalam *log file* (*.LOG) dan *message file* (*.MSG).

3. Post Processor

Post Processor merupakan tahap pembacaan hasil proses eksekusi. Informasi penting yang dapat diperoleh pada tahap ini antara lain :

• Proses simulasi; berupa tampilan gerakan (animasi) cetakan menekan benda kerja hingga terbentuk geometri akhir benda kerja yang mengikuti bentuk dalam cetakan.

- *Plot result*; berupa *contour plot* (untuk menampilkan distribusi beberapa variabel, seperti : tegangan, regangan, temperatur, dan deformasi) dan *vector plot* (untuk melihat vektor perpindahan dan kecepatan yang terjadi pada setiap step proses deformasi)
- *Point tracking*, berupa *tool* untuk mengetahui informasi hasil proses pada suatu titik tertentu yang kita ingin ketahui.
- *Summary*; berupa jendela program yang dapat menampilkan rangkuman informasi hasil simulasi berupa nilai beberapa variabel seperti perubahan volume, tegangan, regangan dan kecepatan pada tiap node.
- Grafik hubungan beberapa variabel antara lain waktu-beban, bebanvolume, dan beban-perpindahan.

2.6 Kerangka Berpikir Teoritis

Cetakan yang tidak terisi penuh (lack of die fill) merupakan salah satu cacat pada proses tempa, khususnya tempa cetakan tertutup. Salah satu penyebabnya adalah sulitnya mengatur jumlah (volume) logam benda kerja awal yang cukup untuk mengisi seluruh rongga cetakan. Jumlah logam yang terlalu berlebihan merupakan suatu pemborosan material yang tentunya akan meningkatkan biaya produksi. Untuk mengatasi hal ini, maka dilakukan modifikasi terhadap cetakan dengan menambahkan sirip dan perabung sirip pada cetakan sebagai jalan keluar dan tempat penampungan bagi kelebihan logam. Karena adanya sirip, maka jumlah logam benda kerja awal hanya dilebihkan sedikit saja. Agar rongga cetakan dapat terisi penuh, maka celah sirip dibuat sempit agar aliran logam pada bagian ini lebih sulit dibandingkan bagian lain dalam cetakan. Tetapi celah sirip yang terlalu sempit akan menyebabkan beban tempa meningkat dan cetakan mudah rusak, dan jika terlalu besar maka aliran logam pada bagian ini semakin mudah. Aliran logam pada bagian ini dapat juga dipersulit dengan penambahan lebar sirip karena semakin lebar sirip maka hambatan terhadap aliran logam yang lewat juga semakin besar, akibatnya aliran logam akan lebih banyak mengisi rongga cetakan sehingga tingkat pemenuhan terhadap rongga cetakan semakin besar. Selain itu, peningkatan kecepatan penempaan akan meningkatkan beban tempa terhadap benda kerja, sehingga memberikan kemudahan untuk mengalirkan logam memenuhi rongga cetakan.

2.7 Hipotesa

Mengacu pada teori bahwa dengan semakin lebarnya sirip (*flash*), maka hambatan deformasi tekan terhadap logam benda kerja awal yang mengalir melalui sirip (*flash*) akan semakin meningkat sehingga logam benda kerja awal akan lebih banyak mengalir mengisi rongga cetakan. Demikian pula dengan peningkatan kecepatan penekanan, dimana semakin besar kecepatan penekanan, maka kecepatan alir logam untuk mengisi rongga cetakan semakin besar pula. Dengan demikian, hipotesa dari penelitian ini adalah bahwa besarnya variasi lebar sirip (*flash*) dan kecepatan penekanan akan mempengaruhi tingkat persentase pemenuhan rongga cetakan, yang mana semakin besar pula tingkat persentase pemenuhan rongga cetakan.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Yang Digunakan

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian eksperimental semu (*quasi experimental research*), metode ini bertujuan untuk memperoleh informasi yang merupakan perkiraan bagi informasi yang diperoleh dalam eksperimen nyata, karena variabel yang tidak relevan tidak dapat dikontrol.

Dalam hal ini peneliti berusaha sedekat mungkin pada prosedur dan tata cara penelitian eksperimental nyata, dan pada masalah tertentu perbedaannya kecil dengan penelitian sungguhan karena langkah-langkah yang harus diambil sama.

3.2 Alat yang Digunakan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini :

1. Hardware

2 unit komputer dengan spesifikasi :

Processor	RAM	VGA	HDD
AMD Athlon 64 2800+	1 GB	128 MB	80 GB
Intel Pentium D 2,6GHz	512 MB	256 MB	80 GB

2. *Software*

Software yang digunakan adalah :

- AutoCAD 2006, untuk penggambaran geometri benda kerja dan cetakan
- DEFORM^{TM-}3D ver.5.0 (*service pack* 3), untuk komputasi simulasi

3.3 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang. Adapun waktu pelaksanaannya adalah bulan Juni – Juli 2007.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Simulasi 3D pengaruh lebar celah sirip (*flash*) dan kecepatan penekanan dilakukan dengan memodelkan proses *impression die forging* menggunakan bantuan komputer. Data material benda kerja yang digunakan meliputi modulus elastisitas,

kapasitas panas spesifik, konduktivitas panas, tegangan *yield* tekan, tegangan *ultimate* tekan dan *poison's ratio* yang merupakan data masukan utama yang menentukan sifat material. Sedangkan data geometri adalah bentuk dan ukuran dari cetakan dan benda kerja. Selain data material dan geometri, data yang dimasukkan adalah parameter proses tempa. Dengan data masukan ini maka komputer akan memprosesnya dan menghasilkan keluaran yang berupa *node* perpindahan dari benda kerja yang kemudian digunakan untuk mengetahui deformasi akhir yang terjadi.

Untuk mengetahui keakuratan dari metode simulasi ini, maka sebelum mensimulasikan penelitian, terlebih dahulu dilakukan prosedur verifikasi, yaitu melakukan simulasi *ring compression test* dan hasilnya dibandingkan kurva kalibarsi *ring compression test* analisis Avitzur. Jika verifikasi ini sesuai, maka penelitian ini dapat dilanjutkan. Langkah-langkah simulasi yang akan dilakukan dijelaskan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.5 Verifikasi

Dalam verifikasi digunakan proses *ring compression test*. Verifikasi ini digunakan untuk mengetahui apakah metode simulasi ini akurat, caranya dengan

membandingkan kurva hasil simulasi *ring compression test* dengan kurva kalibrasi *ring compression test*. Jika sesuai, maka penelitian ini dapat dilanjutkan. Bentuk kurva kalibrasi *ring compression test* seperti pada Gambar 3.2 di bawah ini :



Gambar 3.2 Kurva kalibrasi *Ring Compression Test* Sumber : Dieter, 1988 : 546

3.5.1 Benda Kerja

Benda kerja yang digunakan untuk *ring compression test* diasumsikan sebagai material plastis. Dimensi dan bentuk 3D benda kerja seperti pada Gambar 3.3 berikut :



Gambar 3.3 Dimensi dan Bentuk 3D benda kerja ring compression test

Karakteristik baja carbon 0,35 % (AISI 1035) yang digunakan untuk memodelkan benda kerja adalah :

•	Modulus Elastisitas bahan (E)	= 206 GPa
•	Angka poison (v)	= 0,3
•	Density (ρ)	$= 7870 \text{ Kg.m}^{-3}$
•	Tegangan Yield tekan (20°C)	= 700 MPa
•	Tegangan Ultimate tekan (20°C)	= 930 MPa
•	Specific Heat Capacity (c)	$= 486 \text{ J.}(\text{Kg.}^{\circ}\text{C})^{-1}$
•	Thermal Conductivity (k)	$= 49.28 \text{ W}(\text{m.K})^{-1}$

3.5.2 Cetakan

Punch / Top die dan *Die / Bottom die* yang digunakan diasumsikan sebagai material rigid. Dimensi *punch* dan *die* dan bentuk 3D seperti pada Gambar 3.4 berikut :



Gambar 3.4 Dimensi dan bentuk 3D Punch dan Die ring compression test

3.5.3 Parameter Proses Verifikasi

Parameter yang digunakan dalam verifikasi adalah (School of Mechanical Engineering : University of Bath, 1995 : 32-33) :

- 1. Temperatur Benda Kerja = 20° C
- 2. Temperatur $Dies = 35^{\circ}C$
- 3. Kecepatan Penekanan = 1mm/s
- 4. Variasi *Interfacial Friction Factor (m)* = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; dan 1,0

3.5.4 Pemodelan Verifikasi

Pada prosedur verifikasi ini, pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* DEFORM-3D. Pemodelan verifikasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah proses *Ring Compression Test*. Verifikasi dimodelkan secara 3 dimensi. Jumlah dari objek ditentukan, yaitu 1 benda kerja dan 2 buah *dies*. Pemodelan geometri benda kerja dilakukan sesuai dengan dimensi yang telah ditentukan. Harga atau nilai parameter proses yang digunakan dalam verifikasi ini diambil dari data parameter simulasi *Ring Compression Test* FORGE 2 yang berhasil dilakukan oleh School of Mechanical Engineering, University of Bath. Temperatur untuk benda kerja sebesar 20 °C (temperatur ruangan), pembagian elemen (*meshing*) sebanyak 100000 elemen. Material benda kerja adalah AISI 1035 (0,35%C). Pemodelan benda kerja seperti pada Gambar 3.5 berikut :



Gambar 3.5 Pemodelan Benda Kerja Ring Compression Test

Untuk cetakan tidak ada masukan data material maupun jumlah *mesh* karena cetakan diasumsikan *rigid* dan tidak ada analisa yang dilakukan pada cetakan. Harga kecepatan penekanan dari *punch* pada arah sumbu z negatif konstan sebesar 1 mm/s. Pemodelan proses *Ring Compression Test* adalah seperti pada Gambar 3.6 berikut :



Gambar 3.6 Pemodelan proses Ring Compression Test

Langkah selanjutnya adalah pemasukan nilai koefisien gesek (*friction coefficient*). Dalam verifikasi ini, nilai koefisien gesek inilah yang divariasikan. Penentuan panjang langkah penekanan dari *top die*, yaitu sebesar 5 mm. Setelah semua data parameter dimasukkan, selanjutnya dilakukan proses pengecekan data dan pembuatan *database*. Tahap selanjutnya adalah proses *running* dari *software*, proses ini dapat dilakukan setelah proses pembuatan *database* selesai.

3.6 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian adalah :

- 1. Variabel Bebas
 - Lebar sirip (2; 2,5; 3; 3,5 dan 4 kali dari harga tebal sirip)
 - Kecepatan penekanan (60; 120; 180; 240 dan 300 mm/s)
- 2. Variabel terikat
 - Kekosongan rongga cetakan (%)
- 3. Variabel tetap
 - Koefisien gesek $\mu = 0,3$
 - Volume awal benda kerja = $13.273,23 \text{ mm}^3$
 - Tebal sirip = 0,6 mm
 - Temperatur benda kerja = 1100°C
 - Temperatur $dies = 300^{\circ}C$

3.7 Pemilihan Model Benda Kerja

Pemilihan model benda kerja untuk simulasi 3 dimensi ini harus mengacu pada kriteria yang telah disebutkan dalam latar belakang dan tinjauan pustaka, yaitu : memiliki bentuk yang kompleks, maksudnya bentuk benda tersebut bukan merupakan benda putar *(axysimetric)* atau benda-benda lain yang bentuknya dapat dimodelkan secara 2 dimensi. Berdasarkan kriteria di atas maka salah satu benda dengan bentuk yang dapat digunakan sebagai model simulasi 3 dimensi ini adalah *connecting rod*.

Pada umumnya proses pembuatan *connecting rod* dengan proses *impression die forging* dilakukan sebanyak 5 hingga 6 langkah (tergantung bentuk produk jadi) yang mana secara umum dibagi menjadi 3 bagian, yaitu pertama *preform* atau pembentukan awal benda kerja (langkah 1-3 / 1-4), kedua *finishing* atau pembentukan akhir (langkah 4 / 5) dan ketiga proses *trimming* atau penghilangan *flash* (langkah 5 / 6). *Preform* bertujuan untuk mendapatkan bentuk benda kerja yang ideal untuk proses *finishing*, *finishing* bertujuan untuk mendapatkan bentuk akhir produk (sebelum proses *trimming* atau pemotongan *flash*) dan *trimming* (pemotongan *flash*) bertujuan untuk mendapatkan bentuk produk jadi *connecting rod*. Karena pengamatan yang dilakukan dalam penelitian ini terfokus pada kekosongan rongga cetakan yang disebabkan oleh pengaruh lebar sirip *(flash)* dan kecepatan penekanan, maka proses pembentukan yang dilakukan hanya sampai pada proses *finishing* karena pada proses *inilah* sirip terbentuk dan tahap akhir pengisian rongga cetakan oleh material benda kerja. Total langkah pembentukan dalam simulasi ini adalah 4 langkah (hingga proses *finishing*). Gambar model benda kerja seperti pada Gambar 3.7 berikut :



Gambar 3.7 Model Benda Kerja "Connecting Rod"



Gambar 3.8 Dimensi Model Benda Kerja "Connecting Rod"

3.8 Benda Kerja

Benda kerja yang digunakan mempunyai dimensi dan bentuk 3D seperti pada Gambar 3.9 berikut:



Gambar 3.9 Benda kerja awal (a) Dimensi dan (b) Bentuk 3D

Karakteristik AISI 1045 yang digunakan untuk material benda kerja adalah (DEFORM 3D *materials data base*):

- Modulus Elastisitas bahan (E) = 206 GPa
- Angka *poison* (v) = 0,3
- Tegangan Yield (σ_y) tekan (1098°C) = 122,419 MPa
- Tegangan *Ultimate* (σ_u) tekan (1098°C) = 240 MPa

• Density (ρ)	$= 7870 \text{ Kg.m}^{-3}$
• Specific Heat Capacity (c)	$= 486 \text{ J} (\text{Kg.C})^{-1}$

• Thermal Conductivity (k) = $51.9 \text{ W}(\text{m.K})^{-1}$

Aplikasi dari AISI 1045 adalah untuk produk yang membutuhkan kekuatan yang baik. Contoh produk yang menggunakan material ini adalah suku cadang otomotif seperti *connecting rod*.

3.9 Cetakan

3.9.1 Preform I

Preform I atau biasa disebut *fullering* merupakan tahapan awal pembentukan yang bertujuan memperpanjang dan memperlebar benda kerja hingga mencapai ukuran yang diinginkan serta memberikan bentuk sederhana pada benda kerja. Proses ini biasanya dilakukan sebanyak 4-5 kali penempaan. Dalam simulasi ini, penempaan hanya dilakukan 1 kali. Dimensi dan bentuk 3D cetakan tahap ini dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.10 Dimensi cetakan Preform I.



Gambar 3.11 Bentuk 3D cetakan Preform I.

3.9.2 Preform II

Preform II atau biasa disebut *edging* merupakan tahapan pembentukan berikutnya yang bertujuan mengubah bentuk dan ukuran penampang kedua ujung benda kerja yang mana ujung yang satu dimensinya lebih besar dari pada ujung yang lainnya. Dimensi dan bentuk 3D cetakan tahap ini dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.12 Dimensi punch Preform II



Gambar 3.13 Cetakan Preform II (a) dimensi die, (b) bentuk 3D

3.9.3 Preform III

Preform III atau biasa disebut *blocking* merupakan tahapan pembentukan berikutnya yang bertujuan mengubah bentuk benda kerja hasil *edging* menjadi bentuk yang menyerupai bentuk benda kerja akhir. Dimensi dan bentuk 3D cetakan tahap ini dapat dilihat pada gambar berikut :





3.9.4 Finishing (Impression Die Forging)

Proses *finishing* merupakan tahapan pembentukan akhir benda kerja yang mana pada proses inilah bentuk dan dimensi akhir benda kerja diperoleh karena proses berikutnya hanyalah proses pemotongan (*trimming*) sirip (*flash*) benda kerja menjadi

40

BRAWIJAYA

produk *connecting rod*. Dimensi dan bentuk 3D cetakan tahap ini dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.15 Cetakan Finishing (a) Dimensi dan (b) Bentuk 3D

Sedangkan dimensi dan bentuk sirip *(flash)* pada cetakan finishing ini dapat dilihat pada gambar berikut :

BRAWIJAYA



Gambar 3.16 Dimensi sirip (flash)

3.10 Pemodelan

Sebelum proses *impression die forging* dilakukan, maka terlebih dahulu dilakukan proses pembentukan awal *(preform)* pada benda kerja yang bertujuan untuk mendapatkan bentuk benda kerja yang ideal untuk proses *finishing (impression die forging)*. Karena bentuk benda kerja yang ideal untuk proses *finishing* cukup rumit, maka proses *preform* dilakukan dalam tiga tahap dan dimodelkan secara 3 dimensi. Benda kerja hasil *preform* sebelumnya merupakan benda kerja awal untuk proses berikutnya. Masing-masing tahap *preform* menggunakan bentuk cetakan yang berbeda. Pemodelan *preform* yang dilakukan adalah sebagai berikut :

• Preform I

Jumlah dari objek ditentukan, yaitu 1 benda kerja dan 2 buah cetakan (*punch dan die*). Langkah selanjutnya adalah pemodelan benda kerja, dengan temperatur 1100°C, geometri benda kerja, dan material benda kerja adalah AISI 1045 dengan jumlah elemen *meshing* sebanyak 100000. Pemodelan benda kerja untuk proses *Preform* I adalah seperti yang terlihat pada Gambar 3.17 di bawah ini :



Gambar 3.17 Pemodelan benda kerja Preform I

Selanjutnya adalah pemodelan geometri dari *punch* dan *die*. Masukan temperatur untuk *punch* dan *die* sebesar 300 °C. Kemudian menetapkan arah gerak dari *punch*, yaitu searah sumbu z negatif dengan kecepatan penekanan konstan 250 mm/s. *Die* dikondisikan tidak bergerak. Pemodelan dari *punch* dan *die* proses *Preform* I seperti terlihat pada Gambar 3.18 berikut :



Gambar 3.18 Pemodelan cetakan *Preform* I (a) *Punch* dan (b) *Die*

Selanjutnya adalah penentuan kontrol simulasi berupa parameter kontak, panjang langkah penekanan dan jumlah langkah simulasi. Parameter kontak berupa koefisien gesek sebesar 0,3. Langkah total dari *punch* sampai menyentuh *die* adalah sebesar 5 mm. Jumlah langkah simulasi sebesar 150 langkah dengan *step increment* sebesar 10. Pemodelan proses *Preform* I ini seperti yang terlihat pada Gambar 3.19 berikut :



Gambar 3.19 Pemodelan proses Preform I

Setelah proses pemodelan, dilakukan proses pengecekan data dan pembuatan *database* dari proses *Preform* I ini. Selanjutnya dilakukan langkah simulasi, hasil dari proses simulasi ini dapat dilihat pada *post processor*.

• Preform II

Pada dasarnya proses yang dilakukan pada *preform* II sama dengan yang dilakukan pada *preform* I. Benda kerja awal yang digunakan adalah hasil pemodelan *preform* I. Untuk masukan data temperatur, jenis material dan jumlah *meshing* benda kerja *preform* II sama dengan *preform* I. Pemodelan benda kerja untuk proses *Preform* II adalah seperti yang terlihat pada Gambar 3.20 di bawah ini :



Gambar 3.20 Pemodelan benda kerja Preform II

Untuk proses *preform* II digunakan *punch* dan *die* yang berbeda dari *preform* I. Tetapi, temperatur untuk *punch* dan *die* tetap sama dengan *preform* I, begitu pula dengan gerakan *punch* yang searah dengan sumbu z negatif dengan kecepatan penekanan konstan 250 mm/s dan *die* dikondisikan tidak bergerak. Pemodelan dari *punch* dan *die* proses *Preform* II seperti terlihat pada Gambar 3.21 berikut :



Gambar 3.21 Pemodelan cetakan *Preform* II (a) *Punch* dan (b) *Die*

Selanjutnya adalah penentuan kontrol simulasi berupa parameter kontak, panjang langkah penekanan dan jumlah langkah simulasi. Parameter kontak berupa koefisien gesek sebesar 0,3. Langkah total dari *punch* sampai menyentuh *die* adalah sebesar 8,4 mm. Jumlah langkah simulasi sebesar 150 langkah dengan *step increment* sebesar 10. Pemodelan proses *Preform* II ini seperti yang terlihat pada Gambar 3.22 berikut :



Gambar 3.22 Pemodelan proses Preform I

Setelah proses pemodelan, dilakukan proses pengecekan data dan pembuatan *database* dari proses *preform* II ini. Selanjutnya dilakukan langkah simulasi, hasil dari proses simulasi ini dapat dilihat pada *post processor*.

• Preform III

Pada dasarnya proses yang dilakukan pada *Preform* III juga sama dengan yang dilakukan pada *Preform* I dan II. Benda kerja awal yang digunakan adalah hasil pemodelan *Preform* II. Untuk masukan data temperatur, jenis material dan jumlah *meshing* benda kerja *Preform* III sama dengan *preform* I dan II. Pemodelan benda kerja untuk proses *Preform* III adalah seperti yang terlihat pada Gambar 3.23 di bawah ini :



Gambar 3.23 Pemodelan benda kerja proses Preform III

Untuk proses *Preform* III juga digunakan *punch* dan *die* yang berbeda dari *Preform* I dan II. Namun, untuk masukan temperatur *punch* dan *die* tetap sama dengan *Preform* I dan II, begitu pula dengan gerakan *punch* yang searah dengan sumbu z negatif dengan kecepatan penekanan konstan 250 mm/s dan *die* dikondisikan tidak bergerak. Pemodelan dari *punch* dan *die* proses *Preform* III seperti terlihat pada Gambar 3.24 berikut :



Gambar 3.24 Pemodelan cetakan Preform III (a) Punch dan (b) Die

Selanjutnya adalah penentuan kontrol simulasi berupa parameter kontak, panjang langkah penekanan dan jumlah langkah simulasi. Parameter kontak berupa koefisien gesek sebesar 0,3. Langkah total dari *punch* sampai menyentuh *die* adalah sebesar 10,6 mm. Jumlah langkah simulasi sebesar 150 langkah dengan *step increment* sebesar 10.

Seperti pada proses *Preform* I dan II, setelah proses pemodelan, dilakukan proses pengecekan data dan pembuatan *database* dari proses *Preform* III ini. Selanjutnya dilakukan langkah simulasi, hasil dari proses simulasi ini dapat dilihat pada *post processor*. Pemodelan proses *Preform* III ini seperti yang terlihat pada Gambar 3.25 berikut :



Gambar 3.25 Pemodelan Proses Preform III

• Finishing

Proses *finishing (impression die forging)* ini dimodelkan secara 3 dimensi. Jumlah dari objek ditentukan, yaitu 1 benda kerja dan 2 buah cetakan. Langkah selanjutnya adalah pemodelan benda kerja, dengan temperatur 1100°C, geometri benda kerja merupakan hasil dari *Preform* III, dan jumlah elemen *meshing* sebanyak 100000. Material dari benda kerja adalah AISI 1045, pemodelan dari benda kerja adalah seperti yang terlihat pada Gambar 3.26 di bawah ini :



Gambar 3.26 Pemodelan benda kerja proses Finishing (Impression Die Forging)

Pemodelan geometri dari *punch* dilakukan dengan variasi lebar sirip yang telah ditentukan, yaitu 2X; 2,5X; 3X; 3,5X; dan 4X dari harga tebal sirip. Masukan temperatur untuk *punch* sebesar 300 °C.. Selanjutnya adalah memasukan arah gerak dari *punch*, yaitu searah dengan sumbu z negatif. Besar kecepatan penekanan divariasikan dan dianggap sebagai variabel bebas, yaitu sebesar 60; 120; 180; 240 dan 300 mm/s. Pemodelan dari *punch* seperti yang terlihat pada Gambar 3.27(a)

Proses berikutnya adalah pemodelan *die*. Pemodelan geometri dari *die* juga dilakukan dengan variasi lebar sirip yang telah ditentukan, yaitu 2X; 2,5X; 3X; 3,5X; dan 4X dari harga tebal sirip. Temperatur untuk *die* sebesar 300 °C dan *die* dikondisikan tidak bergerak. Pemodelan dari *die* seperti yang terlihat pada Gambar 3.27(b) berikut :



Gambar 3.27 Pemodelan cetakan proses Finishing (a) Punch dan (b) Die

Selanjutnya adalah penentuan kontrol simulasi berupa parameter kontak, panjang langkah penekanan dan jumlah langkah simulasi. Parameter kontak berupa koefisien gesek sebesar 0,3. Langkah total dari *punch* sampai menyentuh *die* adalah sebesar 11,85 mm. Jumlah langkah simulasi sebesar 200 langkah dengan *step increment* sebesar 10. Pemodelan proses *finishing* ini seperti yang terlihat pada Gambar 3.28 berikut.



Gambar 3.28 Pemodelan proses *Finishing*

Setelah proses pemodelan, selanjutnya dilakukan proses pengecekan data dan pembuatan *database* dari proses *finishing* ini. Langkah selanjutnya adalah langkah simulasi, hasil dari proses simulasi ini dapat dilihat pada *post processor*.

3.11 Rancangan Penelitian

Data untuk pembahasan yang digunakan hanya data dari proses *finishing* karena pengaruh kedua variabel yang diteliti diperoleh pada proses ini. Adapun rancangan penelitian yang akan dilakukan seperti ditabelkan pada Tabel 3.1 berikut :

Kecepatan	Lebar Sirip				
penekanan	2 x	2,5 x	3 x	3,5 x	4 x
60 mm/s	V1100	V ₁₂	V ₁₃	V ₁₄	V ₁₅
120 mm/s	V ₂₁	V ₂₂	V ₂₃	V ₂₄	V ₂₅
180 mm/s	V ₃₁	V ₃₂	V ₃₃	V ₃₄	V ₃₅
240 mm/s	V ₄₁	V ₄₂	V ₄₃	V ₄₄	V ₄₅
300 mm/s	V ₅₁	V ₅₂	V ₅₃	V ₅₄	V ₅₅

Tabel 3.1	Rancangan	percobaan

V_{nm} : Kekosongan rongga cetakan (%)

Kekosongan rongga cetakan disini dinyatakan dalam satuan persen (%), sebagai hasil perbandingan volume *connecting rod* hasil *finishing* tanpa sirip dengan volume rongga cetakan tanpa sirip.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Proses Verifikasi

4.1.1 Hasil Verifikasi

Dari *post processor* diperoleh data berupa *displacement*, distribusi tegangan, regangan, temperatur dan kemungkinan kerusakan yang terjadi selama proses berjalan. Dari proses ini, diperoleh data *displacement* dari *ring* khususnya pengurangan tinggi dan perubahan diameter dalamnya. Hasil simulasi dari proses ini akan dibandingkan dengan hasil analisis Avitzur berupa kurva kalibrasi *ring compression test*. Animasi dari proses ini bisa dilihat pada *post processor*, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.1 berikut :



Gambar 4.1 Proses *Ring Compression Test*. (a) Kondisi awal, (b) langkah 30%, (c) langkah 60%, (d) kondisi akhir.

Hasil simulasi *ring compression test* dari masing-masing nilai *interfacial friction factor (m)* dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut :



Gambar 4.2 Hasil simulasi Ring Compression Test. (a) m = 0.05. (b) m = 0.1. (c) m = 0.15. (d) m = 0.2. (e) m = 0.3. (f) m = 0.5. (g) m = 0.7. (h) m = 1

4.1.2 Pembahasan Verifikasi

Data *displacement* berupa data pengurangan tinggi (*reduction in height*) dan pengurangan diameter dalam (*decrease in inside diameter*) yang diperoleh dari *post processor* digambarkan dalam bentuk kurva dan dibandingkan dengan kurva kalibrasi *ring compression test* seperti tampak pada Gambar 4.3. Dari Grafik Verifikasi *Ring Compression Test* pada Gambar 4.3 terlihat bahwa kurva hasil simulasi *ring compression test* memiliki kecenderungan yang sama dengan kurva kalibrasi untuk setiap nilai *m*, meskipun terdapat beberapa perbedaan harga. Sebagai perbandingan, bersama dengan kurva *ring compression test software* DEFORM 3D dan kurva kalibrasi digambarkan kurva hasil simulasi *ring compression test software* FORGE 2 (School of Mechanical Engineering; University of Bath, 1995 : 35) dimana kurva ini telah digunakan sebagai dasar keakuratan penggunaan *software* FORGE 2 untuk mensimulasikan proses tempa. Dari Grafik Verifikasi *Ring Compression Test* berikut dapat disimpulkan bahwa *software* DEFORM 3D dapat digunakan untuk melakukan simulasi proses tempa (*forging*).



Gambar 4.3 Grafik Verifikasi Ring Compression Test

4.2.1 Hasil Preform dan Impression Die Forging

Data - data yang diperoleh dari *post processor* adalah *displacement*, distribusi tegangan, regangan, temperatur, kemungkinan kerusakan yang terjadi selama proses berjalan dan animasi dari proses simulasi ini. Gambaran animasi dari proses ini adalah sebagai berikut :

• Preform I, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Proses *Preform* I. (a) kondisi awal, (b) langkah 50%, (c) langkah 100%, (d) bentuk akhir benda kerja



• *Preform* II, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.5 berikut :



- x — y (b) (a) $x \xrightarrow{Z} y$ Z | х – (d) (c)
 - Gambar 4.6 Proses *Preform* III. (a) kondisi awal, (b) langkah 50%, (c) langkah 100%,



• Preform III, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.12 berikut :

Gambar 4.7 Proses *Finishing* (a) kondisi awal, (b) langkah 50%, (c) langkah 100%, (d) bentuk akhir benda kerja

4.2.2. Pembahasan Impression Die Forging

Dari proses *finishing* yang dilakukan, diperoleh bentuk benda kerja *connecting rod* yang tidak sempurna, hal ini menunjukkan adanya kekosongan rongga cetakan yang terjadi. Kekosongan ini kemungkinan disebabkan oleh proses *preform* yang belum optimum sehingga distribusi volume logam pada cetakan *finishing* tidak proporsional. Proporsional maksudnya jumlah volume logam yang diberikan harus sesuai dengan volume rongga cetakan yang akan diisi. Kekosongan rongga cetakan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut

BRAWIJAYA

Finishing, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.7 berikut



Gambar 4.8 Kekosongan rongga cetakan. (a) Cetakan dipotong oleh bidang A-A, (b) potongan A-A, (c) penampang cetakan yang kosong

Dari gambar di atas dapat diketahui bahwa bentuk *connecting rod* hasil penempaan tidak sempurna. Ketidaksempurnaan bentuk itu dapat kita lihat pada Gambar 4.9 berikut :


Gambar 4.9 Bentuk Connecting Rod yang tidak sempurna

Besarnya nilai kekosongan rongga cetakan diperoleh dari perbandingan volume *connecting rod* tanpa sirip dengan volume rongga cetakan tanpa sirip volume. Pemotongan sirip *connecting rod* dan penghitungan volumenya dilakukan menggunakan bantuan *software* SolidWorks 2005, bentuk benda kerja tanpa sirip seperti pada Gambar 4.10. Dari hasil pengukuran kekosongan rongga cetakan dengan variabel bebas lebar sirip *(flash)*dan kecepatan penekanan didapatkan data seperti pada tabel 4.1



Gambar 4.10 Connecting Rod tanpa sirip.

BRAWIJAYA

KEKOSONGAN RONGGA CETAKAN (%)		Lebar Sirip					
		2 x	2,5 x	3 x	3,5 x	4 x	
nan	60 mm/s	4.01	3.88	3.58	3.45	3.12	
neka	120 mm/s	3.94	3.82	3.53	3.36	3.06	
an pe	180 mm/s	3.89	3.79	3.50	3.35	3.02	
epata	240 mm/s	3.85	3.78	3.49	3.31	3.00	
Kec	300 mm/s	3.83	3.76	3.43	3.17	2.96	

Tabel 4.1. Hasil Pengukuran Kekosongan Rongga Cetakan (%)

4.2.2.1 Pengaruh Variasi Lebar Sirip (*Flash*) Terhadap Kekosongan Rongga Cetakan

Gambar 4.11 menunjukkan contoh hasil akhir proses *impression die forging* pada kecepatan penekanan 60 mm/s dengan variasi lebar sirip 2-4 kali dari tebal sirip. Kekosongan rongga cetakan bisa terjadi akibat adanya bentuk cetakan yang rumit, sehingga sulit dimasuki oleh logam yang akan ditempa. Bentuk cetakan yang rumit ini seperti adanya sudut tajam, dan jari-jari kelengkungan yang kecil. Oleh karena itu diperlukan strategi dalam mendesain bentuk cetakan dari proses *forging* ini, sehingga dapat dihasilkan produk dengan dimensi yang tepat. Pada tinjauan ini akan dibahas pengaruh variasi lebar sirip terhadap volume kekosongan rongga cetakan pada kondisi kecepatan penekanan dikonstankan. Pengaruh lebar sirip terhadap persentase volume kekosongan rongga cetakan pada berbagai kecepatan penekanan bisa dilihat pada Gambar 4.12.

61



Gambar 4.11 Hasil akhir proses *impression die forging* pada kecepatan penekanan 60 mm/s. (a) lebar sirip 2X , (b) lebar sirip 2,5X, (c) lebar sirip 3X , (d) lebar sirip 3,5X, dan (e) lebar sirip 4X



Gambar 4.12 Grafik hubungan lebar sirip terhadap volume kekosongan rongga cetakan

Dari Gambar 4.12 hubungan lebar sirip terhadap persentase volume kekosongan rongga cetakan di atas dapat diketahui bahwa semakin lebar sirip maka nilai persentase volume kekosongan rongga cetakan akan semakin menurun. Nilai persentase volume kekosongan rongga cetakan terbesar terjadi pada lebar sirip yang besarnya 2 kali tebalnya, hal ini terjadi karena logam yang tertekan keluar cetakan hanya melewati daerah hambatan yang pendek sebelum masuk ke perabung sirip yang kurang memberikan hambatan, dan nilai persentase volume kekosongan rongga cetakan terkecil terjadi pada lebar sirip yang besarnya 4 kali tebalnya karena logam yang tertekan keluar cetakan melewati daerah hambatan yang lebih panjang. Dari persamaan 2-10 (penempaan pada regangan bidang) :

$$p = \sigma'_0 e^{\mu L/h(1-2x/L)}$$

apabila L/h bertambah besar, maka hambatan terhadap deformasi tekan, bertambah dengan cepat. Pada cetakan, L merupakan lebar sirip dan h merupakan panjang langkah penekanan sehingga dengan semakin lebar sirip maka hambatan deformasi tekan pada sirip juga semakin besar.

Pada pembahasan ini kondisi yang memberikan kemampuan pengisian rongga cetakan terbaik, yaitu dengan nilai persentase volume kekosongan rongga cetakan

terkecil adalah dengan lebar sirip yang besarnya 4 kali tebalnya pada kecepatan penekanan 300 mm/s. Nilai persentase volume kekosongan rongga cetakan pada kondisi tersebut sebesar 2.96 %.

Berdasarkan persamaan 2-10 dan hasil simulasi berupa nilai volume kekosongan rongga cetakan, dapat disimpulkan bahwa semakin besar lebar sirip pada cetakan maka semakin besar pula tingkat persentase pemenuhan rongga cetakan pada proses *impression die forging*.

4.2.2.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Penekanan Terhadap Kekosongan Rongga Cetakan

Pada tinjauan kali ini akan dibahas pengaruh kecepatan penekanan terhadap kekosongan rongga cetakan. Gambar 4.13 dibawah menunjukkan contoh hasil akhir proses *impression die forging* dengan lebar sirip 4 kali ketebalannya dengan variasi kecepatan penekanan 60-300 mm/s.





Gambar 4.13 Hasil akhir proses *impression die forging* pada lebar sirip 4 kali ketebalannya; (a) kecepatan penekanan 60 mm/s, (b) kecepatan penekanan 120 mm/s, (c) kecepatan penekanan 180 mm/s, (d) kecepatan penekanan 240 mm/s, (e) kecepatan penekanan 300 mm/s

Pengaruh kecepatan penekanan terhadap persentase volume kekosongan rongga cetakan pada kondisi lebar sirip yang berbeda ditunjukkan melalui grafik pada Gambar 4.14 di bawah ini.



Gambar 4.14 Grafik hubungan kecepatan penekanan terhadap kekosongan rongga

cetakan

Dari grafik pada Gambar 4.14 di atas dapat diketahui bahwa terdapat kecenderungan nilai persentase volume kekosongan rongga cetakan akan semakin turun dengan semakin bertambahnya kecepatan penekanan. Kondisi yang memberikan kemampuan pengisian rongga cetakan terbaik dari masing-masing lebar sirip adalah pada kecepatan terbesar yaitu 300 mm/s. Dari hubungan kecepatan penekanan, *strain rate* dan *flow stress* yang diberikan oleh persamaan 2-26 ($\phi = \frac{v}{h}$) dan grafik *flow stress* yang digambarkan pada Gambar 2.11, apabila kecepatan penekanan v bertambah besar (panjang langkah penekanan *h* tetap), maka *strain rate* yang terjadi semakin besar pula dan pada grafik *flow stress* dalam Gambar 2.11 diperoleh hubungan semakin besar *strain rate* (pada temperatur yang sama) maka *flow stress* akan semakin besarnya gaya penekanan ini menyebabkan aliran logam benda kerja cenderung ke arah rongga

cetakan yang kosong dibandingkan ke arah perabung sirip *(flash gutter)*, hal ini terjadi karena aliran logam yang semakin cepat terhambat oleh sirip sehingga logam benda kerja lebih banyak terdorong dan mengalir mengisi rongga cetakan yang kosong. Dari Tabel 4.1 diketahui bahwa kondisi yang memberikan kemampuan pengisian rongga cetakan yang terbaik adalah pada kecepatan 300 mm/s dan lebar sirip yang besarnya 4 kali tebalnya. Nilai persentase volume kekosongan rongga cetakan pada kondisi tersebut sebesar 2.96 %.

Berdasarkan hasil pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa semakin besar kecepatan penekanan yang diberikan maka semakin besar pula tingkat persentase pemenuhan rongga cetakan pada proses *impression die forging*.

4.2.2.3 Pengaruh Interaksi Lebar Sirip (*Flash*) dan Kecepatan Penekanan Terhadap Kekosongan Rongga Cetakan

Pengaruh interaksi kedua variabel bebas di atas (lebar sirip dan kecepatan penekanan) terhadap persentase kekosongan rongga cetakan dapat dilihat pada Gambar 4.15 di bawah ini.



Gambar 4.15 Grafik pengaruh lebar sirip *(flash)* dan kecepatan penekanan terhadap kekosongan rongga cetakan

Dari grafik pada Gambar 4.15 di atas dapat diketahui bahwa interaksi kedua variabel bebas yang digunakan berpengaruh terhadap kemampuan pengisian rongga

cetakan yang mana semakin besar nilai dari kedua variabel yang berinteraksi maka persentase kekosongan rongga cetakan yang terjadi semakin kecil. Hal ini terjadi karena semakin besar lebar sirip maka hambatan terhadap aliran logam yang melalui sirip semakin besar, begitu pula dengan kecepatan aliran logam yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan penekanan. Adanya hambatan yang semakin besar dan kecepatan aliran logam yang meningkat, maka logam semakin banyak yang terdorong dan mengalir mengisi rongga cetakan Kekosongan rongga cetakan yang paling kecil persentasenya diperoleh dari interaksi antara lebar sirip yang besarnya 4 s, ya. BRAMIIII kali tebalnya dengan kecepatan penekanan 300mm/s, yaitu sebesar 2,96%.

NERSI



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari proses simulasi komputer menggunakan *software* DEFORM-3D yang digunakan dalam memodelkan proses *impression die forging* secara 3 dimensi ini, didapatkan kesimpulan bahwa memperbesar lebar sirip *(flash)* dan meningkatkan kecepatan penekanan akan meningkatkan kemampuan pengisian rongga cetakan. Pada penelitian ini, diperoleh hasil kemampuan pengisian rongga cetakan terbaik untuk proses *impression die forging* pada lebar sirip yang besarnya 4 kali ketebalannya dan kecepatan penekanan 300 mm/s. Pada kondisi ini kekosongan rongga cetakan yang terjadi sebesar 2.96 %.

5.2. Saran

- 1. Perlu dikembangkan analisis pada kasus pembentukan awal *(preform)* benda kerja yang lebih optimum pada proses *impression die forging* dengan menggunakan metode simulasi 3 dimensi.
- 2. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut mengenai optimasi dimensi logam benda kerja awal untuk mendapatkan hasil yang optimum.
- 3. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut mengenai variabel-variabel lain yang berpengaruh pada proses *impression die forging*, sehingga didapatkan gambaran yang lebih lengkap mengenai proses ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous. 1994. Development of Modelling Tools for The Forging Industry. Engineering and Physical Sciences Research Council, England.
- Anonymous, 1995. Forging Modelling Project. School of Mechanical Engineering : University of Bath.
- Avitzur, Betzalel. 1968. *Metal Forming : Process and Analysis*, Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi
- Bathe, Klaus-Jurgen. 1996. Finite Element Procedures. Prentice Hall, New Jersey
- Button, Sergio Tonini. 2000. Numerical Simulation and Phisical Modelling as Educational Tool to Teach Metal Forming Processes. Campina : State University of Campinas.
- Castro, Catarina F, at all. 2000. A Multilevel Approach To Optimization Of Bulk Metal Forming Processes. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Barcelona.
- Choirotin, Ismi. 2006. Pengaruh Lebar Celah Sirip (Flash) Dan Kecepatan Penekanan Terhadap Kemampuan Pengisian Rongga Cetakan Pada Proses Closed Die Forging. Skripsi. Teknik Mesin Universitas Brawijaya. Malang.
- Dieter, George E. 1988. *Metalurgi Mekanik*. Edisi kedua. Terjemahan Sriati Djaprie. Jakarta : Erlangga.
- Faradis, Ismet. 2004. Pengaruh Kelonggaran Celah Sirip (Flash) Dan Kecepatan Penekanan Terhadap Kemampuan Pengisian Rongga Cetakan Pada Proses Closed Die Forging Dengan Simulasi Komputer. Skripsi. Teknik Mesin Universitas Brawijaya. Malang.
- Fluhrer, Jeffrey. 2004. *DEFORMTM3D Version 5.03 User's Manual*. Scientific Forming Technologies Corp., Ohio.

Kalpakjian, Schmid. 2001. Manufacturing Engineering and Technology. Prentice Hall.

- Kamenshchikov, G, at all. 1957. Forging Practice. Moscow : Peace Publishers.
- Lange, Kurt. 1985. *Handbook of Metal Forming*. McGraw-Hill Book Company. New York.
- Logan, Daryl.L. 1992. A First Course in the Finite Element Method. Second Edition. PWS Publishing Company. Boston.
- Rao, P.N. 1990. Manufacturing Technology : Foundry, Forming and Welding. 2nd
 Edition. Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd, New Delhi.

Schey, John A. 1988. Introduction to Manufacturing Processes. 2nd edition. Mc.Graw Hill. Singapore.

Sharma, P.C. 1981. A Text Book of Production Engineering. Revised Edition. S.Chand & Co Publisher. New Delhi.

INERSITAS BRAWING

www.efunda.com/metal_processes/forging.cfm.2005

www.matweb.com/search/SpecificMaterialPrint.asp.2007



Lampiran 1. Gambar Benda Kerja dan Cetakan











_								
	\leftarrow	Skalo	: 1:2	Digam	bar :	Brulim	Keteranç	gan :
	-(-(-)+	Satu	an : mm	NIM	: 02	10620028		
		Tgl. :	20/06/07	Diperi	iksa :	Yudy S.I. M.A.Choiron		
	JURUSAN MESIN FAKULTAS TEKNIK UNII	BRAW	Cetak	kan F	'ref	orm 1	No.Gambar : B01	A4









-



160 <u>R35,5</u> R7,5 <u>R3</u> <u>13</u> Q R7,5 R17,5 52,6 30,4 <u>R5</u> <u>R30</u> 76 93,8 38 38 <u>R2</u> 7 RI ൭ R0,5 <u>R13</u> 7 <u>R0,5</u> 60

\uparrow	Skalo	: 1:2	Diga	mbar : Brulir	Ϋ́	Keterang	gan :
-(-(-)+	Satu	an : mm	NIM	: 0210620	028		
	Tgl. :	20/06/07	Dipe	riksa ; Yudy S. M.A.Choir	I. ^on		
JURUSAN MESIN FAKULTAS TEKNIK UNI	BRAW	Cetak	an	Preform	3	No.Gambar 1 B04	A4





Lampiran 2.	Material Properties baja karbon 0,35% (AISI 1035) pada suhu 20 ^o C	
	EPEONISTAN PEORPER WILLIAM	

Elastic Deformation	n	RERSITATAS	BYBR	
Parameter	Symbol	Harga	DEFORM	Satuan
Youngs Modulus	Е	$2,06 \times 10^8$	Konstan	kPa
Poissons Ratio	υ	0,3	Konstan	GHAD P
Yield strength	σ_{v}		$7 \ge 10^5$	kPa
Ultimate strength	$\sigma_{_{u}}$		9,3 x 10 ⁵	kPa
Plastic Deformation		$\overline{\sigma} = \sqrt{3K(T, \overline{\varepsilon})}$ dimana	$\overline{\sigma} = \overline{\sigma}(\overline{\varepsilon}, \overline{\varepsilon}, T)$	
RESIL		$K(T,\overline{\varepsilon}) = K_0 (\overline{\varepsilon} + \overline{\varepsilon_0})^n e^{\beta/T}$		AVAU
Parameter	Symbol	Harga	DEFORM	Satuan
Constant Term	K ₀	245		kPa
Strain Hardening	$\frac{-}{80}$	1,14		- 10
Regulatiom	0			
Sensitivity to	n	0,345	-	
Strain Hardening	11			
Temperatur Term	β		-	7
Termal Behaviour	Ę		2	
Parameter	Symbol	Harga	DEFORM	Satuan
Density	ρ	や23 7870 2005 19	7870	kg m ⁻³
Specific Heat	c (_	486	486	$J(kg.^{o}C)^{-1}$
Capacity			5	
Thermal	k	49,28	49,28	$W(m.K)^{-1}$
Conductivity	(1
Effusivity	α	$7,5 \times 10^{-6}$	-	K-1
	b	11800	-	Kg.s ^{-5/2} K ⁻¹
-AS				

Lampiran 3. Message proses *impression die forging* dengan lebar sirip 2 kali ketebalannya dan kecepatan penekanan 60 mm/s.

Step number is -79

Node 11895 of Obj. 1 has contacted Die # 3

STEP NUMBER = 79

Eqs.New ProfileAve. Bandwidth77264199388050

DIRECT METHOD

ITERATION	VELOCITY	RELATIVE VELOCITY	RELATIVE FORCE	SOLVING TIME
NUMBER	NORM	ERROR NORM	ERROR NORM	(SEC)
		CIA	J DRA	
1 0.	5059361765E+04	0.3448922290E+01	0.4084423507E+04	28.876
2 0.	1816983618E+05	0.5817479089E+00	0.1206266200E+01	28.936
3 0.	1333505594E+05	0.4380650385E-01	0.3226006882E+00	28.890
4 0.	1329152295E+05	0.1830009341E-01	0.4250517395E-01	28.844
5 0.	1326874994E+05	0.9551870042E-02	0.1827654431E-01	29.000
6 0.	1325737773E+05	0.5577577065E-02	0.9289286028E-02	28.968
7 0.	1325117350E+05	0.3486483281E-02	0.5231018435E-02	28.796
The following	nodes of Obj. 1 h	ave separated from Die 2	⊃F.S.I// \	
142 169 1	70 609 610 6	15 649 1009 1013 13	355 2032 2330	
3109 3487 3	3534 3749 3829	10934 10995 10996 11	647 11880 16549 1694	19
17468 17949				
The following	nodes of Obj. 1 h	ave separated from Die 3		\mathbf{v}
3 392 457	527 713 1353	3 1362 2587 2993 311	6 3133 3523	
3778 3908 1	0558 10972 1106	57 11166 11167 11681 1	1701 11895 18745 18	758
18796 19079	19080 19145			

The following nodes of Obj.1 have contacted Die2109272115612741130711317914859148601705118155

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 204 398 1505 2348 2739 3130 13181 14231 14852 15031 15356 15374 15508 15556 15728 16090 16545 17340 18940 19156 19269

OLD AVE. STRAIN RATE= 2.538393 OLD LIMITING STR. R.= 0.025384 NEW AVE. STRAIN RATE= 2.606661 NEW LIMITING STR. R.= 0.026067

 UPDATED TIME/STROKE
 =
 0.079000
 4.740000

 TIME/STROKE INCREMENT
 =
 0.001000
 0.060000

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 3 (min) 54.8120 (sec)

SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP = 234.7340 (sec)

RESULT I/O 1.4680

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION	0.3580	1	
EQ. INDEXING PREPERATION	6.0920	1	
STIFFNESS MATRIX GENERATION	12.02	00	7
BOUNDARY CONDITION CAL.	0.9560	7	

 EQUATION SOLVING
 207.4500
 7

 CONTACT TIME CALCULATION
 0.0000
 1

 MESH CHECKS
 0.0000
 1

 INSIDE/OUTSIDE CHECK
 1.4840
 1

STEP NUMBER = 80

DIRECT METHOD

ITERATIO	N VELOCITY	RELATIVE VELOCITY	RELATIVE FORCE	SOLVING TIME
NUMBE	ER NORM	ERROR NORM	ERROR NORM	(SEC)
1-1-5-	0.1324750054E+05	0.8824422744E+00	0.1778932548E-01	30.064
2	0.1793927184E+05	0.5003039975E+00	0.1050459646E+01	29.204
3	0.1348051399E+05	0.4196991389E-01	0.6609925049E+00	29.890

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

П	ERATIC	N VELOCITY R NORM	RELATIVE VELOCITY	RELATIVE FORCE	SOLVING TIME
			Liuton nonun	Littloit itolitii	(BEC)
	1	0.1346359406E+05	0.4377619533E-01	0.4602082686E-01	29.704
	2	0.1341603571E+05	0.2230918417E-01	0.2335119887E-01	29.032
	3	0.1336213376E+05	0.1938394370E-01	0.7641311430E-02	29.562
	4	0.1336939249E+05	0.1297254814E-01	0.3580343227E-02	29.420
	5	0.1337000937E+05	0.1185792275E-01	0.3336611882E-02	29.360
	6	0.1337056980E+05	0.1068338240E-01	0.3055143385E-02	29.218
	7	0.1337106480E+05	0.1000679612E-01	0.2522408650E-02	29.610
	8	0.1337494150E+05	0.4946617728E-02	0.1170839790E-02	30.016

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 2 2032 3685 3827 3881 10995 11337 17240 17374 17939

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 3 3378 3391 3839 4202 11553 11564 11701

 The following nodes of Obj.
 1 have contacted Die
 2

 110
 132
 145
 649
 1355
 12331
 15896
 16468
 17530
 17851

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 392 527 3537 12372 13387 14230 14797 15001 15303 15355 16384 19062 19145 19149 19225

Ignore contact of previously separated Node 3839 of Obj. 1 from Die # 3

OLD AVE. STRAIN RATE= 2.606661 OLD LIMITING STR. R.= 0.026067 NEW AVE. STRAIN RATE= 2.733816 NEW LIMITING STR. R.= 0.027338

 UPDATED TIME/STROKE
 0.080000
 4.800000

 TIME/STROKE INCREMENT
 0.001000
 0.060000

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 10 (min) 19.2960 (sec)

SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP = 384.4840 (sec)

RESULT I/O 1.7360

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION	0.2960	1	
EQ. INDEXING PREPERATION	0.0000	0	
STIFFNESS MATRIX GENERATION	40.57	700	30

BOUNDARY CONDITION CAL.3.604030EQUATION SOLVING333.234011CONTACT TIME CALCULATION0.00001MESH CHECKS0.00001INSIDE/OUTSIDE CHECK1.71801

STEP NUMBER = 81

DIRECT METHOD

1

TERATIC NUMBI	ON VELOCITY ER NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)
1	0.1337702736E+05	5 0.4398574073E+00	0.2617234932E-01	30.500
2	0.1377086318E+05	0.2755933818E+00	0.3870947872E+00	28.624
3	0.1335025634E+05	0.2558789468E-01	0.3004718038E+00	28.844

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

IЛ	TERATIO	N VELOCITY H	RELATIVE VELOCITY	RELATIVE FORCE	SOLVING TIME
	NUMBEI	R NORM	ERROR NORM	ERROR NORM	(SEC)
	1	0.1336625383E+05	0.3332138596E-01	0.3471511596E-01	30.076
	2	0.1335061484E+05	0.2489365599E-01	0.3118539005E-01	28.516
	3	0.1332989653E+05	0.1436956136E-01	0.2011997552E-01	28.234
	4	0.1331401133E+05	0.8586773827E-02	0.7931657495E-02	28.612
	5	0.1330548127E+05	0.5688316146E-02	0.4261275956E-02	28.188
	6	0.1330078722E+05	0.3669106821E-02	0.1999716722E-02	29.906

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 2 649 1779 2799 3827 11597

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 3 527 11564 18613

The following nodes of Obj.1 have contacted Die279149521043121113371221512991140271408614808148371527015561156801642017240173741750417842179391800018002

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 120 709 1372 3839 4126 4202 12205 12359 12407 12410 15392 16089 16548 16953 19079

OLD AVE. STRAIN RATE= 2.733816 OLD LIMITING STR. R.= 0.027338 NEW AVE. STRAIN RATE= 2.685050 NEW LIMITING STR. R.= 0.026851

 UPDATED TIME/STROKE
 =
 0.081000
 4.860000

 TIME/STROKE INCREMENT
 =
 0.001000
 0.060000

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 15 (min) 22.6380 (sec)

SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP = 303.3420 (sec)

RESULT I/O 1.4400

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION0.31201EQ. INDEXING PREPERATION0.00000STIFFNESS MATRIX GENERATION25.782018BOUNDARY CONDITION CAL.2.268018EQUATION SOLVING268.15609

CONTACT TIME CALCULATION0.01401MESH CHECKS0.00001INSIDE/OUTSIDE CHECK1.68801

STEP NUMBER = 82

DIRECT METHOD

ľ

ΓERATIC	ON VELOCITY	RELATIVE VELOCITY	RELATIVE FORCE	SOLVING TIME
NUMBE	ER NORM	ERROR NORM	ERROR NORM	(SEC)
1	0.1329835732E+05	0.3977381167E+00	0.2441454130E-01	28.610
2	0.1419922565E+05	0.2220306569E+00	0.2559757148E+00	29.080
3	0.1348932184E+05	0.2189337081E-01	0.1413038472E+00	31.140
	TIONIAL MENTONI			

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

ITERATIONVELOCITYRELATIVE VELOCITYRELATIVE FORCESOLVING TIMENUMBERNORMERROR NORMERROR NORM(SEC)

1	0.1348425467E+05	0.2289658861E-01	0.1775761744E-01	29.016
2	0.1341455847E+05	0.2666306005E-02	0.5443728884E-02	28.236

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 2 425 1779 3828 11337 17236 17242 17266 17839 17939 17947

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 3 394 3841

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 2 85 649 767 1415 3881 15352 15534 15687 15886 16246 17506 17531 17986

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 26 365 403 527 932 1153 1989 3170 14301 14611 15357 16104 18578 18613 18948 19060 19080 19088 19104 19241

OLD AVE. STRAIN RATE= 2.685050 OLD LIMITING STR. R.= 0.026851 NEW AVE. STRAIN RATE= 2.717026 NEW LIMITING STR. R.= 0.027170

 UPDATED TIME/STROKE
 0.082000
 4.920000

 TIME/STROKE INCREMENT
 0.001000
 0.060000

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 18 (min) 10.5781 (sec)

SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP = 167.9400 (sec)

RESULT I/O 1.3600

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION 0.3140 1 EQ. INDEXING PREPERATION 0.0000 0 STIFFNESS MATRIX GENERATION 10.3760 5 BOUNDARY CONDITION CAL. 0.8880 5 EQUATION SOLVING 149.8900 5 CONTACT TIME CALCULATION 0.0000 1 0.0000 1 MESH CHECKS INSIDE/OUTSIDE CHECK 1.5160 1

STEP NUMBER 83

DIRECT METHOD

ITERATIO	N VELOCITY R NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)
1	0.1341276493E+05	0.3828191537E+00	0.2514859526E-01	28.610
2	0.1416071978E+05	0.1798978080E+00	0.2695531225E+00	28.406
3	0.1358400454E+05	0.2302312914E-01	0.1475786544E+00	28.642

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

ITERATION	VELOCITY	RELATIVE VELOCITY	RELATIVE FORCE	SOLVING TIME
NUMBER	NORM	ERROR NORM	ERROR NORM	(SEC)
1 0.	1358458821E+05	0.2329760078E-01	0.1953217859E-01	28.688
2 0.	1352157633E+05	0.2650339617E-02	0.5346512809E-02	28.580
			SRDA	
The following	nodes of Obj. 1 h	nave separated from Die 2		
76 1249 380	66 11473 16872	16964 16966 17240 179	47	
The following	nodes of Obj. 1 h	have separated from Die 3		
1352 1711 3	3839 4202 11700	0 18613 19079 19080		
The following	nodes of Obj. 1 h	ave contacted Die 2		
425 636 10	36 2685 3113	3828 3876 12223 12796	5 13070 13466 13520	
12022 14720	15276 15696 16	001 10005 10014 17020	17040 17066 17707	17020

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 2 425 636 1036 2685 3113 3828 3876 12223 12796 13070 13466 13520 $13822 \ 14739 \ 15376 \ 15686 \ 16081 \ 16895 \ 16914 \ 17236 \ 17242 \ 17266 \ 17707 \ 17939$

The following nodes of Obj. 1 will not contact Die 2 because of previous separation. 1249 16964

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 364 394 457 2667 12373 12781 14412 15655 15966 16546 17327 18951

OLD AVE. STRAIN RATE= 2.717026 OLD LIMITING STR. R.= 0.027170 NEW AVE. STRAIN RATE= 2.743930 NEW LIMITING STR. R.= 0.027439

UPDATED TIME/STROKE = 0.083000 4.980000 TIME/STROKE INCREMENT = 0.001000 0.060000

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 20 (min) 53.9541 (sec)

SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP = 163.3760 (sec)

RESULT I/O 1.4040

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION 0.3120 1 EQ. INDEXING PREPERATION 0.0000 0 STIFFNESS MATRIX GENERATION 9.1260 5 BOUNDARY CONDITION CAL. 0.7320 5 146.9380 EQUATION SOLVING 5 CONTACT TIME CALCULATION 0.0000 1 MESH CHECKS 0.0000 1 INSIDE/OUTSIDE CHECK 1.6880 1

STEP NUMBER 84

DIRECT METHOD

NUMBER	NORM	ERROR NORM	ERROR NORM	(SEC)
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	351961200E+05	0.3234398441E+00	0.2530265997E-01	28.844
	404162209E+05	0.1373367611E+00	0.2034773653E+00	28.408
	369743059E+05	0.1849650351E-01	0.1020636586E+00	29.140

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

ITERATION	VELOCITY	RELATIVE VELOCITY	RELATIVE FORCE	SOLVING TIME
NUMBER	R NORM	ERROR NORM	ERROR NORM	(SEC)
1	0.1368411708E+05	0.1972559686E-01	0.1625104312E-01	28.578
2	0.1360834829E+05	0.1327155953E-02	0.2707947090E-02	28.094
			SRD	
The followin	g nodes of Obj. 11	have separated from Die 2		
61 425 29	57 3828 3878 3	881 11048		
The followin	g nodes of Obj. 11	have separated from Die 3		
83 364 13	352 3522 11345 1	8885		
The followin	g nodes of Obj. 1 h	have contacted Die 2		
418 1249	1810 11473 12795	5 12799 13101 14220 16	073 16109 16415 1690	64
17291 1736	2 17957			

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 811 2740 3839 4202 11988 12384 14070 14223 14583 15609 15713 16070 16430 16827 18946 19089

OLD AVE. STRAIN RATE= 2.743930 OLD LIMITING STR. R.= 0.027439 NEW AVE. STRAIN RATE= 2.768533 NEW LIMITING STR. R.= 0.027685

UPDATED TIME/STROKE = 0.084000 0.001000 TIME/STROKE INCREMENT =

5.040000 0.060000

163.2340 (sec)

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 23 (min) 37.1881 (sec)

SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP =

RESULT I/O 1.4060

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION 0.3280 1 EQ. INDEXING PREPERATION 0.0000 0 STIFFNESS MATRIX GENERATION 9.1120 5 BOUNDARY CONDITION CAL. 0.7360 5 EQUATION SOLVING 146.8100 5 CONTACT TIME CALCULATION 0.0000 0.0000 1 MESH CHECKS **INSIDE/OUTSIDE CHECK** 1.5480 1

STEP NUMBER = 85

DIRECT METHOD

ITERATION NUMBER	VELOCITY NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)	
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1360691371E+05 1421227135E+05 1382477758E+05	0.3679453010E+00 0.1589845529E+00 0.1891701665E-01	0.2406047333E-01 0.2478426919E+00 0.1226970176E+00	28.360 28.842 34.202	
CONVENTIO	NAL NEWTON R	RAPHSON METHOD			
ITERATION NUMBER	VELOCITY NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)	
$ \begin{array}{cccc} 1 & 0. \\ 2 & 0. \end{array} $	1381665445E+05 1374935597E+05	0.1917577293E-01 0.1188801154E-02	0.1689584096E-01 0.2759793536E-02	32.766 28.860	
The following 272 1085 14	nodes of Obj. 1 h 38 10933 11215	ave separated from Die 2 11857 17242 17266 17	374 17405 17837	W	
The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 3 4 1991 2768 3839 4202 11342 The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 2 169 310 2360 2486 2702 12578 12732 12810 13769 14024 14338 14501					
The following 83 1703 113 16121 16122	nodes of Obj. 1 h 45 12019 13040 16516 18625 18	ave contacted Die 3 13280 13490 14562 148 723 19150 19280	361 15509 15592 1570		
OLD AVE. ST OLD LIMITIN NEW AVE. ST NEW LIMITIN	TRAIN RATE= 2 NG STR. R.= 0.0 TRAIN RATE= 1 NG STR. R.= 0.0	2.768533 27685 2.786895 227869			
UPDATED TIME/STROKE = 0.085000 5.100000 TIME/STROKE INCREMENT = 0.001000 0.060000					
TOTAL CPU	TIME UP TO THI	S STEP = 26 (min) 32	.6881 (sec)		
SUBTOTAL C	CPU TIME OF TH	IIS STEP = 175.500	0 (sec)		
RESULT I/O		1.4200			

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION 0.3120 1 EQ. INDEXING PREPERATION 0.0000 0 10.5760 5 STIFFNESS MATRIX GENERATION BOUNDARY CONDITION CAL. 0.8920 5 EQUATION SOLVING 157.4700 5 CONTACT TIME CALCULATION 0.0000 1 0.0000 1 MESH CHECKS INSIDE/OUTSIDE CHECK 1.5480 1

STEP NUMBER 86 =

DIRECT METHOD

ITERATION NUMBER	VELOCITY NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	1374816204E+05 1431819869E+05 1393005549E+05	0.3487441399E+00 0.1433067092E+00 0.1771249083E-01	0.2370341167E-01 0.2535226650E+00 0.1405562276E+00	28.702 28.732 30.358
CONVENTIO	NAL NEWTON F	RAPHSON METHOD		
ITERATION NUMBER	VELOCITY NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)
$ \begin{array}{ccc} 1 & 0. \\ 2 & 0. \end{array} $	1393008774E+05 1388104326E+05	0.2200713824E-01 0.1847541785E-02	0.1769926773E-01 0.4395622181E-02	29.626 29.172
The following 1800 2443 1	nodes of Obj. 1 h 1256 11473 1723	ave separated from Die 2		WI.
The following 294 3915 11	nodes of Obj. 1 h 063 11579 12015	ave separated from Die 3 5 17915 18582		4
The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 2 309 1816 1834 12301 14339 15717 16832 17295				
Fhe following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 4 461 1448 2871 3078 12669 12780 13157 14608 14610 15867 16484 18613 18790				
OLD AVE. ST OLD LIMITIN	TRAIN RATE= 2 NG STR. R.= 0.0	2.786895 2.786 9		X.

NEW AVE. STRAIN RATE= 2.829789 NEW LIMITING STR. R.= 0.028298

UPDATED TIME/STROKE = TIME/STROKE INCREMENT =

0.086000 5.160000 0.001000 0.060000

166.8580 (sec)

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 29 (min) 19.5461 (sec)

SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP =

RESULT I/O 1.6420

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION 0.3280 1 EQ. INDEXING PREPERATION 0.0000 0 STIFFNESS MATRIX GENERATION 8.9540 5 BOUNDARY CONDITION CAL. 0.7520 5 150.5980 5 EQUATION SOLVING CONTACT TIME CALCULATION 0.0000 1 MESH CHECKS 0.0000 1 INSIDE/OUTSIDE CHECK 1.7800 1

STEP NUMBER = 87

DIRECT METHOD

T

TERATIO NUMBE	N VELOCITY R NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)
1 0.1	387820402E+05	0.3229332734E+00	0.2459771964E-01	28.390
2 0.1	438233061E+05	0.1503775023E+00	0.2151471878E+00	29.984
3 0.1	404653212E+05	0.1757830851E-01	0.1217027681E+00	29.798

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

ITERATION VELOC	ITY RELATIVE VELC	CITY RELATIVE FORCE	CE SOLVING TIME
NUMBER NORM	M ERROR NOR	M ERROR NORM	I (SEC)
1 0.1404735333E	+05 0.1942883622E-	01 0.1655119174E-01	29.578
2 0.1398019964E	+05 0.1385376911E-	02 0.2246063485E-02	28.938

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 2 1800 2042 11217 11338 11882 17305

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 3 153 4126 11229 11580

RAWIUAL The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 2 61 1668 1928 2061 2066 2178 2805 11256 13446 13683 15148 15494 15498 16048 16050 17840

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 294 364 1352 4202 12734 14303 14612 14799 15340 15706 15940 16434 16983

OLD AVE. STRAIN RATE= 2.829789 OLD LIMITING STR. R.= 0.028298 NEW AVE. STRAIN RATE= 2.848097 NEW LIMITING STR. R.= 0.028481

UPDATED TIME/STROKE = 0.087000 5.220000 TIME/STROKE INCREMENT = 0.001000

1.4200

0.060000

166.9240 (sec)

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 32 (min) 6.4701 (sec)

SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP =

RESULT I/O

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION 0.3140 1 EQ. INDEXING PREPERATION 0.0000 0 STIFFNESS MATRIX GENERATION 9.2000 5 BOUNDARY CONDITION CAL. 0.7500 5 EQUATION SOLVING 150.5200 5 CONTACT TIME CALCULATION 0.0000 1 MESH CHECKS 0.0000 1 **INSIDE/OUTSIDE CHECK** 1.5940

STEP NUMBER 88

DIRECT METHOD

ITERATIO	N VELOCITY	RELATIVE VELOCITY	RELATIVE FORCE	SOLVING TIME
NUMBE	R NORM	ERROR NORM	ERROR NORM	(SEC)
1	0.1397899367E+05	0.4174702581E+00	0.2227521504E-01	27.984

2	0.1517167193E+05	0.2415759920E+00	0.3293506891E+00	28.624
3	0.1430880265E+05	0.2621621820E-01	0.2150927751E+00	29.236

CONVENTIONAL NEWTON RAPHSON METHOD

ITERATIO NUMBE	N VELOCITY R NORM	RELATIVE VELOCITY ERROR NORM	RELATIVE FORCE ERROR NORM	SOLVING TIME (SEC)
1	0.1431304017E+05	0.2549282346E-01	0.2237260692E-01	29.376
2	0.1424757972E+05	0.1006163933E-01	0.8750573035E-02	29.844
3	0.1424788976E+05	0.1269599074E-01	0.4004777600E-02	30.126
4	0.1424859880E+05	0.5626161080E-02	0.1964758376E-02	30.062
5	0.1424959756E+05	0.2769510715E-02	0.1302609375E-02	28.688

267.7020 (sec)

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 2 104 187 2624 3321 11217 11694 11940 17254 17304 17459 17939

The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 3 153 2892 3840 4079 10979 11261 11703 18456 18613 19284

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 2 165 615 2126 12727 14592 15233 15610 16027 16966 17300 17837

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 1113 13029 13271 14302 15644 18786

OLD AVE. STRAIN RATE= 2.848097 OLD LIMITING STR. R.= 0.028481 NEW AVE. STRAIN RATE= 2.884386 NEW LIMITING STR. R.= 0.028844

UPDATED TIME/STROKE = 0.088000 5.280000 TIME/STROKE INCREMENT = 0.001000 0.060000

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 36 (min) 34.1721 (sec)

SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP =

/0 1.5620

RESULT I/O 1

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)

INTERFACE GENERATION 0.3120 1 EQ. INDEXING PREPERATION 0.0000 0 STIFFNESS MATRIX GENERATION 19.5120 12 BOUNDARY CONDITION CAL. 1.7840 12 EQUATION SOLVING 240.1700 8 CONTACT TIME CALCULATION 0.0000 1 0.0000 1 MESH CHECKS INSIDE/OUTSIDE CHECK 1.5780 1

Step number is -200

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 2 522 5487 8629

The following nodes of Obj. 1 have contacted Die 3 3988 9186 14927

STEP NUMBER = 200

Eqs.New ProfileAve. Bandwidth60016147840848

DIRECT METHOD

TERATIO	ON VELOCITY	RELATIVE VELOCITY	RELATIVE FORCE	SOLVING TIME
NUMBE	R NORM	ERROR NORM	ERROR NORM	(SEC)
1	0.2355438733E+05	0.3911507694E+01	0.2190186688E+05	13.472
2	0.9393717557E+05	0.1538101809E+00	0.7886369319E+01	13.172
3	0.1052200254E+06	0.3550434868E-01	0.9789376077E-01	13.152
4	0.1021586234E+06	0.8156409192E-02	0.3195754434E-01	13.360
5	0.1019918266E+06	0.4515170102E-02	0.2895333746E-02	13.328

*** INFO: Substepping due to DPLEN at Node 3926 of Obj. 1 Old time step = 0.10000D-02; New time step = 0.33137D-03

 The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 2

 522
 524
 528
 582
 895
 922
 968
 987
 1222
 1223
 1225
 1276

 1300
 1641
 1682
 2162
 2248
 2257
 2409
 2410
 2412
 2474
 2548
 2778

 2915
 2991
 3001
 3153
 3154
 3215
 3313
 3418
 3718
 3753
 3806
 3846

 4176
 4198
 4439
 4567
 4617
 4705
 4799
 5086
 5119
 5170
 5389
 5487

 7476
 7689
 8084
 8244
 8403
 8404
 8629
 8868
 9238
 9343
 9630
 9925

 10183
 10777
 11241
 11290
 11821
 12091
 12182
 12475
 12730
 13156
 13208
 13340

 13816
 14088
 14227
 14529
 14743
 14819
 14893
 14924

 The following nodes of Obj. 1 have separated from Die 3

 489
 492
 521
 525
 526
 544
 790
 844
 1177
 1180
 1373
 2161

 2260
 2331
 2350
 2364
 2379
 2383
 2466
 2539
 2642
 2701
 2713
 2739

 2939
 2961
 2988
 3000
 3126
 3145
 3169
 3401
 3452
 3499
 3500
 3595

 3661
 3664
 3714
 3876
 3890
 3998
 4151
 4156
 4203
 4271
 4274
 4498

 4582
 4801
 4921
 5388
 5426
 6182
 7283
 7352
 8187
 8417
 8484
 8538

 8599
 8869
 9002
 9012
 9132
 9186
 9192
 9496
 9865
 9912
 943
 10338

 10675
 10798
 11022
 11309
 11754
 11951
 11982
 12238
 12459
 12582
 12731
 12732

 13264
 13341
 13385
 13441
 14228

The following nodes of Obj.1 have contacted Die24212285233024182483254425502665266630573125325632693343369238144190435844334634474852776971100191012812281125811273412919129781339813449135591361614145

The following nodes of Obj. 1 will not contact Die 2 because of previous separation. 2162 10183

 The following nodes of Obj.
 1 have contacted Die 3

 588
 845
 1092
 1094
 1519
 2075
 2148
 2227
 2394
 2485
 2624
 2630

 3104
 3105
 3172
 3450
 3845
 4316
 4351
 4487
 4807
 4814
 5069
 5533

 5564
 8374
 10913
 12724
 13032
 13120
 13569
 13689

 OLD AVE. STRAIN RATE=
 46.435330

 OLD LIMITING STR. R.=
 0.464353

 NEW AVE. STRAIN RATE=
 37.191957

 NEW LIMITING STR. R.=
 0.371920

UPDATED TIME/STROKE = 0.197500 11.850000 TIME/STROKE INCREMENT = 0.000235 0.014072

PROGRAM STOPPED! THE Z STROKE -11.8500000 HAS REACHED THE SPECIFIED LIMIT -11.8500000