OPTIMASI DIMENSI AWAL PELAT PADA PROSES PEMBENGKOKAN BENTUK *JOGGED FLANGE* DENGAN SIMULASI TIGA DIMENSI

SKRIPSI

Konsentrasi Teknik Produksi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

SAPTONUGROHO SUM ADI RIPTANTO
NIM. 0001060225-62

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN MESIN
M A L A N G
2 0 0 7

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

OPTIMASI DIMENSI AWAL PELAT PADA PROSES PEMBENGKOKAN BENTUK *JOGGED FLANGE* DENGAN SIMULASI TIGA DIMENSI

SKRIPSI

Konsentrasi Teknik Produksi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

SAPTONUGROHO SUM ADI RIPTANTO
NIM. 0001060225-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Pembimbing I	Pembimbing II
Moch. Agus Choiron, ST., MT.	**Sofyan Arief Setya Budi, ST.**
NIP. 132 259 661	**NIP. 132 206 464**

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI DIMENSI AWAL PELAT PADA PROSES PEMBENGKOKAN BENTUK *JOGGED FLANGE* DENGAN SIMULASI TIGA DIMENSI

Disusun oleh :

SAPTONUGROHO SUM ADI RIPTANTO
NIM. 0001060225-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan **lulus** pada
tanggal 8 Agustus 2007

DOSEN PENGUJI

Skripsi I

Ir. Saifuddin Baedowie
NIP. 130 350 753

Skripsi II

Ir. Bambang Indrayadi, MT.
NIP. 131 653 469

Komprehensif

Ir. Sentanu
NIP. 130 518 945

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin :

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

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penulis sadar bahwa selama dalam penulisan skripsi ini telah dibantu oleh banyak pihak.

Oleh sebab itu penulis menyatakan terima kasih yang tulus kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini, yaitu :

- Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, Msc., selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., selaku Ketua Konsentrasi Teknik Produksi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Bapak Moch. Agus Choiron, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing I.
- Bapak Sofyan Arief Setya Budi, ST., selaku Dosen Pembimbing II.
- Bapak dan Ibu selaku orang tua beserta seluruh keluarga yang telah banyak membantu dan memberi dorongan dalam segala hal.
- Seluruh keluarga besar MIT Jurusan Mesin Universitas Brawijaya karena telah menemani penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, terutama Bapak Sofyan dan Bapak Choiron yang telah memberikan fasilitas dan nasehat serta selalu memaksa saya untuk menyelesaikan skripsi ini.
- Seluruh teman-teman yang secara langsung atau tidak langsung, khususnya Mahasiswa Mesin angkatan 2000 yang telah membantu dalam kelancaran terselesaikannya skripsi ini dengan baik.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan karena itu kritik dan saran yang sifatnya membangun sangat penulis harapkan dalam kesempurnaan skripsi ini.

Malang, 8 Agustus 2007

Penulis

DAFTAR ISI

		Halaman
KATA PENGANTAR		i
DAFTAR ISI		ii
DAFTAR TABEL		iv
DAFTAR GAMBAR		v
DAFTAR LAMPIRAN		vii
RINGKASAN		viii
BAB I	**PENDAHULUAN**	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	2
1.3	Batasan Masalah	3
1.4	Tujuan Penelitian	3
1.5	Manfaat penelitian	3
BAB II	**TINJAUAN PUSTAKA**	4
2.1	Penelitian Sebelumnya	4
2.2	Proses *Bending*	8
2.3	Analisa Tegangan	12
2.4	Cacat Ketidakrataan	13
2.5	Simulasi Komputer	13
2.6	Persoalan *Non-Linear*	14
2.7	Hipotesis	16
BAB III	**METODOLOGI PENELITIAN**	17
3.1	Metode Penelitian	17
3.2	Rancangan Percobaan	17
3.3	Diagram Alir Penelitian	18
3.4	Variabel Penelitian	20
3.5	Spesifikasi Material Pelat	21
3.6	Geometri Pelat	21

3.7 Pemodelan 22
3.7.1 Pemodelan 22
3.7.2 Langkah Langkah Pemodelan 23

BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN 28
4.1 Data 28
4.2 Pembahasan 31
4.2.1 Verifikasi Hasil Pemodelan 31
4.2.2 Pengaruh Radius Belokan Terhadap Ketidakrataan *Sisi Flange* 31

BAB V PENUTUP 34
5.1 Kesimpulan 34
5.2 Saran 34

DAFTAR PUSTAKA 35
LAMPIRAN 36

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Rancangan Percobaan	17
Tabel 4.1	Hasil pengukuran ketidakrataan dt_1 (mm)	29
Tabel 4.2	Hasil pengukuran ketidakrataan dt_2 (mm)	29

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Komparasi solusi analitis dan simulasi pada panjang kritis *flange* terhadap *springback*	4
Gambar 2.2	Effek gap dan radius *die* pada *springback*	5
Gambar 2.3	*Setting tool* pada eksperimen	6
Gambar 2.4	Animasi pada proses *straight flanging*	7
Gambar 2.5	Grafik hubungan radius die terhadap sudut springback pada variasi tebal pelat	8
Gambar 2.6	Contoh bentuk produk-produk hasil proses *bending*	9
Gambar 2.7	Skema proses *bending*	10
Gambar 2.8	Macam-macam tipe *flange*	10
Gambar 2.9	Perhitungan gaya *bending*	11
Gambar 2.10	Perubahan tegangan pada radius tekuk	13
Gambar 2.11	Metode *Newton Raphson*	15
Gambar 3.1	Spesifikasi geometri pelat yang digunakan	18
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian	19
Gambar 3.3	Pengukuran ketidakrataan pada daerah lokal belokan (mm)	20
Gambar 3.4	Variasi radius pelat (R_1 dan R_2) mulai dari 5 mm s/d 15 mm.	21
Gambar 3.5	Pemodelan proses *jogged flanging*	22
Gambar 3.6	Bentuk produk akhir	23
Gambar 3.7	Variasi radius R_1 dan R_2 pada Mechanical Desktop 6 Power Pack	24
Gambar 3.8	*Sketch* di *extrude* setebal 3 mm arah sumbu *z* pada SolidWork 2005	24
Gambar 3.9	Pemodelan proses *jogged flange* menggunakan *software* DEFORM 3D	25
Gambar 3.10	*Meshing* keseluruhan pada benda kerja	26
Gambar 3.11	Contoh keluaran DEFORM-3D *Post*, Tegangan utama pada kontur permukaan banda kerja	27
Gambar 4.1	Pengukuran ketidakrataan pada daerah lokal belokan (mm)	28

Gambar 4.2 Grafik ketidakrataan belokan 1, hubungan radius belokan 2 terhadap ketidakrataan ketinggian pada belokan 1..... 30
Gambar 4.3 Grafik ketidakrataan belokan 2, hubungan radius belokan 1 terhadap ketidakrataan ketinggian pada belokan 2..... 30
Gambar 4.4 Verifikasi model 3 dimensi pada *straight flange* 31
Gambar 4.5 Kedwisumbuan tegangan yang terjadi pada radius belokan pelat..... 32

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Data ketidakrataan ketinggian sisi *flange*	L-1
Lampiran 2.	Data tegangan pada ujung *flange*.	L-2

repository.ub.ac.id

RINGKASAN

Saptonugroho Sum Adi Riptanto, 2007. Universitas Brawijaya. *Optimasi Dimensi Awal Pelat pada Proses Pembengkokan Bentuk Jogged Flange dengan Simulasi Tiga Dimensi*. **Dosen Pembimbing : Moch. Agus Choiron, ST., MT. & Sofyan Arief Setya Budi, ST.**

Salah satu permasalahan utama dalam proses pembentukan logam adalah terjadinya perubahan dimensi pada hasil akhir pembentukan yang tidak sesuai dengan yang diharapkan. Selain karakteristik fisik material, ada beberapa faktor lain yang juga berpengaruh terhadap hasil akhir pembentukan, antara lain ketebalan pelat, radius *bending*, dimensi awal pelat, parameter proses, dan *design tool* yang digunakan. Dalam mendesain dimensi awal material maupun *setting tool* untuk mendapatkan hasil akhir yang sempurna, masih sering dilakukan prosedur coba-coba, sehingga banyak digunakan bantuan simulasi komputer, sebagai prediksi proses untuk lebih menghemat waktu analisa. Diantara beberapa faktor tersebut, yang paling mudah dan sangat berperan terhadap perubahan dimensi adalah dimensi awal material.

Metode penelitian yang digunakan pada skripsi ini adalah metode eksperimental semu, yang bertujuan untuk mendapatkan informasi yang dapat digunakan sebagai acuan maupun perkiraan dalam melaksanakan eksperimen secara nyata, dan untuk mengetahui bagaimana pengaruh dimensi awal bahan baku pelat terhadap kerataan ketinggian hasil produk akhir pada sisi *flange* yang terjadi pada proses *bending* bentuk *jogged flange*. Dilakukan *flanging*/*wiping die* pada sisi *flange* dengan divariasikannya radius kedua belokan pada sisi *flange*, antara 5 mm sampai dengan 15 mm. Kemudian dilakukan analisis pengaruh dimensi awal pelat terhadap ketidakrataan ketinggian yang terjadi pada sisi flange.

Dari hasil pengujian pada belokan pertama didapatkan nilai ketidakrataan ketinggian minimum dicapai oleh radius R_1 = 15 mm dengan radius pada belokan 2 (R_2) = 6 mm dan ketidakrataan ketinggian maksimum dicapai oleh radius R_1 = 5 mm dengan radius pada belokan 2 (R_2) = 12 mm. Sedangkan hasil pengujian pada belokan kedua, nilai ketidakrataan ketinggian minimum dicapai oleh radius R_2 = 15 mm dengan radius pada belokan 1 (R_1) = 10 mm dan ketidakrataan ketinggian maksimum dicapai oleh radius R_2 = 5 mm dengan radius pada belokan 1 (R_1) = 14 mm.

Kata Kunci : Optimasi, Dimensi Awal, Pelat, Pembengkokan, *Jogged Flange*, Simulasi, Tiga Dimensi.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pembentukan logam banyak digunakan dalam industri otomotif, khususnya dalam pembuatan bodi atau rangka kendaraan. Salah satu permasalahan utama dalam proses pembentukan logam adalah terjadinya perubahan dimensi pada hasil akhir pembentukan yang tidak sesuai dengan yang diharapkan. Selain karakteristik fisik material, ada beberapa faktor lain yang juga berpengaruh terhadap hasil akhir pembentukan, antara lain ketebalan pelat, radius *bending*, dimensi awal pelat, parameter proses, dan *design tool* yang digunakan. Dalam mendesain dimensi awal material maupun *setting tool* untuk mendapatkan hasil akhir yang sempurna, masih sering dilakukan prosedur coba-coba (*trial and error*), sehingga banyak digunakan bantuan simulasi komputer, sebagai prediksi proses untuk lebih menghemat waktu analisa.

Cao, Jian (2001) mengembangkan simulasi metode elemen hingga dengan bantuan *software* ABAQUS pada proses *bending* bentuk *straight flanging* untuk mengetahui pengaruh pertambahan gap (lebar antara *punch* dan *die*) dan panjang *flange* (panjang pembengkokan) terhadap *springback* yang terjadi. Dari hasil simulasi dapat ditarik kesimpulan bahwa sudut *springback* akan bertambah seiring dengan pertambahan gap dan semakin pendeknya panjang *flange*. Cao, Jian; Buranathiti, Thaweepat (2004) melakukan penelitian model analitis untuk memprediksi *springback* pada proses *bending* bentuk *straight flanging*. Dari hasil analisa disebutkan bahwa perubahan radius *die* mempunyai efek lebih besar dibandingkan dengan perubahan gap. Hampir sama dengan yang dilakukan Jian Cao (2001), prediksi *springback* menggunakan model analitis menghasilkan kesimpulan yang sama dengan menggunakan metode elemen hingga. Salah satunya yaitu sudut *springback* yang semakin mengecil seiring dengan pengurangan lebar gap maupun pengurangan radius *die*, yang disebabkan karena perbedaan nilai regangan maupun tegangan yang terjadi pada setiap *setting* variabel bebas yang berbeda.

Kulkarni, Pravin, and Prabhakar, Shashikiran (2003) melakukan studi mengenai *springback* pada *aluminum*, untuk mengetahui pengaruh effek dari laju regangan (*strain-rate*) pada *springback* yang terjadi pada material *aluminum* 2024 dengan proses *hydroforming*. Studi yang menggunakan baik metode eksperimen langsung maupun

metode elemen hingga dengan simulasi komputer LS-Dyna ini, menghasilkan kesimpulan bahwa *aluminum alloy* 2024-T3 lebih sensitif untuk membentuk laju regangan dibandingkan dengan *aluminum alloy* 2024-O. Dari studi ini bisa dilihat bahwa jenis material sangat mempengaruhi laju regangan yang terjadi. Perbedaan laju regangan sangat berkaitan langsung dengan bentuk deformasi produk akhir yang terjadi.

Choiron, Moch. Agus, dan Widiarko, Kiki Amban (2006) mensimulasikan *springback* pada proses *bending* bentuk *straight flanging* dengan pemodelan dua dimensi, disimpulkan bahwa pertambahan radius belokan *die* akan memperbesar daerah elastis pada daerah bengkokan, sehingga *springback* yang terjadi semakin besar. Untuk variasi ketebalan pelat didapatkan hasil yang sebaliknya, dimana sudut *springback* akan menurun seiring pertambahan tebal pelat. Penelitian selanjutnya (Choiron, Moch. Agus, 2006) dengan simulasi tiga dimensi proses *bending* bentuk *jogged flange* yang geometrinya lebih komplek dibandingkan dengan *straight flange*. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan elemen tiga dimensi, dimana komputasinya menggunakan bantuan *software* aplikasi komputer DEFORM-3D ver 5.0. Dengan melihat pengaruh radius *die* dan tebal pelat terhadap *springback* yang terjadi, menghasilkan kesimpulan yang sama. Akan tetapi hasil yang didapat menunjukkan ketidakrataan hasil produk akhir, akibat *strain-rate* (laju regangan) pada tiap segmen bahan baku yang berbeda, terutama pada radius belokan pelat. Pada daerah tersebut muncul kedwisumbuan tegangan, sehingga deformasi yang terjadi menjadi tidak seragam. Selain karena pengaruh bentuk *tool* (*die*, *blankholder* dan *punch*), pelumasan, kecepatan *punch*, gaya *blankholder*, maupun penyebab lain yang dapat diperbaiki dengan mudah adalah belum dioptimasinya dimensi awal bahan baku pelat.

Dari latar belakang tersebut, penulis mencoba mengoptimasi dimensi awal pelat, sehingga bisa meminimalkan cacat ketidakrataan ketinggian pada sisi *flange*. Pemodelan dilakukan dengan bantuan *software* DEFORM 3D ver 5.0.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dianalisa adalah bagaimana simulasi tiga dimensi proses *bending* bentuk *jogged flange* untuk mengoptimasi dimensi awal bahan baku pelat, sehingga bisa meminimalkan cacat ketidakrataan pada sisi *flange* produk hasil akhir.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan adalah:

1. Pelat benda kerja dimodelkan dengan menggunakan elemen tiga dimensi.
2. Material diasumsikan *homogen* dan *isotropic*.
3. *Punch*, *Die*, dan *Holder* dimodelkan sebagai material *rigid*, sedangkan pelat benda kerja dimodelkan sebagai material *bilinear isotropic*.
4. Koefisien gesek dianggap konstan.
5. Tebal pelat benda kerja adalah 3 mm.
6. Tidak membahas pembuatan *die*.
7. Geometri *die* tetap.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh dimensi awal bahan baku pelat terhadap kerataan hasil akhir pada sisi *flange* yang terjadi pada proses *bending* bentuk *jogged flange*.

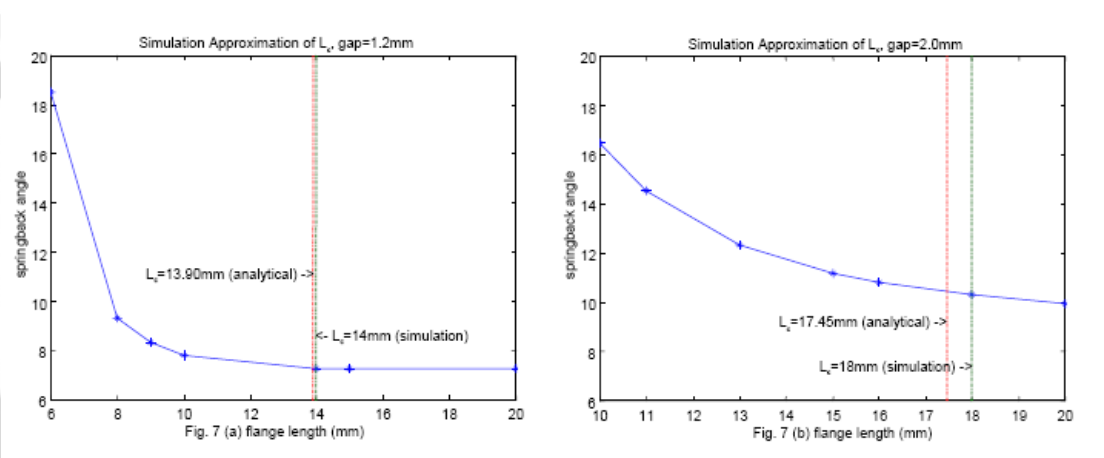
1.5 Manfaat Penelitian

Memberikan gambaran mengenai proses *bending* melalui simulasi komputer yang berguna untuk mereduksi waktu yang diperlukan dalam *trial and error setting* proses *bending* beserta penentuan dimensi awal bahan baku pelat. Optimasi dimensi awal bahan baku pelat pada proses *bending* bentuk *jogged flange* terkait langsung dengan dimensi hasil akhir produk yang diinginkan. Dengan simulasi akan diperoleh bentuk desain awal dimensi bahan baku pelat secara *virtual* yang dapat dikembangkan setiap saat dan tentunya dengan waktu yang jauh lebih cepat.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Cao, Jian (2001) mengembangkan simulasi metode elemen hingga dengan bantuan *software* ABAQUS pada proses *bending* bentuk *straight flanging* untuk mengetahui pengaruh pertambahan gap (lebar antara *punch* dan *die*) dan panjang *flange* (panjang pembengkokan) terhadap *springback* yang terjadi. Dari hasil simulasi dapat ditarik kesimpulan bahwa sudut *springback* akan bertambah seiring dengan pertambahan gap dan semakin pendeknya panjang *flange* (Gambar 2.1).

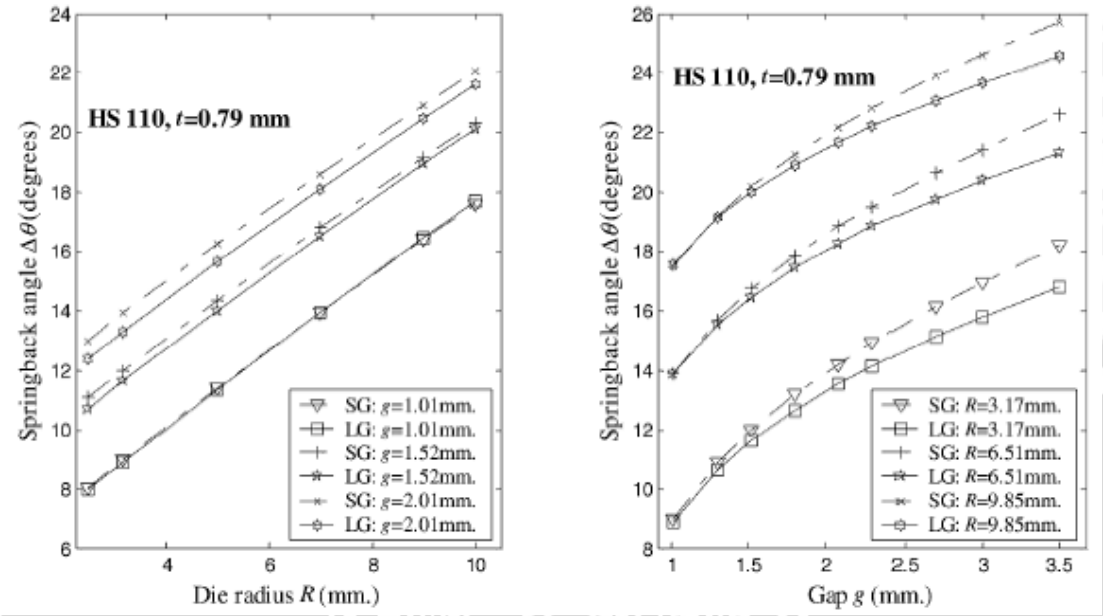


Gambar 2.1. Komparasi solusi analitis dan simulasi pada panjang kritis *flange* terhadap *springback.*

Sumber: Cao, Jian (2001).

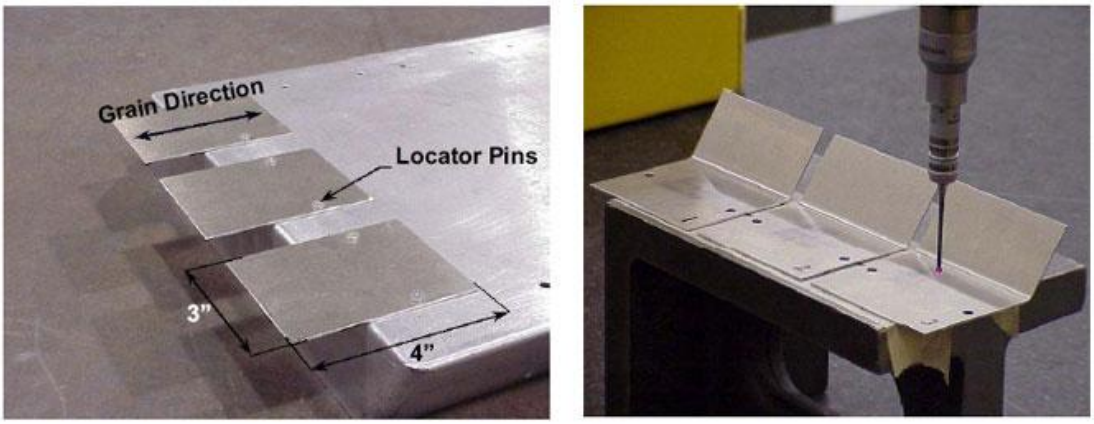
Cao, Jian; Buranathiti, Thaweepat (2004) melakukan penelitian model analitis untuk memprediksi *springback* pada proses *bending* bentuk *straight flanging*. Dari hasil analisa disebutkan bahwa perubahan radius *die* mempunyai efek lebih besar dibandingkan dengan perubahan gap (Gambar 2.2). Hampir sama dengan yang dilakukan Jian Cao (2001), prediksi *springback* menggunakan model analitis menghasilkan kesimpulan yang sama dengan menggunakan metode elemen hingga. Salah satunya yaitu sudut *springback* yang semakin mengecil seiring dengan pengurangan lebar gap maupun pengurangan radius *die*, yang disebabkan karena

perbedaan nilai regangan maupun tegangan yang terjadi pada setiap *setting* variabel bebas yang berbeda.



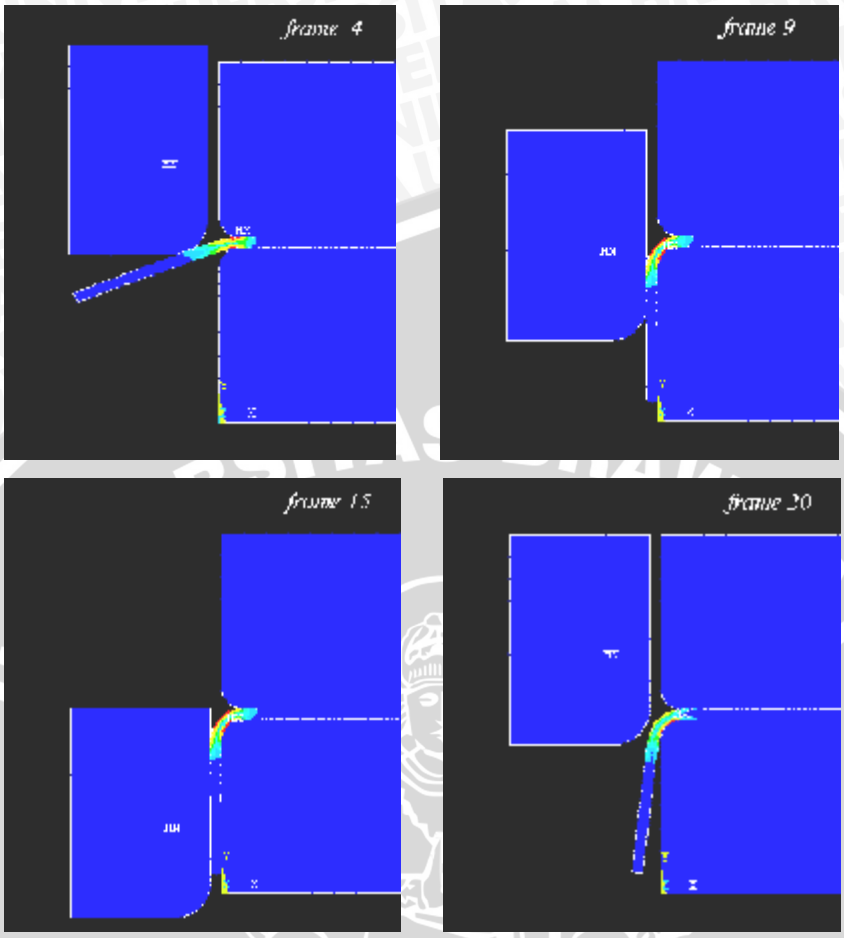
Gambar 2.2. Effek gap dan radius *die* pada *springback*.
Sumber: Cao, Jian; Buranathiti, Thaweepat (2004).

Kulkarni, Pravin, and Prabhakar, Shashikiran (2003) melakukan studi mengenai *springback* pada *aluminum*, untuk mengetahui pengaruh effek dari laju regangan (*strain-rate*) pada *springback* yang terjadi pada material *aluminum* 2024 dengan proses *hydroforming*. Studi yang menggunakan baik metode eksperimen langsung (Gambar 2.3) maupun metode elemen hingga dengan simulasi komputer LS-Dyna ini, menghasilkan kesimpulan bahwa *aluminum alloy* 2024-T3 lebih sensitif untuk membentuk laju regangan dibandingkan dengan *aluminum alloy* 2024-O. Dari studi ini bisa dilihat bahwa jenis material sangat mempengaruhi laju regangan yang terjadi. Perbedaan laju regangan sangat berkaitan langsung dengan bentuk deformasi produk akhir yang terjadi.



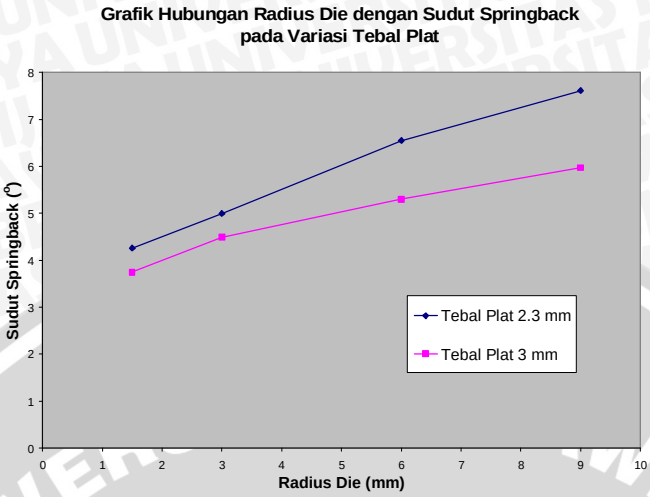
Gambar 2.3. *Setting tool* pada eksperimen.
Sumber: Kulkarni, Pravin, and Prabhakar, Shashikiran (2003).

Choiron, Moch. Agus, dan Widiarko, Kiki Amban (2006) mensimulasikan *springback* pada proses *bending* bentuk *straight flanging* dengan pemodelan dua dimensi (Gambar 2.4), disimpulkan bahwa pertambahan radius *die* akan memperbesar daerah elastis pada daerah bengkokan, sehingga *springback* yang terjadi semakin besar. Untuk variasi ketebalan pelat didapatkan hasil yang sebaliknya, dimana sudut *springback* akan menurun seiring pertambahan tebal pelat.



Gambar 2.4. Animasi pada proses *straight flanging*.
Sumber: Choiron, Moch. Agus, dan Widiarko, Kiki Amban (2006).

Choiron, Moch. Agus, (2006) melakukan simulasi tiga dimensi proses *bending* bentuk *jogged flange* yang geometrinya lebih kompleks dibandingkan dengan *straight flange*. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan elemen tiga dimensi, dimana komputasinya menggunakan bantuan *software* aplikasi komputer DEFORM-3D ver 5.0. Dengan melihat pengaruh radius *die* dan tebal pelat terhadap *springback* yang terjadi, menghasilkan kesimpulan yang sama (Gambar 2.5).

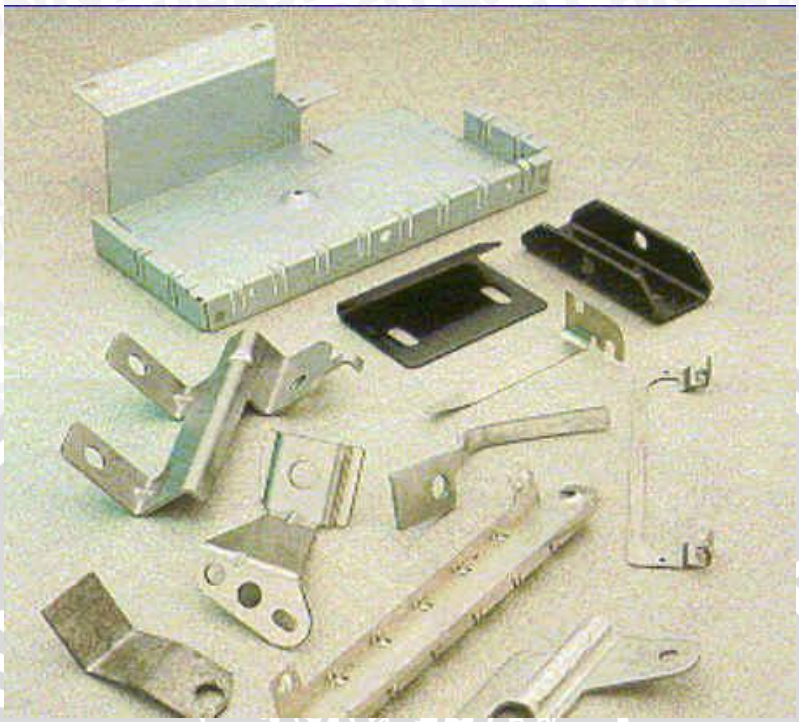


Gambar 2.5. Grafik hubungan radius *die* terhadap sudut *springback* pada variasi tebal pelat.

Sumber: Choiron, Moch. Agus, (2006).

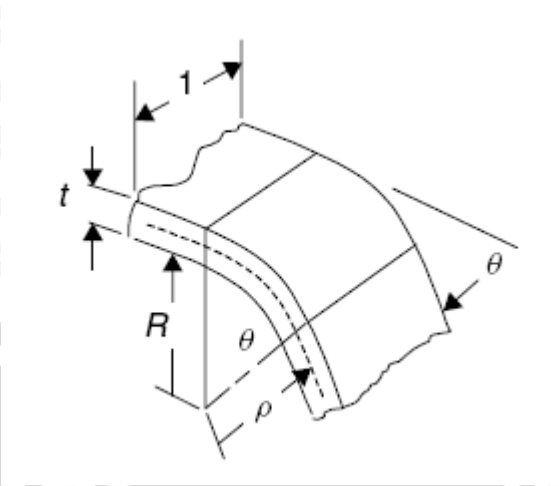
2.2 Proses *Bending*

Bending (pembengkokan) adalah proses dimana bentuk-bentuk yang lurus diubah menjadi lengkungan. Proses ini merupakan proses yang sering digunakan untuk mengubah pelat contohnya pelat menjadi saluran, drum, tangki dan komponen otomotif serta bentuk-bentuk lainnya (Gambar 2.6).



Gambar 2.6. Contoh bentuk produk-produk hasil proses *bending*.
Sumber: Choiron, Moch. Agus, (2006).

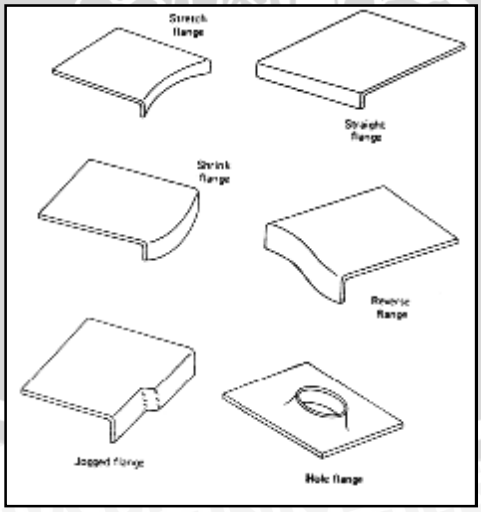
Jari-jari *bending* (R) didefinisikan sebagai jari-jari lengkungan cekung atau permukaan dalam bengkokan. Pada pembengkokan plastis melampaui batas elastis, sumbu netral bergeser lebih dekat ke permukaan dalam lengkungan pada saat proses pembengkokan dilakukan (Gambar 2.7). Karena regangan plastis sebanding dengan jarak dari sumbu netral, serat-serat pada permukaan luar mengalami regangan lebih besar dibanding serat dipermukaan dalam dan serat dipermukaan dalam mengalami pengerutan. Serat ditengah-tengah mengalami perentangan dan karena merupakan serat rata-rata, maka harus terjadi pengurangan tebal (pada arah radial) untuk mempertahankan volume konstan. Makin kecil jari-jari lengkungan, makin besar penurunan tebal pada bengkokan.



Gambar 2.7. Skema proses *bending*.

Sumber: Marciniak, Z (2002).

Flanging merupakan salah satu jenis dari berbagai macam proses *bending* (Gambar 2.8). Pada dasarnya proses ini sama dengan proses *bending* kecuali pada bagian benda kerja yang dibengkokkan mempunyai ukuran relatif kecil dan biasa terletak di ujung.



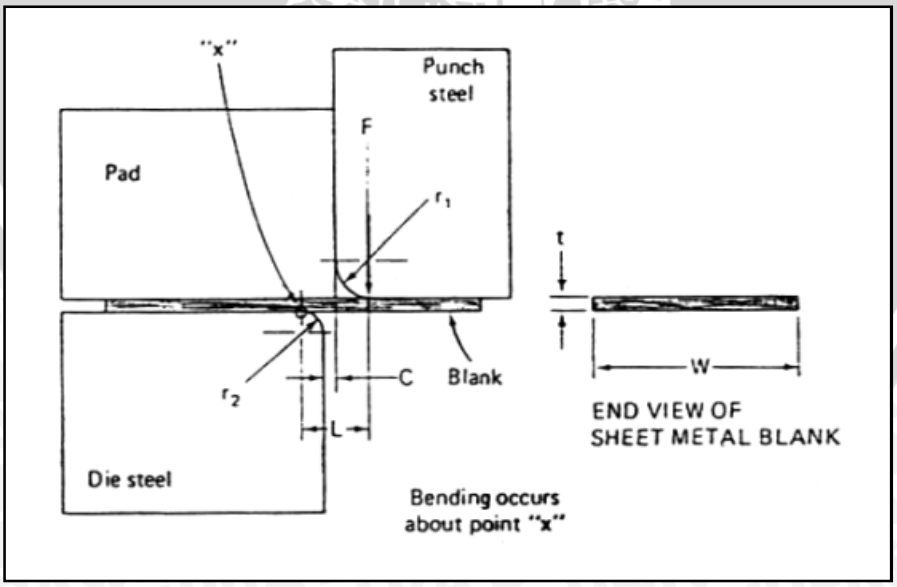
Gambar 2.8. Macam-macam tipe *flange*.

Sumber: Marciniak, Z (2002).

Straight flanging merupakan proses *flanging* yang memiliki bentuk paling sederhana dimana lengkungan membentuk garis lurus searah lebar pelat, sehingga geometri produk akhir semisal ketinggian sisi *flange* yang terjadi mudah untuk diamati. Sedangkan *jogged flange* sendiri adalah proses *flanging* yang lebih kompleks dari *straight flange*, dimana lengkungan *flange* tidak lurus, melainkan membentuk belokan, sehingga ketinggian sisi *flange* berbeda pada tiap belokan pelat yang berbeda. Proses *flanging* ini memiliki kegunaan yang lebih spesifik dibandingkan *bending* pada umumnya yaitu:

1. *Flanging* digunakan untuk memperkuat ujung dari *part* metal yang berbentuk pelat. *Part* ini mungkin berbentuk *flat* atau dapat berupa panel yang berbentuk kompleks seperti yang dihasilkan dari proses pembentukan lain.
2. Pada beberapa kasus, *small flange* digunakan untuk memperhalus ujung berbentuk melingkar sehingga didapatkan penampilan yang menarik.
3. *Flanges* sering kali digunakan untuk menyediakan bentuk bagi pengabungan untuk proses *assembling parts.*

Besarnya gaya yang dibutuhkan untuk proses *bending* khususnya *wiping/flanging dies* dapat diformulasikan sebagai berikut (Gambar 2.9) :



Gambar 2.9. Perhitungan gaya *bending*.

Sumber : Eary (1974).

$$F = 0{,}167 \frac{s_{uts} W t^2}{L} \qquad \text{(Eary ; 1974 : 71)} \qquad (2\text{-}1)$$

Konstanta 0,167 dinaikkan menjadi 0,333 untuk kompensasi *span* yang pendek dan tegangan plastis yang terjadi sehingga rumus di atas menjadi :

$$F = 0{,}333 \frac{s_{uts} W t^2}{L} \qquad \text{(Eary ; 1974 : 71)} \qquad (2\text{-}2)$$

Keterangan :

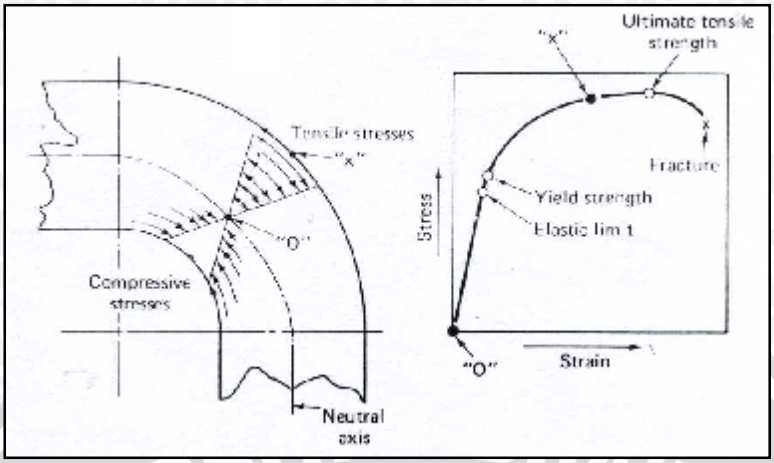
F	=	gaya *bending*	(*pounds*)
t	=	tebal pelat	(*inch*)
W	=	lebar pelat	(*inch*)
L	=	*span*	(*inch*)
r_1	=	radius *punch*	(*inch*)
r_2	=	radius *die*	(*inch*)
C	=	kelonggaran die (*gap*)	(*inch*)
s_{uts}	=	UTS (*ultimate tensile strength*)	(*psi*)

Pada umumnya dalam proses *bending* tipe *wiping die* diperlukan *pad/holder* yang berfungsi untuk mengimbangi gaya *bending* sehingga pelat bisa dibengkokan. Besarnya gaya yang diberikan pada *pad* umumnya sepuluh kali lebih besar dari gaya *bending* atau lebih tepatnya dapat dicari berdasarkan persamaan berikut :

$$P = 0{,}333\ s_{uts} W t \qquad \text{(Eary ; 1974 : 71)} \qquad (2\text{-}3)$$

2.3 Analisa Tegangan

Tegangan tarik paling besar terjadi pada permukaan luar pelat saat dibengkokan. Tegangan tarik semakin mengecil kearah pusat dari tebal pelat dan bernilai nol pada sumbu netral. Gambar 2.9 menunjukkan perubahan tegangan tarik dan tegangan tekan pada daerah tekukan. Untuk menghasilkan tekukan yang baik, tegangan tarik pada titik *x* harus lebih rendah dari tegangan *ultimate*. Logam yang paling dekat dengan sumbu netral mengalami tegangan di bawah batas elastis. Logam tersebut menimbulkan daerah sempit yang elastis pada kedua sisi sumbu netral (Gambar 2.10).



Gambar 2.10. Perubahan tegangan pada radius tekuk.

Sumber: Marciniak, Z (2002).

2.4 Cacat Ketidakrataan

Cacat ketidakrataan hasil produk adalah sesuatu yang tidak diinginkan dalam suatu proses permesinan. Cacat ketidakrataan dalam proses *bending* bisa diakibatkan karena ketidakseragaman deformasi yang terjadi pada proses *bending* itu sendiri. Pada *bending* bentuk *jogged flange*, yang mana sisi *flange*/yang dibengkokan tidak rata seperti pada *straight flange*, pada produk hasil akhirnya bisa didapati ketinggian *flange* yang berbeda antara daerah yang lurus dengan daerah yang ada belokannya. Adanya bentuk belokan pada proses *jogged flange*, mengakibatkan terjadinya penipisan tebal pelat yang tidak rata yang nantinya mengakibatkan tidak ratanya ketinggian sisi *flange* pada hasil produk akhir.

2.5 Simulasi Komputer

Simulasi komputer adalah suatu proses simulasi yang dilakukan dengan menggunakan bantuan komputer dengan memakai *software* berbasis metode elemen hingga yang sering kali digunakan pada berbagai kasus *engineering*. Contoh kasus-kasus yang mampu diselesaikan meliputi :

1. Analisis struktur statis/dinamis baik linier maupun *non-linear*.
2. Perpindahan panas dan mekanika fluida.
3. Fenomena elektromagnetik.

Secara umum solusi metode elemen hingga dapat dibagi menjadi 3 bagian utama. Hal ini menjadi panduan utama dalam menentukan langkah-langkah penyelesaian dengan menggunakan metode ini. Tahap tersebut adalah :

1. *Preprocessing*

Adalah tahap mendefinisikan masalah dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- Menentukan *keypoint, lines, area* atau *volume*.
- Menentukan tipe elemen dan material yang digunakan beserta *properties*-nya.
- Melakukan *meshing* pada *lines, area* atau *volume* sesuai kebutuhan.

Pada tahap ini tingkat ketelitiannya disesuaikan dengan analisis dimensi yang dipilih semisal 1 dimensi, 2 dimensi, *axi-symmetric* atau 3 dimensi.

2. *Solution*

Adalah tahap pemberian beban (*load*), *constraints* dan *solving*. Pada tahap ini ditentukan bagaimana beban diaplikasikan dan berapa besarnya. Selanjutnya dipilih model *constraints* yang digunakan (translasi dan, atau rotasi) dan yang terakhir adalah tahap *solving* (*running program*).

3. *Postprocessing*

Adalah tahap akhir dimana hasil dari *solving* bisa dilihat. Pada tahap ini ada beberapa hal yang bisa diamati atau ditampilkan yaitu :

- Perpindahan/*deformation*.
- Distribusi *Strain* (regangan), *Strain Rate* (laju regangan).
- Distribusi *Stress* (regangan).
- Distribusi temperatur, dan lain-lain.

2.6 Persoalan *Non-Linear*

Pada proses pembentukan logam, deformasi yang terjadi adalah besar (*large deformation*). Selain itu terdapat kondisi elastis plastis dimana matrik konstitutif tergantung pada tegangan sebelumnya. Karena kedua kondisi di atas, maka prosedur metode elemen hingga yang digunakan adalah *non-liniear*. Prinsip dasar persoalan *non-linier* adalah persamaan kesetimbangan harus ditulis dengan mengacu pada geometri yang sudah terdeformasi dan pada kondisi elastis plastis persamaan kesetimbangan harus ditulis dengan menggunakan sifat material yang tergantung pada tegangan sebelumnya, bukan oleh suatu matrik konstanta. Persoalan *non-linear* bisa diubah

menjadi permasalahan *linear* dengan sistem koordinat *Update Langrangian* atau dengan metode *Newton Raphson*.

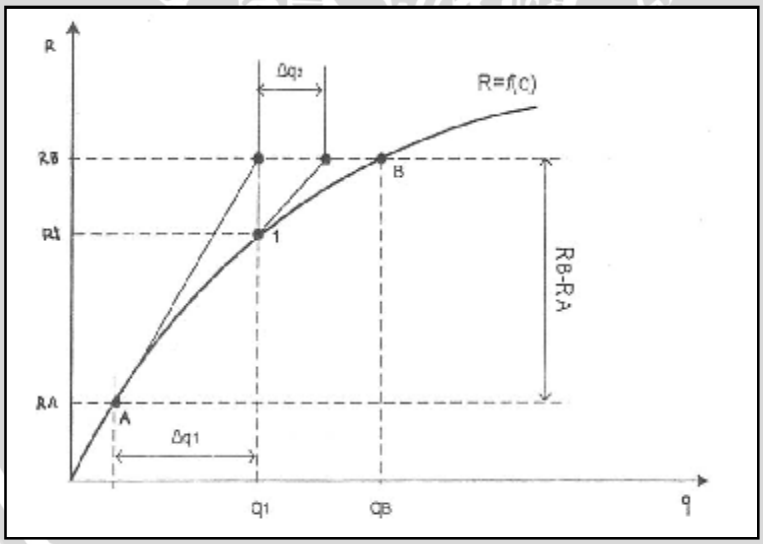
Ø Sistem Koordinat *Update Lagrangian*.

Pada sistem ini sumbu koordinat akan berubah mengikuti deformasi dari material. Prinsip sistem ini adalah :

1. Sebuah sistem koordinat lokal dikenakan pada tiap elemen, sistem lokal bergerak bersama dengan gerakan elemen.
2. Diferensiasi dan integrasi dilakukan dengan mengacu pada koordinat lokal.
3. Keadaan deformasi sekarang digunakan sebagai acuan sebelum tahap solusi inkremental berikutnya.
4. Koordinat lokal disesuaikan untuk menghasilkan keadaan acuan yang baru.

Ø Metode *Newton Raphson*.

Misal terdapat sebuah fungsi beban terhadap peralihan R = f(q) untuk sistem kebebasan derajat tunggal (Gambar 2.11).



Gambar 2.11. Metode *Newton Raphson*.

Perpindahan q_A yang berkenaan dengan R_A, kemudian beban dinaikkan menjadi R_B dan peralihan yang berkaitan q_B dicari. Melalui ekspansi deret Taylor R = f (q) pada titik q_A dipotong hingga turunan pertama adalah :

$$f(q_A + \Delta q_1) = f(q_A) + (dR/dq)_A (\Delta q_1) \qquad (2\text{-}4)$$

dimana f (q_A) = R_A, $[dr/dq]_A$ = K_A (kekakuan pada A), dan f ($q_A + \Delta q_1$) = R_B , sehingga:

$$K_A (\Delta q_1) = R_B - R_A \qquad (2\text{-}5)$$

$R_B - R_A$ diinterpretasikan sebagai selisih antara beban yang dikenakan dengan gaya tahanan pada struktur. Langkah berikutnya:

1. Ubah peralihan $q_1 = q_A + \Delta q_1$
2. Gunakan q_1 untuk memperoleh kekakuan K_1 dan tahanan R_1
3. Hitung inkremen peralihan Δq_2 berikutnya dari $K_1 (\Delta q_2) = R_B - R_1$

Jadi $R_B - R_1$ ialah kesetimbangan gaya saat itu. Akhirnya $q_B = q_A + q_1 + q_2 + \ldots$ untuk pendekatan yang cukup dekat. Dengan prosedur semacam ini maka pada kondisi elastis plastis matrik konstitutif bisa dievaluasi tiap-tiap iterasi berdasar tegangan sebelumnya.

2.7 Hipotesis

Pada proses *bending* bentuk *jogged flange*, akan terjadi ketidakseragaman deformasi, terutama di daerah belokan sisi *flange* yang diakibatkan oleh kedwisumbuan tegangan. Ketidakseragaman deformasi akan mengakibatkan tidak ratanya ketinggian sisi *flange*. Dengan memvariasikan radius pada tiap tiap belokan pelat benda kerja, akan bisa didapatkan angka minimal cacat ketidakrataan pada sisi *flange* yang terjadi karena adanya perbedaan geometri pelat benda kerja.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimental semu. Simulasi pengaruh penentuan dimensi awal pelat terhadap hasil produk akhir yang terjadi pada proses *bending* bentuk *jogged flange* dilakukan dengan memodelkan proses *bending* dengan menggunakan bantuan komputer. Metode ini bertujuan untuk mendapatkan informasi yang dapat digunakan sebagai acuan maupun perkiraan dalam melaksanakan eksperimen secara nyata. Dalam hal ini peneliti berusaha sedekat mungkin pada prosedur dan tata cara dalam eksperimen nyata.

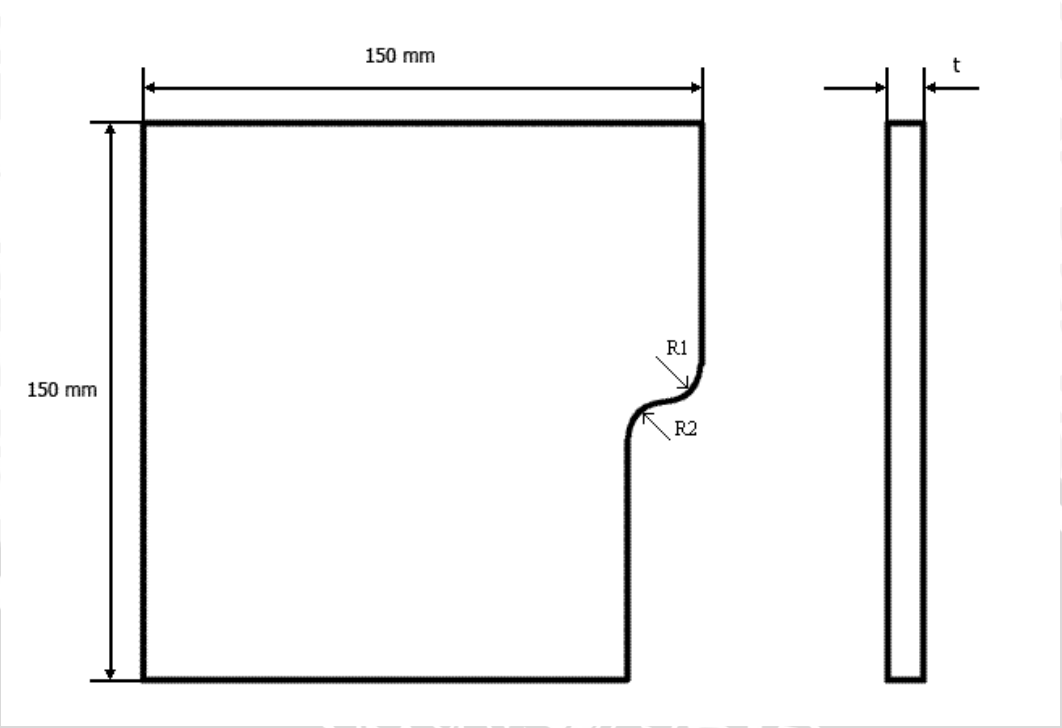
3.2 Rancangan Percobaan

Rancangan yang akan dilakukan ditabelkan seperti Tabel 3.1 sebagai berikut :

Tabel 3.1. Rancangan Percobaan.

R_2 \ R_1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	$dt_{5,5}$	$dt_{6,5}$	$dt_{7,5}$	$dt_{8,5}$	$dt_{9,5}$	$dt_{10,5}$	$dt_{11,5}$	$dt_{12,5}$	$dt_{13,5}$	$dt_{14,5}$	$dt_{15,5}$
6	$dt_{5,6}$	$dt_{6,6}$	$dt_{7,6}$	$dt_{8,6}$	$dt_{9,6}$	$dt_{10,6}$	$dt_{11,6}$	$dt_{12,6}$	$dt_{13,6}$	$dt_{14,6}$	$dt_{15,6}$
7	$dt_{5,7}$	$dt_{6,7}$	$dt_{7,7}$	$dt_{8,7}$	$dt_{9,7}$	$dt_{10,7}$	$dt_{11,7}$	$dt_{12,7}$	$dt_{13,7}$	$dt_{14,7}$	$dt_{15,7}$
8	$dt_{5,8}$	$dt_{6,8}$	$dt_{7,8}$	$dt_{8,8}$	$dt_{9,8}$	$dt_{10,8}$	$dt_{11,8}$	$dt_{12,8}$	$dt_{13,8}$	$dt_{14,8}$	$dt_{15,8}$
9	$dt_{5,9}$	$dt_{6,9}$	$dt_{7,9}$	$dt_{8,9}$	$dt_{9,9}$	$dt_{10,9}$	$dt_{11,9}$	$dt_{12,9}$	$dt_{13,9}$	$dt_{14,9}$	$dt_{15,9}$
10	$dt_{5,10}$	$dt_{6,10}$	$dt_{7,10}$	$dt_{8,10}$	$dt_{9,10}$	$dt_{10,10}$	$dt_{11,10}$	$dt_{12,10}$	$dt_{13,10}$	$dt_{14,10}$	$dt_{15,10}$
11	$dt_{5,11}$	$dt_{6,11}$	$dt_{7,11}$	$dt_{8,11}$	$dt_{9,11}$	$dt_{10,11}$	$dt_{11,11}$	$dt_{12,11}$	$dt_{13,11}$	$dt_{14,11}$	$dt_{15,11}$
12	$dt_{5,12}$	$dt_{6,12}$	$dt_{7,12}$	$dt_{8,12}$	$dt_{9,12}$	$dt_{10,12}$	$dt_{11,12}$	$dt_{12,12}$	$dt_{13,12}$	$dt_{14,12}$	$dt_{15,12}$
13	$dt_{5,13}$	$dt_{6,13}$	$dt_{7,13}$	$dt_{8,13}$	$dt_{9,13}$	$dt_{10,13}$	$dt_{11,13}$	$dt_{12,13}$	$dt_{13,13}$	$dt_{14,13}$	$dt_{15,13}$
14	$dt_{5,14}$	$dt_{6,14}$	$dt_{7,14}$	$dt_{8,14}$	$dt_{9,14}$	$dt_{10,14}$	$dt_{11,14}$	$dt_{12,14}$	$dt_{13,14}$	$dt_{14,14}$	$dt_{15,14}$
15	$dt_{5,15}$	$dt_{6,15}$	$dt_{7,15}$	$dt_{8,15}$	$dt_{9,15}$	$dt_{10,15}$	$dt_{11,15}$	$dt_{12,15}$	$dt_{13,15}$	$dt_{14,15}$	$dt_{15,15}$

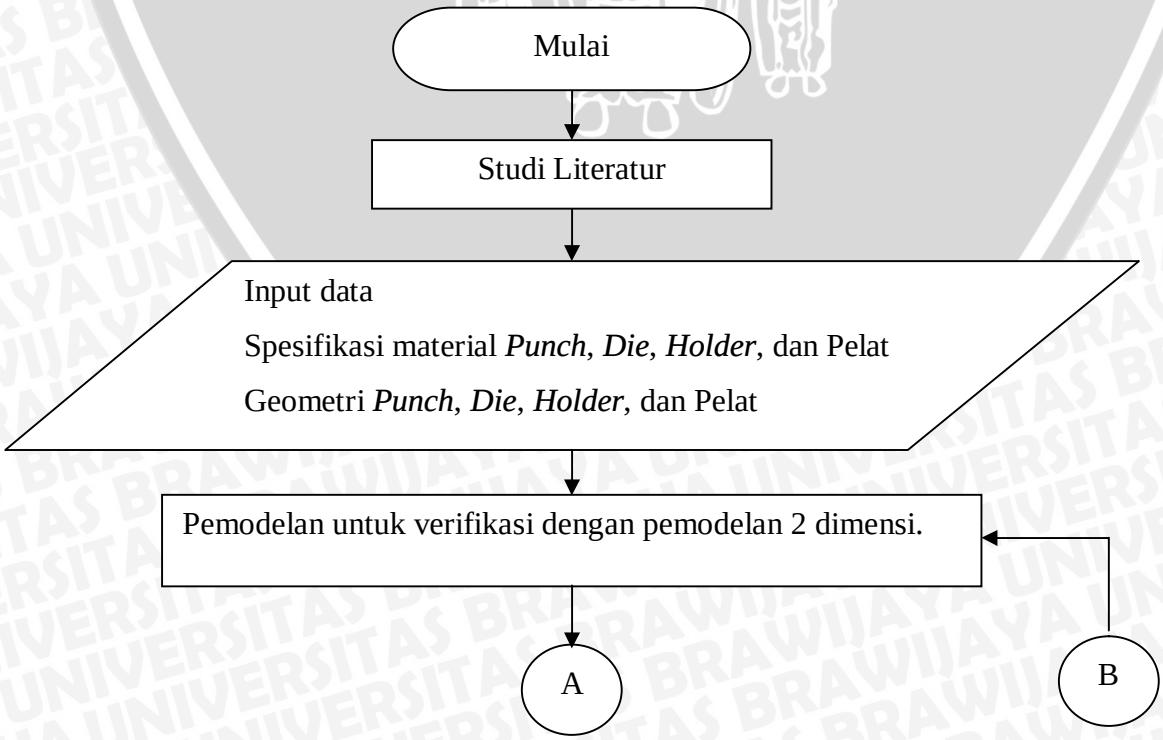
- R_1 dan R_2 adalah radius belokan pelat dalam satuan milimeter (mm) pada sisi *flange* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.1.
- $dt_{x,y}$ adalah ketidakrataan pada daerah lokal belokan (mm), dimana $_x$ adalah radius belokan 1, dan $_y$ adalah radius belokan 2.

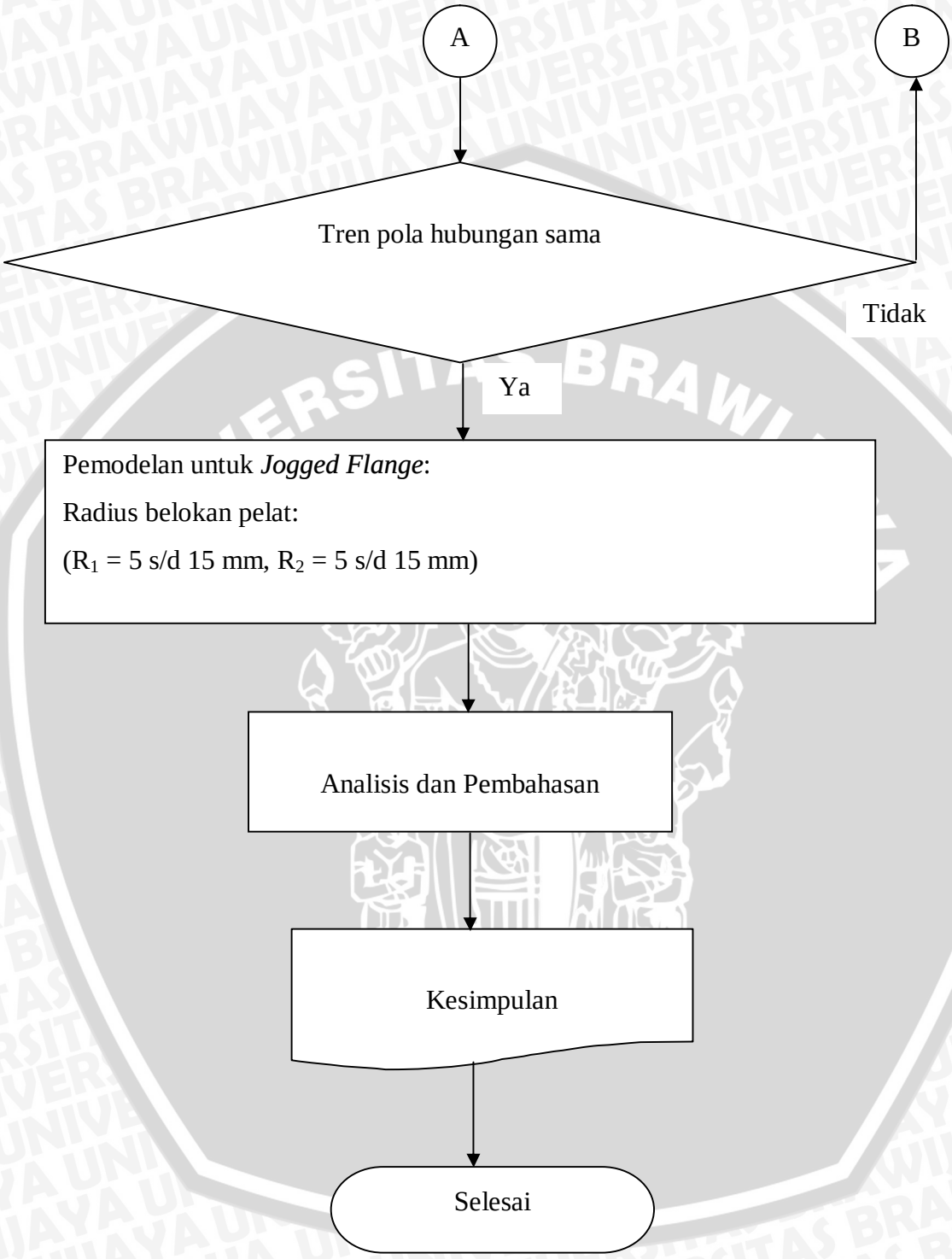


Gambar 3.1. Spesifikasi geometri pelat yang digunakan.

3.3 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian ini digambarkan pada diagram alir seperti Gambar 3.2 dibawah ini:





Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian.

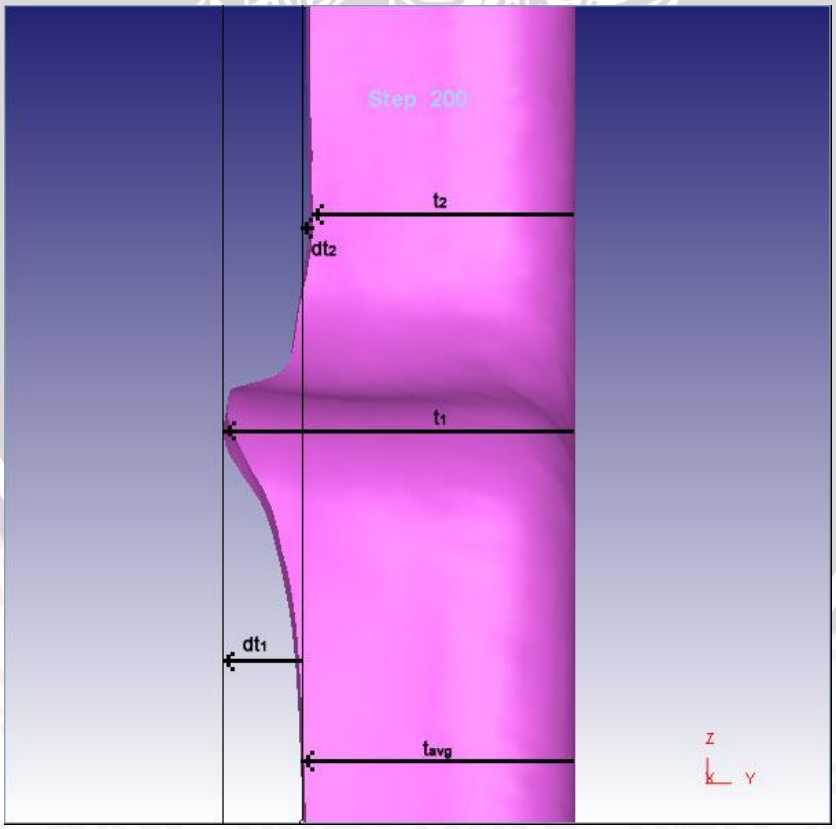
Masukan data material pada *punch*, *die*, *holder* dan pelat meliputi modulus elastisitas, *poisson's ratio*, masa jenis, dan khusus pada pelat ditambahkan data tangent modulus dan tegangan *yield*. Sedangkan data geometri adalah bentuk dan ukuran dari *punch*, *die*, *holder*, maupun pelat. Dengan masukan ini, maka komputer akan memprosesnya dan menghasilkan keluaran berupa *node* perpindahan dari pelat yang kemudian digunakan untuk mengetahui deformasi akhir yang terjadi.

3.4 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Variabel Bebas (*independent variable*)
   - Variasi radius belokan pelat (R_1 dan R_2 mulai dari 5 mm s/d 15 mm).
2. Variabel Terikat
   - Ketidakrataan ketinggian pada daerah lokal belokan (mm) (Gambar 3.3).

.



Gambar 3.3. Pengukuran ketidakrataan pada daerah lokal belokan (mm).

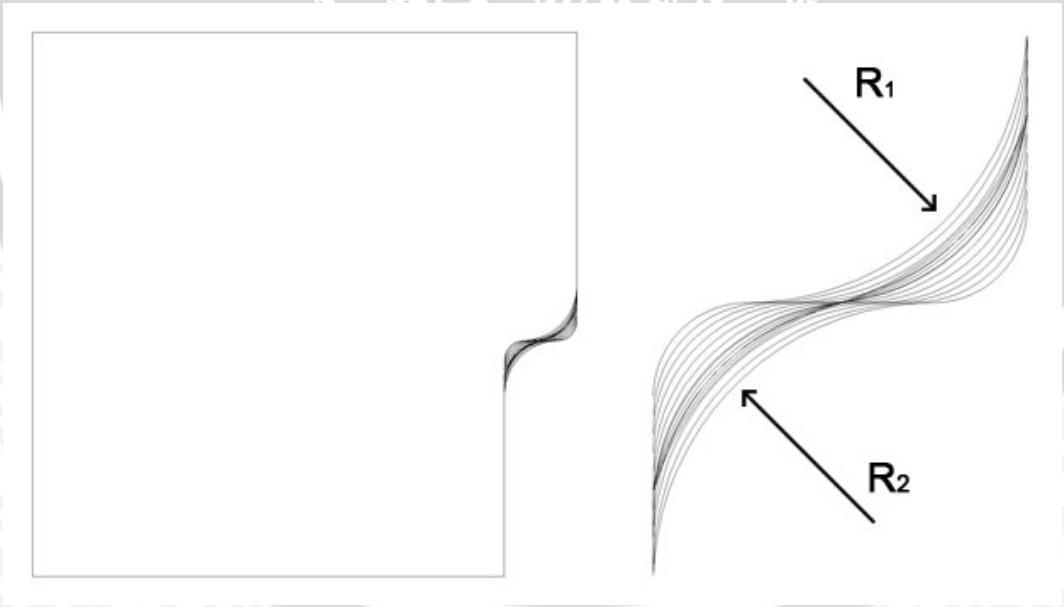
3.5 Spesifikasi Material Pelat

Karakteristik material *Aluminum Alloys* 5182-O yang digunakan untuk memodelkan pelat adalah sebagai berikut:

- Modulus Elastisitas Bahan (E) = 70 Gpa
- Angka Poisson (v) = 0.3
- Tegangan *Yield* (σ_y) = 146 Mpa
- Tangent Modulus = 3,7929 Gpa
- Massa Jenis = 2.650 kg/m^3
- *Strain Hardening Exponent* = 0,306

3.6 Geometri Pelat

Pelat yang digunakan berbentuk persegi panjang sisi 150 mm dengan dimensi pelat untuk sisi *flange* berbentuk menyerupai *dies* sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 3.4.

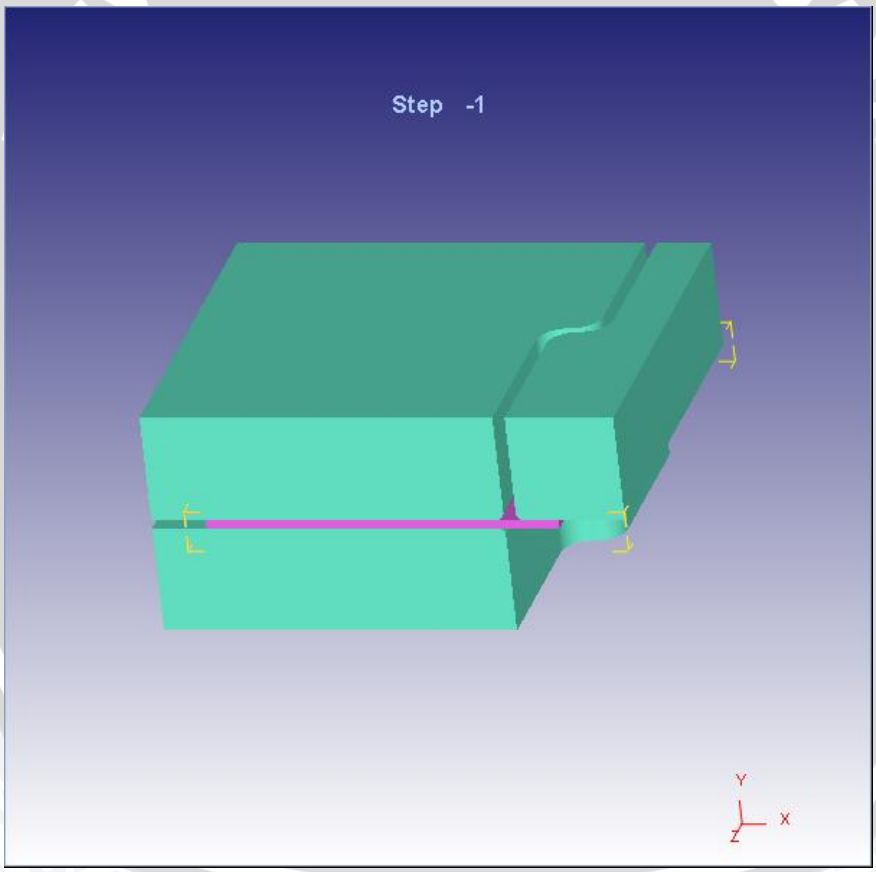


Gambar 3.4. Variasi radius pelat (R_1 dan R_2) mulai dari 5 mm s/d 15 mm.

3.7 Pemodelan

3.7.1 Pemodelan

Proses *jogged flanging* dimodelkan secara tiga dimensi karena memiliki geometri yang kompleks dan ketidaksamaan ukuran pada salah satu sumbunya. Tahap awal dari pemodelan ini dimulai dengan menggambar bagian-bagian yang terlibat dalam proses yaitu pelat, *punch*, *die* dan *holder*. Penggambaran tersebut dilakukan dengan menggunakan *software* CAD Solidwork 2005 yang nantinya disimpan dalam format stl, yang kemudian diimpor ke *software* DEFORM-3D. sehingga didapatkan hasil seperti pada Gambar 3.5.

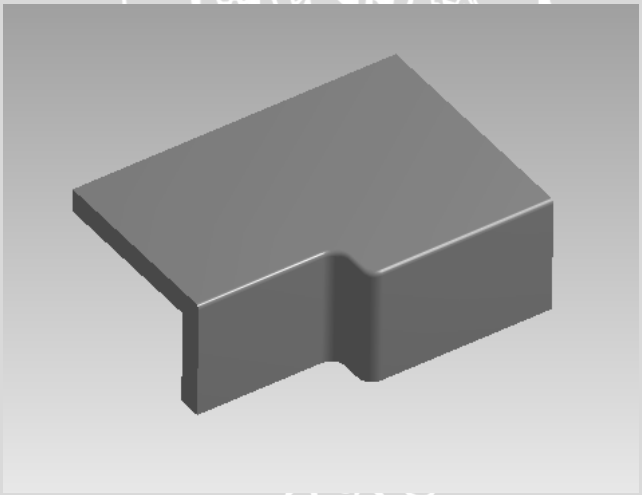


Gambar 3.5. Pemodelan proses *jogged flanging*.

Tahap berikutnya adalah pemilihan data material, *meshing*, *movement* untuk *primary die* yaitu *punch*. Material pelat menggunakan material *aluminum Alloys* 5182-O dengan model *elasto-plastic*, sedangkan untuk *punch*, *die* dan *holder* dimodelkan

sebagai material *rigid*. *Object positioning* dilakukan untuk menset posisi pelat, *punch*, *die* dan *holder* yang ketika diimpor dari file CAD masih belum sesuai kedudukannya, dengan menggunakan fasilitas *offset-distance vector*. *Meshing* dilakukan pada pelat dengan *setting* ukuran sejumlah 50000 elemen. Penetapan *movement* pada *punch* sebagai *primary die* bertujuan untuk memberikan pergerakan berupa kecepatan. Tipe kontak yang dipilih adalah *shear* pada fasilitas *inter-object data definition*, dengan nilai koefisien gesek sebesar 0,125 yang biasa digunakan dalam proses *flanging*. *Running* dilakukan setelah sebelumnya menset jumlah *step* dan kriteria *stop* program pada fasilitas *simulation control*.

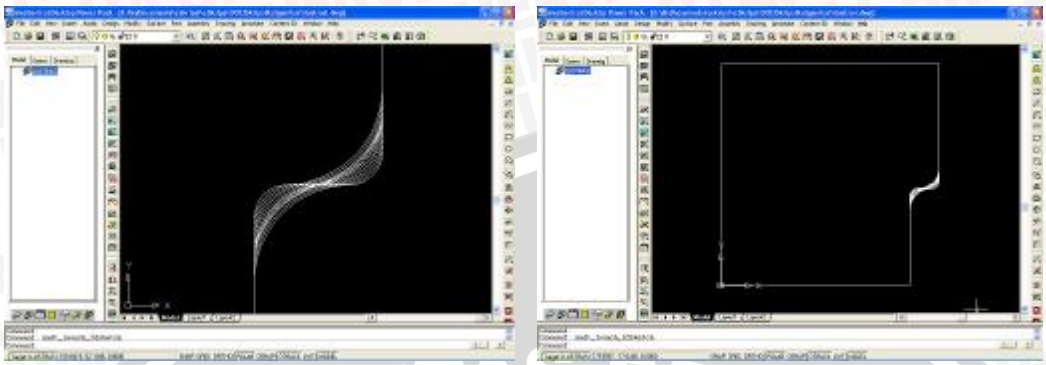
Sedang bentuk produk akhir yang diharapkan adalah seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Bentuk produk akhir.

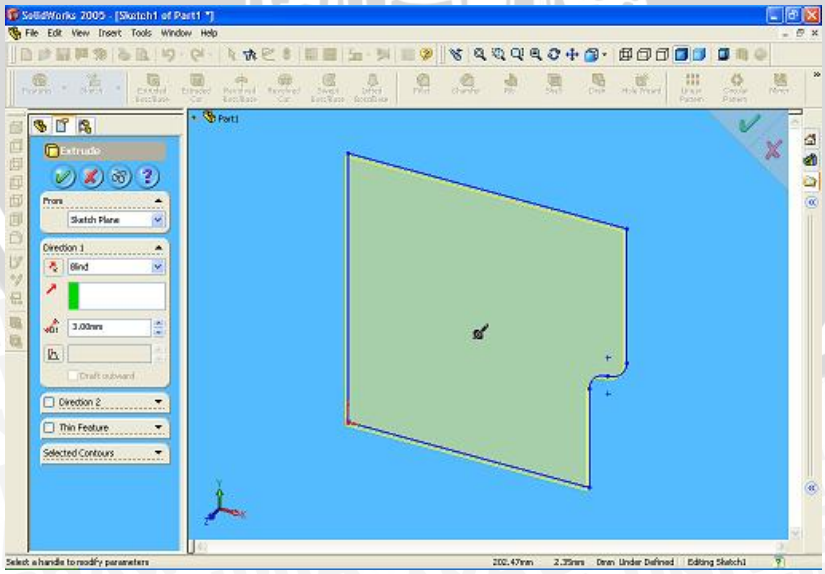
3.7.2 Langkah Langkah Pemodelan

Proses *jogged flanging* dimodelkan secara tiga dimensi karena memiliki bentuk yang kompleks. Tahap awal pemodelan ini adalah dengan menggambar *punch, die,* dan *holder*. Kemudian pelat benda kerja divariasikan untuk radius belokan baik R_1 maupun R_2 dengan menggunakan *software* Mechanical Desktop 6 Power Pack secara dua dimensi dan di gambar pada bidang *xy* (Gambar 3.7).



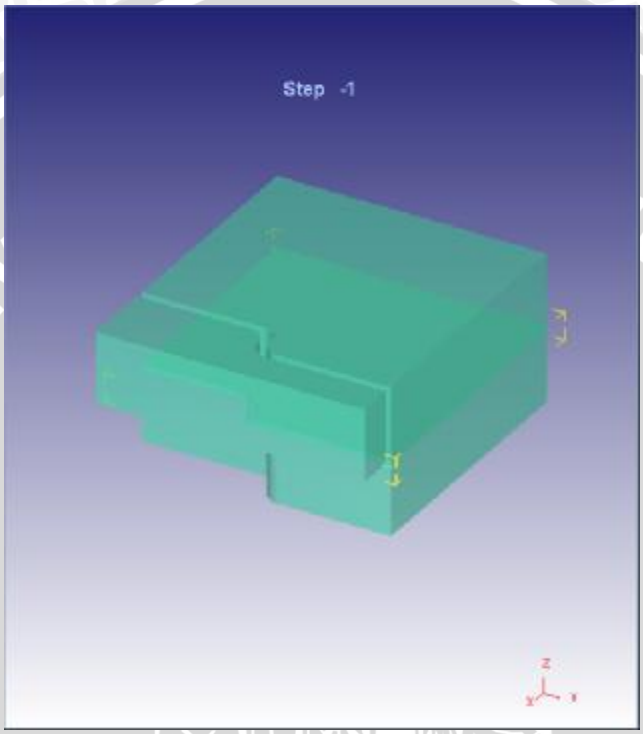
Gambar 3.7. Variasi radius R_1 dan R_2 pada Mechanical Desktop 6 Power Pack.

Selanjutnya gambar disimpan dalam format DWG dan diimpor ke *software* SolidWork 2005 sebagai *sketch* dua dimensi. Di *software* SolidWork 2005, sketch dua dimensi untuk *punch*, *die*, dan *holder* di *extrude* setebal 40 mm ke arah sumbu *z* positif, dan diberi *feature fillet* sebesar 3 mm pada sisi yang mengalami kontak dengan pelat benda kerja. Sedangkan pada pelat benda kerja masing-masing di *extrude* sebesar 3 mm ke arah sumbu *z* positif (Gambar 3.8) dan selanjutnya semuanya disimpan dalam format STL agar geometri bisa dibaca oleh *software* DEFORM 3D.



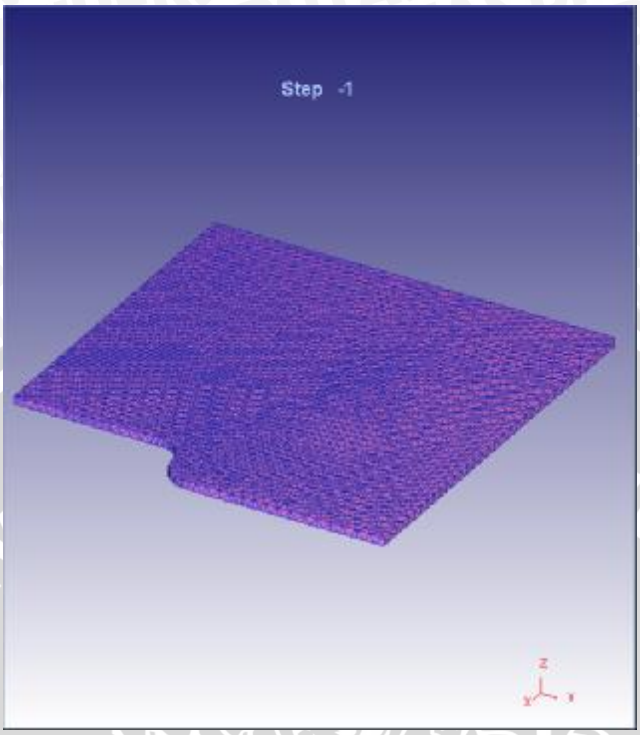
Gambar 3.8. *Sketch* di *extrude* setebal 3 mm arah sumbu *z* pada SolidWork 2005.

Dari DEFORM 3D, pertama memilih Deform-3D *Pre* yang kemudian memasukkan geometri satu persatu dimulai dari benda kerja, *punch*, *die*, dan *holder* (Gambar 3.9).



Gambar 3.9. Pemodelan proses *jogged flange* menggunakan DEFORM 3D.

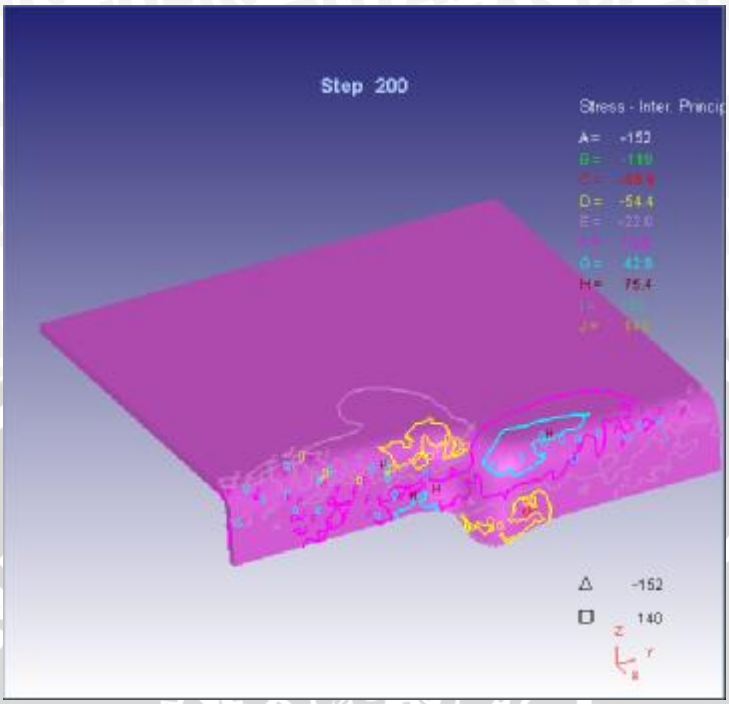
Pelat benda kerja dimodelkan sebagai material *elasto-plastic*, sedang yang lainnya sebagai material *rigid*. Tahap berikutnya adalah pemilihan *properties* benda kerja. Pertama menentukan *meshing*/jumlah elemen yaitu sebesar 50.000 elemen (Gambar 3.10).



Gambar 3.10. *Meshing* keseluruhan pada benda kerja.

Pemilihan material *Aluminum Alloys* 5182-O dari *library* untuk pelat benda kerja. Selanjutnya menentukan arah *movement* untuk *punch* yaitu ke arah sumbu *z* negatif dengan kecepatan konstan sebesar 1 mm/s. Pembebanan *punch* dimodelkan dengan kecepatan pergerakannya yang diperoleh dari tabel hubungan antara waktu dan *displacement*. Koefisien gesek yang dipakai antara benda kerja dengan *punch*, *die*, dan *holder* adalah 0,125 yang biasa digunakan dalam proses *flanging*.

Keluaran yang didapat dari DEFORM-3D *Post* adalah *displacement*, distribusi tegangan, regangan, dll (Gambar 3.11). Koordinat *displacement* pada tiap-tiap node digunakan untuk mengetahui ketinggian maksimal/minimal pada sisi *flange* hasil produk akhir.



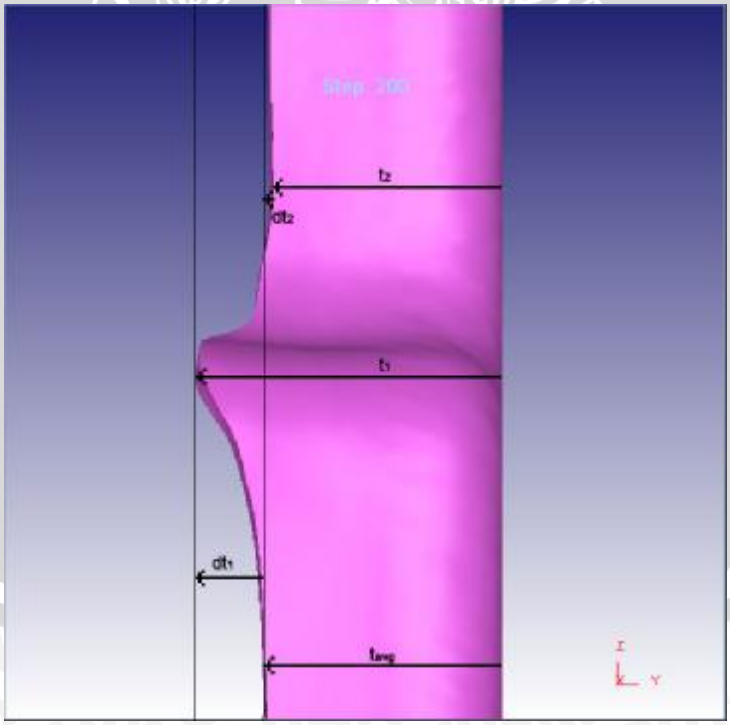
Gambar 3.11. Contoh keluaran DEFORM-3D *Post*, Tegangan utama pada kontur permukaan banda kerja.

BAB IV
DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data

Keluaran yang didapat dari DEFORM-3D *Post* adalah *deformation*, distribusi tegangan, regangan, laju regangan dan kemungkinan kerusakan (*damage*) yang terjadi. Koordinat *deformation* pada beberapa *node* diposisi *flange* digunakan untuk menggambarkan bentuk pelat setelah pembebanan penuh, sehingga ketidakrataan ketinggian pada sisi *flange* yang terjadi bisa diketahui.

Pada hasil pengukuran sisi *flange*, terjadi ketidakrataan ketinggian sisi *flange* seperti terlihat pada Gambar 4.1, dengan 2 kondisi yaitu pada bagian 1 (t_1), ketinggian sisi *flange* lebih besar dari seharusnya yang selanjutnya kelebihan ketinggian pada sisi *flange* bagian 1 tersebut dinamakan dt_1, sedangkan pada bagian 2 (t_2), ketinggian sisi *flange* lebih kecil dari seharusnya yang selanjutnya kekurangan ketinggian pada sisi *flange* bagian 2 tersebut dinamakan dt_2.



Gambar 4.1. Pengukuran ketidakrataan pada daerah lokal belokan (mm).

Dengan memvariasikan radius belokan pelat 1 dan radius belokan pelat 2 dapat diperoleh hasil seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 berikut :

Tabel 4.1 Hasil pengukuran ketidakrataan dt_1 (mm).

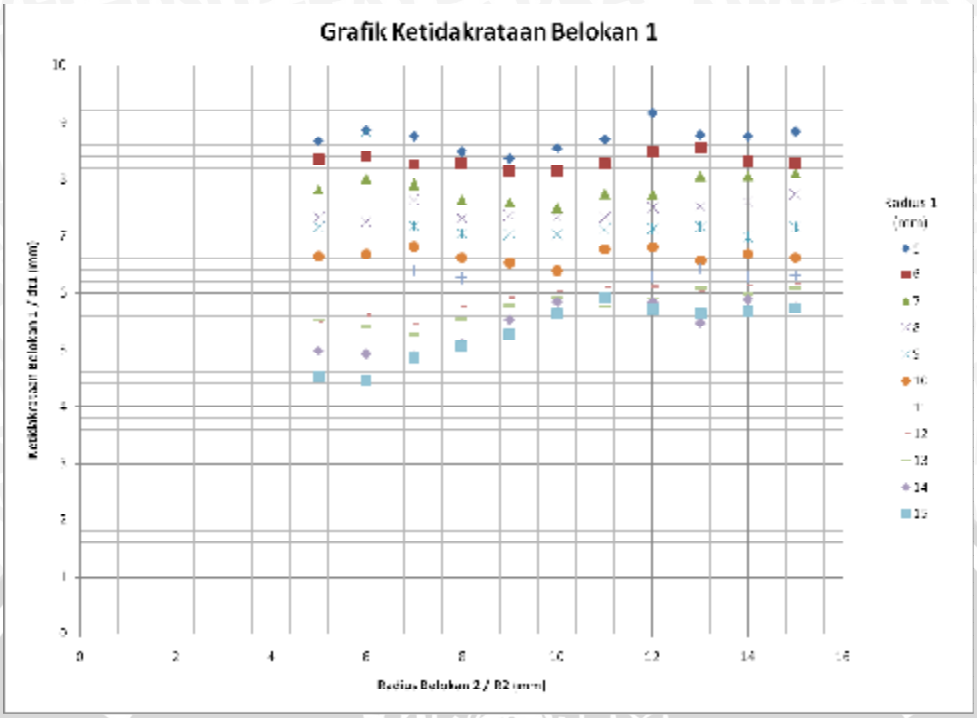
R2 \ R1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	8.6752	8.3532	7.823	7.3278	7.1564	6.6429	6.1909	5.5033	5.5204	4.9811	4.5343
6	8.873	8.3989	8.0088	7.258	8.8532	6.6803	6.1313	5.6101	5.4042	4.9298	4.4517
7	8.7671	8.2647	7.9081	7.6385	7.18	6.8211	6.3856	5.4548	5.2689	4.8803	4.865
8	8.4881	8.2799	7.6269	7.3146	7.043	6.6235	6.2558	5.7593	5.543	5.1151	5.0659
9	8.3694	8.1572	7.5893	7.37	7.0312	6.5291	6.1157	5.9144	5.772	5.5271	5.2595
10	8.55	8.1456	7.4957	7.3402	7.0243	6.3801	6.5565	6.0411	5.9134	5.843	5.6308
11	8.7065	8.2675	7.7488	7.326	7.1158	6.7758	6.3871	6.1034	5.7561	5.9274	5.9195
12	9.1691	8.4823	7.7288	7.5095	7.1275	6.8093	6.289	6.1106	5.8819	5.8353	5.7188
13	8.7861	8.5576	8.0482	7.5175	7.1633	6.5707	6.4259	6.0446	6.0784	5.4675	5.6361
14	8.7642	8.3199	8.0498	7.6077	6.9863	6.6853	6.2771	6.1228	5.9829	5.8837	5.6702
15	8.8536	8.2991	8.098	7.7418	7.1537	6.6278	6.3007	6.1624	6.0821	5.7386	5.7267

Tabel 4.2 Hasil pengukuran ketidakrataan dt_2 (mm).

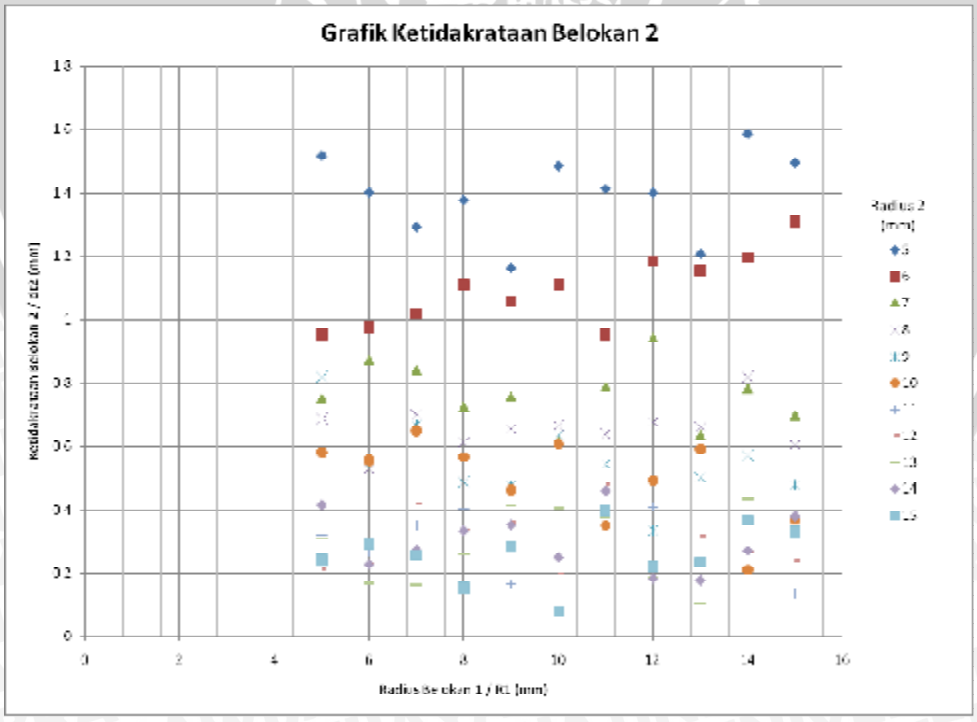
R2 \ R1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	1.5178	1.4025	1.2926	1.3781	1.1614	1.4868	1.414	1.401	1.2068	1.5849	1.497
6	0.9556	0.9752	1.0185	1.11	1.055	1.111	0.9552	1.183	1.1544	1.1963	1.3116
7	0.7523	0.874	0.8421	0.7259	0.7577	0.6168	0.791	0.9462	0.635	0.7842	0.6978
8	0.6895	0.5295	0.7015	0.6136	0.6562	0.6665	0.6406	0.6777	0.6623	0.822	0.6047
9	0.8206	0.5477	0.6692	0.4866	0.476	0.6358	0.5435	0.3351	0.5012	0.571	0.4787
10	0.5791	0.5545	0.6487	0.5651	0.4626	0.606	0.3518	0.4912	0.5911	0.2105	0.3729
11	0.3222	0.2706	0.353	0.4061	0.1665	0.4795	0.3288	0.4116	0.3154	0.4486	0.1357
12	0.2113	0.2288	0.4206	0.3386	0.3651	0.1997	0.4788	0.2341	0.3181	0.2695	0.2405
13	0.3097	0.1677	0.163	0.2591	0.4157	0.4092	0.377	0.1865	0.1038	0.4356	0.382
14	0.4178	0.228	0.2736	0.3352	0.3538	0.2509	0.4604	0.1834	0.1782	0.272	0.3809
15	0.2435	0.2937	0.2599	0.1548	0.2842	0.0809	0.401	0.2218	0.235	0.3667	0.3322

Tabel di atas didapatkan dari perhitungan beda ketinggian antara ketinggian rata-rata sisi *flange* dengan ketinggian sisi *flange* pada masing-masing radius belokan, baik radius belokan 1 maupun radius belokan 2. Tabel data ketinggian rata-rata sisi *flange*, ketinggian sisi *flange* pada belokan 1 maupun ketinggian sisi *flange* pada belokan 2 bisa dilihat pada Lampiran 1.

Adapun grafik yang menampilkan hubungan radius belokan pelat terhadap ketidakrataan ketinggian sisi *flange* pada variasi radius belokan pelat ditampilkan pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 di bawah ini :



Gambar 4.2. Grafik ketidakrataan belokan 1, hubungan radius belokan 2 terhadap ketidakrataan ketinggian pada belokan 1.



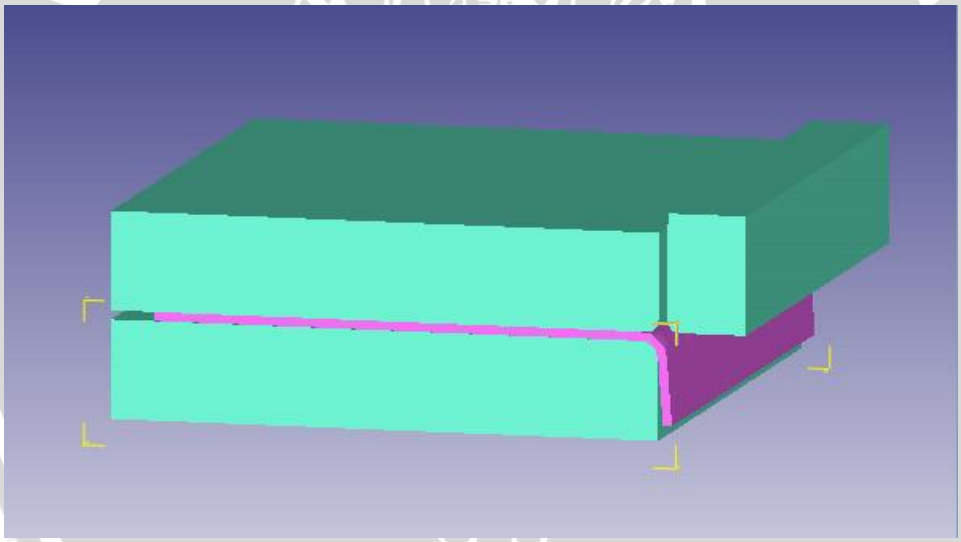
Gambar 4.3. Grafik ketidakrataan belokan 2, hubungan radius belokan 1 terhadap ketidakrataan ketinggian pada belokan 2.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Verifikasi Hasil Pemodelan

Software DEFORM tidak menyediakan fasilitas yang menampilkan secara langsung besar sudut penyimpangan itu sehingga digunakanlah perhitungan dengan cara menggunakan bantuan *software* CAD.

Verifikasi dilakukan dengan membandingkan model dua dimensi pada penelitian sebelumnya dengan model tiga dimensi pada penelitian ini. Parameter proses yang dipilih adalah radius *die* 3 mm, tebal pelat 2,3 mm dan panjang *flange* 20 mm (Gambar 4.4). Hasil simulasi dengan model tiga dimensi (6,829º) sedikit berbeda dengan hasil model dua dimensi (6,151º). Hal ini dikarenakan pada model dua dimensi tebal pada arah *z* diabaikan (asumsi *plain strain*), sedangkan pada model tiga dimensi objek memiliki harga pada ketebalan arah *z.* Toleransi penyimpangan dari verifikasi sebesar 5,83 % sehingga masih cukup *valid*.



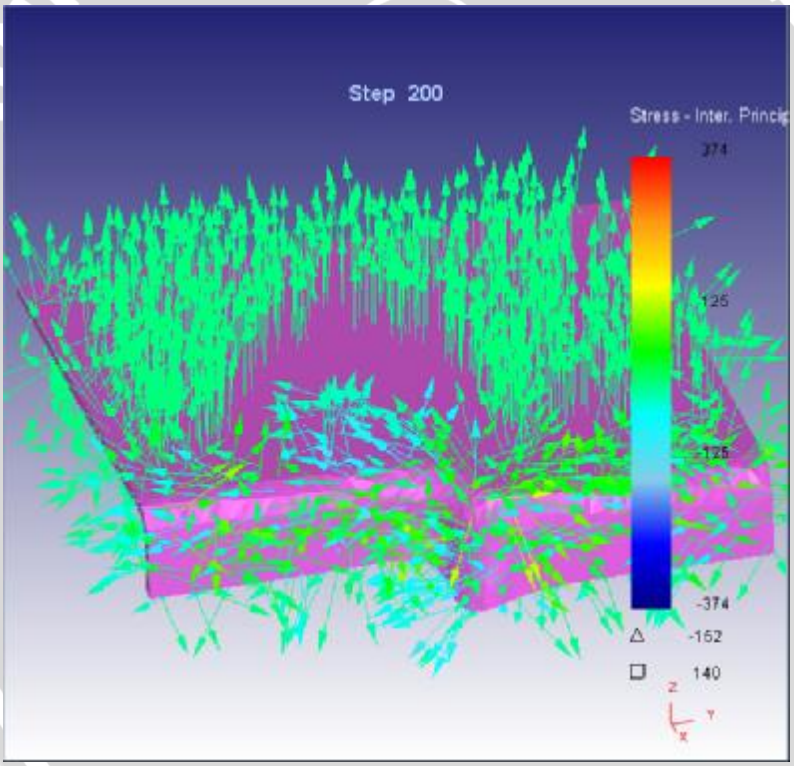
Gambar 4.4. Verifikasi model tiga dimensi pada *straight flange.*

4.2.2 Pengaruh Radius Belokan Terhadap Ketidakrataan Sisi Flange

Dari grafik ketidakrataan belokan 1 (Gambar 4.2) terlihat bahwa nilai ketidakrataan ketinggian minimum dicapai oleh radius R_1 = 15 mm dengan radius pada belokan 2 (R_2) = 6 mm dan ketidakrataan ketinggian maksimum dicapai oleh radius R_1 = 5 mm dengan radius pada belokan 2 (R_2) = 12 mm. Sedangkan pada grafik ketidakrataan belokan 2 (Gambar 4.3), nilai ketidakrataan ketinggian minimum dicapai

oleh radius R_2 = 15 mm dengan radius pada belokan 1 (R_1) = 10 mm dan ketidakrataan ketinggian maksimum dicapai oleh radius R_2 = 5 mm dengan radius pada belokan 1 (R_1) = 14 mm. Pada grafik ketidakrataan belokan 1, yang lebih mempengaruhi nilai ketidakrataan ketinggian belokan 1 (dt_1) adalah besar radius belokan 1 (R_1), karena secara geometri ukuran R_1 secara langsung mempengaruhi besar deformasi yang terjadi pada daerah lokal belokan 1. Begitu juga sebaliknya dengan pada grafik ketidakrataan belokan 2.

Pada pembengkokan pelat bentuk *jogged flange*, dibagian belokan cenderung mengalami pemanjangan maupun pengurangan ketinggian *flange*. Kecenderungan tersebut disebabkan karena kedwisumbuan tegangan yang terjadi pada belokan radius pelat (Gambar 4.5).



Gambar 4.5. Kedwisumbuan tegangan yang terjadi pada radius belokan pelat.

Dari Gambar 4.5 di atas, bisa kita lihat bahwa pada radius belokan pelat 1, vektor tegangan utama yang terjadi mengalami kecenderungan yang lebih besar ke arah bawah. Oleh karena itu pada bagian radius belokan pelat 1 mengalami kelebihan ketinggian arah bawah, karena arah tegangan utama secara langsung mempengaruhi

arah gerak dari deformasi yang terjadi. Begitu juga pada radius belokan pelat 2, dimana vektor tegangan utama yang terjadi mengalami kecenderungan yang lebih besar ke arah samping (sumbu *y*). Dengan adanya arah tegangan utama ke samping, maka pada radius belokan 2 mengalami kekurangan ketinggian. Ini juga disebabkan karena arah gerak deformasi yang terjadi mengalami kecenderungan ke samping. Data tabel tegangan pada ujung *flange* untuk radius belokan pelat 1 bisa dilihat pada Lampiran 2.

Springback yang terjadi pada proses pembengkokan pelat berpengaruh pada bentuk hasil akhir. Untuk mendapatkan hasil produk akhir seperti yang diinginkan, harus diminimalisir terjadinya *springback*. Untuk meminimalkan terjadinya *springback*, ada beberapa cara, diantaranya adalah dengan memperkecil besar radius *die*, dan memperkecil lebar gap. Untuk besar radius *die* yang diijinkan adalah antara 2 kali sampai 14 kali tebal *sheet* (Eary, Donald F., 1974 : 113) dengan gap *clearance* adalah $U_D = t + 0{,}02\sqrt{10t}$ (Kurt Lange, 1985). Radius *die* yang dipakai dalam penelitian ini adalah 3 mm, dan lebar gap yang dipakai adalah 4,5 mm.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian tentang optimasi dimensi awal pelat pada proses pembengkokan bentuk *jogged flange* dengan simulasi tiga dimensi, dapat diambil kesimpulan bahwa ketidakseragaman deformasi yang terjadi pada proses *bending* bentuk *jogged flange* diakibatkan oleh terjadinya kedwisumbuan tegangan pada radius belokan pelat. Perbedaan ketidakrataan ketinggian pada sisi *flange*, dipengaruhi oleh besarnya tegangan utama yang terjadi pada sisi *flange*. Dimana besar tegangan utama pada sisi belokan memiliki kecenderungan lebih besar dibanding pada sisi yang rata. Dengan memvariasikan dimensi awal bahan baku pelat, bisa dilihat kecenderungan arah dan besar tegangan yang terjadi pada sisi *flange*. Nilai ketidakrataan ketinggian minimum pada belokan 1 dicapai oleh radius R_1 = 15 mm dengan radius pada belokan 2 (R_2) = 6 mm dan ketidakrataan ketinggian maksimum pada belokan 1 dicapai oleh radius R_1 = 5 mm dengan radius pada belokan 2 (R_2) = 12 mm. Untuk nilai ketidakrataan ketinggian minimum pada belokan 2 dicapai oleh radius R_2 = 15 mm dengan radius pada belokan 1 (R_1) = 10 mm dan ketidakrataan ketinggian maksimum pada belokan 2 dicapai oleh radius R_2 = 5 mm dengan radius pada belokan 1 (R_1) = 14 mm.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh variasi dimensi *dies*, baik *punch*, *holder*, maupun *die*.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh gaya *blankholder* terhadap ketidakrataan ketinggian sisi *flange* yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

Cao, Jian; 2000 : *Effective Models for Prediction of Springback in Flanging*; Journal of Engineering Materials and Technology; Vol. 123 No. 4, pp.456-461, Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, IL.

Cao, Jian, and Buranathiti, Thaweepat; 2004: *An Effective Analytical Model for Springback Prediction in Straight Flanging Processes*; Int. J. Materials and Product Technology; Vol. 21, Nos. 1/2/3, Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, IL.

Kulkarni, Pravin, and Prabhakar, Shashikiran; 2003: *Influence of the Effect of Strain Rates on Springback in Aluminum 2024 (ISO $AlCu_4Mg_1$)*; 4th European LS-DYNA Users Conference.

Dieter, George E.; 1992 : *Metalurgi Mekanik*; Jilid II; Edisi-3; Terjemahan Sriati Djaprie; Erlangga, Jakarta.

Marciniak, Z; 2002 : *Mechanics of Sheet Metal Forming*; Butterworth-Heinemann, London.

Eary, Donald F. and Reed, E. A.; 1974 : *Techniques of Pressworking Sheet Metal*; An Engineering Approach to Die Design, 2nd ed.

Choiron, Moch. Agus, dan Widiarko, Kiki Amban, 2006 : *Simulasi Pengaruh Radius Die dan Tebal Pelat terhadap Springback pada Proses Straight Flanging Aluminum Paduan*; 1st Seminar on Application and Research in Industrial Technology (SMART), Yogyakarta, 27 April 2006.

Choiron, Moch. Agus, dan Setyabudi, S.A, 2007: *Simulasi 3 Dimensi Pengaruh Radius Die dan Tebal Pelat Terhadap Springback pada Proses Pembengkokan Bentuk Jogged Flange*; Jurnal Rekayasa Mesin / Volume 3 No. 1 – Februari 2007.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data ketidakrataan ketinggian sisi *flange*.

Tabel ketinggian rata-rata sisi *flange* (mm) :

R2 \ R1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	-20.0793	-19.9729	-19.951	-20.0982	-20.0384	-20.0233	-19.9944	-20.0323	-20.0026	-20.0375	-20.1434
6	-19.7083	-19.9262	-19.8671	-19.9798	-20.0936	-19.9251	-20.0677	-20.1299	-20.0124	-20.0435	-20.0949
7	-20.0187	-19.896	-20.0374	-19.8675	-19.9501	-19.8875	-20.0021	-20.1572	-19.9877	-20.0607	-19.9471
8	-20.0896	-20.0006	-20.0256	-20.0326	-20.1265	-20.07	-20.0443	-19.977	-20.0127	-20.073	-19.8453
9	-20.2936	-20.056	-20.1792	-20.0353	-20.0109	-20.0678	-20.0035	-19.919	-19.9142	-19.9759	-19.8876
10	-20.0952	-20.041	-20.247	-20.0256	-19.9135	-20.088	-19.9093	-20.0748	-19.8968	-19.8071	-19.8538
11	-19.982	-19.9268	-19.9281	-20.0943	-19.845	-20.173	-19.9558	-20.0524	-19.9461	-20.0414	-19.8628
12	-20.3186	-19.923	-20.068	-19.9534	-20.0567	-19.8897	-19.9901	-19.8918	-19.8333	-19.6686	-19.8786
13	-20.0377	-19.8026	-19.8561	-19.9276	-20.0282	-19.9422	-19.8586	-19.88	-19.5563	-19.9396	-19.9597
14	-20.0632	-20.0414	-20.0772	-20.1127	-19.9913	-19.8805	-20.0918	-19.7857	-19.8208	-20.3753	-19.9803
15	-20.036	-20.0043	-20.0394	-20.0071	-19.9169	-20.0014	-19.9738	-19.8926	-19.7759	-19.9116	-19.9198

Tabel ketinggian sisi *flange* pada belokan 1 (mm) :

R2 \ R1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	-28.7545	-28.3261	-27.774	-27.426	-27.1948	-26.6662	-26.1853	-25.5356	-25.523	-25.0186	-24.6777
6	-28.5813	-28.3251	-27.8759	-27.2378	-28.9468	-26.6054	-26.199	-25.74	-25.4166	-24.9733	-24.5466
7	-28.7858	-28.1607	-27.9455	-27.506	-27.1301	-26.7086	-26.3877	-25.612	-25.2566	-24.941	-24.8121
8	-28.5777	-28.2805	-27.6525	-27.3472	-27.1695	-26.6935	-26.3001	-25.7363	-25.5557	-25.1881	-24.9112
9	-28.663	-28.2132	-27.7685	-27.4053	-27.0421	-26.5969	-26.1192	-25.8334	-25.6862	-25.503	-25.1471
10	-28.6452	-28.1866	-27.7427	-27.3658	-26.9378	-26.4681	-26.4658	-26.1159	-25.8102	-25.6501	-25.4846
11	-28.6885	-28.1943	-27.6769	-27.4203	-26.9608	-26.9488	-26.3429	-26.1558	-25.7022	-25.9688	-25.7823
12	-29.4877	-28.4053	-27.7968	-27.4629	-27.1842	-26.699	-26.2791	-26.0024	-25.7152	-25.5039	-25.5974
13	-28.8238	-28.3602	-27.9043	-27.4451	-27.1915	-26.5129	-26.2845	-25.9246	-25.6347	-25.4071	-25.5958
14	-28.8274	-28.3613	-28.127	-27.7204	-26.9776	-26.5658	-26.3689	-25.9085	-25.8037	-26.259	-25.6505
15	-28.8896	-28.3034	-28.1374	-27.7489	-27.0706	-26.6292	-26.2745	-26.055	-25.858	-25.6502	-25.6465

Tabel ketinggian sisi *flange* pada belokan 2 (mm) :

R2 \ R1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	-18.5615	-18.5704	-18.6584	-18.7201	-18.877	-18.5365	-18.5804	-18.6313	-18.7958	-18.4526	-18.6464
6	-18.7527	-18.951	-18.8486	-18.8698	-19.0386	-18.8141	-19.1125	-18.9469	-18.858	-18.8472	-18.7833
7	-19.2664	-19.022	-19.1953	-19.1416	-19.1924	-19.2707	-19.2111	-19.211	-19.3527	-19.2765	-19.2493
8	-19.4001	-19.4711	-19.3241	-19.419	-19.4703	-19.4035	-19.4037	-19.2993	-19.3504	-19.251	-19.2406
9	-19.473	-19.5083	-19.51	-19.5487	-19.5349	-19.432	-19.46	-19.5839	-19.413	-19.4049	-19.4089
10	-19.5161	-19.4865	-19.5983	-19.4605	-19.4509	-19.482	-19.5575	-19.5836	-19.3057	-19.5966	-19.4809
11	-19.6598	-19.6562	-19.5751	-19.6882	-19.6785	-19.6935	-19.627	-19.6408	-19.6307	-19.5928	-19.7271
12	-20.1073	-19.6942	-19.6474	-19.6148	-19.6916	-19.69	-19.5113	-19.6577	-19.5152	-19.3991	-19.6381
13	-19.728	-19.6349	-19.6931	-19.6685	-19.6125	-19.533	-19.4816	-19.6935	-19.4525	-19.504	-19.5777
14	-19.6454	-19.8134	-19.8036	-19.7775	-19.6375	-19.6296	-19.6314	-19.6023	-19.6426	-20.1033	-19.5994
15	-19.7925	-19.7106	-19.7795	-19.8523	-19.6327	-19.9205	-19.5728	-19.6708	-19.5409	-19.5449	-19.5876

Lampiran 2. Data tegangan pada ujung *flange*.

Tabel tegangan pada ujung *flange* radius belokan pelat 1 (N/mm^2) :

R1 / R2	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
5	-14.4	-13.9	-31.4	-47.3	-38.1	-44.4	-28.9	-64.7	-12.8	-36.5	-78.7
6	-25	-26.1	-3.62	-35.9	-40.9	-38.6	-43.7	-45.2	-85.5	-62.1	-57.8
7	-18	-39.4	-24.4	-10.9	-35.4	-49.8	-30.6	-43	-59.6	-78.5	-63.8
8	-32.6	-28	-15.1	-14.3	-29.1	-52.6	-50.1	-34	-93.4	-42.4	-70.6
9	-38.4	-40.4	-48.9	-26.5	-57	-41.4	-14.5	-12.8	-68.1	-66.6	-56.5
10	-48.6	-27.6	-15.5	-4.08	-40.1	-15.2	-32.1	-37.4	-57.3	-14.6	-36
11	-39.9	-4.58	-27	-29.1	-44.5	-30.7	-39.6	-32.1	-43.8	-35.2	-33.8
12	-16.7	-2.86	-11.3	-23.7	-8.91	-54.8	-40.3	-41.4	-23.1	-25.5	-48.1
13	-15.6	-24.4	-19	-15.4	-4.67	-38.1	-23.5	-27	-23.3	-37.6	-53.8
14	-35.4	-20.8	-8.85	-15.9	-29	-17.1	-26.8	-40.4	-51.2	-28	-38.9
15	-31.4	-19.1	-30	-23.6	-32.3	-47.9	-74.4	-58.2	-36.5	-67.1	-40.1