

ANALISIS PENGARUH *RADIUS DIES* TERHADAP *SPRINGBACK* LOGAM LEMBARAN *STAINLESS-STEEL* PADA PROSES BENDING HIDROLIK *V-DIE*

Sukarman^{1,*}, Choirul Anwar¹, Nana Rahdiana², Khoirudin³, Anwar Ilmar Ramadhan⁴

¹Program Studi Teknik Mesin, STT Wastukencana, Jl. Cikopak No. 53 Sadang, Purwakarta Jawa Barat 41151

²Program Studi Teknik Industri, Universitas Buana Perjuangan, Jl. H.S. Ronggowaluyo, Karawang, Jawa Barat 41361

³Program Studi Teknik Mesin, Universitas Buana Perjuangan, Jl. H.S. Ronggowaluyo, Karawang, Jawa Barat 41361

⁴Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27 Jakarta 10510

*Email: sukarman@stt-wastukencana.ac.id

Diterima: 12 Desember 2019

Direvisi: 04 Maret 2020

Disetujui: 07 April 2020

ABSTRAK

Proses bending merupakan salah satu proses pembentukan material (metal forming) banyak digunakan di proses manufaktur. Penggunaan radius dies bending dan penyetingan sudut bending yang tidak tepat akan berdampak pada terjadinya kegagalan material dan dimensi. Penelitian ini menggunakan ekperimental dengan menggunakan material Stainless-Steel (SUS 304) dengan tebal 1.0 mm yang memenuhi standar ASTM A-240. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan parameter sudut bending 90°, yang divariasikan pada radius dies sebesar 1.0 mm dan 1.3 mm. Analisis pengaruh *springback* telah dilakukan dengan mengatur sudut bending secara hitungan teoritis dan membandingkannya dengan pengaturan sudut aktual. Proses selanjutnya dilakukan analisis dan evaluasi untuk mencapai sudut standar $90^\circ \pm 30''$. Proses bending yang menggunakan sudut bending 93°45'' dan 92°30'' berturut-turut menghasilkan nilai *springback* sebesar 0.98 dan 0.97. Sudut benda kerja yang dihasilkan pada saat penyetingan sudut bending 92°30'' dan 93°45'' berturut-turut adalah 91°30'' dan 90°. Dari data ini didapatkan bahwa proses bending menggunakan sudut 92°,30'' mendapatkan hasil yang lebih presisi dibandingkan dengan sudut bending teoritis 93°45''.

Kata kunci: Pembentukan logam, radius bending, faktor *springback*, dies dan Sudut bending

ABSTRACT

The bending process is one of the material forming processes widely used in the manufacturing process. The use of bending dies radius and incorrect bending angle settings will effect to material and dimensions failures. This study used an experimental method using Stainless Steel (SUS 304) with a thickness of 1.0 mm that met to ASTM A-240 standards. This research was conducted using 90° bending angle limits, which varied in dies radius of 1.0 mm and 1.3 mm. *Springback* effect analysis has been carried out by adjusting the bending angle theoretically and comparing it with the real angle adjustment. Furthermore, it has been analyzed and evaluated to reach a standard angle of $90^\circ \pm 30''$. The bending process that used 93°45'' and 92°30'' bending angles produces *springback* values of 0.98 and 0.97, respectively. The workpiece angles produced when setting bending angles of 92°30'' and 93°45'' are 91°30'' and 90°, respectively. From this data it was found that the bending process uses an angle of 92°30'' gets more precise results compared to the theoretical bending angle of 93°45''.

Keywords: Metal forming, bending radius, *Springback* factor, dies and Bending Engel

PENDAHULUAN

Teknologi pengolahan lembaran logam (*sheet metal*) merupakan salah satu teknologi manufaktur paling awal yang dikembangkan dalam industri manufaktur (Lin and Chang 1996). Seiring dengan pesatnya perkembangan industri manufaktur, teknologi pemrosesan lembaran logam telah mengalami peningkatan terus menerus. Akibatnya, produk lembaran logam telah banyak digunakan di semua sektor industri. Penekukan (*bending*) sheet metal merupakan salah satu proses pembentukan logam (*metal forming*). Banyak pendekatan penekukan logam telah dikembangkan dalam menanggapi tuntutan beragamnya bentuk, spesifikasi plat, dan meningkatnya toleransi pembentukan logam. Proses pembentukan lembaran logam melibatkan kombinasi lentur elastis-plastik dan deformasi regangan benda kerja (Palaniswamy, Ngaile, and Altan 2004).

Berdasarkan perlakuan suhu, metode pembentukan logam dibagi dalam dua proses yaitu pembentukan dingin (*cold working*) yang dilakukan pada suhu kamar dan pembentukan panas (*hot working*) dengan temperatur tinggi. Proses pembentukan dingin dilakukan tanpa pemanasan benda kerja. Pembentukan dingin merupakan pembentukan plastis logam di bawah suhu rekristalisasi dan dilakukan di suhu kamar. Proses pembentukan logam didasarkan pada tipe penekukanya ada dua yaitu, pembentukan kinematik (*Kinematic shaping*) dan pembentukan dengan dies (*shaping with rigid tools*). Proses pembentukan kinematik lebih fleksibel. Bentuk akhir dari komponen tersebut tidak ditentukan oleh bentuk alat, melainkan oleh gerakan relatif alat dan benda kerja. Pembentukan dengan dies dipengaruhi oleh geometri benda kerja yang diinginkan, terutama yang berkaitan dengan lengkungan, dan faktor *springback* setelah penekanan. Karena geometri dies dan benda tetap, proses pembentukan ini menghasilkan reproduktifitas tinggi dan waktu pemrosesan lebih pendek dalam banyak kasus (American Society for Testing and Materials 2004)

Berdasarkan perlakuan suhu, proses *bending* merupakan salah satu jenis pembentukan dingin. Pada proses ini pemilihan mesin *bending* harus mempertimbangkan spesifikasi mesin seperti kapasitas tekanan dari mesin *bending*, panjang penekukan produk,

dan ketinggian terbuka cetakan. Hal ini penting untuk mencapai pilihan terbaik berdasarkan kebutuhan keputusan pembuat desain. Metode pemilihan mesin *bending* lembaran logam telah menjadi masalah praktis yang penting untuk diperhatikan.

Pada proses *bending*, jarak antara punch dan die harus memungkinkan benda kerja dipasang atau ditarik secara bebas. Benda kerja tertentu, seperti beberapa komponen pada produk kulkas dan *filling cabinet*, memerlukan pemasangan menyamping yang disebut '*penarikan samping*', yang harus dihindari jika memungkinkan. Dari perspektif meningkatkan efisiensi operasi, lebih baik memasang dari depan mesin *bending*. Oleh karena itu jelas bahwa jarak *tip-to-die* yang cukup membantu meningkatkan efisiensi operasional (Osakada et al. 2011).

Springback adalah masalah fisik yang rumit dan nilainya tergantung pada deformasi alami suatu elemen. Radius *bending* akhir bisa lebih rendah dari radius referensi bagian yang dikompensasi (Troive et al. 2018). Fenomena *springback* dalam proses *bending* biasanya menyumbang sejumlah besar waktu setup (Leu and Zhuang 2016). Beberapa penelitian tentang fenomena *springback* pada pembentukan logam telah dilakukan oleh Yang dan Thakere melakukan penelitian fenomena *spring back* pada proses *bending* pipa berdiameter 70 mm dan 127 mm. Material yang digunakan pada penelitian ini adalah high-strength TA-18, mid-strength TA-18, LF2M dan Cr14Ni9Ti. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen dan simulasi FE (*Finite Element*). Pada penelitian ini telah diidentifikasi bahwa proses penekukan (*pipa*) yang efisien dan tepat tergantung pada pengetahuan tentang sifat mekanik bahan. Pemodelan dan simulasi FE tepat dan akurat sangat bergantung pada pemahaman pemodelan keunikan respons material pada saat pembebanan (Thakare, Salodkar, and Handa 2019).

Pada penelitian pengaruh distribusi tegangan pada *springback* dalam proses *hydroforming* dilakukan oleh Zhiying dan Lihui. Dalam penelitian ini diketahui bahwa bahwa semakin besar tekanan hidrolik, semakin kecil *springback*, dan itu konsisten dengan analisis teoritis. Ketika tekanan ruang cair adalah 10 MPa, *springback* berkurang sebesar 8,9%. Ketika tekanan 20 MPa,

springback berkurang 26% (Sun and Lang 2017).

Fenomena yang terjadi pada kasus penekukan pelat berbeda dengan penekukan pipa. Selama pembengkokan, pelat logam terdeformasi plastis sepanjang garis lurus untuk mengubah bentuknya dan umumnya digunakan dengan metode coba-coba. Akan tetapi keakuratan dan keberhasilan operasi pembengkokan tergantung pada parameter operasi serta sifat material (Yu, Yang, and Zhou 2018).

Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini difokuskan pada analisis gaya bending, kerja bending, dan pengaruh springback pada proses penekukan material SUS 304 dengan tebal 1,0 mm. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh sudut dan springback pada proses bending material SUS 304 pada sudut bending 90°. Metode penelitian ini menggunakan metode ekperimental dan dilakukan analisis pengaruh spring back dengan memvariasikan radius V-Dies.

METODE PENELITIAN

Material dan Dimensional

Penelitian ini menggunakan plate 1,0 mm material SUS 304 HL yang diproduksi dari **PT Jindal Stainless Indonesia** dengan

Tabel 3. Dimesi sample uji SUS 304

Posisi	Dimensi	Posisi	Dimensi
A	16,0 ±0,2	E	14,0 ±0,2
B	48,0 ±0,2	G	180,0 ±0,2
C	113,0 ±0,2	H	460,0 ±0,2
D	65,0 ±0,2	I	385,0 ±0,2

Lokasi proses bending terpanjang berturut-turut terletak pada lokasi H, I, dan G. Gambar benda kerja/produk tersaji pada gambar berikut:

batch no. 67213A2. Spesifikasi SUS 304 HL mengacu pada standar ASTM A-240 (American Society for Testing and Materials 2004). Komposisi kimia bahan yang digunakan untuk pengujian tersaji pada tabel berikut.

Tabel 2: Chemical properties SUS 304

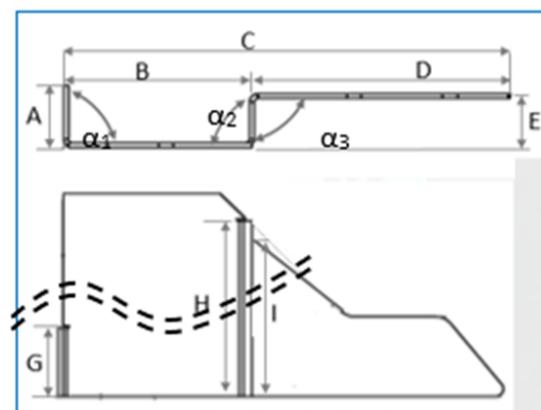
Unsur	Standard	Aktual
C	0,030-0,10	0,36
Mn	2,00	0,94
S	0,030	0,003
P	0,054	0,032
Si	0,75	0,5
Ni	8,0-12,0	8,05
Cr	17,5-19,5	18,2
N	0,10	0,05

Mechanical properties bahan SUS 304 yang digunakan tersaji pada tabel berikut:

Tabel 1: Mechanical properties SUS 304

Mechanical properties	Standard	Aktual
UTS (MPa)	≥ 515,	670
YS (MPa)	≥ 250	292
Elongation (%)	≥ 40	57,6%
Harness (HRB), max,	≤ 92,	85

Ekperimen menggunakan produk dengan tiga proses bending dengan panjang blank 137,7 mm. Dimensi dan toleransi benda kerja tersaji pada tabel berikut:



Gambar 1. Geometri benda kerja SUS 304

Gaya dan Kerja Penekukan

Radius bending sangat menentukan kualitas proses bending, karena akan mempengaruhi mutu, Radius bending yang kekecilan bisa menyebabkan keretakan (crack) sedangkan jika terlalu besar akan berdampak pada dimensi dan terjadinya pemborosan bahan. Dies dan-v-dies yang teredia saat ini

adalah memiliki 0,8, 1,0 dan 1,2. Material Dies dan V-Dies menggunakan material SKD 11 yang dikeraskan (*hardening process*). Pada penelitian ini akan digunakan dies dengan radius 1,0 dan 1,2 mm. Gambar proses bending, dies, dan v-dies pada penelitian ini tersaji pada gambar berikut:



Gambar 2. Dies dan V-Dies proses bending

Radius bending akan berpengaruh terhadap dimensi dan kegagalan material/keretakan material. Semakin tinggi radius yang kita gunakan maka akan semakin panjang material yang dibutuhkan. Jika profile tekukan suatu komponen banyak maka kondisi ini akan mempengaruhi efisiensi penggunaan material. Hal ini bisa diartikan bahwa panjang komponen dan blank material merupakan parameter yang harus dikontrol dalam menentukan radius dies yang akan digunakan. Kesalahan penggunaan radius bending akan berpengaruh pada dimensi akhir suatu komponen. Pada sisi lain yang harus dijaga

adalah keretakan hasil bending yang bisa mempengaruhi ketangguhan suatu komponen..

Hal terpenting untuk mencegahnya adalah dengan menggunakan radius bending yang tidak terlalu kecil. Dalam menentukan radius bending harus memperhatikan sifat mekanik/ mechanical properties (khususnya tensile strength) dan ketebalan material yang akan digunakan. Beberapa referensi dalam menentukan radius minimum untuk material dengan tensile strength sampai dengan 640 N/m² tersaji pada tabel berikut (Osman et al. 2010).

Tabel. 4 Minimum radius bending (mm) untuk sudut di bawah 120°

Tensile strength [N/mm ²]	Bending Direction (arah)	Ketebalan material (s), mm				
		1,0	> 1 - 1,5	> 1,5 - 2,5	> 2,5 – 3,0	> 3,0 – 4,0
Sampai dengan 390	transverse	1,0	1,6	2,5	3,0	5,0
	longitudinal	1,0	1,6	2,5	3,0	6,0
>390 - 490	transverse	1,2	2,0	3,0	4,0	5,0
	longitudinal	1,2	2,0	3,0	4,0	6,0
400 - 640	transverse	1,6	2,5	4,0	5,0	6,0
	longitudinal	1,6	2,5	4,0	5,0	8,0

Besarnya gaya yang diperlukan pada proses penekukan (bending force. F_b (N) dihitung dengan peramaan berikut (Altan 1998):

$$F_b = \frac{b_s s^2 R_m}{w} \quad (1)$$

untuk $w/s < 10$;

untuk $w/s \geq 10$;

$$F_b = \left(1 + \frac{4,s}{w}\right) \frac{b_s s^2 R_m}{w} \quad (2)$$

di mana b_s merupakan lebar penekukan (mm), w adalah lebar V-Dies (mm), s adalah ketebalan material (m), R_m adalah tensile strength (N/mm²) dan w kerja bending (Nm).



Gambar 3. Tabel pengaturan gaya pada mesin bending LVD berkapasitas 400 kN.

Penyetingan gaya aktual (F_a) dilakukan dengan menambahkan faktor keamanan (*safety factor*) sebesar 20% dari hasil perhitungan manual. Matrik penyetingan gaya pada mesin bending pada penelitian ini tersaji pada gambar 3.

Perhitungan kerja bending (bending work), W_b dalam satuan Nm dihitung dengan persamaan berikut (Altan 1998):

$$W_b = x \cdot F_b \cdot h \quad (3)$$

di mana x merupakan konstanta ketidakrataannya gaya yang nilainya antara 0,3 - 0,6. Nilai konstanta ketidakrataannya tergantung persyaratan penekukan dan penyetingan mesin bending. Sedangkan h tinggi material sebelum bending sampai dies berhenti (m).

Springback factor

Springback (gaya balik) merupakan fenomena proses metal forming dengan metode dingin. Springback terjadi karena pengaruh elastisitas bahan pada saat pembentukan. Karakteristik *springback* tergantung pada jenis material yang digunakan. *Springback* terjadi pada semua pembentukan material dengan proses *bending*, *folding*, *roll forming* dan *roll bending* (Altan 1998).

Springback memengaruhi presisi geometris dan dimensi. Mirip dengan ketidakstabilan kerutan, fenomena *springback* adalah satu faktor kunci menjaga kualitas

elastisitas, meningkatkan biaya die dan produk serta melemahkan efisiensi manufaktur (Yang et al. 2012). Springback factor, k_R adalah perbandingan antara sudut bending yang diminta pada dies (α_1), dengan sudut bending yang benda kerja setelah *springback* (α_2). Besarnya springback factor dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Altan 1998)(Ahmed et al. 2014)(Osman et al. 2010).

$$k_R = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{r_{i1} + 0,5s}{r_{i2} + 0,5s} \quad (4)$$

di mana r_{i1} dan r_{i2} berturut-turut adalah radius dies dan benda kerja dalam mm.

Besaran nilai springback factor adalah antara 0 sampai dengan 1 ($0 \leq k_R \leq 1$). Nilai $k_R = 1$ mengindikasikan tidak ada *springback* pada material tersebut, sedangkan $k_R = 0$ mengindikasikan material tersebut elastis sempurna (Ahmed et al. 2014).

Springback factor untuk beberapa material tersaji pada tabel berikut (Altan 1998):

Tabel 5. *Springback factor* untuk beberapa material

Material	Springback factor, k_R	
	$r_{i2}/s = 1$	$R_{i2}/s = 10$
St 12	0,99	0,97
St 13	0,985	0,97
St 14	0,985	0,96
High temperature ferritic steels	0,99	0,97
Stainless steel	0,96	0,92
High temperature austenitic steels	0,982	0,955
Al99 5F 7	0,99	0,96

Radius sisi dalam pada *V-dies* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$r_{i1} = \frac{r_{i2}}{1 + \frac{r_{i2} \cdot R_m}{s \cdot E}} \quad (5)$$

di mana R_m , s , r_{i2} dan E berturut-turut adalah *tensile strength* (N/mm²), ketebalan material (mm), radius benda kerja (mm) dan *modulus elastisitas* (N/mm²).

Panjang komponen (*blank dimension*) yang akan ditekuk/ bending dipengaruhi juga oleh bukaan sudut penekukan yang nilainya dihitung dengan persamaan berikut:

untuk bukaan sudut bending antara 0°-165°,

$$l = a + b + v \quad (6)$$

untuk bukaan sudut bending antara 165°-180°,

$$l = a + b \quad (7)$$

di mana a dan b adalah masing panjang lengan tekukan (dalam m) dan faktor kompensasi yang nilainya bisa dihitung dengan persamaan berikut:

untuk $\beta = 0^\circ-90^\circ$.

$$v = \pi \left(\frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) \cdot \left(r + \frac{s}{2} \cdot k \right) - z \quad (8)$$

untuk $\beta > 90^\circ$ sampai 165°,

$$v = \pi \left(\frac{180^\circ - \beta}{180^\circ} \right) \left(r + \frac{s}{2} \cdot k \right) - z \cdot \tan \phi \quad (9)$$

Dengan $\phi = \frac{180^\circ - \beta}{2}$, dan $z = 2 \cdot (r + s)$

β adalah sudut bending sisi dalam (°)

v faktor kompensasi (mm)

l panjang komponen (mm),

dan k adalah *corection factor* yang nilainya bergantung pada *r/s ratio*.

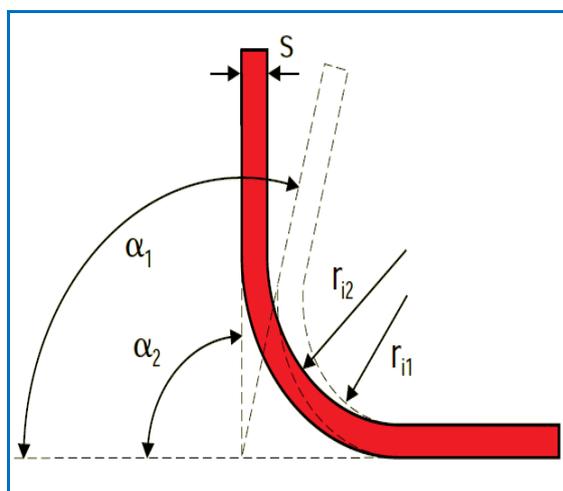
Untuk nilai $r/s > 5$

$$k = 1 \quad (10)$$

Untuk nilai $r/s \leq 5$

$$k = 0,65 + \frac{1}{2} \log \frac{r}{s} \quad (11)$$

Feomena *springback tersaji* pada gambar berikut (Altan 1998):



Gambar 4. Elastisitas bahan pada proses bending

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 6. Alat ukur yang digunakan

Parameters	Full scale	Accuracy
Vernier caliper, mm	200 and 300	0,01
Vernier caliper, mm	1000	0,05
Bevel Protector	-360°-360°	5"
Bending Machine	400 kN	5 kN

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Gaya dan Kerja Bending

Analisis gaya dan kerja penekukan di dasarkan pada data pada tabel 3 posisi G, H dan I. Panjang G, H dan I berturut-turut adalah 180, 460 dan 380 mm, Proses bending dilakukan secara membujur (longitudinal) dengan menggunakan dies beradius 1,0 mm dan 1,2 mm. Dengan menggunakan material SUS 304 1,0 mm yang memiliki tensile strength 670 MPa maka besarnya gaya yang diperlukan pada proses bending dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1. Perhitungan gaya pada eksperimen ini tidak menggunakan persamaan 2 karena perbandingan lebar bendingan dengan ketebalan bahan melebihi 10 ($\frac{w}{s} > 10$).

Perhitungan kerja bending dilakukan dengan menggunakan persamaan 3. Dengan model *V-Dies* dengan kedalaman bending 23,8 maka konstanta ketidakrataan, x ditetapkan sebesar 1/3. Perhitungan gaya bending pada posisi G dengan $b_s = 180$ mm, ketebalan bahan, $s = 1$ mm, $R_m = 670$ MPa (N/mm^2) dan lebar *V-dies*, $w = 49,1$ mm dihitung menggunakan persamaan 1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F_b &= \frac{b_s s^2 R_m}{w} \\
 &= \frac{180 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}^2 \times 670 \frac{N}{\text{mm}^2}}{49,1 \text{ mm}} \\
 &= 2456,2 \text{ N} = 2,46 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Sedangkan perhitungan kerja bending pada posisi G dengan konstanta ketidak rataan $x =$

0,3 dan kedalaman v-dies, $h = 0,0238$ m dihitung dengan menggunakan persamaan 3 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 W_b &= x \cdot F_b \cdot h \\
 &= 0,3 \times 12456,2 \text{ N} \times 0,0238 \text{ m} \\
 &= 19,5 \text{ N.m} = 19,5 \text{ Joule}
 \end{aligned}$$

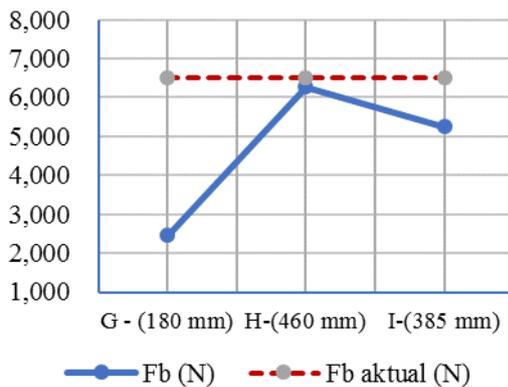
Hasil perhitungan gaya yang dibutuhkan (F_b) dan kerja mesin bending (W_s) pada posisi bendingan G, H dan L Tersaji pada tabel 7.

Tabel 7. Gaya dan kerja bending

Posisi bending	Fb (N)	Ws (N,m)
G	2456,2	19,5
H	6277,0	49,8
I	5253,6	41,7

Berdasarkan perhitungan pada table maka, mesin bending diatur pada gaya minimal 6,5 kN. Untuk Perbandingan perhitungan gaya mesin bending dengan gaya sebenarnya pada saat pelaksanaan, tersaji pada grafik berikut:

Gaya Perhitungan Teoritis dan Aktual



Gambar 5. Gaya bending Fb atual > Fb teoritis

Analisis Springback Factor

Perhitungan *springback factor* dihitung dengan menggunakan persamaan 4. Karena radius bending yang diminta (r_{i2}) adalah 1,0 mm maka dengan menggunakan ketebalan material s sebesar 1,0 mm didapat *radius thickness ratio* sebesar, $\frac{r_{i2}}{s} = 1$. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah SUS 304, sehingga dengan menggunakan table 5 maka *springback factor* yang digunakan adalah sebesar 0,96. Dengan menggunakan persamaan 4 maka besarnya α_1 , dan r_{i2} untuk r_{i1} menggunakan 1.0 mm dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 k_R &= \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \text{ sehingga } \alpha_1 = \frac{\alpha_2}{k_R} \\
 \alpha_1 &= \frac{90^\circ}{0,96} = 93,75^\circ \approx 93^\circ 45''
 \end{aligned}$$

dimana α_1 merupakan nilai sudut untuk proses bending secara teoritis. Hasil bending dan pengukuran sudut tersaji pada gambar berikut:



Gambar 6. Pengukuran sudut bending dengan menggunakan bevel proractor

Penerapan proses bending dengan menggunakan radius bending dies 1.0 dengan sudut bending α_1 sebesar $93^{\circ}45''$ didapatkan α_2 (sudu bending benda) sesuai tabel berikut:

Tabel 8. Sudut bending α_1 aktual

Garis bending	α_2	α_1
G	$90^{\circ}33''$	$93^{\circ}45''$
H	$90^{\circ}33''$	$93^{\circ}45''$
I	$90^{\circ}33''$	$93^{\circ}45''$

Berdasarkan table diatas dapat dihitung *springback factor* aktual sebagai berikut:

$$k_R = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{90^{\circ},10''}{93^{\circ}45''} = \frac{90,33^{\circ}}{93,75^{\circ}} = 0,96$$

Penerapan proses bending dengan menggunakan radius bending dies 1.3 dengan sudut bending α_1 sebesar $93^{\circ}45''$ didapatkan α_2 (sudu bending benda) sesuai tabel berikut:

Tabel 9. Sudut bending benda kerja pada α teoritis

Garis bending	α_2	α_1
G	$91^{\circ}30''$	$93^{\circ}45''$
H	$91^{\circ}30''$	$93^{\circ}45''$
I	$91^{\circ}30''$	$93^{\circ}45''$

Sehingga *springback factornya* adalah sebagai berikut:

$$k_R = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{91^{\circ}30''}{93^{\circ}45''} = \frac{91,5^{\circ}}{93,75^{\circ}} = 0,98$$

Dengan kedua data tersebut diperoleh k_R aktual antara 0,96-0,98.

Analisis *Blank Dimensions*

Perhitungan panjang dimensi mutlak diperlukan untuk mengevaluasi ketepatan penggunaan *radius bending* yang digunakan. Rasio r/s pada penggunaan radius bending 1 mm adalah 1, sehingga *correction factor* proses *bending* (k) dihitung menggunakan persamaan $k = 0,65 + \frac{1}{2} \log \frac{r}{s}$, sehingga diperoleh data hitungan sebagai berikut:

$$k_{G-180\text{ mm}} = 0.65 + \frac{1}{2} \cdot \log \left(\frac{1.0}{1} \right) = 0,71$$

Karena sudut aplikasi sudut bending menggunakan sudut 90° , maka nilai *factor kompensasi* (v) dihitungn dengan menggunakan persamaan 8. Untuk nilai v pada posisi bending G-180 mm dihitung sebagai berikut.

$$v_{G-180\text{ mm}} = \pi \frac{90}{180} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot 0.71 \right) = -2,0\text{ mm}$$

Data nilai k dan v untuk setiap proses bending menggunakan radius bending 1.0 mm tersaji pada tabel berikut:

Tabel 10. Nilai k dan v pada $\frac{r}{s} = 1$ dan $s = 1$

Parameter	Posisi Bending		
	G - 180 mm	H-460 mm	I-385 mm
β (o)	90	90	90

r/s	1,0	1,0	1,0
k	0.65	0.65	0.65
v (mm)	-1.92	-1.92	-1.9

Dengan proses yang sama diperoleh nilai factor corection k dan faktor kompensasi v dengan menggunakan radius bending 1.3 mm terjasi pada tabel berikut:

Tabel 11. Nilai k dan v pada $\frac{r}{s} = 1.3$ dan $s = 1$

Parameter	Posisi Bending		
	G - 180 mm	H-460 mm	I-385 mm
β (°)	90	90	90
r/s	1,3	1,3	1,3
k	0.71	0.71	0.71
v (mm)	-2.00	-2.00	-2.0

Karena sudut bending $\beta \leq 90^\circ$, maka besarnya nilai v dihitung dengan menggunakan persamaan 8.

$$v = 3.14 \left(\frac{180^\circ - 90^\circ}{180^\circ} \right) \cdot \left(1,0 + \frac{1,0}{2} \cdot k \right) - z$$

Karena besarnya sudut bending β adalah 90° , maka perhitungan panjang komponen yang dibutuhkan (blank dimesnion) dihitung dengan menggunakan persamaan 6. Nilai panjang komponen pada saat menggunakan radius bending 1.0 mm adalah sebagai berikut:

$$l = A + B + D + E + v$$

$$l = 16,0 + 48,0 + 90,0 + 14,0 + (3x(-1,92))$$

$$l = 162.24 \text{ mm}$$

Sedangkan nilai panjang komponen pada saat menggunakan radius bending 1.3 mm adalah sebagai berikut:

$$l = A + B + D + E + v$$

$$l = 16,0 + 48,0 + 90,0 + 14,0 + (3x(-2,0))$$

$$l = 162.00 \text{ mm}$$

KESIMPULAN

Dari data hasil proses bending dengan menggunakan radius 1.0 dan bending 1.3 didapatkan nilai *springback* berturut-turut 0.96 dan 0.98. Dari data ini dapat disimpulkan bahwa besarnya nilai *springback* berbanding lurus dengan radius yang digunakan untuk

proses bending. Hal ini sesuai membuktikan teori pada persamaan 4 dimana besarnya nilai *springback* berbanding lurus dengan radius bending ditambah setengah dari ketebalan material. Besaran nilai radius bending mempengaruhi panjang material (*blank dimension*) benda kerja. Semakin besar radius dies yang kita gunakan maka akan semakin panjang benda kerja yang dibutuhkan. Eksperimen ini juga sesuai dengan teori yang disebutkan bahwa faktor kompensasi v pada proses bending berbanding lurus dengan radius yang digunakan. Untuk mengetahui konsistensi pengaruh radius dies terhadap *springback* akan dilakukan penelitian dengan melakukan variasi sudut bending menggunakan SUS 304 dengan ketebalan 3 mm.

DAFTAR PUSTAKA:

- Ahmed, G.M. Sayeed, Hakeemuddin Ahmed, Mohd Viqar Mohiuddin, and S. Md Safi Sajid. 2014. "Experimental Evaluation of Springback in Mild Steel and Its Validation Using LS-DYNA." *Procedia Materials Science* 6(Icmpc): 1376–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.117>.
- Altan, Taylan. 1998. *Metal Forming Handbook Metal Forming Handbook*. ed. Taylan Altan. Springer Verlag Berlin.
- American Society for Testing and Materials. 2004. I ASTM International *ASTM A240: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*.
- Basri, H., Ramadhan, A. I., & Diniardi, E. (2019). Analysis Structure and Function Cooling System on Unit D155A-6. *Journal of Applied Sciences and Advanced Technology*, 1(2), 49-52.
- Leu, Daw Kwei, and Zhi Wei Zhuang. 2016. "Springback Prediction of the Vee Bending Process for High-Strength Steel Sheets." *Journal of Mechanical Science and Technology* 30(3): 1077–84.
- Lin, Zone Ching, and D. A. Yuan Chang. 1996. "Selection of Sheet Metal Bending Machines by the PRISM-Inductive Learning Method." *Journal of Intelligent*

- Manufacturing* 7(4): 341–49.
- Osakada, K., K. Mori, T. Altan, and P. Groche. 2011. “Mechanical Servo Press Technology for Metal Forming.” *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60(2): 651–72.
- Osman, M, M Shazly, A El Mokaddem, and A S Wifi. 2010. “Springback Prediction in V-Die Bending: Modelling and Experimentation.” *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering* 38(2): 179–86.
- Palaniswamy, Hariharasudhan, Gracious Ngaile, and Taylan Altan. 2004. “Optimization of Blank Dimensions to Reduce Springback in the Flexforming Process.” *Journal of Materials Processing Technology* 146(1): 28–34.
- Setiyo, M., Saifudin, B. C. P., Waluyo, B., & Ramadhan, A. I. (2017). Temperature Distribution of R-134a Through Aluminum and PTFE Expansion Valve on Automotive Air Conditioning Applications. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(4), 1046-1051.
- Sun, Zhiying, and Lihui Lang. 2017. “Effect of Stress Distribution on Springback in Hydroforming Process.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93(5–8): 2773–82.
- Thakare, Prafull S., Sandip M. Salodkar, and C. C. Handa. 2019. “Experimental Investigation of Three-Roller Bending Operation for Multi-Pass Cylindrical Forming of Plates.” *Materials Today: Proceedings* 18: 2779–86. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.143>.
- Troive, Lars et al. 2018. “Springback Compensation for a Vehicle’s Steel Body Panel.” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31(2): 152–63. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1379096>.
- Yakub, A., Karmiadj, D. W., & Ramadhan, A. I. (2016). Optimasi Desain Rangka Sepeda Berbahan Baku Komposit Berbasis Metode Anova. *Jurnal Teknologi*, 8(1), 17-22.
- Yang, He et al. 2012. “Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies.” *Chinese Journal of Aeronautics* 25(1): 1–12. [http://dx.doi.org/10.1016/S1000-9361\(11\)60356-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1000-9361(11)60356-7).
- Yu, Q. M., X. J. Yang, and H. L. Zhou. 2018. “An Experimental Study on the Relationship between Torque and Preload of Threaded Connections.” *Advances in Mechanical Engineering* 10(8): 1–10.