Bambang Mulyanto

Program Magister Teknik Mesin,
Fakultas Teknik, Universitas Mercu
Buana Jakarta 11610
mazbam01@gmail.com

Deni S. Khaerudini

Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu
Pengetahuan Indonesia, Puspitek
Serpong Banten 15314
deni.shidqi@gmail.com

INVESTIGASI SIMULASI NUMERIS DAN EKSPERIMEN PROSES SPRINGBACK BERBENTUK CUP SILINDER PADA LEMBARAN BAJA KARBON SPCC

The sheet metal forming (SMF) process is one of the manufacturing processes that essential and commonly used in the automotive industry. Compared with casting and forging, forming process into the metal sheet obtain several advantages, including lightweight materials and variations in shapes that can be made. One of the challenges in the SMF process is the springback phenomenon, which can cause a deviation in the size of sheet products. The springback occurs due to the reverse force phenomena due to the effect of its elasticity of sheet carbon steel material that has to experience the formation process. Ironing of SPCC sheet metal with a thickness of 0.8 and 1.0 mm is carried out in a pressure of 2.9 MPa with die velocity 60 mm/sec. The experimental data that carried out with a single die on the Cup Silinder sample test showed that the lower the value of ironing, the higher the value of the springback material. Therefore, the springback phenomenon can be reduced 0.03 to 0.07 mm by engineering the ironing process with a range of 0.15 mm.

Keywords: Springback, Ironing, SMF, Cup Silinder, Carbon Steel SPCC.

RETRACTED

1. PENDAHULUAN

Sheet metal forming (SMF) adalah proses pembentukan lembaran logam yang dibuat dengan menggunakan *dies* dan mesin *press*. Proses *SMF* menggunakan satu *dies* dalam satu langkah (*combination dies*) atau menggunakan beberapa rakitan *dies* (*progressive dies* dan *transfer dies*) dalam satu langkah tekan [1]. Salah satu fenomena yang muncul pada *SMF* adalah *springback*. Efek dari *springback* adalah terjadi penyimpangan ukuran dari produk pembentukan, oleh karena itu harus direduksi agar proses menjadi lebih efisien. Setiap proses pembentukan lembaran logam (*SMF*) melibatkan pembentukan elastis dan kemudian diikuti oleh deformasi plastik permanen. Karena adanya sifat elastis logam, setelah produk terlepas dari *die* dan *punch*, fenomena *springback* elastis selalu terjadi menghasilkan produk yang terbentuk di luar target. *Springback* adalah deviasi dimensi karena elastisitas lembaran logam selama pembentukan dan setelah pembentukan [2].

Springback merupakan gaya balik yang disebabkan pengaruh elastisitas bahan pelat yang mengalami proses pembentukan. Besarnya gaya balik ini ditentukan oleh harga modulus elastisitas bahan [1]. Dalam proses *bending* ini harus diperhatikan gaya balik atau *springback* seperti ditunjukkan pada Gambar 1. *Springback* mengakibatkan terjadinya penyimpangan terhadap sudut *bending* dan mengakibatkan bahan produk hasil *bending* dapat mengalami penyimpangan ukuran.

Aplikasi sederhana seperti pada proses *bending* dengan sudut 90° maka besarnya sudut tekan pada *die* dan *punch bending* harus lebih kecil dari 90°, sehingga pada saat kondisi lepas dari *die* dan *punch bending* menghasilkan sudut produk yang sama dengan 90°. Besarnya perubahan ukuran pada hasil pembentukan setelah tekanan pembentukan ditiadakan (dilepaskan) mencerminkan karakteristik elastisitas bahan baja karbon *SPCC* tersebut. Jika beban dihilangkan regangan total akan berkurang disebabkan oleh terjadinya pemulihan elastis. Pemulihan elastis merupakan fenomena balikan pegas yang mungkin besar jika tegangan

luluh semakin tinggi atau modulus elastis lebih rendah, sehingga regangan plastis semakin besar. Setiap deformasi plastis akan diikuti oleh pemulihan elastis. Sebagai konsekuensi dari fenomena ini adalah terjadi cacat plastis setelah beban dilepaskan.

Gambar 1: Skema *springback* pada proses *bending*

Keterangan Gambar :

R_i = jari-jari saat *bending* (mm)

β_i = sudut saat *bending* ($^\circ$)

R_f = jari-jari setelah *bending* (mm)

β_f = sudut setelah *bending* ($^\circ$)

T = tebal bahan (mm)

ΔR = perubahan titik pusat jari-jari (mm)

β_i = sudut produk saat *bending* ($^\circ$)

β_f = sudut produk setelah *bending* ($^\circ$)

$\Delta\alpha$ = perubahan sudut produk ($^\circ$).

Boljanovic [1] menunjukkan bahwa deformasi permanen (ϵ_t) yang terbentuk adalah hasil pengurangan deformasi plastis dengan deformasi elastis yang dihitung menggunakan persamaan.

$$\epsilon_t = \epsilon_{pl} - \epsilon_e \quad (1)$$

dengan :

ϵ_t = deformasi permanen

ϵ_{pl} = deformasi plastis

ϵ_e = deformasi elastis

Bila kelonggaran *bending* pada garis netral (L_n) sebelum dan sesudah *bending* dianggap sama, maka dapat dihitung dengan Persamaan :

$$L_n = \left[R_i + \frac{T}{2} \right] \beta_i = \left[R_f + \frac{T}{2} \right] \beta_f \quad (2)$$

dimana :

L_n = garis netral

R_i = jari-jari saat *bending* (mm)

β_i = sudut saat *bending* ($^\circ$)

R_f = jari-jari setelah *bending* (mm)

β_f = sudut setelah *bending* ($^\circ$)

T = adalah tebal bahan (mm)

Faktor *springback* (K_s) dapat dihitung dengan persamaan:

$$K_s = \frac{R_i + \frac{T}{2}}{R_f + \frac{T}{2}} = \frac{\frac{2R_i}{T} + 1}{\frac{2R_f}{T} + 1} = \frac{\phi_f}{\phi_i} = \frac{180^\circ - \alpha_2}{180^\circ - \alpha_1} \quad (3)$$

dengan :

α_1 = sudut produk saat *bending* ($^\circ$)

α_2 = sudut produk setelah *bending* ($^\circ$)

$\Delta\alpha$ = perubahan sudut produk ($^\circ$)

Faktor *springback* (K_s) bergantung pada rasio (R:T) besarnya jari-jari *punch* (R) dan tebal bahan uji (T). Bila faktor *springback* (K_s) = 1 artinya tidak ada *springback* dan bila faktor *springback* (K_s) = 0 menunjukkan bahwa pemulihan elastis telah lengkap [1]. *Ironing* merupakan proses penipisan dinding bahan pada proses *drawing* atau *deep drawing* oleh *drawing die* atau *drawing*. Pada proses *SMF* khususnya *drawing* dan *deep drawing ironing* sangat berpengaruh pada fenomena *springback* karena *ironing* membatasi deformasi elastis dari bahan uji. *Ironing* juga mengurangi tegangan sisa yang didistribusikan dengan baik ke sepanjang dinding silinder cup *punch* [3, 4].

Ironing rasio (IR) pada proses *SMF* dapat dihitung dengan Persamaan [4].

$$IR = \left[\frac{T_0 - T_f}{T_0} \right] \times 100 \quad (4)$$

Dengan :

IR = ironing rasio (%)

T_0 = tebal awal bahan (mm)

T_f = tebal akhir bahan (mm)

Darmawan, *et al.* [5] melakukan simulasi dan eksperimen fenomena *springback* pada bahan lembaran paduan Aluminium ketebalan 0,32 mm. Simulasi dilakukan dengan Autoform dan eksperimen pada mesin *press* hidrolik dengan tekanan 1500 kN dengan variasi celah antara *bending die* dan *bending punch*. Penelitian dilakukan untuk mengetahui penyimpangan ukuran setelah proses *bending*.

Mulidran, *et al.* [7] melakukan penelitian dengan simulasi dan eksperimen proses *U-bending* pada bahan *Tailor welded blank (TWB)* tebal 1,0 mm. *TWB* tersusun dari dua bahan yaitu DC 04 di sisi kiri dan DP 1200 di sisi kanan dengan variasi celah *drawing die* dan *punch* sebesar 1,2 dan 2,2 mm. Tekanan dudukan blank diatur ke 1,8 MPa, nilai koefisien gesekan f adalah 0,25.

Siswanto, *et al.* [8] melakukan penelitian dengan simulasi fenomena *springback* pada proses *U bending* material mild steel DC04 tebal 0,8 mm dengan dua metode berbeda. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan prosedur kompensasi yang dapat melakukan proses dengan optimal, menggunakan kombinasi konvergensi cepat *displacement adjustment (DA)* dan metode fleksibel *spring forward (SF)* sehingga metode kombinasi akan cepat dan berlaku untuk semua permukaan *dies*. Metode ini memandu proses modifikasi permukaan *dies* untuk mengkompensasi *springback* setelah produk terlepas dari *dies*. Metode gabungan baru ini kemudian disebut kompensasi *hybrid method (HM)*.

Steel plate cold rolled coiled (SPCC) adalah baja karbon yang dibentuk dengan rol dingin dengan kualitas komersial, merujuk pada *JIS-G3141* bahan ini berbentuk lembaran untuk proses pengerjaan dingin. Bahan ini paling banyak digunakan dalam industri manufaktur *SMF* khususnya *drawing* dan *deep drawing* dibandingkan dengan bahan jenis lain seperti *ASTM (American Society for Testing and Bahans)*, *KS (Korean Steel Standard)* atau *GB (Guojia Biaozhun-China)*. Bahan *SPCC* memiliki kandungan karbon (C) maksimal adalah 0,15 %, Mangan (Mn) 0,6 %, Fosfor (P) 0,1 dan Sulfur (S) 0,05 %. *Tensile strength* minimal 270 N/mm², *yield point* minimal 240 N/mm², dan elongasi minimal 36 % untuk ketebalan 0,6 sampai 1,0 mm.

Bahan jenis ini memiliki nilai batasan penyimpangan ketebalan sebesar 0,06 mm untuk ketebalan 0,6 mm sampai 1,0 mm sehingga memiliki kemampuan bentuk yang baik. Pertimbangan lain dalam pemilihan bahan adalah berdasarkan karakteristik awal dari bahan yang memiliki tingkat kemudahan fabrikasi atau dibatasi berdasarkan keinginan untuk mencapai sifat akhir yang diperlukan untuk menyelesaikan proses deformasi.

Aspek yang termasuk adalah, jenis bahan, berat, kekuatan, dan kekakuan sehingga dipilih lembaran logam dari bahan baja karbon *SPCC*. Penelitian ini melakukan analisis nilai penyimpangan diameter dinding karena gaya balik (*springback*) pada proses *drawing* untuk bahan lembaran baja karbon *SPCC*, dengan morfologi berbentuk *cup* silinder dan ketebalan tertentu yaitu 0,8 dan 1,0 mm dengan metode *ironing* [9].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian Investigasi simulasi numeris dan eksperimen proses *springback* berbentuk *cup* silinder pada lembaran baja karbon *SPCC* dengan menerapkan rekayasa *ironing* pada *die* dan *punch*. Teori sederhana proses bending diterapkan untuk memperkirakan nilai *springback* yang terjadi pada produk uji. *Ironing* rasio (*IR*) digunakan untuk menentukan kompensasi *springback* pada *die* dan *punch*.

2.1 Cetakan (Dies)

Untuk mengetahui nilai *springback* yang terjadi pada bahan Baja karbon *SPCC* berbentuk *cup* silinder dengan ketebalan 0,8 dan 1,0 mm dilakukan eksperimen menggunakan *dies* tunggal, yaitu *dies* yang hanya melakukan satu proses *drawing* saja, seperti ditunjukkan Gambar 2 berikut ini.

Gambar 2: Proses *drawing die* tunggal, a. persiapan proses *drawing*, b. proses *drawing* berlangsung [1]

Keterangan Gambar:

D_b = diameter blank (mm)

R_d = jari-jari dies (mm)

R_p = jari-jari *punch* (mm)

c = celah *dies* (mm)

F = *punch force* (kN)

F_h = *blank holder force* (kN)

v = kecepatan *punch* (mm/detik)

2.2 Mesin Press

Eksperimen proses *drawing* lembaran baja karbon *SPCC* dengan *die* tunggal dilakukan pada mesin *press* 600 kN, tekanan 2,9 MPa. Kecepatan langkah mesin *press* dalam penelitian ini ditetapkan 60 mm per menit. Spesifikasi mesin *press* ditunjukkan pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1: Spesifikasi mesin *press* mekanik 600 kN [17]

Spesifikasi	Tipe mesin (2)E
Kapasitas (kN)	600
Panjang langkah (mm)	140
Langkah per menit	45 – 85
Tinggi <i>dies</i> , <i>slide ke bolster</i> (mm)	300
Slide adjustmen (mm)	70
Ukuran <i>slide</i> , panjang x lebar (mm)	480 x 400
Ukuran <i>bolster</i> , panjang x lebar (mm)	870 x 520
<i>Frame gap</i> (mm)	270
<i>Frame inside measurement</i> (mm)	130
Motor utama	5.5 x 4
Tekanan udara dibutuhkan (Mpa)	0.5

2.3 Pengukuran

Pengukuran produk *SMF* dilakukan dengan dua metode pengukuran yaitu:

1. Pengukuran geometri.

Pengukuran diameter dilakukan pada titik a dan titik b produk uji seperti Gambar 3, dengan alat ukur *CMM* (*coordinate measuring machine*) tipe Apex504 dengan perangkat lunak Geopak v.3.0.R19 yang memiliki ketelitian 0,0001 mm seperti Gambar 4. Nilai *springback* didapat dari selisih diameter pada titik a dan b.

2. Pengukuran kontur

Pengukuran kontur dilakukan untuk mengetahui bentuk permukaan dinding luar produk uji menggunakan *Formtracer* tipe *FT-600* dengan perangkat lunak *Formplus* v.1.21 seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

RETRACTED

Gambar 3: Posisi ukur produk uji. **Gambar 4:** Pengukuran ukuran linear produk uji dengan *CMM*

Gambar 5: Pengukuran kontur permukaan dinding luar produk uji dengan *formtracer*

2.4 Bahan

Pada penelitian ini dilakukan kalkulasi dan eksperimen terhadap proses *SMF cup* silinder (Gambar 5) dari bahan baja karbon *SPCC*. Komposisi kimia produk uji *cup* silinder seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan sifat mekanik seperti pada Tabel 3 berikut ini :

Tabel 2: Komposisi kimia bahan *SPCC* dalam prosen unsur-unsur [16]

Unsur	C	Mn	P	S	Fe
%	0,15 max	0,60 max	0,100 max	0,050 max	<i>Balance</i>

Tabel 3: Sifat mekanik bahan *SPCC* [16]

Tebal	Yield point (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongasi
0.25 – 0.30	240 max	270 min	28 min
0.30 – 0.40	240 max	270 min	31 min
0.40 - 0.60	220 max	270 min	34 min
0.60 – 1.00	210 max	270 min	36 min
1.00 – 1.60	190 max	270 min	37 min

Gambar 6: Geometri produk uji *cup* silinder dengan, H adalah tinggi produk uji (15 mm), D adalah diameter luar produk uji (60 mm).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 7 memperlihatkan hasil kalkulasi dan eksperimen proses *drawing* bahan lembaran baja karbon *SPCC* dengan ketebalan 0,8 mm sedangkan Gambar 8 memperlihatkan hasil kalkulasi dan eksperimen bahan lembaran baja karbon *SPCC* tebal 1,0 mm.

Gambar 7: Hasil kalkulasi dan eksperimen nilai *ironing* terhadap *springback* produk uji *cup* silinder lembaran baja karbon SPCC tebal 0,8 mm.

RETRACTED

Gambar 8: Hasil kalkulasi dan eksperimen nilai *ironing* terhadap *springback* produk uji *cup* silinder lembaran baja karbon SPCC tebal 1,0 mm.

Nilai *springback* menurun sebanding dengan penurunan koefisien gesek dan berbanding terbalik dengan naiknya celah *die* dan *punch* [5-7]. *Springback* meningkat sebanding dengan kenaikan nilai *ironing* dan *blank holder pressure* (BHP) [8]. Hasil kalkulasi dan eksperimen proses *drawing* bahan lembaran baja karbon SPCC dengan ketebalan 0,8 dan 1,0 mm pada mesin *press* mekanik 600 kN, *blank holder pressure* (BHF) 2,9 MPa, kecepatan *die* 60 mm per menit pada penelitian ini menunjukkan fenomena yang sama dengan penelitian sebelumnya yaitu nilai *springback* meningkat berbanding terbalik dengan peningkatan nilai *ironing*.

Gambar 9 memperlihatkan hasil pengukuran kontur permukaan hasil proses SMF *cup* silinder bahan SPCC tebal 0,8 mm pada *ironing* 0% sampai 14%. Sedangkan Gambar 10 memperlihatkan hasil pengukuran kontur permukaan untuk bahan tebal 1,0 mm. Fenomena *springback* pada produk uji dimulai dari pangkal dinding *cup* silinder setelah jari-jari lengkungan dan terus membesar sampai ujung dinding *cup* silinder.

Gambar 9: Kontur permukaan dinding luar produk uji *cup* silinder tebal 0,8 mm.

RETRACTED

Gambar 10: Kontur permukaan dinding luar produk uji *cup* silinder tebal 1,0 mm

Gambar 7 di atas memperlihatkan bahwa, nilai *springback* hasil kalkulasi lembaran baja karbon SPCC ketebalan 0,8 mm lebih besar 0,02 mm ketebalan 1,0 mm. Hal ini disebabkan karena lembaran baja karbon SPCC ketebalan 1,0 mm memiliki kekakuan yang lebih besar dari pada 0,8 mm [1]. Gambar 8 memperlihatkan hasil eksperimen lembaran baja karbon SPCC pada proses drawing *cup* silinder dengan ketebalan 1,0 mm lebih rendah 0,01 mm dibanding ketebalan 0,8 mm.

Dari kedua produk uji tersebut menunjukkan bahwa nilai *springback* hasil perhitungan lebih besar 0,01 mm dari hasil eksperimen karena tidak semua parameter dalam eksperimen seperti koefisien gesek dan *blank holder pressure (BHP)* dimasukkan dalam perhitungan. Variabel tersebut juga berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *springback SMF* produk uji *cup* silinder linear menurun sebanding dengan kenaikan nilai *ironing*. Hasil eksperimen menunjukkan nilai *springback* cenderung menurun kemudian stabil pada *ironing* 11, 13 dan 14%.

4. KESIMPULAN

Fenomena *springback* bahan baja karbon SPCC dengan ketebalan 0,8 dan 1,0 mm pada proses *draw-ing* menunjukkan bahwa dapat direduksi dengan metode *ironing* sebesar 0,03 sampai 0,07 mm. Fenomena umum dari eksperimen dan perhitungan untuk bahan tebal 0.8 mm dan 1.0 mm menunjukkan *ironing* 2% menurunkan nilai *springback* sebesar 0.04 mm dan *ironing* 14% menurunkan nilai *springback* 0.13 mm. Dari fenomena tersebut dapat diperkirakan bahwa geometri akhir produk uji dapat sesuai dengan spesifikasi yang dirancang (ditetapkan) dengan keakurasian geometri produk uji diperoleh pada rentang *ironing* 4 - 13%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] BOLJANOVIC, V., *Handbook sheet metal forming processes and die design*, New York, Industrial Press Inc, 2004.
- [2] WAGONER, R.H., LIM H., LEE M.G., “Advanced issues in springback”, *International Journal of Plasticity*, v. 45, pp. 3–20, Jun. 2013.
- [3] ZEIN, H., EL-SHERBINY, M., ABD-RABOU, M., EL-SHAZLY, M., “Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process”, *American Journal of Mechanical Engineering*, v.1, n.2, pp. 20-29, Apr. 2013.
- [4] PARIDA, A.K., SOREN, S., JHA, R.N., KRISHNAMURTHY, N., “Cylindrical cup manufacturing using 12 mm thick circular blanks of AISI 1040 graded medium carbon steel”, *The Iron and Steel Institute of Japan International Journal*, v. 56, n.8, pp 1452-1461, Apr. 2016.
- [5] DARMAWAN, A., ANGGONO, A., HAMID, A., “Die design optimization on sheet metal forming with considering the phenomenon of springback to improve product quality”, *In The 2nd International Conference on Engineering and Technology for Sustainable Development, Bahan Science, Engineering and Chemistry*, 154, 1-4, Jogjakarta. 13-14 Sep. 2017.
- [6] HU, W.B., ZHANG, L., LI, H., LIANG, W.A., L., “Numerical simulation and experiment investigation of springback on cup drawing forming tailor welded blank”, *Journal of Iron Steel and Research*, v. 1, n.9, pp.8-13, Sept. 2012.
- [7] MUTO, K., PISPIS, E., MURER, K.O., J. OMAR, M. SLOTT, L. “Springback prediction of formed tailor welded blanks”, *The International Journal Engineering and Science*, v.7, n.11, pp. 31-35, Nov. 2018.
- [8] SISWANTO, W.A., ANGGONO, A.D., OMAR, B., JUSOFF, K., “An alternate method to springback compensation for sheet metal forming”, *The Scientific World Journal*, v.2014, pp.1-13, Jun. 2014.
- [9] COERA, J., LAURENTA, H., OLIVEIRAB, M.C., MANACHA, P.Y., MENEZES, L.F., “Detailed experimental and numerical analysis of a cylindrical cup deep drawing: pros and cons of using solid-shell elements”, *International Journal Of Material Forming*, v.11, n.3, pp. 357-373, May 2018.
- [10] CHAUDHARI, S.S., PATIL, N.K., “Springback prediction of sheet metal in deep drawing process”, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, v.6, n.12, pp. 09-17, Dec. 2015.
- [11] PATIL, S.M., HUSSAIN, S.M., KUMAR, K.R., “Experimental and numerical analysis of springback in deep drawing”, *Global Journal Of Engineering Science And Researches*, v.1, n.7, pp. 15-24, Sep. 2014.
- [12] BOUCHAALA, K., FAQIR, M., GHANAMEH, M.H., CHOUYIAKH, H., MADA, M., ESSADIQI, E., “Finite element investigation of friction behavior in cylindrical deep drawing cup of AA2090 Al-Li sheet Metal” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, v.10, n.8, pp. 78-90, Aug. 2019.
- [13] MA, R., WANG, C., ZHAI, R., ZHAO, J., “An iterative compensation algorithm for springback control in plane deformation and its application”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, v.32, n.28, pp. 01-12, Dec. 2019.
- [14] LIU, X., CAO, J., CHAIA, X., LIUA, J., ZHAO, R., KONG, N., “Investigation of forming parameters on springback for ultra high strength steel considering Young’s modulus variation in cold roll forming”, *Journal of Manufacturing Processes*, v.29, pp.289–297, Aug. 2017.
- [15] FOUA, N., EL-BANA, R., SAMUEL, M., “Experimental and numerical prediction of spring back in u-bending process”, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, v.15, n.5, pp.28-38, Oct. 2015.
- [16] MUTO K., NAITO T. *Cold reduced carbon steel sheet and strips*” In Japan Industrial Standard, Ferrous Material and Metallurgy, Akasaka, Minato-ku, Japan, 2008
- [17] KIMIKAZU A., Aida press handbook, Aida Engineering, Kanagawa, Japan, 2010.