



Investigasi simulasi numeris dan eksperimen proses *springback* berbentuk *cup* silinder pada lembaran baja karbon SPCC

Numerical simulation and experimental investigation of springback process of carbon steel SPCC sheet shaped cylinder cup

B. Mulyanto*¹ D.S. Khaerudini*^{1,2}

¹Program Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana Jakarta 11610

²Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Puspiptek Serpong Banten 15314

*E-mail: mazbam01@gmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 02 September 2019

Accepted 20 December 2019

Available online 1 April 2020

Keywords:

Spring-back

Ironing

Cup cylinder

Carbon steel SPCC

SMF



The sheet metal forming (SMF) process is one of the manufacturing processes that important and commonly used in the automotive industry. Compared with casting and forging, forming process into the metal sheet obtain several advantages including fewer weight materials and variations in shapes that can be made. One of the challenges in the SMF process is the spring-back phenomenon which can cause a deviation in the size of sheet products. The spring-back occurs due to the reverse force phenomena due to the effect of its elasticity of sheet carbon steel material that has experienced 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 cylinder sample test showed that the lower the value of ironing, the greater the value of the spring-back material. Therefore, the spring-back phenomenon can be reduced 0.03 to 0.07 mm by engineering the ironing process with a range of 0.15 mm

1. PENDAHULUAN

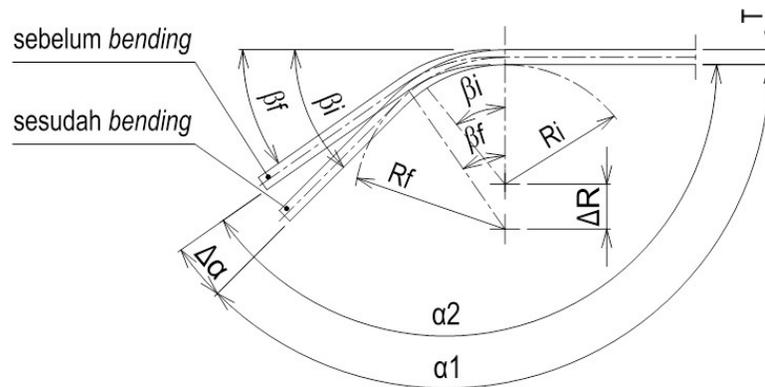
Sheet metal forming (SMF) adalah proses pembentukan lembaran logam yang dibuat dengan menggunakan *dies* dan mesin *press*. Proses SMF menggunakan satu *dies* dalam satu langkah (*combination dies*) atau menggunakan beberapa rakitan *dies* (*progressive dies*, *transfer dies*) dalam satu langkah tekan (Boljanovic, 2004). Salah satu fenomena yang muncul pada SMF adalah

springback. Efek dari *springback* adalah terjadi peyimpangan 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 plastis 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 (Wagoner dkk., 2013).

Springback merupakan gaya balik yang disebabkan pengaruh elastisitas bahan pelat yang mengalami proses pembentukan. Besarnya gaya balik ini ditentukan oleh harga modulus elastisitas bahan (Boljanovic, 2004). 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 diadadakan (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* dengan R_i adalah jari-jari saat *bending* (mm), β_i adalah sudut saat *bending* (°), R_f adalah jari-jari setelah *bending* (mm), β_f sudut setelah *bending* (°), T adalah tebal bahan (mm), ΔR adalah perubahan titik pusat jari-jari (mm), α_1 adalah sudut produk saat *bending* (°), α_2 adalah sudut produk setelah *bending* (°) dan $\Delta\alpha$ adalah perubahan sudut produk (°).

Deformasi permanen (ϵ_t) yang terbentuk adalah hasil pengurangan deformasi plastis dengan deformasi elastis yang dihitung menggunakan persamaan (Boljanovic, 2004):

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

dimana ϵ_t adalah deformasi permanen, ϵ_{pl} adalah deformasi plastis dan ϵ_e adalah deformasi elastis.

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

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

dengan L_n adalah garis netral, R_i adalah jari-jari saat *bending* (mm), β_i adalah sudut saat *bending* ($^\circ$), R_f adalah jari-jari setelah *bending* (mm), β_f sudut setelah *bending* ($^\circ$), dan T adalah tebal bahan (mm).

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

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

dimana α_1 adalah sudut produk saat *bending* ($^\circ$), α_2 adalah sudut produk setelah *bending* ($^\circ$) dan $\Delta\alpha$ adalah 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 (Boljanovic, 2004).

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* (Zein dkk., 2014).

Ironing rasio (IR) pada proses SMF dapat dihitung dengan persamaan (Parida dkk., 2016):

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

dimana IR adalah *ironing* rasio (%), T_0 adalah tebal awal bahan (mm) dan T_f adalah tebal akhir bahan (mm).

Darmawan dkk. (2018) 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 dkk. (2018) 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 40 di sisi kiri dan DP 1200 disisi 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 dkk. (2014) 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 %, Phospor (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 kemampubentukan 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.

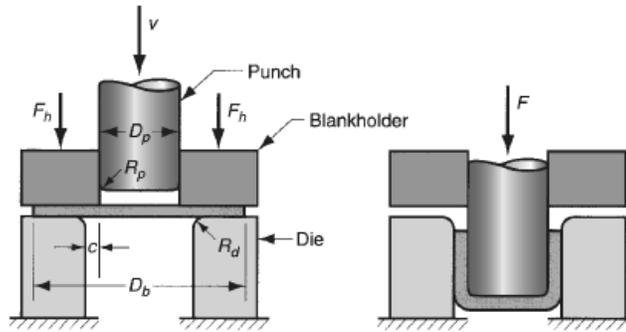
Aspek yang termasuk adalah, jenis bahan, berat, kekuatan, dan kekakuan sehingga dipilih lembaran logam dari bahan baja karbon SPCC. Penelitian ini melakukan analisis nilai penyimpangan diameter dinding karena gaya balik (*springback*) pada proses *drawing* untuk bahan lembaran baja karbon SPCC, dengan morfologi berbentuk *cup* silinder dan ketebalan tertentu yaitu 0,8 dan 1,0 mm dengan metode *ironing* (Coera dkk., 2018)

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 gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Proses *drawing die* tunggal

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 dalam tabel 1 dibawah ini.

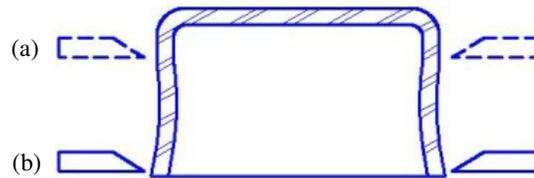
Tabel 1. Spesifikasi mesin *press* mekanik 600 kN (*Aida press hand book*, 2010)

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:

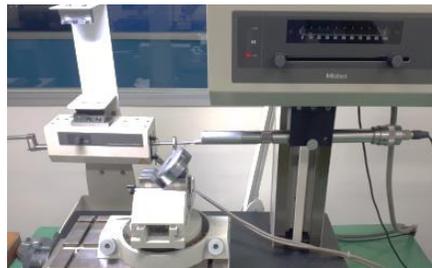
1. Pengukuran geometri.
Pengukuran diameter dilakukan pada bagian atas (bagian a) dan bagian bawah (bagian b) produk uji seperti gambar 3, dengan alat ukur *CMM* (*coordinate measuring machine*) tipe Apex504 dengan perangkat lunak Geopak v.3.0.R19 yang memiliki ketelitian 0,0001 mm seperti gambar 4. Nilai springback didapat dari selisih diameter bagian a dan b.
2. Pengukuran kontur.
Pengukuran kontur dilakukan untuk mengetahui bentuk permukaan dinding luar produk uji menggunakan *Formtracer* tipe *SV-C500* dengan perangkat lunak Formpak v.1.213 seperti ditunjukkan pada gambar 5 dibawah ini.



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

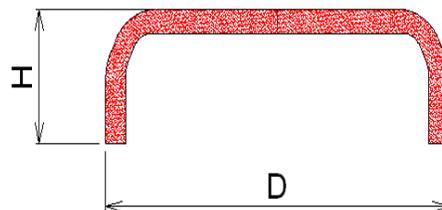
Pada penelitian ini dilakukan kalkulasi dan eksperimen terhadap proses *SMF cup* silinder dari bahan baja karbon *SPCC*. Komposisi kimia produk uji *cup* silinder seperti ditunjukkan pada tabel 2 dan sifat mekanik seperti pada tabel 3 berikut ini :

Tabel 2. Komposisi kimia bahan SPCC dalam % (Muto dan Naito, 2008)

Unsur	C	Mn	P	S	Fe
%	0,15 max	0,60 max	0,100 max	0,050 max	Balance

Tabel 3. Sifat mekanik bahan SPCC (Muto dan Naito, 2008)

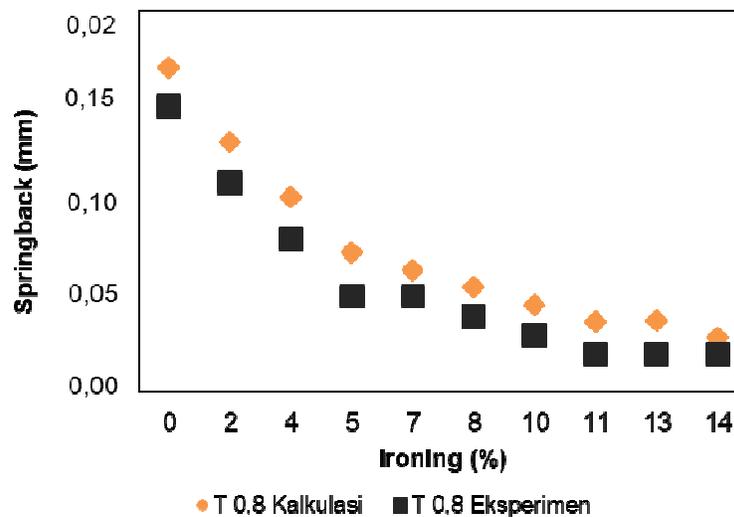
Tebal	Yield point (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongasi (%)
0,25 - 0,30	240 max	270 min	28 min
0,30 - 0,40	240 max	270 min	31 min
0,40 - 0,60	220 max	270 min	34 min
0,60 - 1,00	210 max	270 min	36 min
1,00 - 1,60	190 max	270 min	37 min



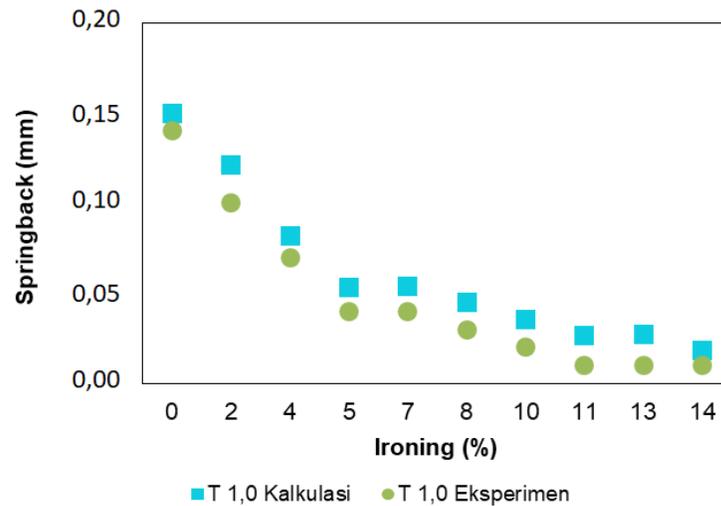
Gambar 6. Geometri produk uji *cup* silinder, H adalah tinggi produk uji (15 mm), D adalah diameter luar produk uji (60 mm).

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.



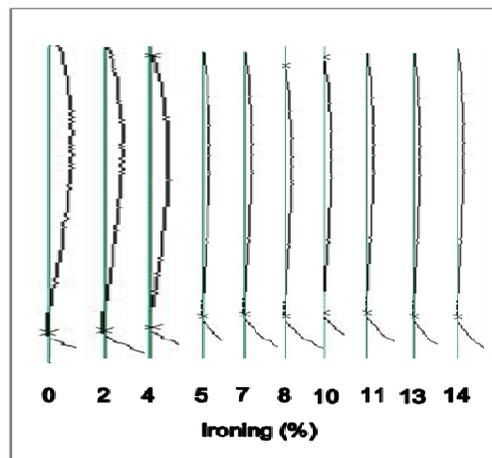
Gambar 7. Hasil kalkulasi dan eksperimen nilai *ironing* dan *springback* produk uji *cup* silinder lembaran baja karbon SPCC tebal 0,8 mm.



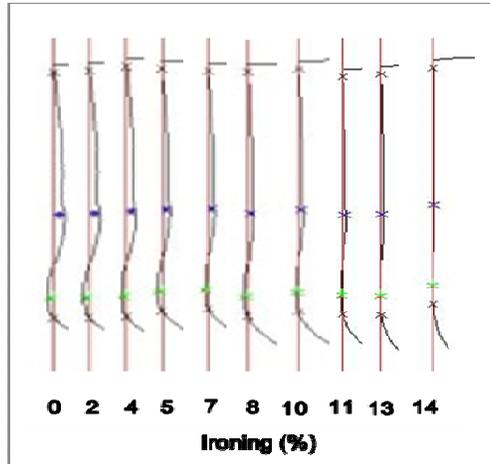
Gambar 8. Hasil kalkulasi dan ekperimen nilai *ironing* dan *springback* produk uji *cup* silinder lembaran baja karbon SPCC tebal 1,0 mm.

Nilai *springback* menurun sebanding dengan penurunan koefisien gesek dan berbanding terbalik dengan naiknya celah *die* dan *punch*, Darmawan dkk. (2018), Mulidran dkk. (2018). *Springback* meningkat sebanding dengan kenaikan nilai *ironing* dan *blank holder pressure (BHP)*, Siswanto dkk. (2014). 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



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

Pada gambar 7 di atas terlihat 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 (Boljanovic, 2004). 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 *drawing* 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%.

DAFTAR NOTASI

- H : Tinggi produk uji (mm)
- D : Diameter produk uji (mm)
- 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)
- α_1 : Sudut produk saat *bending* ($^\circ$)
- α_2 : Sudut produk setelah *bending* ($^\circ$)
- $\Delta\alpha$: Perubahan sudut produk ($^\circ$)
- ϵ_t : Deformasi permanen
- ϵ_{pl} : Deformasi plastis

ϵ_e : Deformasi elastis
 L_n : Garis netral
 K_S : Faktor springback
IR : Ironing rasio (%)

DAFTAR PUSTAKA

- Boljanovic V., 2004, Handbook sheet metal forming processes and die design, Industrial press inc, New York.
- Coera J., Laurenta H., Oliveirab M.C., Manacha P.Y., Menezes L.F., 2018, Detailed experimental and numerical analysis of a cylindrical cup deep drawing: pros and cons of using solid-shell elements, *International Journal of Material Forming*, 11(3), 357–373.
- Darmawan A., Anggono, A., Hamid, A., 2018, 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.
- Muto K., Naito T., 2008, Japan industrial standard, Ferrous material and metallurgy, Akasaka, Minato-ku, Japan.
- Mulidran P., Spisak E., Majernikova J., Tomas M., Slota J., 2018, Springback Prediction Of Formed Tailor Welded Blanks, *The International Journal Engineering and Science*, 7(11), 31-35.
- Siswanto W.A., Anggono A.D., Omar B., Jusoff K., 2014, An alternate method to springback compensation for sheet metal forming, *The Scientific World Journal*, 301271,1-13.
- Wagoner R.H., Lim H., Lee M.G., 2013, Advanced issues in springback, *International Journal of Plasticity*, 45, 3–20.
- Zein H., El-Sherbiny M., Abd-Rabou M., El-Shazly M., 2013, Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process *American Journal of Mechanical Engineering*,1(2), 20-29.