

## ANALISIS FENOMENA SPRING-BACK/SPRING-GO FACTOR PADA LEMBARAN BAJA KARBON RENDAH MENGGUNAKAN PENDEKATAN EKSPERIMENTAL

**Khoirudin<sup>1\*</sup>, Sukarman<sup>1</sup>, Nana Rahdiana<sup>2</sup>, Ahmad Fauzi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Buana Perjuangan Karawang, Jl. H.S. Ronggowaluyo, Karawang, Jawa Barat 41361;

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Industri, Universitas Buana Perjuangan, Jl. H.S. Ronggowaluyo, Karawang, Jawa Barat 4136;

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Informatika, Universitas Buana Perjuangan, Jl. H.S. Ronggowaluyo, Karawang, Jawa Barat 41361

\*Email: [khoirudin@ubpkarawang.ac.id](mailto:khoirudin@ubpkarawang.ac.id)

Diterima: 17 September 2021

Direvisi: 21 Oktober 2021

Disetujui: 11 Desember 2021

### ABSTRAK

Akurasi sudut hasil *bending* merupakan variable output utama yang harus dicapai pada proses *V-bending*. *Spring-back/spring-go factor* merupakan salah satu variable penting yang memengaruhi akurasi sudut *bending*. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen Taguchi menggunakan empat parameter input dan tingkat eksperimen majemuk. Parameter input yang digunakan dalam penelitian ini adalah, bukaan *V-die* (*V-die opening*), sudut *punch* (*punch angle*), kecepatan *punch* (*punch speed*) dan gaya *bending* (*bending force*). Pada tingkat eksperimen, bukaan *V-die* menggunakan dua tingkat percobaan, sedangkan ketiga parameter lainnya menggunakan tiga tingkat percobaan. Material baja karbon rendah SPCC-SD dengan ketebalan material 0.8 mm dipilih dalam penelitian ini. Hasil analisis metode ANOVA didapatkan bahwa sudut *punch* (*punch angle*) merupakan factor utama yang signifikan mempengaruhi *spring-back/spring-go factor* dengan kontribusi paling tinggi sebesar 76.15%. Kondisi ini juga sesuai dengan hasil analisis S/N ratio dimana parameter sudut *punch* (*punch angle*) memiliki delta sebesar 0.125 yang diikuti oleh parameter kecepatan *punch* (*punch speed*), bukaan *V-die* (*V-die opening*), dan gaya *bending* (*bending force*). Ketiga parameter ini memiliki nilai delta masing-masing sebesar, 0.026, 0.022, dan 0.009.

**Kata kunci:** ANOVA, Faktor *spring-back/spring-go*, Kerja *bending*, S/N ratio, *V-bending*.

### ABSTRACT

*Bending angle accuracy* is the primary output variable that should achieve in the *V-bending* process. The *spring-back/spring-go factor* is one of the essential variables that affect the accuracy of the *bending angle*. This study uses the Taguchi experimental method using four input parameters and multiple practical levels. The input parameters used in this research are *V-die opening*, *punch angle* (*punch angle*), *punch speed* (*punch speed*) and *bending force*. The *V-die opening* used two experimental levels at the practical level, while the other three parameters used three functional groups. This work selected SPCC-SD low carbon steel material with a material thickness of 0.8 mm in this study. The results of the ANOVA analysis showed that the *punch angle* is the main factor that affects the *spring-back/spring-go factor*, with the highest contribution of 76.15%. This condition is also following the results of the S/N ratio analysis, where the *punch angle* parameter has a delta of 0.125, followed by the *punch speed*, *V-die opening*, and *bending force*. These parameters have a delta value of 0.026, 0.022, and 0.009, respectively.

**Keywords:** ANOVA, *Bending force*, *Spring-back/spring-go factor*, S/N ratio, *V-bending*.

## PENDAHULUAN

Pembentukan lembaran logam presisi tinggi merupakan salah satu tujuan utama di banyak industri manufaktur. Pembentukan lembaran logam menggunakan baja karbon rendah SPCC-SD memainkan peran penting dalam industri industri otomotif, industri elektronik, dan industri peralatan perumahan. Salah satu proses pembentukan lembaran logam yang paling banyak digunakan adalah menggunakan proses *V-bending*. Proses *V-bending* lembaran logam umumnya diterapkan untuk membuat bagian melengkung dalam produksi berbagai komponen. Pengaturan ekonomis dan berbagai macam komponen dengan ukuran dan bentuk yang kompleks dapat dibuat. Sudut *bending* dan akurasi dalam dimensi komponen yang di *bending* merupakan dua indikator kualitas yang paling penting (Karaağaç, 2017).

Dalam penelitian sebelumnya, belum banyak pekerjaan eksperimental dilakukan dalam memahami *bending feature* khususnya terkait dengan fenomena *spring-back* dan *spring-go* [3-10]. Namun demikian penelitian fenomena *spring-back* dan *spring-go* yang terjadi secara simultan belum banyak dilakukan. Sebagai contoh, Zang et al. (Zang et al., 2007) mempelajari model konstitutif untuk prediksi pegas di mana perubahan modulus Young dengan deformasi plastis dipertimbangkan. Leu dan Hsieh (Leu & Hsieh, 2008) menyelidiki pengaruh gaya coining pada reduksi *spring-back* dalam proses *V-die bending*. Wang et al. (Wang et al., 2008) mempelajari kontrol *spring-back* pada proses *air-bending* untuk lembaran logam. Tekaslan et al. (Tekaslan et al., 2008) menentukan *spring-back* lembaran logam baja tahan karat menggunakan *V-die bending*. Meinder et al. (Meinders et al., 2008) mempelajari prediksi dan optimasi pegas kembali menggunakan analisis numerik. Kim dan Koc (Kim & Koc, 2008) menyelidiki karakteristik pegas kembali dari paduan lembaran logam aluminium dalam kondisi pembentukan hangat menggunakan metode numerik. Kazan et al. [8] memprediksi *spring-back* dalam proses *wipe-bending* dari sheet metal menggunakan neural network. Parsa et al. (Parsa et al., 2010) mempelajari pegas dari lembaran sandwich aluminium/polipropilen/aluminium lengkung ganda dengan menggunakan simulasi dan

eksperimen FEM. Panthi et al. (Panthi et al., 2010) mempelajari prediksi *spring-back* dari proses *bending* lembaran logam dengan menggunakan FEM. Tidak hanya terjadinya *spring-back* tetapi juga terjadinya *spring-go* yang berpengaruh pada sudut lentur. *Spring-back* merupakan masalah fisik yang kompleks dan nilainya dipengaruhi oleh pada deformasi alami suatu elemen. Radius *bending* akhir bisa lebih rendah dari radius referensi komponen yang dikompensasikan (Troive et al., 2017). Fenomena *spring-back* dalam proses *bending* umumnya memberikan dampak yang signifikan untuk waktu penyetingan (Leu & Zhuang, 2016)(Sukarman et al., 2020).

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian juga telah dilakukan untuk memahami fenomena *spring-back* dan *spring-go* untuk mencapai akurasi sudut *bending* (Thipprakmas 2011) (Phanitwong et al., 2013) (Rahmani et al., 2009). Thipprakmas dkk. menyelidiki fenomena *spring-back* dan *spring-go* yang terjadi pada material A1100-0 dengan menggunakan metode Taguchi. Parameter input yang digunakan adalah sudut *bending*, ketebalan material, dan radius *punch*. Pada fenomena *spring-back*, factor ketebalan material merupakan parameter input yang paling dominan diikuti oleh *punch* radius dan *bending* angle. Sementara itu pada fenomena *spring-go*, factor *bending* angle merupakan parameter input yang paling dominan diikuti oleh ketebalan material dan *punch* radius. Phanitwong et al. (Phanitwong et al., 2013) melakukan penelitian eksperimental untuk menganalisis fenomena *spring-back/spring-go* pada proses *U-bending* dengan menggunakan material A1100-0. Berdasarkan analisis distribusi tegangan, perubahan parameter geometri bagian menyebabkan perubahan karakteristik *spring-back* dan *spring-go* pada komponen yang di *bending*. Karakteristik *spring-go* menurun dan *spring-back* meningkat seiring dengan bertambahnya panjang benda kerja dan lebar U-channel yang menurun. Peningkatan radius *punch* dan die menyebabkan peningkatan karakteristik *spring-back* dan penurunan pada *spring-go* pada komponen *bending*. Selain itu, dalam hal ketebalan benda kerja, peningkatan ketebalan benda kerja menyebabkan peningkatan karakteristik *spring-go* dan penurunan karakteristik *spring-back* pada benda kerja. Rahmani et al. (Rahmani et al., 2009)

melakukan penelitian ekperimental untuk mengalalisis fenomena *spring-back/spring-go* pada proses *V-bending* dengan menggunakan material ST-12 dan CK67 steel sheets. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan parameter proses, *die tip radius*, *sheet thickness*, *punch velocity*, dan *sheet orientation*.

Berbeda dengan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, penelitian ini difokuskan pada analisis fenomena *spring-back/ spring-go* yang terjadi secara simultan pada proses *V-bending* menggunakan material baja karbon rendah SPCC-SD engan tebal 0.8 mm. Penelitian ini menggunakan metode ekperimen Taguchi yang divalidasi dengan menggunakan regeresi multi linear. Proses parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi, *die opening*, *punch angle*, *punch peed* dan *force bending*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh proses parameter terhadap fenomena *spring-back/ spring-go* fakator pada proses *V-die bending*.

## METODE PENELITIAN

### Material dan Dimensional

Pada penelitian ini, proses pemotongan menggunakan mesin shearing dilakukan terhadap baja karbon rendah SPCC-SD untuk digunakan dalam eksperimental. Baja canai dingin SPCC-SD sesuai dengan standar JIS G-3141. Bahan lembaran baja canai dingin SPCC-SD memiliki ketebalan 0,8 mm yang diproduksi oleh PT Posco International Corporation dengan menggunakan *heat no.* SP51023/CRX1548. Material JIS G-3141 memiliki *workability* (mampu bentuk) yang baik, sehingga saat ini banyak digunakan di berbagai industri, seperti industri perkantoran dan peralatan rumah tangga, otomotif, dan elektronik (Nana, dkk, 2020). Karakteristik mekanik dan komposisi kimia bahan lembaran SPCC-SD mengacu pada standar JIS G-3141 (Sukarman et al., 2021), dan umumnya tersedia dalam ukuran 0,8 mm x 1219 mm x 2438 mm (Khoirudin et al., 2021). Bentuk geometri sampel dibuat persegi panjang dengan dimensi 64 mm x 24 mm yang dihasilkan oleh proses pemotongan mesin *shearing*. Data material baja lembaran SPCC-SD dan geometri alat

yang digunakan dalam penelitian ini tercatat pada **Tabel 1**.

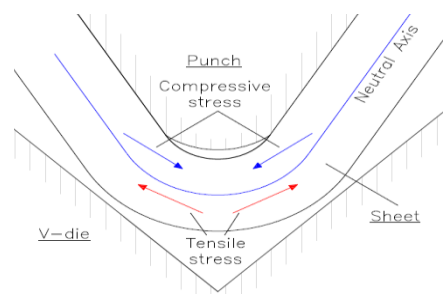
### Karaterisasi *Spring-back/spring-go*

Distribusi tegangan benda kerja ketika proses *bending* sebelum tahap unloading yang menimbulkan fenomena *spring-back/spring-go* diilustrasikan pada **Gambar 1**. Material di sisi *punch* berada di bawah tegangan kompresi (compressive stress), sedangkan material di sisi die berada di bawah tegangan tarik (tensile stress) (Rahmani et al., 2009). Sebagai akibat dari distribusi tegangan, material di zona tekan mencoba untuk memperbesar dan material di zona tegangan mencoba untuk menyusut karena adanya pita elastis melalui ketebalan lembaran. Akibatnya, material di daerah lentur mencoba untuk *spring-back* dan benda kerja yang ditekuk sedikit terbuka (Thipprakmas 2011). Sebaliknya, fenomena *spring-go* berasal dari alasan lain yang serupa, dalam keadaan tertentu. Thipprakmas dan Rojananan (Thipprakmas 2008) meneliti terjadinya *reverse bending*. Mereka membahas analisis aliran material dan menjelaskan alasan teoritis terjadinya fenomena *spring-go*.

**Tabel 1.** Data material, dan geometri alat

Material and tool geometry	Units	Quantity
Tensile strength, $\sigma_u$ *	N/mm <sup>2</sup>	314
Yield stress, $\sigma_y$ *	N/mm <sup>2</sup>	184
Elongation, $\epsilon$ *	%	46
Friction coefficient, $\mu$	$\mu$	0.1
Material density, $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7.85
<i>Punch tip radius</i> , $R_i$	mm	variable
<i>Sheet thickness</i> , $t$	mm	variable
<i>Die-opening</i> , $L$	mm	variable
<i>Punch angle</i> , $\phi$	°	variable
<i>Punch velocity</i> , $v$	mm/s	variable
<i>Bending force</i> , $F_b$	N	variable

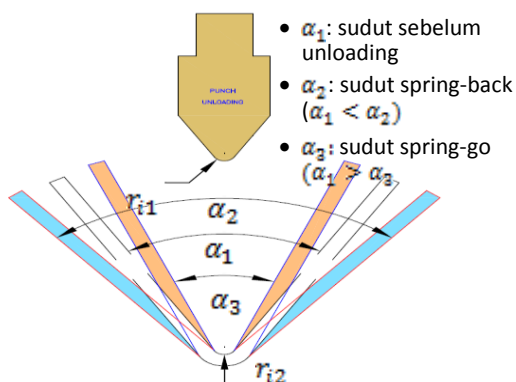
\* Mil test certificate/



**Gambar 1.** Distribusi tegangan sebelum proses unloading pada *V-bending*

Fenomena tekukan terbalik menghasilkan distribusi tegangan terbalik dibandingkan dengan zona tekukan; oleh karena itu, tegangan tarik dan tekan masing-masing dihasilkan pada sisi *punch* dan die. Perbedaan karakteristik aliran material pada berbagai variasi radius sudut *bending* menyebabkan distribusi tegangan yang berbeda dan juga jumlah tegangan balik yang berbeda pada lembaran. Oleh karena itu, ketika tegangan yang dihasilkan di zona *bending* tertekan, tegangan yang dihasilkan di zona *bending* menjadi terbalik sehingga fenomena *spring-back* terjadi. Sebaliknya, ketika tegangan yang dihasilkan di zona *bending* berbalik menekan tegangan yang dihasilkan maka akan terjadi fenomena *spring-go*.

**Gambar 2** menunjukkan fenomena sudut *spring-back/spring-go* pada proses *V-bending*. Sudut *bending* sebelum proses unloading force, sudut *spring-back*, dan sudut *spring-go* beerturut-turut diidentifikasi dengan  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  and  $\alpha_3$ . Besarnya nilai factor *spring-back/spring* dihitung dengan persamaan (1) and (2) (Sukarman et al., 2020) (Altan, 1998) (Osman et al., 2010) (Ahmed et al., 2014).



**Gambar 2.** Fenomena sudut *spring-back* dan *spring-go*

$$k_R = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{r_{i1} + 0,5t}{r_{i2} + 0,5t} \quad (1)$$

$$k_R = \frac{\alpha_3}{\alpha_1} = \frac{r_{i1} + 0,5t}{r_{i2} + 0,5t} \quad (2)$$

Dimana,  $r_{i1}$ ,  $r_{i2}$  dan  $t$ , berturut-turut adalah radius *punch*, radius beda kerja dan ketebalan material.

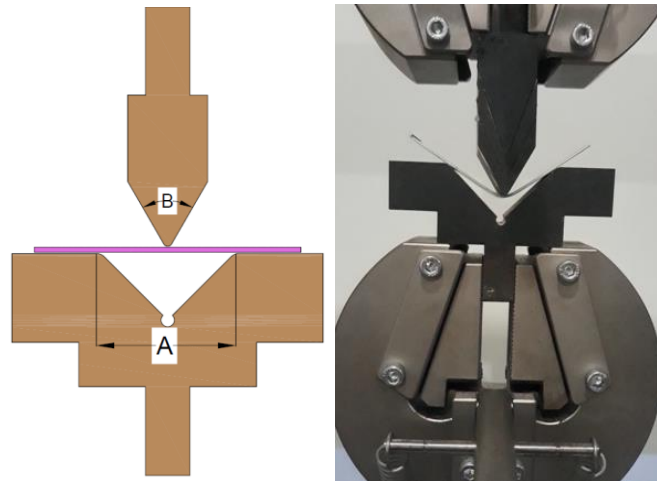
## Deskripsi *V-die bending* dan proses parameter

Gambar 3 menunjukkan skema *V-die bending* dan proses pengujian *V-bending*. *V-die bending* terdiri dari *punch* dengan tiga variasi sudut dan *V-die* dengan dua variasi die opening. *Punch* memiliki jari-jari ujung 1.0 mm dan pengujian diseting dalam 3 kecepatan *bending*. Untuk memasang *V-die bending* set pada mesin pengujian, digunakan *rectangular holder* sebagai pilar pemandu dengan panjang 20 mm. Pengujian dilakukan dengan kecepatan yang diatur konstan pada 30 mm/s, 40 mm/s dan 50 mm/s. Setelah benda kerja diletakkan pada *V-die* set yang sudah terpasang pada ram mesin, proses pengujian mulai dijalankan. Pengujian diawali dengan turunya *punch* dan menekan benda kerja pada yang tertumpu pada sepatu bawah. Proses *bending* terjadi dalam dua tahap. Pada tahap pertama, yang disebut pemuatan, *punch* bergerak ke bawah hingga pukulannya mencapai nilai tertentu, 15.0 mm atau 17.1 mm. Pada tahap kedua, bernama proses pembongkaran (*spring-back*), *punch* bergerak ke atas. Eksperimen diulangi untuk berbagai parameter pengujian yang sudah ditetapkan pada tabel 2. Dengan demikian, 18 percobaan dilakukan dan hasilnya tersaji pada gambar 3. Sebuah *bavel protactor* dengan akurasi 5” digunakan untuk mengukur sudut *bending*.

Dalam melakukan pengujian, dua sample uji disiapkan untuk setiap kondisi percobaan. Hasil uji *bending* tersaji pada Gambar 4. Namun, selama percobaan disadari bahwa ada sedikit perbedaan antara nilai-nilai yang diukur. Jadi, untuk setiap kondisi dua sample tes dilakukan pengukuran sudut dan dan dicatat rata-ratanya. Data ini digunakan untuk menghitung nilai *spring-back/spring-go* factor yang dihitung dengan persamaan 1 dan 2. Hasil perhitungan eksperimental diprediksi dengan menggunakan multi regresi linear dan dibandingkan dengan studi literature yang sudah ada. Software statistic digunakan untuk mempermudah prediksi nilai *spring-back/spring-go* factor.

**Tabel 2.** Minimum radius *bending* (mm) untuk sudut di bawah 120°

Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	<i>Bending</i> Direction (arah)	Ketebalan material ( <i>t</i> ), mm			
		1,0	> 1 - 1,5	> 1,5 - 2,5	> 2,5 – 3,0
Sampai 390	transverse	1,0	1,6	2,5	3,0
	longitudinal	1,0	1,6	2,5	3,0
>390 - 490	transverse	1,2	2,0	3,0	4,0



**Gambar 3.** Geometri V- bending dan skema pengujian

**Signal to noise ratio (S/N Ratio)**

Metode *array orthogonal* Taguchi banyak digunakan untuk meningkatkan proses manufaktur diberbagai industry baik dari sisi kualitas ataupun quantitas. Matrik *array orthogonal* taguchi yang digunakan dalam eksperimen ini tersaji pada tabel. Aplikasi metode Taguchi misalnya telah berhasil digunakan di industry tekstile (Budianto et al., 2020), proses spot welding (Sukarman & Abdulah, 2021), painitng (Sukarman et al., 2021) dan machining (Sahithi et al., 2019). Dalam teknik eksperimen Taguchi, istilah

analisis rasio S/N sangat krusial. Istilah 'sinyal' memberikan gambaran sinyal dari nilai yang diinginkan untuk respon variabel (karakteristik output), dan istilah 'noise' mencerminkan nilai yang tidak diharapkan sebagai output. Titik-titik tersebut menunjukkan parameter terbaik untuk memberikan nilai kekuatan tarik terbaik atau dioptimalkan [11]. Perhitungan rasio S/N tergantung pada karakteristik kualitas yang diharapkan. Perhitungan S/N ratio untuk masing-masing ditunjukkan pada persamaan 3, 4., dan 5 [12] [13] [14].





Gambar 4. Sample uji *bending* sebanyak 18 sample x 2 unit

**Tabel 3.** Parameter eksperimen tehnik Taguchi

Kode	Parameter <i>V-bending</i>	Tingkat eksperimental		
		1	2	3
A	<i>V-die opening, L</i> (mm)	30	35	-
B	<i>Punch angel, φ</i> (°)	40	50	60
C	<i>Punch speed, V<sub>b</sub></i> (mm/minute)	30	40	50
D	<i>Bending force, F<sub>b</sub></i> (N)	6500	7000	7500

Larger is better:

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log_{10} \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} \frac{1}{y_i^2} \quad (3)$$

Nominal is the best:

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log_{10} \frac{\bar{y}^2}{s^2} \quad (4)$$

Smaller is better:

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^{n_0} \frac{y_i^2}{n_0} \quad (5)$$

Dimana *n* adalah jumlah sampel, *y* adalah faktor respons,  $\bar{y}$  adalah faktor respons rata-rata, dan *s* merupakan varian faktor respon.

Penelitian eksperimental ini menggunakan data karakteristik “*smaller is the best*” merupakan fitur kualitas dengan nilai batas 0 (nol) dan non-negatif. Nilai rasio S/N yang semakin kecil atau mendekati nol merupakan nilai yang diinginkan. Oleh karena itu, nilai negatif pada fenomena *spring-back/spring-go* factor pada data *V-bending* harus mempertimbangkan data positif.

### Analisis *Spring-back/spring-go* factor

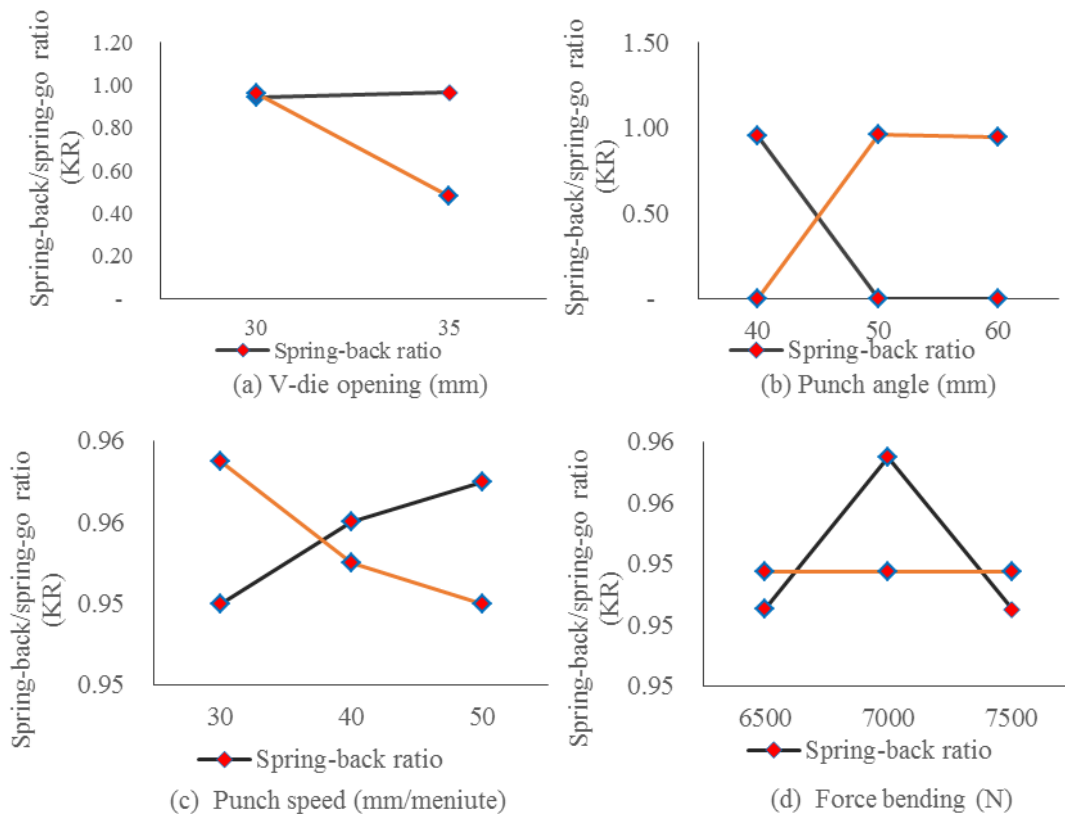
Analisis *spring-back/spring-go* factor bertujuan untuk mengetahui sejauh mana elastisitas bahan pada saat proses *V-bending*. Perhitungan nilai *spring-back/spring-go* factor pada setiap iterasi pengujian dilakukan menggunakan persamaan (1) dan (2). Persamaan (1) digunakan untuk menghitung nilai *spring-back factor* pada saat proses *V-bending* mengalami perubahan sudut *spring-back*. Sedangkan persamaan (2) digunakan untuk menghitung nilai *spring-back factor* pada saat proses *V-bending* mengalami perubahan sudut *spring-go*. Nilai *spring-back/spring-go* factor terletak diantara 0 sampai dengan 1. Nilai *spring-back/spring-go* factor mendekati 0 mengindikasikan material tersebut semakin elastis, sedangkan jika mendekati 1 mengindikasikan material semakin kaku/ rigid (Sukarman et al., 2020) (Suchy, 2006). Nilai *spring-back.spring-go* factor pada eksperimen ini tersaji pada table 4.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

**Tabel 4.** Hasil pengukuran *spring-back/spring-go* factor dan S/N ratio

RUN No.	A	B	C	D	SB/SG factor, <i>k<sub>R</sub></i>		S/N Ratio	
	(mm)	(°)	(mm/menit)	(N)	Exp.*	Predict.	Exp.*	Predict.

1	30	40.00	30	6500	0.940	0.959	0.537	0.353
2	30	40.00	40	7000	0.945	0.957	0.491	0.364
3	30	40.00	50	7500	0.945	0.956	0.491	0.376
4	30	50.00	30	6500	0.980	0.955	0.175	0.387
5	30	50.00	40	7000	0.970	0.954	0.264	0.398
6	30	50.00	50	7500	0.965	0.952	0.309	0.410
7	30	60.00	30	7000	0.955	0.951	0.400	0.419
8	30	60.00	40	7500	0.950	0.950	0.446	0.430
9	30	60.00	50	6500	0.940	0.948	0.537	0.446
10	35	40.00	30	7500	0.960	0.956	0.355	0.372
11	35	40.00	40	6500	0.965	0.955	0.309	0.388
12	35	40.00	50	7000	0.970	0.953	0.265	0.399
13	35	50.00	30	7000	0.950	0.953	0.446	0.407
14	35	50.00	40	7500	0.950	0.951	0.446	0.419
15	35	50.00	50	6500	0.955	0.950	0.400	0.435
16	35	60.00	30	7500	0.950	0.949	0.446	0.439
17	35	60.00	40	6500	0.940	0.947	0.537	0.455
18	35	60.00	50	7000	0.940	0.946	0.537	0.467



**Gambar 5.** Rerata *spring-back/spring-go* factor pada setiap parameter dan tingkat eksperimen.

Rarata spring-bak/*spring-go* factor pada setiap parameter dan tingkat percobaan dianalisis untuk mengetahui pengaruh setiap parameter dan tingkat eksperimen yang diujikan. Pengaruh die opening terhadap *spring-go* factor terlihat menurun seiring dengan meningkatnya lebar dies dan sedikit meningkat pada kondisi *spring-go* factor. Kondisi ini terlihat pada **Gambar 5 a**. Pada parameter *puch angle* terlihat, terjadi penurunan rerata *spring-back* factor seiring dengan meningkatnya tingkat percobaan sampai dengan sudut 50o dan konstan setelahnya. Sementara pada rerata *spring-go* terjadi peningkatan rerata seiring dengan meningkatnya tingkat percobaan sampai dengan sudut 50o dan konstan setelahnya. Kondisi ini terlihat pada gambar **Gambar 5 b**. Pada parameter *Punch speed* terlihat, terjadi penurunan rerata *spring-go* factor seiring dengan meningkatnya tingkat percobaan. Sementara pada rerata rerata *spring-go* menurun seiring dengan meningkatnya tingkat percobaan. Kondisi ini terlihat pada gambar **Gambar 5 c**. Pengaruh parameter *force bending* terhadap rerata *spring-back* dan *spring-go* factor dapat dilihat pada gambar

**Gambar 5 d**. Pada kondisi ini terlihat rerata *spring-back* meningkat pada kondisi tingkat percobaan ke dua dan kembali menurun pada tingkat percobaan ke -3. Sementara pada rerata *spring-go* factor cenderung tidak terjadi perubahan.

Berdasarkan kadar karbon yang terkandung didalamnya, material SPCC-SD termasuk jenis baja karbon rendah karena nilai karbon dalam material kurang dari 3% (Sukarman et al., 2021) (Fertas et al., 2021). Hasil perhitungan *spring-back/spring-go factor* pada pengujian ini berkisar antara 0,94-0,98, dengan rerata 0,954. Besar-kecil nilai dari *spring-back/spring-go factor* dipengaruhi nilai radius hail *bending* dengan ketebalan material. Untuk baja karbon rendah, nilai *spring-back/spring-go factor* berkisar antara 0,97-0,99 (Altan, 1998). Kondisi ini dicapai pada nomor iterasi yang ke 4, 5 dan 12. Berdasarkan data nilai *spring-back/spring-go factor* ini, maka harus diperhatikan pada saat proses *bending*. Dengan memanfaatkan trasisi sudut *spring-back* ke *spring-go* diharapkan ketepatan sudut *bending* pada proses *V-bending* bisa optimalkan.

**Tabel 5.** Prosentase kontribusi *bending* parameter terhadap *variable output*

Variable output	Bending Parameters	Sum of square SS	F-Value	P-Value	% Contribution
a. <i>Spring-back/spring-go</i> factor	<i>V-die</i> opening, <i>L</i> (mm)	0.00003	0.16	0.69	12.39%
	<i>Punch angel</i> , $\phi$ ( °)	0.00017	0.99	0.34	76.15%
	<i>Punch speed</i> , <i>V<sub>b</sub></i> (mm/minute)	0.00003	0.15	0.71	11.47%
	<i>Bending force</i> , <i>F<sub>b</sub></i> (N)	0.00000	0.00	0.98	0.00%
b. S/N ratio	Die opening, <i>L</i> (mm)	0.00218	0.16	0.70	12.16%
	<i>Punch angel</i> , $\phi$ ( °)	0.01371	1.00	0.34	76.43%
	<i>Punch speed</i> , <i>V<sub>b</sub></i> (mm/minute)	0.00203	0.15	0.71	11.30%
	<i>Bending force</i> , <i>F<sub>b</sub></i> (N)	0.00002	0.00	0.97	0.11%

**Tabel 6.** S/N ratio untuk *spring-back/spring-go* ratio

<i>V-bending</i> Parameters	Mean S/N Ratio			Delta (max.- min)	Rank
	1	2	3		
<i>V-die</i> opening <i>L</i> (mm)	0.401	0.423		0.022	3
<i>Punch angel</i> $\phi$ ( °)	0.409	0.352	0.476	0.125	1
<i>Punch speed</i> <i>V<sub>b</sub></i> (mm/menit)	0.396	0.418	0.422	0.026	2
<i>Bending force</i> (N)	0.416	0.407	0.414	0.009	4



## Analisis pengaruh proses parameter

Pengaruh proses parameter terhadap *spring-back/spring-go factor* dapat didekati dengan menggunakan analisis ANOVA.

**Tabel 5.** Prosentase kontribusi bending parameter terhadap variable output dimana, *punch angle* (sudut *bending*) memiliki kontribusi terbesar terhadap *spring-back/spring-go factor* diikuti dengan die opening (bukaan die) *punch speed* (kecepatan *punch*) dan gaya *bending* (*force bending*) untuk baja karbon rendah SPCC-SD. Demikian juga pada parameter input S/N ratio, dimana, *punch angle* (sudut *bending*) memiliki kontribusi terbesar terhadap *spring-back/spring-go factor* diikuti dengan *V-die opening* (bukaan *V-die*) *Punch speed* (kecepatan *punch*) dan gaya *bending* (*force bending*) untuk baja karbon rendah SPCC-SD.

Dengan menggunakan pendekatan S/N ratio didapatkan bahwa *punch angle* (sudut *punch*) merupakan factor utama yang mempengaruhi *spring-back-spring-go factor* dengan nilai delta sebesar 0.125 dan diikuti oleh *Punch speed*, *V-die opening* (bukaan *V-die*) dan *force bending* (gaya *bending*). Kondisi ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Thipprakmas & Phanitwong, 2011) yang menyatakan bahwa sudut *punch* merupakan faktor utama pada proses optimasi *V-bending*.

**Tabel 6** menunjukkan pengaruh proses parameter terhadap *spring-back/spring-go ratio* pada parameter yang digunakan pada proses *V-bending* dengan menggunakan material SPCC-SD

## KESIMPULAN

Analisis fenomena *spring-back/spring-go factor* yang terjadi pada proses *V-bending* telah berhasil dilakukan dengan menggunakan pendekatan eksperimental yang menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Berdasarkan analisis ANOVA, *punch angle* merupakan factor yang signifikan mempengaruhi variable respon. Hal ini dapat dilihat dari besarnya nilai kontribusi yang nilainya lebih dari 75%.
- Berdasarkan analisis S/N ratio pada proses *V-bending*, sudut *V-die* merupakan salah satu factor utama yang mempengaruhi variable reponse yaitu *spring-back/spring-go factor*.

Hasil penelitian ini diharapkan bisa memberi kontribusi dalam penelitian-penelitian yang relevan dengan proses *bending* pada umumnya dan proses *V-bending* pada khususnya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada “**Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia**” yang telah mendanai sepenuhnya penelitian ini melalui program “Penelitian Dosen Pemula” dengan nomor kontrak 065/SP2H/LT/DRPM/2021 dan 030/SP2H/RDPKR-MONO/LL4/2021. Terima kasih penulis sampaikan juga kepada tim di laboratorium Teknik Mesin Universitas Buana Perjuangan Karawang yang telah mendukung proses pengujian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, G. M. S., Ahmed, H., Mohiuddin, M. V., & Sajid, S. M. S. (2014). Experimental Evaluation of Springback in Mild Steel and its Validation Using LS-DYNA. *Procedia Materials Science*, 6(Icmpc), 1376–1385. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.117>
- Altan, T. (1998). Metal Forming Handbook. In T. Altan (Ed.), *Metal Forming Handbook* (Issue 5). Springer Verlag Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58857-0>
- Budianto, A., Jumawan, S. B., & Abdulah, A. (2020). OPTIMASI RESPON TUNGGAL PADA PROSES TEXTURING BENANG DTY-150D / 96F MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI SINGLE RESPONSE OPTIMIZATION OF DTY-150D / 96F YARN TEXTURING PROCESS USING TAGUCHI METHOD. 77–86.
- Fertas, O., Boumerzoug, Z., & Nessark, B. (2021). Heat Treatment Effect On Galvanized Low Carbon Steel. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 28(1), 1–7.
- Karaağaç, İ. (2017). The Experimental Investigation of Springback in V-Bending Using the Flexforming Process. *Arabian Journal for Science and*

- Engineering*, 42(5), 1853–1864.  
<https://doi.org/10.1007/s13369-016-2329-6>
- Khoirudin, K., Murtalim, M., Sukarman, S., Dewadi, F. M., Rahdiana, N., Raais, A., Abdulah, A., Anwar, C., & Abbas, A. (2021). *Mechanical Engineering for Society and Industry A Report on Metal Forming Technology Transfer from Expert to Industry for Improving Production Efficiency*. 93–100.
- Kim, H. S., & Koç, M. (2008). Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1–3), 370–383.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.059>
- Leu, D. K., & Hsieh, C. M. (2008). The influence of coining force on spring-back reduction in V-die bending process. *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1–3), 230–235.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.033>
- Leu, D. K., & Zhuang, Z. W. (2016). Springback prediction of the vee bending process for high-strength steel sheets. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(3), 1077–1084.  
<https://doi.org/10.1007/s12206-016-0212-8>
- Meinders, T., Burchitz, I. A., Bonte, M. H. A., & Lingbeek, R. A. (2008). Numerical product design: Springback prediction, compensation and optimization. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(5), 499–514.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.006>
- Nana, dkk, R. (2020). *Analisis Pengaruh Radius Bending Pada Proses Bending Menggunakan Pelat Spcc-Sd Terhadap Perubahan*. 01(01), 1–10.
- Osman, M., Shazly, M., El Mokaddem, A., & Wifi, A. S. (2010). Springback prediction in V-die bending: modelling and experimentation. *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering*, 38(2), 179–186.
- Panthi, S. K., Ramakrishnan, N., Ahmed, M., Singh, S. S., & Goel, M. D. (2010). Finite Element Analysis of sheet metal bending process to predict the springback. *Materials and Design*, 31(2), 657–662.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.022>
- Parsa, M. H., ahkami, S. N. al, & Ettehad, M. (2010). Experimental and finite element study on the spring back of double curved aluminum/polypropylene/aluminum sandwich sheet. *Materials and Design*, 31(9), 4174–4183.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.024>
- Phanitwong, W., Sontamino, A., & Thipprakmas, S. (2013). Effects of part geometry on spring-back/spring-go feature in U-bending process. *Key Engineering Materials*, 549, 100–107.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.549.100>
- Rahmani, B., Alinejad, G., & Gorji, A. (2009). *An investigation on springback / negative springback phenomena using finite element method and experimental approach*. 223, 841–850.  
<https://doi.org/10.1243/09544054JEM1321>
- Sahithi, V. V.D., Malayadri, T., & Srilatha, N. (2019). Optimization of turning parameters on surface roughness based on taguchi technique. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3657–3666.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.299>
- Suchy, I. (2006). *Handbook of Die Design* (second). McGraw-Hill.
- Sukarman, Anwar, C., Rahdiana, N., & Ramadhan, A. I. (2020). ANALISIS PENGARUH RADIUS DIES TERHADAP SPRINGBACK LOGAM LEMBARAN STAINLESS-STEEL PADA PROSES BENDING HIDROLIK V-DIE. *Junal Teknologi*, 12(2).
- Sukarman, S., & Abdulah, A. (2021). Optimasi parameter resistance spot welding pada pengabungan baja electro-galvanized menggunakan metode Taguchi. *Dinamika*

*Teknik Mesin*, 11(1), 39–48.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.29303/dtm.v11i1.372>

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.01.003>

Sukarman, S., Shieddieque, A. D., Anwar, C., Rahdiana, N., & Ramadhan, A. I. (2021). Optimization of Powder Coating Process Parameters in Mild Steel (Spcc-Sd) To Improve Dry Film Thickness. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(2), 1–9. <https://doi.org/10.5937/jaes0-26093>

Tekaslan, Ö., Gerger, N., & Şeker, U. (2008). Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies. *Materials and Design*, 29(5), 1043–1050. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.04.004>

Thipprakmas, S., & Phanitwong, W. (2011). Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique. *Materials and Design*, 32(8–9), 4430–4436. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.069>

Thipprakmas, S., & Rojananan, S. (2008). Investigation of spring-go phenomenon using finite element method. *Materials and Design*, 29(8), 1526–1532. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.02.002>

Troive, L., Bałon, P., Świątoniowski, A., Mueller, T., & Kielbasa, B. (2017). Springback compensation for a vehicle’s steel body panel. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(2), 152–163. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1379096>

Wang, J., Verma, S., Alexander, R., & Gau, J. T. (2008). Springback control of sheet metal air bending process. *Journal of Manufacturing Processes*, 10(1), 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.manpro.2007.09.001>

Zang, S. L., Liang, J., & Guo, C. (2007). A constitutive model for spring-back prediction in which the change of Young’s modulus with plastic deformation is considered. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(11), 1791–1797.

