

ANALISIS *SPRINGBACK* TERHADAP KECEPATAN PENEKANAN DAN WAKTU PENAHANAN (*HOLDING TIME*) PADA PROSES *V-BENDING*

Oki Supriadi, Hartono Widjaja, Wiwik Purwadi

Teknik Manufaktur, Politeknik Manufaktur Bandung

Jl Kanayakan No. 21 - Dago, Bandung – 40135

Phone/Fax : 022. 250 0241 / 250 2649

Email: okisupriadi96@gmail.com

Abstrak

Pada saat proses penekukan (*bending*), material pelat (produk) akan mengalami perubahan dimensi sudut dan radius tekuk yang dinamakan *springback*. Akibatnya, pada proses pembentukan produk mengalami ketidaksesuaian/perubahan dari sisi dimensi. Untuk memenuhi ketercapaian produk dari sisi dimensi maka diperlukan pengetahuan tentang perilaku *springback* pada logam saat proses pembentukan.

Selama ini untuk memprediksi besarnya *springback* seorang perancang menggunakan rumus *springback* ($\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i \cdot Y}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i \cdot Y}{E \cdot t} \right) + 1$) dan tabel *springback*. Namun rumus dan tabel *springback* tersebut tidak mencakup variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*). Sehingga rumus dan tabel *springback* tersebut hanya berlaku secara umum. Maka dari itu perlu dilakukan penelitian mengenai *springback* dengan variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*) untuk menyempurnakan rumus dan tabel tersebut.

Analisis dilakukan dengan uji coba *v-bending* menggunakan spesimen uji yang memiliki dimensi 1.87×35×150, sudut tekuk 90°, dan material pelat AISI 1005, serta diuji dengan variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*) menggunakan mesin *press AIDA direct servo formers DSF-C1-A series*.

Hasil dari analisis menyatakan bahwa besarnya *springback* akibat variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*) mempengaruhi pada besarnya *springback*, besarnya *springback* yang mendekati nilai ideal dengan menggunakan variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*) masing-masing adalah 1 *stroke*/menit dengan besar *springback* 1.304° dan 0 detik (tanpa *holding time*) dengan besar *springback* 1.232°. Selanjutnya untuk memprediksi besarnya *springback* menggunakan kedua variabel tersebut dapat menggunakan rumus persamaan regresi linear berganda $Y = -1.1519 + (-0.0039) \cdot x_1 + (-0.0093) \cdot x_2$ dengan ketentuan material yang digunakan yaitu pelat AISI 1005 dengan dimensi spesimen yaitu 1.87×35×150 mm, sudut tekuk 90°, radius tekuk R8.465 mm, proses penekukan dengan metode *bottoming bending*, *rolling direction* pelat uji searah dengan pengerolan, besar *clearance* antara *punch bending* dan *die bending* sama dengan tebal pelat (1.87 mm).

Kata kunci: *springback*, *v-bending*, kecepatan penekanan, waktu penahanan (*holding time*)

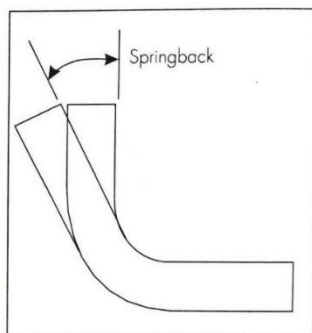
1. Pendahuluan

Dalam Industri manufaktur, teknologi semakin berkembang dengan pesat. Salah satunya yaitu perkembangan di bidang *sheet metal*. Pembuatan produk dengan *sheet metal* saat ini sudah merambah hampir ke semua bidang. Hasil dari *output*-nya pun sangat lah

bervariatif, mulai dari bentuk yang sederhana hingga bentuk yang kompleks, juga mulai dari keakurasian yang rendah hingga keakurasian yang tinggi. Ketercapaian produk dari segi apapun menjadi tujuan utama produsen dalam memproduksi produknya. Untuk produsen dengan tingkat produksi volume yang tinggi (masal), menjaga keseragaman bentuk dari

produk harus sangat diperhatikan, maka dari itu teknologi *presstool* digunakan oleh produsen untuk memproduksi produk mereka. *Presstool* merupakan alat untuk membentuk, memotong, atau gabungan dari keduanya dengan menerapkan penekanan pada material berupa *sheet metal*, *presstool* dapat menghasilkan benda dengan bentuk yang sederhana hingga bentuk yang rumit.

Pada praktiknya penggunaan mesin harus digunakan dengan kesesuaian kebutuhan dan dengan kaidah yang benar, pengaturan mesin yang sesuai dapat menghasilkan produk dengan kualitas baik yang sesuai dengan keinginan. Sehingga pengetahuan penggunaan mesin dan spesifikasi mesin harus dikuasai oleh pembuat. Ada banyak parameter yang ada pada suatu mesin *press* terutama pada mesin *press AIDA direct servo formers DSF-C1-A series*, salah satu diantaranya yaitu parameter kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*). Kedua parameter tersebut seringkali diabaikan oleh operator dalam proses pembuatannya. Namun bisa sangat memungkinkan bahwa penggunaan parameter kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*) berpengaruh untuk meminimalisir besarnya *springback*. *Springback* merupakan gaya balik yang ditimbulkan akibat pengaruh elastisitas bahan pelat yang mengalami proses pembentukan sehingga material cenderung ke posisi awalnya (lihat gambar 1.1), *Springback* sendiri terjadi hampir disemua proses pembentukan (*bending, forming, deep drawing, collar drawing, flanging, embossing, curling, coining, crimping*) pada *sheet metal*.



Gambar 1.1 *Springback*

Rumus umum untuk memprediksi besar *springback* biasanya menggunakan rumus $\left(\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i Y}{E t} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i Y}{E t} \right) + 1 \right)$ dan

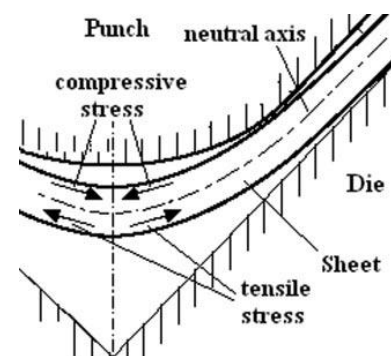
tabel *springback*. Akan tetapi rumus dan tabel tersebut tidak mencakup variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*). Sehingga rumus dan tabel *springback* tersebut hanya berlaku secara umum.

Oleh karena itu, pengetahuan mengenai *springback* dan analisis tentang *springback* sangat dibutuhkan untuk mengetahui perilaku *springback*. Salah satu cara yang digunakan untuk menganalisis *springback* adalah dengan uji coba *v-bending* di bawah pengaruh variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*). Hasil dari uji coba tersebut akan menghasilkan data *springback* pada material AISI 1005 sehingga data tersebut dapat digunakan sebagai referensi atau acuan untuk memprediksi besarnya *springback* menggunakan variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*).

2. Landasan Teori

2.1 Prinsip dari *Springback*

Gambar 2.1 mengilustrasikan distribusi tegangan pada lembaran pelat dalam proses penekukan sebelum tahap *unloading* yang menyebabkan fenomena *springback*. Lembaran pelat di sisi *punch* berada di bawah tegangan tekan, sedangkan materi di sisi *die* berada di bawah tegangan tarik. Sebagai hasil dari distribusi tegangan, material pelat pada daerah tegangan tekan akan mencoba untuk memperbesar dan material pada daerah tegangan tarik mencoba menyusut karena adanya sisa elastis melalui ketebalan pelat. Akibatnya, material pada area *bending* mencoba untuk bergerak ke posisi semula dan benda kerja yang ditekuk sedikit terbuka.



Gambar 2.1 Distribusi tegangan

Sebaliknya, fenomena *springback* negatif berasal dari pengaruh lain yang serupa dengan penjelasan sebelumnya, dalam keadaan tertentu. Fenomena *reversed bending* menghasilkan distribusi tegangan terbalik dibandingkan dengan distribusi tegangan di daerah *bending* pada umumnya. Oleh karena itu, tegangan tarik dan tekan masing-masing dihasilkan pada sisi *punch* dan *die*. Perbedaan karakteristik aliran material (*metal flow*) dalam berbagai radius sudut tekuk menyebabkan distribusi tegangan yang berbeda dan juga jumlah tegangan balik yang berbeda pada pelat.

Fenomena *springback* dapat terjadi oleh beberapa parameter yang digunakan saat proses penekukan, adapun parameter yang mempengaruhi besar *springback* dibagi menjadi 5 parameter utama, yaitu:

1. Teknik penekukan
2. *Bulk properties of materials*
3. *Mechanical properties of material*
4. *Toolings*
5. *Process condition*

2.2 Rumus Springback

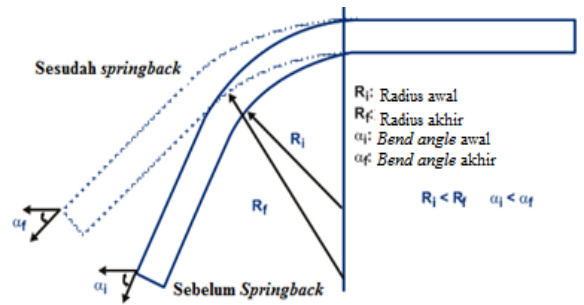
Suatu karakterisasi kuantitas pada besarnya *springback* adalah dengan menentukan *springback factor* (K_s), yang bisa ditentukan sebagai berikut. Dikarenakan *bend allowance* besarnya sama dengan sebelum dan sesudah penekukan, persamaannya diperoleh sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{bend allowance} &= \left(R_i + \frac{t}{2}\right) \alpha_i \\ &= \left(R_f + \frac{t}{2}\right) \alpha_f \end{aligned}$$

Dari persamaan tersebut, K_s ditetapkan seperti

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{\left(\frac{2R_i}{t}\right) + 1}{\left(\frac{2R_f}{t}\right) + 1}$$

Kondisi dimana $K_s=1$ mengindikasikan tidak ada *springback* yang terjadi dan $K_s=0$ mengindikasikan terjadinya pemulihan elastisitas material (benda kerja kembali ke bentuk semula tanpa terjadinya deformasi yang menyebabkan benda berubah bentuk dari bentuk awalnya).



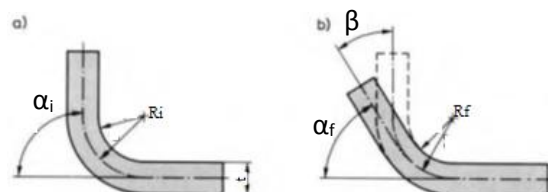
Gambar 2.2 *Springback* pada proses penekukan

Terminologi untuk *springback* pada proses penekukan (*bending*) dapat dilihat pada gambar 2.2 diatas. Dapat diperhatikan bahwa *bend angle* akhir (α_f) pada gambar lebih kecil ataupun dalam beberapa situasi *bend angle* akhir (α_f) menjadi lebih besar atau disebut dengan *springback* negatif

Dari pengujian tarik material, jumlah dari pemulihan elastisitas tergantung pada tingkat tegangan dan modulus elastisitas (E) dari material. Pemulihan elastisitas meningkat dengan tingkat tegangan dan dengan penurunan modulus elastisitas berbasis pada observasi ini, sebuah pendekatan rumus sudah dikembangkan untuk memprediksi *springback*, adapun rumus untuk memprediksi besar *springback* yaitu $\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i Y}{E t}\right)^3 - 3 \left(\frac{R_i Y}{E t}\right) + 1$. Dimana R_i adalah radius awal (mm), R_f adalah radius akhir (mm), Y adalah *yield strength* (N/mm^2), E adalah modulus *young* (N/mm^2), dan t adalah tebal pelat (mm).

2.3 Tabel Springback

Pada setiap proses penekukan (*bending*) fenomena *springback* terjadi, efek dari *springback* terjadi perubahan *bend angle* dari yang direncanakan. Hasilnya *bend angle* yang direncanakan menjadi lebih kecil. Keterangan gambar 2.3 dan tabel 2.1 dibawah ini bisa digunakan untuk memprediksi besar *springback* untuk material St dengan tegangan tarik maksimal R_m yaitu $300 N/mm^2$



Gambar 2.3 *Springback* pada bending, a) sebelum *springback*, b) sesudah *springback*

Tabel 2.1 Tabel *springback* (β)

t (mm)	Ri (mm)	β (°)
0.5 s.d. 0.7	1t s.d. 5t	5
0.8 s.d. 1.9	1t s.d. 5t	3
2 s.d. 4	1t s.d. 5t	1

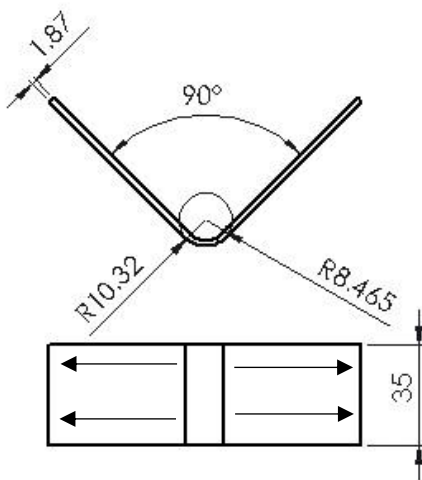
Tabel 3.1 Data sifat mekanis dari spesimen

Parameter Pengukuran	Rata-rata
0.2% Y.S.	221.967
Yield Strength (γ) [N/mm ²]	223.697
Tensile Strength (σ) [N/mm ²]	299.347
Elongation sebelum pelat putus (ϵ) [%]	52.97
Elongation setelah pelat putus (ϵ) [%]	38.87

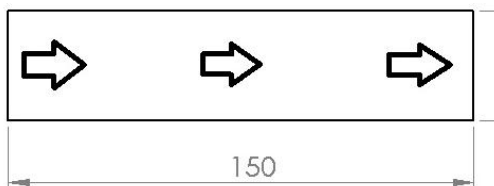
3. Metodologi Penelitian

3.1 Material

Material spesimen yang digunakan untuk uji *v-bending* yaitu material AISI 1005 dengan dimensi pelat 150×35×1.87 (mm). Spesimen ditekuk sebesar 90° dengan ukuran radius dalam sebesar R8.465 dan radius luar sebesar R10.32 serta arah pengerolan yaitu melintang atau searah dengan arah pengerolan dan diketahui sifat mekanis-nya sebagai berikut.



Gambar 3.1 Dimensi spesimen



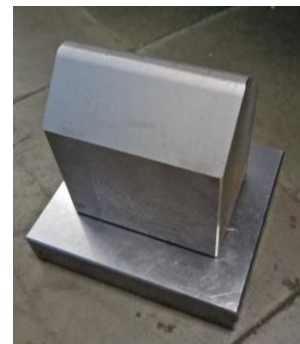
Gambar 3.2 Arah pengerolan dari spesimen

3.2 Pembuatan Tools

Tools yang dibuat yaitu *tools v-bending* yang terdiri dari 4 komponen utama yaitu, *upper late* dengan material DIN 1.0037, *punch bending* dengan material DIN 1.2510, *die bending* dengan material DIN 1.2510, dan *bottom plate* DIN 1.0037. Proses pembuatan dari masing-masing *tools* dikerjakan di bengkel Teknik Manufaktur Politeknik Manufaktur Bandung menggunakan mesin *milling aciera f4*, *milling cnc dalian*, gerinda datar, dan bor. *Tools* yang dibuat dibagi menjadi 2 bagian utama yaitu bagian bawah *tools* dan bagian atas *tools*. Bagian bawah *tools* terdiri dari *base plate*, *die bending* dan *pin locator* dan bagian atas terdiri dari *upper plate* dan *punch bending*. *Tools* yang dibuat sebagai berikut.



Gambar 3.3 *tools* bagian bawah



Gambar 3.4 *Tools* bagian atas

3.3 Uji Coba dan Pengukuran Spesimen

Proses uji coba *v-bending* dilakukan di laboratorium Teknik Manufaktur Politeknik Manufaktur Bandung menggunakan mesin *press AIDA direct servo formers DSF-C1-A series*. Variabel yang digunakan untuk proses uji coba pada analisis ini yaitu variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*). Besar variabel kecepatan adalah kecepatan minimum mesin 1 *stroke*/menit, kecepatan menengah mesin 28 *stroke*/menit, dan kecepatan maksimum mesin 56 *stroke*/menit, serta besar variabel waktu penahanan (*holding time*) masing-masing adalah 0 detik, 30 detik, dan 60 detik. Selanjutnya sudut yang terbentuk pada spesimen diukur menggunakan mesin CMM (*Coordinate Measuring Machine*) di laboratorium pengukuran jurusan Teknik Manufaktur.

4. Perhitungan dan Analisis

4.1 Prediksi Rumus *Springback*

Langkah awal penggunaan rumus *springback* yaitu menghitung besarnya modulus elastisitas dari spesimen *bending* yang digunakan, perhitungan *elongation* menggunakan rumus perbandingan antara *elongation* puncak sebelum pelat putus dan *elongation* setelah pelat putus. Adapun perhitungannya sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\text{sebelum plat putus}}}{\varepsilon_{\text{setelah plat putus}}} = \frac{52.97\%}{38.867\%} = 1.33\%$$

Sehingga modulus elastisitas yang didapat sebagai berikut.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{221.967}{1.33\%} = 16689.25 \text{ N/mm}^2$$

Selanjutnya modulus elastisitas yang sudah dihitung dimasukkan pada rumus *springback* untuk memprediksi besar radius akhir. Berikut merupakan perhitungan besar *springback* radius akhir.

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i \cdot Y}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i \cdot Y}{E \cdot t} \right) + 1$$

$$\frac{8.465}{R_f} = 4 \left(\frac{8.465 \times 223.697}{16689.25 \times 1.87} \right)^3 - 3 \left(\frac{8.465 \times 223.697}{16689.25 \times 1.87} \right) + 1$$

$$\frac{8.465}{R_f} = 0.819$$

$$R_f = 10.317$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung besar *springback* menggunakan rumus persamaan *k factor springback*. Dimana diketahui besar *bend angle* awal (α_i) yaitu 180° dikurangi sudut tekuk (89.98°) sehingga besar *bend angle* awal (α_i) adalah 90.02° atau 1.571 radian, sehingga perhitungannya sebagai berikut.

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{\left(\frac{2R_i}{t} \right) + 1}{\left(\frac{2R_f}{t} \right) + 1}$$

$$\alpha_f = 1.571 \times \frac{\left(\frac{2 \times 8.465}{1.87} \right) + 1}{\left(\frac{2 \times 10.317}{1.87} \right) + 1}$$

$$\alpha_f = 1.312 \approx 75.172^\circ$$

Sehingga besarnya prediksi *springback* yaitu selisih antara α_i dan α_f .

$$\text{Springback} = \alpha_i - \alpha_f$$

$$= 90.02^\circ - 75.172^\circ$$

$$= 14.848^\circ$$

Radius awal dan radius akhir serta besarnya *bend angle* awal (α_i) dan *bend angle* akhir (α_f) yang sudah diketahui, dapat digunakan untuk menghitung besarnya *k factor springback*. Berikut perhitungan *k factor springback*.

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{\left(\frac{2R_i}{t} \right) + 1}{\left(\frac{2R_f}{t} \right) + 1}$$

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{1.312}{1.571} = 0.835$$

4.2 Tabel *Springback*

Keterangan gambar 2.3 dan tabel 2.1 sebelumnya merupakan tabel untuk memprediksi besarnya *springback* dengan pengaruh material pelat, radius *punch* dan ketebalan pelat. Sehingga untuk memprediksi besarnya *springback* dengan rancangan analisis kali ini dapat Merujuk pada tabel 2.1 sebelumnya. Berikut merupakan prediksi menggunakan tabel *springback*.

Diketahui :

- Material AISI 1005 = 299.347 N/mm² (σ)
- Ketebalan material (t) = 1.87 mm.
- Radius tekuk (radius *punch*) = R8.465 mm.

Sehingga:

- Prediksi besarnya menggunakan tabel *springback* yaitu sebesar 3°.

Selanjutnya untuk mengetahui besar pengaruh prediksi *springback* menggunakan tabel *springback* ini maka langkah selanjutnya adalah menghitung besar *k factor springback*. Berikut merupakan perhitungan *k factor springback* menggunakan tabel *springback*.

$$\text{Springback} = 3^\circ \approx 0.052 \text{ radian}$$

- Sehingga besarnya *bend angle* akhir (α_f) adalah selisih antara *bend angel* awal (α_i) dan besar *springback*, dengan besar $\alpha_i = 90.02^\circ$ atau 1.571 radian. Berikut merupakan perhitungan untuk mencari besar α_f dan *k factor springback*

$$\begin{aligned} \text{springback} &= \alpha_i - \alpha_f \\ \alpha_f &= \alpha_i - \text{springback} \\ &= 1.571 - 0.052 \\ &= 1.519 \text{ radian} \\ K_s &= \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{1.519}{1.571} = 0.967 \end{aligned}$$

4.3 Analisis Hasil Pengukuran

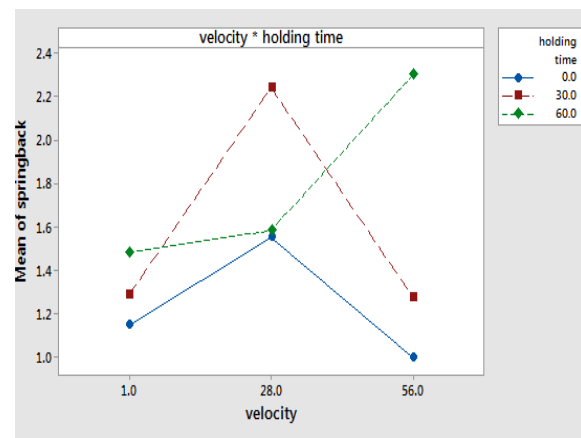
Tabel 4.1 Hasil pengukuran

No	Kecepatan (stroke/menit)	Holding time (s)	Rata-rata
1	1	0	1.148
2	1	30	1.285
3	1	60	1.481
4	28	0	1.553
5	28	30	2.243
6	28	60	1.584
7	28	0	0.997
8	56	30	1.273
9	56	60	2.302
			1.540

Dari Data hasil pengukuran (tabel 4.1) besarnya *springback* yang dicapai berbasis pada besarnya sudut *punch* yang sudah dibuat, besar sudut *punch* yang dibuat, pada hasil pengukuran sudut kali ini besarnya *springback* sangat dipengaruhi oleh faktor kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*) juga pada besarnya nilai dari kedua variabel yang diambil (level) bisa dilihat pada hasil pengukurannya yang berbeda-beda. Selanjutnya untuk melihat pengaruh dari kedua variabel secara bersamaan dan melihat pengaruh dari masing-masing variabel terhadap *springback* maka *interaction plot* dan *main effect plot* dibuat untuk melihat pengaruh tersebut. Pengolahan data untuk membuat *interaction plot* dan *main effect plot* yang dilakukan pada analisis kali ini menggunakan *software Minitab18*.

4.3.1 Interaction Plot

Untuk melihat apakah kedua variabel berpengaruh atau tidaknya terhadap *springback* maka data yang sudah didapat diolah menjadi *interaction plot*. Gambar 4.1 di bawah merupakan *interaction plot* dari data yang sudah di dapat.



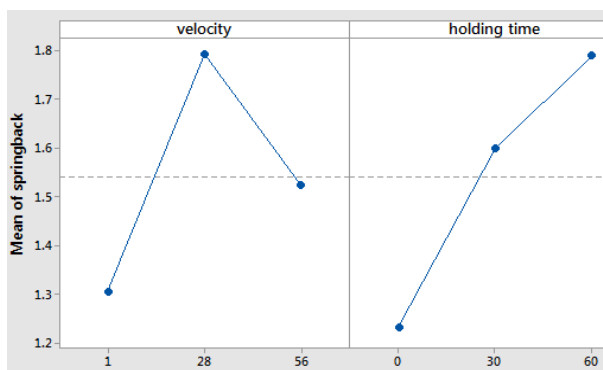
Gambar 4.1 Interaction plot

Interaction plot di atas mengidentifikasi adanya interaksi yang ditimbulkan oleh variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*) serta besarnya nilai kedua variabel tersebut mempengaruhi interaksi pada besarnya *springback* yang dihasilkan. Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa interaksi dari kedua variabel yang menghasilkan *springback* yang mendekati nilai yaitu dengan nilai variabel kecepatan 56 *stroke/menit* dan tanpa adanya

holding time dengan rata-rata 0.997° , nilai tersebut merupakan nilai yang mendekati ideal dibandingkan dengan interaksi dari besarnya dua variabel yang lain, sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan *springback* yang paling baik harus menggunakan variabel kecepatan penekanan 56 *stroke*/menit dan tanpa adanya *holding time*.

4.3.2 Main Effect Plot

Main effect plot digunakan untuk menguji perbedaan antara rata-rata besarnya variabel (level) terhadap satu atau lebih variabel. Ketika besarnya nilai variabel berbeda maka akan mempengaruhi respon yang berbeda pula. *Main effect plot* ini memberikan informasi mengenai tiap-tiap variabel secara individu mempengaruhi besarnya nilai respon atau untuk kasus ini mempengaruhi besarnya *springback*. Gambar 4.2 di bawah merupakan *main effect plot* dari data yang sudah di dapat.



Gambar 4.2 Main effect plot

Main effect plot di atas menjelaskan bahwa efek dari variabel kecepatan penekanan dan variabel *holding time* mempengaruhi besarnya *springback*, ditandai dengan grafik yang cenderung menaik keatas dari kedua variabel tersebut. Dari grafik *holding time*, semakin cepat waktu penahanan semakin ideal laju perubahan *springback* yang dihasilkan. Namun berbeda dengan kecepatan penekanan, pada kecepatan penekanan 28 *stroke*/menit besar *springback* berada di titik yang sangat tidak ideal dan menuju kecepatan 56 *stroke*/menit laju *springback* berubah kembali ke besar *springback* yang menuju nilai ideal.

Titik paling tinggi dari kedua variabel tersebut merupakan besar nilai *springback* yang mendekati nilai ideal. Titik paling tinggi untuk variabel kecepatan penekanan yaitu 1 *stroke*/menit dengan nilai *springback* sebesar

1.304° dan titik paling tinggi untuk variabel waktu penahanan (*holding time*) yaitu 0 detik (tanpa *holding time*) dengan nilai *springback* sebesar 1.232°. sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan hasil *springback* yang mendekati ideal (mendekati nilai 0°) yaitu menggunakan kecepatan penekanan sebesar 1 *stroke*/menit atau menggunakan variabel 0 detik (tanpa penekanan).

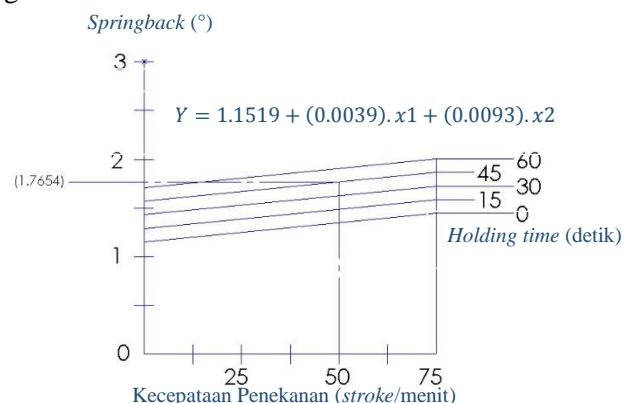
4.4 Rumus Regresi Linear Berganda

Dalam mengkaji hubungan antara beberapa variabel menggunakan analisis regresi, terlebih dahulu peneliti menemukan satu variabel yang disebut variabel tidak bebas dan satu atau lebih variabel bebas. Jika ingin dikaji hubungan atau pengaruh satu variabel bebas terhadap variabel tidak bebas, maka model regresi yang digunakan adalah model regresi linear sederhana. Kemudian jika ingin dikaji hubungan atau pengaruh dua atau lebih variabel bebas terhadap variabel tidak bebas, maka model regresi yang digunakan adalah model regresi linear berganda (*multiple linear regression model*).

Rumus persamaan regresi linear berganda ini dibuat untuk memprediksi besarnya *springback* dengan menggunakan variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*). Adapun rumus persamaan regresi linear berganda yang sudah dibuat berdasarkan data hasil uji coba yaitu :

$$Y = 1.1519 + (0.0039).x_1 + (0.0093).x_2$$

Untuk penyederhanaan penentuan prediksi *springback*, rumus regresi linear berganda dibuat menjadi data grafik, adapun grafik regresi linear berganda dapat dilihat pada gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4.3 Grafik regresi linear berganda

Dimana Y adalah besarnya *springback*, x1 yaitu variabel kecepatan penekanan, dan x2 yaitu variabel waktu penahanan (*holding time*). Selanjutnya rumus persamaan di uji dengan menggunakan besar variabel yang berbeda dengan besar variabel yang diambil untuk mengetahui kesesuaian nilai hasil prediksi dengan nilai aktualnya dan nantinya akan dibandingkan dengan prediksi besar *springback* dengan menggunakan rumus dan tabel *springback*. Berikut hasil percobaan diluar besar variabel yang digunakan.

4.4.1 Percobaan Rumus Persamaan Regresi Linear Berganda Diluar Besar Variabel

Untuk menguji rumus yang dibuat sesuai atau tidak maka dibutuhkan percobaan diluar besar variabel yang diambil.

a. Percobaan ke-1

Diketahui :

- Kecepatan Penekanan : 5 *stroke*/menit
- *Holding Time* : 15 detik

Maka :

$$Y = 1.1519 + (0.0039).x_1 + (0.0093).x_2$$

$$Y = 1.1519 + (0.0039).5 + (0.0093).15$$

$$Y = 1.3094^\circ$$

Hasil pengukuran menggunakan CMM untuk variabel kecepatan penekanan 5 *stroke*/menit dan *holding time* 15 detik yaitu 91.679° atau dengan nilai *springback* 1.699° atau 0.030 radian, sehingga selisih antara nilai aktual dengan menggunakan rumus yaitu $1.699^\circ - 1.3094^\circ = -0.3896^\circ$.

Selanjutnya nilai k *factor springback* dari percobaan ke-1 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{springback} &= ai - \alpha f \\ \alpha f &= ai - \text{springback} \\ &= 1.571 - 0.030 \\ &= 1.541 \text{ radian} \\ K_s &= \frac{\alpha f}{ai} = \frac{1.541}{1.571} = 0.981 \end{aligned}$$

b. Percobaan ke-2

Diketahui :

- Kecepatan Penekanan : 50 *stroke*/menit

- *Holding Time* : 45 detik

Maka :

$$Y = 1.1519 + (0.0039).x_1 + (0.0093).x_2$$

$$Y = 1.1519 + (0.0039).50 + (0.0093).45$$

$$Y = 1.7504^\circ$$

Hasil pengukuran menggunakan CMM untuk variabel kecepatan penekanan 50 *stroke*/menit dan *holding time* 45 detik yaitu 92.184° atau dengan besar *springback* 2.204° atau 0.038 radian, sehingga selisih antara nilai aktual dengan menggunakan rumus yaitu $2.204^\circ - 1.7504^\circ = 0.4536^\circ$.

Selanjutnya nilai k *factor springback* dari percobaan ke-1 yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{springback} &= ai - \alpha f \\ \alpha f &= ai - \text{springback} \\ &= 1.571 - 0.038 \\ &= 1.533 \text{ radian} \\ K_s &= \frac{\alpha f}{ai} = \frac{1.533}{1.571} = 0.976 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil dari percobaan, rumus regresi linear berganda yang telah dibuat bisa digunakan dengan beberapa ketentuan, dimana ketentuan harus merujuk kepada semua aspek yang ada pada penelitian ini, adapun ketentuannya yaitu.

- Material yang digunakan pelat AISI 1005 dengan material properties yang sama dengan hasil pengujian tarik.
- Dimensi spesimen yaitu $1.87 \times 35 \times 150$ mm.
- Radius tekuk yang digunakan yaitu 8.465 mm.
- Sudut yang ditekuk hanya 90° .
- Proses penekukan menggunakan *tools v-bending* dengan metode *bottoming bending*.
- *Rolling direction* (arah Pengerolan) dari pelat uji searah dengan pengerolan.
- Besarnya *clearance* antara *punch bending* dan *die bending* yaitu sama dengan tebal pelat (1.87 mm)

5. Kesimpulan

1. Berdasarkan *main effect plot* besar variabel kecepatan penekanan yang menghasilkan *springback* mendekati besar ideal yaitu 1 *stroke*/menit dengan nilai *springback* sebesar 1.304° dan besar variabel waktu penahanan (*holding time*) yang menghasilkan *springback* mendekati besar ideal yaitu 0 detik (tanpa *holding time*) dengan nilai *springback* sebesar 1.232°.
2. Berdasarkan hasil analisis pengukuran, untuk menentukan besar *springback* yang terjadi terhadap variabel kecepatan penekanan dan waktu penahanan (*holding time*) dapat dihitung menggunakan rumus persamaan regresi linear berganda $Y = 1.1519 + (0.0039).x_1 + (0.0093).x_2$
3. Besarnya nilai *springback* menggunakan rumus regresi linear berganda cukup mempengaruhi pada besarnya *springback*. Besarnya *springback* dengan rumus regresi linear berganda tersebut lebih mendekati ideal dibandingkan dengan rumus *springback* dan tabel *springback*. Adapun hasil perbandingan bisa dilihat pada tabel 5.1 dan tabel 5.2 berikut.

Tabel 5.1 Perbandingan hasil *springback*

Kecepatan (<i>stroke</i> /menit)		5	50
<i>Holding time</i> (detik)		15	45
Hasil <i>springback</i> (°)	Rumus regresi linear berganda	1.3094	1.7504
	Rumus umum <i>springback</i>	14.848	14.848
	Tabel <i>springback</i>	3	3

Tabel 5.1 Perbandingan k factor *springback*

Kecepatan (<i>stroke</i> /menit)		5	50
<i>Holding time</i> (detik)		15	45
Hasil k factor <i>springback</i>	Rumus regresi linear berganda	0.981	0.976
	Rumus umum <i>springback</i>	0.835	0.835
	Tabel <i>springback</i>	0.967	0.967

DAFTAR PUSTAKA

1. Luchsinger, H.R. (1984). *Tool design*. Bandung: Politeknik Mekanik Swiss-ITB
2. Tschaetsch, H. *Metal forming practise*. Dresden: View Verlag
3. Suchy, I. (2006). *Handbook of die design*. New york: Mc Graw-Hill Hand Books
4. Budiarto. (2012). *Sheet metal forming*. Bandung: Politeknik Manufaktur Bandung
5. Kalpakjian, S. dan Schmid, S.R. (2008). *Manufacturing processes for engineering and technology*. Jurong: Pearson Education South Asia Pte Ltd
6. Choudhury, L.A. dan Ghomi, V. (2013). *Springback reduction of aluminium sheet in v-bending dies*. (jurnal). Kuala lumpur: SAGE
7. Suprianto, J. (2000). *Statistik-teori dan aplikasi*. Jakarta: Erlangga
8. Kutner Nachtsheim, Neter, Li. (2004). *Applied linier statistical models*. New york: Mc Graw Hill Book Company
9. Dieter, G.E. (1987). *Mechanical Metallurgy*. New York : Mc Graw Hill Book Company
10. Ostegaard, D.E. (1963). *Basic die making*. USA: McGraw-Hill Book Company
11. Rahmani, B. Alinejad, G. dkk. (2009). *An investigation on springback/negative springback phenomena using finite element method and experimental approach*. (jurnal). Mazandaran: SAGE

