

Analisis *Springback* Pelat ST 37 dengan Tegangan Tarik 343 N/mm² Tebal 1,98 mm Pada Proses V-Bending dengan Sudut 120°, 135°, Dan 150° Serta Arah Tekukan Berlawanan *Grain* Direction Pelat

Hartono Widjaja¹, Rizq Rafi Khairuman²

^{1,2} Jurusan Teknik Manufaktur, Politeknik Manufaktur Bandung

Email: hartono@polman-bandung.ac.id

Informasi Artikel:

ABSTRAK

Received:
17 Juli 2024

Accepted:
17 Maret 2025

Available:
29 April 2025

Springback adalah penyimpangan sudut tekuk yang cenderung kembali ke posisi semula akibat sisa elastisitas material pada daerah tekukan yang melewati batas plastis material. Lima parameter utama yang memengaruhi *springback* adalah profile /die, work material, material properties, bending technique, dan process condition. Penelitian ini fokus pada sudut *punch* yang mempengaruhi besarnya *springback*. Pengujian dilakukan dengan sudut *punch* 120°, 135°, dan 150° menggunakan mesin press AIDA *direct servo formers* DSF-C1-A series. Hasil menunjukkan semakin besar sudut *punch*, semakin kecil *springback*- nya. Semua sudut menghasilkan nilai *springback* negatif, dengan sudut *punch* 150° sebesar -0.990° paling mendekati sudut yang dituju. Besar *springback* dapat dihitung menggunakan rumus regresi linear sederhana. Penyimpangan sudut akibat *springback* dapat digunakan sebagai nilai kompensasi dalam pembuatan *bending tool* untuk mendapatkan hasil *bending* yang diinginkan.

Kata Kunci:

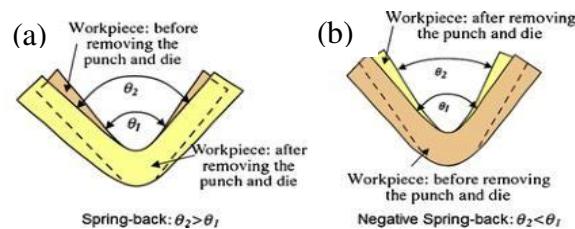
ABSTRACT

Springback
Sudut *punch*
v-bending

Springback is a deviation in the bending angle which tends to return to its original position due to the remaining elasticity of the material in the bending area which crosses the plastic material boundary. The five main parameters that influence springback are /die profile, work material, material properties, bending technique, and process conditions. This research focuses on the angle of impact which influences the amount of springback. Tests were carried out with angles of 120°, 135°, and 150° using an AIDA direct servo press machine forming the DSF-C1-A series. The results show that the larger the angle, the smaller the springback. All angles produce negative springback values, with the 150° strike angle of -0.990° closest to the target angle. The amount of springback can be calculated using a simple linear regression formula. The angular deviation due to springback can be used as a compensation value in making bending tools to obtain the desired bending results.

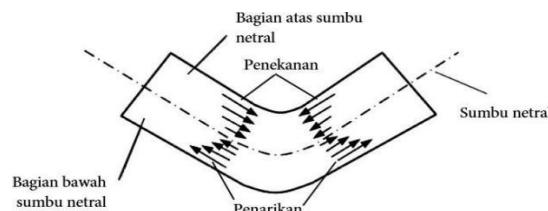
1 PENDAHULUAN

Pada proses penekukan (*bending*) atau pembentukan pelat dengan cara ditekuk, pelat yang ditekuk akan mengalami perubahan bentuk pada dimensi sudut. Dalam proses penekukan akan terjadi fenomena *springback* yaitu fenomena yang terjadi disebabkan oleh gaya balik beberapa derajat menuju ke bentuk semula yang dipengaruhi oleh elastisitas bahan pelat yang mengalami pembentukan sehingga bentuk atau sudut yang diinginkan tidak tercapai. *Springback* yang ditimbulkan dapat berupa kecenderungan kembalinya bentuk benda menuju bentuk semula sehingga pada benda kerja sudut tekuk yang terbentuk lebih besar dari sudut tekuk yang diinginkan (*springback* positif) atau bahkan sudut tekuk yang terbentuk kurang dari sudut tekuk yang diinginkan (*springback* negatif) seperti pada Gambar 1.



Gambar 1 (a) *Springback* Positif dan (b) *Springback* Negatif

Proses terjadinya *springback* disebabkan oleh perbedaan tegangan pada daerah tekukan bagian atas sumbu netral yang mengalami penekanan menuju permukaan dalam tekukan dan daerah tekukan bagian bawah sumbu netral yang mengalami penarikan menuju permukaan luar tekukan sehingga mengakibatkan pemuluran yang berbeda seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Penekukan

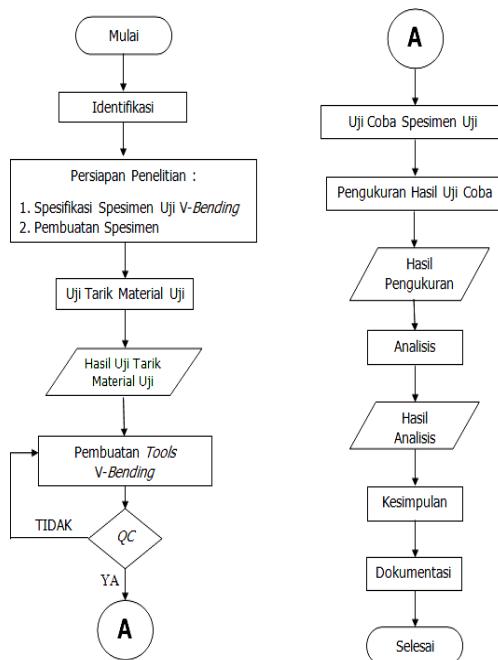
Imtiaz A Choudhury and Vahid Ghomi menyatakan bahwa lima parameter utama yang mempengaruhi *springback*, yaitu *punch/die profile* (sudut *punch*, radius *punch*, die radius, *punch/die geometry*, dan *blank holder geometry*), *workmaterial* (dimensi pelat, kualitas permukaan, dan tebal material.), *material properties* (modulus young, tegangan tarik, tipe material, strain hardening, material texture, dan poisson's ratio), *bending technique* (*arc bottoming*, *double bending*, *die piercing*, dan *Tension & bending*), dan *process condition* (pelumasan, *pad force*, dan *sheet preheating*) [7].

Pada penilitian sebelumnya telah dilakukan eksperimen proses v-bending dengan menggunakan sudut 90° saja dengan hasil *springback* negatif $-0,729^\circ$. Penelitian kali ini penulis akan membahas salah satu parameter yang menjadi penyebab *springback* yaitu sudut *punch* karena pada kehidupan sehari-hari produk sheet metal yang dibentuk memiliki berbagai macam sudut. Pada penelitian saat ini penulis akan lakukan yaitu menganalisis besar *springback* yang terjadi pada sudut 120° , 135° dan 150° karena sudut tersebut merupakan sudut istimewa. Arah sumbu tekukan berpotongan dengan arah *grain direction* atau *rolling direction* material dengan proses pembuatan pelat secara *hot roll* dan menggunakan parameter dari penelitian sebelumnya. Dengan melakukan percobaan tersebut, diharapkan dapat mengetahui besar *springback* yang terjadi pada sudut yang diteliti oleh penulis dan membandingkan antara nilai aktual *springback* yang dihasilkan dari hasil percobaan dengan nilai *springback* yang dihasilkan dari perhitungan melalui rumus umum *springback*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Diagram Alir Penelitian

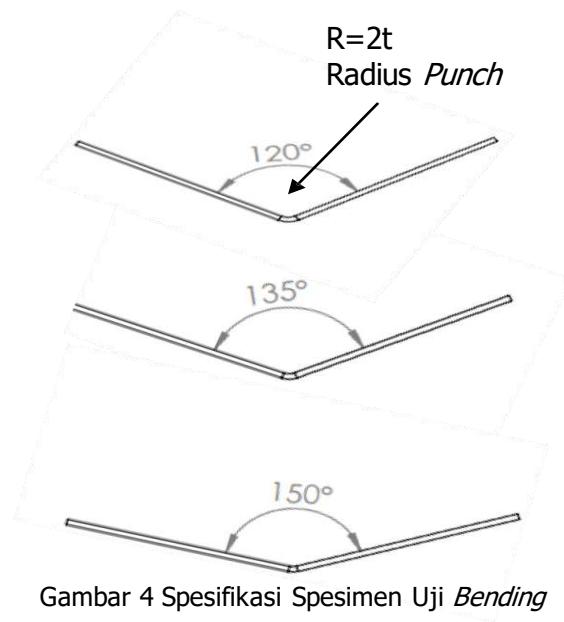
Gambar 3 menunjukkan diagram alir penelitian yang diawali dari mengidentifikasi tuntutan sistem berdasarkan masalah. Kemudian dilakukan persiapan penelitian dengan menentukan spesifikasi dan spesimen uji coba. Tahap selanjutnya yakni melakukan uji penarikan material untuk mendapatkan hasil tarik uji sehingga dapat masuk ke proses pembuatan *Tools V-Bending* sebagaimana Gambar 3.



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

2.2 Material

Material yang digunakan untuk uji v-bending ini yaitu ST37 dengan dimensi pelat $140 \times 45 \times 1,98$ (mm). Spesimen ditekuk sebesar 120° , 135° , dan 150° dengan ukuran *radius* sebesar $2t$ dan arah sumbu tekukan berpotongan dengan arah penggerolan seperti pada gambar 3 serta tabel 1 untuk data sifat mekanis spesimen bahan tersebut.

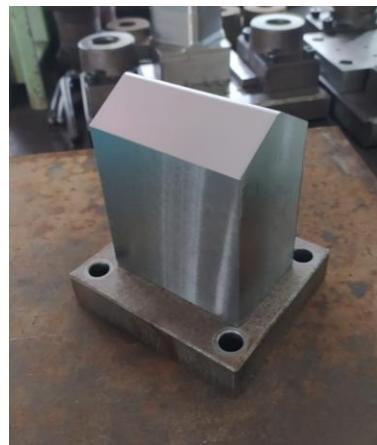
Gambar 4 Spesifikasi Spesimen Uji *Bending*

Tabel 1 Data sifat mekanis spesimen

Parameter Pengukuran	Rata-Rata
$Y_{0.02}$ (0.02 Yield Strength) [N/mm ²]	263.5863
Modulus Young [N/mm ²]	51173.76
Tensile Strength [N/mm ²]	343.6495
Elongation [%]	25.8

2.3 Pembuatan *Tools*

Pembuatan *tools* diperlukan dalam analisis ini untuk menghasilkan produk yang dapat dianalisis sesuai dengan spesifikasi. *Tools* yang dibuat adalah *v-bending* yang terdiri dari 4 komponen utama yaitu, *upper plate* dengan material DIN 1.0037, *bending* dengan material DIN 1.2379, *die bending* dengan material DIN 1.2379, dan *bottom plate* DIN 1.0037. Proses pembuatan dari masing-masing *tools* dilakukan di Laboratorium Teknik Manufaktur Politeknik Manufaktur Bandung menggunakan mesin milling aciera f4, milling CNC Dalian, gerinda datar Harig, dan bor. *Tools* yang dibuat dibagi menjadi dua bagian utama yaitu *tools* bagian bawah dan *tools* bagian atas. *Tools* bagian bawah terdiri dari *bottom plate*, *die bending* dan *stop pin* dan *tools* bagian atas terdiri dari *upper plate* dan *punch bending*. *Tools* yang dibuat adalah sebagai berikut.



Gambar 5 *Tools* Bagian Atas



Gambar 6 *Tools* Bagian Bawah

2.4 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 besar sudut *punch* yaitu 120°, 135° dan 150°. Dua parameter yang digunakan dalam uji coba adalah *holding time* 0 detik dan kecepatan penekanan (*speed*) adalah 100 mm/s atau 17 *stroke* per menit. Selanjutnya sudut yang terbentuk pada spesimen diukur menggunakan mesin CMM (*Coordinate Measuring Machine*) di Laboratorium Pengukuran Jurusan Teknik Manufaktur.

3. HASIL

3.1 Prediksi Rumus *Springback*

3.1.1 Sudut 120°

Langkah awal dalam menentukan besar *springback* melalui rumus *springback* adalah menentukan besar *Rf* berdasarkan data-data yang telah didapatkan yaitu salah satunya dengan radius sebesar 3.96 mm. Berikut adalah perhitungan besar *Rf*.

$$\frac{Ri}{Rf} = 4 \left(\frac{Ri \cdot Y}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \left(\frac{Ri \cdot Y}{E \cdot t} \right) + 1$$
$$\frac{3,96}{Rf} = 4 \left(\frac{3,96 \cdot 263,586}{51173,76 \cdot 1,98} \right)^3 - 3 \left(\frac{3,96 \cdot 263,586}{51173,76 \cdot 1,98} \right) + 1$$
$$\frac{3,96}{Rf} = 0,969$$

$$Rf = 4,08$$

Setelah radius akhir didapatkan kemudian sudut akhir dapat ditentukan menggunakan rumus k faktor *springback* dengan diketahui besar *bend angle* awal (α_i) yaitu 180° dikurangi sudut tekuk yaitu $119,978^\circ$ sehingga besar *bend angle* awal (α_i) adalah $60,022^\circ$ atau 1.047 radian seperti perhitungannya sebagai berikut.

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

$$\begin{array}{r} 2 \cdot 3,96 \quad +1 \\ \left(\frac{1,98}{1,98}\right) \\ \hline a_f = 1,047 \times 2 \cdot 4,08 \\ \left(\frac{1,98}{1,98}\right) +1 \\ af = 1,022 \text{ rad} = 58,55^\circ \end{array}$$

Besar prediksi *springback* dapat diketahui melalui selisih *bend angle* akhir (α_f) dengan *bend angle* awal (α_i):

$$Springback = \alpha_i - \alpha_f$$

$$Springback = 60,002^\circ - 58,550^\circ = 1,452^\circ$$

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

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{58,550^\circ}{60,002^\circ} = 0,975$$

3.1.2 Sudut 135°

Langkah awal dalam menentukan besar *springback* melalui rumus *springback* adalah menentukan besar R_f berdasarkan data-data yang telah didapatkan yaitu salah satunya dengan radius sebesar 3.96 mm. Berikut adalah perhitungan besar R_f .

$$\begin{aligned} \frac{R_i}{R_f} &= 4 \left(\frac{R_i \cdot Y}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i \cdot Y}{E \cdot t} \right) + 1 \\ \frac{3,96}{R_f} &= 4 \left(\frac{3,96 \cdot 263,586}{51173,76 \cdot 1,98} \right)^3 - 3 \left(\frac{3,96 \cdot 263,586}{51173,76 \cdot 1,98} \right) + 1 \\ \frac{3,96}{R_f} &= 0,969 \\ R_f &= 4,08 \end{aligned}$$

Setelah radius akhir didapatkan kemudian sudut akhir dapat ditentukan menggunakan rumus k faktor *springback* dengan diketahui besar *bend angle* awal (α_i) yaitu 180° dikurangi sudut tekuk yaitu $134,999^\circ$ sehingga besar *bend angle* awal (α_i) adalah $45,001^\circ$ atau $0,785$ radian seperti perhitungannya sebagai berikut.

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

"Analisis *Springback* Pelat ST 37 Dengan Tegangan Tarik 343 N/mm² Tebal 1,98 mm Pada Proses V-Bending Dengan Sudut 120°, 135°, Dan 150° Serta Arah Tekukan Berlawanan Grain Direction Pelat"

$$af = \frac{\frac{2 \cdot 3,96}{1,98} + 1}{0,785 \times \frac{2 \cdot 4,08}{1,98} + 1}$$

$$af = 0,766 \text{ rad} = 43,880^\circ$$

Besarnya prediksi *springback* dapat diketahui melalui selisih *bend angle* akhir (af) dengan *bend angle* awal (ai)

$$Springback = \alpha_i - \alpha_f$$

$$Springback = 45,001^\circ - 43,880^\circ = 1,121^\circ$$

Radius awal, radius akhir, *bend angle* awal (ai) dan *bend angle* akhir (af) yang sudah diketahui, dapat digunakan untuk menghitung k faktor *springback*. Berikut perhitungan k faktor *springback*.

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{43,880^\circ}{45,001^\circ} = 0,975$$

3.1.3 Sudut 150°

Langkah awal dalam menentukan besar *springback* melalui rumus *springback* adalah menentukan besar Rf berdasarkan data-data yang telah didapatkan yaitu salah satunya dengan radius sebesar 3.96 mm. Berikut adalah perhitungan besar Rf.

$$\frac{R_f}{R_f} = \frac{\frac{R_i \cdot Y^3}{E \cdot t} - 3 \left(\frac{R_i \cdot Y}{E \cdot t} \right) + 1}{4 \left(\frac{3,96 \cdot 263,586}{51173,76 \cdot 1,98} \right)^3 - 3 \left(\frac{3,96 \cdot 263,586}{51173,76 \cdot 1,98} \right) + 1}$$

$$\frac{3,96}{R_f} = 0,969$$

$$R_f = 4,08$$

Setelah radius akhir didapatkan kemudian sudut akhir dapat ditentukan menggunakan rumus *k factor springback* dengan diketahui besar *bend angle* awal (ai) yaitu 180° dikurangi sudut tekuk yaitu 149,992° sehingga besar *bend angle* awal (ai) adalah 30,008 atau 0,523 radian seperti perhitungannya sebagai berikut.

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

$$af = 0,523 \times \frac{\left(\frac{2 \cdot 3,96}{1,98} + 1 \right)}{\left(\frac{2 \cdot 4,08}{1,98} + 1 \right)}$$

$$af = 0,510 \text{ rad} = 29,220^\circ$$

Besar prediksi *springback* dapat diketahui melalui selisih *bend angle* akhir (α_f) dengan *bend angle* awal (α_i) $Springback = \alpha_i - \alpha_f$

$$Springback = 30,008^\circ - 29,220^\circ = 0,788^\circ$$

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

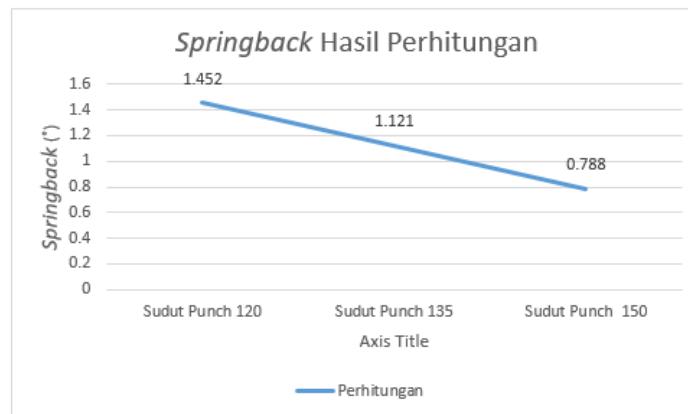
$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{29,220^\circ}{30,008^\circ} = 0,973$$

3.2 Analisis hasil pengukuran

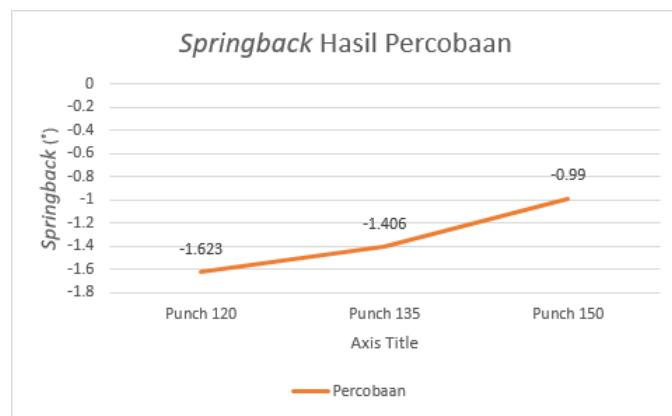
Tabel 2 Hasil Pengukuran

No	Sudut Punch	Rata-Rata Springback (°)
1	120°	-1,623
2	135°	-1,406
3	150°	-0,990

Pada hasil pengukuran sudut kali ini besarnya *springback* sangat dipengaruhi oleh faktor sudut . Data tersebut dapat diolah menjadi sebuah grafik *springback* terhadap sudut pada perhitungan dan percobaan seperti grafik di bawah ini.



Gambar 7 *Springback* Hasil Perhitungan



Gambar 8 *Springback* Hasil Percobaan

Berdasarkan Gambar 6 grafik hasil perhitungan, besar hasil *springback* menurun seiring besarnya sudut *punch* juga meningkat dan bernilai positif mendekati nol karena per, serta pada Gambar 7 grafik hasil percobaan dapat dilihat bahwa arah pergerakan grafik meningkat atau semakin kecil hasil *springback* nya seiring besar sudut *punch* juga meningkat. Namun, peningkatan grafik pada hasil percobaan menghasilkan nilai negatif yang mendekati nol. Hasil negatif mengartikan bahwa *springback* menghasilkan *springback* negatif yang menunjukkan sudut yang dihasilkan kurang dari sudut yang dituju (sudut *punch*). Sudut *punch* yang menghasilkan nilai *springback* negatif terbesar adalah sudut *punch* 120° sebesar -1,623° dan *springback* negatif terkecil oleh sudut *punch* 150° sebesar -0,990° sehingga menjadikan sudut *punch* 150° adalah sudut *punch* yang menghasilkan *springback* terdekat dengan sudut yang dituju atau sudut *punch* 150°.

Pada kasus ini terdapat perbedaan fisik pada produk atau pelat yang ditekuk yaitu *springback* negatif. Berdasarkan rumus umum *springback*, hasil perhitungan akan selalu menghasilkan *springback* yang positif. Artinya rumus tersebut dapat digunakan pada proses air bending yang menghasilkan *springback* bernilai positif. Namun pada percobaan ini menggunakan proses v-bending yang dapat menyebabkan *springback* bernilai negatif akibat adanya sifat deformasi material yang terjadi tepat setelah *punch* menekan pelat pada die. Dengan kata lain, pelat dijepit pada *punch* dan die.

Apabila dihubungkan dengan hasil perhitungan *springback*, nilai hasil perhitungan *springback* memiliki pergerakan menurun mendekati nol seiring dengan membesarnya sudut tetapi hasilnya positif daripada hasil percobaan. Nilai *springback* hasil percobaan yang paling mendekati perhitungan *springback* adalah pada sudut *punch* 150° dengan selisih 1,778°.

3.3 Rumus Regresi Linear

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.

Rumus persamaan regresi linear sederhana ini dibuat untuk memprediksi besarnya *springback* dengan menggunakan variabel sudut *punch*. Adapun rumus persamaan regresi linear sederhana yang sudah dibuat berdasarkan data hasil uji coba yaitu:

$$\hat{Y} = 0,021X - 4.188$$

Di mana Y adalah besarnya *springback* dan X yaitu variabel sudut *punch*. Selanjutnya rumus persamaan dicoba dengan menggunakan beberapa besar variabel yang diuji coba untuk mengetahui kesesuaian nilai hasil prediksi dengan nilai aktualnya dan nantinya akan dibandingkan dengan prediksi besar *springback* dengan menggunakan rumus. Berikut hasil percobaan dengan beberapa variabel yang digunakan.

3.3.1 Percobaan rumus regresi linear

Untuk menguji persamaan rumus yang dibuat sesuai atau tidak maka dibutuhkan percobaan menggunakan variabel sudut *punch* yaitu:

a. Percobaan ke-1

Apabila diketahui besar sudut *punch* adalah 120°, besar sudut tersebut disubtitusikan kedalam persamaan rumus regresi linear.

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= 0,021X - 4.188 \\ \hat{Y} &= 0,021(120) - 4.188 \\ \hat{Y} &= -1,668^\circ \end{aligned}$$

Hasil rata-rata pengukuran menggunakan CMM untuk variabel sudut *punch* 120° yaitu 118,354° atau dengan nilai *springback* -1.623° atau 0.028 radian sehingga selisih antara nilai aktual dengan menggunakan rumus yaitu -1.623° - (-1.668°) = 0.045°

b. Percobaan ke-2

Apabila diketahui besar sudut *punch* adalah 135° , maka besar sudut *punch* tersebut disubtitusikan kedalam persamaan rumus regresi linear.

$$\begin{aligned}Y^* &= 0,021X - 4.188 \\Y^* &= 0,021(135) - 4.188 \\Y^* &= -1,353^\circ\end{aligned}$$

Hasil rata-rata pengukuran menggunakan CMM untuk variabel sudut *punch* 135° yaitu $133,592^\circ$ atau dengan nilai *springback* -1.406° atau $0,024$ radian sehingga selisih antara nilai aktual dengan menggunakan rumus yaitu $-1.406^\circ - (-1.355^\circ) = 0,053^\circ$

c. Percobaan ke-3

Apabila diketahui besar sudut *punch* adalah 150° , maka besar sudut *punch* tersebut disubtitusikan ke dalam persamaan rumus regresi linear.

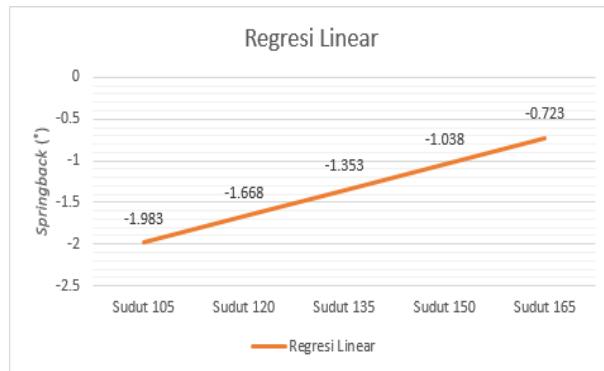
$$\begin{aligned}Y^* &= 0,021X - 4.188 \\Y^* &= 0,021(150) - 4.188 \\Y^* &= -1,038^\circ\end{aligned}$$

Hasil rata-rata pengukuran menggunakan CMM untuk variabel sudut *punch* 150° yaitu $149,001^\circ$ atau dengan nilai *springback* $-0,990^\circ$ atau $0,017$ radian sehingga selisih antara nilai aktual dengan menggunakan rumus yaitu $-0,990^\circ - (-1,038^\circ) = 0,048^\circ$

3.3.2 Pembuktian Rumus

Pembuktian rumus dilakukan melalui percobaan menggunakan sudut *punch* diluar dari variabel yang telah ditentukan yaitu dengan sudut *punch* sebesar 105° dan 160° .

$$\begin{aligned}Y^* &= 0,021X - 4.188 \\Y^* &= 0,021(105) - 4.188 \\Y^* &= -1.983 \\Y^* &= 0,021X - 4.188 \\Y^* &= 0,021(160) - 4.188 \\Y^* &= -0,828\end{aligned}$$



Gambar 9 Grafik *Springback* Terhadap Sudut *Punch* dengan Pembuktian

Dari pembuktian rumus di atas, rumus regresi linear terbukti untuk penggunaan dalam menentukan penyimpangan *springback*. Dapat dilihat dari grafik diatas pembuktian rumus dengan garis regresi masih berada pada garis regresi. Rumus regresi linear yang telah dibuat dapat digunakan dengan

"Analisis Springback Pelat ST 37 Dengan Tegangan Tarik 343 N/mm² Tebal 1,98 mm Pada Proses V-Bending Dengan Sudut 120°, 135°, Dan 150° Serta Arah Tekukan Berlawanan Grain Direction Pelat"

beberapa ketentuan, dimana ketentuan harus merujuk kepada semua aspek yang ada pada penelitian ini, adapun ketentuannya yaitu:

1. Material yang digunakan plat ST 37 atau material *properties* yang sama dengan hasil pengujian tarik.
2. Tebal pelat yang ditekuk adalah 1,98mm
3. Sudut yang ditekuk yaitu 120°, 135° dan 150°.
4. *Holding time* 0 detik
5. Kecepatan penekanan 100mm/s atau 17 spm (*stroke per minute*)
6. Proses penekukan menggunakan *tools* metode *v-bending*
7. Arah sumbu tekukan pelat berpotongan dengan arah penggerolan (*grain direction*).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pada bab sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan di antaranya:

1. Sudut *punch* berpengaruh terhadap *springback* yang menghasilkan grafik semakin besar sudut *punch* semakin kecil pula *springback*-nya mendekati nol. Namun semua sudut yaitu 120°, 135°, dan 150° menghasilkan nilai *springback* negatif yaitu sebesar -1,623°, -1,406°, dan -0,990°.
2. Sudut *punch* yang menghasilkan besar *springback* mendekati sudut yang dituju (sudut) adalah pada sudut *punch* 150° sebesar -0,990° namun bernilai negatif.
3. Untuk menentukan besar *springback* yang terjadi terhadap sudut *punch* dapat dihitung menggunakan rumus regresi linear sederhana $\hat{Y}=0,021X-4.188$ di mana $\hat{Y}=\text{springback}(\text{°})$ dan $X = \text{sudut punch}$ (mm) dengan ketentuan: material yang digunakan memiliki material properties yang sama dengan hasil pengujian tarik; tebal pelat 1,98 mm; sudut 120°, 135°, dan 150°; holding time 0 detik; kecepatan penekanan 100mm/s; menggunakan proses *v-bending*; dan arah tekukan berpotongan dengan arah penggerolan.
4. Besarnya nilai *springback* menggunakan rumus regresi linear cukup memengaruhi besarnya *springback*. Besarnya *springback* dengan rumus regresi linear tersebut lebih mendekati hasil percobaan dibandingkan dengan rumus umum *springback* karena rumus tersebut selalu menghasilkan nilai *springback* positif. Sedangkan pada percobaan ini menggunakan proses *v-bending* menghasilkan nilai *springback* negatif. Perbandingan hasil *springback* dapat dilihat pada Tabel 3 yang memiliki selisih antara besar *springback* hasil rumus regresi linear dan hasil percobaan adalah 0,045° Sedangkan selisih antara besar *springback* hasil rumus umum dan hasil percobaan adalah 3.075°.

Tabel 3 Perbandingan *Springback*

Hasil <i>Springback</i>	Sudut Punch	120°	135°	150°
	Rumus Umum <i>Springback</i> (°)	1,452	1,121	0,788
Hasil Percobaan (°)	-1,623		-1,406	-0,990
Rumus Regresi Linear (°)	-1,668	-1,353	-1,038	

5. REFERENSI

- [1] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufacturing Processes for Engineering and Technology*. Jurong: Pearson Education South Asia Pte Ltd.
- [2] Ostergaard, D. E. (1966). *Basic Diemaking*. USA: McGraw-Hill Book Company.
- [3] Tschaetsch, H. (2005). *Metal Forming Practise*. Dresden: Springer.

- [4] Luchsinger, H. R. (1984). *Tool Design 2*. Bandung: Politeknik Mekanik Swiss-ITB.
- [5] Smith, D. A. (1990). *Die Design Handbook*. Michigan: Society of Manufacturing Engineers.
- [6] Kumar A, Viswanath P, Mahesh K, Swati M, Kumar PM, Abhijit A, Singh S. (2010) *Prediction of springback in V-bending and design of dies using finite element simulation*. International Journal of Materials and Product Technology.
- [7] Choudhury, I. A., & Ghomi, V. (2013). *Springback reduction of aluminum sheet in V- bending dies*. Engineering Manufacture, 8.
- [8] Hanafiah, K. A. (1993). *Rancangan Percobaan Teori dan Aplikasi*. Jakarta: Raja Grafindo Persada.
- [9] Vukota Boljanovic, P.D. (2004). *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. NewYork: Industrial Press.
- [10] P.H Joshi (January,2017) *Press Tools Design and Construction* Paperback S.Chand Publishing; 23rd edition
- [11] K Venkataraman (Latest edition 2022) *Design of jigs, Fixture and presstool* Departement of Mechanical Engineering, BITS Pilani, chennai centre(formerly). Chennai, India.