

Simulasi Springback pada Laser Beam Bending dan Rotary Draw Bending untuk Pipa AISI 304L

Adnan Syadidan, Mas Irfan P. Hidayat, dan Wikan Jatimurti

Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: irfan@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Proses bending tube pada dewasa ini telah mengalami banyak perkembangan. Dua metode diantaranya adalah rotary draw bending yang bersifat konvensional serta laser beam bending yang lebih modern. Selain itu, untuk mengoptimalkan proses tube bending diperlukan pengertian lebih mendalam terhadap fenomena springback, agar hasil yang didapatkan lebih presisi. Pada penelitian ini dilakukan analisis springback menggunakan Finite Element Method dengan bantuan software ANSYS 17.1. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan hasil springback dari kedua metode yang nantinya akan dibandingkan. Penelitian pertama dilakukan dengan mensimulasikan proses laser beam bending hingga mencapai batas maksimum sudut bending yang dapat diterima. Selain itu, simulasi juga dilakukan pada metode rotary draw bending dengan parameter diameter dan ketebalan tube yang sama seperti sebelumnya namun, dengan sudut bending yang berbeda yaitu sebesar 60, 120, dan 180 yang akan digunakan sebagai data pendukung nilai springback. Dari simulasi didapatkan bahwa semakin tinggi laser power dan pass number pada laser beam bending, maka akan semakin tinggi springback yang dihasilkan namun, masih sangat kecil bila dibandingkan dengan rotary draw bending.

Kata Kunci—Springback, 304L, Rotary Draw Bending, Laser Beam Bending, Metode Elemen Hingga.

I. PENDAHULUAN

TUBE bending merupakan hal yang sangat penting dalam industri manufaktur sebagai contoh pada boiler, mesin, *heat exchanger*, pendingin ruangan, dan pipa maupun *tube*. *Tubes* dapat dibengkokkan secara mekanis baik dalam keadaan panas (*hot bending*) maupun dingin (*cold bending*), walaupun proses *bending* lebih banyak digunakan dalam keadaan dingin. *Cold bending* lebih efisien dan menghasilkan produk yang lebih *rigid*, sedangkan *hot bending* lebih sesuai untuk sudut *bending* yang lebih kecil atau diameter *tube* yang lebih besar. [1]

Laser forming merupakan teknik *forming* dengan proses bebas *springback* dan juga tanpa kontak yang dalam dekade belakangan telah banyak dilakukan penelitian tentangnya. Dibandingkan dengan mengaplikasikan gaya eksternal menggunakan *tools forming*, *laser forming* lebih disebabkan oleh deformasi plastis yang dihasilkan dari tegangan termal akibat pemanasan laser dan pendinginan yang cepat. Meskipun asal mula dari *laser forming* dapat ditelusuri dari metode *flame bending* yang telah ada sebelumnya, namun *laser forming* memiliki teknik yang lebih mulus dan terkendali yang menawarkan banyak kemungkinan aplikasi unik.

Berbagai kemungkinan aplikasi ini dihasilkan dari kontrol yang baik pada transfer energi, akurasi tingkat tinggi dan reproduktifitas, fleksibilitas yang tinggi, serta sifat tanpa kontakannya.[2]

Rotary draw bending merupakan proses fisik tri-nonlinier dengan efek kopling multifactor dan beberapa kecacatan seperti *local wrinkling*, *over thinning* (bahkan *crack*), dan distorsi *cross-section* dengan parameter *forming* yang tidak sesuai. Bila dibandingkan dengan proses *bending* yang lain, metode ini merupakan proses kontak dominan dalam *multi-die constraints* dengan menggunakan *bend die*, *clamp die*, *pressure die*, *wiper die*, serta mandrel (dengan *mandrel shank* dan bola fleksibel). [3] Hanya dengan penggunaan yang presisi dari alat-alat ini, memungkinkan kestabilan dan ketepatan dari deformasi *bending* dapat dicapai dengan R^d/D , bebas *wrinkling*, derajat deformasi dari *wall thinning* dan *cross-section*. Gesekan dari berbagai *interfaces* alat memungkinkan untuk memberikan efek yang berbeda-beda dari perilaku deformasi *bending* metode ini.[4]

Sedangkan *springback* merupakan fenomena *strain recovery* yang diakibatkan pelepasan tegangan sisa pada lembaran logam saat dilepaskan dari cetakan. Dalam rangka memprediksi besar nilai dari *springback*, simulasi akurat dari tegangan pada *dead point* dan perilaku tanpa beban dari material sangat dibutuhkan. Penelitian *springback* secara teoritis dan eksperimental pada *rotary draw* telah banyak dilakukan. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa sudut *springback* berbanding lurus dengan sudut *bending* pada sudut *bending* yang besar, dan kontrol *bend-rebend* biasanya mengandung data *springback* dan penyeimbangannya. Metode dari kontrol proses dikembangkan untuk mengoptimalkan strategi kontrol secara keseluruhan. Prediksi *springback* berdasarkan eksperimen dianggap cukup terpercaya, mengandung data *springback* yang hanya berlaku pada tube bending dengan kondisi yang sama.[1]

II. METODE PENELITIAN

A. Peralatan yang Digunakan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat lunak (*software*) berbasis metode elemen hingga yaitu ANSYS dengan modul Mechanical APDL Release 17.1 yang digunakan untuk membuat pemodelan *springback* dan memodelkan simulasi metode *rotary draw bending* dan *laser beam bending*.

B. Material Tube

Pada penelitian ini, material yang digunakan pada proses tube bending adalah AISI 304L. Data material yang ada diperoleh dari North American Stainless dengan

menggunakan standar UNS S30430, EN 1.4307 dan ASM Handbook Vol 1. Komposisi dari AISI 304L dapat dilihat pada Tabel 1 dan untuk properti material AISI 304L dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 1.

Standar Komposisi Kimia AISI 304L (NAS-UNS S30430, EN 1.4307)

Unsur	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Min						18.00	8.00
Max	0.03	2.0	0.045	0.030	1.00	20.00	12.00

Tabel 2.

Properti Material dari AISI 304L

Konduktivitas (W/m K)	31.7
Specific Heat (J/kg K)	682
Koefisien Konveksi (W/m ²)	20
Poisson ratio	0.3
Modulus Elastisitas (Gpa)	196
Density (kg/m ³)	7850
Thermal Expansion (1/K)	2.00E-5

C. Geometri Tube

Geometri yang digunakan kedua metode *bending* pada penelitian ini yaitu tube berpenampang lingkaran. Penampang lingkaran ini memiliki ukuran *outer diameter* sebesar 15mm dengan ketebalan *tube* 2mm. Kedua metode memiliki panjang yang sama yaitu 800mm.

D. Pemodelan Pipa

Tipe pemodelan yang digunakan pada penelitian ini untuk kedua metode menggunakan *element type* SHELL 132 dengan 8 *nodes* untuk analisa termal dan SHELL281 dengan 8 *nodes* untuk analisa struktural, dengan satu derajat kebebasan (DOF) temperatur pada masing masing *nodes*. Pada metode *laser beam bending* digunakan dua analisa yaitu termal dan struktural. Properti material yang dimasukkan untuk analisa termal antara lain konduktivitas termal isotropic, *specific heat*, densitas, serta koefisien konveksi, lalu untuk analisa structural antara lain *poisson ratio*, modulus elastisitas, serta densitas. Adapun pemodelan *boundary condition* pada *laser beam bending* untuk analisa termal, perpindahan panas yang terjadi adalah konveksi, dimana konveksi terjadi pada semua permukaan *tube* kecuali pada daerah yang dikenai laser, konveksi yang terjadi merupakan *free convection* artinya konveksi tanpa ada pengaruh dari luar. Proses adiabatik dianggap terjadi pada *tube path* yang dikenai sinar laser. Untuk analisa structural, salah satu sisi *tube* akan dijepit ke segala arah, sehingga dapat dilihat respon mekanik yang terjadi. Sedangkan untuk *die* pada *rotary draw bending* dianggap *rigid*.

E. Meshing

Meshing yang digunakan pada simulasi *laser beam bending* dan *rotary draw bending* menggunakan metode *free mesh* dengan elemen segitiga dan *smartsizes* 1 untuk *tube*. Elemen segitiga dipilih karena mempermudah memperoleh konvergensi namun diperlukan *meshing* dengan ukuran yang cukup halus

F. Tipe Pembebanan

Pembebanan pada penelitian kali ini dibagi berdasarkan tipe pembebanan untuk masing-masing metode. Untuk tipe pembebanan metode *laser beam bending* yaitu pembebanan termal. Pada proses termal, *tube* akan diberi panas yang berasal dari laser dalam bentuk *heatflux*, melintang pada tengah sisi kiri *tube* selama 10 detik. Setelah proses pemanasan selesai, maka dilakukan proses pendinginan dengan *free convection* selama 180 detik. Proses pemanasan dan pendinginan ini dilakukan selama dua kali (2 *pass*) untuk mendapatkan hasil distribusi temperatur. Nilai distribusi temperature ini kemudian akan menjadi pembebanan struktural yang akan ditambahkan dengan beban displacement pada sisi kanan *tube* sebesar 0 sebagai *boundary condition*. Langkah ini akan diulang kembali untuk jumlah *pass* serta *laser power* lainnya. Sedangkan tipe pembebanan pada metode *rotary draw bending*, menggunakan displacement ke arah sumbu Z (ROTZ) dengan menggunakan *pilot node* pada *bend die*, dan *pressure* pada tube dengan nilai *internal pressure* = 5.

Pembebanan pada metode *laser beam bending* dilakukan hingga mencapai sudut tertentu yang merupakan batas maksimal kemampuannya bila tanpa adanya *external pressure*. Hal ini dikarenakan metode *laser beam bending* memiliki keterbatasan sudut *bending* yang besarnya akan dicari pada percobaan kali ini. Hasil analisa struktur dari metode *laser beam bending* ini nantinya akan dibandingkan dengan metode *rotary draw bending*. Seluruh variasi pembebanan akan dijelaskan di dalam Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3.

Variasi Pembebanan pada Percobaan

Laser Power (W)	Pass Number
900	2 <i>pass</i>
	3 <i>pass</i>
	4 <i>pass</i>
1200	2 <i>pass</i>
	3 <i>pass</i>
	4 <i>pass</i>
1500	2 <i>pass</i>
	3 <i>pass</i>
	4 <i>pass</i>

G. Tipe Analisa

Proses analisa yang digunakan untuk kedua metode adalah analisa *springback*, yang didapat dari nilai displacement. Selain itu, analisa tegangan *Von Mises* juga dapat digunakan untuk menganalisa ada tidaknya pelepasan tegangan sebagai tanda akan terjadinya *springback*. Adapun perbandingan masing-masing metode *bending* pada percobaan ini dijelaskan dalam Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4.

Perbandingan Metode Proses Penelitian

Metode	Pembebanan	Analisa
Laser Beam Bending	Termal	Sudut <i>bending</i> dan <i>springback</i>
Rotary Draw Bending	Displacement dan <i>pressure</i>	Springback

III. HASIL DAN DISKUSI

Untuk menentukan jumlah *springback*, maka simulasi tegangan yang akurat dilakukan dengan memberikan suatu beban dalam jangka waktu tertentu kemudian mengamati perilaku *unloading* dari logam tersebut. Analisa *springback* pada penelitian *laser beam bending* kali ini dilakukan dengan cara mengamati perubahan *displacement* dan juga *von mises stress* pada saat proses pelepasan beban terakhir untuk setiap *pass*. Adapun untuk analisa *springback* pada metode *rotary draw bending* diamati pada saat proses pelepasan beban setelah *bending*.

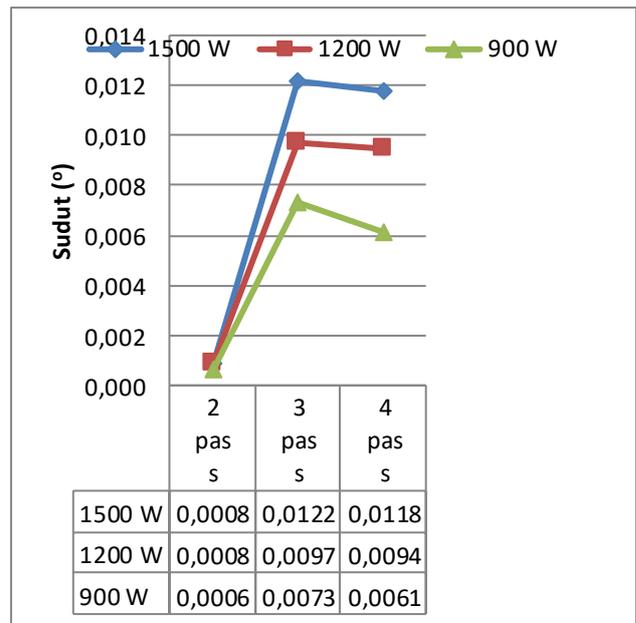
Pemodelan analisa *springback* untuk metode *laser beam bending* dimulai dengan membuat desain *tube*. Pada *tube* kemudian diberikan *heatflux*. Setelah melakukan pengaturan pada *software* yang digunakan maka dilakukan proses *solving*. Hasil yang didapat dari simulasi adalah perpindahan yang terjadi serta nilai *von mises stress*-nya. Hasil ini belum memperlihatkan *springback* yang muncul. Untuk mendapatkan *springback*-nya dilakukan proses penghilangan beban dari benda kerja dengan cara pendinginan menggunakan konveksi. Mekanisme pendinginan inilah yang memunculkan *springback* pada proses ini.

A. Pengamatan Hasil Pemodelan Laser Beam Bending

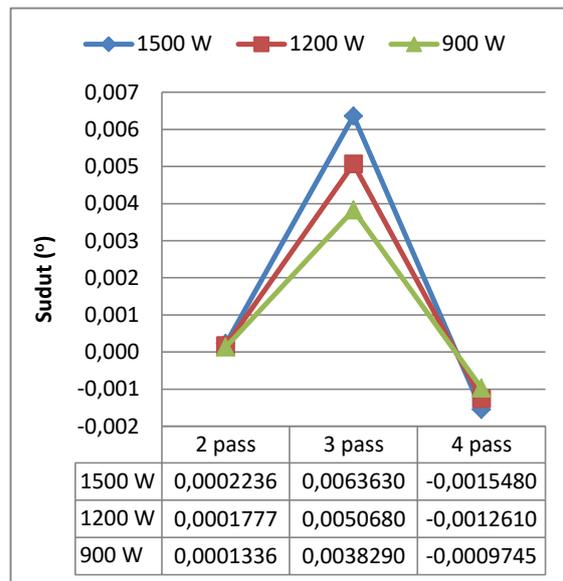
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di atas maka, dapat dilihat bahwa sudut *bending* maksimum yang dapat dicapai menggunakan metode *laser beam bending* bila dilakukan tanpa adanya beban struktural dari luar adalah sebesar 0,01221° serta terjadi pada variasi *laser power* sebesar 1500 W dengan *pass number* sebanyak 3 *pass*. Hal ini menjelaskan bahwa ketika ingin menambah kemampuan sudut *bending* pada *laser beam bending* dapat dilakukan dengan cara menambah jumlah *laser power* dari metode tersebut. Adapun nilai selisih sudut *bending* pada 3 *pass* untuk setiap *laser power* adalah 0,002407° untuk *laser power* antara 1200 W dengan 900 W serta 0,002465° untuk *laser power* antara 1500 W dengan 1200 W.

Sedangkan, nilai hasil *springback* mencapai angka terbesar untuk metode *laser beam bending* adalah pada saat *laser power* 1500 W 3 *pass* sebesar 0,006363°. Adapun nilai selisih *springback* pada 3 *pass* untuk setiap *laser power* adalah 0,001239° untuk *laser power* antara 1200 W dengan 900 W serta 0,001295° untuk *laser power* antara 1500 W dengan 1200 W. Hal ini menunjukkan, semakin tinggi input dari *laser power* maka akan semakin tinggi pula sudut *bending* serta *springback* yang dapat dicapai pada metode *laser beam bending* ini.

Namun, anomali terjadi pada saat variasi *laser* 4 *pass* dilakukan di mana *springback* yang muncul tidaklah menuju ke arah negatif *bending* namun, menuju ke arah positif dari sudut *bending* awal yang dicapai. Anomali ini pun terjadi pada saat kondisi penghilangan beban termal terjadi atau pada saat *cooling condition*. Adapun perbandingan hasil sudut *bending* dan *springback* berdasarkan tiap *power laser* dan *pass number* dijelaskan pada Gambar 1 dan Gambar 2 berikut.



Gambar 1. Grafik Perbandingan Hasil Sudut Bending untuk Setiap Laser Power dan Pass Number



Gambar 2. Grafik Perbandingan Hasil Springback untuk Setiap Laser Power dan Pass Number

B. Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Hammer Crusher

Perbedaan yang muncul dari hasil penelitian ini terhadap kedua metode diantaranya adalah kemampuan sudut *bending*, radius *bending*, profil *bending*, *springback* yang dihasilkan, serta perubahan energi yang terjadi. Telah ditunjukkan pada analisa data di atas bahwa metode *rotary draw bending* memiliki kemampuan sudut *bending* yang lebih besar dan baik bila dibandingkan dengan metode *laser beam bending*. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 5 yang merupakan perbandingan kemampuan sudut *bending* untuk metode *laser beam bending* dan *rotary draw bending*. Perbandingan yang digunakan untuk metode *laser beam bending* hanya pada kemampuan sudut maksimum berdasarkan penelitian ini yaitu proses *bending* pada 3 *pass* untuk setiap *laser power*.

Tabel 5.
Perbandingan Kemampuan Sudut *Bending* Penelitian pada Metode *Laser Beam Bending* dan *Rotary Draw Bending*

<i>Laser Beam Bending</i>			<i>Rotary Draw Bending</i>
900 W	1200 W	1500 W	
0,1221°	0,009745°	0,007338°	180°

Begitupun dengan radius *bending* yang dapat dicapai oleh metode *laser beam bending* yang memiliki keterbatasan bila dibandingkan dengan metode *rotary draw bending*. Profil *bending* pada metode *rotary draw bending* pun terlihat lebih halus bila dibandingkan dengan metode *laser beam bending*. Namun, *springback* yang dihasilkan oleh metode *laser beam bending* sangat jauh lebih kecil dibandingkan dengan metode *rotary draw bending*. Hal ini lah yang menjadi kelebihan dari metode *laser beam bending* sehingga kedepannya metode ini sangat banyak mengalami pengembangan seperti penggunaan *die* dan *external force* untuk menanggulangi kekurangan-kekurangan yang telah dijelaskan. Adapun perbandingan *springback* yang muncul pada kedua metode akan dijelaskan pada Tabel 6 dan Tabel 7 berikut.

Tabel 6.
Perbandingan Hasil *Springback* Penelitian pada Metode *Laser Beam Bending*

	<i>Laser Beam Bending</i>		
	900 W	1200 W	1500 W
Sudut	6,48E-4°	8,66E-4°	8,6E-4°
2 pass	1,34E-4°	1,78E-4°	2,24E-4°
Sudut	7,34E-3°	9,75E-3°	1,22E-2°
3 pass	3,83E-3°	5,07E-3°	6,36E-3°
Sudut	6,14E-3°	9,46E-3°	1,18E-2°
4 pass	-9,8E-4°	-1,26E-3°	-1,54E-3°

Tabel 7.
Perbandingan Hasil *Springback* Penelitian pada Metode *Rotary Draw Bending*

<i>Rotary Draw Bending</i>			
Sudut <i>bending</i>	60°	120°	180°
<i>Springback</i>	1,54°	2,469°	3,11°

Adapun perubahan energi yang terjadi pada saat *loading* maupun *unloading* untuk kedua metode mengalami perbedaan. Perbedaan pertama yaitu berupa besarnya energi yang muncul. Pada metode *laser beam bending* dapat terlihat energi terbesar yang muncul hanya mencapai angka 0,4366 MPa. angka ini sangatlah kecil bila dibandingkan dengan metode *rotary draw bending* yang mampu menghasilkan energi maksimum hingga mencapai 397 MPa. Hal ini membuktikan bahwa metode *laser beam bending* memiliki efisiensi penghematan energi yang lebih baik untuk dapat digunakan kedepannya. Perbedaan kedua yaitu mengenai energi yang muncul pada saat *unloading*. Seperti yang diketahui bersama bahwa *springback* merupakan suatu kejadian yang mengindikasikan *stress relief* yang muncul

pada saat *unloading* dari proses *bending*. Teori ini terbukti pada metode *rotary draw bending* sebagai mana terlihat di atas. Namun, hal ini tidaklah terjadi pada metode *laser beam bending*. Pada metode *laser beam bending*, *springback* yang terjadi malah menghasilkan penambahan energi yang muncul pada daerah *bending* dari *tube*, terutama pada daerah *buckling* dari *tube* itu sendiri setelah *unloading*. Hal ini dapat terjadi dikarenakan *springback* yang muncul pada metode *laser beam bending* didasari oleh mekanisme pemuaian dan penyusutan secara pengamatan macro di mana, apabila diamati secara micro maka mekanisme ini disebabkan oleh perubahan fasa yang terjadi selama pemanasan dan pendinginan. Perubahan fasa yang terjadi juga menyebabkan perubahan bentuk dan struktur kristal penyusunnya sehingga menimbulkan perubahan dislokasi. Perubahan dislokasi ini lah yang akhirnya menciptakan *residual stress* terpusat yang memunculkan indikasi peningkatan energi pada *springback* dan bukan memunculkan *stress relief*. Berikut adalah Tabel 8 dan Tabel 9 mengenai perbandingan energi yang muncul pada saat kondisi *loading* dan *unloading*.

Tabel 8.
Perbandingan Energi pada Kondisi *Loading*

	<i>Laser Beam Bending</i>		
	900 W	1200 W	1500 W
2 pass	24820,4 Pa	33093,8 Pa	41367,3 Pa
3 pass	247776 Pa	330368 Pa	412960 Pa
4 pass	260680 Pa	347574 Pa	434467 Pa
<i>Rotary Draw Bending</i>			
	60°	120°	180°
	395x10 ⁶ Pa	395x10 ⁶ Pa	397x10 ⁶ Pa

Tabel 9.
Perbandingan Energi pada Kondisi *Unloading*

	<i>Laser Beam Bending</i>		
	900 W	1200 W	1500 W
2 pass	25393,2 Pa	33857,6 Pa	42322 Pa
3 pass	253926 Pa	338568 Pa	423210 Pa
4 pass	261932 Pa	349243 Pa	436554 Pa
<i>Rotary Draw Bending</i>			
	60°	120°	180°
	209x10 ⁶ Pa	208x10 ⁶ Pa	206x10 ⁶ Pa

IV. KESIMPULAN

1. Semakin besar *laser power* yang diberikan pada metode *laser beam bending* maka semakin tinggi pula *springback* yang dihasilkan untuk *tube* berpenampang lingkaran dengan OD 15 mm dan tebal 2 mm material SS304L.
2. Semakin banyak *pass number* yang diberikan pada metode *laser beam bending* maka semakin tinggi pula *springback* yang dihasilkan untuk *tube* berpenampang lingkaran dengan OD 15 mm dan tebal 2 mm material SS304L.
3. *Springback* yang dihasilkan oleh proses *bending* untuk *tube* berpenampang lingkaran dengan OD 15 mm

dan tebal 2 mm material SS304L menggunakan metode *laser beam bending* lebih kecil bila dibandingkan dengan proses *bending* bila dilakukan menggunakan metode *rotary draw bending*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih seluruh pihak yang telah mendukung penelitian kali ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. et al Sumikawa, "Improvement of Springback Prediction Accuracy by Considering Nonlinear Elastoplastic Behavior After Stress Reversal," 2017.
- [2] L. Hao, N. dan Li, "An Analytical Model For Laser Tube Bending," 2003.
- [3] S. Thorat, "Finite Element Analysis and Mathematical Calculation of Springback in Rotary Draw Tube Bending," 2015.
- [4] dan M. Z. Yang, H., H. Li, "Friction Role in Bending Behaviors of Thin-Walled Tube in Rotary-Draw-Bending Under Small Bending Radii," 2010.