

Analisis Roll Bending Process pada Square Pipe dengan Desain Flexible Roll

Sufiyanto *, R Djoko Andrijono

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang

Alamat resmi : Jl. Taman Agung No. 1 Malang

*E-mail: sufiyanto@unmer.ac.id

Abstract

The roll bending process is used to form the curved frame needed for making canopies and iron fences. The number of stages of the roll bending process is determined by the frame's curvature radius, thickness, cross-section size and the pipe material used. The flexible roll design aims to ensure that the dies roll can be used for the roll bending process with various of square pipe sections. It is necessary to analyze the roll bending process of square pipe to make the curved frame with a flexible roll design. This analysis aims to calculate the required bending force and the bending stress that occurs. The method used in this analysis uses two ways. First, the bending force is determined based on the strength of the pipe material used. Second, the bending force is determined based on the amount of lateral deflection given. The results obtained from the analysis of the first method are the bending force required of 488.4 kg on a square pipe with 2.2 mm thickness and 3 cm x 3 cm pipe size; 868.3 kg at 4 cm x 4 cm pipe size; 1953.6 kg at 6 cm x 6 cm pipe size. The conclusion of the first method is that the forming process occurs when the bending force applied must be able to produce plastic deformation in the formed pipe. Whereas the second method produces a limitation that the lateral deflection that occurs should not exceed the limit of the permissible bending stress in order to avoid buckling.

Keywords : Roll Bending Of Rectangular Pipe, Flexsible Roll Design, Bending Force, Lateral Deflection

Abstrak

Proses roll bending digunakan untuk membentuk frame lengkung yang dibutuhkan pada pembuatan canopy dan pagar besi. Jumlah tahapan proses roll bending ditentukan oleh radius kelengkungan frame, ketebalan, ukuran penampang dan material pipa yang digunakan. Desain flexible roll bertujuan agar dies roll pada mesin roll mekanik dapat digunakan untuk proses roll bending dengan ukuran penampang pipa kotak yang bervariasi. Untuk itu perlu dilakukan analisis proses roll bending pipa kotak untuk membuat frame lengkung dengan desain flexible roll. Analisis ini bertujuan untuk menghitung gaya bending yang dibutuhkan dan tegangan bending yang terjadi pada proses roll bending pipa kotak. Metode yang dilakukan dalam analisis ini menggunakan ada dua cara. Pertama, gaya bending ditentukan berdasarkan kekuatan material pipa yang digunakan. Kedua, gaya bending ditentukan berdasarkan besarnya defleksi lateral yang diberikan. Hasil yang diperoleh dari analisa metode pertama yaitu gaya bending yang dibutuhkan sebesar 488,4 kg pada pipa kotak dengan tebal 2,2 mm dan ukuran pipa 3 cm x 3 cm; 868,3 kg pada ukuran pipa 4 cm x 4 cm; 1953,6 kg pada ukuran pipa 6 cm x 6 cm. Sedangkan hasil analisis metode kedua yaitu defleksi lateral maksimal yang dapat diberikan sebesar 5 mm pada ukuran pipa 4 cm x 4 cm, 3 mm pada ukuran pipa 6 cm x 6 cm. Kesimpulan pada metode pertama bahwa proses pembentukan terjadi apabila gaya bending yang diberikan harus mampu menghasilkan deformasi plastis pada pipa yang dibentuk. Sedangkan metode kedua menghasilkan batasan bahwa defleksi lateral yang terjadi tidak boleh melebihi batas tegangan bending ijin agar tidak terjadi cacat tekuk (buckling).

Kata kunci : Roll Bending Pipa Persegi, Desain Flexsible Roll, Gaya Bending, Defleksi Lateral

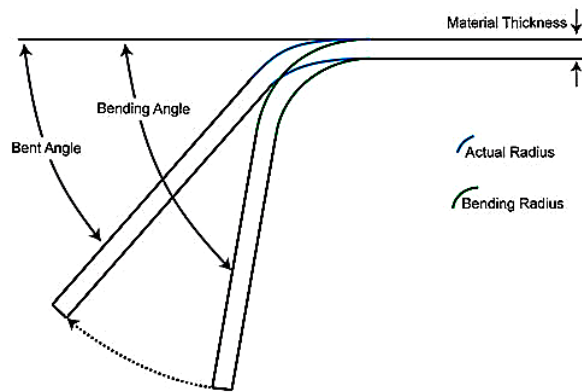
1. Pendahuluan

Teknologi roll bending digunakan pada proses pembentukan pipa hollow bulat ataupun kotak menjadi frame lengkung. Canopy, pagar dan produk-produk lain yang dihasilkan oleh sebuah bengkel las teknik membutuhkan bentuk frame lengkung pada beberapa bagiannya. Dengan proses roll bending tersebut, dapat dihasilkan radius kelengkungan yang seragam dan proses pengerjaannya lebih cepat. Proses pengerjaan frame lengkung tersebut membutuhkan beberapa kali tahapan proses bending. Hal ini diperlukan agar deformasi bending yang terjadi tidak melebihi batas kemampuan material untuk menghindari terjadinya cacat tekuk (buckling) dan cacat kerut (wrinkle). Jumlah tahapan proses bending dipengaruhi oleh beberapa faktor pembatas antara lain : radius akhir kelengkungan frame, ketebalan pipa, dimensi/ukuran penampang pipa, dan jenis material/bahan.

Secara umum, ukuran *dies roll* yang digunakan harus sesuai dengan ukuran pipa yang akan dibentuk menjadi *frame* lengkung. Untuk pipa bulat, satu ukuran *dies* hanya dapat digunakan untuk proses *bending* satu ukuran diameter luar pipa saja. Dengan demikian diperlukan banyak ukuran *dies roll* pada proses *roll bending* untuk pipa bulat. Dalam penelitian ini menggunakan desain *flexible roll* yang dapat digunakan untuk proses *roll bending* pipa kotak dengan ukuran lebar 3 s/d 6 cm. Sehingga desain *roll* tersebut, dapat digunakan untuk membentuk *frame* lengkung dengan beberapa jenis ukuran penampang pipa kotak. Variasi ukuran penampang pipa yang dibentuk pada proses *roll bending* berpengaruh terhadap besarnya gaya *bending* dan daya mekanis yang dibutuhkan. Selain itu, variasi ketebalan pipa dan besarnya defleksi awal yang diberikan untuk menghasilkan radius kelengkungan *frame* juga merupakan faktor yang mempengaruhi gaya *bending* dan daya mekanis yang dibutuhkan.

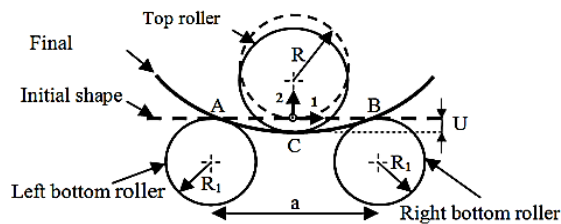
Proses pengerolan pipa termasuk dalam proses pembentukan logam yang lebih dikenal dengan proses *roll bending*. Tujuan dari proses ini adalah untuk membentuk kelengkungan dengan radius tertentu. Proses *roll bending* ini termasuk pengerjaan dingin karena tidak memerlukan pemanasan selama proses pembentukan berlangsung. Untuk membentuk pipa sampai diperoleh kelengkungan yang diinginkan diperlukan beberapa tahapan proses. Hal ini dilakukan untuk menghindari kegagalan atau cacat pada proses *roll bending* pipa.

Selain itu radius pembentukan yang diberikan harus lebih besar dari radius yang direncanakan karena adanya efek *spring back* pada proses *roll bending*. *Spring back* adalah efek perlawanan yang diberikan oleh material pada saat menerima beban *bending* yang diberikan. Secara prinsip hal ini sama dengan efek yang ditimbulkan oleh pegas saat ditekan atau ditarik akan berusaha untuk kembali pada bentuk semula [1].



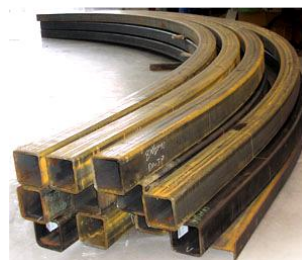
Gambar 1. Springback Effect [1]

Prinsip dasar proses *roll bending* dapat dijelaskan dengan gambar 2 di bawah ini. Gaya pembentukan yang diberikan merupakan gaya *bending* sehingga pipa / besi profil yang dibentuk memiliki radius kelengkungan yang direncanakan. *Roll* utama memberikan gaya *bending* pada pipa dan 2 *roll* pengikut sebagai tumpuan. Pengaturan radius kelengkungan dilakukan dengan merubah ketinggian *roll* utama terhadap *roll* pengikut.



Gambar 2. Mekanisme Proses Roll Bending [2]

Bentuk akhir yang dihasilkan setelah melalui proses *roll bending* dapat dilihat pada gambar 3 berikut :



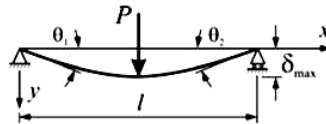
Gambar 3. Hasil Proses Roll Bending [3]

Selain metode *roll bending*, terdapat beberapa metode yang digunakan dalam proses *bending* pada pipa antara lain :

- *rotary draw bending*
- *induction bending*
- *increment bending*
- *compression bending*

Proses Bending

Material yang akan dibentuk dengan proses *bending* diletakkan di antara 2 tumpuan dengan jarak sebesar L dan menerima beban terpusat P tepat ditengah bentangan batang (*beam*). Batang akan mengalami defleksi maksimal sebesar δ_{max} (gambar 4).



Gambar 4. Pemodelan Proses *Bending* [4]

Besarnya defleksi maksimal δ_{max} dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\delta_{max} = \frac{P.L^3}{48.E.I_z} \text{ (mm)} \tag{1}$$

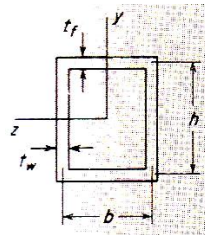
Dimana:

E = modulus elastisitas bahan (kg/mm²)

I_z = momen inersia penampang (mm⁴)

Untuk bentuk pipa *hollow* kotak mempunyai momen inersia penampang I_z yang dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$I_z = \frac{h^2}{6} (h.t_w + 3.b.t_f) \text{ (mm}^4\text{)} \tag{2}$$



Gambar 5. Momen Inersia Penampang Pipa *Hollow* Kotak [5]

Pada saat pipa *hollow* kotak mendapat gaya tekan P untuk menghasilkan kelengkungan atau defleksi maksimal sebesar δ_{max} , maka pipa mengalami tegangan *bending*. Besarnya tegangan *bending* yang terjadi dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut :

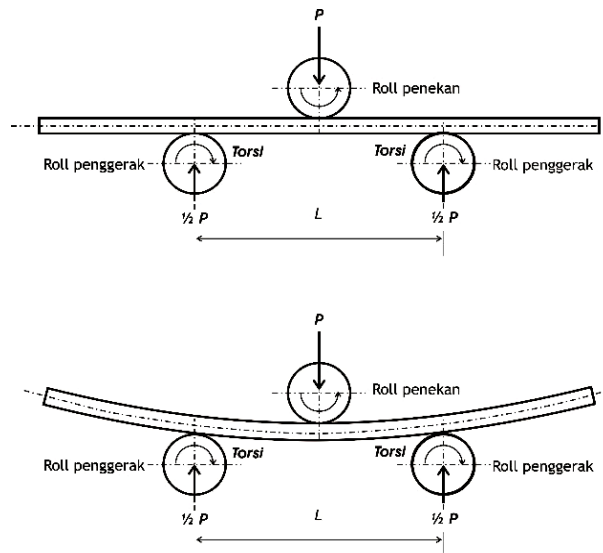
$$\sigma_b = \frac{M \times c}{I_z} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \tag{3}$$

Dimana:

M = momen lentur yang terjadi pada pipa (kg.mm)

c = jarak sumbu netral (mm)

I_z = momen inersia penampang (mm⁴)



Gambar 6. Proses *Roll Bending* Pipa

Pada gambar 6 menunjukkan proses *roll bending* pada pipa untuk membentuk *frame* lengkung. *Roll* penggerak memberikan torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan pipa maju dan mundur sehingga radius kelengkungan terbentuk di sepanjang pipa. Untuk menentukan daya pengerolan yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$N = \frac{T.n}{97,4.10^4} \text{ (kw)} \quad (4)$$

Dimana:

- T = torsi untuk menggerakkan *roll* penggerak (kg.mm)
- n = putaran poros *roll* penggerak (rpm)

2. Material dan metode penelitian

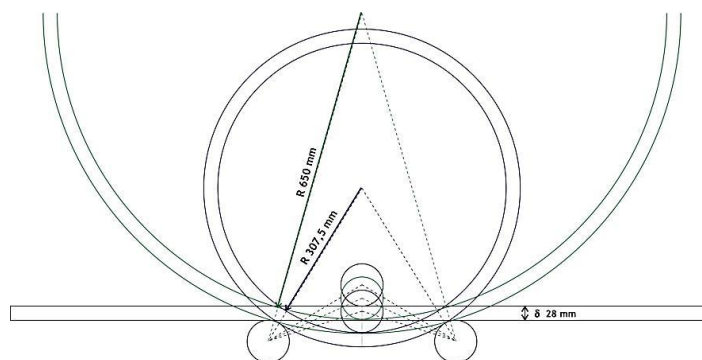
2.1. Proses *Roll Bending*

Proses pembentukan *frame* lengkung dilakukan secara bertahap dengan cara memberikan beban P pada *roll* penekan (gambar 6) untuk menghasilkan defleksi awal. Jumlah tahapan proses *bending* ditentukan oleh besarnya defleksi yang diberikan pada setiap tahapan proses.

Untuk menjelaskan tahapan proses *roll bending* dapat dijabarkan menggunakan mekanisme pada gambar 7 berikut. Besarnya defleksi yang dibutuhkan untuk mendapatkan radius kelengkungan *frame* sebesar 650 mm adalah 28 mm. Hal ini dilakukan dengan cara memberikan beban pada *roll* penekan secara bertahap dengan cara memutar poros ulir sehingga *roll* penekan bergerak turun sebesar 28 mm. Pergeseran *roll* penekan ke bawah sebesar 28 mm tersebut dilakukan sebanyak 4 bertahap, sehingga setiap tahap *roll* penekan bergeser turun sejauh 7 mm. Jika diberikan defleksi yang kedua sebesar 28 mm lagi, maka radius kelengkungan *frame* menjadi 307,5 mm.

Faktor-faktor yang menjadi batasan penentuan jumlah tahapan dan besarnya radius kelengkungan akhir yang dapat dicapai proses *roll bending* adalah :

1. kemampuan atau jenis material
2. ketebalan pipa yang dibentuk
3. dimensi atau ukuran penampang pipa
4. posisi sambungan las pada pipa



Gambar 7. Tahapan Proses *Roll Bending*

2.2. Desain Mesin Roll Bending Dengan Flexible Roll

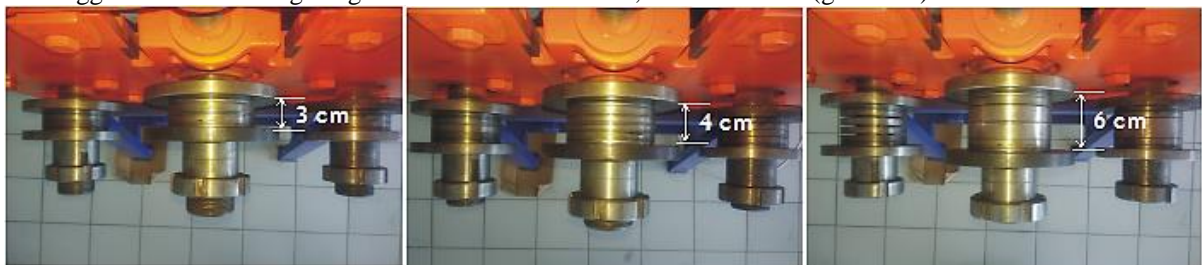
Mesin *roll bending* pipa yang digunakan untuk membentuk *frame* lengkung seperti yang ditunjukkan pada gambar 8 berikut. Adapun spesifikasi teknis mesin *roll bending* tersebut adalah sebagai berikut :

1. Motor penggerak : 1,5 KW (2 HP), 220 Volt, *single phase induction motor*, 1400 rpm.
2. Jenis transmisi : *belt transmission* dan *chain transmission* dengan rasio kecepatan $i = 1$.
3. Rasio *gear box* : 1 : 80.
4. Putaran poros *roll* n_{roll} : 20 rpm
5. Kontrol arah putaran *roll* penggerak : *clock wise* dan *counter clockwise*.
6. Diameter *roll* d_{roll} : 90 mm.
7. Jarak antar *roll* penggerak l : 400 mm.
8. Panjang lengan tuas engkol untuk memutar poros ulir : 300 mm.
9. Diameter poros ulir d_{ulir} : 30 mm.
10. Jarak ulir poros ulir (*pitch*) p : 3,5 mm.



Gambar 8. Mesin Roll Bending

Mesin *roll bending* (gambar 8) mempunyai desain *flexible roll* yang dapat digunakan untuk proses *roll bending* pipa kotak dengan berbagai macam ukuran lebar antara 3 s/d 6 cm. Desain *flexible roll* ini mempunyai bertujuan agar satu set *roll* dapat digunakan untuk melakukan proses *bending* pipa dengan beberapa macam ukuran. Metode *flexible roll* ini menggunakan desain *roll* yang terdiri dari beberapa bagian yang dapat dipisah-pisah. Lebar celah *roll* dapat diatur menggunakan cincin/ring dengan ukuran ketebalan 1 cm, 2 cm dan 4 cm (gambar 9).



Gambar 9. Desain Flexible Roll Variabel / Parameter Penelitian

Parameter yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut :

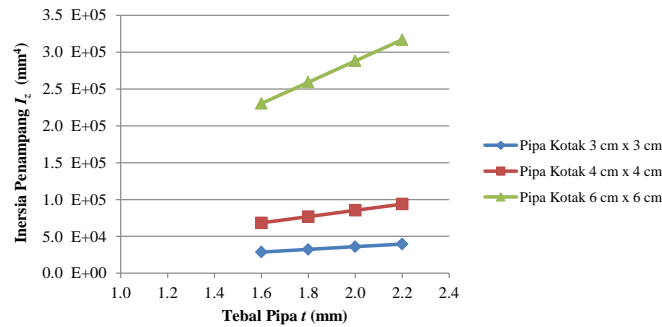
- Variabel bebas :
 - Ukuran pipa kotak : 3 cm x 3 cm, 4 cm x 4 cm, 6 cm x 6 cm
 - Ketebalan pipa t : 1,6 mm, 1,8 mm, 2,0 mm, dan 2,2 mm.
- Variabel terikat :
 - Beban *bending* P (kg)
 - Torsi mekanis T (kg.mm)
 - Daya mekanis N (kw)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan ukuran penampang pipa *hollow* kotak yang digunakan dapat ditentukan inersia penampang I_z sebagai berikut (tabel 1) :

Tabel 1. Inersia Penampang I_z

Tebal Pipa t (mm)	Inersia Penampang I_z (mm ⁴)		
	3 cm x 3 cm	4 cm x 4 cm	6 cm x 6 cm
1.6	28800	68267	230400
1.8	32400	76800	259200
2.0	36000	85333	288000
2.2	39600	93867	316800



Grafik 1. Perubahan Inersia Penampang I_z Terhadap Tebal Pipa t

Inersia penampang dipengaruhi oleh tebal t dan ukuran penampang pipa. Peningkatan inersia penampang I_z bertambah dengan naiknya ketebalan pipa dan bertambah secara drastis dengan naiknya ukuran penampang pipa (grafik 1).

Besarnya gaya *bending* P yang diperlukan untuk membentuk kelengkungan ditentukan oleh defleksi δ yang diberikan pada setiap tahapan *bending*. Selain itu jenis material juga berpengaruh terhadap gaya *bending*, karena semakin tinggi kekuatan material, maka semakin besar gaya *bending* yang dibutuhkan. Material pipa yang digunakan adalah ST 37 dengan batas kekuatan tarik σ_{tarik} sebesar 37 kg/mm². Tegangan *bending* yang dibutuhkan dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\sigma_{bending} = 0,5 \times \sigma_{tarik} \left(\frac{kg}{mm^2} \right) \tag{5}$$

Dengan persamaan tersebut, di atas maka besarnya tegangan *bending* yang dibutuhkan adalah sebesar :

$$\sigma_{bending} = 0,5 \times 37 \left(\frac{kg}{mm^2} \right) = 18,5 \left(\frac{kg}{mm^2} \right)$$

Untuk mencari besarnya gaya *bending* P yang dibutuhkan untuk proses pengerolan pipa dapat menggunakan persamaan yang diturunkan dari persamaan tegangan *bending* (persamaan 3). Dalam penentuan momen *bending*, diperlukan pemodelan pada proses pengerolan pipa seperti gambar 6. Berdasarkan pemodelan di atas, maka besarnya momen *bending* yang terjadi adalah :

$$M = \frac{1}{2} \cdot P \times \frac{1}{2} \cdot L = \frac{1}{4} \cdot P \cdot L \tag{6}$$

Dimana :

L = jarak antar sumbu *roll* = 400 mm

Dengan memasukkan persamaan (6) ke dalam persamaan (3), maka akan diperoleh :

$$\sigma_{bending} = \frac{\frac{1}{4} \cdot P \cdot L \times c}{I_z} \tag{7}$$

Sehingga besarnya gaya *bending* P dihitung dengan persamaan 8 dibawah.

$$P = \frac{4 \times \sigma_{bending} \times I_z}{L \times c} \tag{8}$$

Berikut perhitungan gaya *bending* P (tabel 2) berdasar variabel tebal pipa t dan ukuran pipa yang ditentukan dalam penelitian.

Daya mekanis N yang dibutuhkan untuk proses *roll bending* ditentukan oleh besarnya torsi dan putaran yang disediakan poros *roll*. Torsi yang dibutuhkan pada mesin *roll* ini digunakan untuk memutar *roll* sehingga pipa yang diletakkan diantara *roll* penekan dan *roll* penggerak dapat bergerak sehingga proses pengerolan dapat terjadi. Dengan demikian maka prinsip yang digunakan adalah menggunakan gaya gesek yang terjadi antara permukaan *roll* dan pipa. Gaya gesek yang terjadi ditentukan oleh besarnya gaya penekanan P yang diberikan untuk mengerol pipa dan koefisien gesek antara *roll* dan pipa. Diasumsikan nilai koefisien gesek yang terjadi $\mu = 0,74$, sehingga besarnya gaya gesek yang terjadi adalah :

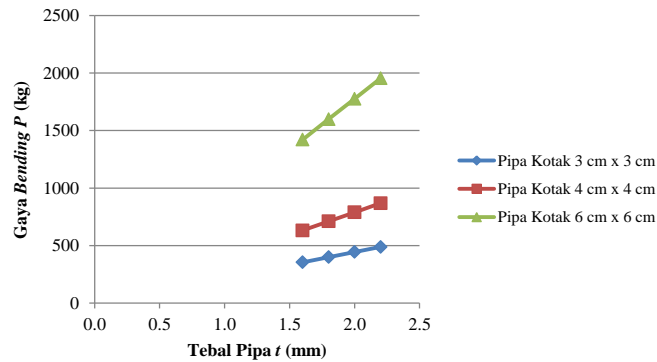
$$F_{friction} = \mu \times P \text{ (kg)} \tag{9}$$

Besarnya torsi yang dibutuhkan ditentukan oleh gaya gesek dan diameter roll ($d_{roll} = 90 \text{ mm}$), sehingga torsi didapatkan dengan persamaan :

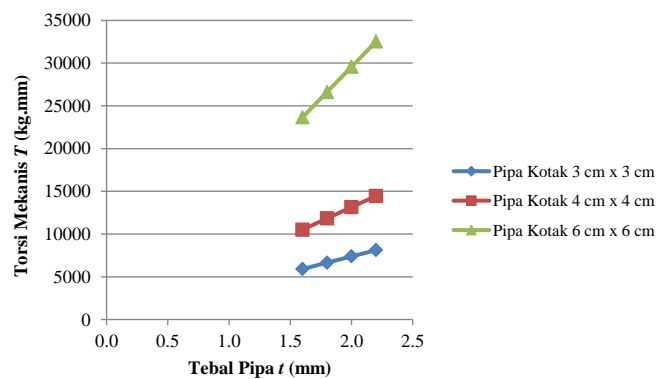
$$T = F_{friction} \times d_{roll} \text{ (kg.mm)} \tag{10}$$

Tabel 2. Perhitungan Gaya Bending P , Torsi Mekanis T dan Daya Mekanis N Pada Proses *Roll Bending*

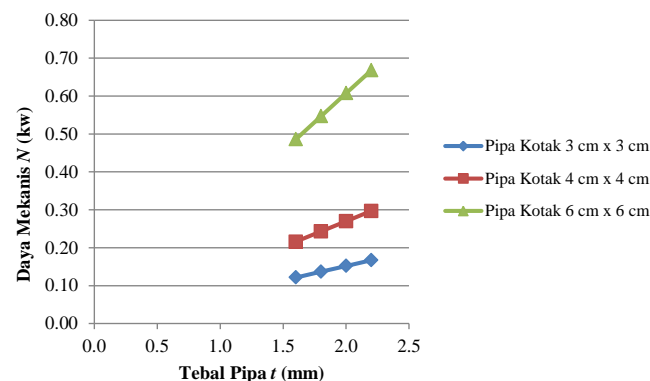
Tebal Pipa t (mm)	Gaya Bending P (kg)			Torsi Mekanis T (kg.mm)			Daya Mekanis N (kw)		
	3 cm x 3 cm	4 cm x 4 cm	6 cm x 6 cm	3 cm x 3 cm	4 cm x 4 cm	6 cm x 6 cm	3 cm x 3 cm	4 cm x 4 cm	6 cm x 6 cm
1.6	355.2	631.5	1420.8	5914.1	10513.9	23656.3	0.12	0.22	0.49
1.8	399.6	710.4	1598.4	6653.3	11828.2	26613.4	0.14	0.24	0.55
2.0	444.0	789.3	1776.0	7392.6	13142.4	29570.4	0.15	0.27	0.61
2.2	488.4	868.3	1953.6	8131.9	14456.6	32527.4	0.17	0.30	0.67



Grafik 2. Gaya Bending Yang Dibutuhkan Pada Proses *Roll Bending*



Grafik 3. Torsi Yang Dibutuhkan Pada Proses *Roll Bending*



Grafik 4. Daya Mekanis Yang Dibutuhkan Pada Proses *Roll Bending*

Ketebalan pipa berpengaruh terhadap besarnya gaya bending, torsi mekanis dan daya mekanis yang dibutuhkan pada proses *roll bending* (grafik 2-4). Semakin tebal pipa yang dibentuk, maka diperlukan gaya yang lebih besar, sehingga torsi dan daya mekanis yang dibutuhkan juga meningkat. Selain itu, ukuran penampang pipa juga berpengaruh besar terhadap ketiga parameter di atas. Pada pipa kotak dengan ukuran penampang 6 cm x 6 cm perubahan ketebalan pipa berdampak sangat besar terhadap peningkatan gaya, torsi dan daya mekanis yang dibutuhkan.

Gaya tekan P yang dibutuhkan untuk membengkokkan pipa pada proses *roll bending* berkaitan dengan perencanaan poros ulir. Mekanisme gerakan translasi naik dan turun *roll* penekan ditentukan oleh poros ulir yang diputar menggunakan batang engkol. Perhitungan poros ulir memerlukan data-data sebagai berikut :

- Diameter poros ulir (d_{ulir}) = 30 mm.
- Jarak bagi ulir (*pitch*) = 3,5 mm (untuk ulir tunggal $p = pitch$)
- Panjang lengan tuas engkol untuk memutar poros ulir : 250 mm

Dengan data tersebut, dapat diperoleh sudut kemiringan ulir α dengan persamaan berikut :

$$\alpha = \arctg\left(\frac{p}{\pi.d}\right) \tag{11}$$

Persamaan yang digunakan dalam torsi yang diperlukan untuk memutar poros ulir adalah :

$$M = P. r. tg(\alpha + \phi) \tag{12}$$

Dimana:

M = momen yang diperlukan untuk mengangkat beban

P = beban ulir berupa gaya tekan *roll*

α = sudut ulir

ϕ = dipengaruhi oleh koefisien gesek

Jika koefisien gesek antara poros ulir dan rumah ulir saat poros ulir berputar diasumsikan $\mu = 0,3$, maka nilai ϕ ditentukan dengan persamaan :

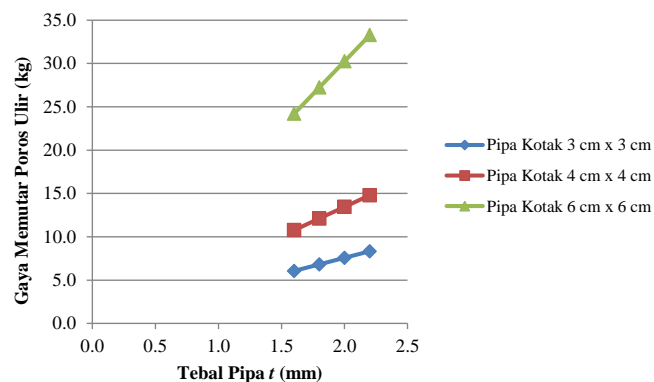
$$\phi = \arctg \mu \tag{13}$$

Besarnya torsi M yang diperlukan untuk memutar poros ulir dengan beban ulir sesuai dengan besarnya gaya tekan *roll* P dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Apabila panjang lengan engkol untuk memutar poros ulir $l = 300$ mm , maka besarnya gaya yang dikeluarkan oleh operator untuk memutar dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan Torsi dan Gaya Memutar Poros Ulir Pada Proses *Roll Bending*

Tebal Pipa t (mm)	Torsi Poros Ulir (kg.mm)			Gaya Memutar Poros Ulir (kg)		
	3 cm x 3 cm	4 cm x 4 cm	6 cm x 6 cm	3 cm x 3 cm	4 cm x 4 cm	6 cm x 6 cm
1.6	1814.9	3226.5	7259.5	6.0	10.8	24.2
1.8	2041.7	3629.8	8167.0	6.8	12.1	27.2
2.0	2268.6	4033.1	9074.4	7.6	13.4	30.2
2.2	2495.5	4436.4	9981.9	8.3	14.8	33.3



Grafik 5. Gaya Yang Dibutuhkan Untuk Memutar Poros Ulir

Berdasarkan grafik 5, operator harus memutar engkol poros ulir dengan gaya yang lebih besar dari 20 kg untuk membentuk pipa kotak dengan penampang 6 cm x 6 cm. Secara teknis, gaya tersebut, sudah mendekati kemampuan maksimal tenaga manusia ($\pm 1/3$ berat manusia). Untuk mengatasi hal tersebut, maka operator harus menambah lengan torsi ($l > 300$ mm) pada saat memutar poros ulir.

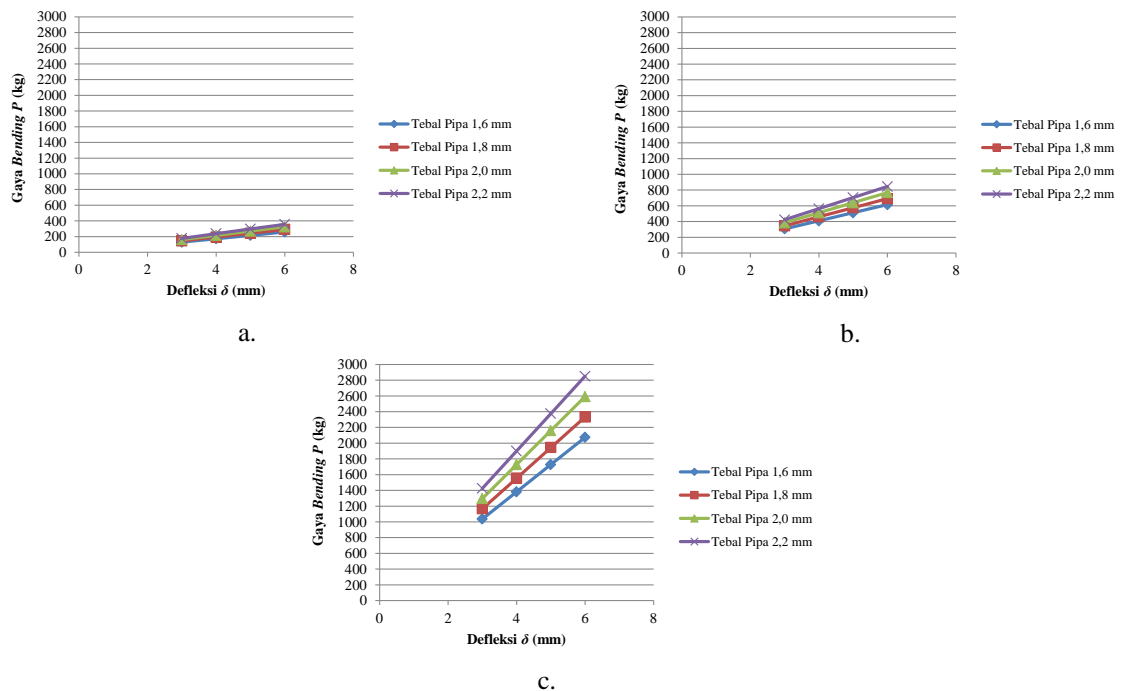
Analisa proses *roll bending* diatas dilakukan berdasarkan besarnya gaya *bending* yang diperlukan untuk membentuk pipa menjadi *frame* lengkung. Apabila gaya *bending* yang diberikan menghasilkan tegangan kerja lebih besar dari kekuatan material, maka proses *bending* yang dilakukan mampu membentuk pipa menjadi *frame* lengkung.

Metode lain untuk menganalisa proses *roll bending* berdasarkan lendutan atau defleksi lateral yang dihasilkan. Hal ini secara teknis dapat dilakukan dengan cara menentukan besarnya jarak translasi *roll* penekan dari posisi awal. Pengaturan jarak defleksi lateral berkaitan dengan jumlah langkah yang diperlukan untuk membentuk radius kelengkungan yang direncanakan. Pada tabel 4 menyajikan perhitungan gaya *bending* yang dibutuhkan untuk

menghasilkan defleksi lateral antara 3 mm s/d 6 mm. Variasi ketebalan pipa dan ukuran penampang pipa kotak berpengaruh terhadap besarnya gaya *bending* yang dibutuhkan.

Tabel 4. Perhitungan Gaya *Bending* Berdasarkan Variasi Ketebalan dan Ukuran Penampang Pipa Kotak

Ukuran Penampang	Defleksi δ (mm)	Gaya <i>Bending</i> P (kg)			
		t = 1,6 mm	t = 1,8 mm	t = 2,0 mm	t = 2,2 mm
3 cm x 3 cm	3	129.6	145.8	162.0	178.2
	4	172.8	194.4	216.0	237.6
	5	216.0	243.0	270.0	297.0
	6	259.2	291.6	324.0	356.4
4 cm x 4 cm	3	307.2	345.6	384.0	422.4
	4	409.6	460.8	512.0	563.2
	5	512.0	576.0	640.0	704.0
	6	614.4	691.2	768.0	844.8
6 cm x 6 cm	3	1036.8	1166.4	1296.0	1425.6
	4	1382.4	1555.2	1728.0	1900.8
	5	1728.0	1944.0	2160.0	2376.0
	6	2073.6	2332.8	2592.0	2851.2



Grafik 6. Pengaruh Defleksi Lateral Terhadap Gaya *Bending* Pada :
 a. Pipa Kotak 3 cm x 3 cm, b. Pipa Kotak 4 cm x 4 cm, dan c. Pipa Kotak 6 cm x 6 cm

Penambahan ketebalan pipa dan defleksi lateral yang diberikan akan meningkatkan besarnya gaya *bending* yang dibutuhkan. Peningkatan gaya *bending* yang sangat besar terjadi pada ukuran penampang pipa kotak 6 cm x 6 cm. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kekakuan yang ditunjukkan dengan besarnya inersia penampang I_z pada penampang pipa kotak 6 cm x 6 cm (grafik 1).

Gaya *bending* yang diterima oleh material yang dibentuk akan menghasilkan tegangan *bending* σ_b . Berdasarkan perhitungan yang dihasilkan (tabel 5) dapat dijelaskan bahwa tegangan *bending* meningkat seiring dengan bertambahnya defleksi lateral yang diberikan dan ukuran penampang pipa. Selain itu dapat dilihat bahwa pada pipa dengan ukuran penampang 4 cm x 4 cm dan 6 cm x 6 cm menghasilkan tegangan kerja yang melebihi batas tegangan *bending* ijin material 18,5 kg/mm². Hal ini berarti bahwa, defleksi lateral yang lebih besar dari 6 mm pada pipa kotak 4 cm x 4 cm akan mengakibatkan terjadinya cacat tekuk (*buckling*) pada proses *roll bending*. Demikian juga untuk pipa kotak dengan ukuran penampang 6 cm x 6 cm, akan mengalami cacat tekuk apabila diberikan defleksi lateral yang lebih besar dari 4 mm.

Berdasarkan perhitungan di tabel 5 dapat dilihat bahwa nilai tegangan *bending* yang terjadi tidak dipengaruhi oleh ukuran ketebalan pipa. Hal ini dapat dibuktikan dari persamaan 1 dan 7, dimana :

$$P = \frac{\delta \cdot 48 \cdot E \cdot I_z}{L^3}$$

$$\sigma_{bending} = \frac{\frac{1}{4} \cdot P \cdot L \times c}{I_z}$$

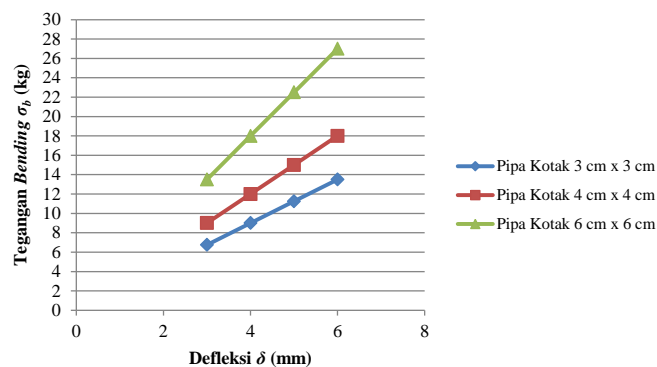
Sehingga diperoleh persamaan berikut :

$$\sigma_{bending} = \frac{\delta \cdot 12 \cdot E \cdot c}{L^2} \tag{14}$$

Sesuai persamaan 14 diatas dapat dibuktikan bahwa faktor ketebalan pipa yang dibentuk pada proses *roll bending* tidak mempengaruhi besarnya tegangan *bending* yang terjadi.

Tabel 5. Perhitungan Tegangan *Bending* Berdasarkan Variasi Defleksi Lateral dan Ukuran Penampang Pipa Kotak

Tebal Pipa <i>t</i> (mm)	Defleksi δ (mm)	Tegangan <i>Bending</i> σ_b (kg/mm ²)		
		3 cm x 3 cm	4 cm x 4 cm	6 cm x 6 cm
1.6	3	6.8	9.0	13.5
	4	9.0	12.0	18.0
	5	11.3	15.0	22.5
	6	13.5	18.0	27.0
1.8	3	6.8	9.0	13.5
	4	9.0	12.0	18.0
	5	11.3	15.0	22.5
	6	13.5	18.0	27.0
2.0	3	6.8	9.0	13.5
	4	9.0	12.0	18.0
	5	11.3	15.0	22.5
	6	13.5	18.0	27.0
2.2	3	6.8	9.0	13.5
	4	9.0	12.0	18.0
	5	11.3	15.0	22.5
	6	13.5	18.0	27.0



Grafik 7. Pengaruh Defleksi Lateral dan Ukuran Penampang Pipa Terhadap Tegangan *Bending*

Grafik 7 menunjukkan peningkatan tegangan *bending* yang terjadi akibat bertambahnya defleksi lateral yang diberikan pada tahapan saat pembentukan *frame* lengkung. Selain itu, peningkatan kekakuan pipa yang identik dengan bertambahnya inersia penampang menyebabkan peningkatan tegangan *bending* yang sangat besar pada pipa kotak 6 cm x 6 cm.

4. Kesimpulan

Analisis proses *roll bending* dilakukan untuk menentukan parameter-parameter yang berpengaruh terhadap proses tersebut. Penentuan besarnya gaya *bending* yang dibutuhkan dapat dilakukan dengan dua metode yaitu berdasarkan kekuatan material yang dibentuk atau berdasarkan besarnya defleksi lateral yang diberikan.

Pada metode pertama menghasilkan ketentuan bahwa untuk membentuk pipa menjadi *frame* lengkung harus memberikan gaya *bending* yang mampu menghasilkan deformasi plastis pada pipa yang dibentuk.

Metode yang kedua menghasilkan ketentuan bahwa besarnya gaya *bending* tergantung besarnya defleksi lateral yang ditentukan dengan batasan defleksi lateral tersebut tidak menyebabkan cacat tekuk (*buckling*) pada pipa yang dibentuk.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DP2M) Ristek DIKTI yang telah mendanai Program Kemitraan Masyarakat (PKM) 2019 dengan kontrak No. 003/Kontrak/LPPM/UM/III/2019, No. 111/SP2H/PPM/DRPM/2019 yang kami usulkan.

Daftar Pustaka

- [1] Donnel, David, 2010, <http://www.thefabricator.com/article/bending/a-rundown-on-rolling-machines>, diakses 15 September 2016
- [2] Ktari, Ahmed, et. all, 2012, *Modeling And Computation Of The Three-Roller Bending Process Of Steel Sheets*, Journal of Mechanical Science and Technology, DOI: 10.1007/s12206-011-0936-4
- [3] Smith, Bill and Mark King, 2002, *Bending Square and Rectangular Tubing*, The Tube & Pipe Journal.
- [4] http://home.eng.iastate.edu/~shermanp/STAT447/STAT%20Articles/Beam_Deflection_Formulae.pdf diakses 7 Oktober 2019
- [5] Budynas, Richard G, 2011, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, Ninth Edition, McGraw-Hill Companies, Inc., New York