

Kajian Teoretis Kerutan di Daerah Tekukan pada Pipa Hasil Proses Bending

Sigit Iswahyudi

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Tidar, Magelang
E-mail: sigit_iswahyudi@yahoo.com

ABSTRAK

Kajian ini membahas pemanfaatan teori *buckling* plastis untuk memperkirakan kapan mulai terjadi kerutan pada proses penekukan profil khususnya pipa. Profil atau pipa yang ditekuk dilokalisir pada bagian yang mendapatkan beban tekan kemudian dianalogikan sebagai kolom yang mendapatkan beban tekan. Pipa dengan rasio tebal dibanding diameter luarnya dengan nilai di atas 0,1 akan mengalami kerutan plastis. Metode *tangent modulus*, metode *shanley* dan metode *reduced modulus* digunakan untuk memperkirakan kapan mulai terjadi pembentukan kerutan. Hasil analisa menunjukkan bahwa perkiraan pembentukan kerutan dengan menggunakan *reduced modulus* lebih cepat dari pada dengan menggunakan metode *shanley* dan *tangent modulus*. Persentase perbedaan jari-jari penekukan di mana kerutan mulai timbul antara hasil analisa menggunakan metode *reduced modulus* dengan *tangent modulus* dibanding *tangent modulus* adalah 95%. Sementara itu, persentase perbedaan jari-jari penekukan antara hasil perhitungan menggunakan metode *shanley* dengan *tangent modulus* dibanding metode *tangent modulus* adalah 39%.

Kata kunci: Profil, penekukan, *buckling* plastis, kerutan.

ABSTRACT

This study discuss about the use of plastic buckling theorem to predict the beginning of wrinkling on profile or pipe when it be bent. The compressed area of bending profile/pipe was localized then analogized to compressed column. Pipe has ratio of thickness to outer diameter greater than 0.1 will undergo plastic wrinkling. Tangent modulus, shanley and reduced modulus will be used to predict when the wrinkling begins to exist. The result shows that prediction by reduced modulus theorem, the starting of wrinkling exist faster than prediction using shanley or tangent modulus theorem. The percentage of difference of the starting wrinkling between reduced modulus and tangent modulus to tangent modulus is 95 % and between shanley and tangent modulus to tangent modulus is 39%.

Keywords: Profile, bending, plastic buckling, wrinkling.

PENDAHULUAN

Pada proses pembentukan, suatu elemen dibentuk dengan salah satu caranya memberi beban melampaui kekuatan elastisnya. Analisa tegangan di luar batas elastis telah banyak dilakukan, baik secara teoritis maupun melalui percobaan-percobaan. Dalam hal ini, persoalan *spring back effect* menjadi salah satu kajian yang mendalam. *Spring back effect* pembentukan material menyebabkan sulitnya pencapaian geometri dari suatu desain secara presisi. Dalam analisa, pengaruh *spring back* didekati menggunakan parameter tegangan luluh bahan [1,2,3]. Pendekatan ini cukup berhasil pada pembentukan elemen dari pelat yang cukup tebal. Pada kasus penekukan, pendekatan ini juga cukup berhasil pada kondisi dimana ketebalan pelat cukup

besar. Pada kasus penekukan profil berdinding tipis, daerah yang menerima beban tekan mengalami *buckling* yang ditandai oleh munculnya kerutan-kerutan sebagai kegagalan dari proses ini [4,5]. Penyelesaian permasalahan ini dapat dilakukan dengan cara mencoba mengetahui pengaruh ketebalan profil terhadap munculnya kerutan pada proses penekukan melalui banyak percobaan. Proses penekukan pada profil berdinding tipis mengakibatkan perubahan geometri penampangnya [6,7]. Perubahan geometri penampang perlu diperhatikan dalam hal untuk memenuhi batasan-batasan desain yang diijinkan. Pengetahuan yang komprehensif tentang penekukan profil berdinding tipis dibutuhkan untuk dapat menghasilkan produk yang dapat memenuhi syarat-syarat suatu desain.

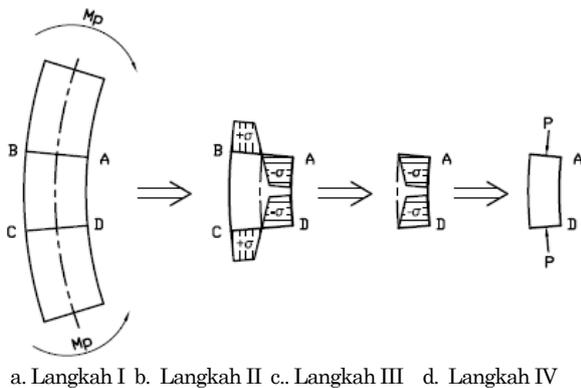
Pembentukan kerutan sebagai batasan masalah dalam pembahasan ini. Pembentukan kerutan plastis dianalisa menggunakan metode *tangent modulus*, *shanely* dan *reduced modulus*.

METODE PENELITIAN

Transformasi Beban

Timbulnya kerutan pada penekukan pipa berinding tipis dapat dianalisa menggunakan ekuivalensi pembebanan. Suatu struktur yang diberi suatu beban dengan cara tertentu akan mengalami perubahan tertentu. Cara pembebanan pada suatu struktur dapat dilakukan dengan berbagai jalan namun memberikan pengaruh yang sama. Pada kasus penekukan pipa berinding tipis, timbulnya kerutan disebabkan momen yang diterapkan memberikan ketidakstabilan geometri struktur yang langsing. Ketidakstabilan geometri struktur yang langsing mulai terjadi saat struktur mendapatkan beban tekan sama dengan beban kritisnya. Transformasi beban untuk menganalisa terjadinya kerutan pada penekukan berinding tipis dapat dilakukan seperti pada Gambar 1.

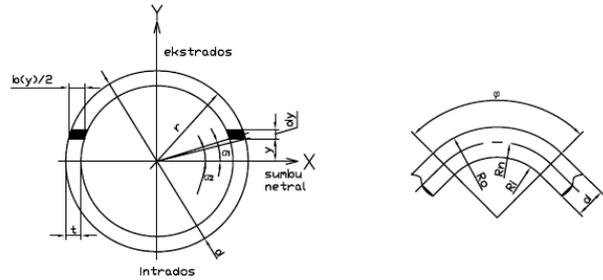
Proses transformasi beban dilakukan dalam empat langkah. Langkah pertama melakukan perhitungan momen yang dibutuhkan untuk memperoleh lengkungan dengan jari-jari hasil penekukan yang sesuai dengan desain (Gambar 1.a). Langkah kedua melakukan analisa distribusi tegangan yang terjadi pada penampang pipa yang ditekuk (Gambar 1.b). Langkah ketiga melakukan isolasi tegangan terhadap bagian pipa yang mengalami tegangan tekan (Gambar 1.c). langkah keempat mentransformasi distribusi tegangan tekan pada permukaan pipa yang ditekuk menjadi beban tekan (Gambar 1.d). Kestabilan geometri struktur dapat dianalisa setelah langkah empat dilakukan dengan cara membandingkan beban tekan (ekuivalensi momen tekuk) dengan beban kritis untuk geometri separuh dari struktur yang ditekuk.



Gambar 1. Tranformasi Beban Penekukan Pipa ke Penekanan Kolom [8]

Definisi Geometri

Pada proses penekukan, momen penekuk untuk menghasilkan jari-jari tekukan (ρ), pipa harus ditekuk dengan jari-jari tekukan (R_n). Analisa penekukan pipa menggunakan definisi geometri seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Definisi Geometri Penekukan

Pada penekukan elastik, nilai R_n diperkirakan menggunakan Persamaan 1[8].

$$R_n = \frac{2}{3} \frac{(r_o^3 - r_i^3)}{I_w \pi^2} \cdot SR^2 \cdot r_g^2 \tag{1}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pendekatan Tangent Modulus

Penelitian untuk memperkirakan nilai *tangent modulus* berkembang dan disempurnakan oleh Ramberg dan Osgood [9] yang membahas kurva tegangan dan regangan. Persamaan Ramberg dan Osgood (Persamaan 2) cukup tepat untuk memperkirakan bentuk kurva paduan aluminium namun memiliki deviasi yang cukup besar untuk paduan baja. Persamaan Ramberg dan Osgood selanjutnya diperbaiki oleh Rasmussen [10] (Persamaan 6).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \tag{2}$$

$$n = 1 + \frac{0,3853}{\log_{10} \frac{\sigma_1}{\sigma_2}} \tag{3}$$

$$K = \left(\frac{1}{m_1} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_1}{E} \right)^{1-n} = \left(\frac{1}{m_2} - 1 \right) \left(\frac{\sigma_2}{E} \right)^{1-n} \tag{4}$$

dimana, $m_1 = 0,7$, σ_1 ialah kekuatan luluh sekan (*secant yield strength*), σ_2 ialah kekuatan luluh sekan kedua (*second secant yield strength*) dan $m_2 = 0,85$.

Modulus tangent ditentukan sebagai berikut.

$$\frac{1}{E_t} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{1}{E} + \frac{nK}{\sigma} \left(\frac{\sigma}{E} \right)^{n-1} \tag{5}$$

Kurva tegangan dan regangan untuk seluruh daerah tegangan *stainless steel* sebagai berikut:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n & \text{untuk } \sigma \leq \sigma_{0,2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0,2}}{E_{0,2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0,2}}{\sigma_u - \sigma_{0,2}} \right)^m + \varepsilon_{0,2} & \text{untuk } \sigma > \sigma_{0,2} \end{cases} \quad (6)$$

untuk paduan austenitic dan dupleks

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} = 0,2 + 185e \quad (7)$$

untuk semua paduan,

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} = \frac{0,2 + 185e}{1 - 0,0375(n-5)} \quad (8)$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} \quad (9)$$

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(\sigma_{0,2}/\sigma_{0,01})} \quad (10)$$

$$m = 1 + 3,5 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} \quad (11)$$

$$e = \frac{\sigma_{0,2}}{E_0} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{0,2} = \frac{\sigma_{0,2}}{E_0} + 0,002 \quad (13)$$

Buckling mulai terjadi saat tegangan tegangan maksimum pada profil yang ditekuk mencapai tegangan plastis bahan (*proof stress*). Nilai modulus *tangent* ditentukan menggunakan derivasi Persamaan 5, sebagai berikut.

$$\frac{1}{E_t} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{d}{d\sigma} \left(\frac{\sigma - \sigma_{0,2}}{E_{0,2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0,2}}{\sigma_u - \sigma_{0,2}} \right)^m + \varepsilon_{0,2} \right)$$

$$\frac{1}{E_t} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{1}{E_{0,2}} + \frac{m\varepsilon_u(\sigma - \sigma_{0,2})^{m-1}}{(\sigma_u - \sigma_{0,2})^m}$$

Untuk $\sigma = \sigma_{0,2}$ maka

$$\frac{1}{E_t} = \frac{1}{E_{0,2}} \quad (14)$$

atau $E_t = E_{0,2}$.

Tegangan yang ditanggung bahan menjadi

$$\sigma_{0,2} = \frac{E_{0,2}\pi^2}{(SR)^2}$$

sehingga SR dapat ditentukan menjadi:

$$SR = \pi \sqrt{\frac{E_{0,2}}{\sigma_{0,2}}}$$

Dengan substitusi nilai SR di atas ke Persamaan 1, diperoleh radius penekukan di mana kerutan mulai terjadi sebagai berikut.

$$R_n = \frac{2}{3} \frac{(r_o^3 - r_i^3)}{I_w} \cdot \frac{E_{0,2}}{\sigma_{0,2}} \cdot r_g^2 \quad (15)$$

Pendekatan *Reduced Modulus*

Melalui pendekatan *Reduced Modulus*, nilai modulus *tangent* disesuaikan menggunakan persamaan;

$$E_r = \frac{4E_0E_t}{(\sqrt{E_0} + \sqrt{E_t})^2}$$

Nilai σ_r diperkirakan menggunakan persamaan

$$\frac{1}{E_r} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{1}{E_{0,2}} + \frac{m\varepsilon_u(\sigma_r - \sigma_{0,2})^{m-1}}{(\sigma_u - \sigma_{0,2})^m}$$

$$\sigma_r = \left(\left(\frac{1}{E_r} - \frac{1}{E_{0,2}} \right) \frac{(\sigma_u - \sigma_{0,2})^m}{m\varepsilon_u} \right)^{1/(m-1)} + \sigma_{0,2}$$

Nilai SR dihitung sebagai berikut

$$\sigma_t = \frac{E_t\pi^2}{(SR)^2}$$

$$(SR)^2 = \frac{E_t\pi^2}{\sigma_t}$$

$$(SR)^2 = \frac{\frac{4E_0E_t}{(\sqrt{E_0} + \sqrt{E_t})^2} \pi^2}{\left(\left(\frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_{0,2}} \right) \frac{(\sigma_u - \sigma_{0,2})^m}{m\varepsilon_u} \right)^{1/(m-1)} + \sigma_{0,2}}$$

Radius tekukan di mana kerutan mulai terjadi menjadi

$$R_n = \frac{2}{3} \frac{(r_o^3 - r_i^3)}{I_w} \cdot \frac{\frac{4E_0E_t}{(\sqrt{E_0} + \sqrt{E_t})^2} \pi^2}{\left(\left(\frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_{0,2}} \right) \frac{(\sigma_u - \sigma_{0,2})^m}{m\varepsilon_u} \right)^{1/(m-1)} + \sigma_{0,2}} r_g^2 \quad (16)$$

Teori *Shanley*

Untuk kasus penekukan pipa, nilai SR di mana pipa mulai mengalami kerutan menjadi dapat didekati menggunakan persamaan

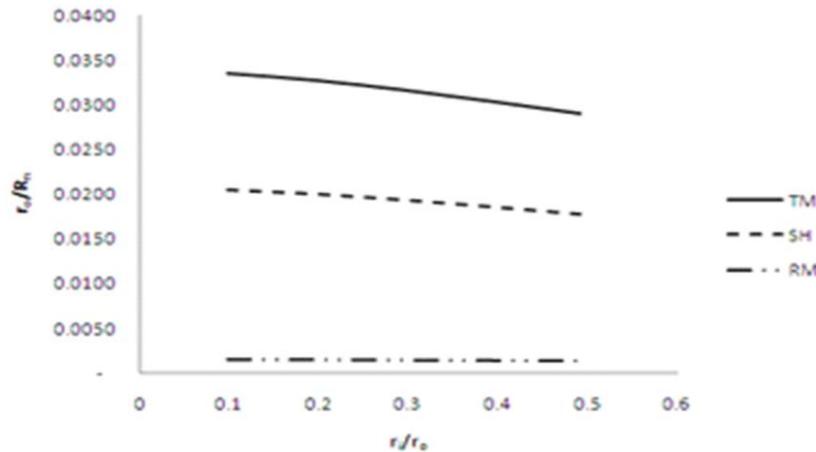
$$(SR)^2 = \frac{E_t\pi^2}{\sigma_t \left(1 + \frac{1-\tau}{1+\tau} \right)} \quad (17)$$

di mana $\tau = \frac{E_t}{E_0}$. Dengan menyubstitusikan nilai $E_t = E_{0,2}$, $\sigma_t = \sigma_{0,2}$ dan modifikasi nilai $(SR)^2$ pada Persamaan 2.22 menggunakan Persamaan 2.24, jari-jari penekukan saat pipa mulai mengalami kerutan menjadi sebagai berikut.

$$R_n = \frac{2}{3} \frac{(r_o^3 - r_i^3)}{I_w} \cdot \frac{E_{0,2}}{\sigma_{0,2} \left(1 + \frac{1-\tau}{1+\tau} \right)} \cdot r_g^2 \quad (18)$$

Batas Pembentukan Kerutan

Sebagai contoh untuk membandingkan hasil perhitungan menggunakan ketiga teori tersebut di atas, digunakan data material baja tahan karat 304L. Dalam bentuk grafik nilai perbandingan antara r_i/r_o lawan r_o/R_n , hasil perhitungan disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perkiraan Mulai Terjadinya Kerutan Menggunakan Metode *Tangent Modulus (TM)*, *Shanley (SH)* dan *Reduced Modulus (RM)*

Metode tangent modulus memberikan perkiraan mulai terjadinya kerutan pada permukaan pipa yang ditebuk paling lambat dibanding metode *shanley* dan *reduced modulus*. Persentase perbedaan antara hasil perhitungan menggunakan metode *tangent modulus* dan *shanley* dibanding metode *tangent modulus* adalah 39 % sementara itu persentase perbedaan antara hasil perhitungan menggunakan metode *tangent modulus* dan *reduced modulus* dibanding metode *tangent modulus* adalah 95%.

Mulai terjadinya kerutan dalam perhitungan di atas perlu dipertimbangkan kembali untuk perancangan sesungguhnya karena batas toleransi kerutan yang timbul suatu persyaratan desain akan berbeda dengan hasil perhitungan teoritis. Jika diinginkan hasil tekukan sama sekali tidak mengalami kerutan, pendekatan menggunakan metode *tangent modulus* dapat digunakan.

KESIMPULAN

Metode *tangent modulus*, *shanley* dan *reduced modulus* yang digunakan untuk memperkirakan terjadinya buckling plastis pada kolom yang diberi beban tekan dapat digunakan untuk memperkirakan terjadinya kerutan pada proses penekukan pipa. Metode *tangent modulus* dapat digunakan untuk memperkirakan batas penekukan pipa jika diinginkan hasil penekukan tanpa kerutan. Penggunaan metode *tangent modulus* untuk menentukan batas terjadinya kerutan pada proses penekukan pipa dapat dikoreksi menurut syarat batas perancangan terjadinya kerutan pada proses penekukan pipa. Penggunaan metode perkiraan mulai terjadinya kerutan pada proses penekukan pipa atau profil sebaiknya dikoreksi kembali berdasarkan persyaratan tingkat terjadinya kerutan produk.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ini disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Tidar Magelang yang telah mendanai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ashby, M. F., Jones, D. R. H., *Engineering Materials 1: An Introduction to their Properties and Applications*, second edition, Butterworth-Heinemann, Great Britain, 2002.
- [2] Dieter, G. E., *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Book Company, London, 1988.
- [3] Hosford, H.F., Caddell, R.M., *Metal Forming, Mechanism and Metallurgy*, third edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
- [4] Naoi, H., Kitakami, N., Mizumura, M., dan Kuriyama, Y., Study of Intrusion Bending for Steel Tubes with Thin Wall Thickness. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 17, pp. 376-381, 2008.
- [5] Zhao, G., Liu, Y., Yang, H., Effect of Clearance on Wrinkling of Thin-Walled Rectangular Tube in Rotary Draw Bending Process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 50:85–92, 2010.
- [6] Tang, D., Li, D., Yin, Z., Peng, Y., Roles of Surface Booster System on Bending of Thin-Walled Copper Tube, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 18 (4), pp. 369-377, 2009.
- [7] Liu, Y., Daxin, E., Effects of Cross-Sectional Ovalization on Springback and Strain Distribution of Circular Tubes under Bending, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Publikasi online, 2011.

- [8] Iswahyudi, S., *Mekanisme Pembentukan Kerutan pada Proses Penekukan Pipa*, Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Ke-2, pp. C65-C69, Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim, Semarang, 2011.
- [9] Ramberg. W., Osgood, W.R., *Description of Stress-strain Curves by Three Parameters*, Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, 1943.
- [10] Rasmussen, K. J. R., *Full-range Stress-strain Curves for Stainless Steel Alloys*. Research Report No R811. Centre for Advanced Structural Engineering, Department of Civil Engineering, The University of Sydney, 2001.