
MEKANISME PEMBENTUKAN KERUTAN PADA PROSES PENEKUKAN PIPA

Sigit Iswahyudi

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tidar Magelang

Jl.Kaptan Suparman No. 39, Magelang

e-mail: sigit_iswahyudi@yahoo.com

Abstrak

Pengerutan dan perubahan geometri penampang merupakan hal yang menyebabkan kegagalan pada proses penekukan pipa. Untuk menghindari kegagalan proses, perlu diketahui mekanisme proses pembentukan kerutan, perubahan geometri penampang dan batasan-batasannya. Pada tulisan ini dibahas mekanisme pembentukan kerutan melalui pendekatan mekanisme buckling pada penekukan pipa. Pengaruh rasio tebal pipa-diameternya dan rasio tebal pipa-radius penekukan terhadap stabilitas geometri pipa dihitung.

Kata kunci: penekukan, pipa, buckling, kerutan

PENDAHULUAN

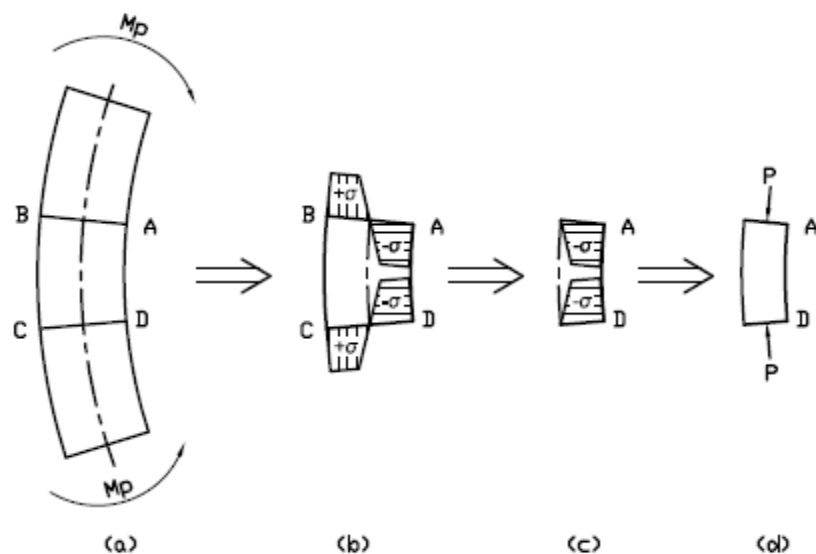
Proses penekukan merupakan salah satu proses yang penting dalam dunia industri. Di bidang otomotif, pemanfaatan profil dan pipa dilakukan untuk mengurangi bobot kendaraan sehingga kebutuhan akan bahan bakar menurun. Pada proses penekukan, permasalahan umum yang dihadapi adalah *springback* yang menyebabkan ketidaktepatan geometri. Pada penekukan pipa, permasalahan bertambah karena terjadinya ovalisasi. Pada penekukan pipa berdinding tipis, timbulnya kerutan menyebabkan kegagalan disamping terjadinya ovalisasi.

Usaha-usaha untuk memperbaiki proses penekukan, khususnya penekukan pipa telah dilakukan. Liu dan Daxin (2010) menggunakan model analitik dengan mempertimbangkan ovalisasi untuk menghitung *springback* dan regangan tangensial pada pipa yang ditekuk. Pengaruh ovalisasi terhadap *springback* dapat diabaikan jika rasio jari-jari tekukan dan rasio ketebalan dinding cukup besar, dan pengaruh ovalisasi tergantung pada jenis material. Naoi dkk. (2008) menyatakan bahwa kerutan merupakan masalah pada penekukan pipa berdinding tipis. Pembentukan kerutan membatasi proses manufaktur. Dengan terjadinya eksentrisitas, ketebalan dinding menurun di daerah luar tekukan dan meningkat di daerah dalam tekukan. Dengan mengacu ovalitas, diameter luar dari panjang vertikal cenderung lebih besar dari pada panjang horisontal. Pengaruh nilai r terhadap eksentrisitas lebih jelas dari pada kekuatan tarik dan ketebalan dinding. Ketika rasio radius tekukan turun, kerutan timbul pada sumbu horisontal atau bagian dalam. Semakin tinggi kekuatan tarik bahan dan semakin tipis dinding pipa, semakin mudah kerutan timbul pada pipa. Ketika rasio sudut *gyro* meningkat, timbulnya kerutan di sumbu horisontal menurun, namun di daerah dalam tekukan meningkat.

Kerutan timbul di daerah sumbu horisontal dan di daerah dalam tekukan. Pada kasus timbulnya kerutan di daerah dalam tekukan, dinding pipa mengalami beban tekan. Beban tekan yang ditanggung bahan berukuran langsing dapat menyebabkan *buckling*. Timbulnya kerutan di daerah dalam tekukan merupakan kejadian *buckling* pada penekukan pipa berdinding tipis. Secara analitik, analisa *buckling* pada penekukan pipa belum dilakukan. Pada tulisan ini, analisa *buckling* secara analitik akan dilakukan untuk memperkirakan terjadinya kerutan pada proses penekukan pipa berdinding tipis. Namun pada tulisan ini dibatasi pada *buckling* elastik.

METODOLOGI

Timbulnya kerutan pada penekukan pipa berdinding 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 berdinding 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 berdinding tipis dapat dilakukan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Transformasi beban penekukan pipa ke penekanan kolom

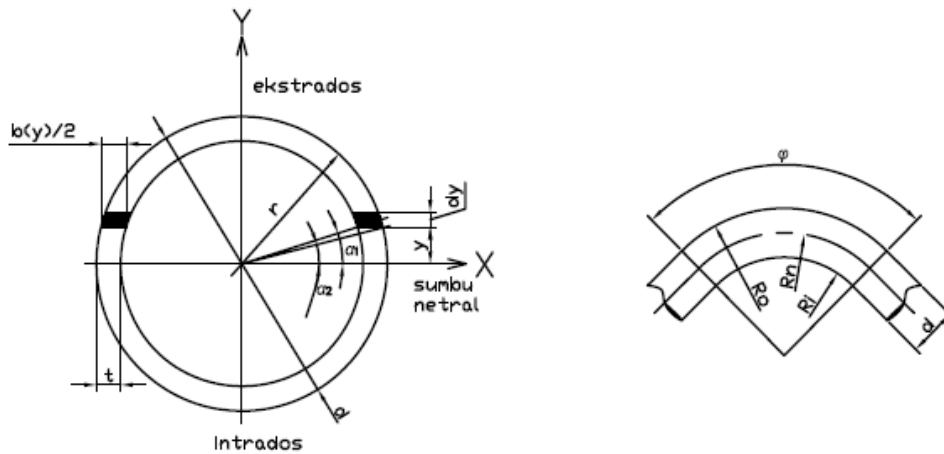
Proses transformasi beban dilakukan dalam empat langkah. Langkah pertama melakukan perhitungan momen yang dibutuhkan untuk memperoleh lengkungan dengan jari-jari hasil penekukan yang sesuai dengan desain (Gambar 1.a). Langkah kedua melakukan analisa distribusi tegangan yang terjadi pada penampang pipa yang ditekek (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 ditekek 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 ditekek.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Buckling terjadi sebelum tegangan normal pada kolom mencapai kekuatan material kolom. Tegangan yang diijinkan pada elemen yang mengalami beban tekan tergantung pada rasio kerampingannya yang dibagi menjadi pendek, menengah dan panjang. Untuk kolom pendek kekuatannya dibatasi oleh batas kekuatan bahan. Untuk kolom menengah kekuatannya dibatasi oleh batas tak elastiknya (*inelastic*). Sementara untuk kolom panjang dibatasi oleh batas elastiknya. Klasifikasi ini tergantung pada geometri (rasio kerampingan) dan sifat-sifat material (Modulus Young dan kekuatan luluhnya).

Pada proses penekukan, salah satu dari tiga jenis *buckling* dapat terjadi. Pada penekukan pipa yang sangat tipis, proses penekukan akan memberikan *buckling* elastik. Kerutan yang timbul pada proses penekukan pipa bersifat tidak elastis, setelah beban penekuk dilepas, kerutan dan tekukan pada pipa tidak hilang. Penekukan ini juga tidak melebihi kekuatan material, sehingga proses pembentukan kerutan dapat digolongkan ke dalam kejadian *buckling* pada kolom menengah. Untuk menyelesaikan persoalan ini, teori *tangent-modulus* atau teori *reduced-modulus* atau teori *Shanley* dapat digunakan sebagai pendekatan. Berdasarkan teori Shanley, beban kritis terletak antara beban kritis yang diperkirakan menggunakan teori *tangent-modulus* dan teori *reduced-modulus*.

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



Gambar 2. Definisi geometri penekukan

Penekukan elastik

Momen tekukan pada kasus elastik dihitung menggunakan persamaan 1 (Silva, 2006). Distribusi tegangan pada penampang pipa mengikuti persamaan 2. Dari distribusi tegangan pada daerah tertekan, ekuivalensi beban yang ditanggung oleh pipa dihitung menggunakan persamaan 3.

$$M = \frac{EI}{R_n} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{Ey}{R_n} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P &= \int_{-r_o}^0 \sigma dA \\ &= \int_{-r_o}^0 \frac{Ey}{R_n} b(y) dy \\ &= \int_{-r_o}^{-r_i} \frac{2Ey}{R_n} r_o \cos \alpha_2 dy + \int_{-r_i}^0 \frac{2Ey}{R_n} (r_o \cos \alpha_2 - r_i \cos \alpha_1) dy \quad (3) \end{aligned}$$

dengan melakukan substitusi nilai $\cos \alpha_1 = \sqrt{1 - (y^2/r_i^2)}$ dan $\cos \alpha_2 = \sqrt{1 - (y^2/r_o^2)}$ ke Persamaan (3) diperoleh gaya tekan pada kolom (P) sebagai berikut (r_i adalah jari-jari lingkaran dalam penampang pipa dan r_o adalah jari-jari luar penampang pipa).

$$\begin{aligned} P &= -\frac{2E}{3R_n} \left[(r_o^2 - y^2)^{3/2} \Big|_{-r_o}^{-r_i} + (r_o^2 - y^2)^{3/2} - (r_i^2 - y^2)^{3/2} \Big|_{-r_i}^0 \right] \\ &= -\frac{2E}{3R_n} (r_o^3 - r_i^3) \quad (4) \end{aligned}$$

Buckling elastik

Stabilitas geometri struktur saat diberi beban tekan tergantung pada besar beban, rasio kerampingan (*slenderness ratio*, SR) dan jenis material. Nilai $SR = L_{eff}/r_m$, di mana L_{eff}

adalah panjang efektif dan r_m adalah radius girasi yang diperoleh dari $r_m = \sqrt{I/A}$. Dengan menggunakan rumus Euler, beban *buckling* kritis (P_{kr}) sebagai berikut.

$$P_{kr} = \frac{EI\pi^2}{L_{eff}^2} \quad (5)$$

Pada penekukan pipa berdinding tipis, nilai I dihitung hanya untuk separuh bagian dari pipa yang dikenai oleh beban tekan. Untuk menghitung momen inersia penampang terhadap pusat massa \bar{y} , posisi pusat massa dari separuh penampang dihitung sebagai berikut.

$$\bar{y} = \frac{\int y b(y) dy}{\int b(y) dy}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\int_{-r_i}^{-r_o} 2yr_o \cos \alpha_2 dy + \int_{-r_i}^0 2y(r_o \cos \alpha_2 - r_i \cos \alpha_1) dy}{\int_{-r_o}^{-r_i} 2r_o \cos \alpha_2 dy + \int_{-r_i}^0 2(r_o \cos \alpha_2 - r_i \cos \alpha_1) dy} \\
&= \frac{\int_{-r_o}^{-r_i} 2y\sqrt{r_o^2 - y^2} dy + \int_{-r_i}^0 2y(\sqrt{r_o^2 - y^2} - \sqrt{r_i^2 - y^2}) dy}{\int_{-r_o}^{-r_i} 2\sqrt{r_o^2 - y^2} dy + \int_{-r_i}^0 2(\sqrt{r_o^2 - y^2} - \sqrt{r_i^2 - y^2}) dy} \\
&= \frac{-\frac{2}{3}(r_o^3 - r_i^3)}{\frac{\pi r_o^2}{2} - \frac{\pi r_i^2}{2}} \\
&= -\frac{4}{3\pi} \frac{r_o^3 - r_i^3}{r_o^2 - r_i^2} \quad (6)
\end{aligned}$$

Momen inersia kedua untuk setengah lingkaran terhadap diameternya adalah $\frac{\pi R^4}{8}$. Momen inersia kedua dari luasan yang setengah pipa (I_n) dihitung sebagai $\frac{\pi(R_o^4 - R_i^4)}{8}$. Momen inersia setengah penampang pipa terhadap sumbu sejajar dengan diameternya dan melalui titik beratnya (I_{W}) adalah:

$$\begin{aligned}
I_w &= I_n + A\bar{y}^2 \\
&= \frac{\pi(r_o^4 - r_i^4)}{8} + \left(\frac{\pi r_o^2}{2} - \frac{\pi r_i^2}{2}\right) \left(-\frac{4}{3\pi} \frac{r_o^3 - r_i^3}{r_o^2 - r_i^2}\right)^2 \\
&= \frac{\pi(r_o^4 - r_i^4)}{8} + \frac{8}{9\pi} \frac{(r_o^3 - r_i^3)^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (7)
\end{aligned}$$

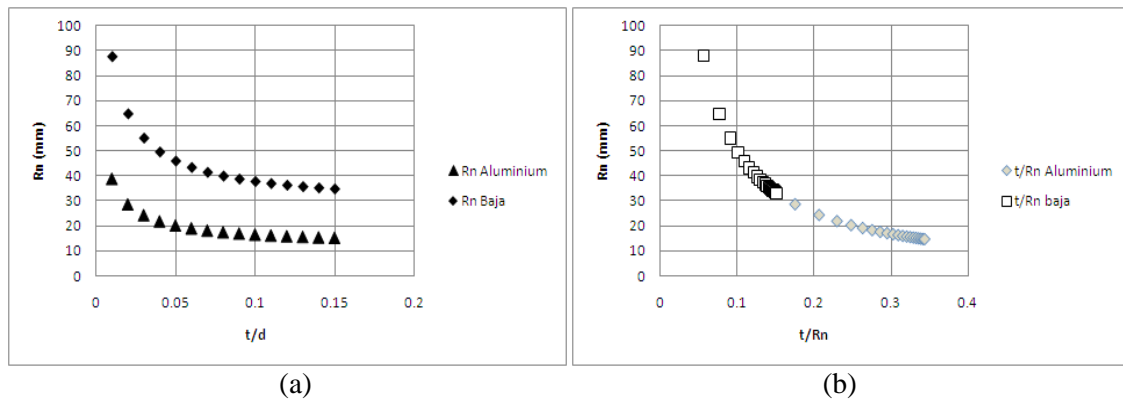
Selanjutnya, radius girasi dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
r_m &= \sqrt{\frac{I_w}{A}} \\
&= \sqrt{\frac{\frac{\pi(r_o^4 - r_i^4)}{8} + \frac{8}{9\pi} \frac{(r_o^3 - r_i^3)^2}{r_o^2 - r_i^2}}{\frac{\pi r_o^2}{2} - \frac{\pi r_i^2}{2}}} \quad (8)
\end{aligned}$$

Stabilitas geometri pipa

Stabilitas geometri pipa saat ditekuk dianalisa dengan kondisi batas kedua ujungnya merupakan ujung bebas. Secara teoritis, panjang efektifnya adalah panjang kolom ekuivalen - panjang kolom yang diekuivalensi dengan kondisi penekukan-, namun secara teknis panjang efektifnya sebesar 1,2 kali panjang kolom ekuivalen. Mode *buckling* mengikuti bentuk $\sin \frac{\pi z}{L_{eff}}$, di mana z adalah panjang kolom. Batas stabilitas tergantung pada jenis material. Sebagai simulasi, akan digunakan baja struktur yang memiliki batas stabilitas elastik $SR > 150$ dan paduan aluminium AA 6061-T6 yang memiliki batas stabilitas elastik $SR > 66$. Dalam perhitungan, untuk baja struktur digunakan $SR_{st} = 150$ dan $E_{Baja} = 207 GPa$. Untuk aluminium AA 6061-T6 digunakan $SR = 66$ dan $E_{Al} = 69 GPa$. Dari Persamaan (4), (5) dan (8) Hubungan geometri tekukan (R_n) dengan geometri penampang pipa pada saat mencapai batas kestabilan *buckling* elastik ditulis sebagai berikut.

$$R_n = \frac{2}{3} \frac{(r_o^3 - r_i^3)}{I\pi} \cdot SR \cdot r_m \quad (9)$$



Gambar 3. (a) Pengaruh rasio tebal pipa-diameter pipa terhadap jari-jari lengkungan tekukan saat mulai terjadi ketidakstabilan elastis. (b) Pengaruh rasio tebal pipa jari-jari lengkungan terhadap jari-jari lengkungan tekukan saat mulai terjadi ketidakstabilan elastis

Kestabilan geometri pada proses penekukan dipengaruhi oleh jenis material dan rasio tebal pipa-diameter pipa. Gambar 3(a) dan (b) menunjukkan bahwa geometri aluminium lebih stabil dari pada geometri baja. Jari-jari tekukan untuk mencapai ketidakstabilan elastis untuk aluminium lebih kecil dari pada yang untuk baja. Perubahan nilai R_n terlihat curam untuk nilai $\frac{t}{d}$ kurang dari 0,1, sementara itu untuk $\frac{t}{d}$ lebih dari 0,1 perubahannya landai. Hal ini memperlihatkan bahwa pipa dengan nilai $\frac{t}{d}$ kurang dari 0,1 peka terhadap beban tekan (ekuivalen dengan penerapan momen lengkung).

KESIMPULAN

Analisa proses penekukan pipa dapat dilakukan ekuivalensi beban tekukan ke beban tekan untuk memperkirakan kestabilan geometri pipa terhadap pelengkungan hingga jari-jari tertentu. Pada tulisan ini baru dibahas analisa kestabilan elastik geometri pipa saat diberi tekukan. Perubahan elastik yang terjadi pada pipa akan hilang saat beban dilepaskan. Untuk mengetahui pembentukan kerutan yang sebenarnya, analisa stabilitas tak elastik dibutuhkan pada proses penekukan. Ekuivalensi beban tekukan dengan beban tekan perlu dilanjutkan ke mode *buckling* tak elastik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada LPPM Universitas Tidar Magelang yang telah mendanai penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Liu, Y., Daxin, E.. 2011. Effects of Cross-Sectional Ovalization on Springback and Strain Distribution of Circular Tubes Under Bending. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Publikasi online.
- Naoui, H., Kitakami, N., Mizumura, M., dan Kuriyama, Y. 2008. Study of Intrusion Bending for Steel Tubes with Thin Wall Thickness. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Volume 17, halaman 376-381.
- Silva, V.D.. 2006. *Mechanics and Strength of Materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.