

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 PERHITUNGAN TEGANGAN PIPA SEBELUM *WATER HAMMER* DAN KETIKA TERJADI *WATER HAMMER*

Berikut ini adalah perhitungan masing-masing tegangan yang terjadi pada pipa sebelum terjadi *water hammer* dan saat terjadi *water hammer*.

4.1.1 Perhitungan Tegangan Pipa Sebelum Terjadi *Water Hammer*

Ada beberapa jenis tegangan yang terjadi pada pipa ketika didalamnya ada tekanan internal dari fluida. Tegangan tersebut diantaranya adalah tegangan longitudinal, tegangan tangensial, tegangan radial, dan tegangan geser. Berikut ini adalah perhitungan dari masing-masing tegangan pada pipa ketika belum terjadi *water hammer*.

a. Perhitungan Tegangan Longitudinal

Tegangan longitudinal bisa diperoleh dengan menghitung persamaan 2.10 sebagai berikut.

$$\sigma_L = \frac{F_{ax}}{Am} + \frac{Mb}{z} + \frac{Pdo}{4t}$$

Namun sebelum itu langkah yang harus dilakukan adalah menentukan beberapa besaran berikut.

- Tegangan Aksial

Tegangan aksial dapat diperoleh dengan perhitungan persamaan 2.1.

$$\sigma_{ax} = \frac{F_{ax}}{A_m} = \frac{P \times A_i}{A_m}$$

Dimana nilai A_m dapat diketahui dengan rumus 2.3.

$$A_m = \frac{\pi(do^2 - di^2)}{4}$$

$$A_m = \frac{3,14(33,4^2 \text{ mm} - 26,64^2 \text{ mm})}{4}$$

$$A_m = 318,6 \text{ mm}^2$$

$$A_m = 0,0003186 \text{ m}^2$$

Nilai A_i dapat diketahui dengan rumus 2.2.

$$A_i = \frac{\pi(di^2)}{4}$$

$$A_i = \frac{3,14(26,64^2 \text{ mm})}{4}$$

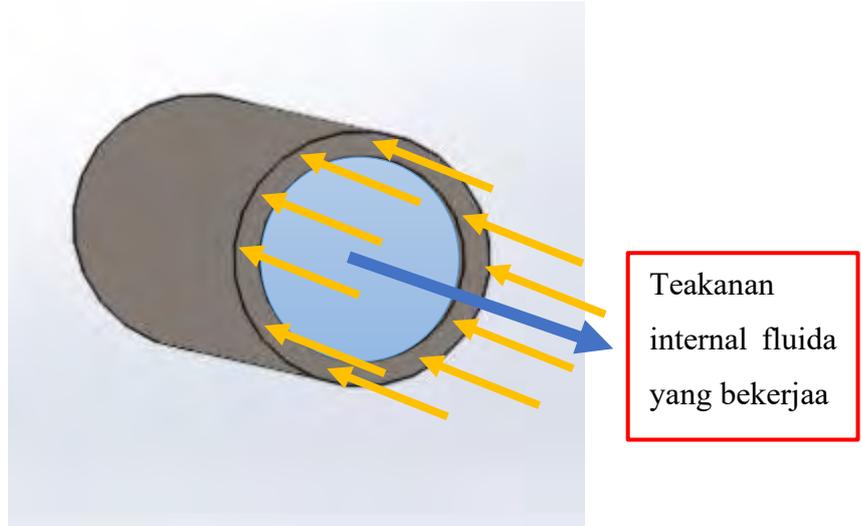
$$A_i = 557,1 \text{ mm}^2$$

$$A_i = 0,0005571 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{ax} = \frac{225,553 \text{ MPa} \times 0,0005571 \text{ m}^2}{0,0003186 \text{ m}^2}$$

$$\sigma_{ax} = 394,399 \text{ MPa}$$

Besarnya tegangan aksial yang terjadi pada pipa adalah $\sigma_{ax} = 394,399 \text{ MPa}$ dibulatkan menjadi $\sigma_{ax} = 394,4 \text{ MPa}$. Arah tegangan aksial pada pipa adalah sebagai berikut.



Gambar 4. 1 Tegangan Kibat Gaya Aksial

Arah tegangan yang diakibatkan gaya aksial ditunjukkan pada gambar 4.1 yaitu berlawanan arah dengan aliran fluida.

- Tegangan akibat tekanan dalam (*internal force*)

Tegangan ini dapat diperoleh dengan persamaan 2.4 berikut.

$$\sigma_{LP} = \frac{P A_i}{A_m} = \frac{P d_i^2}{d_o^2 - d_i^2} = \frac{P d_i^2}{4tdm} = \frac{P d_o}{4t}$$

$$\sigma_{LP} = \frac{P d_o}{4t}$$

$$P = 225,553 \text{ MPa}$$

$$d_o = 33,4 \text{ mm} = 0,0334 \text{ m}$$

Ketebalan pipa dapat diketahui dengan menggunakan perhitungan manual dengan persamaan 2.5.

$$t = \frac{P \cdot d_o}{2(\sigma E + P \cdot Y)} + C$$

$$P = 225,553 \text{ MPa} = 0,00225553 \text{ KN/mm}^2$$

$$d_o = 33,4 \text{ mm}$$

$$\sigma = 16,7 \text{ ksi (didapatkan dari ASME B31.3)} = 11514,244 \text{ MPa} = 0,1151424 \text{ KN/mm}^2$$

$$E = 1 \text{ (didapatkan dari ASME B31.3)}$$

$$Y = 0,4 \text{ (didapatkan dari ASME B31.3)}$$

$$C = 0,5$$

Sehingga tebal pipa yang dibutuhkan adalah.

$$t = \frac{0,00225553 \text{ KN/mm}^2 \times 33,4 \text{ mm}}{2(0,1151424 \text{ KN/mm}^2 \times 1 + 0,00225553 \text{ KN/mm}^2 \times 0,4)} + 0,5$$

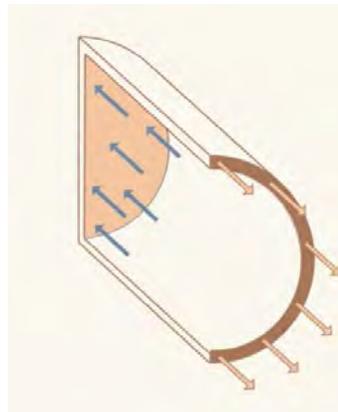
$$t = 0,824 \text{ mm}$$

Namun dalam penerapannya tidak ada pipa dengan ketebalan 0,824 mm dan ketebalan pipa yang digunakan dalam jalur pipa *hot water supply* adalah 3,38 mm. Maka nilai tegangan akibat tekanan dalam adalah sebagai berikut.

$$\sigma_{LP} = \frac{225,553 \text{ MPa} \times 0,0334 \text{ m}}{4 \times 0,00338 \text{ m}}$$

$$\sigma_{LP} = 557,209 \text{ MPa}$$

Besarnya nilai tegangan akibat tekanan dalam adalah $\sigma_{LP} = 557,209 \text{ MPa}$ dibulatkan menjadi $\sigma_{LP} = 557,21 \text{ MPa}$. Arah tegaganya adalah sebagai berikut.



Gambar 4. 2 Tegangan Akibat Tekanan Internal

Arah tegangan yang munculkan akibat adanya tekanan internal adalah berlawanan arah dengan aliran fluida.

- Tegangan akibat momen tekuk

Tegangan ini dapat diperoleh dari perhitungan persamaan 2.6.

$$\sigma_b = \frac{Mb.c}{I} = \frac{Mb.r}{I} = \frac{Mb}{z}$$

Mb : Nilainya dapat diperoleh dengan perhitungan persamaan 2.7

$$Z : 0,133 \text{ inchi}^3 = 0,000002179 \text{ m}^3$$

Untuk menentukan nilai Mb adalah sebagai berikut.

$$Mb = \frac{wL^2}{8}$$

$$L : 2,85 \text{ m}$$

Untuk menentukan berat keseluruhan pipa dapat dihitung dengan persamaan 2.16. Dimana W pipa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.14 dan W fluida dapat dihitung dengan persamaan 2.15.

Menentukan berat pipa (W pipa)

$$W_{\text{pipa}} = \rho_{\text{pipa}} \times A_{\text{pipa}}$$

$$W_{\text{pipa}} = 8000 \text{ kg/m}^3 \times 0,0003186 \text{ m}^2$$

$$W_{\text{pipa}} = 2,548 \text{ kg/m}$$

Menentukan berat fluida

$$W_{\text{fluida}} = \rho_{\text{fluida}} \times A_{\text{fluida}}$$

$$W_{\text{fluida}} = 902,2 \text{ kg/m}^3 \times 3,14 \times 0,01332^2 \text{ m}^2$$

$$W_{\text{fluida}} = 0,502 \text{ kg/m}$$

Jadi berat keseluruhan pipa dapat dihitung sebagai berikut.

$$W_{total} = (W_{pipa} + W_{fluida}) \times g$$

$$W_{total} = (2,548 + 0,052) \times 9,8$$

$$W_{total} = 25,48 \text{ N/m}$$

Jadi berat total dari pipa adalah 25,48 N/m

$$Mb = \frac{25,48 \text{ N/m} \times (2,85 \text{ m})^2}{8}$$

$$Mb = 2,587 \text{ Nm}$$

$$Mb = 0,0258 \text{ KNm}$$

Maka nilai tegangan akibat momen tekuk adalah sebagai berikut.

$$\sigma_b = \frac{Mb}{z}$$

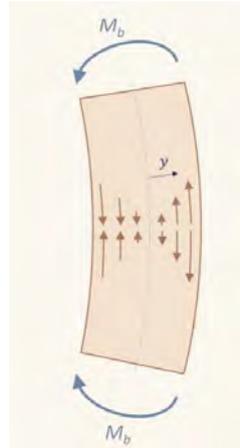
$$\sigma_b = \frac{0,0258 \text{ KNm}}{0,000002179 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_b = 11840,29 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_b = 1184,029 \text{ MPa}$$

Besarnya nilai tegangan akibat momen tekuk adalah $\sigma_b = 1184,029 \text{ MPa}$.

Dibulatkan menjadi $\sigma_b = 1184,03 \text{ MPa}$. Arah dari tegangan akibat momen tekuk adalah sebagai berikut.



Gambar 4. 3 Tegangan Akibat Momen Tekuk

Dari semua nilai $\sigma_{ax}, \sigma_{LP}, \sigma_b$ yang telah didapat kemudian dimasukkan ke rumus 2.10.

$$\sigma L = \frac{F_{ax}}{Am} + \frac{Mb}{z} + \frac{Pdo}{4t}$$

$$\sigma L = 394,4 \text{ MPa} + 557,21 \text{ MPa} + 1184,03 \text{ MPa}$$

$$\sigma L = 2135,64 \text{ MPa}$$

Jadi besar nilai tegangan longitudinal dari jalur pipa adalah $\sigma L = 2135,64 \text{ MPa}$.

b. Perhitungan Tegangan Tangensial (*Circumferential Stress*)

Tegangan tangensial dapat diketahui dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan 2.11 seperti berikut.

$$\sigma H = \frac{P \cdot di \cdot L}{2 \cdot t \cdot L} = \frac{P \cdot di}{2 \cdot t} = \frac{P \cdot do}{2t}$$

$$P = 225,553 \text{ MPa}$$

$$do = 33,4 \text{ mm} = 0,0334 \text{ m}$$

$$t = 3,38 \text{ mm} = 0,00338 \text{ m}$$

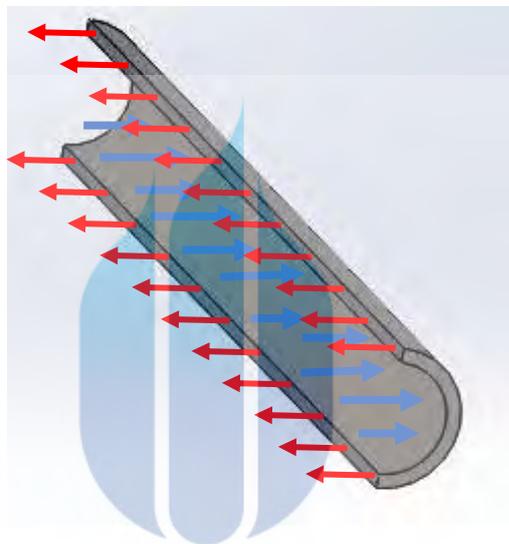
Nilai tegangan tangensialnya adalah sebagai berikut.

$$\sigma_H = \frac{225,553 \text{ MPa} \times 0,0334 \text{ m}}{2 \times 0,00338 \text{ m}}$$

$$\sigma_H = 1114,418 \text{ MPa}$$

Jadi besarnya tegangan tangensial pada jalur pipa adalah $\sigma_H = 1114,418 \text{ Mpa}$.

Berikut ini adalah gambar arah tegangan tangensial.



Gambar 4. 4 Tegangan Tangensial

Untuk mempermudah melihat arah tegangan tangensial pipa dipotong pada sumbu Y sehingga dapat dilihat seperti gambar 4.2 tersebut. Tekanan internal fluida yang terjadi ditandai dengan panah berwarna biru menekan dinding-dinding pipa. Sehingga muncul tegangan searah dengan sumbu tangensial pipa yang disebut tegangan tangensial.

c. Perhitungan Tegangan Radial

Tegangan radial dapat diperoleh dari perhitungan persamaan 2.12 sebagai berikut.

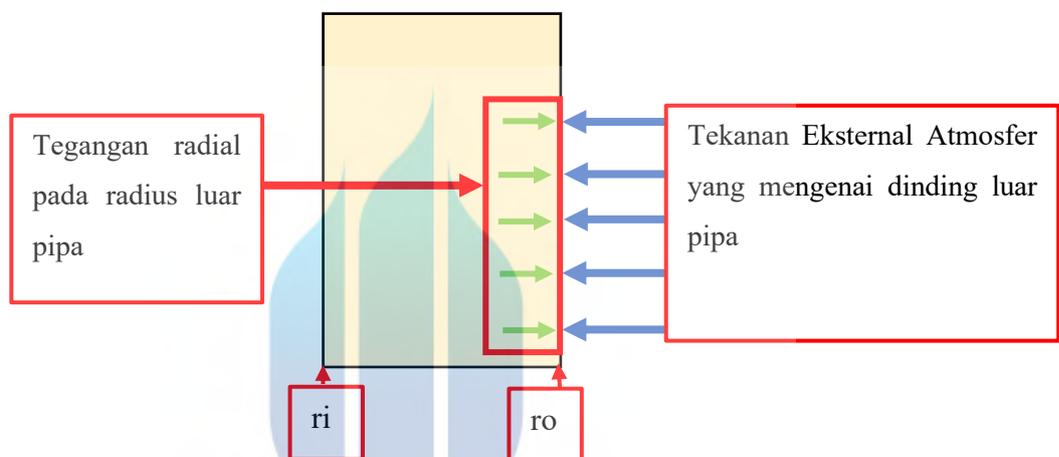
- Tegangan radial pada dinding luar pipa

Sedangkan nilai tegangan radial minimum yang terjadi adalah pada bagian radius luar. Nilai tegangannya dapat diperoleh dari perhitungan persamaan 2.14 sebagai berikut.

$$\sigma_{Rmin} = -P_{atm}$$

$$\sigma_{Rmin} = -0,101325 \text{ MPa}$$

Tegangan radial memiliki nilai negatif yang kecil dikarenakan radius yang diperhatikan atau r adalah radius luar pipa atau r_o . Dimana nilai tegangan radial terendah terdapat pada radius luar. Tanda negatif itu adalah tanda bahwa tegangan radial yang terjadi adalah tegangan kompresi. Tegangan radial pada dinding luar pipa muncul karena adanya tekanan atmosfer yang menekan pipa. Arah tegangannya dapat dilihat pada gambar 4.3 berikut ini.



Gambar 4. 5 Tegangan Radial Radius Luar Pipa

- Tegangan radial pada dinding dalam

$$\sigma_R = P \frac{r_i^2 - \frac{r_i^2 \times r_o^2}{r^2}}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$P = 225,553 \text{ MPa}$$

$$r_i = 13,32 \text{ mm} = 0,01332 \text{ m}$$

$$r_o = 16,67 \text{ mm} = 0,0167 \text{ m}$$

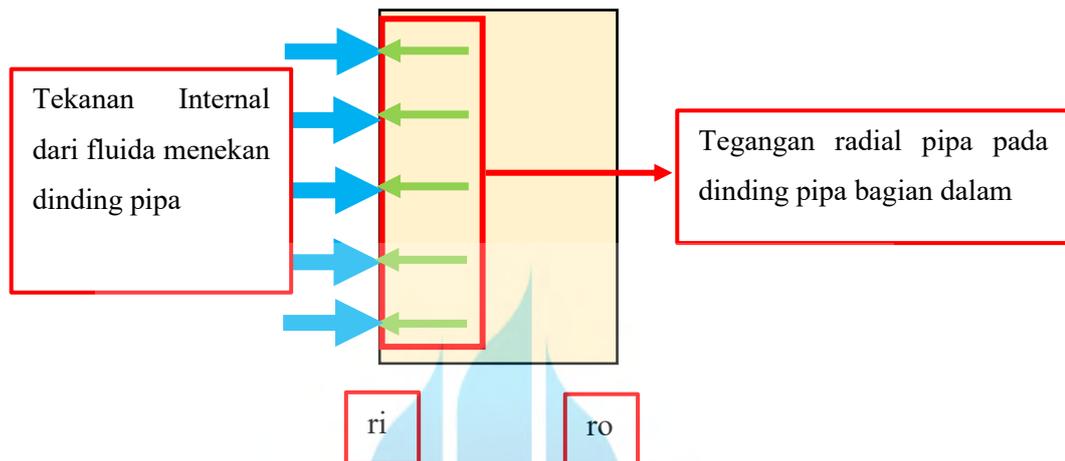
$$r = r_i = 0,01332 \text{ m}$$

Maka nilai dari tegangan radialnya adalah sebagai berikut.

$$\sigma_{Rmax} = 225,553 \text{ MPa} \frac{0,01332^2 \text{ m} - \frac{0,01332^2 \text{ m} \times 0,0167^2 \text{ m}}{0,01332^2 \text{ m}}}{0,0167^2 \text{ m} - 0,01332^2 \text{ m}}$$

$$\sigma_{R_{max}} = -225,553 \text{ MPa}$$

Nilai tegangan radialnya negatif dikarenakan tekanan yang mengenai pipa adalah tekanan internal sehingga tegangannya berupa tegangan kompresi (negatif).



Gambar 4. 6 Tegangan Radial Pada Dinding Pipa Bagian Dalam

Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada pipa adalah pada bagian tersebut karena nilai tegangan yang terjadi pada permukaan pipa sama dengan nilai tekanan internal yang menekan pipa. Dikarenakan arah tegangan tersebut adalah arah mengkompresi sehingga nilai tegangannya negatif.

d. Perhitungan Tegangan Geser

Besarnya tegangan geser yang terjadi diperoleh dari penjumlahan tegangan yang diakibatkan gaya geser dan tegangan yang diakibat momen puntir. Perhitungan persamaan 2.13 seperti di bawah ini.

$$\sigma_{max} = \frac{V \cdot Q}{A_{max}} + \frac{W \times L}{2 \times Z}$$

$$A_m = 0,0003186 \text{ m}^2$$

$$Q = 1,33$$

$$V = \frac{W}{NOS} = \frac{0,0255 \text{ KN/m}}{1} = 0,0255 \text{ KN/m}$$

$$W = 0,0255 \text{ KN/m}$$

NOS = Jumlah *support* dalam jalur pipa

$$Z = 0,000002179 \text{ m}^3$$

$$L = 2,85 \text{ m}$$

Maka nilai dari tegangan geser adalah sebagai berikut.

$$\sigma_{max} = \frac{0,0255 \text{ KN/m} \times 1,33}{0,0003186 \text{ m}^2} + \frac{0,0255 \text{ KN/m} \times 2,85 \text{ m}}{2 \times 0,000002179 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_{max} = \frac{0,0255 \text{ KN/m} \times 1,33}{0,0003186 \text{ m}^2} + \frac{0,0255 \text{ KN/m} \times 2,85 \text{ m}}{2 \times 0,000002179 \text{ m}^3}$$

$$\sigma_{max} = 106,45 \text{ KN/m}^2 + 16676,22 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma_{max} = 16782,75 \text{ KN/m}^2$$

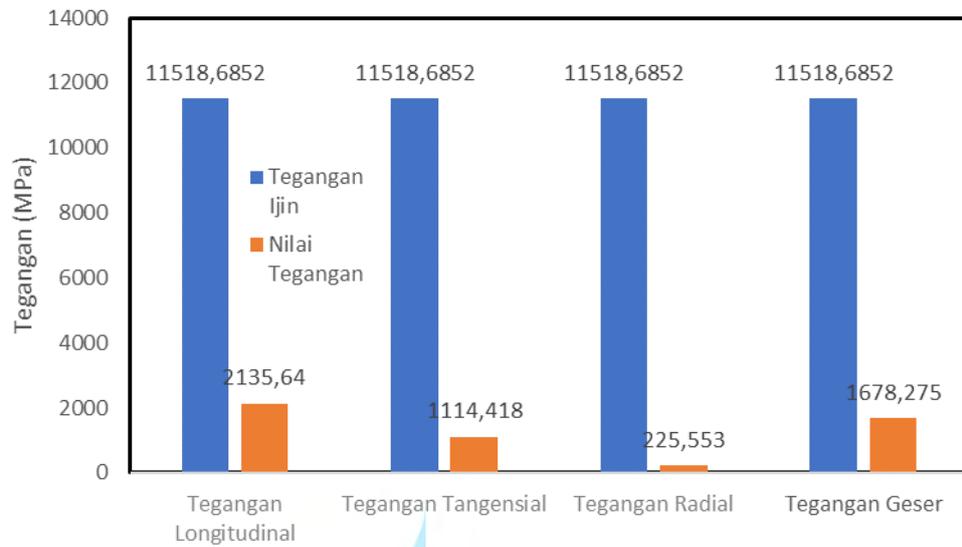
$$\sigma_{max} = 1678,275 \text{ MPa}$$

Jadi besar nilai tegangan geser pipa adalah $\sigma_{max} = 1678,275 \text{ MPa}$. Dari nilai tegangan geser tersebut nilai tegangan yang paling dominan menyebabkan tegangan geser adalah tegangan akibat momen puntir. Tegangan akibat momen puntir memiliki nilai 1667,622 MPa atau 99,36 % dari nilai tegangan geser. Sedangkan tegangan akibat gaya geser sendiri hanya mempengaruhi tegangan geser sebesar 10,645 MPa atau 0,64% dari total nilai tegangan geser.

e. *Allowable Stress*

Tegangan ijin (*allowable stress*) untuk besarnya *code allowable stress* dapat dilihat pada table ASME B31.3 ada pada lampiran A. Nilai min *code allowable stress* nya adalah 16,7 ksi atau setara dengan 11518,6852 MPa.

Dari nilai-nilai yang dihasilkan dari proses perhitungan sebelumnya dapat digunakan untuk mengevaluasi tegangan yang terjadi pada pipa keadaan normal. Dari hasil perhitungan tegangan yang telah dilakukan maka didapati nilai tegangan sebagai berikut.



Gambar 4. 7 Tegangan Pipa Sebelum Terjadi *Water Hammer* dan Tegangan Ijin

Grafik tersebut merupakan grafik tegangan yang terjadi pada pipa ketika belum terjadi *water hammer*. Dari grafik tersebut didapati bahwa hasil tegangan pipa normal yang terjadi meliputi tegangan longitudinal sebesar 2135,64 MPa, tegangan tangensial sebesar 1114,418 MPa, tegangan radial maksimumnya sebesar 225,553 MPa nilai tegangannya minus menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi adalah tegangan kompresi, dan tegangan geser sebesar 1678,275 MPa sedangkan untuk tegangan ijin dari material *stainless steel* ASTM A312 sch. 40 ini adalah 16,7 ksi atau 11518,6852 MPa. Tegangan longitudinal hanya 18,54% dari tegangan ijin, tegangan tangensial hanya 9,67% dari tegangan ijin, tegangan geser hanya sebesar 14,57% dari tegangan ijin, dan tegangan radial sebesar 1,95% dari tegangan ijin namun tegangan radial yang terjadi memiliki nilai minus. Ini menunjukkan bahwa tegangan radial yang terjadi adalah tegangan kompresi dikarenakan adanya tekanan internal fluida di dalam pipa. Dari grafik dapat diketahui bahwa tegangan pipa sebelum terjadi *water hammer* masih dibawah tegangan ijin. Sehingga tegangan pipa sebelum terjadi *water hammer* tidak menjadi potensi kebocoran dikarenakan tegangan yang melampaui tegangan ijin.

4.1.2 Perhitungan Tegangan *Water Hammer*

- a. Perhitungan Tekanan Maksimum
 - Waktu Penutupan *Valve*

Waktu penutupan *valve* penting untuk diketahui agar dapat menentukan persamaan yang akan digunakan dalam menghitung besar nilai kenaikan tekanan *water hammer*. Penentuan waktu penutupan *valve* menggunakan pengamatan langsung di hitung menggunakan *stopwatch* pada ponsel. Pengukuran waktu dilakukan sebanyak 10 kali saat *valve* menutup. Hasil dari pengukuran adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Tabel pengukuran waktu penutupan *valve*

Pengujian Ke-	Waktu (detik)
1	0,16
2	0,18
3	0,14
4	0,21
5	0,15
6	0,16
7	0,18
8	0,13
9	0,17
10	0,17
Rata-rata waktu penutupan <i>valve</i> 0,165	

Waktu penutupan yang akan digunakan adalah rata-rata waktu dari 10 pengujian. Maka waktu penutupan *valve* adalah 0,165 detik. Setelah mendapatkan nilai waktu penutupan *valve* maka selanjutnya adalah menentukan nilai seleritas gelombang atau kecepatan gelombang *water hammer* yang dapat diperoleh dari perhitungan persamaan

- Kecepatan Gelombang *Water Hammer* (Seleritas)

Setelah mendapatkan nilai waktu penutupan *valve* maka selanjutnya adalah menentukan nilai seleritas gelombang atau kecepatan gelombang *water hammer* yang dapat diperoleh dari perhitungan persamaan 2.19 seperti di bawah ini.

$$c = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \left(\frac{K \times di}{E \times Ep}\right)}}$$

$$K = 2,24 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$di = 26,64 \text{ mm} = 0,02664 \text{ m}$$

$$E = 3,38 \text{ mm} = 0,00338 \text{ m}$$

$$Ep = 190295301292 \text{ N/m}^2$$

$$\rho = 902,2 \text{ kg/m}^3$$

Maka nilai selaritas gelombang adalah sebagai berikut.

$$c = \sqrt{\frac{2,24 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} / 902,2 \text{ kg/m}^3}{1 + \left(\frac{2,24 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \times 0,02664 \text{ m}}{0,00338 \text{ m} \times 190295301292 \text{ N/m}^2}\right)}}$$

$$c = 1507,38 \text{ m/s}$$

Jadi kecepatan gelombang *water hammer* yang terjadi adalah 1507,38 m/s.

- Tekanan Maksimal Akibat Fenomena *Water Hammer*

Persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung besar kenaikan tekanan *water hammer* ada dua persamaan yaitu persamaan 2.17 dan persamaan 2.21. Untuk persamaan yang akan digunakan dapat ditentukan dengan mengetahui nilai waktu penutupan *valve* lebih besar atau lebih kecil dari nilai panjang pipa dibagi selaritas gelombang seperti berikut.

$$t = 0,165 \text{ s}$$

$$\frac{L}{c} = \frac{2,85 \text{ m}}{50,29 \text{ m/s}} = 0,056 \text{ s}$$

Dari kedua nilai diatas dapat diketahui bahwa nilai dari waktu penutupan *valve* lebih besar dari panjang pipa dibagi selaritas gelombang. Jadi persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai kenaikan tekanan *water hammer* adalah persamaan 2.21.

$$\Delta P = P_0 \left(\frac{N}{2} + \sqrt{\frac{N^2}{4} + N} \right)$$

$$P_0 = 225,553 \text{ MPa}$$

$$N = 0,1503 \text{ kg}$$

Tv = waktu penutupan (s)

Maka nilai kenaikan tekanannya adalah.

$$\Delta P = 225,553 \text{ MPa} \left(\frac{0,1503 \text{ kg}}{2} + \sqrt{\frac{0,1503^2 \text{ kg}}{4} + 0,1503 \text{ kg}} \right)$$

$$\Delta P = 106,11 \text{ MPa}$$

Tekanan maksimum yang terjadi ketika terjadinya fenomena *water hammer* dapat diketahui dengan persamaan 2.21 seperti berikut ini.

$$P_{\max} = P_0 + \Delta P$$

$$P_0 = 225,553 \text{ MPa}$$

$$\Delta P = 106,11 \text{ MPa}$$

Maka nilai dari tekanan maksimum yang terjadi adalah sebagai berikut.

$$P_{\max} = 225,553 \text{ MPa} + 106,11 \text{ MPa}$$

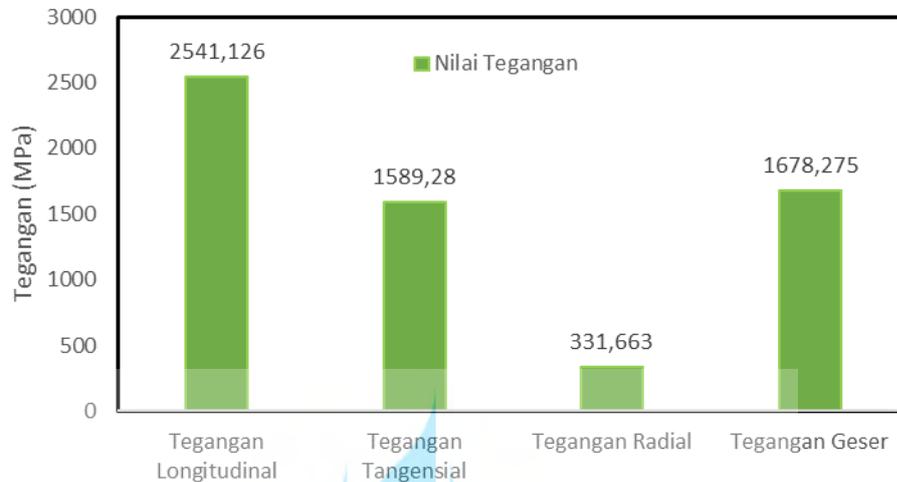
$$P_{\max} = 321,663 \text{ MPa}$$

Nilai tekanan $P_{\max} = 321,663 \text{ MPa}$ ini yang nantinya akan digunakan untuk mencari tau berapa tegangan yang terjadi ketika terjadinya fenomena *water hammer*.

b. Perhitungan Tegangan Saat *Water Hammer*

Dari nilai tekanan *water hammer* yang telah didapatkan kemudian dimasukkan kedalam setiap persamaan tegangan yang terjadi untuk mengganti nilai tekanan

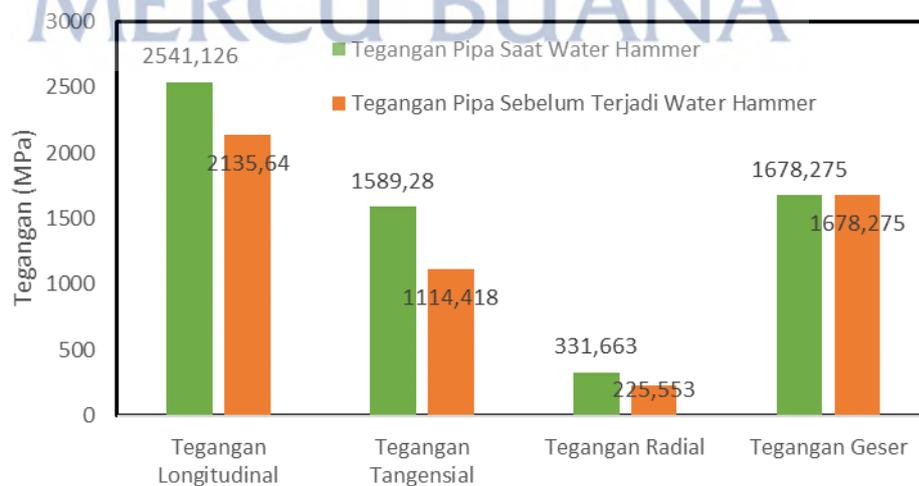
internal. Maka didapatkan nilai tegangan pipa ketika terjadi fenomena *water hammer* adalah sebagai berikut.



Gambar 4. 8 Tegangan Pipa Water Hammer

Berdasarkan gambar 4.1 menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi lebih tinggi daripada tegangan sebelum terjadi *water hammer*. Ini dikarenakan terjadinya kenaikan tekanan internal pada fluida yang disebabkan oleh fenomena *water hammer*.

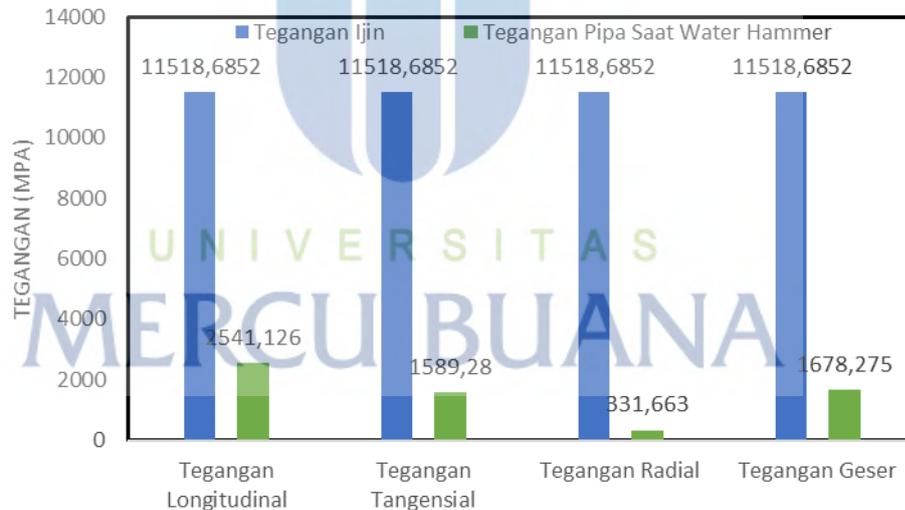
Dari hasil perhitungan tegangan pipa pada saat terjadi *water hammer* didapati nilai tegangan sebagai berikut.



Gambar 4. 9 Perbandingan Nilai Tegangan Pipa Sebelum Water Hammer dengan Tegangan Pipa saat *Water Hammer*

Pada saat terjadi fenomena *water hammer* tegangan pada pipa yang berhubungan dengan tekanan mengalami trend kenaikan nilai. Tegangan longitudinal mengalami kenaikan 405,486 MPa atau 18,98% dari tegangan pipa normal dan tegangan tangensial mengalami kenaikan nilai tegangan sebesar 474,862 MPa atau 42,61% dari tegangan pipa normal. Sementara itu nilai tegangan radial maksimum juga ikut mengalami kenaikan sebesar 106,11 MPa atau 47% tentu saja dengan nilai tegangan negatif karena merupakan tegangan kompresi. Tegangan geser nilainya tetap sebesar 1678,275 MPa dikarenakan tegangan geser tidak bergantung pada tekanan internal yang terjadi sehingga tidak mengalami kenaikan.

Nilai tegangan pipa saat terjadi *water hammer* dibandingkan dengan tegangan ijin material dapat dilihat dari grafik berikut.



Gambar 4. 10 Tegangan Water Hammer dan Tegangan Ijin

Dari grafik tersebut didapati bahwa hasil tegangan pipa saat *water hammer* terjadi, meliputi tegangan longitudinal sebesar 2541,13 MPa, tegangan tangensial sebesar 1589,28 MPa, tegangan radial maksimumnya sebesar 331,663 MPa namun nilainya adalah minus dikarenakan tegangan radial yang terjadi adalah tegangan kompresi yang diakibatkan adanya tekanan internal fluida, dan tegangan

geser sebesar 1678,275 MPa sedangkan untuk *code allowable stress* dari material *stainless steel* A312 sch. 40 ini adalah 16,7 ksi atau 11518,6852 MPa. Tegangan longitudinal hanya 22,06% dari nilai tegangan ijin, tegangan tangensial hanya 13,79% dari nilai tegangan ijin, tegangan radial sebesar 2,87% karena kecilnya nilai tegangan radial sehingga dapat diabaikan, dan tegangan geser hanya sebesar 14,57% dari nilai tegangan ijin. Fenomena *water hammer* memang menyebabkan kenaikan tekanan dan tegangan yang terjadi pada pipa namun berdasarkan gambar 4.4 menunjukkan bahwa tegangan pipa saat terjadi *water hammer* masih dibawah tegangan ijin. Sehingga dapat dikatakan bahwa tegangan pada pipa saat terjadi *water hammer* masih terkendali atau aman dan tidak menyebabkan kebocoran dalam jangka waktu pendek.

4.2 MENGHITUNG TEGANGAN WATER HAMMER DENGAN PENUTUPAN VALVE YANG DIVARIASIKAN

Untuk menentukan usulan tindakan preventif terkait potensi kebocoran akibat fenomena *water hammer* maka dilakukan perhitungan tegangan *water hammer* pada pipa dengan variasi waktu penutupan *valve* untuk mengetahui perbandingan tegangan *water hammer* yang terjadi dengan tegangan ijin ketika waktu penutupan divariasikan. Variasi waktu yang dilakukan adalah sebagai berikut.

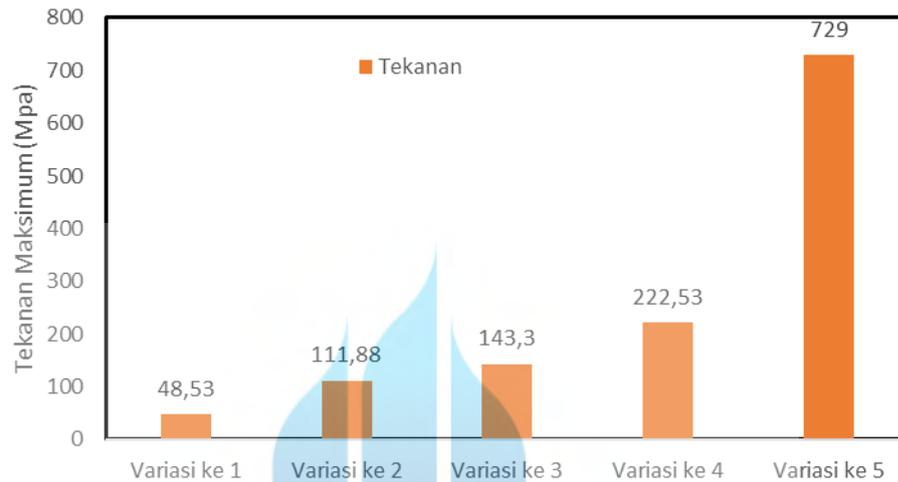
Tabel 4. 2 Variasi Waktu Penutupan Valve

Variasi Ke-	Waktu
1	0,2
2	0,15
3	0,1
4	0,05
5	0,01

Dari variasi waktu penutupan valve tersebut maka dapat dihitung nilai kenaikan tekanan maksimum yang terjadi menggunakan persamaan 2.22 sebagai berikut.

$$\Delta P = P_0 \left(\frac{N}{2} + \sqrt{\frac{N^2}{4} + N} \right)$$

Maka hasil kenaikan tekanan masing-masing variasi waktu adalah sebagai berikut.

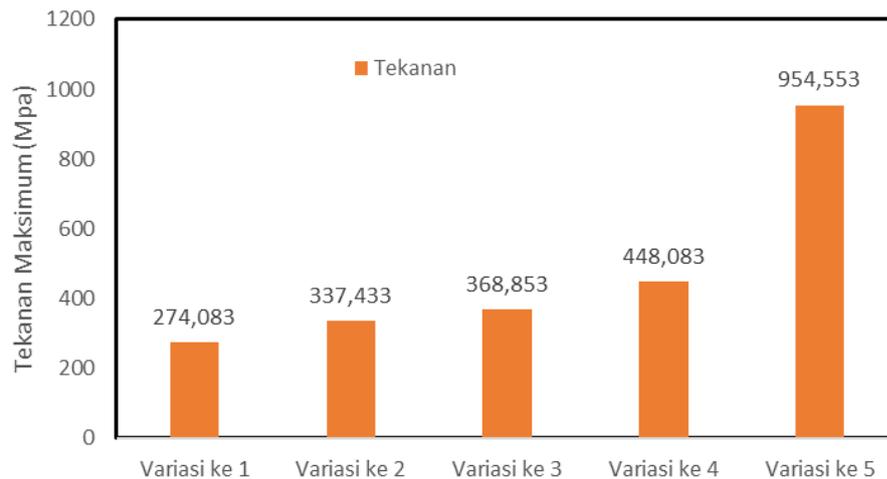


Gambar 4. 11 Kenaikan Tekanan Masing-Masing Variasi

Kemudian dari hasil kenaikan tekanan tersebut digunakan untuk mencari nilai tekanan maksimum yang terjadi dengan rumus 2.23 sebagai berikut.

$$P_{max} = P_0 + \Delta P$$

Hasil dari tekanan maksimum yang terjadi pada ke lima variasi waktu penutupan *valve* tersebut adalah sebagai berikut.



Gambar 4. 12 Tekanan Maksimum Berdasarkan Masing-Masing Variasi

Setelah semua variasi didapat nilai tekanan maksimumnya, nilai tersebut digunakan untuk menghitung tegangan pipa yang terjadi. Tegangan yang dihitung adalah sebagai berikut.

a. Tegangan Longitudinal

Tegangan ini dapat dihitung dengan persamaan 2.11.

$$\sigma_L = \frac{F_{ax}}{Am} + \frac{Mb}{z} + \frac{Pdo}{4t}$$

b. Tegangan Circumferensial

Tegangan ini dapat dihitung dengan persamaan 2.12.

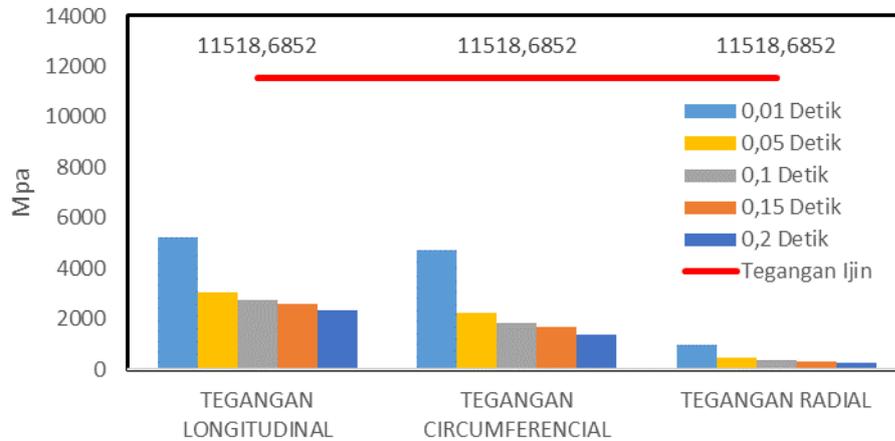
$$\sigma_H = \frac{P \cdot do}{2t}$$

c. Tegangan Radial

Tegangan radial yang digunakan sebagai acuan adalah tegangan radial maksimum yang berada pada dinding dalam pipa. Tegangan ini dapat dihitung dengan persamaan 2.13 sebagai berikut.

$$\sigma_{R_{max}} = P \frac{ri^2 - \frac{ri^2 \times ro^2}{r^2}}{ro^2 - ri^2}$$

Maka hasil dari ketiga tegangan tersebut pada masing-masing variasi waktu penutupan adalah sebagai berikut.



Gambar 4. 13 Variasi Waktu Penutupan Valve

Berdasarkan gambar 4.12 diketahui bahwa meskipun waktu penutupan *valve* yang terjadi adalah 0,01 detik tegangan yang terjadi masih dibawah dari tegangan ijin stainless steel ASTM A312 berdasarkan ASME B31.3. Jadi dapat dikatakan bahwa meskipun *valve* ditutup dengan waktu yang sangat singkat sekalipun jalur pipa hot water supply masih aman dari lonjakan tegangan yang terjadi pada pipa yang disebabkan oleh lonjakan tekanan saat terjadi water hammer. Sehingga tidak diperlukan adanya tindakan preventif terkait potensi kebocoran pipa yang disebabkan oleh faktor *water hammer*.