

VARIASI KONSTANTA ELASTIS PIPA FLEKSIBEL PADA GETARAN YANG DIBANGKITKAN SENDIRI DALAM ALIRAN FLUIDA

Sufiyanto*

Abstraksi

Fenomena getaran yang dibangkitkan sendiri (*self excited vibration*) ditimbulkan oleh adanya perubahan luasan penampang aliran akibat adanya jepitan (*pinch*). Pada suatu nilai tertentu, akan timbul osilasi yang kemudian berkembang menjadi amplitudo yang lebih besar akibat kondisi yang tak stabil dalam aliran saat melewati daerah jepitan. Metode yang digunakan untuk memunculkan getaran ini adalah metode *fixed flow rate* yaitu besarnya jepitan diatur sampai terjadi getaran dengan kecepatan aliran tetap. Tujuan penelitian untuk mengetahui aspek-aspek dan karakteristik dalam aliran fluida yang dapat mengakibatkan terjadinya getaran yang dibangkitkan sendiri oleh sistem (*self-excited vibrations*), dengan variasi konstanta elastis pegas (K) dari selang (*tube*) pada aliran fluida yang mengalami getaran yang dibangkitkan sendiri (*self-excited vibrations*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa getaran yang dibangkitkan sendiri muncul pada kondisi aliran kritis yang ditentukan dengan *pinch ratio* antara 63% s/d 68% pada kapasitas aliran antara 15 liter/menit s/d 20 liter/menit. Karakteristik getaran yang muncul menunjukkan peningkatan frekwensi tetapi amplitudo getaran berkurang dengan bertambahnya *pinch ratio*. Rentang frekwensi getaran antara 2 s/d 14 Hz dengan amplitudo ± 0.25 s/d 2.25 mm. Perubahan konstanta pegas dari selang menunjukkan perubahan yang kurang signifikan terhadap frekwensi getaran yang dihasilkan, tetapi mempersempit rentang *pinch ratio* dimana getaran tersebut muncul.

Kata Kunci : *Self Vibration, Pinch Ratio, Konstanta Pegas, Karakteristik Getaran*

PENDAHULUAN

Dalam ilmu teknik mesin terdapat dua bidang kajian yang telah dikenal secara luas yaitu getaran mekanik dan mekanika fluida, tetapi kajian tentang kombinasi getaran mekanik yang terjadi di dalam sebuah sistem fluida jarang dilibatkan. Fenomena getaran yang dibangkitkan sendiri dalam sistem (*self-excited vibrations*) muncul pada kondisi aliran tunak (*steady*) dan kemudian menunjukkan terjadinya getaran tanpa adanya gaya luar yang mempengaruhi (Pejack, 2006).

Aliran fluida yang memiliki kecepatan, tekanan dan perubahan keduanya yang terjadi dalam suatu aliran fluida memberikan kontribusi terjadinya getaran. Getaran dapat mengakibatkan pembengkakan pada sistem perpipaan. Pada kasus yang ekstrim dapat mengakibatkan keretakan pada sistem perpipaan. Pompa dan katup merupakan penyebab terbesar terjadinya getaran dan tumbukan akibat perubahan drastis tekanan dan kecepatan yang terjadi pada komponen tersebut. (Walker, 2007).

Ditinjau dari kegagalan akibat terjadinya kelelahan (*fatigue*), tegangan dinamik yang ditimbulkan tidak boleh melebihi batas ijin yang ditentukan dari tegangan bolak-balik (*alternating stress*) berdasarkan jumlah siklus yang diberikan. Untuk itu perlu pengamatan getaran yang dilakukan dengan cara melakukan pengukuran terhadap frekwensi dan amplitudo getaran.

Untuk mengetahui aspek-aspek dan karakteristik dalam aliran fluida yang dapat mengakibatkan terjadinya getaran yang dibangkitkan sendiri oleh sistem (*self-excited vibrations*),

* Dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang

maka akan dilakukan penelitian dengan variasi konstanta elastis pegas (K) dari selang (*tube*) pada aliran fluida yang mengalami getaran yang dibangkitkan sendiri (*self-excited vibrations*).

KAJIAN PUSTAKA

Aliran fluida dalam pipa dapat menimbulkan terjadinya getaran yang dibangkitkan sendiri (*self excited vibration*) yang diawali adanya osilasi yang kemudian berkembang menjadi amplitudo yang besar (Pejack, 2006).

Adanya osilasi pada dinding selang terjadi ketika aliran fluida menjadi tidak tunak (*unsteady*) (Chen dan Rosenberg, 1973). Peningkatan kecepatan aliran (*flow rate*) akan mempercepat terjadinya ketidakstabilan dalam aliran. Kecepatan aliran yang tinggi dalam pipa merupakan faktor penyebab pipa bergetar dan tertekuk (Naguleswaran dan Williams, 1968). Penguatan getaran akan terjadi bila frekwensi getaran akibat kecepatan aliran berimpit dengan frekwensi resonansi pipa (Housner, 1954). Hal ini akan berdampak pada terjadinya kegagalan *fatigue* apabila muncul resonansi getaran akibat frekwensi natural sistem turun dengan meningkatnya kecepatan aliran kritis fluida (Wardana, 2000).

Variasi tekanan yang cepat dapat meningkatkan beban *fatigue* pipa dan komponen lainnya pada sistem perpipaan (Olesen). Aliran berdenyut (*pulsatile flow*) dapat mengakibatkan ketidakstabilan aliran. Tetapi dengan peningkatan kekakuan dinding selang (*tube*) dapat menurunkan rata-rata gradien tekanan (Anssari, 2008). Selain itu peningkatan viskositas fluida akan menyebabkan gradien tekanan yang lebih tinggi tetapi fluktuasi tekanan berkurang.

Gerakan osilasi dinding selang cenderung didominasi oleh komponen transversal. Analisa tentang selang yang berisi fluida dengan konstanta elastis dinding merupakan kasus interaksi yang melibatkan fluida dan struktur. Analisa non dimensional hubungan antara osilasi dan elastisitas selang dinyatakan dengan bilangan Womersley dan Strouhal (Heil dan Waters, 2006). Bilangan Womersley yang besar menyatakan kekakuan dinding selang dan densitas fluida yang besar.

$$a = \left(\frac{a}{m} \right)^{\frac{1}{2}} (K \cdot r_f)^{\frac{1}{4}}$$

Bilangan Strouhal yang besar menunjukkan nilai kekakuan dinding K yang lebih besar dibandingkan tekanan yang diakibatkan inersia fluida.

$$S_i = \frac{1}{U} \left(\frac{K}{r_f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Karakteristik aliran dapat dipengaruhi oleh interaksi antara kekakuan selang dan fluida yang mengalir didalamnya. Pengaruh elastisitas (K) dari selang dinyatakan dengan parameter indeks kecepatan (S) yang merupakan rasio inersia fluida dengan kekakuan dari selang, dimana peningkatan kekakuan akan menurunkan indeks kecepatan yang dapat mengurangi osilasi (Hazel dan Heil, 2003). Indeks kecepatan dinyatakan sebagai

$$S^2 = \frac{rU^2}{K} \left[\frac{1}{a^3} \left(\frac{\partial V}{\partial a} \right)^{-1} \right]$$

dengan α = rasio luas penampang selang dengan luas tak terdeformasi

Pengaruh inersia fluida pada perilaku sistem diakibatkan oleh efek Bernoulli yang membangkitkan penambahan *pressure drop* ketika selang menekuk dan luas penampang berkurang (*collapsible tubes*).

Analisis pendekatan matematis dapat dilakukan untuk menentukan kriteria dan mengungkap mekanisme ketidakstabilan saat terjadinya *self excited vibration* yang diamati (Pejack, 2006). Persamaan yang digunakan dalam pendekatan matematis tersebut adalah :

$$m\ddot{x}_1 + \left\{ \left[K + \frac{PW}{4} (P_i - P_a) \right] - \left[\frac{PW r V_i^2 (1 + 3b_e^2)}{8(1 - b_e^2)^3} \right] \right\} x_1 = 0$$

Dari persamaan tersebut dapat dinyatakan bahwa karakteristik *self excited vibration* yang terjadi merupakan sistem getaran harmonik dimana terjadi gerakan osilasi dinding berulang secara teratur (Thompson, 1998).

METODOLOGI

Variabel bebas :

- K = konstanta elastis selang (N/m)
- Q = kapasitas aliran fluida (liter/menit)
- β = rasio jepitan (*pinch ratio*)

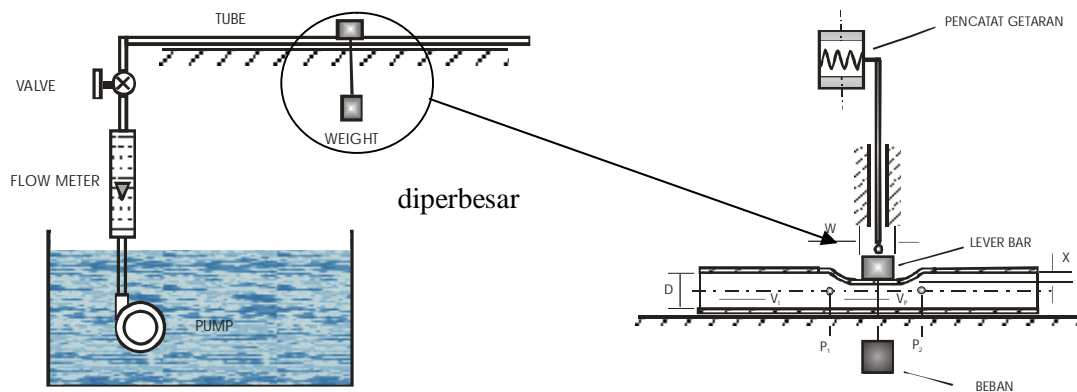
Variabel tergantung :

- A = amplitudo osilasi getaran (mm)
- f = frekwensi getaran

Prosedur penelitian :

Pada gambar 1 skema alat uji dapat dijelaskan karakteristik getaran yang dihasilkan pada saat terjadi *self excited vibration* akan dicatat oleh alat pencatat getaran (*plotter*). Kondisi aliran yang dapat memunculkan getaran dipengaruhi oleh kapasitas aliran dan rasio jepitan (*pinch ratio*).

Analisa data hasil penelitian meliputi karakteristik getaran hasil plotter yang dibandingkan dengan getaran secara model matematis, karakteristik aliran saat terjadi *self excited vibration*, dan interaksi fluida-struktur.



Gambar 1. Skema Alat Uji

PENGOLAHAN DATA

- **Data Aliran Fluida**

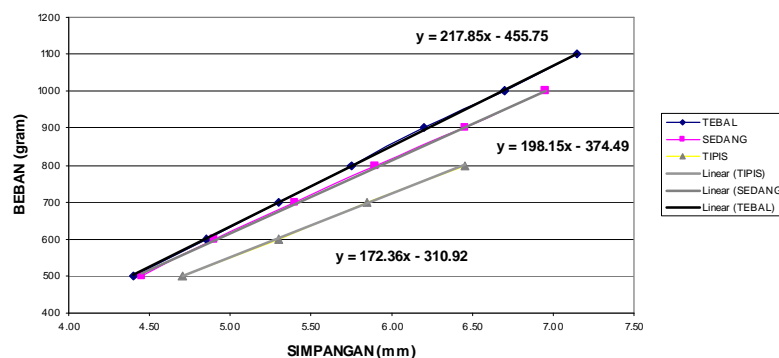
Fluida yang digunakan adalah air dengan nilai $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1,787 \cdot 10^{-3} \text{ Ns/m}$ (Munson, 2003) dan diameter selang yang digunakan \bar{A}_{in} adalah 3/8 in (9.5 mm)., Bilangan Reynold dari aliran yang terjadi seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Bilangan Reynold Aliran

No.	Q (m^3/mnt)	V (m/dtk)	Re aliran
1	0.0200	4.71	25012.72
2	0.0175	4.12	21886.13
3	0.0150	3.53	18759.54
4	0.0100	2.35	12506.36
5	0.0050	1.18	6253.18

Kondisi aliran selama pengujian berlangsung adalah turbulen dimana nilai $Re > 4000$.

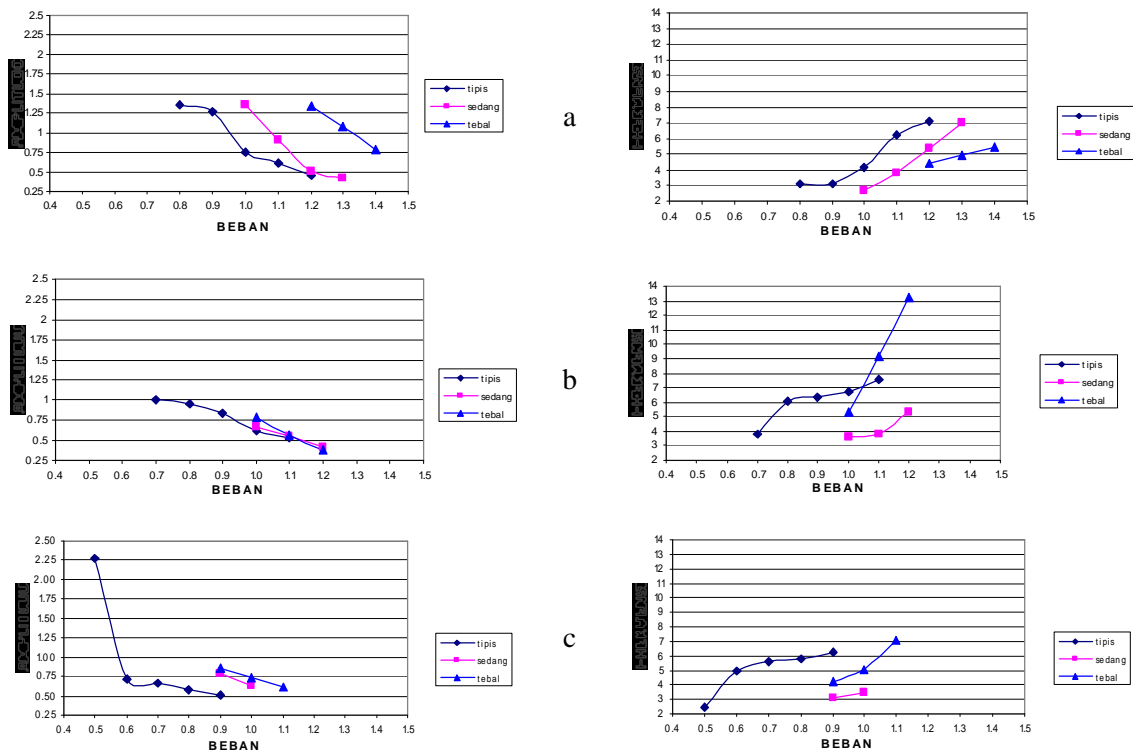
- **Konstanta Pegas Dari Selang**



Gambar 2. Konstanta Pegas Dari Selang

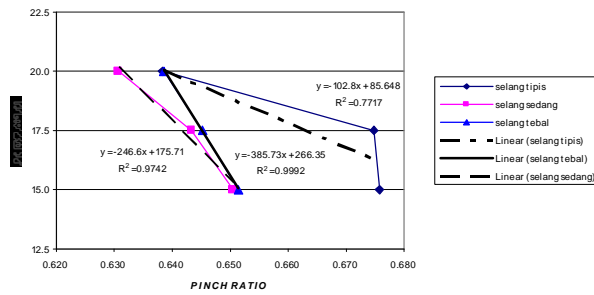
Dari grafik diatas dapat ditentukan bahwa konstanta pegas dari selang tipis $K_{tipis} = 172.36 \text{ kg/m}$, selang sedang $K_{sedang} = 198.15 \text{ kg/m}$, dan selang tebal $K_{tebal} = 217.85 \text{ kg/m}$.

• **Karakteristik Getaran Hasil Plotter**



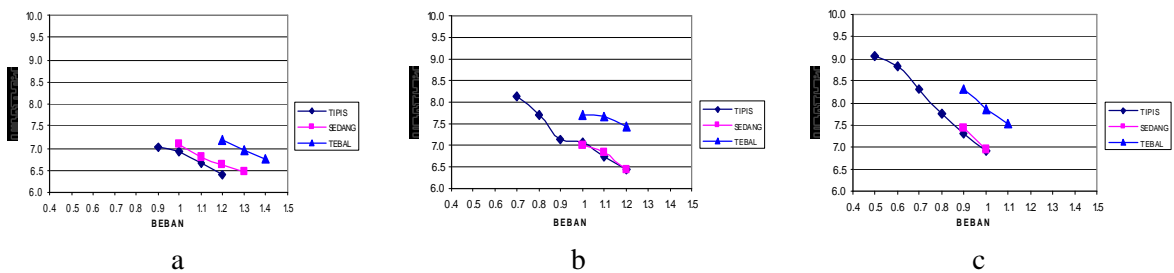
Gambar 3. Karakteristik Getaran Dengan Variasi Konstanta Pegas Dari Selang Pada Kapasitas a. 20 lt/mnt, b. 17.5 lt/mnt, c. 15 lt/mnt

• **Pinch Ratio Kondisi Aliran Kritis**



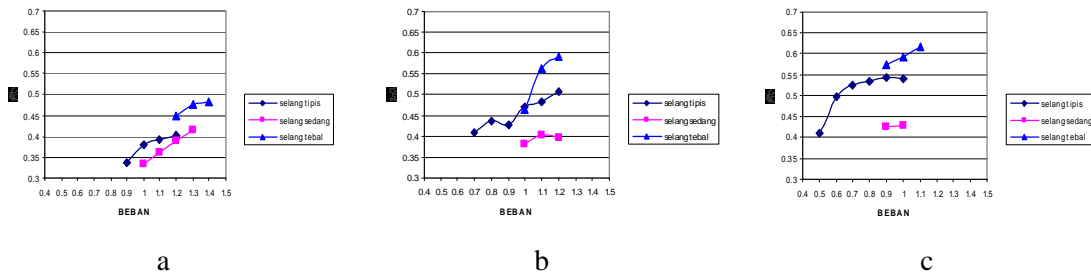
Gambar 4. Pinch Ratio Kondisi Aliran Kritis Dengan Variasi Konstanta Pegas Dari Selang

• **Model Matematis Getaran**

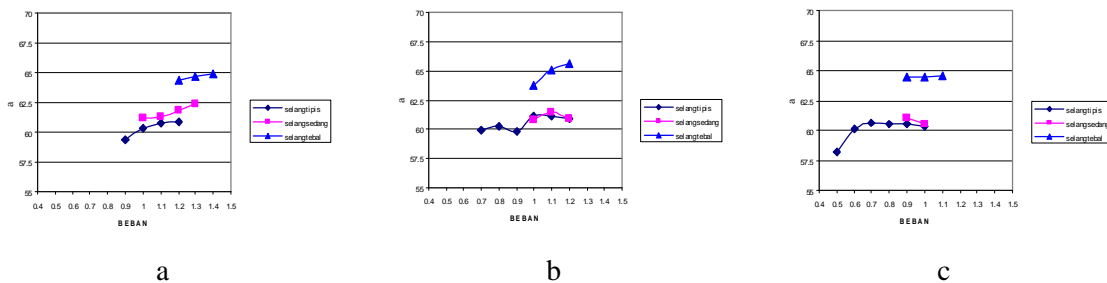


Gambar 5. Frekwensi Getaran Model Matematis Pada Kapasitas a. 20 lt/mnt, b. 17.5 lt/mnt, c. 15 lt/mnt

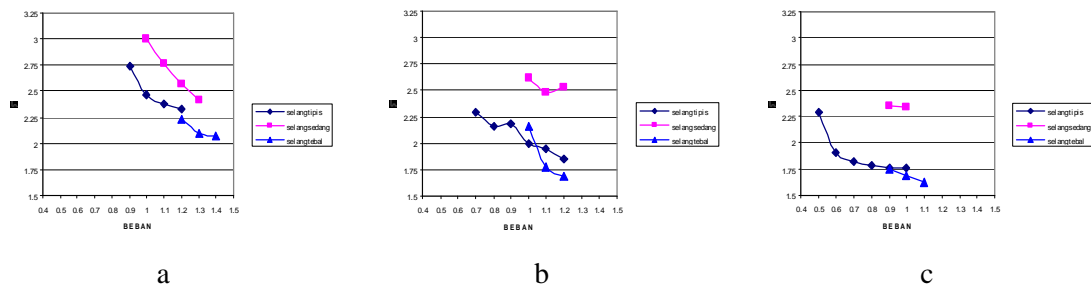
• **Interaksi Fluida-Struktur**



Gambar 6. *Strouhal Number* Pada Interaksi Fluida Struktur Dengan Kapasitas a. 20 lt/mnt, b. 17.5 lt/mnt, c. 15 lt/mnt



Gambar 7. *Womersley Number* Pada Interaksi Fluida Struktur Dengan Kapasitas a. 20 lt/mnt, b. 17.5 lt/mnt, c. 15 lt/mnt



Gambar 8. *Indeks Kecepatan* Pada Interaksi Fluida Struktur Dengan Kapasitas a. 20 lt/mnt, b. 17.5 lt/mnt, c. 15 lt/mnt

PEMBAHASAN

Kapasitas aliran yang digunakan pada penelitian ini adalah 20, 17.5 dan 15 liter/menit. Pemilihan kapasitas aliran tersebut didasarkan pada pengujian sebelumnya dimana pada kapasitas aliran yang lebih kecil dari 10 liter/menit, getaran yang dihasilkan memiliki respon yang terlalu kecil. Dengan respon getaran yang terlalu kecil, alat pencatat getaran (*plotter*) tidak mampu untuk merekam getaran tersebut. Tetapi getaran tersebut sudah dapat direspon dengan dial indikator. Hal serupa juga dihasilkan oleh Pejack (2006) dalam penelitiannya diperoleh simpangan osilasi getaran sebesar ± 0.05 mm pada kapasitas aliran pompa antara 0.5 s/d 10 liter/menit.

Karakteristik Selang (*Tube*)

Selang (*tube*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis selang fleksibel (*flexible tube*) dari bahan *polypropylene* dengan diameter dalam \bar{A}_{in} 3/8 inch (9.5 mm). Dari hasil pengujian diperoleh nilai $K_{tipis} = 172.36$ kg/m, $K_{sedang} = 198.15$ kg/m, dan $K_{tebal} = 217.85$ kg/m. Sebagai pembandingan dari penelitian Pejack (2006) menggunakan selang karet dari bahan lateks dengan diameter dalam \bar{A}_{in} 5/16 inch (7.9 mm) dan konstanta $K = 2100$ N/m atau 210 kg/m.

Dari gambar 2 terlihat semakin besar nilai konstanta pegas dari selang akan menghasilkan simpangan yang semakin kecil pada pembebanan yang sama. Dengan simpangan yang kecil berarti memiliki rasio jepitan (*pinch ratio*) yang kecil juga. Peningkatan beban jepit yang diberikan akan memperbesar simpangan yang dihasilkan sehingga *pinch ratio* semakin besar. Nilai konstanta pegas dari ketiga selang yang digunakan menunjukkan hubungan simpangan berbanding lurus dengan beban.

Karakteristik Getaran

Beban jepit yang semakin besar menyebabkan peningkatan tekanan fluida di dalam selang pada daerah sebelum jepitan. Tekanan fluida yang besar pada dinding selang dapat meningkatkan kekakuan sistem dari selang. Semakin besar kekakuan (K) dari suatu sistem, maka frekwensi getaran yang dihasilkan akan meningkat dengan amplitudo yang semakin kecil. Hal ini relevan dengan hipotesa awal bahwa peningkatan nilai K akan dapat meningkatkan frekwensi dan memperkecil amplitudo getaran.

Kapasitas aliran yang besar akan berpengaruh terhadap kekakuan sistem yang terdiri dari konstanta pegas dari selang dan volume fluida yang ada di dalam selang. Peningkatan kapasitas aliran akan memperbesar kekakuan sistem secara keseluruhan, sehingga dibutuhkan beban yang besar untuk menjepit selang sampai menghasilkan rasio jepit (*pinch ratio*) yang dapat memunculkan getaran.

Dalam getaran yang dibangkitkan sendiri (*self excited vibration*) dari hasil penelitian ini memiliki rentang frekwensi antara 2 s/d 14 Hz dengan amplitudo ± 0.25 s/d 2.25 mm.

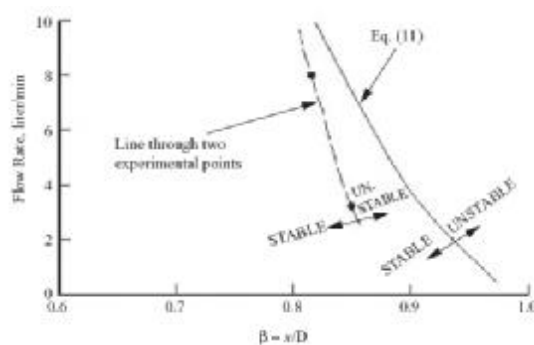
Konstanta pegas dari selang yang lebih besar mengakibatkan rentang pembebanan yang lebih sempit dibandingkan selang dengan konstanta pegas yang lebih kecil. Hal ini berarti pada selang dengan konstanta pegas yang kecil cenderung lebih mudah mengalami getaran dengan rentang pembebanan yang lebih luas. Selain itu konstanta pegas dari selang tipis menunjukkan respon getaran lebih awal pada pembebanan yang lebih kecil. Dengan pembebanan yang kecil, selang tipis sudah dapat mencapai *pinch ratio* dimana kondisi kritis *self excited vibration* muncul. Perubahan kondisi aliran yang tak stedi pada saat melewati *pinch ratio* kritis menyebabkan gangguan kesetimbangan antara beban jepit dan kekakuan selang. Pada selang yang tipis dengan

konstanta pegas yang kecil lebih mudah mengalami getaran dengan sedikit gangguan kesetimbangan akibat kondisi aliran yang tak stedi.

Getaran yang dibangkitkan sendiri dapat terjadi sebagai akibat dari kondisi aliran yang tak stedi berupa efek Bernoulli yang membangkitkan terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*) ketika selang menekuk dan luasan penampang selang berkurang di daerah jepit (Hazel, 2003). Pada kondisi ini interaksi antara struktur dan fluida sangat berpengaruh. Pada saat pembebanan yang diberikan mendekati terjadinya penurunan tekanan, selang dengan konstanta pegas yang kecil akan lebih mudah untuk menekuk dibandingkan selang dengan konstanta pegas yang lebih besar. Akibatnya selang tipis lebih mudah mengalami getaran dengan sedikit gangguan yang mengakibatkan terjadinya penurunan tekanan.

Kondisi Aliran Kritis

Terjadinya penurunan tekanan di daerah yang mengalami jepit (*pinch area*) merupakan faktor penyebab terjadinya *self excited vibration*. Penurunan tekanan sebagai akibat dari pengurangan luas penampang di daerah *pinch* yang dikenal dengan efek Bernoulli. Getaran yang dibangkitkan sendiri mulai terjadi pada saat pembebanan yang diberikan menghasilkan *pinch ratio* yang dapat membangkitkan terjadinya penurunan tekanan. Dari data hasil penelitian ini diperoleh nilai *pinch ratio* yang dapat memunculkan *self excited vibration* berkisar antara 63% s/d 68% untuk kapasitas aliran 15 liter/menit s/d 20 liter/menit seperti yang ditunjukkan gambar 4. Sebagai perbandingan (gambar 9) hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Pejack (2006) dimana *pinch ratio* yang dihasilkan antara 80% s/d 85% untuk kapasitas aliran 0.5 s/d 10 liter/menit.



Gambar 9. Perubahan *Flow Rate* Terhadap *Pinch Ratio* (Pejack, 2006)

Frekwensi Model Matematis

Frekwensi yang dihasilkan dari hasil pengujian memiliki kecenderungan yang berbeda dengan frekwensi model matematis. Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan frekwensi dengan meningkatnya pembebanan, sedangkan hasil dari model matematis berlaku sebaliknya. Pada persamaan model matematis hanya menghasilkan frekwensi getaran yang tergantung pada nilai kekakuan (K) dan massa (m), tidak melibatkan amplitudo dari getaran. Sedangkan pada kenyataannya dari hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi antara penurunan amplitudo

dengan peningkatan frekwensi sebagai gantinya. Selain itu pada kondisi aktualnya, nilai kekakuan sistem dari selang dipengaruhi oleh besarnya pembebanan jepit yang diberikan.

Selain itu frekwensi yang dihasilkan dari persamaan matematis nilainya lebih besar dibandingkan frekwensi hasil penelitian. Hal ini disebabkan adanya kerugian gesekan pada plotter dan ujung pena pada saat mencatat getaran yang terjadi. Kerugian gesekan akan berfungsi sebagai faktor peredaman sehingga mengurangi frekwensi getaran.

Interaksi Struktur-Fluida

Pada saat dibebani selang akan menyempit sehingga kecepatan aliran akan menurun sedangkan tekanan didalam selang akan meningkat. Hal ini akan mengakibatkan kekakuan sistem dari selang akan bertambah sehingga akan meningkatkan nilai bilangan Strouhal. Penurunan kapasitas aliran akan menurunkan kecepatan dan kekakuan sistem tetapi penurunan kecepatan lebih signifikan sehingga akan meningkatkan nilai bilangan Strouhal. Semakin kecil kapasitas aliran menghasilkan peningkatan bilangan Strouhal.

Pada aliran fluida yang membahas mengenai terjadinya *vortex*, bilangan Strouhal mempunyai korelasi dengan frekwensi *vortex*. Sehingga dengan kenaikan nilai bilangan Strouhal akan meningkatkan frekwensi getaran pada fenomena osilasi yang dibangkitkan sendiri.

Perubahan kekakuan sistem juga dapat dilihat pada nilai bilangan Womersley. Peningkatan kekakuan sistem pada selang yang digunakan akan meningkatkan nilai bilangan Womersley. Nilai bilangan Womersley yang dihasilkan dari penelitian relatif konstan terhadap perubahan kapasitas aliran. Peningkatan kekakuan sistem akibat kenaikan konstanta pegas dari selang dan peningkatan tekanan akibat pembebanan merupakan hal yang paling berpengaruh terhadap kenaikan nilai bilangan Womersley.

Osilasi yang dibangkitkan sendiri akan berimpit dengan terjadinya aliran superkritis yang dapat ditentukan jika parameter indeks kecepatan $S > 1$. Aliran superkritis adalah aliran yang dapat menyebabkan terjadinya penurunan tekanan sehingga selang mengalami penekukan (*collapsible tube*). Penurunan tekanan pada aliran akan semakin besar apabila kecepatan aliran meningkat atau Re meningkat sehingga dapat memperbesar nilai parameter indeks kecepatan S . Sedangkan peningkatan kekakuan selang justru akan menurunkan nilai indeks kecepatan yang dihasilkan. Hasil yang diperoleh dari penelitian menunjukkan nilai indeks kecepatan $S > 1$, yang berarti pada semua kondisi yang dicapai dalam penelitian menunjukkan adanya osilasi. Penurunan nilai indeks kecepatan (S) menunjukkan bahwa osilasi getaran menjadi berkurang.

SIMPULAN

Karakteristik getaran yang dihasilkan dari alat pencatat getaran (*plotter*) menghasilkan rentang frekwensi antara 2 s/d 14 Hz dengan amplitudo ± 0.25 s/d 2.25 mm. Perilaku getaran menunjukkan kenaikan frekwensi getaran pada saat beban jepit dinaikkan tetapi justru amplitudo

getaran akan menurun. Frekwensi yang dihasilkan dari analisis model matematis akan meningkat dengan bertambahnya konstanta pegas dari selang pada pembebanan yang tetap. Peningkatan frekwensi sebagai akibat meningkatnya konstanta pegas sistem ditunjukkan dengan bertambahnya nilai bilangan Strouhal dan Womersley. Sedangkan penurunan osilasi atau amplitudo getaran ditunjukkan dengan berkurangnya nilai indeks kecepatan.

Peningkatan konstanta pegas dari selang tidak menunjukkan perubahan frekwensi getaran tetapi mempersempit rentang pembebanan jepit. Kondisi aliran kritis yang dapat memunculkan self excited vibration terjadi pada pinch ratio antara 63 % s/d 68 % untuk kapasitas aliran 20 s/d 15 liter/menit.

DAFTAR PUSTAKA

- Anssari, A., 2008. *A New System to Analyze Pulsatile Flow Characteristics in Elastic Tubes for Hemodynamic Applications*, American Journal of Applied Sciences 5 (12): 1730-1736, ISSN 1546-9239, © 2008 Science Publications
- Chen, S.S., and G.S. Rosenberg, 1973. *Vibration And Stability Of A Tube Conveying Fluid*, Argone National Laboratories ANL-7762, Int Ref. N71 – 34631
- Hazel, L., and Matthias Heil, 2003. *Finite-Reynolds-Number Flows In Three-Dimensional Collapsible Tubes*, J. Fluid Mech. (2003), vol. 486, pp. 79–103. @ 2003 Cambridge University Press 79 DOI: 10.1017/S0022112003004671, United Kingdom
- Heil, Matthias, And Sarah L. Waters, 2006. *Transverse Flows In Rapidly Oscillating Elastic Cylindrical Shells*, J. Fluid Mech. (2006), vol. 547, pp. 185–214. @ 2006 Cambridge University Press 185 DOI:10.1017/S0022112005007214, United Kingdom
- Housner, 1954. *Bending Vibrations Of A Pipeline Containing Flowing Fluid*, J. Appl Meh 1954.74.205. Int Ref. HPO 469
- Munson, Bruce R., 2003, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4th edn, John Wiley & Sons Inc., New York
- Naguleswararn, S., & C.J.H. Williams, 1968. *Lateral Vibrations Of A Tube Containing A Fluid*, J Mech Eng. Eng Sci 10 (3) 228-238 1968 Int Ref., 472
- Olesen, H. P., *Detection Of Pressure Variations In Thin Walled Tubes By Vibration Measurements*, www.bksv.com/doc/13-069.pdf
- Pejack, E. R., 2006. *Apparatus For Demonstrating Self-excited Vibrations In Fluid Flow*, Department of Mechanical Engineering, University of the Pacific, Stockton, California 95211, USA
- Thompson, W., M. Dahleh, 1998. *Theory of Vibration with Applications*, 5th edn, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ
- Walker, Rocky, 2007, *Fluid Power Handbook & Directory*, Nevada, <http://www.hydraulicspneumatics.com>, December 2008
- Wardana, I.N.G., 2000. *Getaran Pipa Akibat Aliran Fluida*, Proc. Piping Technology Seminar 2000, p. 213-221.