

## PENGARUH *PINCH RATIO* TERHADAP KARAKTERISTIK GETARAN PADA ALIRAN FLUIDA YANG MENGALAMI *SELF EXCITED VIBRATIONS*

Sufiyanto \*

### Abstraksi

Mekanisme terjadinya *self excited vibrations* diawali dengan adanya perubahan arah aliran fluida didalam selang (*flexible pipe*) saat melewati daerah jepitan (*pinch area*). Perubahan penampang selang akan mempengaruhi arah vektor aliran yang menyebabkan aliran fluida tidak stabil (*unstable*). Selain itu fluida mempunyai energi yang diperoleh dari pompa terdiri dari energi tekanan dan kecepatan sesuai dengan hukum Bernoulli. Pada saat melewati daerah jepitan, terjadi pertukaran energi antara energi tekanan dan energi kecepatan secara bergantian menyebabkan terjadinya fluktuasi aliran yang berdampak pada munculnya getaran pada selang yang dicirikan dengan frekwensi getarannya. Berdasarkan persamaan model matematis menunjukkan bahwa perubahan rasio jepitan antara 0,66 s/d 0,68 menghasilkan frekwensi model antara 9,75 hz s/d 7,12 hz. Hal ini menunjukkan perbedaan dengan hasil pengujian dimana semakin besar rasio jepitan terjadi penurunan amplitudo yang diikuti dengan peningkatan frekwensi sebagai akibat pertukaran energi tekanan menjadi energi kecepatan.

**Kata Kunci :** Aliran Fluida, *Pinch Ratio*, *Unstable Flow*, *Self-Excited Vibrations*

### PENDAHULUAN

Pada sistem perpipaan munculnya getaran yang diakibatkan oleh aliran fluida yang mengalir didalamnya merupakan hal yang tak dapat dihindarkan. Untuk menjamin keamanan pada sistem perpipaan, maka getaran yang dapat diterima oleh sistem ditentukan dengan adanya batas maksimum tegangan yang ditimbulkan akibat getaran dalam pipa tersebut. Selain itu untuk mengurangi getaran yang terjadi dapat dilakukan dengan cara meningkatkan stabilitas dari instalasi sistem perpipaan. Peningkatan stabilitas dapat dilakukan dengan meningkatkan kekakuan sistem melalui pengaturan tumpuan (klem) pada pipa.

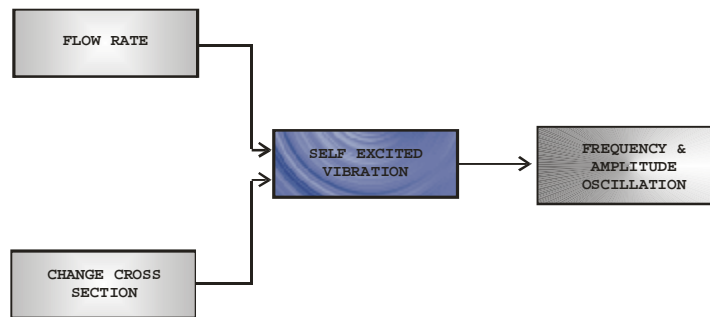
Ditinjau dari kegagalan akibat terjadinya kelelahan (*fatigue*), tegangan dinamik yang ditimbulkan tidak boleh melebihi batas ijin yang ditentukan dari tegangan bolak-balik (*alternating stress*)

berdasarkan jumlah siklus yang diberikan. Untuk itu perlu pengamatan getaran yang dilakukan dengan cara melakukan pengukuran terhadap frekwensi dan amplitudo getaran.

Fenomena terjadinya getaran yang dibangkitkan sendiri (*self excited vibrations*) 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.

Ada beberapa kondisi yang menyebabkan timbulnya *self excited vibrations* ini yaitu : perubahan kecepatan aliran dan penampang pipa yang dilalui fluida.

\* Dosen Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Merdeka Malang



Gambar 1. Kerangka Konsep Penelitian

Pengaruh kecepatan aliran menjadi sangat signifikan apabila kecepatan aliran diperbesar. Pada saat kecepatan aliran mendekati nilai batas kritisnya maka aliran menjadi tidak stabil. Adanya osilasi pada dinding pipa atau selang terjadi ketika aliran menjadi tidak tunak (*unsteady*). Oleh karena itu, apabila kecepatan aliran semakin besar maka osilasi akan berkembang menjadi getaran dengan amplitudo yang besar.

Perubahan penampang saluran yang dilalui oleh aliran fluida akibat adanya pengaruh jepitan (*pinch*) akan mengakibatkan terjadinya pertukaran antara energi gerak dan energi potensial elastis. Pada saat melewati daerah jepitan aliran menjadi tidak stabil dan akan menimbulkan osilasi pada dinding selang (*tube*). Dengan semakin besar rasio jepitan (*pinch ratio*) yang berarti perubahan penampang aliran semakin besar maka aliran menjadi semakin tidak stabil. Pada kondisi ini osilasi akan berkembang menjadi amplitudo yang besar yang kemudian disebut dengan *self excited vibrations*. Selain itu peningkatan kecepatan aliran (*flow rate*) akan mempercepat terjadinya ketidakstabilan dalam aliran.

Untuk mengetahui aspek-aspek dan karakteristik dalam aliran fluida yang dapat mengakibatkan terjadinya getaran yang dibangkitkan sendiri oleh sistem, maka dilakukan penelitian dengan variasi besarnya *pinch ratio* pada pipa fleksibel (selang) yang didalamnya mengalir fluida *incompressibel*.

#### KAJIAN PUSTAKA

Pada beberapa tahun terakhir telah ada peningkatan penelitian yang mempelajari perilaku pipa berdinding tipis yang berada pada kondisi dan lingkungan yang berbeda. Penelitian seperti ini sangat penting bagi industri minyak dan gas, dan bahkan penting bagi industri listrik nuklir dimana pipa dan selang harus tahan terhadap tekanan yang sangat tinggi.

Salah satu topik penting untuk penelitian adalah getaran yang terjadi pada dinding selang. Getaran tersebut yang dapat ditimbulkan dengan sejumlah cara dan jika resonansi dilibatkan dapat menghasilkan efek yang signifikan. Housner (1954) telah melakukan sebuah penyelidikan untuk menentukan efek kecepatan angin yang tinggi pada sistem perpipaan minyak melintasi gurun. Kesimpulan yang diperoleh dari penelitiannya adalah apabila frekwensi

getaran paksa akibat kecepatan aliran fluida, berimpit dengan frekwensi resonansi pipa, penguatan getaran dapat menjadi faktor yang signifikan penyebab pipa mengalami tekuk (*bending*).

Naguleswaran dan Williams (1968) menyelidiki masalah yang lebih spesifik getaran pada dinding selang, baik secara teoritis maupun eksperimental. Pada saat kecepatan aliran fluida sangat cepat ditemukan getaran pipa logam secara signifikan. Penelitian tersebut juga dikembangkan pada kasus variasi tekanan fluida dalam selang tanpa kecepatan aliran fluida. Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah sebuah aliran fluida dalam pipa logam bukan merupakan faktor yang signifikan penyebab pipa tersebut bergetar dan tertekuk, kecuali pada kecepatan aliran yang sangat tinggi.

Pengamat lain telah memperoleh kesimpulan serupa pada penelitian dengan variasi tekanan dalam selang mengakibatkan aliran berdenyut. Dalam sebuah pengamatan yang dilakukan Chen dan Rosenberg (1973), efek gaya coriolis dan lekukan dinding selang dinilai tidak menjadi signifikan pada kecepatan aliran fluida yang rendah. Adanya osilasi yang tak stabil pada dinding selang ketika aliran tidak steady, dan juga ditemukan aliran berdenyut mengakibatkan ketidakstabilan pada kecepatan aliran yang relatif rendah.

Olesen mengamati sejumlah selang berisi fluida tanpa kecepatan aliran tetapi dengan variasi tekanan diatur dalam aliran

dengan arti secara tiruan seperti pembangkit getaran. Variasi tekanan yang cepat mungkin secara serius meningkatkan beban *fatigue* pipa dan komponen lainnya pada sistem perpipaan.

Menurut Wardana (2000) kegagalan *fatigue* dapat terjadi apabila muncul resonansi getaran jika frekwensi natural turun sampai pada batas tertentu. Dalam sistem perpipaan, jika kecepatan aliran fluida melebihi batas kritis maka pipa menjadi tidak stabil. Dari hasil penurunan persamaan getaran pipa dengan tumpuan di kedua ujungnya diperoleh kesimpulan bahwa frekwensi natural pipa berkurang dengan meningkatnya kecepatan kritis fluida yang mengalir dalam pipa.

Karakteristik aliran yang berubah pada saat kondisi selang mengalami pengkerutan (*collapsible tubes*) dianalisa oleh Hazel dan Heil (2003). Jika tekanan yang bekerja dalam selang bernilai negatif kemudian selang menekuk tidak simetris dan deformasi yang besar mengakibatkan interaksi yang kuat antara fluida dan selang. Pengaruh utama dari inersia fluida pada perilaku sistem secara makro diakibatkan oleh efek Bernoulli yang membangkitkan penambahan *pressure drop* ketika selang menekuk dan luas penampang berkurang. Perubahan kecil tekanan dalam selang menyebabkan perubahan besar dalam luas penampang selang. Perubahan yang menyertai dalam pembebanan fluida pada dinding dapat mengakibatkan interaksi kuat struktur-fluida, yang berpotensi menyebabkan fenomena seperti pembatasan

aliran dan berkembang perpindahan yang besar pada osilasi yang dibangkitkan sendiri. Pengaruh elastisitas selang dinyatakan dengan parameter indeks kecepatan yang menyatakan rasio inersia fluida dengan kekakuan *bending* dari selang, dimana peningkatan kekakuan akan menurunkan indeks kecepatan yang dapat mengurangi osilasi.

Analisa tentang selang berisi fluida dengan konstanta elastis dinding yang menunjukkan osilasi frekwensi tinggi amplitude kecil dilakukan oleh Heil dan Waters (2006). Gangguan kecepatan yang dibangkitkan oleh gerakan dinding didominasi oleh komponen transversal dan menggunakan simulasi numeris untuk menganalisa aliran dua dimensi yang berkembang dalam penampang selang. Metode asimtotik digunakan untuk mendapatkan prediksi yang tegas bagi medan aliran dan energi disipasi, dimana nilainya memerankan peranan penting dalam pengembangan osilasi yang dibangkitkan sendiri. Dalam kasus interaksi fluida dan struktur, osilasi gabungan dikontrol dengan rasio kerapatan fluida dan dinding, dan dengan parameter material yang mana ekuivalen dengan bilangan Womersley, dan menunjukkan pentingnya gaya inersia fluida dan elastisitas dinding relatif terhadap kekentalan fluida. Bilangan Womersley yang besar berhubungan dengan kasus kekakuan dinding dan densitas fluida yang besar. Nilai kekakuan dinding  $K$  yang lebih besar dibandingkan tekanan yang diakibatkan

inersia fluida ditunjukkan dengan bilangan Strouhal yang besar.

Pejack (2006) dalam tulisannya menyatakan bahwa dalam sistem getaran yang dibangkitkan sendiri terjadi suatu pertukaran antara energi gerak dan energi yang tersimpan (seperti gaya potensial yang elastis atau gravitasi). Pada kecepatan aliran yang kritis akan terjadi osilasi yang kemudian berkembang menjadi amplitudo yang besar. Peningkatan kecepatan yang lebih tinggi akan mempercepat terjadinya kondisi tidak stabil dalam aliran. Selain itu juga dilakukan analisis pendekatan matematis untuk menentukan kriteria dan mengungkap mekanisme ketidakstabilan saat terjadinya *self excited vibrations* yang diamati.

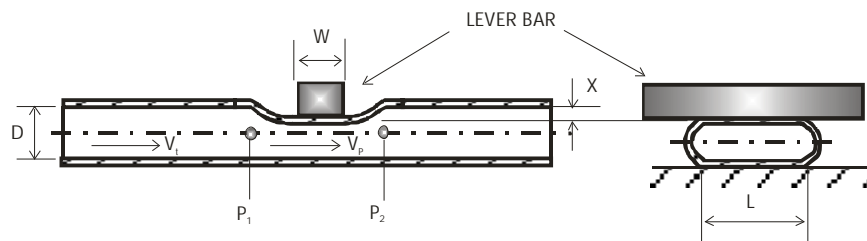
Studi tentang karakteristik aliran berdenyut (*pulsatile flow*) untuk mensimulasikan aliran darah arteri dilakukan oleh Anssari (2008). Penelitian yang dilakukan dengan membuat sistem arterial tiruan yang dapat diatur dengan kondisi mekanik yang berbeda meliputi modulus elastisitas yang berbeda dan fluida dengan kekentalan yang berbeda. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kekakuan dinding selang (*tube*) menghasilkan penurunan rata-rata denyut gradien tekanan. Selain itu peningkatan viskositas fluida mengakibatkan denyut gradien tekanan yang lebih tinggi dan fluktuasi denyut gradien tekanan berkurang.

### Definisi *Self-Excited Vibrations*

Dalam mekanika fluida *self-excited vibrations* didefinisikan sebagai sebuah getaran yang berubah menjadi tidak stabil (*unstable*) tanpa adanya gangguan eksternal dengan sebuah kondisi awal yang stabil dalam aliran tunak (*steady flow*). Getaran tersebut yang terjadi berkembang dari sebuah aliran yang tunak kemudian berubah menunjukkan peningkatan amplitudo getaran (Pejack, 2006).

### Model Matematis

Model matematis sederhana dari *self-excited vibrations* dikembangkan untuk mengungkap mekanisme dibalik ketidakstabilan dan memperoleh kriteria untuk ketidakstabilan (Pejack, 2006). Pada gambar 1 dibawah ini dapat dilihat untuk memberikan gambaran tentang model matematis dari sistem aliran yang dapat menyebabkan terjadinya *self-excited vibrations*.



Gambar 1. Model Matematis

### METODOLOGI

#### Variabel Penelitian

Adapun variabel pengujian dalam penelitian ini adalah :

#### Variabel bebas :

-  $b$  = rasio jepitan (*pinch ratio*) pada selang yang dilakukan dengan mengatur besarnya pembebanan

#### Variabel terikat :

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

#### Alat yang Digunakan

1. Pompa air (*water pump*) :
2. Pengukur aliran (*flow meter*)
3. Pengukur tekanan (*pressure gauge*)
4. Alat pencatat getaran
5. *Dial indikator*
6. Jangka sorong

#### 7. ADC (*Analog to Digital Converter*)

#### Prosedur Penelitian

Adapun langkah pengujian yang dilakukan sbb :

1. menentukan nilai konstanta elastisitas pegas ( $K$ ) dari selang (*tube*) yang digunakan.
2. mengatur berat pembebanan untuk mendapatkan *pinch ratio* yang telah direncanakan.
3. menetapkan posisi awal alat pencatat getaran untuk pengukuran amplitudo dan frekwensi getaran.
4. mengulang langkah 1-3 untuk *pinch ratio* yang berbeda.

#### Metode Pengambilan Data

Metode yang digunakan untuk menghasilkan getaran dengan pembangkitan

sendiri (*self excited vibrations*) yaitu : metode laju aliran konstan (*fixed flow rate*) dimana kecepatan aliran ditetapkan sedangkan besarnya jepitan diatur (divariasikan) sampai getaran yang dibangkitkan sendiri muncul.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### § Data Pengujian

Pada tahap awal data pengujian yang diambil adalah pengujian pada kapasitas aliran dengan bukaan katup penuh. Variasi

rasio jepit (*pinch ratio*) yang diberikan pada selang fleksibel dilakukan dengan mengatur besarnya beban jepit dan jarak lengan pembebanan terhadap titik tumpuan. Variasi beban yang diberikan 40 g, 50 g, dan 70 g sedangkan variasi jarak lengan pembebanan adalah 50 cm, 55 cm dan 60 cm. Data yang dicatat oleh pengukur tekanan, flow meter dan dial indikator dapat dilihat pada tabel 1 berikut :

Tabel 1. Data Pengukuran Tekanan, Debit dan Jarak Jepitan (*Pinch*)

Beban <i>m</i> (gr)	Jarak Lengan <i>l</i> (cm)	Tekanan <i>P</i> (kg/cm <sup>2</sup> )		<i>Pinch d</i> (mm)	Debit <i>Q</i> (liter/menit)
		<i>P<sub>low</sub></i>	<i>P<sub>high</sub></i>		
40	50	0,25	0,375	3,72	11
	55	0,25	0,375	3,68	11
	60	0,25	0,375	3,50	11
50	50	0,25	0,375	3,58	11
	55	0,25	0,375	3,55	11
	60	0,25	0,375	3,53	11
70	50	0,25	0,375	3,45	11
	55	0,25	0,375	3,40	11
	60	0,25	0,375	3,38	10,75

Data frekwensi dan amplitudo getaran yang dihasilkan oleh sensor getaran selama pengujian berlangsung dibaca oleh alat ADC kemudian diolah dengan program. Cara kerja alat ADC dan konversi menjadi data angka yang ditampilkan di komputer dapat dilihat pada gambar 2.

Data yang dihasilkan oleh program berupa data angka (gambar 3) kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik (gambar 4) untuk selanjutnya dilakukan analisa frekwensi dan amplitudo getaran yang dihasilkan saat terjadi *self excited vibrations*.

### § Perhitungan model matematis

Persamaan matematis untuk *self excited vibrations* adalah :

$$m \ddot{x} + \left\{ \begin{array}{l} \left[ K + \frac{PW}{4} (P_t - P_a) \right] \\ - \left[ \frac{PW r V_t^2 (1 + 3b_e^2)}{8(1 - b_e^2)^3} \right] \end{array} \right\} x_1 = 0 \quad (1)$$

Dimana *m* : massa

*K* : konstanta elastis selang

*W* : lebar batang penekan

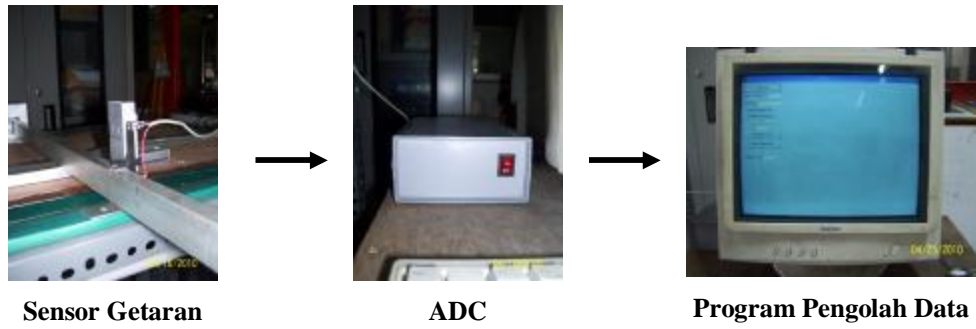
*P<sub>t</sub>* : tekanan dalam selang

*P<sub>a</sub>* : tekanan atmosfer

*V<sub>t</sub>* : kecepatan aliran

*b<sub>e</sub>* : rasio jepitan

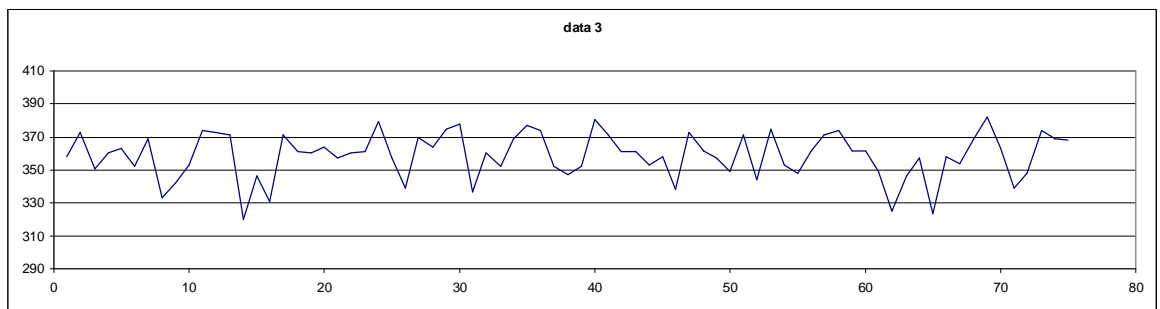
Berdasarkan data hasil pengukuran pada tabel 1, maka dengan menggunakan persamaan matematis (1) diatas, maka dapat diperoleh frekwensi model matematis yang dihasilkan seperti pada tabel 2.



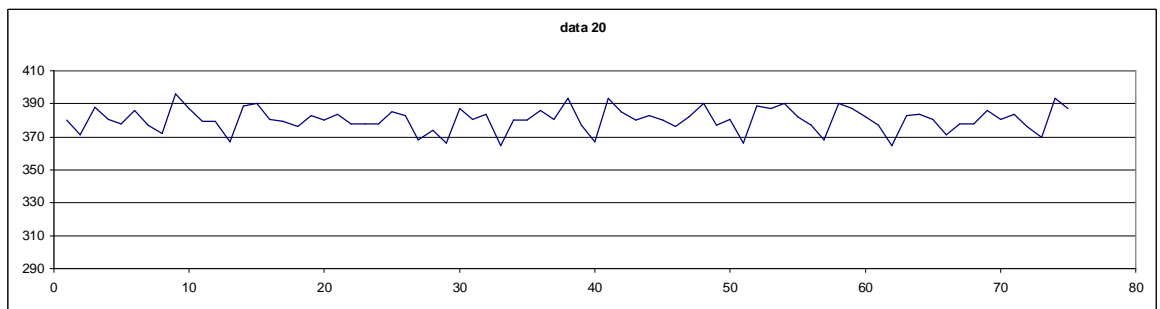
Gambar 2. Mekanisme Alat Ukur Getaran

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Data Hasil Pengambilan																		
2	374	374	364	344	338	337	351	369	371	312	346	375	334	376	353	359	376	374	350
3	377	347	346	342	376	330	353	368	339	375	378	357	343	353	354	378	333	368	327
4	352	370	370	367	355	379	370	377	331	368	376	335	376	334	342	357	336	376	361
5	393	352	389	389	374	347	343	381	389	378	361	352	351	371	376	344	343	347	373
6	396	371	330	367	367	368	375	345	331	364	346	378	357	307	353	373	354	362	362
7	365	361	331	378	371	367													

Gambar 3. Data Angka Yang Dihasilkan Pembacaan ADC



a.



b.

Gambar 4. Karakteristik Getaran Dengan Kapasitas Aliran Penuh pada Pembebanan  
a. 40 g, b. 70

Tabel 2. Perhitungan Frekwensi Model Matematis

Luas  
Penampang 7.08E-05  
(A) m<sup>2</sup>

$m$	$(P_r - P_a)$ kg/cm <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	$V$ , lt/menit	m/dtk	$K$	$W$	$r$	$be$	$K$ sistem	$w = \sqrt{K/m}$	$f = w/2p$
0.40	0.175	17500	11.00	2.59	1724	0.012	1000	0.66	1499.07	61.22	9.75
0.50	0.175	17500	11.00	2.59	1724	0.012	1000	0.67	1452.08	53.89	8.58
0.70	0.175	17500	11.00	2.59	1724	0.012	1000	0.68	1401.34	44.74	7.12

## § Pembahasan

Mekanisme terjadinya *self excited vibrations* diawali dengan adanya perubahan arah aliran fluida didalam selang saat melewati daerah jepitan (*pinch area*). Perubahan penampang selang akan mempengaruhi arah vektor aliran yang menyebabkan aliran fluida tidak stabil (*unstable*). Selain itu fluida yang mengalir didalam selang mempunyai energi yang diperoleh dari pompa dan sesuai dengan hukum Bernoulli terdiri dari energi yang berupa tekanan dan kecepatan. Pada saat melewati daerah jepitan, terjadi pertukaran energi antara energi tekanan dan energi kecepatan secara bergantian. Pertukaran energi tersebut akan menyebabkan terjadinya fluktuasi aliran yang berdampak pada munculnya getaran pada selang.

Pada saat rasio jepitan diperbesar dengan cara menambahkan beban penjepit, maka amplitudo getaran yang ditunjukkan dengan simpangan akan mengalami penurunan. Penurunan simpangan atau amplitudo getaran akan diikuti dengan bertambahnya frekwensi getaran. Hal ini disebabkan oleh energi tekanan yang dimiliki fluida akan dialihkan menjadi energi kecepatan. Energi tekanan identik dengan

amplitudo sedangkan energi kecepatan identik dengan frekwensi getaran. Pada saat energi tekanan ditahan oleh beban penjepit maka simpangan getaran akan menurun dan energi fluida dialihkan menjadi energi kecepatan yang akan meningkatkan frekwensi getaran.

Pada gambar 4 diatas ditunjukkan beban jepit yang diberikan 40 g dan 70 g dengan posisi lengan pembebanan yang tetap. Pada beban 70 g amplitudo atau simpangan getaran lebih kecil dari simpangan yang dihasilkan oleh pembebanan 40 g. Sebaliknya pada beban 70 g frekwensi getaran yang dihasilkan meningkat dibandingkan pada beban 40 g. Hal ini diakibatkan adanya pertukaran antara energi tekanan dan energi kecepatan yang dimiliki oleh fluida saat melewati daerah jepitan (*pinch area*).

Persamaan model matematis digunakan untuk membandingkan karakteristik getaran yang dihasilkan dari pengujian dengan karakteristik getaran berdasar persamaan matematis. Ternyata dari frekwensi yang dihasilkan pada tabel 2 dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya beban penjepitan justru akan menurunkan frekwensi model. Hal ini berbeda dengan frekwensi hasil penelitian justru menunjukkan peningkatan



dengan bertambahnya beban jepit. Pada persamaan matematis (1) hanya menunjukkan perubahan frekwensi sedangkan amplitudo tidak dapat ditunjukkan atau dianggap konstan. Frekwensi dipengaruhi oleh besarnya konstanta pegas dan massa beban yang diberikan. Secara teoritis frekwensi getaran akan berkurang apabila massa yang diberikan bertambah. Selain itu konstanta elastis sistem ternyata juga mengalami penurunan dengan bertambahnya beban jepit. Penurunan nilai konstanta elastis sistem sebagai akibat dari berkurangnya volume fluida yang berada dibawah daerah jepit (*pinch*) yang ditunjukkan dengan *pinch ratio* yang bertambah.

#### SIMPULAN

*Self excited vibrations* terjadi sebagai akibat adanya perubahan arah aliran fluida pada saat melewati daerah jepitan sehingga terjadi aliran tidak stabil (*unsteady flow*). Pada kondisi tersebut terjadi pertukaran energi yang dimiliki fluida antara energi tekanan dan energi kecepatan yang akan berpengaruh terhadap karakteristik getaran yaitu amplitudo dan frekwensi *self excited vibrations* yang muncul.

#### 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

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](http://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

Wardana, I.N.G., 2000. *Getaran Pipa Akibat Aliran Fluida*, Proc. Piping Technology Seminar 2000, p. 213-221.

