

ANALISIS DAN LINIERISASI PERSAMAAN MODEL MATEMATIS TERJADINYA *SELF EXCITED VIBRATIONS* PADA ALIRAN FLUIDA DALAM SELANG (*TUBE*)

Sufiyanto¹⁾

ABSTRAK

Perubahan penampang aliran dapat menyebabkan terjadinya fenomena *self excited vibrations* karena aliran fluida mengalami perubahan pola aliran pada saat melewati penampang tersebut. Pembebanan yang diberikan pada selang (*tube*) akan mengakibatkan penyempitan (*pinch*), sehingga perubahan tekanan dan kecepatan aliran terjadi pada daerah jepitan. Mekanisme *self excited vibration* menunjukkan bentuk perubahan antara energi potensial tekanan dan energi kecepatan fluida. Perubahan energi tersebut terjadi silih berganti menghasilkan gerakan osilasi pada dinding selang yang memiliki karakteristik frekwensi dan amplitudo tertentu.

Pendekatan model matematis menghasilkan sebuah bentuk persamaan diferensial non-linier. Persamaan tersebut membutuhkan proses linierisasi agar dapat menggambarkan gerakan linier osilasi dinding selang pada saat terjadinya *self excited vibrations*.

Hasil simulasi data penelitian dengan persamaan model matematis menunjukkan terjadinya peningkatan kekakuan sistem (K_{sistem}) dan penurunan nilai frekwensi model dengan bertambahnya *pinch ratio* yang diberikan.

Kata Kunci : Model Matematis, *Self Excited Vibrations*, Karakteristik Getaran

PENDAHULUAN

Dalam sebuah sistem perpipaan dan operasi pada mesin-mesin hidrolis, dimungkinkan terjadinya efek getaran yang terjadi sebagai akibat perubahan pola aliran fluida. Perubahan penampang aliran dapat mengakibatkan terjadinya perubahan tekanan dan kecepatan aliran fluida di dalam pipa.

Mekanisme terjadinya *self excited vibrations* merupakan suatu bentuk perubahan energi antara energi tekanan dan energi kecepatan yang terjadi silih berganti sesuai dengan persamaan Bernoulli. Pola perubahan energi yang terjadi akan menghasilkan sebuah karakteristik getaran yang ditunjukkan dengan frekwensi dan amplitudo getaran gerakan osilasi dinding selang.

Karakteristik getaran dan mekanisme yang menunjukkan terjadinya *self excited vibrations* dapat diselesaikan dengan menggunakan pendekatan matematis yang merupakan sebuah persamaan diferensial getaran mekanis. Persamaan tersebut merupakan persamaan getaran harmonis yang dapat diselesaikan untuk mendapatkan solusi persamaan getaran dan frekwensi getaran yang dihasilkan.

Penurunan Persamaan Model Matematis

Untuk memberikan gambaran tentang model matematis dari *self excited vibrations* aliran fluida di dalam sebuah selang fleksibel dapat dilihat pada gambar 1. Model matematis sederhana dari getaran *self-excited* dikembangkan sebagai analisis untuk mengungkap mekanisme dibalik ketidakstabilan dan memperoleh kriteria untuk ketidakstabilan (Pejack, 2006). Adapun variabel-variabel yang digunakan untuk menurunkan persamaan model matematis adalah sebagai berikut :

A_t : luas penampang selang

A_p : luas penampang jepit

D : diameter luar selang

g : gravitasi

K : konstanta elastis

L : panjang kontak antara batang dengan selang

m : masa tuas dan beban di lokasi jepit

P_t : tekanan di dalam selang

P_a : tekanan atmosfer

P_1 : tekanan sisi masuk daerah jepit

P_2 : tekanan sisi keluar daerah jepit

V_t : kecepatan fluida di dalam selang

V_p : kecepatan fluida di daerah jepit

W : lebar batang tuas

x : jarak perpindahan selang pada daerah jepit

x_e : jarak perpindahan saat kesetimbangan

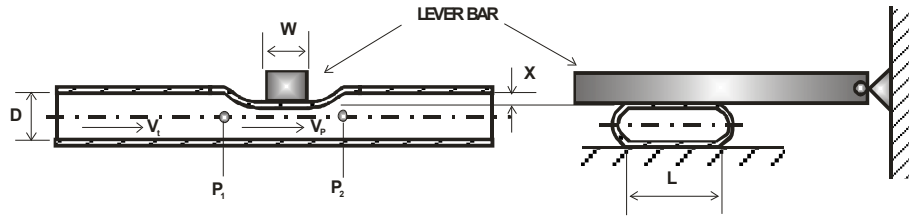
α : rasio luas A_p/A_t

ρ : densitas fluida

β : x/D

Beberapa asumsi diperlukan untuk penyederhanaan dalam menurunkan persamaan model matematis diatas, antara lain :

1. Aliran fluida merupakan jenis aliran fluida inkompresibel satu dimensi.
2. Terjadi pemusatan aliran sebelum masuk daerah jepitan dan fluida mengalir tanpa gesekan ketika masuk daerah jepitan.
3. Aliran menyebar keluar jepitan dengan kerugian tekanan $(K/2)(V_p - V_t)^2$, dan apabila perbedaan aliran keluar jepitan pada sudut yang besar (90°), maka K diambil mendekati 1.
4. Tekanan tiba-tiba yang mengikuti aliran menyebar keluar dari jepitan adalah tekanan atmosfer (P_a), mengabaikan kerugian tekanan dalam sisi keluar selang pada jepitan.
5. Kondisi awal sebelum masuk daerah jepitan diasumsikan sebagai aliran tunak (*steady flow*) jika analisis termasuk ketidakstabilan awal dan bukan aliran sesudahnya.



Gambar 1. Model Matematis

Dari asumsi inkompresibel dan kontinuitas menghasilkan persamaan :

$$A_t \cdot V_t = A_p \cdot V_p \quad (1)$$

Selanjutnya, dengan menggunakan persamaan Bernoulli untuk aliran memusat memasuki daerah jepitan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$P_1 = P_t + \frac{\rho V_t^2}{2} \left(1 - \frac{I}{\alpha^2} \right) \quad (2)$$

dengan α adalah rasio luasan A_p/A_t .

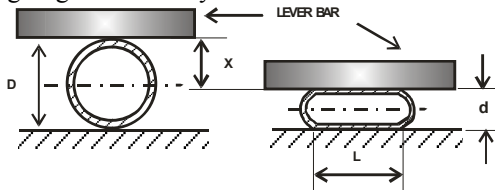
Untuk aliran menyebar keluar dari jepitan, ada kerugian tekanan signifikan saat aliran menyebar pada sudut yang besar. Persamaan Bernoulli dengan bentuk kerugian tekanan pada saat aliran keluar dari daerah jepitan adalah :

$$P_2 + \frac{\rho V_p^2}{2} = P_a + \frac{\rho V_t^2}{2} + \frac{K\rho}{2} (V_p - V_t)^2 \quad (3)$$

Setelah penyederhanaan (untuk $K = 1$) menjadi

$$P_2 - P_a = \rho V_t^2 \left(1 - \frac{I}{\alpha} \right) \quad (4)$$

Rasio luasan α , tergantung pada perpindahan x batang pada lokasi jepitan. Gambar 2 berikut menunjukkan asumsi bentuk deformasi penampang lintang lingkarannya.



Gambar 2. Deformasi Penampang di Daerah Jepitan (Pinch)

Dengan keliling selang tetap tidak berubah pada daerah jepitan, maka

$$\alpha = A_p / A_t = 1 - (x/D)^2 = 1 - \beta^2 \quad (5)$$

dengan $\beta = x/D$ dan panjang L batang yang kontak dengan selang adalah :

$$L = \pi x / 2 \quad (6)$$

Pendekatan untuk α kecil, gabungan persamaan (2) dan (4) memberikan :

$$\frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{P_a + P_t}{2} - \frac{\rho V_t^2}{4\alpha^2} \quad (7)$$

dengan $(P_1 + P_2)/2$ diambil sebagai tekanan rata-rata efektif yang bekerja pada batang sepanjang luasan $WL = W\pi x/2$.

Gaya yang bekerja pada batang di daerah jepitan muncul dari berat massa yang sebanding (m), tekanan tidak seimbang $((P_1 + P_2)/2) - P_a$ dan gaya elastis selang. Dengan menggunakan persamaan differensial gerakan dari hukum Newton kedua diperoleh persamaan sbb :

$$\left[\frac{\pi W (P_a - P_b)}{4} + \left(\frac{\pi W}{8} \right) \frac{\rho V_t^2}{(1 - (x/D)^2)^2} - K \right] x \quad (8)$$

$$+ mg = m\ddot{x}$$

dengan m adalah massa sebanding yang diletakkan pada jepitan menyatakan efek massa dari batang dan berat yang ditambahkan. Bentuk kedua dalam tanda kurung pada persamaan (8) adalah perpindahan nonlinier x . Untuk mencapai persamaan linier dilakukan dengan melinierkan bentuk daerah dekat $x = x_e$, dimana x_e adalah posisi kesetimbangan. Pergeseran titik awal variabel perpindahan juga dibuat dengan meletakkan

$$x_1 = x - x_e \quad (9)$$

Kesetimbangan gaya pada kondisi setimbang, sehingga bentuk konstan dalam persamaan differensial linier gerakan keluar saat dinyatakan dalam bentuk koordinat baru x_1 . Persamaan differensial linier dalam x_1 menjadi :

$$\left[\frac{\pi W \rho V_t^2 (1 + 3\beta_e^2)}{8(1 - \beta_e^2)^3} - \left[K + \frac{\pi W}{4} (P_t - P_a) \right] \right] x_1 = m\ddot{x}_1 \quad (10)$$

dengan $\beta_e = x_e/D$. Ruas kiri persamaan (10) adalah keseluruhan gaya pemulihan, yang nilainya harus negatif untuk memberikan kestabilan ketika sistem dikenakan gangguan kecil. Ketika bernilai positif, gangguan kecil dari kesetimbangan tidak akan dikembalikan, dan gangguan akan berkembang menjadi bentuk yang dikenal dengan getaran *self-excited*. Jumlah dalam kelompok kedua dalam kurung pada persamaan (10) menyatakan gaya pemulihan dari elastisitas selang dan efek pemulihan tekanan hidostatik dalam. Kelompok pertama dalam kurung pada persamaan (10) menyatakan gaya tidak stabil akibat aliran fluida. Kriteria getaran *self-excited* terjadi pada :

$$\frac{\pi W \rho V_t^2}{8} \left[\frac{1 + 3\beta_e^2}{(1 - \beta_e^2)^3} \right] > K + \frac{\pi W}{4} (P_t - P_a) \quad (11)$$

Besaran yang termasuk dalam kurung pada persamaan (11) meningkat cepat ketika β_e mencapai 1, yaitu ketika x_e mendekati D . Hal ini sangat sensitif sebagai contoh hanya 2% variasi pada $\beta_e = 0,8$ menghasilkan 20 - 30% perubahan pada sisi kiri kriteria stabilitas persamaan (11).

Persamaan Getaran

Pendekatan matematis untuk menentukan kriteria stabilitas dan mekanisme terjadinya *self excited vibration* telah diuraikan diatas. Getaran yang dihasilkan dari mekanisme ini adalah sistem getaran harmonik dimana terjadi gerakan osilasi berulang secara teratur. Dalam sistem getaran mekanik, gerakan seperti ini dihasilkan oleh mekanisme massa dan pegas yang menghasilkan persamaan getaran bebas sesuai hukum Newton kedua sebagai berikut (Thomson, 1998) :

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (12)$$

Persamaan (10) apabila disusun kembali akan menghasilkan persamaan yang sama dengan persamaan (12), yaitu :

$$m\ddot{x}_1 + \left[\begin{array}{c} \left[K + \frac{\pi W}{4} (P_t - P_a) \right] \\ - \left[\frac{\pi W \rho V_t^2 (1 + 3\beta_e^2)}{8(1 - \beta_e^2)^3} \right] \end{array} \right] x_1 = 0 \quad (13)$$

Dimana besaran yang terdapat dalam tanda kurung pada ruas kiri persamaan merupakan nilai konstanta elastis pegas pada sistem getaran mekanik.

Persamaan gerak yang dihasilkan oleh sistem getaran bebas secara umum dinyatakan dengan persamaan :

$$x = A \cos \omega_n t \quad (14)$$

Dimana ω_n menyatakan kecepatan sudut yang berhubungan dengan frekwensi sistem yang dinyatakan dengan hubungan

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega_n \quad (15)$$

Dan $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ yang diperoleh dari persamaan (12),

sehingga nilai kecepatan sudut ω_n dari persamaan getaran *self excited* persamaan (13) adalah

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\left[\begin{array}{c} \left[K + \frac{\pi W}{4} (P_t - P_a) \right] \\ - \left[\frac{\pi W \rho V_t^2 (1 + 3\beta_e^2)}{8(1 - \beta_e^2)^3} \right] \end{array} \right]}{m}} \quad (16)$$

Linierisasi

Linierisasi yang dimaksud dalam tulisan ini adalah mengubah persamaan diferensial nonlinear menjadi persamaan diferensial linier. Persamaan 8 merupakan persamaan diferensial nonlinear karena nilai x dalam persamaan tersebut merupakan gerakan nonlinear yang akan diubah menjadi gerakan linier yang dinyatakan dengan bentuk $x_1 = x - x_e$.

Persamaan differensial yang akan dilinierkan adalah persamaan 8, yaitu:

$$\left[\begin{array}{c} \frac{\pi W (P_a - P_b)}{4} \\ + \left(\frac{\pi W}{8} \right) \frac{\rho V_t^2}{(1 - (x/D)^2)^2} \\ - K \end{array} \right] x + mg = m\ddot{x} \quad (i)$$

Bagian dari persamaan (i) yang mengalami linierisasi, yaitu :

$$\left[\frac{x}{[1 - (x/D)^2]^2} \right] = \left[\frac{x/D}{1/D [1 - (x/D)^2]^2} \right]$$

Apabila rasio jepitan dinyatakan dengan $\frac{x}{D} = \beta$, maka

$$\left[\frac{x}{[1 - (x/D)^2]^2} \right] = \frac{\beta}{1/D [1 - \beta^2]^2} = \frac{D\beta}{[1 - \beta^2]^2}$$

Misalkan

$$f(\beta) = \frac{D\beta}{[1 - \beta^2]^2} \quad (a)$$

Dari deret Taylor :

$$f(\beta) = f(\beta_e) + \frac{(\beta - \beta_e)}{1!} f'(\beta_e) + \frac{(\beta - \beta_e)^2}{2!} f''(\beta_e) + \dots$$

Untuk linearisasi dapat dituliskan :

$$f(\beta) = f(\beta_e) + (\beta - \beta_e) f'(\beta_e) + O(2) \quad (b)$$

dengan $\frac{x_e}{D} = \beta e$ masuk ke persamaan (a)

$$f(\beta e) = \frac{D\beta e}{[1 - \beta e^2]^2} \quad (c.1)$$

Dari persamaan (a) diturunkan untuk mendapatkan $f'(\beta)$, yaitu :

$$\begin{aligned} f'(\beta) &= D \left[\frac{(1 - \beta^2)^{-2}}{+ \beta(-2)(1 - \beta^2)^{-3}(-2)\beta} \right] \\ &= D \left[\frac{1}{(1 - \beta^2)^2} + \frac{4\beta^2}{(1 - \beta^2)^3} \right] \end{aligned}$$

Atau

$$f'(\beta) = D \left[\frac{1 - \beta^2 + 4\beta^2}{(1 - \beta^2)^3} \right] = D \left[\frac{1 + 3\beta^2}{(1 - \beta^2)^3} \right]$$

Sehingga diperoleh :

$$f'(\beta e) = D \left[\frac{1 + 3\beta e^2}{(1 - \beta e^2)^3} \right] \quad (c.2)$$

Substitusikan persamaan (c.1) dan (c.2) ke dalam persamaan (b), dan diperoleh :

$$\begin{aligned} f(\beta) &= D \left[\frac{\beta e}{(1 - \beta e^2)^2} + \left(\frac{1 + 3\beta e^2}{(1 - \beta e^2)^3} \right) (\beta - \beta e) \right] \\ &= D \left[\frac{\beta e}{(1 - \beta e^2)^2} + \left(\frac{1 + 3\beta e^2}{(1 - \beta e^2)^3} \right) \beta \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{1 + 3\beta e^2}{(1 - \beta e^2)^3} \right) \beta e \right] \quad \text{Atau} \\ &= D \left[\left(\frac{1 + 3\beta e^2}{(1 - \beta e^2)^3} \right) \beta \right. \\ &\quad \left. + \frac{(1 + 3\beta e^2)\beta e + (1 - \beta e^2)\beta e}{(1 - \beta e^2)^3} \right] \\ f(\beta) &= \frac{D}{(1 - \beta e^2)^3} \left[\frac{(1 + 3\beta e^2)\beta}{-4\beta e^3} \right] \quad (d) \end{aligned}$$

Jadi dari persamaan (a) dan (d) diperoleh :

$$\frac{D\beta}{(1 - \beta^2)^2} = \frac{D}{(1 - \beta e^2)^3} \left[\frac{(1 + 3\beta e^2)\beta}{-4\beta e^3} \right]$$

Masukkan kembali $\frac{x}{D} = \beta$

$$\begin{aligned} \frac{x}{\left(1 - \left(\frac{x}{D}\right)^2\right)^2} &= \frac{(1 + 3\beta e^2)}{(1 - \beta e^2)^3} x \\ &\quad - \frac{4\beta e^3}{(1 - \beta e^2)^3} \end{aligned} \quad (e)$$

Persamaan (i) dapat dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned} \left[\frac{\pi W(P_a - P_b)}{4} + -K \right] x \\ + \left(\frac{\pi W}{8} \right) \rho V_t^2 \frac{x}{\left(1 - \left(\frac{x}{D}\right)^2\right)^2} + mg = m\ddot{x} \quad (ii) \end{aligned}$$

Substitusi persamaan (e) ke dalam persamaan (ii), dan diperoleh :

$$\begin{aligned} \left[\frac{\pi W(P_a - P_b)}{4} + -K \right] x \\ + \left(\frac{\pi W}{8} \right) \rho V_t^2 \left[\frac{(1 + 3\beta e^2)}{(1 - \beta e^2)^3} x - \frac{4\beta e^3}{(1 - \beta e^2)^3} \right] \\ + mg = m\ddot{x} \end{aligned}$$

Atau

$$\begin{aligned} \left[\left(\frac{\pi W}{8} \right) \rho V_t^2 \frac{(1 + 3\beta e^2)}{(1 - \beta e^2)^3} \right] x \\ - \left[K + \frac{\pi W(P_b - P_a)}{4} \right] x \\ + \left(\frac{\pi W}{8} \right) \rho V_t^2 \left(-\frac{4\beta e^3}{(1 - \beta e^2)^3} \right) + mg = m\ddot{x} \end{aligned}$$

Atau

$$\begin{aligned} \left[\left(\frac{\pi W}{8} \right) \rho V_t^2 \frac{(1 + 3\beta e^2)}{(1 - \beta e^2)^3} \right] x \\ - \left[K + \frac{\pi W(P_b - P_a)}{4} \right] x \\ - \left(\frac{\pi W}{2} \right) \rho V_t^2 \left(\frac{\beta e^3}{(1 - \beta e^2)^3} \right) + mg = m\ddot{x} \end{aligned} \quad (iii)$$

Misalkan $C = -\left(\frac{\pi W}{2} \right) \rho V_t^2 \left(\frac{\beta e^3}{(1 - \beta e^2)^3} \right) + mg$,

maka persamaan (iii) dapat ditulis dengan

$$\begin{aligned} \left[\left(\frac{\pi W}{8} \right) \rho V_t^2 \frac{(1 + 3\beta e^2)}{(1 - \beta e^2)^3} \right] x + C = m\ddot{x} \quad (iv) \\ - \left[K + \frac{\pi W(P_b - P_a)}{4} \right] x \end{aligned}$$

Ketika kondisi dalam keadaan setimbang ($x = x_e$), maka nilai $\ddot{x} = 0$, sehingga dari persamaan (iv) dapat diperoleh nilai

$$C = - \left[\begin{array}{c} \left(\frac{\pi W}{8} \right) \rho V_t^2 \frac{(1 + 3\beta e^2)}{(1 - \beta e^2)^3} \\ - \left(K + \frac{\pi W(P_b - P_a)}{4} \right) \end{array} \right] x_e \quad (v)$$

Dengan substitusi persamaan (v) ke persamaan (iv) diperoleh :

$$\left[\begin{array}{c} \left(\frac{\pi W}{8} \right) \rho V_t^2 \frac{(1 + 3\beta e^2)}{(1 - \beta e^2)^3} \\ - \left(K + \frac{\pi W(P_b - P_a)}{4} \right) \end{array} \right] (x - x_e) = m \ddot{x} \quad (vi)$$

Misalkan $x_l = x - x_e$, maka $\dot{x} = \dot{x}_l$ dan $\ddot{x} = \ddot{x}_l$, sehingga persamaan (vi) menjadi

$$\left[\begin{array}{c} \left(\frac{\pi W}{8} \right) \rho V_t^2 \frac{(1 + 3\beta e^2)}{(1 - \beta e^2)^3} \\ - \left(K + \frac{\pi W(P_b - P_a)}{4} \right) \end{array} \right] x_l = m \ddot{x}_l \quad (vii)$$

memperoleh karakteristik getaran dengan pendekatan model matematis.

Pengertian kekakuan sistem (K_{sistem}) adalah nilai kekakuan secara keseluruhan yang bekerja pada sistem dimana besarnya dipengaruhi oleh nilai rasio jepitan (β_e), perubahan tekanan (P) dan kecepatan (V) dalam aliran serta elastisitas dari selang (K).

Dengan menggunakan persamaan 16 dapat diperoleh nilai frekwensi natural sistem (f_n) yang nilainya ditentukan oleh hubungan antara kekakuan sistem (K_{sistem}) dan massa (m) yang bekerja pada sistem. Massa (m) adalah besarnya pembebanan yang diberikan pada selang untuk memperoleh rasio jepitan yang menghasilkan terjadinya *self excited vibrations*.

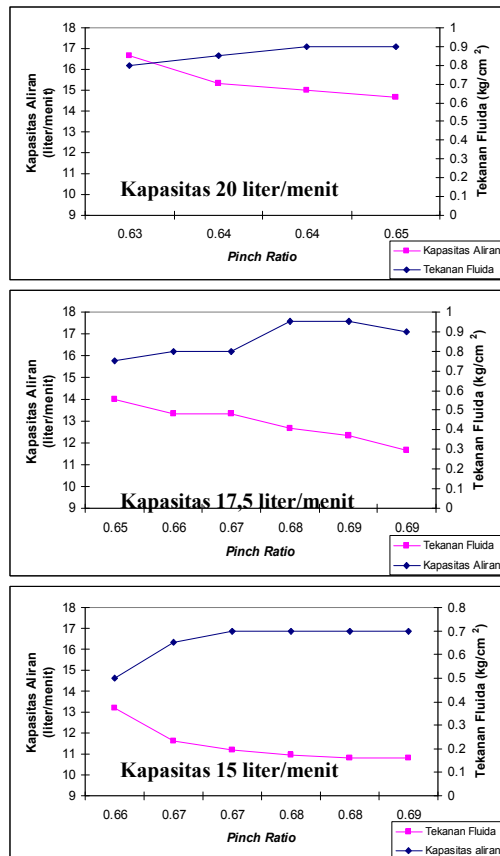
Dengan adanya perubahan bentuk penampang selang yang terjepit akibat pembebanan yang diberikan akan menghasilkan perubahan perilaku aliran fluida pada saat melewati daerah jepitan tersebut. Peningkatan *pinch ratio* (β_e) akan mengakibatkan jumlah fluida yang mengalir pada daerah jepitan akan berkurang tetapi disisi lain tekanan fluida akan meningkat pada daerah sebelum jepitan. Pada gambar 3 menunjukkan pengaruh peningkatan *pinch ratio* terhadap penurunan kapasitas aliran dan peningkatan tekanan pada sisi masuk daerah jepitan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengaplikasikan kedalam persamaan 13 yang merupakan persamaan differensial getaran, maka diperlukan data hasil pengujian (tabel 1) untuk

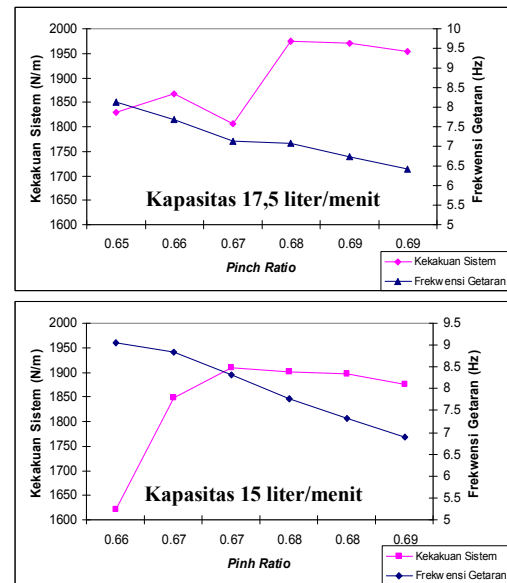
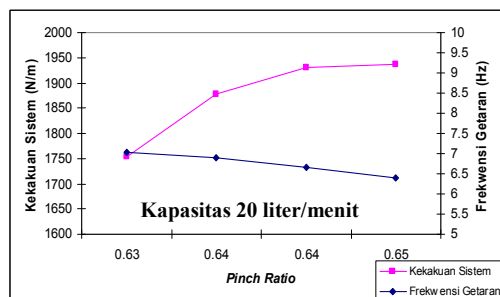
Tabel 1. Data Hasil Pengujian

A											
7.08E-05											
m	(P _r ,P _a) kg/cm ²	H/m ²	V,lt/menit	m/dtk	K	W	ρ	β _e	K sistem	ω = √(K/m)	f = ω/2π
0.90	0.80	80000	16.67	3.92	1724	0.012	1000	0.63	1753.57	44.14	7.03
1.00	0.85	85000	15.33	3.61	1724	0.012	1000	0.64	1878.68	43.34	6.90
1.10	0.90	90000	15.00	3.53	1724	0.012	1000	0.64	1931.11	41.90	6.67
1.20	0.90	90000	14.67	3.45	1724	0.012	1000	0.65	1936.73	40.17	6.40
A											
7.08E-05											
m	(P _r ,P _a) kg/cm ²	H/m ²	V,lt/menit	m/dtk	K	W	ρ	β _e	K sistem	ω = √(K/m)	f = ω/2π
0.70	0.75	75000	14.00	3.29	1724	0.012	1000	0.65	1819.07	50.98	8.12
0.80	0.80	80000	13.33	3.14	1724	0.012	1000	0.66	1868.20	48.32	7.69
0.90	0.80	80000	13.33	3.14	1724	0.012	1000	0.67	1805.87	44.79	7.13
1.00	0.95	95000	12.67	2.98	1724	0.012	1000	0.68	1975.10	44.44	7.08
1.10	0.95	95000	12.33	2.90	1724	0.012	1000	0.69	1969.91	42.32	6.74
1.20	0.90	90000	11.67	2.74	1724	0.012	1000	0.69	1953.48	40.35	6.42
A											
7.08E-05											
m	(P _r ,P _a) kg/cm ²	H/m ²	V,lt/menit	m/dtk	K	W	ρ	β _e	K sistem	ω = √(K/m)	f = ω/2π
0.50	0.50	50000	13.20	3.11	1724	0.012	1000	0.66	1620.02	56.92	9.06
0.60	0.65	65000	11.60	2.73	1724	0.012	1000	0.67	1847.39	55.49	8.84
0.70	0.70	70000	11.20	2.63	1724	0.012	1000	0.67	1909.31	52.23	8.32
0.80	0.70	70000	10.96	2.58	1724	0.012	1000	0.68	1901.30	48.75	7.76
0.90	0.70	70000	10.80	2.54	1724	0.012	1000	0.68	1895.80	45.90	7.31
1.00	0.70	70000	10.80	2.54	1724	0.012	1000	0.69	1875.23	43.30	6.90



Gambar 3. Perubahan Perilaku Aliran Pada Kapasitas Aliran 20 ltr/mnt, 17,5 ltr/mnt, dan 15 ltr/mnt

Perubahan *pinch ratio* (β_e) juga memberikan pengaruh pada nilai kekakuan sistem (K_{sistem}) yang merupakan gabungan antara elastisitas selang dan perilaku aliran fluida dalam selang. Peningkatan *pinch ratio* akan cenderung menambah kekakuan sistem secara keseluruhan. Karakteristik getaran yang dihasilkan oleh pendekatan model matematis menunjukkan bahwa frekwensi getaran cenderung mengalami penurunan dengan bertambahnya *pinch ratio* (gambar 4).



Gambar 4. Kekakuan Sistem dan Frekwensi Getaran Pada Kapasitas Aliran 20 ltr/mnt, 17,5 ltr/mnt, dan 15 ltr/mnt

Mekanisme terjadinya *self excited vibrations* ditentukan dengan menggunakan persamaan 11 diatas. Pada saat gaya pembebanan diberikan pada selang maka gaya tidak stabil yang terjadi pada aliran masih dapat dilawan oleh gaya tekanan hidrostatik dan gaya elastis selang. Tetapi ketika gaya tidak stabil tersebut bertambah dengan meningkatnya *pinch ratio*, maka gaya tekanan hidrostatik dan gaya elastis selang tidak akan mampu menahan. Sehingga kondisi ini akan menyebabkan munculnya *self excited vibrations*. Perilaku aliran pada saat kondisi *self excited vibrations* itu terjadi, pada awalnya selang akan mengalami pengkerutan secara cepat. Tekanan hidrostatik fluida di daerah jepitan akan turun dengan cepat sehingga kedua dinding selang akan saling menempel. Dilain pihak tekanan pada sisi masuk daerah jepitan akan meningkat, kemudian dapat melawan gaya pembebanan dan menyebabkan gerakan osilasi naik. Mekanisme osilasi dinding selang secara berulang akan terjadi secara terus menerus dengan frekwensi dan amplitudo tertentu.

Dari hasil pengamatan pada saat pengambilan data menunjukkan bahwa semakin besar *pinch ratio* yang diberikan maka frekwensi getaran yang terjadi semakin meningkat dengan simpangan osilasi semakin menurun. Tetapi berdasarkan persamaan model matematis menunjukkan bahwa frekwensi getaran semakin menurun dengan bertambahnya *pinch ratio* yang diberikan. Hal ini dapat dijelaskan bahwa pada persamaan model matematis tidak dapat menunjukkan

perubahan amplitudo osilasi yang terjadi. Sedangkan peningkatan *pinch ratio* dapat dicapai dengan menambah beban yang diberikan, sehingga frekwensi sistem akan menurun dengan bertambahnya massa (m) yang bekerja sistem.

Argumentasi terjadinya peningkatan frekwensi dengan bertambahnya *pinch ratio* pada hasil pengamatan dapat ditunjukkan dengan terjadinya kenaikan kekakuan sistem (K_{sistem}). Dan osilasi dinding selang dibatasi oleh besarnya *pinch ratio* yang diberikan. Semakin besar *pinch ratio* maka osilasi dinding selang akan berkurang/terbatas. Seperti yang diungkap oleh Pejack (2006) bahwa mekanisme *self excited vibrations* merupakan bentuk pertukaran energi antara energi tekanan dan energi kecepatan yang dimiliki oleh fluida. Energi yang dimiliki oleh fluida adalah tetap sebagai energi yang dihasilkan oleh pompa. Sehingga dengan demikian apabila osilasi dinding berkurang sebagai bentuk energi tekanan maka energi tersebut akan berubah menjadi peningkatan energi kecepatan dalam bentuk frekwensi getaran yang muncul dalam fenomena *self excited vibrations*.

KESIMPULAN

Pendekatan model matematis menghasilkan sebuah bentuk persamaan diferensial non-linier. Persamaan tersebut membutuhkan proses linierisasi agar dapat menggambarkan gerakan linier osilasi dinding selang pada saat terjadinya *self excited vibration*.

Mekanisme *self excited vibrations* merupakan bentuk pertukaran energi antara energi tekanan dan energi kecepatan yang dimiliki oleh fluida. Dengan mekanisme tersebut maka akan dapat ditentukan karakteristik getaran yang ditunjukkan dengan frekwensi dan amplitudo osilasi dinding selang.

DAFTAR PUSTAKA

- 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 edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ
- Sufiyanto, 2010, **Pengaruh Pich Ratio Terhadap Karakteristik Getaran Pada Aliran Fluida Yang Mengalami**

Self Excited Vibrations, Jurnal Transmisi Vol-VI Edisi-2/ Hal. 589 – 598, ISSN : 0216-3233, Teknik Mesin, Universitas Merdeka Malang.

Sufiyanto, 2010, **Karakteristik Self Excited Vibration Pada Aliran Fluida Dalam Pipa Fleksibel**, Jurnal Transmisi Vol-VI Edisi-1/ Hal. 557 – 566, ISSN : 0216-3233, Teknik Mesin, Universitas MerdekaMalang.