

STABILITAS INTERNAL BEDA FLUKS ENERGI RESPON FREKUENSI ALIRAN HIDROLIK DALAM PIPA HORIZONTAL DENGAN VARIASI FRAKTAL JUMLAH ALUR MEMANJANG

Abdul Hadi^{*)}

Abstract

It's good accurately a frequency domain method or was known too as a Lumped Parameter System (LPS) method could be applied when the signals response quantity fluctuation (pressure and mass flow rate) as practically (measurement acquisition evidence) have small gain. Referring to that this research would be given to investigate the mean fluctuation energy flux net different and the power gain stability of hydraulic flow steady state-low Reynold number turbulent in a horizontal pipeline. In this matter, the fluid lines plant could be regarded as an open loop system for which as a fixed parameter of this research, a longitudinal grooves number variation are setting around of the pipelines profile tangential inner in a fractal geometry imaging. Inverse with laminar flow, there are a primary empirical considering where the turbulent fluid flows hold the LPS modeling because the fluid friction coefficient have small relative change in the relation with the contribution of the small mass flow rate fluctuation.

Keyword: *internal frequency response energy flux different stability, hydraulic flow, steady state-low turbulent, small gain pressure fluctuation, horizontal pipeline with longitudinal grooves number fractal variation*

I. PENDAHULUAN

Hasil penelitian eksperimen Setyarini et al [1] menunjukkan bahwa aliran fluida hidrolis dalam pipa horizontal pada kondisi *steady state* dapat dikontrol sedemikian hingga tetap berada dalam zone turbulen *Reynold* rendah dan memiliki sifat *small gain pressure fluctuation* pada posisi-posisi pengukuran *upstream* dan *downstream*-nya untuk setiap perubahan yang kecil dari diameter hidrolis pipa akibat variasi jumlah alur memanjangnya. Dengan menerapkan metode pemodelan analitik LPS Matko et al [2] dapat diketahui bahwa respon waktu tekanan fluida *in flow* dan *out flow* sebagaimana ditunjukkan oleh Hadi et al [3] adalah memiliki *low frequency class model* dan bersifat *transient* namun dalam *step* dan *total time masing-masing* 0.5 detik dan sekitar 15 menit untuk setiap *batch recording data* hasil pengukuran Setyarini et al [1] ditunjukkan bahwa fluktuasi sinyal tersebut tidaklah bersifat *transient* meskipun dalam kondisi *small gain fluctuation*. Ini memberikan suatu indikasi bahwa ada pengaruh *source (trajectory flow chaos)* yang mana fluktuasi sinyal internalnya bersifat sebagai *sink* atau *strange attractor*.

Dalam respon waktu, suatu stabilitas lokal linear beda fluks energi aliran fluida pada sistem *fluid lines* Setyarini et al [1] antara posisi-posisi *upstream* dan *downstream*-nya secara internal dengan menerapkan metode LPS Matko et al [2] telah ditunjukkan oleh Hadi et al [3]. Pada penelitian ini akan ditunjukkan bagaimana sifat stabilitas internal beda fluks energi aliran fluida tersebut dalam

respon frekuensi dengan menerapkan konsep Brennen [4] tentang stabilitas beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata aliran fluida dan konsep *Niquist polar* tentang stabilitas *power gain*-nya. Bersama dengan penelitian Setyarini et al [1] dan Hadi et al [3], penelitian ini diupayakan sebagai suatu langkah awal untuk melihat bagaimana karakter stabilitas fluktuasi beda fluks energi aliran fluida baik dalam respon waktu maupun respon frekuensi. Implementasinya adalah sedemikian hingga dapat dikembangkan sebagai suatu referensi ke penelitian lanjutan guna mempelajari fenomena stabilitas beda fluks energi aliran fluida turbulen dalam suatu pipa horizontal dengan variasi fraktal geometri alur memanjang untuk mana pengaruh *source*-nya diperhitungkan dalam suatu estimasi yang lebih kompleks misalnya dengan menerapkan metode-metode *Fast Fourier Transform* (FFT) dan *Hermite Moment Transformation* (HMT), *Kalman Filtering* atau *Ordinary Least Square* (OLS) dan *Wavelet Transform, neural network*, dan sebagainya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Persamaan Yang Dikembangkan

Dapatlah diketahui bahwa jika aliran fluida di dalam suatu *horizontal pipeline* dikalkulasi dengan asumsi *viscos adiabatic, homogeny* dan *small gain fluctuation* maka modifikasi persamaan *property* aliran fluida *Navier-Stoke* dengan koordinat spasial x dan waktu t untuk kondisi *small gain fluctuation* untuk *quantity variables* tekanan $p(x, t)$ dan

^{*)} Abdul Hadi; Dosen Program studi Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknik Unpatti

mass flow rate $q(x,t)$ secara akurat akan menghasilkan dua persamaan dasar *Distributed Parameter System (DPS) model* yang mana adalah analog dengan *Maxwell equation* tanpa *electrical conductance* (Bastin et al [5]). Sebagaimana dikemukakan oleh Matko et al [2] persamaan tersebut memiliki bentuk yaitu:

Dari persamaan momentum linear (gerak);

$$L \frac{\partial q}{\partial t} + Rq = -\frac{\partial p}{\partial x} \tag{1}$$

Dari persamaan kontinuitas;

$$C \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} \tag{2}$$

Dari persamaan (1) dan (2) dapat diperoleh Sistem fluida fluida laju aliran massa;

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} = CL \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + CR \frac{\partial q}{\partial t} \tag{3}$$

sistem fluida aliran tekanan;

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = CL \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + CR \frac{\partial p}{\partial t} \tag{4}$$

Dimana L , C dan R masing-masing menyatakan induktansi, kapasitansi dan resistansi fluida per satuan panjang pipa.

II.2. Persamaan Respon Frekuensi

Jika persamaan diferensial parsial (1), (2), (3) dan (4) diselesaikan dengan transformasi *Laplace* secara simultan pada bagian *upstream* dan *downstream* dari *pipeline* maka dalam bentuk *impedance causal* dengan suatu *Laplace operator* (s) maka diperoleh

$$\begin{Bmatrix} P_0 \\ P_{l_p} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_0 \\ Q_{l_p} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

Sedemikian hingga

$$\begin{Bmatrix} P_0 \\ P_{l_p} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_c \coth(\lambda l_p) & -Z_c \sinh^{-1}(\lambda l_p) \\ Z_c \sinh^{-1}(\lambda l_p) & -Z_c \coth(\lambda l_p) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_0 \\ Q_{l_p} \end{Bmatrix} \tag{6}$$

$$\lambda = \sqrt{(Ls + R)Cs}; \quad Z_c = \frac{Ls + R}{r} = \sqrt{\frac{Ls + R}{Cs}}$$

Dimana l_p , P_{l_p} , P_0 , dan Q_{l_p} , Q_0 masing-masing menyatakan panjang *pipeline unit testing*, respon frekuensi tekanan dan laju massa aliran fluida pada posisi *downstream* dan *upstream*. Sedangkan λ dan Z_c masing-masing disebut sebagai *propagation operator* dan *characteristic impedance*

II.3. Impedansi Kelas Model Frekuensi Rendah

Oleh Matko et al [2], persamaan (5) diaproksimasi dengan menerapkan *Taylor series*. Dua alternatif bentuk persamaan diperoleh, yaitu kelas model frekuensi rendah dan kelas model frekuensi tinggi. Di sini kelas model frekuensi rendah diterapkan karena untuk semua perlakuan sistem harga koefisien redamannya :

$$\zeta_h = \sqrt{2} \sqrt{\frac{C R l_p}{L}} \ll \sqrt{2} \tag{7}$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{22} = -Z_{11} &= -\frac{b_2 s^2 + b_1 s + 1}{(a_2 s^2 + a_1 s + a_0) s}; \\ Z_{21} = -Z_{12} &= \frac{1}{(a_2 s^2 + a_1 s + a_0) s}; \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

Dimana

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= l_p C; \quad a_1 = \frac{1}{6} l_p^3 R C^2; \\ a_2 &= \frac{1}{6} C^2 l_p^3 L + \frac{1}{120} C^3 l_p^5 R^2; \\ b_1 &= \frac{1}{2} l_p^2 R C \\ b_2 &= \frac{1}{2} l_p^2 L C + \frac{1}{24} l_p^4 R^2 C^2; \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

II.4. Elemen-elemen Fluida Pasif

Sebagaimana dapat dilihat pada Hadi et al [3], ketiga parameter R , L dan C untuk suatu hubungan analogi antara *electronic/electrical transmission lines* faand *flow mechanic* disebut sebagai elemen-elemen fluida pasif oleh Craisig [6] yang mana oleh Matko et al [1] dinyatakan sebagai

$$L = \frac{1}{A}; \quad R = \frac{f_r(\bar{q}, D, \mu)}{D A^2 \bar{\rho}} \bar{q}; \quad C = \frac{A}{g^2} \tag{10}$$

Dasar pengembangan ketiga parameter atau elemen fluida pasif tersebut terhadap persamaan aliran fluida yang dikembangkan menurut Nasser [7] dapat dilihat pada *text* dan referensi yang diberikan oleh Munson et al [8], dan juga pada Dorny [9], Lindsay and Katz [10] dan

Doebelin [11] Dalam hal ini R, L dan C dibayangkan secara analog sebagai besaran komponen-komponen *electronic* yang berharga positif dan konstan yang mana satu sama lainnya diberikan secara bebas.

Harga cepat rambat bunyi fluida pada pipa a dapat dikalkulasi dengan menggunakan persamaan *Joukowsky water hammer* seperti dikemukakan oleh Brennen [4] dan juga oleh Tijsseling and Anderson [12] yaitu

$$a = \left[\frac{1}{a_{\infty}^2} + \frac{\bar{\rho} D}{E_p \delta_p} \right]^{-\frac{1}{2}}; a_{\infty} = \left[\frac{K_f}{\bar{\rho}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Dimana $\bar{\rho}, K_f, E_p D, \delta_p$ dan a_{∞} , masing-masing menyatakan densitas rata-rata fluida,

Harga koefisien gesek f_r untuk *smooth pipe* dalam zona aliran turbulen $Re \leq 10^5$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Blasius (Schlichting [13]) yaitu

$$f_r(\bar{q}, D, \mu) = \frac{0,3164}{[Re(\bar{q}, D, \mu)]^{0,25}} \quad (12)$$

Dimana μ adalah viskositas *absolute/dynamic* fluida dan dengan angka Reynold

$$Re(\bar{q}, D, \mu) = \frac{4\bar{q}}{\pi \mu D} \quad (13)$$

Persamaan (10) hingga (13) untuk pipa dengan jumlah alur memanjang dihitung dengan menggunakan diameter hidrolik pipa $D = D_H$, untuk luas total penampang melintang pipa yaitu:

$$D_H = \frac{4A}{Wetted Perimeter Length} \quad (14)$$

II.4. Stabilitas Respon Frekuensi

II.4.1. Beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata *unconditionally* aliran fluida

Terdapat suatu kriteria untuk menentukan stabilitas respon frekuensi yaitu dalam konteks beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata aliran fluida sebagaimana dikemukakan oleh Brennen [4]. Konsep ini dikembangkan dalam hubungannya dengan *performance* dari *input-output* sistem dinamik itu sendiri untuk mana suatu fluks energi fluktuasi rata-rata aliran fluida pada suatu titik terminal dari *pipeline* diperoleh sebagai:

$$E_{\omega} = E(\omega) = \frac{1}{4\bar{\rho}} \{Q(s)\bar{P}(s) + \bar{Q}(s)P(s)\} \quad (15)$$

dimana tanda *over bar* pada Q dan P menyatakan *complex conjugate* dari masing-masing kuantitas respon frekuensi tersebut.

Secara sesuai dengan menerapkan persamaan-persamaan trijektori beda fluks energi respon waktu dari Hadi et al [3] untuk posisi antara $l = 0$ dan $l = l_p$ dari panjang pipa diperoleh

$$\Delta E_{\omega, l_p} = \Delta E_{l_p}(\omega) = E_0(\omega) - E_{l_p}(\omega) = \frac{1}{4\bar{\rho}} [Q_0(s)\bar{P}_0(s) + \bar{Q}_0(s)P_0(s) - Q_x(s)\bar{P}_{l_p}(s) - \bar{Q}_{l_p}(s)P_{l_p}(s)] \quad (16)$$

Untuk aliran *steady* $Q_0(s) = Q_{l_p}(s) = \frac{\bar{q}}{s}$ maka persamaan (16) menjadi

$$\Delta E_{\omega, l_p} = -\frac{1}{4\bar{\rho} s} \{P_0(s) - P_{l_p}(s)\} - [\bar{P}_0(s) - \bar{P}_{l_p}(s)] \quad (17)$$

Dimana dari persamaan (17) diperoleh

$$P_0(s) = -P_{l_p}(s) = Z_0(s) \frac{\bar{q}}{s} = -Z_{l_p}(s) \quad (18)$$

Dan

$$P_0(s) = \left[\frac{b_2 s + b_1}{(a_2 s^2 + a_1 s + a_0) s} \right] \frac{\bar{q}}{s}$$

Dari persamaan (17) dan (18) diperoleh

$$\Delta E_{\omega, l_p} = -\frac{1}{\bar{\rho} s} \text{Im}(P_0(s))j \quad (19)$$

Dengan memasukkan $s = \omega j$ ke dalam persamaan (18) dan (19) diperoleh

$$\Delta E_{\omega, l_p} = -\frac{\bar{q}^2}{\bar{\rho}} \frac{[b_2(a_2 \omega^2 - a_0) + a_1 b_1]}{a_1^2 \omega^4 + (a_2 \omega^2 - a_0)^2 \omega^2} \quad (20)$$

Persamaan (20) tidak bergantung pada kondisi medan vektor respon waktu karena itu $\Delta E_{\omega, l_p}$ -nya dapat dikatakan sebagai beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata *unconditionally* aliran fluida.

Menurut Brennen [4] stabilitas ΔE_{ω} didefinisikan dalam kriteria berikut:

- Respon sistem dikatakan *stable* jika $\Delta E_{\omega} = \Delta E(\omega) > 0$.
- Respon sistem dikatakan *unstable* jika $\Delta E_{\omega} = \Delta E(\omega) < 0$.
- Respon sistem dikatakan *conservative* jika $\Delta E_{\omega} = \Delta E(\omega) = 0$

Dari persamaan (17), (18) dan (19) diperoleh

$$\Delta E_{\omega,lp} = \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\bar{q}}{\omega^2} R_e(Z_0(s)) \quad (21)$$

Persamaan (21) mengandung arti bahwa $\Delta E_{\omega,lp}$ bergantung pada tanda harga bagian *real* dari *impedance* $Z_0(s)$: nol, positif atau negatif. Jika $R_e(Z_0(s))$ positif yang berarti sistem adalah *stable* maka *reflectant coefficient*-nya dapat dibaca pada *Smith chart*. Untuk harga *impedance* yang negatif dapat diterapkan prinsip *Agilent Technology* [14] dimana mereka membuat *plot* nilai *normalized impedance* tersebut di luar *Smith chart*.

Untuk melihat karakter spesifik stabilitas $\Delta E_{\omega,lp}$ bayangkan bahwa respon waktu laju aliran massa fluida pada posisi *upstream* dan *downstream* pipa ada dalam kondisi *quasi steady* sedemikian hingga respon frekuensinya tetap memiliki bentuk *non causal*, yaitu

$$\begin{Bmatrix} P_{lp} \\ Q_{lp} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{Bmatrix} \quad (22)$$

dimana dari persamaan (5), (6) dan (22)

$$\begin{cases} T_{12} = \frac{z_{11}^2 - z_{12}^2}{z_{12}}; \\ T_{21} = \frac{1}{z_{12}}; \\ T_{11} = T_{22} = -\frac{z_{11}}{z_{12}} \end{cases} \quad (23)$$

Brennen [4] mengintroduksi suatu kuantitas respon frekuensi *non causal* yang disebutnya sebagai ‘*dynamic activity*’ H yaitu;

$$H = |1 - \Gamma_3|^2 - \Gamma_1 \Gamma_2 \quad (24)$$

untuk suatu Γ_1 , Γ_2 dan Γ_3 diperoleh sebagai

$$\begin{cases} \Gamma_1 = T_{11} \overline{T_{21}} + T_{21} \overline{T_{11}}; \\ \Gamma_2 = T_{12} \overline{T_{22}} + T_{22} \overline{T_{12}}; \\ \Gamma_3 = T_{12} \overline{T_{21}} + T_{22} \overline{T_{11}}; \end{cases} \quad (25)$$

dimana tanda *over bar* pada Q dan P menyatakan *complex conjugate* dari masing-masing kuantitas respon frekuensi tersebut.

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= T_{22} = 1 - b_2 \omega^2 + b_1 \omega j; \\ T_{21} &= a_1 \omega^2 + (a_2 \omega^2 - a_0) \omega j; \\ T_{12} [(a_0 - a_2 \omega^2)^2 + a_1^2 \omega^2] &= \\ &= 2b_1(a_0 - a_2 \omega^2)(b_2 \omega^2 + 1) + \\ &= -a_1 \omega^2(b_2^2 \omega^2 - b_1 - 2b_2) + [(a_0 - \\ &= a_2 \omega^2)(b_2^2 \omega^2 - b_1^2 - 2b_2) \\ &= -a_1 \omega(2b_1 b_2 \omega^2 + 2b_1)] \omega j \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Dengan demikian untuk setiap harga ω maka $\Delta E_{\omega,lp}$ dari persamaan (21) dapat diplot terhadap harga $H = H_\omega$ yang ditentukan dari persamaan (24), (25) dan (26). Dalam hal ini sifat stabilitas tersebut berdasarkan kriteria Brennen [4] memiliki alternatif sebagai berikut:

- Jika $H < 0$ dan $\Delta E_{\omega,lp} > 0 \Rightarrow$ sistem *completely passive stable*.
- Jika $H > 0$ dan $\Delta E_{\omega,lp} > 0 \Rightarrow$ sistem *potentially active stable*.
- Jika $H < 0$ dan $\Delta E_{\omega,lp} < 0 \Rightarrow$ sistem *completely active unstable*.
- Jika $H > 0$ dan $\Delta E_{\omega,lp} < 0 \Rightarrow$ sistem *potentially active unstable*.
- Jika $\Delta E_{\omega,lp} = 0$ untuk semu $H \Rightarrow$ sistem *conservative*.

II.4.2. Beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata *conditionally* aliran fluida

Dari persamaan medan vektor beda fluks energi sebagaimana dikemukakan oleh Hadi et al [3] dan persamaan (19) diperoleh

$$\Delta E_{\omega,lp} = \Delta E_{c,\omega,lp} = -\frac{1}{2} \frac{\bar{q}}{\bar{\rho}} \frac{p_{atm}}{\omega} \text{Im}\{U(s)\} \quad (27)$$

Dimana $\text{Im}\{U(s)\} =$ *Imaginary part* dari $U(s)$.

Dan :

$$U(s) = U(\omega j) = \frac{-u_0 \omega^2 + v_0 \omega j + \frac{\alpha_1}{T} u_0 \omega j + u^* \frac{\alpha_2}{T^2}}{\omega j [-\omega^2 + \frac{\alpha_1}{T} \omega j + \frac{\alpha_2}{T^2}]} \quad (28)$$

Dengan skala waktu karakteristik T (diberikan menurut diskripsi Strogatz [15]), α_1 dan α_2 , trajektori dan kecepatan trajektori beda fluks energi pada kondisi awal, dan *fixed point*-nya

masing-masing u_0 dan v_0 , u^* dan v^* dapat dilihat pada Hadi et al [3] yaitu;

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{2\beta}; \quad \beta = \frac{1}{2} \frac{a_1}{a_2} \\ \alpha_1 &= 1; \quad \alpha_2 = \frac{\beta^2 + \omega_d^2}{4\beta^2}; \\ u_0 &= (c_0 + c_1) \frac{2\bar{q}}{p_{atm}}; v_0 = -\frac{(\beta c_1 + \omega_d c_2) \bar{q}}{\beta p_{atm}}; \\ u^* &= 2c_0 \frac{\bar{q}}{p_{atm}}; v^* = 0; \\ \omega_d &= \sqrt{\frac{a_0}{a_2} - \beta^2} > 0; c_0 = \frac{b_1}{a_2(\beta^2 + \omega_d^2)}; \\ c_1 &= \frac{b_1 \omega_d - 2b_2}{a_2(\beta^2 + \omega_d^2)}; c_2 = \frac{b_2 \omega_d - b_1 \beta + b_2 \beta^2}{a_2(\beta^2 + \omega_d^2)}; \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

untuk suatu tekanan atmosfer p_{atm} dan input mass flow rate \bar{q} sebagai referensi.

Karena bergantung pada kondisi nilai awal maka $\Delta E_{c,\omega,l,p}$ dari persamaan (27) dalam (28) dapat dikatakan sebagai beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata *conditionally*.

II.4. 3. Power gain

Andaikan *power gain* dari respon frekuensi antara *upstream* dan *downstream* pipa adalah $G(s)$ yang mana menyatakan rasio antara *impedance output power* dan *impedance input power* maka dari persamaan (5) dan (8) dapat dilihat bahwa untuk aliran *steady* diperoleh fungsi transfer

$$G(s) = -\frac{Z_{12}}{Z_{11}} = -\frac{1}{b_2 s^2 + b_1 s + 1} \quad (30)$$

dengan *decibel*-nya yaitu:

$$G(db) = 10 \log\{(\text{mod}(G))\} = 10 \log|G| \quad (31)$$

Stabilitas untuk $G(s)$ berhubungan dengan *phase margin* dan *gain margin* pada *Niquist plot*. Sebagaimana dikemukakan Oleh Dunn ;[16] bahwa suatu *phase margin* adalah *phase* tambahan yang diperlukan untuk membawa sistem ke limit *stable*, yaitu suatu sudut antara titik -1 dan *vector of magnitude* dari fungsi transfer. Sedangkan *gain margin* adalah *gain* tambahan yang diperlukan untuk membawa sistem ke limit *stable*. *Gain* dan *phase margin* juga dapat dicari dari *Bode plot* yaitu dengan melokasikan titik dimana *gain* adalah nol *db* (*unity gain*) dan proyeksi terhadap *phase diagram*. *Phase margin* adalah *margin* antara

phase plot dan -180° . Dengan melokasikan titik dimana sudut *phase* mencapai $\pm 180^\circ$ maka *gain margin* adalah *margin* antara titik proyeksi kembali ini ke *gain plot* dan *zero db level*. Jika *gain* adalah meningkat sampai titik proyeksi ini adalah nol maka sistem menjadi *unstable*.

II.5. Bilangan Frekuensi

Stabilitas beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata aliran fluida dapat dievaluasi dalam bilangan frekuensi *dimensionless* (n) yang mana menyatakan rasio dari setiap *angular frequency* ω terhadap harga *natural angular frequency* sistem *fluid line* ω_n , yaitu;

$$n = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (32)$$

Dimana harga ω_n dapat dilihat pada Hadi et al [3] yaitu;

$$\omega_n = \frac{1}{T} \sqrt{|\alpha_2|} \quad (33)$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

Sistem fluida dalam penelitian ini dirujuk berdasarkan eksperimen Setyarini et al (2003) dengan skenario dan modus penelitian :sinyal sistem adalah sesuai dengan penelitian Hadi et al [3], yaitu:

- Aliran fluida yang dilihat adalah air pada kondisi adiabatik dalam suhu ruang dengan *density*, *dynamic viscosity* dan *bulk modulus*-nya masing-masing adalah $997 \frac{Kg}{m^3}$, $0,894 \cdot 10^{-3} \frac{N \cdot sec}{m^2}$ dan $2,068 \frac{GN}{m^2}$.

- Diameter pipa, panjang pipa dan tebal dinding pipa untuk setiap perlakuan sistem adalah sama yaitu 1 inch, 2 meter dan $(3 \div 2) mm$.

- Digunakan pipa PVC dengan modulus elastisitas 2.58500 GPa.

- Alur memanjang pipa berbentuk profil-V dengan besar sudut 45° yang mana adalah sama untuk semua perlakuan. Jumlah alur memanjang pipa tersebut dalam masing-masing perlakuan adalah 4,8,16 dan 32. Variasi ini diberikan sebagai *fixed parameter* (FP) yaitu masing-masing dari FP(0) untuk pipa tanpa alur dan FP(1) hingga FP (4) untuk pipa dengan alur memanjang.

- Variasi *input volume flow rate* yang diberikan adalah sebesar $(0,5-2,5) m^3/hr$ /11 perlakuan. Variasi ini diberikan sebagai *control parameter* (CP) yaitu masing-masing dari CP(1) hingga CP(11).

■ Sistem *fluid lines* ini dapat dilihat sebagai sistem fluida aliran tekanan untuk mana sinyal tekanan aliran fluida aktual (hasil pengukuran), Internal, dan *source*-nya masing-masing dibayangkan sebagai fungsi dari medan *mass flow rate* aktualnya.

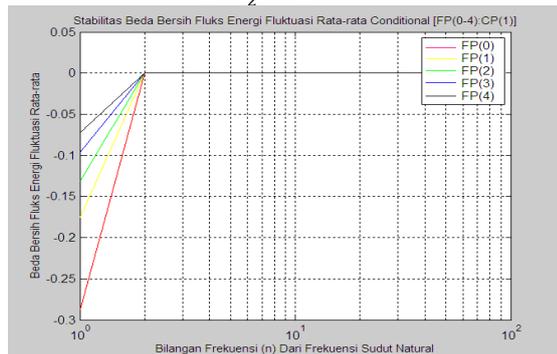
- Data hasil pengukuran tekanan aliran fluida $p_{obs}(t)$ dalam kondisi *steady state* adalah bersifat *small gain fluctuation* oleh karena untuk setiap perlakuan sistem pada posisi *upstream* atau *downstream* pipa memenuhi kriteria (Brennen [4]) yaitu: $|p_{obs}(t) - \bar{p}_{obs}(t)| \ll |\bar{p}_{obs}(t)|$. Untuk itu sistem aktual memenuhi pemodelan LPS dan secara konsekwen dapat dibayangkan bahwa sistem internal *fluid lines* pun demikian
- Sinyal sistem internal *fluid lines* ini memenuhi sifat linear pemodelan LPS oleh karena faktor *non linearly of friction term residual error* pada kondisi *quasi steady* adalah *relative* kecil. Dalam hal ini persamaan homogen (1) dan (2) diperoleh sebagai hasil *mapping* dari *mass flow rate* $q - \frac{\bar{q}}{2} \rightarrow q$. Di sini semua kalkulasi dan

visualisasi grafisnya diberikan tanpa *input mass flow rate mapping* sehingga beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata internalnya perlu dikalikan lagi dengan faktor skala $\frac{1}{4}$.

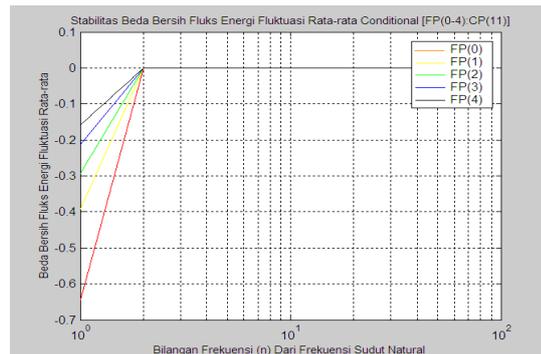
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1. Stabilitas Beda Bersih Fluks Energi Fluktuasi Rata-rata Internal *Conditionally*

Beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata *conditionally* aliran fluida untuk semua perlakuan adalah bersifat *conservative* kecuali pada daerah di bawah frekuensi sudut dengan bilangan frekuensi yang *relative* rendah yaitu $n = 2$ sifatnya adalah *unstable*. Misalnya sebagaimana ditunjukkan pada grafik berikut ini bahwa untuk CP(1) atau CP(11) sifat *unstable* terjadi di bawah daerah frekuensi sudut dengan bilangan frekuensi $n = 2$.



(a)FP(0-4):CP(1)



(b)FP(0-4):CP(11)

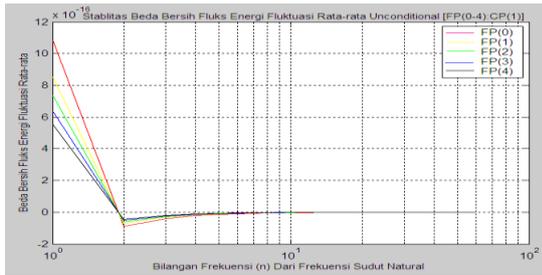
Gambar 1. Beda Bersih Fluks Energi Fluktuasi Rata-rata *Conditionally* Internal Aliran Fluida.

IV.2. Stabilitas Beda Bersih Fluks Energi Fluktuasi Rata-rata Internal *Unconditionally*

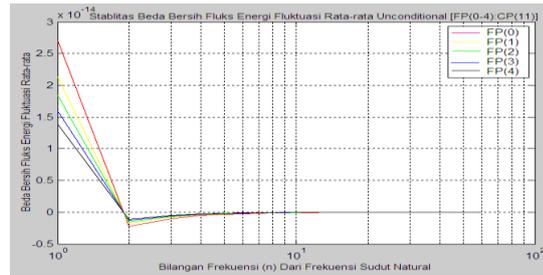
Kuantitas beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata aliran fluida secara *unconditional* untuk semua perlakuan sistem adalah bersifat *potentially active stable* pada frekuensi rendah di bawah bilangan frekuensi $n = 2$. Sedikit di bawah $n = 2$ dan diantara

$n = (2 \div 4)$ kuantitas ini bersifat *potentially active unstable*, sementara untuk $n \geq 4$ sifatnya adalah *conservative*.

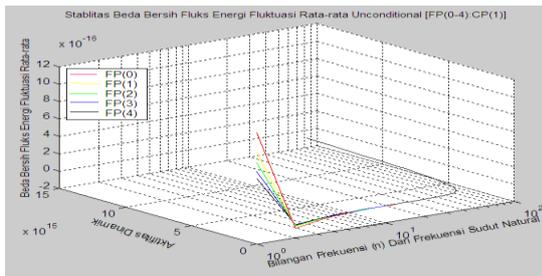
Berikut ini ditunjukkan beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata aliran fluida sebagai fungsi bilangan frekuensi (n) dari frekuensi sudut natural dan aktifitas dinamik (H) untuk setiap FP(0-4) pada variasi CP(1) atau CP(11).



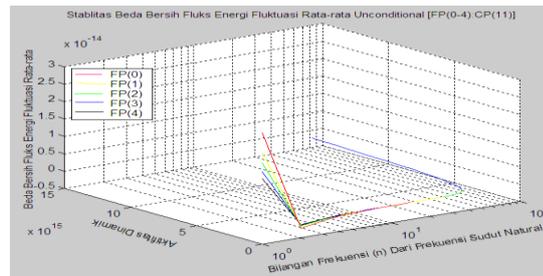
(a) $\Delta E(n)$ [FP(0-4):CP(1)]



(c) $\Delta E(n)$ [FP(0-4):CP(11)]



(b) $\Delta E(n, H)$ [FP(0-4):CP(1)]



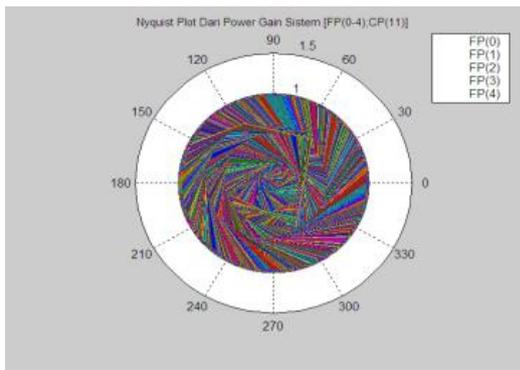
(d) $\Delta E(n, H)$ [FP(0-4):CP(11)]

Gambar 8. Beda Bersih Fluks Energi Fluktuasi Rata-rata *Unconditionally* Internal Aliran Fluida

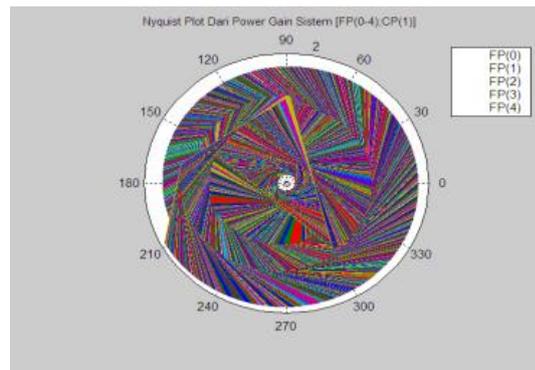
IV.3. Power Gain Internal

Berikut ini dapat dilihat hasil *Nyquist plot* atau *Bode plot* dari *power gain* yang diberikan dalam daerah frekuensi sudut antara 0 hingga 0.1 MHz untuk FP(0-4) pada variasi CP(1) atau CP(11). Grafik tersebut menunjukkan bahwa tidak ada *gain margin* dan *phase margin* dari *power gain* yang berarti bahwa *power gain* bersifat *stable* dalam daerah frekuensi rendah.

Suatu *decibel power gain* pada CP(1) tidak memiliki *cross over point* dan bersifat *high pass* sementara untuk CP(11) bersifat *low pass* dan *cross over point* juga tidak ada kecuali pada FP(0) dalam frekuensi sudut sekitar 0.1 MHz. Hasil *Nyquist plot* atau *bode plot* dari perlakuan yang lain [CP(2) hingga CP(10)] memiliki model yang serupa dengan satu dari kedua model CP(1) atau CP(11) ini.

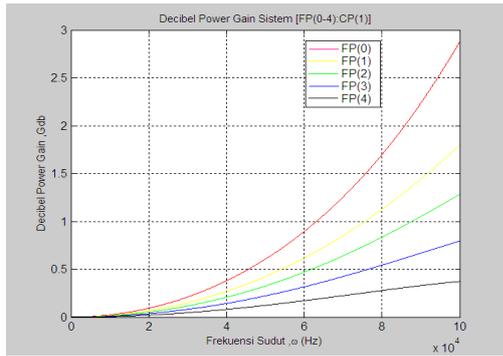


(a) FP(0-4):CP(1)

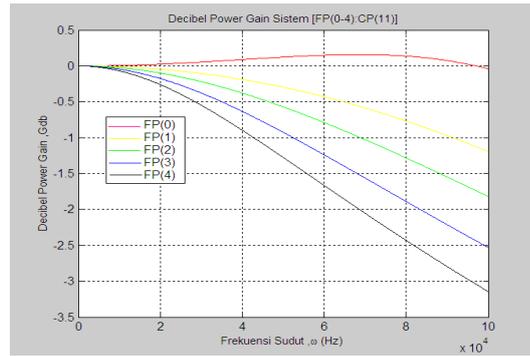


(b) FP(0-4):CP(11)

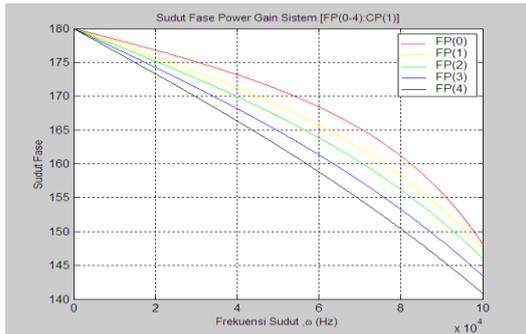
Gambar 3. *Nyquist Polar* Dari *Power Gain* Dalam Daerah Frekuensi Sudut (0-0.1) MHz.



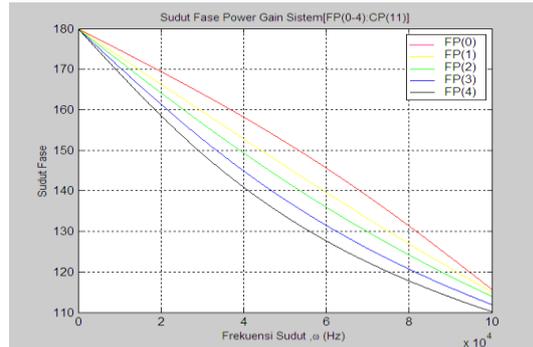
(a) Decibel Power Gain FP(0-4):CP(1)



(c) Decibel Power Gain (0-4):CP(11)



(b) Sudut Fase Power Gain FP(0-4):CP(1)



(d) Sudut Fase Power Gain FP(0-4):CP(11)

Gambar 4. Bode Plot Dari Power Gain Dalam Daerah Frekuensi Sudut (0-0.1) MH

V. PENUTUP

V. 1 Kesimpulan

1. Untuk semua perlakuan sistem, kuantitas beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata *conditionally* internal aliran fluida adalah *conservative* pada bilangan frekuensi $n \geq 2$ dan *unstable* pada $n < 2$.
2. Kuantitas beda bersih fluks energi fluktuasi rata-rata aliran fluida secara *unconditional* untuk semua perlakuan sistem adalah bersifat *potentially active stable* pada frekuensi rendah di bawah bilangan frekuensi $n = 2$. Sedikit di bawah $n = 2$ dan diantara $n = (2 \div 4)$ kuantitas ini

bersifat *potentially active unstable*, sementara untuk $n \geq 4$ sifatnya adalah *conservative*

3. Untuk semua perlakuan, *power gain* sistem bersifat *stable* dalam daerah frekuensi sudut yang rendah yaitu antara 0 hingga 0.1 MHz namun untuk semua variasi jumlah alur yang mana bergantung pada *input volume flow rate* yang diberikan, *Bode plot* menunjukkan bahwa *decibel power gain*-nya dapat bersifat *high pass* atau *low pass* atau *Nyquist polar* menunjukkan bahwa untuk sudut fase yang manapun, *vector of magnitude* dari *power gain* berada diluar atau di dalam lingkaran dengan radius 1 satuan.

V.2 Saran

1. Data-data respon waktu tekanan aliran fluida hasil akuisisi pengukuran eksperimen Setyaqrini et al [1] dapat diubah ke dalam data respon frekuensinya dengan menerapkan FFT. di bawah *time step* yang sesuai dengan periode atau frekuensi *pressure transmitter recording* yang digunakan.
2. Secara signifikan, dengan analisis FFT suatu konsep atau metode Brennen [4] dan Matko et al [2] tentang pemodelan LPS dapat diterapkan. Dalam hal ini faktor koreksi fungsi transfer impedansi hasil pemodelan LPS yang diformulasikan oleh Matko et al [2] dapat diperoleh dengan menggunakan metode statistik OLS dimana evaluasi dilihat secara simultan dalam bagian *real* dan *imaginary* dari data-data respon frekuensi pada *base* hasil kalkulasi pemodelan analitik LPS dan hasil pengukuran eksperimen-nya. Selanjutnya konsep Brennen [4] tentang estimasi stabilitas beda bersih fluks energi respon frekuensi dapat diterapkan.
3. Investigasi juga dapat dilakukan untuk melihat apakah *source*-nya ada dalam bentuk *white noise* atau *pink noise* atau bentuk-bentuk *noise* lainnya;.
4. Jika persamaan fungsi transfer *power gain* hasil estimasi untuk sinyal *source* atau aktual yang diperoleh memiliki bentuk fungsi polinomial yang kompleks (multi order) maka secara analitik suatu sifat stabilitas untuknya dapat diinvestigasi dengan menerapkan prinsip *Routh-Hurwitz Criterion for stability*..

DAFTAR PUSTAKA

- .Setyarini Putu Hadi, Wardana ING. dan Soenoko R., 2003, **Pengaruh Jumlah Alur Memanjang Terhadap Beda Tekanan dan Koefisien Gesek Pada Pipa Horizontal**, Program Pasca Sarjana Universitas Brawijaya, Malang.
- Matko D., Geiger G. and Werner T., 2001, **Modelling of the Pipeline as a Lumped Parameter System**, ISSN 0005-11444 ATKAAF 42 (3-4), 177-188.
- Hadi A., Wardana ING and Sutikno Djoko, 2011, **The Energy Flux Different Stability Of Hydraulic Flow In A Horizontal Pipeline With Longitudinal Grooves Number Variation**, Jurnal Rekayasa Mesin Vol.2, No.2., ISSN 0216-468x :165 - 174.
- Brennen C.E., 1994, **Hydrodynamics of Pump**, Concept NREC
- .Bastin G., Coron and Andrea-Novel D., 2008, **Using Hyperbolic System Of Balance Laws For Modeling, Control And Stability Analysis Of Physical Networks**, 17th IFAC World Congress, Seoul-Korea.
- Craisig K., **Fluid Systems** (www.scribd.com/./mechatronics).
- Nasser K. M., 2000, **Development and Analysis of the Lumped Parameter Model of a Piezo and Hydraulic Actuator**, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Munson B. , Young D. and Okishi T., 1998, **Fundamentals of Fluid Mechanics**, 2nd ed., John Wiley & Son , New York.
- Dorny C., **Understanding Dynamic System**, 1993, Prentice Hall, New Jersey
- Lindsay J. and Kats S., 1979, **Dynamics Of Physics Circuits and Systems**, Matrix Publishers, Illinois.
- Doebelin E., 1972, **System Dynamic Modeling and Response** , Bell & Howel Company, Columbus, Ohio.
- Tijsseling A. S. and Anderson A., **The Joukowski equation for fluids and solids** , GIRT-CT-2002-05069 ([www.surge-net info](http://www.surge-net.info))
- Schlichting H., 1968, **Boundary-Layer Theory**, McGraw- Hill Book Company, 3th ed., New York
- Agilent Technology (www.agilent.com).
- Strogatz S.H., 1994, **Non Linear Dynamick And Chaos With Application to Physics**, Biology, Chemistry, and Engineering, Preseus Books Publishing, L.L.C., USA.
- Dunn-D.J. (www.frestudy.co.uk, 2008).