

THE ENERGY FLUX DIFFERENT STABILITY ESTIMATION OF HYDRAULIC FLOW IN A HORIZONTAL PIPELINE WITH LONGITUDINAL GROOVES NUMBER VARIATION

Abdul Hadi¹⁾, ING. Wardana²⁾, Djoko Sutikno³⁾

¹⁾ Mahasiswa Teknik Mesin Program Magister Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

^{2,3)} Dosen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jl. M.T. Haryono 167 Malang 65145 Indonesia

Email: h4d1_arsal@yahoo.co.id

Abstract

The experimentally research was governed to estimate the external (source) and internal signal combined system without separate each other. Referring to that, the Lumped Parameter System (LPS) analytical modeling method by Matko et al (2001) as looked as possible is significance and accurately to estimate the internal pressure or difference pressure fluctuation of fluid lines. By using the LPS method were known that the horizontal fluid lines dynamic system with longitudinal grooves number variation (in fractal geometry image) for which will be used as an object in this research are fulfilled as a low frequency model class and small gain pressure fluctuation for every measurement acquisition result. It's properly in the LPS modeling method, the hydraulic fluid lines should be looked as a compressible fluid and over pass storage of energy charging so the response is not only affected by resistance but also by inductance and capacitance of the fluid. The three fluid elements respectively for a pipeline length unit are constant, have positive values eventually and modified as a function of the pipeline hydraulic diameter. It's confirmed that the result could be given to predict the locally linearly stability character of the fluid flow energy flux different between upstream and downstream pipeline positions.

Keyword: Energy flux different stability, hydraulic flow, horizontal pipeline, Longitudinal grooves number variation, Lumped parameter system analytical modeling

PENDAHULUAN

Sistem dinamik fluida dalam *scenario* eksperimen Setyarini et al [1] dapat dikatakan bersifat *simple* (mungkin *outoplectic*) yaitu aliran fluida hidrolik dalam kondisi adiabatik pada suhu ruang, diassumsikan *steady* dan *fully developed*, *small gain pressure fluctuation*, tanpa kavitasi, bebas dari pengaruh gravitasi karena pipa diposisikan dalam arah horizontal, kelas pipa *smooth pipe* (PVC *pipeline*) serta perlakuan *stimuli* variasi jumlah alur memanjang yang diberikan memiliki *fractal geometry image* (goresan kecil memanjang pada permukaan dinding dalam pipa setebal 1 mm dengan diameter pipa 1 inch dan panjang pipa 2 m

yang diatur sedemikian hingga jarak antara dua goresan yang berdekatan pada keliling dasar pipa dari semua goresan adalah sama) namun di balik sistem seperti ini boleh jadi terkandung sifat dinamik yang kompleks. Dalam *sense* yang demikian serta kenyataan bahwa kebanyakan penelitian di bidang mekanika fluida hanya lebih memfokuskan perhatiannya terhadap sistem fluida dalam pipa dengan variasi alur melintang atau menyilang secara kuantitatif maka

penelitian Setyarini et al [1] dilanjutkan dalam penelitian ini,

Penelitian ini dilakukan dengan memandang *fluid lines* sebagai *open loop system* dan dimulai dengan suatu gambaran awal dari sudut pandang pemodelan analitik LPS Matko et al [2] bahwa aliran fluida pada eksperimen Setyarini et al [1] ada dalam zone turbulen dengan angka *Reynold* rendah dan termasuk dalam kelas model kuantitas respon frekuensi rendah untuk semua *fixed parameter* jumlah alur memanjang dan semua *control parameter* laju volume aliran fluida masuk. Dapat dilihat bahwa peningkatan jumlah alur memanjang justru menurunkan diameter hidrolik pipa dan ini menyebabkan peningkatan yang cukup signifikan terhadap resistansi dan induktansi fluida per satuan panjang pipa dan juga penurunan yang cukup signifikan terhadap kapasitansi fluida per satuan panjang pipa. Dengan kondisi ini maka penyelesaian respon frekuensi ke dalam respon waktu pada setiap perlakuan sistem fluida Setyarini et al [1] menunjukkan bahwa fluktuasi internal tekanan atau beda tekanan aliran fluida antara posisi *upstream* dan *downstream* pipa sistem adalah bersifat *transient* dan dimana *shock wave* merambat sepanjang *upstream* dan

downstream pipa dengan delay/dead time yang sangat kecil.

Penelitian ini akan difokuskan terhadap penyelesaian kondisi batas fluid lines yaitu pada posisi upstream dan downstream pipa untuk mengetahui bagaimana sifat stabilitas lokal linear respon trajektori beda fluks energi internalnya. Ini diberikan dengan suatu pertimbangan bahwa untuk sinyal transient, respon waktunya adalah bersifat globally attracting atau asymptotically stable (Strogatz [3]). Sifat stabilitas persamaan medan vektor trajektori beda fluks energi aliran fluida tersebut akan dilihat dalam sistem map dua dimensi di sekitar posisi keseimbangan sistem sebagai fixed point-nya.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai salah satu referensi ke penelitian lanjutan dalam persoalan kuantitas dan kualitas (stabilitas) dinamik respon eksternal (source) baik dalam domain waktu atau domain frekuensi atau secara simultan sebagai gabungan domain waktu dan frekuensi

yang meliputi penyelesaian respon pada kondisi batas pipa dan posisi-posisi interior pipa disertai dengan pola virtual osilasi kecepatan aliran fluida (Von Karman's vortex). Implementasinya adalah sedemikian hingga pipa dengan pengaruh jumlah alur memanjang memiliki nilai aplikatif terutama di bidang industri rekayasa sistem perpipaan dan mekanika fluida.

KAJIAN PUSTAKA

Penelitian Terdahulu Dan Relevansinya

Menurut Brennen [4] metode pemodelan LPS atau metode domain frekuensi secara kuantitatif adalah signifikan untuk diterapkan pada fluktuasi kuantitas aliran fluida hidrolis dengan kondisi small gain (dapat membaca unstable motion yang kecil) jika dibandingkan dengan metode water hammer atau domain waktu.

Beberapa penelitian telah mengembangkan metode pemodelan LPS untuk aliran fluida dalam suatu pipeline di bidang mekanika fluida misalnya Nasser [5], Matko et al [2], Tahmeen et al [6] dan Kim et al [7]. Metode-metode mereka bentuknya beragam secara analitis atau simulasi numerik dan diterapkan untuk pipelines dari sistem yang berbeda-beda namun hanya diberikan untuk melihat aspek kuantitatif respon.

Dalam penelitian ini metode Matko et al [2] akan diterapkan dimana sebagai langkah awal dapat dikemukakan bahwa koefisien redaman respon frekuensi tekanan aliran fluida untuk setiap perlakuan pada hasil pengukuran

Setyarini et al [1] adalah yaitu termasuk dalam kriteria kelas model frekuensi rendah dan penyelesaian persamaan respon frekuensi ini memberikan hasil respon waktu yang bersifat transient. Di sini suatu diskripsi antara sinyal internal dan hasil pengukurannya dapat dipandang sebagai pengaruh eksternal (biasanya disebut sebagai source effect dalam hubungannya dengan closed loop feedback system) tekanan aliran fluida dalam pipa.

Persamaan Yang Dikembangkan

Bayangkan bahwa aliran fluida di dalam suatu horizontal pipeline dikalkulasi dengan asumsi: koordinat spasial 1-D, viscos, adiabatic, homogeny, small gain fluctuation dan jika p , q masing-masing menyatakan tekanan dan laju massa aliran fluida sebagai fungsi koordinat spasial dan waktu maka dengan melakukan modifikasi dan linearisasi convective inertial term (time dependent friction term diabaikan untuk aliran quasi steady) pada persamaan property aliran fluida Navier Stokes, diperoleh dua persamaan dasar model Distribution Parameter System (DPS) yang mana adalah analog dengan persamaan yang dikembangkan dalam telegraph transmission line dan diketahui sebagai Maxwell's equation tanpa electrical conductance. (Bastin et al [8]). Secara sesuai ditunjukkan oleh Matko et al [2] yaitu:

dari persamaan momentum linear (gerak);

$$L \frac{\partial q}{\partial t} + I \tag{1}$$

dari persamaan kontinuitas;

$$C \tag{2}$$

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

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

sistem fluida aliran tekanan;

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

dimana: L , C dan I masing-masing menyatakan induktansi, kapasitansi dan resistansi fluida per satuan panjang pipa.

Persamaan Estimasi Pemodelan LPS Respon frekuensi

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

$$\begin{pmatrix} P_0(s) \\ P_1(s) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

dengan matriks fungsi transfer impedansinya:

$$\left. \begin{aligned} [Z] &= \begin{bmatrix} Z_{11} \\ Z_{21} \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} Z_c \coth(\lambda l_p) & -Z_c \sinh \\ Z_c \sinh^{-1}(\lambda l_p) & -Z_c \csc \end{bmatrix} \\ \lambda &= \sqrt{i} \quad z_c = \frac{m}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

dimana $P_0(s)$, $P_1(s)$ dan $Q_1(s)$ masing-masing menyatakan panjang *pipeline unit testing*, respon frekuensi tekanan dan laju massa aliran fluida pada posisi *downstream* dan *upstream*. Sedangkan Z_{11} dan Z_{21} masing-masing disebut sebagai *propagation operator* dan *characteristic impedance*. Suatu *electronic circuit analog model* antara *fluid line* ini dengan *electrical transmission line* dapat dilihat misalnya pada St. Leger [9].

Impedansi kelas model frekuensi rendah

Oleh Matko et al [2], persamaan (6) 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:

$$\zeta_n = \sqrt{2} \sqrt{\frac{k}{i}} \quad (7)$$

Sedangkan harga elemen-elemen matriks fungsi transfer impedansi diperoleh berdasarkan hasil aproksimasi itu dengan restriksi 2 zeros dan 3 poles yaitu:

$$\left. \begin{aligned} Z_{22} &= -Z_{11} = -\frac{b_2}{(a_2 s)} \\ Z_{21} &= -Z_{12} = \frac{1}{(a_2 s)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

dimana;

$$\left. \begin{aligned} & ; \quad a_1 = ; \\ a_2 &= \frac{1}{2} C^2 l_p^2 L + \frac{1}{2} ; \\ b_1 & ; \\ b_2 &= \frac{1}{2} l_p^2 LC + \frac{1}{2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Dapat dilihat bahwa persamaan (8) dan (9) tidak mengandung pengaruh *shock wave* (tidak ada *Liapunov exponential function factor*) dengan *delay time* yaitu:

$$T_1 \quad (10)$$

Respon waktu

Pandanglah bahwa aliran fluida di dalam pipa mengalami suatu super posisi atau interferensi dari gelombang tekanan aliran karena respon eksternal (*source*) dan respon internalnya. Dalam hal ini suatu pemodelan LPS dikembangkan untuk melihat tekanan aliran fluida internal pipa itu sendiri. Sementara tekanan hasil akuisisi pengukuran eksperimen seperti yang dilakukan oleh Setyarini et al [1] dapat dibayangkan sebagai tekanan inter-aksi antara respon eksternal (*source*) dan internal pipa yang terjadi di dalam pipa itu sendiri tanpa membedakannya.

Dengan menerapkan *Laplace Transform invers* pada persamaan (5) yang dipenuhi oleh persamaan (8) dan (9) maka diperoleh persamaan respon waktu tekanan internal aliran fluida hasil pemodelan P_{in} .

Persamaan diferensial yang dikembangkan untuk sistem menunjukkan bahwa respon internal adalah *invariant* terhadap translasi waktu [ini karena persamaan tersebut bersifat linear dan parameter-parameter persamaannya bukan merupakan fungsi waktu (Kwakernaak et al [10]) dan untuk itu respon juga bersifat *stationary* (Brown and Hwang [11])] sehingga *time horizon* sistem setelah kondisi aliran *steady* dapat diberikan tanpa *back shift time* pengukuran (*mapping initial condition of steady state flow*) untuk mana diperoleh sinyal *least damped oscillation* tekanan internal aliran fluida

masing-masing pada posisi *upstream* pipa dan *downstream* pipa p_m dan p_{m2} , yaitu;

$$\left. \begin{aligned} &= \\ &0, \\ &\left\{ c_0 + e^{-\beta t} [c_1 \cos(\omega_d t) - c_2 \sin(\omega_d t)] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

dimana;

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{K}{a_1}; & \omega_d &= \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}; \\ c_0 &= \frac{p_m}{a_1}; & c_1 &= \frac{p_m}{a_1}; \\ c_2 &= \frac{\beta \omega_d}{a_2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

dan dimana menyatakan laju aliran massa fluida untuk kondisi aliran *steady* serta disebut sebagai frekuensi redaman respon .

Beda tekanan internal aliran fluida antara posisi *upstream* dan *downstream* pipa diperoleh dari persamaan (11) sebagai

$$\Delta p_m(t) = p_{mD}(t) - p_{mU}(t) = \quad (13)$$

Elemen-elemen Fluida Pasif

Ketiga parameter dan untuk suatu hubungan analogi antara *electronic/electrical transmission lines* dan *fluid flow mechanic* disebut sebagai elemen-elemen fluida pasif oleh Craisig [12] yang mana oleh Matko et al [2] dinyatakan sebagai

$$\left. \begin{aligned} &; & R &=; & , \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Definisi ketiga elemen fluida tersebut sebagaimana dikemukakan oleh Nasser [5] dapat dilihat juga misalnya pada Dorny [13], Lindsay and Katz [14] dan Doebelin [15] sedangkan dasar pengembangannya terhadap persamaan aliran fluida dapat dilihat pada *text* dan referensi yang diberikan oleh Munson et al [16]. Dalam hal ini dan

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 dapat dikalkulasi dengan menggunakan persamaan *Joukowsky water hammer* seperti dikemukakan oleh Brennen [4] dan juga oleh Tijsseling and Anderson [17] yaitu:

$$a = \left[\frac{1}{\rho a_0^2} + \frac{\beta D}{E_0 \delta_0} \right]^{-\frac{1}{2}} a_0 \quad (15)$$

dimana ρ, K dan , masing-masing menyatakan densitas rata-rata fluida, modulus *bulk* fluida, modulus elastisitas pipa, diameter pipa, tebal dinding pipa dan cepat rambat bunyi dalam fluida itu sendiri.

Harga koefisien gesek untuk *smooth pipe* dalam zone aliran turbulen *Reynold* rendah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *Blasius* (Schlichting [18]), yaitu

$$f_r(\bar{q}, D, \mu) = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

dimana adalah viskositas *absolute/dynamic* fluida dan dengan angka *Reynold*

$$Re(\bar{q}, D) \quad (17)$$

Persamaan (14) hingga (17) untuk pipa dengan jumlah alur memanjang dihitung dengan menggunakan diameter hidrolik pipa , untuk luas total profil penampang melintang pipa yaitu:

$$D_H = \frac{4A}{Wetted Perim} \quad (18)$$

Persamaan Medan Vektor Trajektori

Misalkan yang mana menyatakan fluks energi aliran fluida pada tekanan atmosfer dan laju aliran massa kondisi *steady* diambil sebagai referensi dan beda fluks energi aliran fluida masing-masing adalah:

$$E_{atm}; \quad \Delta E_{cr,1g} = \quad (19)$$

Juga jika trajektori dan kecepatan trajektori beda fluks energi masing-masing adalah:

$$\Delta E_{cr,1g} = \frac{\Delta E_{cr,1g}}{E_{atm}}; \quad \Delta \dot{E}_{cr,1g} = \quad (20)$$

dimana untuk skala waktu karakteristik , suatu menyatakan *time dimensionless* , yaitu:

$$(21)$$

maka dari persamaan (12), (13), (19), (20) dan (21) diperoleh persamaan *autonomous* medan vektor trajektori beda fluks energi internal aliran fluida, yaitu:

$$\frac{d\Delta E_{tr-ke}}{dt} = -2\beta T \Delta E_{tr-ke} + \dots -(\beta^2 + \omega_d^2) T^2 (\dots) \dots (22)$$

Stabilitas Lokal Linear Trajektori

Suatu trajektori dikatakan *locally stable* di sekitar *fixed point*-nya jika medan vektor dari trajektori tersebut menuju *fixed point*-nya dan dikatakan *locally unstable* jika medan vektornya menjauhi *fixed point*-nya. Sehubungan dengan itu andaikan bahwa menyatakan suatu sinyal respon trajektori beda fluks energi aliran fluida dan menyatakan kecepatan trajektori yang mana adalah sedemikian hingga memenuhi persamaan sistem *map* dua dimensi:

$$\left. \begin{aligned} \dot{u} &= \frac{du}{dt} = f(u, v) \\ \dot{v} &= \frac{dv}{dt} = g(u, v) \end{aligned} \right\} (23)$$

Bayangkan pula bahwa adalah *fixed points* untuk mana:

$$f(u^*, v^*) = 0 = g(u^*, v^*) (24)$$

Jika , dicatat sebagai *small disturbance* dari *fixed points* maka dengan menerapkan aproksimasi *Taylor series* pada persamaan (23) sebagaimana dalam diskripsi Strogatz [3] diperoleh:

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial u} & \frac{\partial f}{\partial v} \\ \frac{\partial g}{\partial u} & \frac{\partial g}{\partial v} \end{bmatrix}_{(u^*, v^*)} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} + O(u, v)$$

(25) Dari persamaan (23), (24) dan (25):

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\partial g}{\partial u} & \frac{\partial g}{\partial v} \end{bmatrix}_{(u^*, v^*)} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

$$+ O(u, v) (26)$$

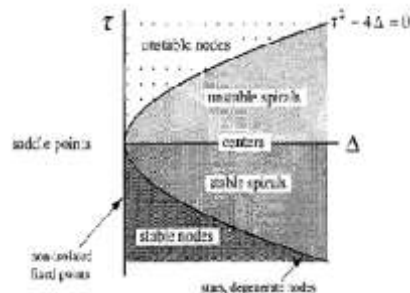
dengan *Jacobian matrix*:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial u} & \frac{\partial f}{\partial v} \\ \frac{\partial g}{\partial u} & \frac{\partial g}{\partial v} \end{bmatrix}_{(u^*, v^*)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{\partial g}{\partial u} & \frac{\partial g}{\partial v} \end{bmatrix} (27)$$

Matriks persamaan (27) memiliki persamaan karakteristik untuk *eigen values* yaitu:

$$\left. \begin{aligned} \lambda^2 - \tau &= 0 \\ \tau &= \text{trace } J \\ \Delta &= \text{det } J \end{aligned} \right\} (28)$$

Sifat stabilitas trajektori pada persamaan (28) dengan demikian dapat dilihat dari nilai dan sebagaimana yang ditunjukkan oleh Strogatz [3] dalam suatu diagram yaitu;



Gambar 1. Diagram stabilitas trajektori [Sumber: Strogatz [3]]

Secara umum (*unrigorously*) suatu *fixed point* dari suatu trajektori untuk sistem *map* dua dimensi diklasifikasikan oleh Strogatz [3] sebagai berikut:

- **Robust cases :**
 - **Repeller** (dikatakan juga **source**); jika kedua *eigen values* memiliki bagian *real* positif.
 - **Attractor** (dikatakan juga **sink**); jika kedua *eigen values* memiliki bagian *real* negatif .
 - **Saddle**; jika satu *eigen value* adalah positif dan yang satunya adalah negatif.
- **Marginal cases :**
 - **Center**; jika kedua *eigen values* memiliki *pure imaginary*

- **Higher-order** dan **non isolated fixed point**: jika paling sedikit satu *eigen value* adalah nol.

Untuk sistem yang dilinearisasi maka persamaan (26) menjadi

$$\dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \alpha_1 & \alpha_2 \end{bmatrix} \mathbf{u}, \quad (29)$$

Bayangkan bahwa persamaan medan vektor trajektori (29) di sekitar *fixed point*-nya adalah valid tanpa nilai deviasi *quadratic term*-nya jika diberikan *small perturbation*. Sementara *fixed point* dalam hal ini sebagaimana telah dikemukakan adalah posisi keseimbangan sistem. Persamaan (28) dan (29) dengan demikian dapat ditulis dalam bentuk persamaan diferensial biasa linear orde-2 dengan *constant coefficient terms*, yaitu:

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \alpha_1 \frac{du}{dt} + \alpha_2 u = 0, \quad (30)$$

yang memenuhi kondisi awal $u(0)$ dan $u'(0) = 0$.

dimana:

$$\alpha_1 = -\left(\frac{\partial f}{\partial u}\right); \quad \alpha_2 = -\left(\frac{\partial f}{\partial u}\right) \quad (31)$$

Attracting Dan Liapunov Stable

Sebagaimana dikemukakan oleh Strogatz [3], bayangkan bahwa suatu *fixed point* dari suatu sistem medan vektor. Dikatakan bahwa adalah *attracting* jika di situ berharga suatu sedemikian hingga $\lim_{t \rightarrow \infty} ||\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}^*(0)|| = 0$ bagaimanapun $||\mathbf{u}(0) - \mathbf{u}^*(0)||$ atau dengan kata lain suatu trajektori yang mulai di dalam suatu jarak dari digaransikan *converger* terhadap untuk semua kejadian. Sebaliknya adalah *Liapunov stable* jika untuk setiap berharga suatu sedemikian hingga $||\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}^*(0)|| < \epsilon$ bagaimanapun $||\mathbf{u}(0) - \mathbf{u}^*(0)|| < \delta$ dan $||\mathbf{u}(0) - \mathbf{u}^*(0)||$ - yaitu bahwa trajektori yang mulai di dalam dari tetap berada di dalam untuk semua waktu positif. Jika trajektori bersifat *attracting* dan *Liapunov stable* maka trajektori dikatakan *asymptotically stable*.

Skala Waktu Karakteristik

Dengan menggunakan diskripsi Strogatz [3] maka dapat ditunjukkan bahwa trajektori sinyal

least damped oscillation [persamaan (22)] memiliki skala waktu karakteristik yaitu:

$$(32)$$

Frekuensi Sudut Natural

Dapat diketahui dari persamaan (30) bahwa trajektori beda fluks energi aliran fluida memiliki frekuensi sudut *natural* yaitu;

$$\omega = \omega_n; \quad (33)$$

Kondisi Nilai Awal Dan Fixed Points

Dari persamaan (12), (13), (21), (27) dan (32) :

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= (C_0); \\ v_0 &= -\frac{(8C_1 + 4)}{\beta} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Dari persamaan (22), (23 dan (24):

$$\mathbf{u}^* = \left\{ \begin{aligned} & \\ & \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Yang berarti bahwa trajektori medan vektor beda fluks energi memiliki *singular fixed point*.

Jacobian Trace Dan Determinant

Dari persamaan (28), (31) dan (32) diperoleh

$$\alpha_1 = -\left(\frac{\partial f}{\partial u}\right); \quad \alpha_2 = -\left(\frac{\partial f}{\partial u}\right) \quad (36)$$

METODOLOGI PENELITIAN

Sistem fluida dalam penelitian ini dirujuk berdasarkan hasil eksperimen Setyarini et al [1] dengan *scenario* dan modus penelitian sinyal sistem yaitu: 1. Jumlah alur memanjang pipa dalam masing-masing perlakuan sistem adalah dan. Variasi ini dipandang 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. 2. Variasi *input volume flow rate* yang diberikan adalah sebesar (0,5-2,5) /11 perlakuan. Variasi ini dipandang sebagai *control parameter* (CP) yaitu masing-masing dari CP(1) hingga CP(11) dengan lebar *step* 0. 3. *Fluid lines* ini dilihat sebagai sistem fluida aliran tekanan untuk mana sinyal tekanan aliran fluida aktual (hasil pengukuran), Internal, dan *source*-nya masing-masing dibayangkan dalam suatu relasi dengan menempatkan medan *mass flow rate* aktualnya sebagai *input signal*. 4. Data hasil

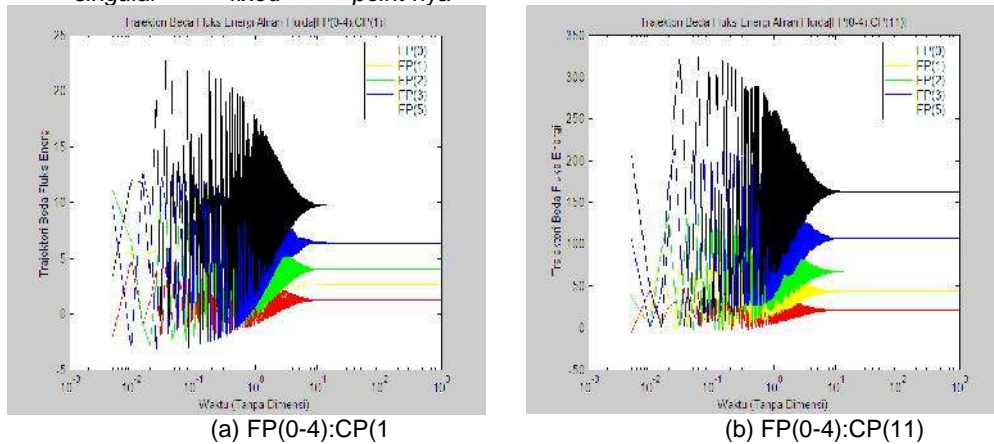
pengukuran tekanan aliran fluida dalam kondisi *steady state flow* adalah bersifat *small gain fluctuation* oleh karena untuk setiap perlakuan sistem dengan $\bar{m}_{obs}(t)$ pada posisi *upstream* atau *downstream* pipa memenuhi kriteria (Brennen [4]) yaitu: $|p_{obs}(t) - \bar{p}_{obs}(t)| \ll$ dan untuk itu sistem aktual memenuhi pemodelan LPS. 5. Sinyal sistem internal *fluid lines* 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

Di sini visualisasi grafis medan vektor trajektori beda fluks energi internalnya diberikan tanpa *input mass flow rate mapping* sehingga hasilnya perlu dikalikan lagi dengan faktor skala .

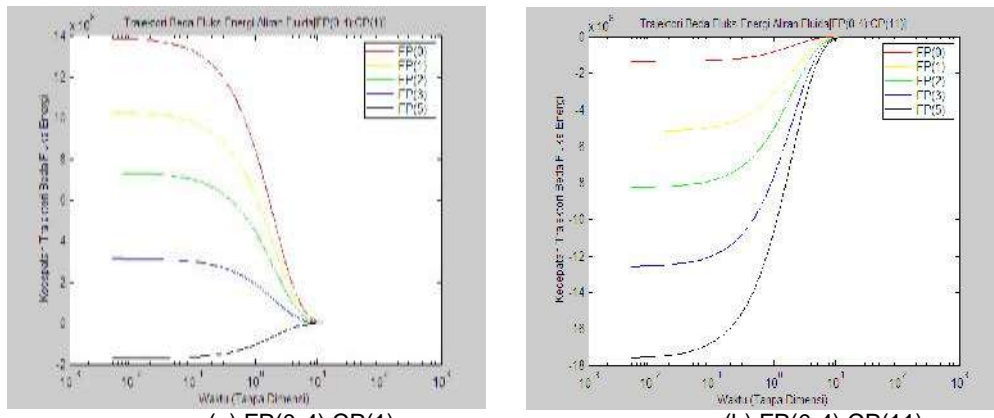
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari persamaan (36) dan gambar 1 dapat dilihat bahwa trajektori beda fluks energi aliran fluida adalah bersifat *stable node* di sekitar *singular fixed point*-nya

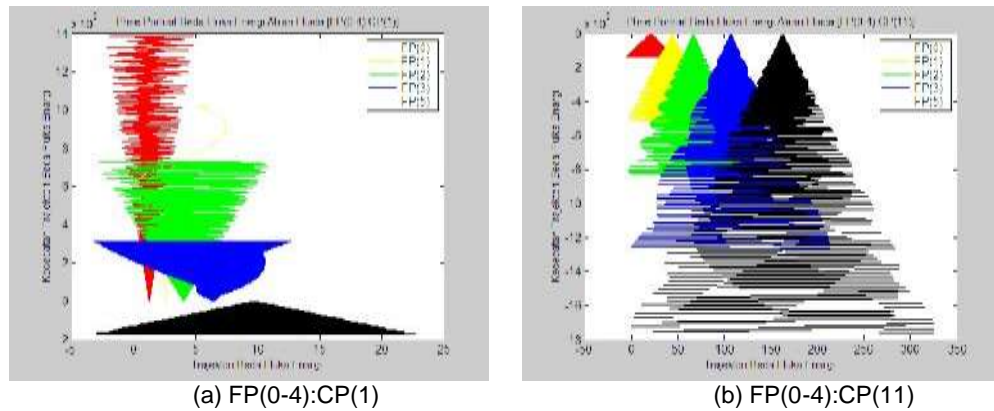
atau posisi keseimbangannya untuk semua perlakuan sistem. Harga *fixed points* itu menjadi makin besar dengan meningkatnya FP untuk CP yang tetap atau dengan meningkatnya CP untuk FP yang tetap. Misalnya untuk FP(0-4) pada CP(1) atau CP(11) dengan *time stage dimensionless* 0.005 diperoleh *plot* sebagai berikut:



Gambar 2. Amplitude Wave Form Trajektori Beda Fluks Energi Internal Aliran Fluida



(a) FP(0-4):CP(1) (b) FP(0-4):CP(11)
 Gambar 3. Amplitude Wave Form Kecepatan Trajektori Beda Fluks Energi internal Aliran Fluida



Gambar 4. Phase Portrait Medan Vektor Trajektori Beda Fluks Energi Internal Aliran Fluida

Gambar 2,3 dan 4 menunjukkan bahwa medan vektor trajektori sistem internal secara lokal linear adalah bersifat *long term aperiodic* dalam bentuk *asymptotically stable* pada *fixed point*-nya. Juga dapat dilihat bahwa terjadi bifurkasi pada sistem fluida yaitu perubahan *fixed points* sistem jika pipa divariasikan dengan jumlah alur memanjang. Ini memberikan suatu informasi bahwa perubahan harga rata-rata beda fluks energi internal *fluid lines* ini (posisi keseimbangan sistem) misalnya terbesar terjadi pada perlakuan FP(4) dan CP(11) yaitu sekitar 75 kali harga referensinya yang mana adalah tidak mungkin jika tidak diimbangi oleh *amplitude* dan frekuensi eksitasi respon sinyal *source* dimana sinyal internal berperilaku sebagai *filtering signal* di dalam *pipeline* sedemikian (kedua sinyal *source* dan internal satu sama lainnya berinter-aksi saling menghapus) hingga sesuai dengan hasil pengukuran eksperimen Setyarini et al [1] bahwa harga rata-rata beda fluks energi aliran fluida tersebut di bawah harga referensinya. Dapat dilihat bahwa untuk *pipeline* tanpa alur memanjang, perubahan harga rata-rata beda fluks energi aliran fluida masih *relative* signifikan jika dibanding hasil akuisisi (*empirical evidence*) pengukurannya. Ini berarti bahwa variasi jumlah alur memanjang pipa tidak membuat sistem *fluid lines* secara aktual bersifat *outoplectic* tetapi *complexity* dan

sebagaimana sinyal internal. untuk suatu *locally linear investigation* dalam *long term prediction model*, sinyal *source* juga dapat dibayangkan memiliki suatu *pseudo fixed point*.

KESIMPULAN

1. Suatu restriksi model 2 zeros dan 3 poles terhadap order polynomial dari Taylor expansion (dengan mengabaikan semua order polynomial yang lebih tinggi) dalam aproksimasi fungsi transcendental hyperbolic dari fungsi transfer impedance causal dalam kasus sistem dinamik ini dapat diterima secara signifikan dengan pertimbangan bahwa kapasitas fluida per satuan panjang pipa adalah sangat kecil.
2. Secara kuantitatif untuk semua perlakuan sistem, beda fluks energi internal aliran fluida antara posisi upstream dan downstream pipa bersifat transient atau long term aperiodic.
3. Medan vektor trajektori dan kecepatan trajektori beda fluks energi internal aliran fluida untuk semua perlakuan sistem secara lokal linear memiliki sifat stable node pada singular fixed point-nya. Dalam hal ini bifurkasi terjadi dengan variasi jumlah alur memanjang pipa; makin besar jumlah alur tersebut makin

besar harga *fixed point* trajektorinya. Stabilitas ini di dalam bidang *phase portrait* sistem *map* dua dimensi memiliki bentuk *asymptotically stable*.

4. Variasi jumlah alur memanjang pipa sangat berpengaruh juga terhadap bifurkasi beda fluks energi *source* dan aktual sistem dinamik *fluid lines*.

SARAN

1. Dalam respon waktu, jika *source* diestimasi secara statistik dengan menerapkan hasil pemodelan internalnya dan hasil pengukuran eksperimental Setyarini et al [1] (dalam *time stage* atau frekuensi *pressure transmitter recording*) yang berarti bahwa sistem internal dilihat sebagai *short term prediction model* maka iterasi numerik misalnya dengan metode *Runge-Kutta* 4 dapat diterapkan.
2. Suatu *short term prediction model* dengan metode iterasi numerik itu juga dapat diberikan untuk menunjukkan kemungkinan adanya fenomena *bifurcation cycles*, *windowed periods*, *intermittency* atau *chaos* pada trajektori beda fluks energi internal aliran fluida.
3. Jika *source* diestimasi secara statistik sebagai suatu diskripsi antara respon frekuensi sinyal hasil pengukuran dan sinyal internalnya maka informasi tentang *back shift time* pengukuran bukanlah merupakan suatu persyaratan yang diperlukan dalam estimasi tersebut.
4. Beberapa metode statistik seperti simulasi gabungan *Fast Fourier Transform* (FFT) dan *Hermite Moment Transformation* (HMT), *Ordinary Least Square* (OLS) dan *Wavelet Transform*, atau *Kalman Filtering* dapat diterapkan dalam estimasi

source beda fluks energi sistem dinamik *fluid lines* sebagaimana dikemukakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. 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.
- [2]. 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.
- [3]. Strogatz S.H., 1994, Non Linear Dynamic And Chaos With Application to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering, Preseus Books Publishing, L.L.C., USA.
- [4]. Brennen C.E., 1994, Hydrodynamics of Pump, Concept NREC.
- [5]. Nasser K. M., 2000, Development and Analysis of the Lumped Parameter Model of a Piezo and Hydraulic Actuator, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [6]. Tahmeen M., Muto T. and Yamada H., 2001, Simulation of Dynamic Response of Tappered Fluid Lines, JSME International Journal Series B Vol.44, No.2: 247-254, Japan.
- [7]. Kim B, Greiner G. and Cerrato-Jay G., 2007, A Numerical and Experimental Study On Power Steering Shudder, SAE International.
- [8]. 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.
- [9]. St. Leger A., 2005, Transmission Line Modeling for the Purpose of Analog Power Flow Computation of Large Scale Power System, Drexel University.

- [10].Kwakernaak H., Sivan R, and Stribos Rens C.W., 1991, Modern Signals And Systems, Prentice-Hall International, Inc., A Division of Simon and Schuster Englewood Cliffs, New Jersey, 07632.
- [11].Brown R.G, and Hwang PYC., 1983, Introduction to Random and Signals and Applied Kalman Filtering, 2nd ed., John Wiley & Sons, INC., New York.
- [12].Craisig K., Fluid Systems (www.scribd.com/./mechatronics)
- [13].Dorny, C., Understanding Dynamic System, 1993, Prentice-Hall, New Jersey.
- [14].Lindsay J. and Katz S., 1979, Dynamics of Physical Circuits and Systems, Matrix Publishers, Illinois.
- [15].Doebelin E., 1972, System Dynamic Modeling and Response, Bell & Howel Company, Colombus, Ohio.
- [16].Munson B., Young D. and Okiishi T., 1998, Fundamentals of Fluid Mechanics, 2nd ed., John Wiley Sons, New York.
- [17].Tijsseling A.S. and Anderson A., The Joukowsky equation for fluids and solids, GIRT-CT-2002-05069 (www.surge-net.info).
- [18].Schlichting H., 1968, Boundary-Layer Theory, 3th ed., Mc.Graw-Hill Book Company, New York.