

## Deteksi Kebocoran Pipa Aliran Dua Fase Plug Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan (JST)

Budi Santoso<sup>1,4</sup>, Indarto<sup>2</sup>, Deendarlianto<sup>2</sup> dan Thomas S. Widodo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Pascasarjana Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, UGM

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, UGM

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, UGM

Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281

<sup>4</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, UNS

Jl. Sutarmi 36A Surakarta 57126

[msbudis@yahoo.co.id](mailto:msbudis@yahoo.co.id)

### Abstrak

Jaringan perpipaan adalah bagian penting dari infrastruktur transportasi fluida dan deteksi kebocoran pipa pada aliran dua fase menggunakan parameter aliran (debit dan tekanan) masih sangat jarang diteliti. Sebuah sistem yang berdasarkan pada Jaringan Syaraf Tiruan (JST) diajukan untuk mendeteksi kebocoran pipa aliran dua fase plug dengan menggunakan pengukuran beda tekanan. Campuran air-udara dialirkan pada pipa horizontal berdiameter (D) 24 mm dan kebocoran buatan dilakukan dengan *solenoid valve* pada posisi bagian bawah pipa. *Differential pressure transducer* (DPT) diletakan sebelum dan sesudah posisi kebocoran dan dihubungkan dengan peralatan data akuisisi kecepatan tinggi. Sinyal fluktuasi beda tekanan yang terekam sebagai data random *time series*. dianalisis menggunakan *Power Spectral Density* (PSD). Empat belas parameter karakteristik dari kurva PSD digunakan sebagai input vektor pelatihan teknik jaringan syaraf tiruan (JST) untuk identifikasi kebocoran pipa. Penelitian ini menggunakan 94 kondisi operasi dengan rincian 80 kondisi operasi digunakan untuk pelatihan dan 14 kondisi operasi digunakan untuk pengujian. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa JST yang diajukan mampu membedakan antara kondisi pipa tidak bocor dengan kondisi pipa bocor dengan akurasi 57,14%.

**Keywords:** kebocoran pipa, aliran plug, aliran dua fase, fluktuasi beda tekanan, jaringan syaraf tiruan.

### 1. Pendahuluan

Pecahnya saluran pipa dapat disebabkan oleh korosi, perubahan/fluktuasi tekanan yang besar, kesalahan produk dan pengaruh eksternal. Kebocoran pipa ini harus segera dideteksi agar pemompaan dapat dihentikan, kerugian produk dan kerusakan lingkungan dapat dihindari, dan sistem perpipaan dapat diperbaiki. Perpipaan aliran dua phase selalu ditemukan pada industri perminyakan, industri kimia, pembangkit tenaga uap dan pembangkit tenaga nuklir. Beberapa permasalahan khusus kebocoran pipa pada aliran dua phase adalah:

- fluktuasi tekanan lokal karena pola aliran tertentu atau slip antar phase,
- posisi kebocoran disekeliling pipa (apabila kebocoran pada bagian bawah maka phase cair yang bocor dan apabila diatas phase gas yang bocor).
- metode deteksi kebocoran yang menggunakan parameter internal aliran untuk saluran pipa dua phase masih jarang.

Ketika fluida dua fase mengalir di dalam pipa dapat memberikan pola aliran yang berbeda dan karakteristik slip antar fase. Hal ini sangat meningkatkan ketidakpastian dalam deteksi kebocoran, dimana harus menentukan karakteristik (pola aliran) sebelum suatu titik kebocoran dapat dikenali. Diskontinu kecepatan superficial cairan

dan gas yang ditimbulkan pada titik kebocoran memperlihatkan indikasi sangat nyata dari suatu kebocoran. Perubahan kecepatan superficial gas dan cairan juga mengubah *liquid holdup* dan mengakibatkan perubahan besarnya penurunan tekanan.

Deteksi kebocoran dapat dilakukan dengan cara penandaan tekanan dengan berbagai cara. Wu dan Wang [1] menggunakan algoritma wavelet untuk mendeteksi gelombang tekanan yang disebabkan oleh transisi keadaan dari tidak bocor ke bocor. Pencatatan waktu kejadian digunakan untuk menghitung posisi kebocoran. Pendekatan yang lain diberikan oleh Feng dkk. [2], dimana gradien tekanan dan gelombang tekanan negatif dikombinasikan dengan logika fuzzy untuk mendeteksi kesalahan/kebocoran. Kemudian, sebuah skema yang berbeda dari pengidentifikasi kebocoran dapat dilihat di Ge dkk. [3], dimana analisis parameter utama menggunakan komputerisasi pengenalan citra yang diterapkan untuk menyaring gelombang tekanan negatif yang disebabkan oleh pipa bocor. Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Emara-Shabaik dkk. [4] berfokus pada penggunaan filter Kalman yang dimodifikasi untuk mengantisipasi besarnya kebocoran. Sebuah bank filter dari mode kebocoran dibuat dan logika keputusan diperkenalkan untuk

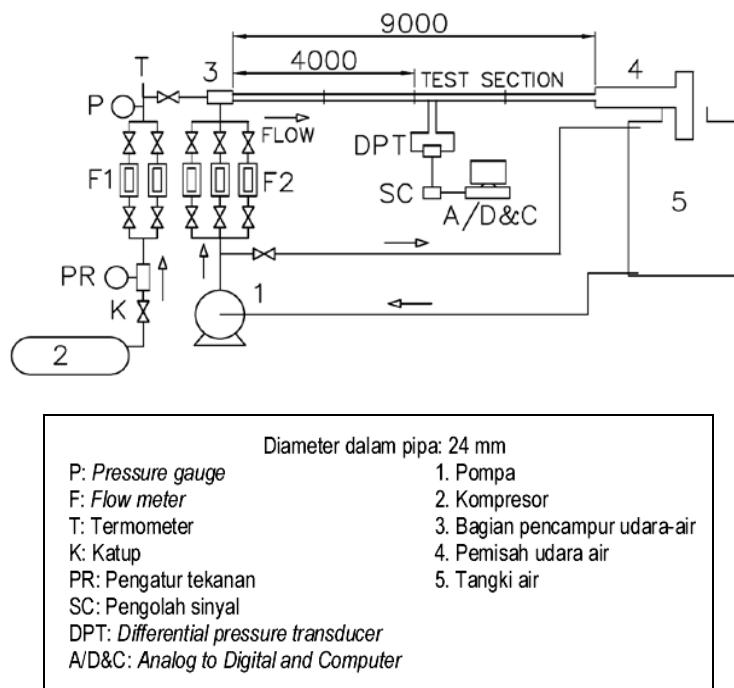
mengisolasi kebocoran. Metode ini agak mirip dengan yang diperkenalkan oleh Verde [5]. Billmann dan Isermann [6] menggunakan suatu model dinamis yang melibatkan pengaruh gesekan. Bila terjadi kebocoran, teknik korelasi diterapkan untuk mendeteksi, mengukur dan menemukan kebocoran.

Perbedaan penelitian ini dengan para peneliti terdahulu adalah menggunakan menggunakan aliran dua fase sedangkan yang para peneliti terdahulu menggunakan aliran fluida satu fase. Kebocoran diidentifikasi dengan membedakan sinyal fluktuasi perbedaan tekanan antara yang tidak terjadi kebocoran dengan yang terjadi kebocoran menggunakan JST perambatan balik.

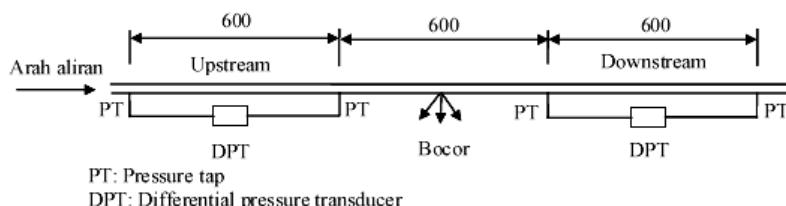
## 2. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 2. Air dialirkann dari tanki (5) oleh pompa (1) dan mengalir melalui flowmeter

air (F2) kedalam pencampur udara-air (3). Udara disuplai dari kompressor (2) dan mengalir melalui flowmeter udara (F1) ke pencampur udara-air (3). Kemudian udara-air yang tercampur mengalir melalui seksi uji dan pemisah udara-air (4), dimana udara dipisahkan ke atmosfer dan air mengalir ke dalam tangki untuk disirkulasikan. Pipa uji terbuat dari pipa transparan dengan diameter dalam (D) 24 mm. Panjang inlet ke seksi uji adalah 4,5 m dan panjang seksi uji adalah 2,5 m. Panjang seksi uji ke outlet adalah 2 m. Data akuisisi yang dipakai adalah PCL-816 buatan Advantech. Kecepatan pengambilan data adalah 400 Hz selama 50 dt. Pola aliran diobservasi pada seksi uji. Visualisasi pola aliran menggunakan *high speed camera*. Pengolahan data menggunakan program MATLAB untuk memperoleh grafik beda tekanan dalam rangkaian waktu, mean, probability density function (PDF), autocorrelation dan power spectral density (PSD).

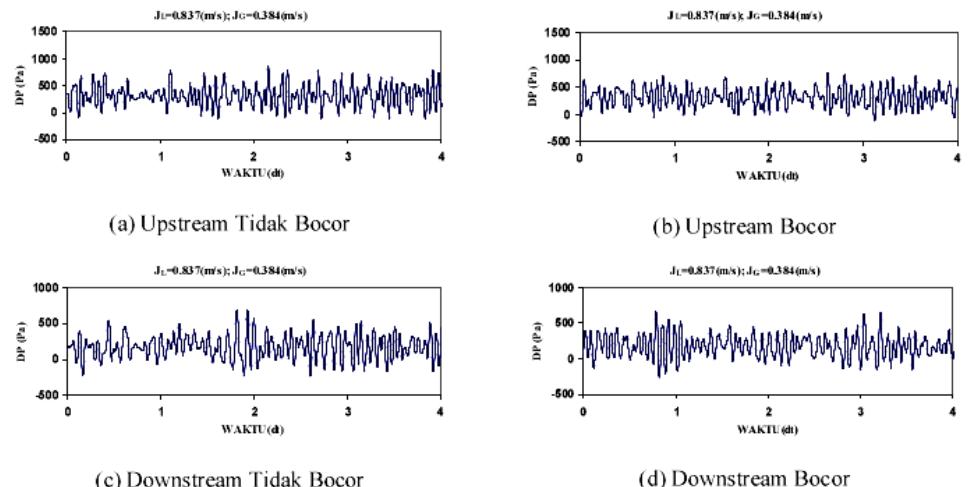


Gambar 1. Susunan peralatan eksperimen

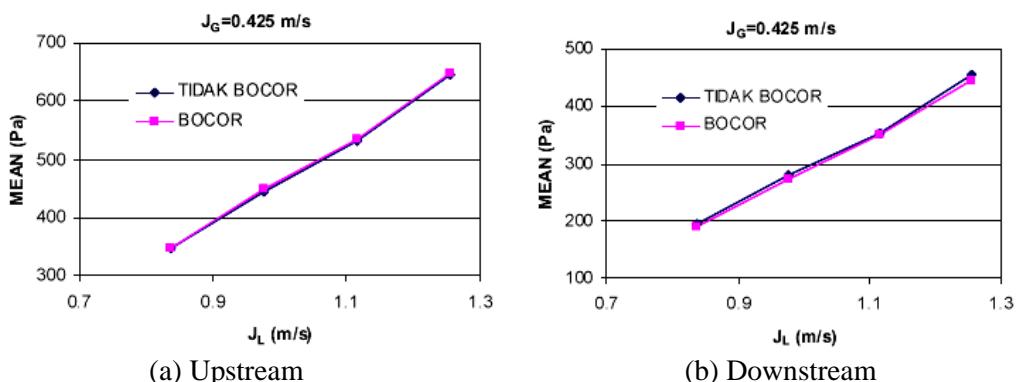


Gambar 2. Bagian pipa uji dan pemasangan DPT

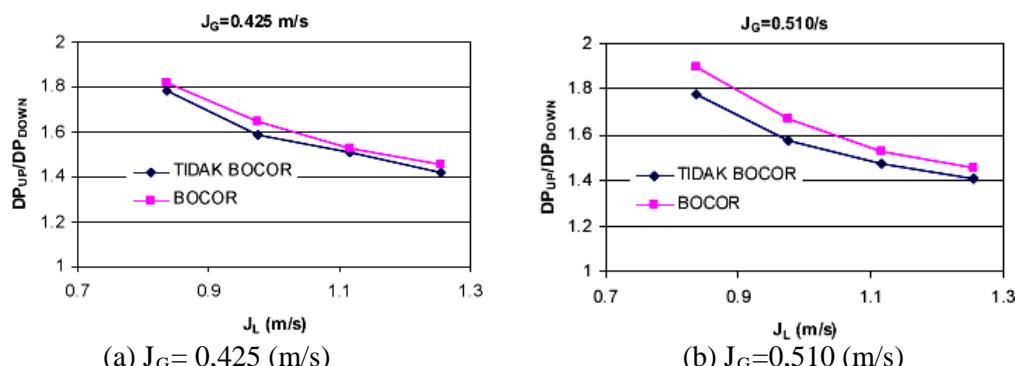
Bagian uji penelitian kebocoran pipa dapat dilihat pada Gambar 2. Dua buah DPT ditempatkan sebelum dan sesudah titik kebocoran untuk merekam beda tekanan. DPT dihubungkan dengan peralatan pengkondisi sinyal dan ADC yang menghasilkan data beda tekanan. Perlu ditegas jarak tap pengukuran adalah 600 (mm) (lihat Gambar 2). Kebocoran buatan dilakukan dengan *solenoid valve* pada posisi bagian bawah pipa. Pengukuran dilakukan pada rentang  $J_G=0,255 - 0,510$  (m/s) dan rentang  $J_L=0,837 - 1,255$  (m/s). Power spectral menggunakan segmen dengan panjang 16834 poin



Gambar 3. Beda tekanan



Gambar 4. Mean beda tekanan



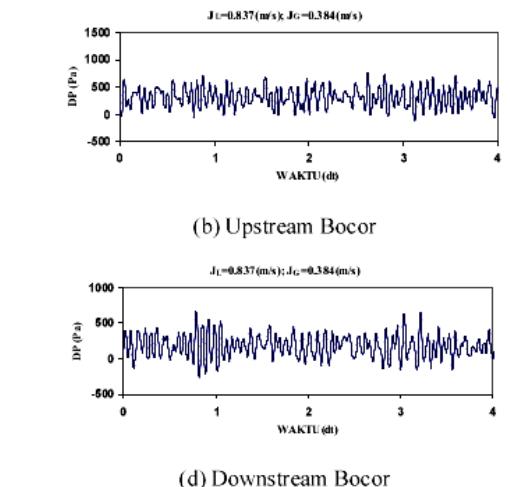
Gambar 5. Rasio Mean beda tekanan

dan Hanning window dengan ukuran yang sama untuk menurunkan varians estimasi. Semua analisa PSD dilakukan dengan menggunakan Toolbox Matlab pemrosesan sinyal (MATLAB 7.6).

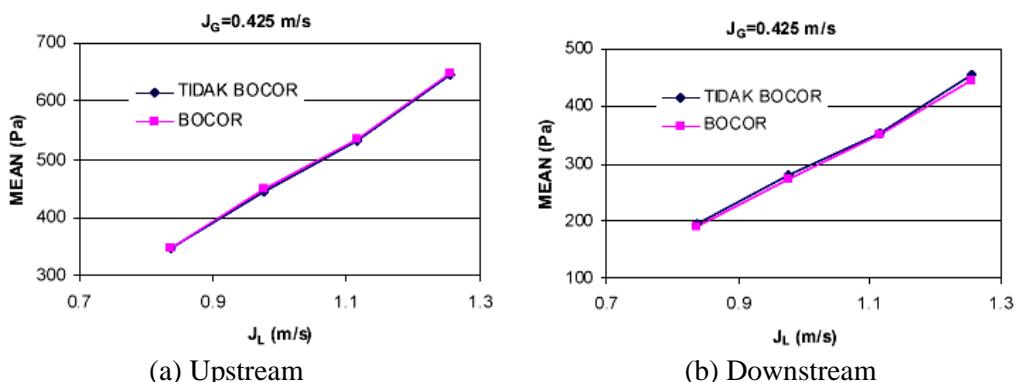
### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1 Domain waktu

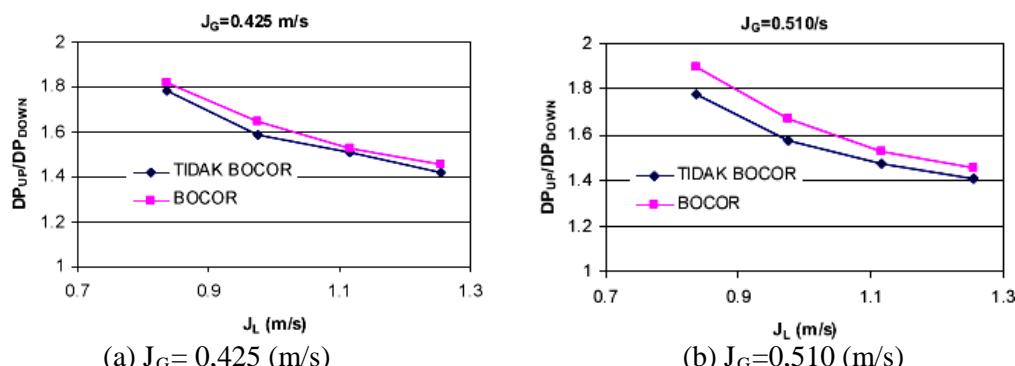
Gambar 3 memperlihatkan beda tekanan upstream dan downstream. Tekanan tersebut berupa data random dalam domain waktu. Untuk mendapat informasi yang diinginkan maka data ini dianalisis menggunakan mean dan PSD.



Gambar 3. Beda tekanan



Gambar 4. Mean beda tekanan



Gambar 5. Rasio Mean beda tekanan

Gambar 4 memperlihatkan perbandingan beda tekanan kondisi tidak bocor dan bocor pada upstream dan downstream. Pada upstream, kondisi bocor tidak menghasilkan perubahan beda tekanan. Pada downstream, kondisi bocor menghasilkan beda tekanan lebih rendah apabila dibandingkan dengan kondisi tidak bocor. Hal ini diakibatkan perubahan tekanan pada titik kebocoran (menjadi tekanan atmosfer).

Kondisi bocor dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 5b. Gambar 5b memperlihatkan perbandingan beda tekanan upstream dengan downstream pada kondisi tidak bocor dan bocor. Perbandingan beda tekanan kondisi bocor lebih tinggi dibanding dengan kondisi tidak bocor pada upstream. Demikian juga pada downstream, perbandingan beda tekanan lebih tinggi dibanding dengan kondisi tidak bocor.

### 3.2 PSD

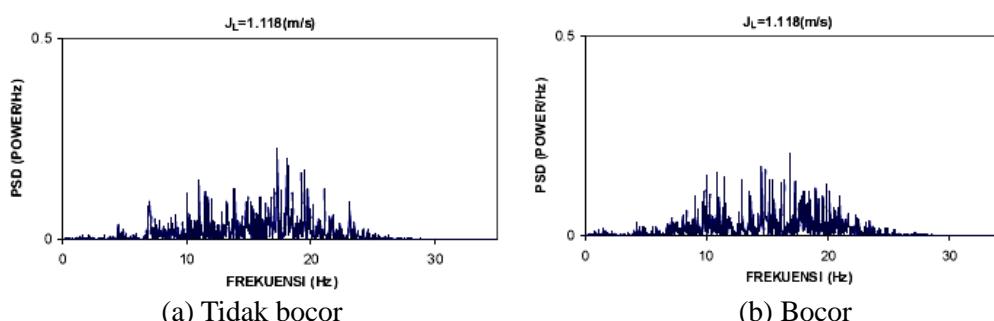
Analisis spektral umumnya digunakan untuk mengungkapkan periodisitas dalam rangkaian waktu. PSD adalah karakteristik domain frekuensi dari rangkaian waktu dan sesuai untuk mendekripsi komposisi frekuensi dalam proses stokastik. Fungsi PSD  $Px(f)$  dari sinyal diskrit waktu  $x(n)$  didefinisikan sebagai *Transformasi Fourier* dari urutan autokorelasi  $Rx(k)$ ,

$$Px(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} Rx(k) e^{i2\pi k f / fs} \quad (1)$$

mana,  $fs$  adalah frekuensi sampling.

Untuk proses autokorelasi-ergodic bernilai real dan jumlah data yang tidak terbatas, urutan autokorelasi mungkin secara teori dapat didekati oleh rata-rata waktu,

$$Rx(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N x(n+k)x(n) \quad (2)$$



Gambar 6. PSD beda tekanan pada upstream

Panjang sinyal yang direkam adalah benar-benar bekerja dengan batas tertentu. Untuk mengurangi distorsi spektrum karena panjang terbatas dari data yang direkam, metode periodogram rata-rata yang dimodifikasi (metode Welch) diadopsi. Jika  $x(n)$  hanya diukur selama interval terbatas, seperti  $n = 0, 1, \dots, N-1$ , maka metode periodogram memperkirakan PSD seperti,

$$Px(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{Rx}(k) e^{i2\pi k f / fs} \quad (3)$$

Dimana autokorelasi tersebut diberikan sebagai,

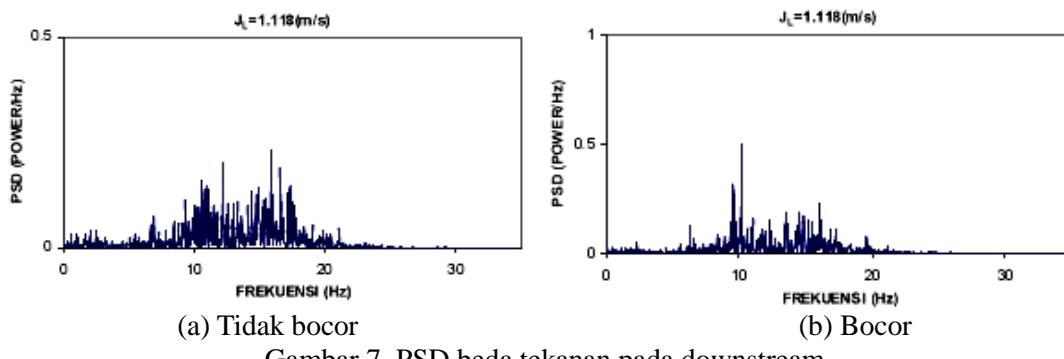
$$\hat{Rx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=-N}^{N-1} x(n+k)x(n) \quad (4)$$

Welch (1967) memodifikasi metode periodogram dengan membagi urutan  $N$ -titik ke segmen yang tumpang tindih. fungsi window diterapkan untuk setiap segmen data dan menghitung periodograms yang sesuai untuk setiap segmen. Periodograms dirata-rata untuk mendapatkan estimasi power spktrum. Rincian lebih lanjut dari metode ini tersedia dalam Proakis dan Manolakis (1996).

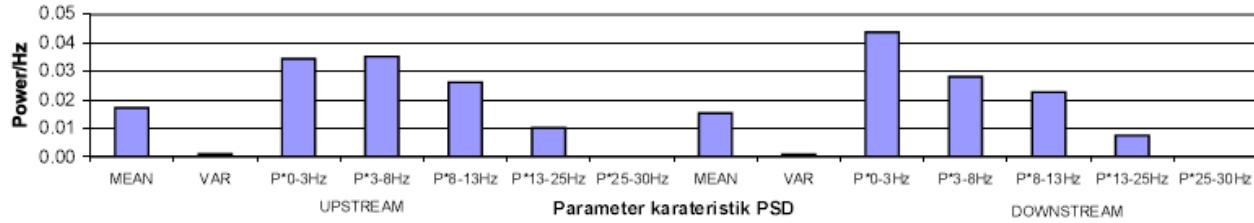
Dalam penelitian ini, fluktuasi beda tekanan dinormalisasi dan didefinisikan,

$$p^* = (p - \bar{p}) / \sqrt{(p - \bar{p})^2} \quad (5)$$

Gambar 6 dan Gambar 7 memperlihatkan PSD beda tekanan kondisi tidak bocor dan bocor pada upstream dan downstream. Harga PSD tersebar antara rentang frekuensi 0 – 28 Hz. Kondisi tidak bocor dan bocor masih sulit dibedakan polanya, karena hal ini disebabkan keduanya masih pada pola aliran plug dan perubahan kecepatan superfisial fluida tidak memberikan perbedaan pola PSD.



Gambar 7. PSD beda tekanan pada downstream



Gambar 8. Parameter karakteristik PSD

### 3.3 Identifikasi pola aliran menggunakan jaringan syaraf perambatan balik

### 3.3.1 Parameter karakteristik PSD

Ekstraksi sinyal *PSD* menjadi parameter karakteristik mempunyai kontribusi yang penting dalam penelitian ini, karena digunakan sebagai input pelatihan jaringan syaraf. Rentang frekuensi *PSD* yang diekstrak adalah 0-30 Hz. Tujuh parameter karakteristik didefinisikan sebagai mean (K1), varian (K2), mean pada 0-3Hz (K3), mean pada 3-8Hz (K4), mean pada 8-13Hz (K5), mean pada 13-25 Hz (K6)

dan mean pada 25-30 Hz (K7) dari sisi upstream. Tujuh parameter karakteristik pada downstream didefinisikan sebagai mean (K8), varian (K9), mean pada 0-3Hz (K10), mean pada 3-8Hz (K11), mean pada 8-13Hz (K12), mean pada 13-25 Hz (K13) dan mean pada 25-30 Hz (K14) dari sisi upstream. Gambar 8 memperlihatkan parameter karakteristik masing-masing pola aliran.

Tabel 1 memperlihatkan bagian dari parameter karakteristik dengan tujuh parameter karakteristik PSD.

Tabel 1. Contoh parameter karakteristik *PSD* dari beda tekanan

Q <sub>air</sub>	Q <sub>data</sub>	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	KONDISI
2 GPM	0.5 SCFH	0.0165	0.0050	0.1086	0.0154	0.0062	0.0063	0.0003	0.0157	0.0131	0.1240	0.0103	0.0052	0.0030	0.0001	TB
2 GPM	0.5 SCFH	0.0188	0.0093	0.1437	0.0102	0.0064	0.0054	0.0005	0.0164	0.0118	0.1241	0.0070	0.0074	0.0050	0.0004	B
3 GPM	0.5 SCFH	0.0151	0.0007	0.0416	0.0178	0.0196	0.0129	0.0003	0.0155	0.0011	0.0439	0.0164	0.0300	0.0097	0.0001	TB
3 GPM	0.5 SCFH	0.0157	0.0008	0.0516	0.0239	0.0170	0.0102	0.0007	0.0143	0.0010	0.0509	0.0166	0.0200	0.0087	0.0003	B
3 GPM	25 GPH	0.0153	0.0019	0.0601	0.0323	0.0197	0.0027	0.0001	0.0166	0.0037	0.0783	0.0342	0.0165	0.0022	0.0001	
3 GPM	25 SCFH	0.0148	0.0016	0.0635	0.0301	0.0172	0.0027	0.0000	0.0158	0.0029	0.0784	0.0350	0.0126	0.0015	0.0000	B
4 GPM	25 GPH	0.0171	0.0010	0.0344	0.0351	0.0261	0.0102	0.0001	0.0153	0.0009	0.0436	0.0280	0.0227	0.0075	0.0001	TB
4 GPM	25 SCFH	0.0160	0.0006	0.0209	0.0263	0.0254	0.0146	0.0001	0.0159	0.0007	0.0327	0.0234	0.0281	0.0115	0.0002	B
5 GPM	25 GPH	0.0160	0.0005	0.0139	0.0239	0.0330	0.0138	0.0005	0.0163	0.0008	0.0202	0.0158	0.0345	0.0161	0.0002	TB
5 GPM	25 SCFH	0.0164	0.0006	0.0122	0.0282	0.0314	0.0143	0.0003	0.0152	0.0006	0.0178	0.0168	0.0356	0.0128	0.0003	B
6 GPM	25 GPH	0.0152	0.0005	0.0077	0.0137	0.0317	0.0183	0.0004	0.0160	0.0009	0.0133	0.0079	0.0378	0.0188	0.0003	TB
6 GPM	25 SCFH	0.0155	0.0005	0.0086	0.0203	0.0316	0.0159	0.0004	0.0159	0.0007	0.0155	0.0140	0.0373	0.0157	0.0003	B
7 GPM	25 GPH	0.0161	0.0006	0.0078	0.0116	0.0331	0.0207	0.0008	0.0161	0.0008	0.0135	0.0083	0.0325	0.0210	0.0005	TB
7 GPM	25 SCFH	0.0166	0.0007	0.0066	0.0187	0.0267	0.0218	0.0011	0.0148	0.0006	0.0119	0.0133	0.0277	0.0179	0.0005	B
8 GPM	25 GPH	0.0155	0.0005	0.0045	0.0126	0.0213	0.0243	0.0012	0.0159	0.0009	0.0054	0.0097	0.0208	0.0269	0.0005	TB
8 GPM	25 SCFH	0.0158	0.0005	0.0078	0.0139	0.0188	0.0247	0.0011	0.0181	0.0010	0.0115	0.0124	0.0288	0.0264	0.0005	B
9 GPM	25 GPH	0.0157	0.0005	0.0052	0.0128	0.0228	0.0238	0.0015	0.0156	0.0007	0.0092	0.0109	0.0262	0.0223	0.0008	TB
9 GPM	25 SCFH	0.0161	0.0006	0.0075	0.0130	0.0239	0.0237	0.0014	0.0165	0.0008	0.0109	0.0103	0.0262	0.0243	0.0006	B
3 GPM	30 SCFH	0.0151	0.0029	0.0846	0.0282	0.0108	0.0015	0.0000	0.0154	0.0049	0.0990	0.0217	0.0085	0.0023	0.0000	TB
3 GPM	30 SCFH	0.0162	0.0065	0.1146	0.0232	0.0076	0.0005	0.0000	0.0162	0.0060	0.1094	0.0269	0.0036	0.0019	0.0000	B
4 GPM	30 SCFH	0.0180	0.0057	0.0982	0.0379	0.0102	0.0018	0.0001	0.0183	0.0072	0.1106	0.0298	0.0107	0.0028	0.0001	TB
4 GPM	30 SCFH	0.0148	0.0013	0.0574	0.0313	0.0175	0.0034	0.0000	0.0170	0.0016	0.0655	0.0309	0.0198	0.0065	0.0001	B
5 GPM	30 SCFH	0.0159	0.0009	0.0340	0.0241	0.0030	0.0099	0.0001	0.0172	0.0015	0.0552	0.0191	0.0279	0.0109	0.0001	TB
5 GPM	30 SCFH	0.0168	0.0009	0.0360	0.0286	0.0043	0.0081	0.0002	0.0169	0.0009	0.0407	0.0212	0.0346	0.0102	0.0001	B
6 GPM	30 SCFH	0.0174	0.0006	0.0160	0.0253	0.0339	0.0162	0.0002	0.0169	0.0008	0.198	0.0109	0.0346	0.0198	0.0003	TB
6 GPM	30 SCFH	0.0162	0.0006	0.0212	0.0227	0.0312	0.0141	0.0004	0.0152	0.0007	0.0300	0.0127	0.0333	0.0124	0.0003	B
7 GPM	30 SCFH	0.0160	0.0006	0.0147	0.0171	0.0290	0.0183	0.0004	0.0166	0.0008	0.166	0.0097	0.0250	0.0242	0.0003	TB
7 GPM	30 SCFH	0.0159	0.0006	0.0108	0.0228	0.0291	0.0164	0.0008	0.0158	0.0006	0.188	0.0153	0.0275	0.0180	0.0006	B
8 GPM	30 SCFH	0.0161	0.0006	0.0069	0.0170	0.0200	0.0239	0.0011	0.0161	0.0008	0.0104	0.0210	0.0225	0.0246	0.0005	TB
8 GPM	30 SCFH	0.0164	0.0005	0.0130	0.0181	0.0241	0.0211	0.0012	0.0181	0.0008	0.198	0.0136	0.0282	0.0242	0.0004	B
9 GPM	30 SCFH	0.0159	0.0005	0.0108	0.0164	0.0208	0.0224	0.0013	0.0162	0.0006	0.158	0.0184	0.0194	0.0227	0.0006	TB

### 3.4.2 Pengidentifikasi aliran menggunakan jaringan syaraf perambatan balik.

Jaringan syaraf dengan lapisan tunggal memiliki keterbatasan dalam pengenalan pola. Kelemahan ini bisa ditanggulangi dengan menambahkan satu atau/beberapa lapisan tersembunyi diantara lapisan masukan dan keluaran. Jaringan syaraf perambatan balik melatih jaringan untuk mendapatkan keseimbangan antara kemampuan jaringan untuk mengenali pola yang akan digunakan selama pelatihan serta kemampuan jaringan untuk memberikan respon yang benar terhadap pola masukan yang serupa (tetapi tidak sama) dengan pola yang dipakai selama pelatihan. Penggunaan lebih dari satu lapisan tersembunyi memiliki kelebihan untuk beberapa

kasus, namun umumnya dimulai dengan mencoba dengan sebuah lapisan tersembunyi lebih dahulu.

Arsitektur jaringan perambatan balik yang digunakan dalam penelitian ini. Arsitektur ini memiliki satu lapisan input (*input layer*) dan dua lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Lapisan input terdiri dari empat belas sel syaraf (neural cell). Lapisan tersembunyi pertama terdiri dari empat belas sel syaraf dan lapisan tersembunyi kedua terdiri dari tujuh sel syaraf. Lapisan output (*output layer*) terdiri dari dua sel syaraf yang berhubungan dengan kondisi bocor (B) dan tidak bocor (TB). Pada artikel ini menghasilkan vektor output untuk kondisi bocor (0,1) dan tidak bocor (1,0).

Tabel 2. Identifikasi hasil jaringan syaraf perambatan balik.

	TIDAK BOCOR	BOCOR
JUMLAH KONDISI OPERASI	7	7
JUMLAH IDENTIFIKASI KONDISI OPERASI BENAR	4	4
AKURASI	57.14%	57.14%

Penelitian ini dilakukan sebanyak 94 kondisi operasi, dimana digunakan untuk pelatihan sebanyak 80 kondisi operasi dan 14 digunakan untuk pengujian. Tabel 2 memperlihatkan hasil identifikasi dan menghasilkan kemampuan identifikasi adalah rendah (57,14%). Perbaikan identifikasi akan diperbaiki dengan input pelatihan yang lain misalkan harga-harga statistik.

## 4. Kesimpulan

Deteksi kebocoran aliran dua fase gas-likuid menggunakan parameter aliran fluida masih jarang diteliti. Alat analisis mean dan PSD telah digunakan untuk menganalisis beda tekanan pada upstream dan downstream untuk membedakan kondisi tidak bocor dan bocor. Identifikasi JST perambatan balik menghasilkan kemampuan yang rendah.

## Ucapan Terimakasih

Sebagian dari penelitian ini telah didukung pembiayaan dari skim Penelitian Hibah Bersaing DIKTI Tahun Anggaran 2012.

## Daftar Notasi

- $J_L$  = kecepatan superfisial air (m/s)
- $J_G$  = kecepatan superfisial udara (m/s)
- DP = beda tekanan (Pa)
- PDF = probability density function
- PSD = power spectral density
- DPT = differential pressure transducer

## Daftar Pustaka

- [1] WU Ming dan Wang Wei-qiang, *Application of Wavelet to Detect Pipeline Leak Point*, Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA'06), 2006.
- [2] Feng Jian dan Zhang Hua, *Diagnosis and Localization of Pipeline Leak Based on Fuzzy Decision-Making Method*, Acta automatica sinica, Vol .31, No. 3: 484-490, 2005,
- [3] Ge Chuanhu, Wang Guizeng, dan Ye Hao, *Analysis of the Smallest Detectable Leakage Flow Rate of Negative Pressure Wave-Based Leak Detection Systems For Liquid Pipelines*, Computers and Chemical Engineering, Vol. 32:1669–1680, 2008.
- [4] H. E.Emara-Shabaik, Y. A. Khulief dan I. Hussaini, *A Non-Linear Multiple-Model State Estimation Scheme for Pipeline Leak Detection and Isolation*, J. Systems and Control Engineering, Vol 216: 498-504, 2002.
- [5] Cristina Verde, Nancy Visairo, dan Sylviane Gentil, *Two Leaks Isolation in a Pipeline by Transient Response*, Advances in Water Resources, Vol. 30:1711–1721, 2007.
- [6] Billmann, L., dan R. Isermann, *Leak Detection Methods for Pipelines*, Automatica, Vol. 23, 3: 381-385, 1987.
- [7] Scott, S. L., dan M. A. Barrufet, *Worldwide Assessment of Industry Leak Detection Capabilities for Single & Multiphase Pipelines*, Project report to Minerals Management Service, 2003.