

ANALISIS DETEKSI AWAL KEBOCORAN PADA JARINGAN PIPA TRANSMISI GAS BUMI SUMATERA UTARA PT X MELALUI PERSAMAAN LAJU ALIR

¹Andreas Readika Bagus Kusuma**, ²Ramon Trisno

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Jakarta

ABSTRAK. Gas bumi di Indonesia disalurkan melalui jaringan pipa transmisi dan jaringan pipa distribusi. Salah satu pipa transmisi yang digunakan adalah pipa transmisi gas bumi Sumatera Utara. Pendeteksian kebocoran pada pipa transmisi Sumatera Utara masih menggunakan metode konvensional yaitu dengan cara inspeksi pada pipa transmisi secara periodik. Metode ini masih memiliki kelemahan antara lain aspek keakurasian, dan kecepatan pendeteksian. Salah satu cara untuk mempercepat deteksi kebocoran pada pipa adalah dengan persamaan laju alir dimana dilakukan melalui perhitungan efisiensi pipa. Analisis kebocoran melalui efisiensi pipa tidak terpengaruh oleh jumlah laju aliran gas yang ada di dalam pipa, juga tidak terpengaruh oleh volume masuk dan volume keluar yang fluktuatif dikarenakan efisiensi pipa relatif tetap walaupun terjadi perubahan jumlah gas. Penelitian ini membandingkan nilai efisiensi pipa aktual yang terukur di lapangan dan nilai efisiensi pipa ideal yang didapatkan dari rumus persamaan laju alir. Beberapa persamaan yang diteliti adalah *Panhandle A*, *Panhandle B*, dan *Weymouth*. Dari hasil analisis didapat persamaan laju alir yang cocok diimplementasikan adalah persamaan *Weymouth*. Kemudian dicari nilai efisiensi pipa dari data histori yang telah terjadi sebelumnya untuk menjadi parameter batas atas dan batas bawah. Apabila nilai efisiensi aktual masih didalam batas atas atau batas bawah daripada nilai efisiensi histori, maka dapat dikatakan bahwa pipa tersebut tidak terdapat kebocoran. Hasil analisis nilai efisiensi pipa berdasarkan persamaan *Weymouth* bahwa nilai tertinggi adalah 64,63%, nilai terendah adalah 41,44%, dan nilai rata – rata adalah 48,03% dengan nilai simpangan baku 0,0604. Untuk mempercepat deteksi awal kebocoran pada pipa transmisi Sumatera Utara dapat dengan melakukan pengukuran nilai efisiensi pipa secara daring (online) dengan dasar persamaan *Weymouth*.

Kata kunci: transmisi; kebocoran; persamaan laju alir; efisiensi pipa.

PENDAHULUAN

PT. X adalah salah satu perusahaan di Indonesia yang bergerak pada bidang niaga dan infrastruktur gas bumi. Salah satu metode yang digunakan untuk mengalirkan Gas Bumi di Indonesia adalah melalui jaringan pipa transmisi. Salah satu pipa transmisi gas bumi yang dimiliki dan dioperasikan oleh PT X adalah pipa transmisi Sumatera Utara. Panjang pipa transmisi gas bumi Sumatera Utara adalah 13 km dan menyalurkan gas bumi mencapai 12 juta kaki kubik per hari (MMSCFD) untuk kebutuhan pembangkit listrik.

Kehandalan pipa transmisi sangat vital untuk keberlangsungan penyaluran gas bumi ke pembangkit listrik pada khususnya dan kehandalan penyediaan listrik untuk wilayah Sumatera Utara pada umumnya. Kehandalan pipa transmisi didukung salah satunya dengan sistem deteksi kebocoran (*Leak Detection System*). Selain itu, kebocoran dapat menyebabkan kerusakan lingkungan dan dapat berbahaya bagi manusia. Oleh karena fungsi vital tersebut, kinerja sistem deteksi kebocoran perlu senantiasa dievaluasi dan ditingkatkan untuk menjaga kehandalan pipa transmisi.

Karena memiliki fungsi vital, sistem pendeteksian kebocoran pada pipa transmisi Sumatera Utara salah satunya masih menggunakan metode konvensional yaitu dengan cara patroli atau inspeksi pada pipa transmisi

1** Corresponding author: andreasreadika@gmail.com; 2*ramon_t@univpancasila.ac.id

yang dilakukan oleh Tim Patroli yang terdiri dari beberapa orang dan bekerja secara periodik. Metode ini masih memiliki beberapa kelemahan diantaranya aspek keakurasian dan sensitivitas, aspek waktu, dan *safety*.

Telah dilakukan penelitian terkait deteksi awal kebocoran pada pipa. Berdasarkan penelitian oleh Payal Gupta, dkk. yaitu deteksi kebocoran pipa jaringan distribusi menggunakan probabilitas. Pada dasarnya penelitian ini mencari lokasi kebocoran pada jaringan distribusi berdasarkan probabilitas, proses simulasi, dan pembacaan sensor. Metode ini mampu mendeteksi kemungkinan lokasi kebocoran pipa [1]. Namun, metode ini masih memiliki kelemahan yaitu hanya cocok pada tekanan rendah, hanya cocok diimplementasikan pada pipa jaringan distribusi, dan hasil akan lebih baik apabila menggunakan lebih banyak sensor pembaca.

Metode deteksi kebocoran yang dilakukan L. Billmann dan R. Issermann adalah berdasarkan jumlah volume gas yang masuk dibandingkan volume gas yang keluar. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa deteksi kebocoran dapat dihitung secara matematis [2]. Namun metode tersebut masih memiliki kelemahan yaitu metode validasi data yang masih memakan waktu yang lama. Hal ini disebabkan oleh proses pembacaan volume dilakukan beberapa kali untuk menghindari bias akibat perubahan volume yang fluktuatif.

Maka, untuk mengatasi kelemahan – kelemahan terhadap penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dilakukanlah penelitian tentang deteksi awal kebocoran pipa melalui persamaan laju alir melalui parameter efisiensi pipa. Tujuan penelitian ini salah satunya adalah untuk mempercepat untuk melakukan deteksi awal kebocoran pada pipa transmisi Sumatera Utara. Hal ini dikarenakan deteksi kebocoran melalui efisiensi pipa tidak terpengaruh oleh jumlah laju aliran gas yang ada di dalam pipa, juga tidak terpengaruh oleh volume masuk dan volume keluar yang fluktuatif dikarenakan efisiensi pipa relatif tetap walaupun terjadi perubahan jumlah gas [3]. Beberapa persamaan yang diteliti pada penulisan ini adalah persamaan Panhandle A, Panhandle B, dan Weymouth. Setelah didapat persamaan yang tepat, dapat dilakukan penelitian lebih lanjut untuk melakukan otomatisasi deteksi kebocoran pipa berdasarkan persamaan yang tepat.

METODE

a. Metode Analisis

Secara umum terdapat tiga metode deteksi kebocoran pipa yang biasanya digunakan yaitu: *Inspection Method*; *Sensing Devices*; dan *Computational Pipeline Monitoring Methods* [4]. Penelitian ini merupakan termasuk dalam metode *Computational Pipeline Monitoring Methods*. Penelitian ini mengkaji tentang metode pendeteksian kebocoran pada pipa transmisi Sumatera Utara pada PT X melalui persamaan laju alir. Secara khusus dilakukan analisis nilai efisiensi pipa aktual dan nilai efisiensi pipa ideal (yang didapatkan dari rumus persamaan laju alir). Dari hasil yang didapat, kemudian dicari nilai efisiensi pipa dari data histori yang telah terjadi sebelumnya untuk menjadi parameter batas atas dan batas bawah. Apabila nilai efisiensi aktual masih didalam batas atas atau batas bawah daripada nilai efisiensi histori, maka dapat dikatakan bahwa pipa tersebut tidak terdapat kebocoran. Tujuannya adalah untuk membuat suatu metode deteksi kebocoran gas dengan cepat dan dapat diaplikasikan pada jaringan gas yang memiliki karakteristik tertentu.

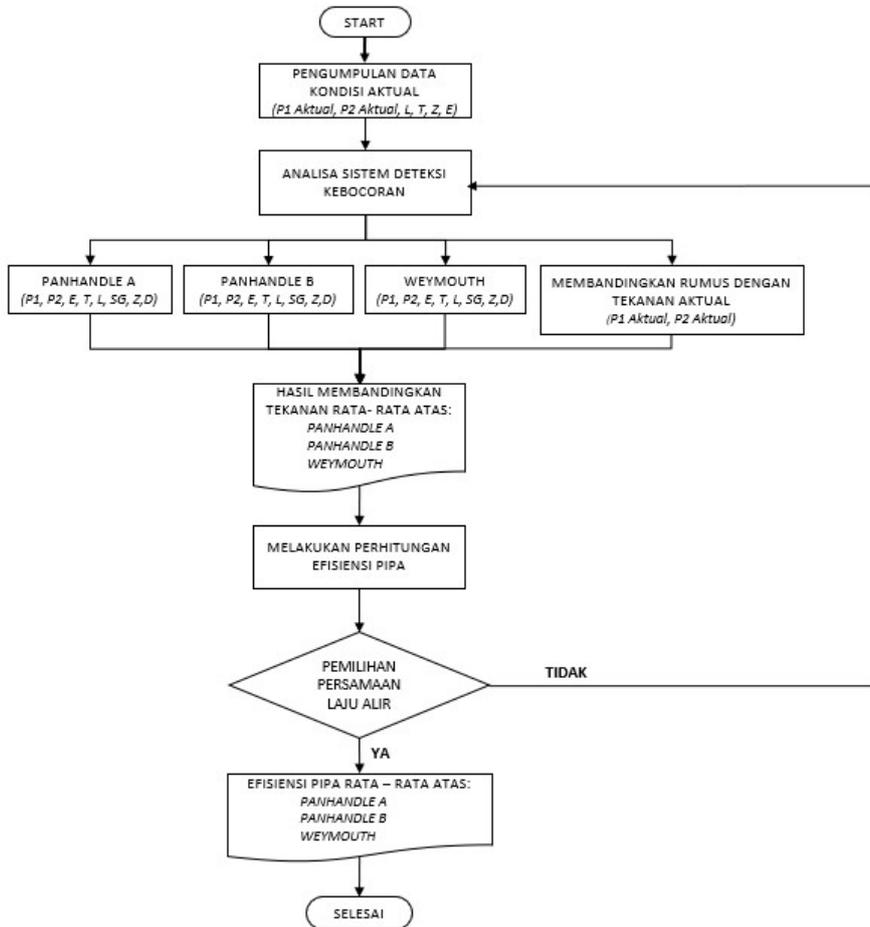
Parameter – parameter operasi yang digunakan antara lain tekanan masuk (P_1), tekanan keluar (P_2), temperature gas rata – rata (T_f), nilai *specific gravity* gas (G), faktor kompresibilitas gas (Z), diameter (D) dan panjang pipa (L_e), dan laju alir gas (Q) yang melalui pipa transmisi Sumatera Utara. Data yang digunakan diambil dari data *record* kondisi lapangan dan data aktual kondisi lapangan. Diagram alir yang menggambarkan metode penelitian dapat dilihat pada gambar 1.

b. Pengambilan Data

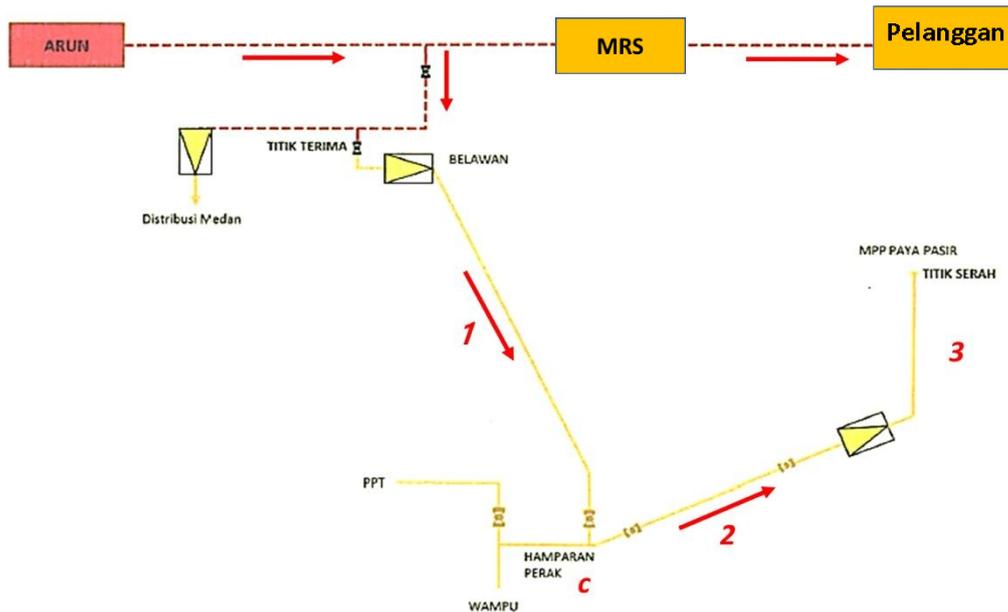
Penyaluran gas bumi telah berlangsung di jaringan pipa transmisi Sumatera Utara dilakukan salah satunya untuk memenuhi kebutuhan pelanggan gas bumi *Mobile Power Plant* (MPP) Paya Pasir. Data yang digunakan diambil dari data *record* kondisi lapangan dan data aktual kondisi lapangan. Prosedur pengambilan melalui tahapan-tahapan sebagai berikut:

- Melakukan pengukuran tekanan dengan alat *pressure transmitter* yang terdiri dari dua buah dan ditempatkan pada titik masuk (P_1) serta titik keluar (P_2) setiap segmen pipa.

- b. Melakukan pengukuran laju alir dengan alat *flow transmitter* yang terdiri dari dua buah dan ditempatkan pada titik masuk (P_1) serta titik keluar (P_2) setiap segmen pipa.
- c. Melakukan pengukuran temperatur dengan alat *temperature transmitter* yang ada di setiap segmen pipa.
- d. Melakukan pengukuran komposisi gas yang mengalir melalui pipa dengan alat kromatografi gas.
- e. Melakukan perhitungan faktor kompresibilitas gas dengan menggunakan alat *flow computer/EVC*.
- f. Memasukkan data-data operasi dan hasil pengukuran yang telah dilakukan dengan menggunakan *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)*.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 2 Skematik dan pembagian segmen pipa transmisi Sumatera Utara

HASIL

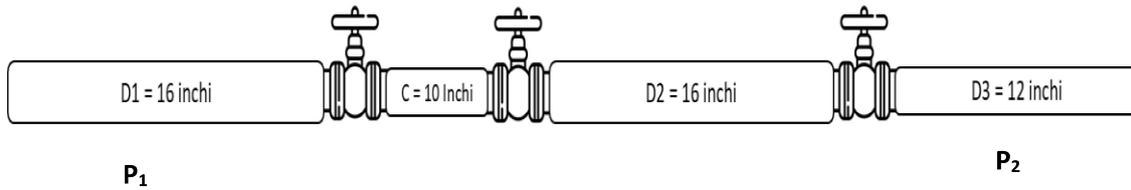
Sistem deteksi kebocoran berdasarkan persamaan laju alir gas pada dasarnya adalah menghitung perbedaan hasil pengukuran *pressure transmitter* yang ada di titik masuk dan titik keluar. Dari hasil pengukuran tersebut akan didapatkan nilai penurunan tekanan aktual. Dari hasil perhitungan melalui rumus persamaan laju alir maka akan didapatkan nilai penurunan tekanan ideal [3]. Data konstanta yang dipakai dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 Nilai Konstanta yang Digunakan

Keterangan	Satuan	Nilai
<i>Pressure Base</i> (P_b)	psi	14,7
<i>Temperature Base</i> (T_b)	K	273
<i>Specific Gravity</i> (G)	–	0,63
Faktor Kompresibilitas (Z)	–	0,96
Diameter (D)	inchi	16
Panjang Pipa (L)	km	13,29

a. Menghitung Panjang Equivalen Pipa

Pipa transmisi Sumatera Utara terdiri dari beberapa segmen yang memiliki diameter dan panjang pipa yang berbeda. Pipa transmisi Sumatera Utara titik pengukurannya tidak tersedia pada setiap segmen pipa. Hanya terdapat titik pengukuran – pengukuran pada titik masuk dan titik keluar pipa transmisi. Untuk memudahkan perhitungan, dilakukan perhitungan untuk menentukan panjang pipa equivalen [5], [6].



Gambar 3 Ilustrasi Perbedaan Diameter dan Titik P_1 dan Titik P_2

Pipa transmisi Sumatera Utara memiliki tiga segmen dan satu pipa *connecting*. Total panjang pipa transmisi adalah 13,29 km. Data panjang dan diameter dalam pipa dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 Panjang dan Diameter Segmen Pipa

Segmen	Panjang (km)	Diameter Dalam (inchi)
Segmen A	9,56	16
<i>Connecting</i>	0,0276	10
Segmen B	3,14	16
Segmen C	0,0712	12

Untuk dapat melakukan proses analisis, maka perlu dilakukan perhitungan panjang pipa ekuivalen. Pipa transmisi dibuat menjadi ekuivalen dengan diameter 16 inchi. Rumus untuk mencari panjang pipa ekuivalen adalah sebagai berikut [5]:

$$Le = L_1 + L_2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^5 + L_3 \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^5 \quad (1)$$

Dimana:

- Le = Panjang pipa ekuivalen total, (km)
- L_1 = Panjang pipa pada segmen 1, (km)
- L_2 = Panjang ekuivalen segmen 2, (km)
- L_3 = Panjang ekuivalen segmen 3, (km)
- D_1 = Diameter pipa segmen 1, (inchi)
- D_2 = Diameter pipa segmen 2, (inchi)
- D_3 = Diameter pipa segmen 3, (inchi)

Hasil perhitungan panjang pipa ekuivalen adalah sebagai berikut:

$$L_e = 9,56 + 0,0276 \left(\frac{16}{10} \right)^5 + 3,14 \left(\frac{16}{16} \right)^5 + 0,0712 \left(\frac{16}{12} \right)^5$$

$$L_e = 13,29 \text{ km}$$

b. Perbandingan Hasil Perhitungan Antar Persamaan

Persamaan laju alir yang akan diuji coba antara lain Panhandle A, Panhandle B, dan Weymouth. Ketiga persamaan tersebut adalah persamaan yang sering digunakan untuk menghitung *linepack*, volume, dan laju alir gas untuk pipa transmisi. Hasil perhitungan atas persamaan laju alir yang diuji tersebut kemudian dibandingkan dengan kondisi aktual di lapangan. Perbedaan tersebut dapat menjadi acuan seberapa dekat hasil perhitungan persamaan laju alir dengan kondisi aktual di lapangan. Persamaan laju alir yang memiliki persentase nilai P_2 ideal dan P_2 aktual paling tinggi (mendekati 100%) yang akan dipilih untuk diimplementasikan. Berikut adalah rumus dari persamaan yang digunakan [6], [7]:

2) Panhandle A

$$Q = 4,5965 \times 10^{-3} E \left(\frac{Tb}{Pb} \right)^{1,0788} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{G^{0,8539} T_f L_e Z} \right)^{0,5394} D^{2,6182} \quad (2)$$

3) Panhandle B

$$Q = 1,002 \times 10^{-2} E \left(\frac{Tb}{Pb} \right)^{1,02} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{G^{0,961} T_f L_e Z} \right)^{0,51} D^{2,53} \quad (3)$$

4) Weymouth

$$Q = 3,7435 \times 10^{-3} E \left(\frac{Tb}{Pb} \right) \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{G T_f L_e Z} \right)^{0,5} D^{2,667} \quad (4)$$

Dimana:

Q = Volume laju aliran, (standar m³/hari)

E = Efisiensi pipa (%)

Pb = *Pressure base*, (psia)

Tb = *Temperature base*, (K (273 + C))

P_1 = Tekanan masuk, (kPa)

P_2 = Tekanan keluar, (kPa)

G = *Specific gravity*

T_f = Temperatur rata-rata, (C)

L_e = Panjang ekuivalen segmen pipa, (km)

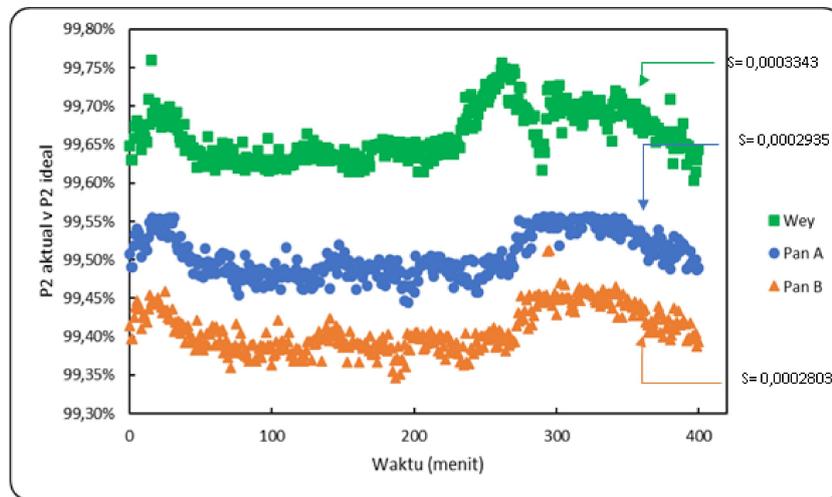
Z = Faktor kompresibilitas

D = Diameter dalam pipa, (inchi)

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan didapatkan hasil perbandingan antara P_2 ideal dan P_2 aktual tiap – tiap persamaan. Dari gambar 4 dapat diketahui bahwa persamaan Weymouth memiliki persentase paling tinggi daripada persamaan lainnya. Selain itu, dari tabel 3 diketahui juga bahwa persamaan Weymouth memiliki persentase perbandingan P_2 ideal dan P_2 aktual paling tinggi diantara persamaan lainnya.

Tabel 3 Hasil Persentase Perbandingan P_2 Antar Persamaan

Keterangan	Panhandle A	Panhandle B	Weymouth
Nilai Tertinggi	99,5565%	99,51206%	99,75985%
Nilai Terendah	99,4415%	99,34659%	99,60344%
Rata-Rata	99,5023%	99,40856%	99,66175%
Simpangan Baku	0,0002935	0,0002802	0,0003343



Gambar 4 Perbandingan Nilai P_2 Aktual dan P_2 Ideal antar Persamaan

Menghitung Nilai Efisiensi Pipa

Mencari nilai efisiensi pipa, dapat digunakan persamaan Panhandle A, Panhandle B dan Weymouth. Dimana rumus tersebut membandingkan penurunan tekanan aktual dengan penurunan tekanan ideal. Penurunan tekanan aktual didapatkan dari hasil pengukuran di lapangan. Data tekanan keluar aktual didapatkan dari hasil pengukuran alat pressure transmitter yang ada di titik masuk yaitu di Stasiun Gas Belawan. Data tekanan keluar aktual didapatkan dari hasil pengukuran alat *pressure transmitter* yang ada di titik keluar yaitu di Stasiun Gas MPP Paya Pasir. Sedangkan penurunan tekanan ideal didapatkan dari perhitungan menggunakan persamaan laju alir Panhandle A, Panhandle B, dan Weymouth. Pada dasarnya, untuk mencari efisiensi pipa dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [3]:

$$E = \frac{\Delta P_{ideal}}{\Delta P_{aktual}} \quad (5)$$

Dimana:

$\Delta P_{ideal} = (P_1^2 - P_2^2)$ yang didapatkan dari persamaan laju alir

$\Delta P_{aktual} = (P_1^2 - P_2^2)$ yang didapatkan dari pengukuran di lapangan

Untuk mendapatkan nilai ΔP ideal dapat digunakan persamaan Panhandle A, Panhandle B, dan Weymouth. Dari persamaan tersebut dilakukan perhitungan perbedaan antara tekanan masuk dan tekanan keluar. Penyesuaian terhadap persamaan untuk mencari ΔP ideal adalah sebagai berikut:

1) Panhandle A

$$(P_1^2 - P_2^2)_{ideal} = \left(\frac{Q}{435,87 \left(\frac{Tb}{Pb} \right)^{1,0788} D^{2,6182}} \right)^{\left(\frac{1}{0,5394} \right)} G^{0,8539} L_e T_f Z \quad (6)$$

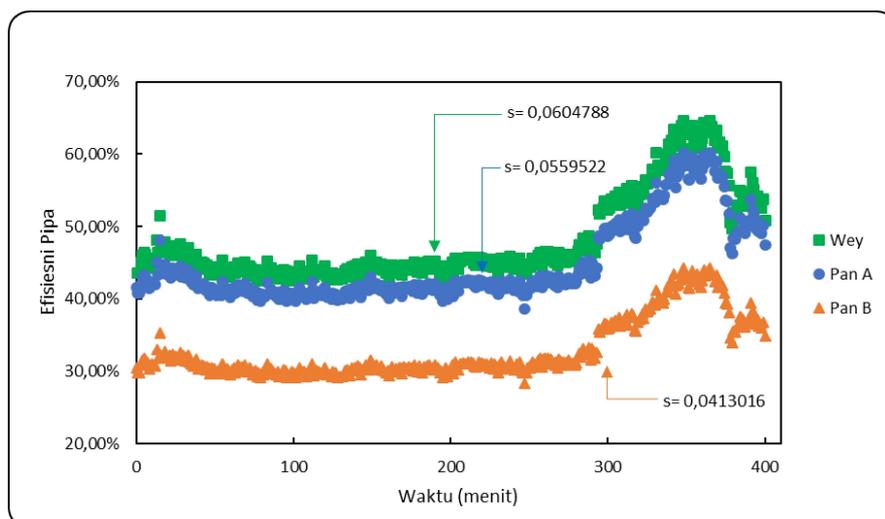
2) Panhandle B

$$(P_1^2 - P_2^2)_{ideal} = \left(\frac{Q}{737E \left(\frac{Tb}{Pb} \right)^{1,02} D^{2,52}} \right)^{\left(\frac{1}{0,51} \right)} G^{0,961} T_f L_e Z \quad (7)$$

3) Weymouth

$$(P_1^2 - P_2^2)_{ideal} = \left(\frac{Q}{433,5E \left(\frac{Tb}{Pb} \right) D^{2,667}} \right)^{\left(\frac{1}{0,5} \right)} G T_f L_e Z \quad (8)$$

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan berdasarkan persamaan (6), (7), dan (8) didapatkan hasil perhitungan ΔP ideal. Atas hasil perhitungan tersebut kemudian disubstitusikan ke dalam perhitungan efisiensi sesuai dengan persamaan (5). Setelah didapatkan hasil perhitungan efisiensi, dari gambar 5 diketahui bahwa persamaan Weymouth memiliki persentase perbandingan efisiensi paling tinggi daripada persamaan lainnya. Dan simpangan baku dari persamaan Weymouth merupakan yang paling tinggi.



Gambar 5 Perbandingan Efisiensi Persamaan

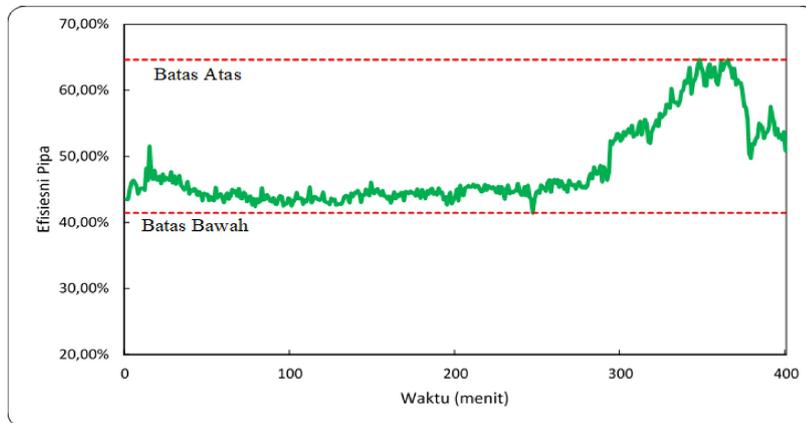
Untuk presentase nilai tertinggi, nilai terendah, nilai rata – rata, dan nilai simpangan baku untuk persamaan Panhandle A, Panhandle B, dan Weymouth dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4 Perbandingan Efisiensi dan Simpangan Baku Tiap Persamaan

Keterangan	Panhandle A	Panhandle B	Weymouth
Nilai Tertinggi	60,1670%	44,2100%	64,6344%
Nilai Terendah	38,6010%	28,3500%	41,4433%
Rata - Rata	44,8000%	32,8724%	48,0310%
Simpangan Baku	0,0559522	0,0413016	0,0604788

Deteksi Kebocoran Pipa

Dari hasil perhitungan perbandingan antara P_2 aktual dan P_2 ideal telah didapatkan hasil bahwa persamaan Weymouth memiliki presentase yang paling tinggi diantara persamaan lainnya. Begitu pula dari perhitungan nilai efisiensi, didapatkan hasil yang menyatakan bahwa persamaan Weymouth memiliki nilai efisiensi yang paling tinggi. Sehingga dapat diartikan bahwa persamaan Weymouth cocok diimplementasikan untuk menjadi acuan dalam mendeteksi kebocoran pipa transmisi Sumatera Utara. Selain itu persamaan Weymouth memiliki karakteristik yang sesuai dengan pipa transmisi Sumatera Utara.



Gambar 6 Batas Atas dan Batas Bawah Efisiensi Pipa

Metode deteksi kebocoran pipa transmisi Sumatera Utara yang akan diimplementasikan adalah dengan menggunakan persamaan laju alir. Parameter yang penting dan menjadi acuan adalah parameter efisiensi. Tujuannya adalah untuk membuat suatu metode deteksi kebocoran gas dengan cepat dan dapat diaplikasikan pada jaringan gas yang memiliki karakteristik tertentu. Karakteristik yang dimaksud adalah jumlah gas yang masuk dan keluar tidak stabil sehingga mempengaruhi perbedaan tekanan. Nilai Efisiensi pipa didapatkan dengan membandingkan penurunan tekanan ideal yang didapatkan dari persamaan Weymouth dengan penurunan tekanan yang didapatkan dari hasil pengukuran di lapangan.

Berdasarkan data historis kondisi operasi transmisi Sumatera Utara yang tergambar pada gambar 5 dan gambar 6 serta tabel 4 dapat diketahui nilai tertinggi dan nilai terendah dari grafik nilai efisiensi pipa berdasarkan persamaan Weymouth. Sehingga diketahui batas bawah dan batas atas dari nilai efisiensi pipa transmisi Sumatera Utara. Hasil perhitungan nilai efisiensi pipa diketahui bahwa nilai tertinggi yang menjadi batas atas adalah 64,63% dan nilai terendah yang menjadi batas bawah adalah 41,44%. Apabila nilai efisiensi pipa melebihi batas – batas tersebut menandakan bahwa telah terjadi penurunan efisiensi pipa yang salah satunya disebabkan oleh kebocoran pipa. Hal ini terjadi karena apabila terjadi kebocoran, terjadi perubahan *pressure drop* yang diluar kondisi normal. Sehingga jika hasil pengukuran nilai efisiensi aktual melebihi batas – batas tersebut, dapat disinyalir bahwa terjadi kebocoran gas bumi. Dengan demikian, hal ini dapat mempermudah dan mempercepat untuk mendeteksi kebocoran pipa transmisi Sumatera Utara. Nilai efisiensi pipa yang telah didapatkan kemudian dibandingkan dengan nilai efisiensi berdasarkan data historis. Apabila nilai efisiensi yang terukur melebihi batas atas dan batas bawah nilai efisiensi, maka dapat disinyalir telah terjadi kebocoran pipa gas.

Dengan menggunakan metode ini, terdapat beberapa kelebihan, antara lain:

- 1) Metode deteksi awal kebocoran dapat dilakukan dengan lebih cepat.
- 2) Deteksi awal kebocoran pada pipa gas dapat lebih akurat karena tidak terpengaruh jumlah gas yang ada di dalam pipa (*linepack*).
- 3) Dapat digunakan pada jaringan pipa yang memiliki pasokan yang tidak stabil karena efisiensi pipa relatif tetap meskipun terjadi ketidakstabilan pasokan.
- 4) Metode ini dapat diaplikasikan menjadi deteksi awal kebocoran secara daring (*online*).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan penelitian yang telah dilakukan atas pipa transmisi Sumatera Utara, dapat diambil simpulan sebagai berikut:

- 1) Hasil analisis menunjukkan bahwa deteksi awal kebocoran pipa dapat dilakukan melalui persamaan laju alir dengan metode mengukur parameter efisiensi yang terdapat pada persamaan laju alir. Hasil perhitungan nilai efisiensi pipa berdasarkan persamaan Weymouth diketahui bahwa nilai tertinggi adalah 64,63%, nilai terendah adalah 41,44%, dan nilai rata – rata adalah 48,03% dengan nilai simpangan baku 0,0604.
- 2) Hasil analisis menunjukkan bahwa persamaan laju alir yang cocok untuk diimplementasikan untuk deteksi awal kebocoran pada pipa transmisi Sumatera Utara adalah persamaan Weymouth.
- 3) Solusi untuk mempercepat deteksi awal kebocoran pada pipa transmisi Sumatera Utara adalah dengan melakukan pengukuran nilai efisiensi pipa secara daring (*online*) dengan teknologi SCADA dengan dasar persamaan Weymouth.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Gupta, T. Tar, T. Zan, M. Wang, J. Dauwels, and A. Ukil, “Journal of Natural Gas Science and Engineering Leak detection in low-pressure gas distribution networks by probabilistic,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 58, no. April, pp. 69–79, 2018.
- [2] L. Billman and R. Isermann, “Leak Detection Methods for Pipelines,” vol. 23, no. 3, 1987.
- [3] M. S. Yoon, C. B. Warren, and S. Adam, *Pipeline System Automation and Control*. Newyork: ASME, 2007.
- [4] H. P. Sumasaputra and W. D. Wibowo, “Paten Proses Deteksi Kebocora Pada Jaringan Pipa Gas,” No. 2018/S/00293, 2018.
- [5] C. U. Ikoku, *Natural Gas Production Engineering*. Florida: Krieger Publishing Company, 1992.
- [6] E. S. Menon, *Gas Pipeline Hydraulics*. Newyork: CRC Press, 2005.
- [7] H. Amani, H. Kariminezhad, and H. Kazemzadeh, “Development of natural gas flow rate in pipeline networks based on unsteady state Weymouth equation,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 33, pp. 427–437, Jul. 2016.