

Pengembangan dan Aplikasi Prototipe Pendiferensial Tekanan untuk Deteksi Kebocoran pada Sistem Pneumatik

Harus Laksana Guntur

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS, Surabaya

Email: masharus@me.its.ac.id

ABSTRAK

Di dalam sistem pneumatik nilai diferensial tekanan seringkali digunakan untuk tujuan tertentu, misalnya sebagai umpan balik pada proses pengendalian tekanan. Alat yang digunakan untuk mendapatkan nilai diferensial ini disebut pendiferensial tekanan (*pressure differentiator*). Pada penelitian ini dikembangkan sebuah prototipe pendiferensial tekanan dengan tambahan berupa ruang isothermal. Penambahan ini bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pengukuran yang terjadi akibat fluktuasi temperatur yang disebabkan oleh perubahan tekanan pada objek ukur. Hasil pengujian prototipe menunjukkan bahwa pendiferensial tekanan dengan ruang isothermal memiliki akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pendiferensial tekanan dengan ruang biasa. Setelah diuji kemudian prototipe digunakan untuk mendeteksi kebocoran pipa udara. Hasil pendeteksian yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai diferensial tekanan meningkat jika tingkat kebocoran bertambah, yaitu -20Pa dan -75Pa untuk tingkat kebocoran $2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ dan $3 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$. Hal ini membuktikan bahwa pendiferensial tekanan juga bisa digunakan sebagai alat pendeteksi kebocoran udara.

Kata kunci: Sistem pneumatik, pendiferensial tekanan, ruang isothermal, deteksi kebocoran.

ABSTRACT

In a pneumatic system, the differentiated value of pressure is often used for special objective. For instance, in process control of pressure the differentiated value of pressure is used as feedback. The mechanism used to obtain the differentiated value of pressure is called pressure differentiator. In this research, we developed a pressure differentiator by adding an isothermal chamber to minimize error caused by temperature fluctuations. The developed prototype was tested and the result show that the pressure differentiator with isothermal chamber in it has higher accuracy as compared with the one without isothermal chamber. The prototype was also applied to detect leak of a pneumatic piping system. The results show that the differentiated pressure increases as the leak size increases: -20Pa and -75Pa for leak size of $2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ and $3 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$, respectively. The results also proved that the developed pressure differentiator is applicable for leak detection.

Keywords: Pneumatic system, pressure differentiator, isothermal chamber, leak detection.

PENDAHULUAN

Dalam sistem pneumatik, selain diperlukan pengukuran tekanan, aliran dan temperatur juga diperlukan pengukuran nilai diferensial tekanan. Karena pada beberapa aplikasi sistem pneumatik, dibutuhkan informasi langsung tentang nilai laju perubahan tekanan terhadap waktu. Seperti pada proses pengukuran tingkat kebocoran udara yang mana bisa dilihat dari nilai laju perubahan tekanannya. Alat yang digunakan untuk mengukur nilai diferensial tekanan disebut pendiferensial tekanan. Salah satu bentuk penggunaan dari pendiferensial tekanan adalah pengendalian tekanan pada ruang peredam getaran dan suspensi udara. Pada sistem pengendalian tekanan ini, nilai

diferensial tekanan digunakan sebagai umpan balik bagi proses pengendalian. Kawashima et al. [1] dan Kato et al. [2, 3] mengembangkan dan menggunakan pendiferensial tekanan dalam pengendalian sistem suspensi udara atau sistem pneumatik peredam getaran presisi tinggi yang digunakan pada teknologi semikonduktor. Kelemahan dari pendiferensial tekanan ini adalah ketidakmampuannya meredam fluktuasi temperatur. Hal ini disebabkan oleh penggunaan tangki biasa (*normal tank*) dalam desain pendiferensial tekanan. Akibatnya, kesalahan pengukuran yang terjadi masih tinggi, yaitu di atas 5%.

Di dalam makalahnya, Kawashima et al. [4, 5] melaporkan pengaruh fluktuasi temperatur terhadap hasil pengukuran aliran dinamis dari udara

pada komponen pneumatik, yaitu dengan menggunakan tangki isothermal (*isothermal tank*) kesalahan pengukuran akibat fluktuasi temperatur bisa direduksi hingga mencapai 3%. Selanjutnya, Harus et al. [6, 7, 8, 9] meneliti proses pendeteksian kebocoran udara pada sistem pneumatik dengan menggunakan prinsip perubahan tekanan dan perubahan beda tekanan. Di dalam penelitiannya, kebocoran dideteksi dengan cara memonitor perubahan tekanan dan perubahan beda tekanan. Dari hasil penelitian ini diungkapkan bahwa pendiferensial tekanan dapat digunakan sebagai pengganti sensor tekanan/sensor beda tekanan yang digunakan untuk mendeteksi kebocoran.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan pendiferensial tekanan dengan menggunakan ruang isothermal (*isothermal chamber*) sebagai pengganti ruang biasa (*normal chamber*) yang digunakan dalam pendiferensial tekanan sebelumnya. Pendiferensial tekanan yang dikembangkan kemudian diuji dan hasil pengujian yang diperoleh dibandingkan dengan hasil pengujian dari pendiferensial tekanan sebelumnya. Hasil rancangan bangun dari prototipe pendiferensial tekanan selanjutnya digunakan dalam pendeteksian kebocoran pipa udara. Hal ini bertujuan untuk mengetahui apakah prototipe yang dihasilkan bisa digunakan sebagai metode alternatif pendeteksian kebocoran udara, di samping metode yang dikembangkan oleh Harus LG [6, 7, 8, 9].

Nomenklatur

<i>H</i> : Tinggi kanal	[m]
<i>L</i> : Panjang kanal	[m]
<i>M</i> : Massa udara	[kg]
<i>N</i> : Jumlah kanal dalam kanal alir	
<i>P</i> : Tekanan	[Pa]
<i>P_a</i> : Tekanan atmosfer/lingkungan	[Pa]
<i>P_s</i> : Tekanan objek ukur	[Pa]
<i>P_c</i> : Tekanan ruang isothermal	[Pa]
<i>Q</i> : Laju aliran	[Nl/min]
<i>R</i> : Konstanta gas ideal	[J/(kg·K)]
<i>T</i> : Temperatur	[K]
<i>T_a</i> : Temperatur atmosfer/lingkungan	[K]
<i>T_s</i> : Temperatur objek ukur	[K]
<i>T_c</i> : Temperatur ruang isothermal	[K]
<i>t</i> : Waktu	[s]
<i>V</i> : Volume	[m ³]
<i>z</i> : Lebar kanal	[m]
<i>μ</i> : Viskositas udara/gas	[Pa.s]
<i>ρ_a</i> : Massa jenis udara/gas	[kg/m ³]

METODE PENELITIAN

Konsep Perencanaan Prototipe

Rancangan pendiferensial tekanan yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam rancangan

ini pendiferensial tekanan tersusun atas sebuah ruang isothermal, kanal alir dan sensor beda tekanan. Prinsip kerja dari alat ini adalah apabila tekanan *P_s* pada obyek ukur mengalami perubahan maka udara/gas akan mengalir melalui kanal alir menuju ruang isothermal. Akibatnya, tekanan *P_c* pada ruang isothermal mengalami perubahan hingga terjadi keseimbangan antara tekanan pada objek ukur dengan tekanan pada ruang isothermal. Nilai diferensial tekanan $\frac{dP_c}{dt}$ sebagai fungsi waktu selanjutnya dapat ditentukan apabila beda tekanan antara obyek ukur dan ruang isothermal dapat ditentukan.

Secara matematis diferensial tekanan yang terjadi dapat ditentukan berdasarkan Gambar 1. Jika diasumsikan bahwa gas dalam ruang isothermal merupakan gas ideal maka hubungan antara tekanan ruang *P_c*, volume ruang *V_c*, massa gas *m_c* dan temperatur ruang *T_c* adalah sebagai berikut:

$$P_c V_c = m_c R T_c, \tag{1}$$

Diferensial Persamaan (1) terhadap waktu menghasilkan:

$$V_c \frac{dP_c}{dt} + P_c \frac{dV_c}{dt} = \frac{dm_c}{dt} R T_c + m_c R \frac{dT_c}{dt} \tag{2}$$

Jika volume ruang konstan dan ruang bersifat isothermal (temperatur dalam ruang isothermal *T_c=T_a*), maka Persamaan 2 menjadi:

$$V_c \frac{dP_c}{dt} = \frac{dm_c}{dt} R T_c \tag{3}$$

Dalam bentuk lain Persamaan 3 bisa ditulis sebagai berikut:

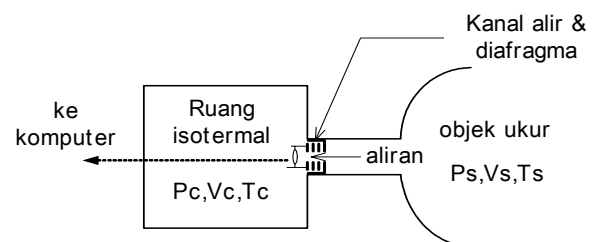
$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{V_c}{R T_c} \frac{dP_c}{dt} \tag{4}$$

Persamaan 4 menunjukkan hubungan antara laju perubahan massa *dm/dt* (laju aliran massa keluar masuk ruang isothermal) dengan perubahan tekanan *dP/dt* pada ruang isothermal.

Jika laju aliran *Q* dari udara/gas melalui kanal alir kemudian dirumuskan sebagai:

$$Q = \frac{nz h^3}{12 \mu L} (P_s - P_c) \tag{5}$$

maka dapat dinyatakan hubungan matematik antara laju perubahan massa dalam ruang isothermal



Gambar 1. Konsep Rancangan Pendiferensial Tekanan

dan laju aliran udara/gas melalui kanal alir, yaitu:

$$\frac{dm_c}{dt} = \rho_a \frac{P_c}{P_a} Q = \frac{\rho_a P_c n z h^3}{12 P_a \mu L} (P_s - P_c) \quad (6)$$

Jika semua konstanta pada Persamaan 5 dituliskan sebagai A , di mana:

$$A = \frac{12 P_a \mu L}{\rho_a n z h^3} \quad (7)$$

maka persamaan (5) menjadi:

$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{P_c}{A} (P_s - P_c) \quad (8)$$

Selanjutnya, jika beda tekanan antara objek ukur dan ruang isothermal dituliskan sebagai P_j , di mana

$$P_j = P_s - P_c \quad (9)$$

maka Persamaan (8) bisa disederhanakan menjadi:

$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{P_c}{A} P_j \quad (10)$$

Dari Persamaan (4) dan (10) didapat

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{P_c P_j}{A} \frac{RT_a}{V} = \frac{1}{K} P_c P_j \quad (11)$$

di mana K adalah konstanta dengan nilai $K = \frac{AV}{RT_a}$.

Transformasi Laplace terhadap Persamaan (11), untuk $P_j(0)=0$, menghasilkan:

$$sP_c - P_c(0) = sP_s - P_s(0) - sP_j = \frac{1}{K} P_c P_j \quad (12)$$

Jika konstanta waktu perubahan dari proses diferensiasi tekanan dinotasikan dengan T yang dinyatakan sebagai berikut:

$$T = \frac{K}{P_c} = \frac{12 P_a \mu L V}{P_c \rho_a n z h^3 R T_a} \quad (13)$$

dan $sP_s - P_s(0) = \int \left(\frac{dP_s}{dt} \right)$, maka Persamaan 12 bisa

ditulis menjadi:

$$P_j = \frac{T}{1 + Ts} \int \left(\frac{dP_s}{dt} \right) \quad (14)$$

Kemudian, berdasarkan Persamaan 14 nilai diferensial tekanan yang dihasilkan dari pendiferensial tekanan bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{P_j}{T} = \frac{1}{1 + Ts} \int \left(\frac{dP_s}{dt} \right) \quad (15)$$

di mana nilai P_c bisa didapat dari sensor tekanan.

Perencanaan Prototipe

Pendiferensial tekanan hasil rancang bangun ditunjukkan pada Gambar 2. Pendiferensial tekanan ini tersusun atas sebuah ruang isothermal, kanal alir dan sensor beda tekanan (diafragma)

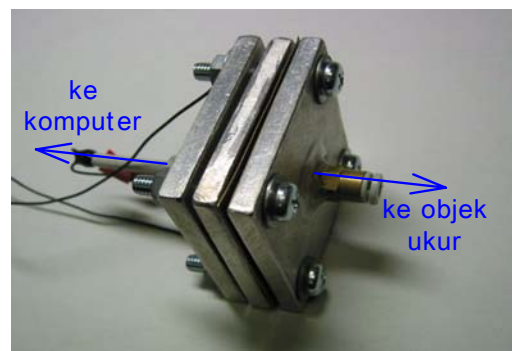
yang terintegrasi didalamnya. Diafragma yang berfungsi sebagai sensor beda tekanan terpasang di dalam ruang isothermal yang terletak di dalam prototipe pendiferensial tekanan. Sensor beda tekanan terhubung dengan sebuah kabel keluar yang bisa dihubungkan ke komputer untuk proses pengukuran dan pengambilan data perubahan tekanan yang terjadi di dalam ruang isothermal. Seperti tampak pada Gambar 2, pada sisi objek ukur dihubungkan dengan pipa fleksibel ke objek yang akan diukur nilai diferensial tekanannya.

Pengujian dan Alat Uji Kanal Alir

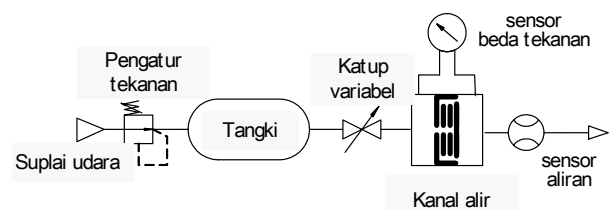
Sebelum kanal alir digunakan/dipasang pada pendiferensial tekanan, terlebih dahulu dilakukan pengujian hubungan antara laju aliran dengan beda tekanan antara sisi masuk dan sisi keluar kanal alir P_j . Skema pengujian dan alat uji karakteristik kanal alir bisa dilihat pada Gambar 3. Katup variabel yang digunakan diperlukan untuk memvariasikan laju aliran udara yang melalui kanal alir. Laju aliran yang terjadi diukur dengan bantuan sensor aliran. Sementara itu, tekanan yang terjadi diukur dengan sensor beda tekanan. Di sini pengujian dilakukan dalam dua arah, yaitu pengujian arah normal dan arah aliran balik. Selain itu, pengujian juga dilakukan pada tekanan kerja sebesar 500kPa.

Pengujian dan Alat Uji Prototipe Pendiferensial Tekanan

Prototipe pendiferensial tekanan hasil rancang bangun diuji untuk mengetahui responnya. Skema pengujian dan alat uji bisa dilihat pada Gambar 4. Alat uji terdiri dari: pengatur tekanan, tangki, katup pengatur, pembangkit sinyal, ruang isothermal, sensor tekanan dan pendiferensial tekanan.



Gambar 2. Prototipe Pendiferensial Tekanan



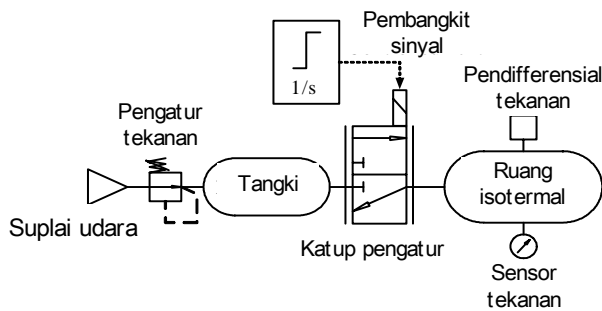
Gambar 3. Skema Pengujian Kanal Alir

Pengatur tekanan berfungsi untuk mengatur tekanan kerja dari suplai udara sesuai dengan yang diinginkan, tangki berfungsi sebagai penyetabil tekanan pada sisi atas kanal alir, katup pengatur (servo valve) berfungsi mengubah debit aliran menuju kanal air, dan pembangkit sinyal (function generator) berfungsi mengubah beda potensial pada katup pengatur untuk menghasilkan bukaan yang diinginkan.

Untuk mengetahui respon dari pendifferensial tekanan, pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu: proses pengisian udara pada ruang isothermal dan proses pelepasan udara dari ruang isothermal.

Pengujian dan alat uji Deteksi Kebocoran

Pendiferensial tekanan hasil rancang bangun yang sudah diuji performanya kemudian diaplikasikan untuk mendeteksi kebocoran pipa udara. Skema pendeteksian kebocoran pada pipa udara dan alat ujinya bisa dilihat pada Gambar 5, yang terdiri dari: kompresor sebagai suplai udara, pengatur tekanan untuk mengatur tekanan kerja, pipa dengan panjang 3m dan diameter $2.5 \times 10^{-2} \text{m}$, pendiferensial tekanan, sensor tekanan, katup variabel, katup dan sensor aliran. Tekanan kerja pada saat pendeteksian kebocoran adalah 500kPa. Kebocoran pada pipa dibuat dengan mengatur bukaan dari katup variabel pada ujung pipa dan untuk mengetahui debit kebocoran digunakan sensor aliran pada ujung keluar dari katup variabel. Pada pengujian ini, tingkat kebocoran yang dideteksi divariasikan pada $3 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ dan $2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$.



Gambar 4. Skema Pengujian Respon dan Diferensiasi Tekanan

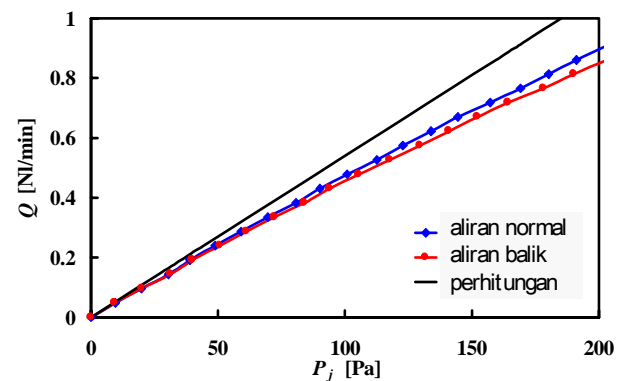
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Kanal Alir

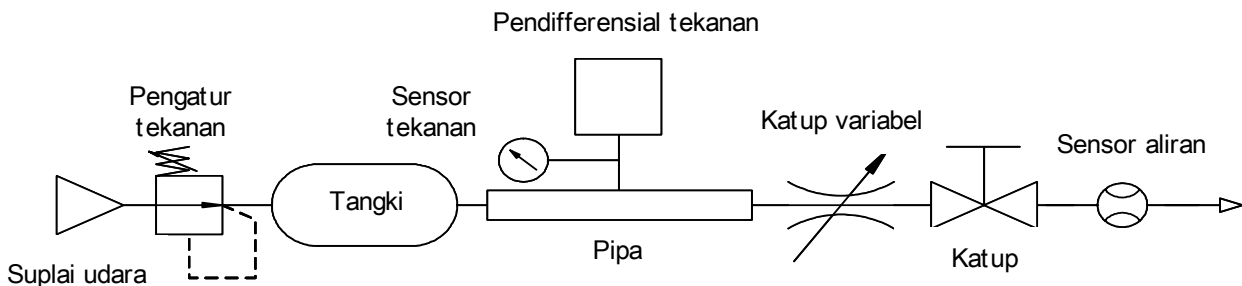
Gambar 6 menunjukkan hubungan antara laju aliran melalui kanal alir Q dengan beda tekanan P_j hasil pengujian dengan hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan (5). Seperti tampak pada Gambar 6, hasil pengujian menunjukkan adanya kesesuaian antara aliran normal dan aliran balik. Jika dibandingkan antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan dengan menggunakan Persamaan (5) terlihat ada perbedaan yang semakin besar dengan semakin besarnya aliran/beda tekanan melalui kanal alir.

Pengujian Pendiferensial Tekanan

Gambar 7 dan 8 menunjukkan respon tekanan hasil pengukuran pada proses pengisian dan pelepasan udara dari ruang isothermal. Sementara Gambar 9 dan 10 menunjukkan respon pendiferensial tekanan (nilai diferensiasi) pada proses pelepasan dan pengisian udara dari ruang isothermal. Garis biru dan hitam pada Gambar 9 dan 10 menunjukkan hasil pengukuran nilai diferensiasi tekanan dengan pendiferensial tekanan (PD) sebelum dan sesudah modifikasi. Sedangkan garis abu-abu menunjukkan nilai diferensiasi dari respon tekanan hasil pengukuran pada sensor tekanan.

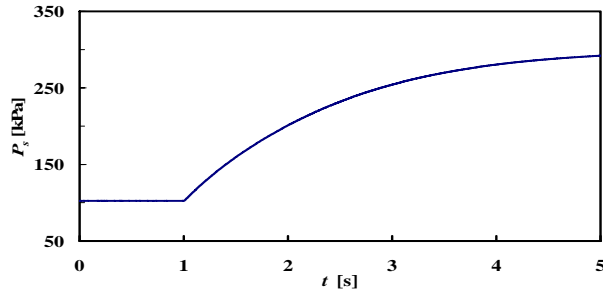


Gambar 6. Hubungan Antara Laju Aliran (Q) dengan Beda Tekanan (P_j)

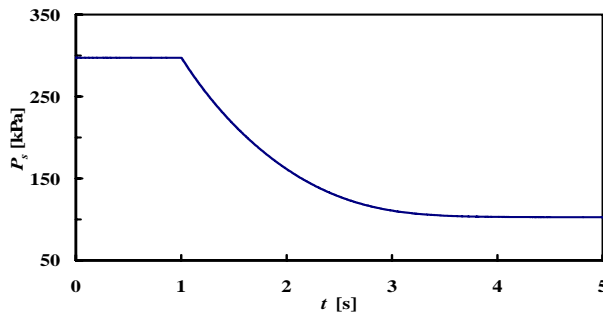


Gambar 5. Skema Pendeteksi Kebocoran Pipa Udara Menggunakan Pendiferensial Tekanan

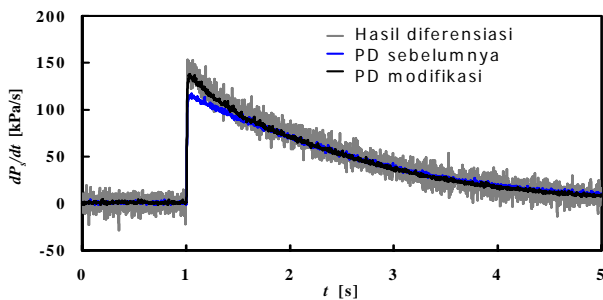
Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan nilai diferensiasi dari respon tekanan. Dari Gambar 9 dan 10 menunjukkan bahwa untuk kedua proses (pengisian dan pelepasan udara), respon dari pendiferensial tekanan hasil modifikasi dengan penambahan ruang isothermal memiliki tingkat kesesuaian yang lebih tinggi dengan nilai diferensiasi dari respon tekanan.



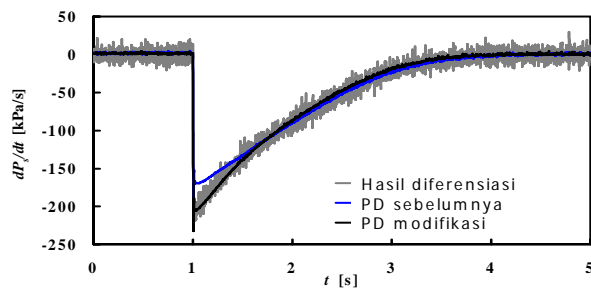
Gambar 7. Respon Tekanan pada Proses Pengisian Udara



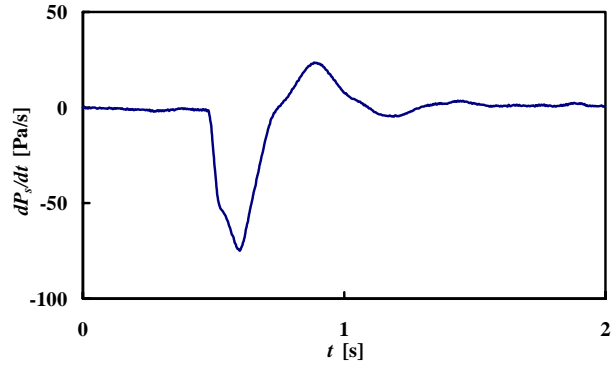
Gambar 8. Respon Tekanan pada Proses Pelepasan Udara



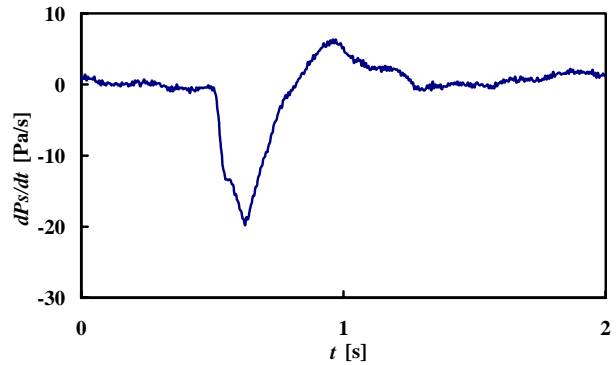
Gambar 9. Nilai Diferensiasi Tekanan pada Proses Pengisian Udara



Gambar 10. Nilai Diferensiasi Tekanan pada Proses Pelepasan Udara



Gambar 11. Hasil Uji Deteksi Kebocoran untuk $Q=3 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$



Gambar 12. Hasil Uji deteksi kebocoran untuk $Q=2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$

Pengujian Pendiferensial Tekanan untuk Deteksi Kebocoran

Hasil pendeteksian kebocoran pipa udara dengan pendiferensial tekanan hasil rancang bangun ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12. Gambar 11 menunjukkan grafik perubahan nilai diferensiasi tekanan sebagai fungsi waktu pada kebocoran $3 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$. Gambar 12 menunjukkan grafik perubahan nilai diferensiasi tekanan sebagai fungsi waktu pada kebocoran $2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$. Dari Gambar 11 dan 12 bisa dilihat adanya kebocoran bisa dideteksi dengan adanya perubahan nilai diferensiasi tekanan yang dihasilkan oleh pendiferensial tekanan.

Untuk tingkat kebocoran $3 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ amplitudo maksimum nilai diferensiasi tekanan yang terukur adalah -75Pa. Sedangkan untuk tingkat kebocoran $2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ amplitudo maksimum nilai diferensiasi tekanan yang terukur adalah -20Pa.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini kami mengembangkan prototipe pendiferensial tekanan dengan menambahkan ruang isothermal sebagai pengganti ruang biasa pada pendiferensial tekanan sebelumnya. Prototipe pendiferensial tekanan hasil modifikasi kemudian

kami uji performanya dan bandingkan hasilnya dengan pendiferensial tekanan sebelumnya. Hasilnya menunjukkan bahwa pendiferensial tekanan dengan ruang isothermal memiliki akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pendiferensial tekanan sebelumnya. Prototipe juga kami cobakan pada proses pendeteksian kebocoran udara pada pipa dengan tingkat kebocoran yang berbeda. Hasilnya menunjukkan bahwa pendiferensial tekanan ini juga bisa digunakan sebagai alat untuk mendeteksi kebocoran pada sistem penumatik, khususnya pipa udara. Perubahan nilai diferensiasi tekanan pada pendiferensial tekanan menunjukkan nilai yang berbeda pada tingkat kebocoran yang berbeda: -20Pa dan -75Pa untuk tingkat kebocoran $2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ dan $3 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$. Kedepan perlu diteliti hubungan antara tingkat kebocoran dengan perubahan nilai diferensiasi tekanan yang dihasilkan oleh pendiferensial tekanan sehingga kedepannya, alat ini tidak hanya bisa digunakan untuk menentukan ada atau tidaknya kebocoran, tapi juga mampu melakukan kuantifikasi berapa debit kebocoran yang terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kenji KAWASHIMA, Tomonori KATO, Koichi SAWAMOTO and Toshiharu KAGAWA, Realization of Virtual Sub Chamber on Active Controlled Pneumatic Isolation Table with Pressure Differentiator, *Precision Engineering*, Vol.31, pp-139-145, 2007.
2. Tomonori KATO, Kenji KAWASHIMA and Toshiharu KAGAWA, Active Control of Pneumatic Isolation Table by Model Following Control using Pressure Differentiator, *Proc. of 21th Annual ASPE Meeting*, CD-ROM, 2006.
3. Tomonori Kato, Kenji Kawashima, Koichi Sawamoto, Toshiharu Kagawa, Active control of a pneumatic isolation table using model following control and a pressure differentiator, *Precision Engineering*, Vol.31, Issue 3, pp.269-275, 2007.
4. Kenji Kawashima and Toshiharu Kagawa, Compressible fluid flow measurement based on the pressure change inside isothermal chamber", *Automatic Control & Measurement Society*, 32-11, 1485/1492, 1996.
5. Kenji Kawashima and Toshiharu Kagawa, Unsteady flow measurement of air using isothermal chamber", *Automatic, Control & Measurement Society*, 33-3, 149/154, 1997.
6. Harus LG, Maolin Cai, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa, Analysis of temperature effect on differential pressure method for air leak detection, *Proceeding of SICE Annual Conference*, Sapporo, Japan, 2004..
7. Harus LG, Maolin Cai, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa, Research on differential pressure method for air leak detection, *Proceeding of JFPS-Japanese Fluid Power Conference*, Tokyo, Japan, 2005.
8. Harus LG, Maolin Cai, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa, Determination of temperature recovery time in differential pressure based air leak detector, *Journal of Measurement Science and Technology*, Institute of Physics Publishing-England, Vol.17 No.2 p 411-418, 2006.
9. Harus LG, Maolin Cai, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa, Development of differential pressure type air leak tester, *Journal of Fluid Power System*, Japanese Fluid Power System Society, Japan, Vol.38 No.4 p 6-11, 2007.