

## Pengukuran Aliran Gas menggunakan Ultrasonik Flowmeter 3-Lintasan Akustik Transduser-Ganda dengan Metoda Waktu-Tempuh Simultan

<sup>1,2</sup>K. Amri<sup>\*)</sup>, <sup>1</sup>L.F. Wiranata, <sup>1</sup>F. Fitria, <sup>1</sup>R. Michael, <sup>1</sup>Suprijanto, <sup>1</sup>D. Kurniadi

<sup>1</sup>KK Instrumentasi dan Kontrol-Institut Teknologi Bandung

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Padang

*mr.khairul.amri@student.itb.ac.id*

### Abstrak

Ultrasonik flowmeter (USM) dengan metoda waktu tempuh merupakan flowmeter dengan akurasi terbaik diantara semua jenis USM yang ada saat ini, tetapi sangat sensitif terhadap perubahan profil aliran. Profil aliran adalah distribusi kecepatan aliran fluida pada penampang melintang pipa. Penggunaan multi lintasan akustik bisa mengatasi permasalahan ini, tetapi akan memunculkan masalah baru yaitu lamanya waktu pencuplikan untuk satu sesi pengukuran, karena selama ini selalu diasumsikan selama satu sesi pengukuran tidak terjadi perubahan kecepatan aliran dan/atau tidak terjadi perubahan profil aliran. Bila ini terjadi maka hasil pengukuran tidak lagi memperlihatkan nilai yang sebenarnya. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka diusulkan suatu teknik pengambilan data yang dinamakan dengan metoda waktu-tempuh simultan dengan menggunakan transduser ganda. Penelitian ini diawali dengan melakukan pengujian kinerja beberapa bentuk konfigurasi multi lintasan akustik secara numerik. Berdasarkan hasil simulasi diputuskan untuk menggunakan konfigurasi 3 lintasan akustik paralel (LIN) dengan pertimbangan faktor hidrodinamik, faktor sensitivitas orientasi, faktor rentang orientasi serta faktor kemudahan implementasinya. Selanjutnya dilakukan eksperimen dengan membuat USM dengan konfigurasi LIN disertai dengan sistem pengukuran yang menggunakan metoda waktu-tempuh simultan. Dari hasil pengukuran diperoleh nilai kecepatan aliran sebesar 3,53 m/s dengan tingkat presisi sebesar 3,10%.

*Kata Kunci: USM multi lintasan akustik, metode waktu- tempuh simultan, eksperimen pengukuran, transduser ganda, flowmeter gas*

### 1 Pendahuluan

Ultrasonik flowmeter (USM) merupakan salah satu alat ukur fluida yang banyak digunakan pada industri proses seperti petro kimia, gas dan minyak bumi. Bila dibandingkan dengan alat ukur kecepatan fluida yang lain (plat orifis, coriolis, turbin meter), USM memiliki beberapa kelebihan antara lain: tidak menimbulkan penurunan tekanan, biaya perawatan murah, akurasi tinggi dan bisa digunakan untuk pipa berukuran besar [1].

Berdasarkan pada teknologi yang digunakan, USM dibedakan lagi menjadi; waktu-tempuh, Doppler, dan korelasi silang. USM waktu tempuh memiliki akurasi yang paling tinggi dan bisa digunakan untuk tujuan transaksi (*custody transfer*) [2]. Prinsip kerja alat ukur ini adalah dengan cara mengukur waktu-tempuh gelombang ultrasonik yang ditransmisikan searah dan berlawanan arah dengan aliran fluida (Gambar 1). USM ini sendiri dikelompokkan lagi menjadi USM dengan lintasan akustik tunggal dan multi-lintasan akustik. Lintasan akustik adalah lintasan yang ditempuh oleh gelombang ultrasonik dari transduser transmitter ke receiver.

Selain memiliki banyak kelebihan seperti yang disebutkan diatas, USM waktu-tempuh juga memiliki keterbatasan ketika digunakan untuk mengukur kecepatan aliran fluida yang

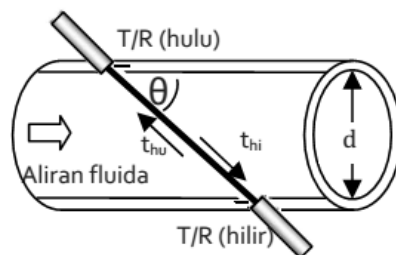
profil alirannya selalu berubah. Profil aliran adalah distribusi kecepatan aliran pada penampang melintang pipa. Pada aliran laminar, profil aliran berbentuk simetris dan cukup diukur dengan USM yang memiliki lintasan akustik tunggal. Namun dilapangan, aliran laminar sangat sulit untuk diperoleh dan dijaga sehingga profil aliran yang terbentuk cenderung berbentuk asimetris. Untuk profil asimetris, penggunaan USM multi-lintasan akustik akan mampu memberikan hasil pengukuran yang jauh lebih baik.

Banyak bentuk konfigurasi multi-lintasan akustik yang telah dipublikasikan oleh para peneliti (Gambar 2), namun sebagian besar sulit untuk diaplikasikan karena keterbatasan ruang untuk meletakkan sejumlah transduser ultrasonik pada dinding pipa, disamping itu, penggunaan lintasan akustik yang terlalu banyak memiliki kompleksitas dan biaya tinggi. Oleh karena itu, disini akan dicari satu konfigurasi USM multi-lintasan akustik yang memiliki kinerja baik serta mudah untuk diimplementasikan.

Permasalahan lain dalam pengukuran kecepatan fluida dengan menggunakan USM multi-lintasan akustik adalah pada teknik pengambilan data, dimana nilai waktu tempuh diukur secara bergantian, dengan anggapan selama satu sesi pengambilan data tidak terjadi perubahan profil maupun kecepatan aliran. Jika kedua asumsi diatas tidak terpenuhi, maka hasil pengukuran tidak lagi akurat. Berdasarkan masalah ini, maka diusulkan suatu metoda baru dimana USM multi lintasan yang akan dibuat menggunakan transduser ultrasonik ganda sehingga mampu mengukur waktu tempuh secara bersamaan yang selanjutnya dinamakan USM waktu-tempuh simultan. Metoda ini diharapkan mampu memberikan hasil pengukuran yang akurat karena waktu yang diperlukan untuk satu sesi pengukuran semakin cepat sehingga probabilitas terjadinya perubahan profil dan kecepatan fluida selama proses pengukuran berlangsung menjadi sangat kecil. Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini adalah diawali dengan melakukan simulasi terhadap beberapa bentuk konfigurasi yang mampu memberikan hasil pengukuran terbaik dan memungkinkan untuk diaplikasikan menjadi sebuah flowmeter. Hasil konfigurasi terbaik akan diimplementasikan menjadi sebuah USM dan divalidasi secara eksperimen.

## 2 Teori Dasar

### 2.1 Ultrasonik flometer (USM) dengan metoda waktu-tempuh



**Gambar 1 Geometri USM dengan lintasan akustik tunggal**

Geometri dan cara kerja dari USM lintasan akustik tunggal dengan metoda waktu-tempuh diperlihatkan pada Gambar 1. Disini digunakan dua transduser yang saling berhadapan dan membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu axial pipa (Gambar 1). Kedua transduser ultrasonik akan bersifat sebagai transmitter dan receiver secara bergantian. Karena pengaruh kecepatan aliran fluida, maka waktu perambatan gelombang ultrasonik dari

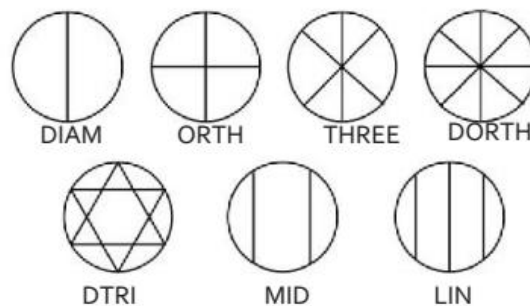
transduser hulu ke transduser hilir maupun sebaliknya akan berbeda. Kedua nilai ini akan digunakan untuk mengukur kecepatan aliran fluida seperti yang tertulis pada persamaan 1.

$$v = \frac{d}{\sin 2\theta} \left( \frac{1}{t_{hi}} - \frac{1}{t_{hu}} \right) \quad (1)$$

$v$  menyatakan kecepatan aliran fluida,  $d$  adalah diameter pipa,  $\theta$  adalah sudut yang dibentuk oleh lintasan akustik dengan sumbu aksial pipa,  $t_{hi}$  adalah waktu yang diperlukan oleh gelombang ultrasonik untuk merambat dari transduser yang berada pada hilir ke transduser yang berada pada hulu, sedangkan  $t_{hu}$  adalah waktu yang diperlukan gelombang ultrasonik untuk merambat pada arah sebaliknya yaitu dari hulu ke hilir.

## 2.2 Konfigurasi USM multi-lintasan akustik

Ada banyak bentuk konfigurasi lintasan akustik USM yang diusulkan oleh para peneliti [3][4][5], perbedaan desain tersebut berkaitan dengan tingkat akurasi yang akan diperoleh. Beberapa bentuk konfigurasi itu terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2 7 bentuk konfigurasi lintasan akustik USM

## 2.3 Metoda waktu-tempuh simultan

Sistem pengukuran yang digunakan pada USM komersial, nilai  $t_{hi}$  dan  $t_{hu}$  (Gambar 1) diukur secara berurutan yang selanjutnya dinamakan dengan metoda sekuensial. Hal ini terjadi karena kedua transduser yang berada pada posisi hulu dan hilir berfungsi sebagai transmitter dan receiver secara bergantian. Proses pengukuran secara sekuensial ini akan dilakukan secara berulang seperti yang terlihat pada Gambar 3a. Dari gambar tersebut terlihat, total waktu yang dibutuhkan untuk satu kali pengukuran kecepatan fluida ( $t_{seq}$ ) adalah.

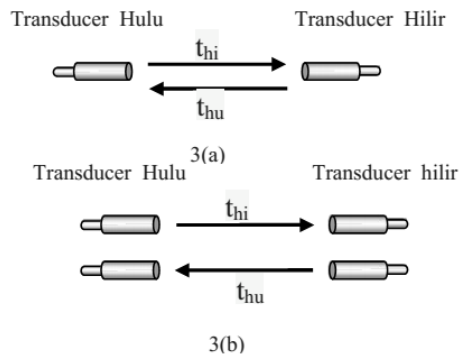
$$t_{seq} = t_{hu} + t_{hi} \quad (2)$$

Disisi lain, untuk metoda pengukuran waktu- tempuh simultan, nilai  $t_{hi}$  dan  $t_{hu}$  diukur secara berbarengan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3b. Ketika tidak ada aliran di dalam pipa maka nilai dari  $t_{hi}$  dan  $t_{hu}$  adalah sama. Namun karena aliran fluida mempengaruhi kecepatan rambat gelombang, maka nilai  $t_{hi}$  akan lebih kecil dibandingkan dengan  $t_{hu}$ . Pada metoda simultan, kedua transmitter pada posisi hulu dan hilir memancarkan gelombang pada waktu yang bersamaan, sehingga waktu untuk satu kali pengukuran ( $t_{smtn}$ ) adalah:

$$t_{smtn} = t_{hu}$$

(3)

Berdasarkan persamaan 2 dan 3 terlihat bahwa penggunaan metoda waktu tempuh simultan jauh lebih singkat dibanding dengan metoda sekuensial.



**Gambar 3 3(a) Prinsip kerja metoda sequensial dan 3(b) metoda waktu-tempuh simultan**

## 2.4 Parameter kinerja USM

Untuk mengetahui kinerja dari sebuah konfigurasi lintasan akustik (Gambar 2) secara numerik, maka dilakukan pengujian konfigurasi ini terhadap berbagai profil aliran asimetri sebelum diimplementasi-kan menjadi sebuah USM. Moore mengusulkan tiga parameter yang mampu menggambarkan kehandalan suatu konfigurasi lintasan akustik terhadap profil aliran asimetri [3].

4. Faktor hidrodinamik (H) adalah parameter yang menyatakan perbandingan antara kecepatan aktual fluida ( $v_{act}$ ) dengan kecepatan hasil pengukuran ( $v_{meas}$ ). H akan bernilai satu jika hasil pengukuran sama dengan kecepatan rata-rata fluida aktual.

$$H = \frac{v_{act}}{v_{meas}} \quad (4)$$

5. Faktor sensitivitas orientasi (S) menyatakan nilai rentang faktor hidrodinamik. Parameter ini digunakan untuk menyatakan kesensitivitas suatu konfigurasi terhadap perubahan orientasi transduser

$$S = H_{max} - H_{min} \quad (5)$$

6. Faktor rentang orientasi yaitu rentang orientasi transduser yang memiliki nilai faktor hidrodinamik dalam batas nilai tertentu.

$$T = \sum \phi \quad \forall 0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ \quad (6)$$

di mana  $\phi$  harus memenuhi syarat

$$H - p \leq H_\phi \leq H + p \quad (7)$$

Disini  $H$  adalah faktor hidrodinamik ideal yang bernilai 1,  $p$  adalah fraksional dari nilai  $H$  ideal,  $H\phi$  yaitu faktor hidrodinamik yang terukur pada suatu profil sebagai fungsi orientasi, dan  $T$  adalah faktor rentang orientasi

### 3 Pengujian konfigurasi USM dengan multi-lintasan akustik secara numerik

Untuk menguji 7 bentuk konfigurasi ultrasonik yang diusulkan (Gambar 2), maka dilakukan pengujian terhadap 10 bentuk profil aliran asimetri yang kemungkakan oleh Salami [6]. Fungsi matematis dari aliran asimetri diperlihatkan pada persamaan 8 dan plot contour dari masing-masingnya ditampilkan pada Gambar 4. Beberapa bentuk profil ini telah terbukti memiliki kemiripan dengan profil aliran saat diuji secara eksperimen.

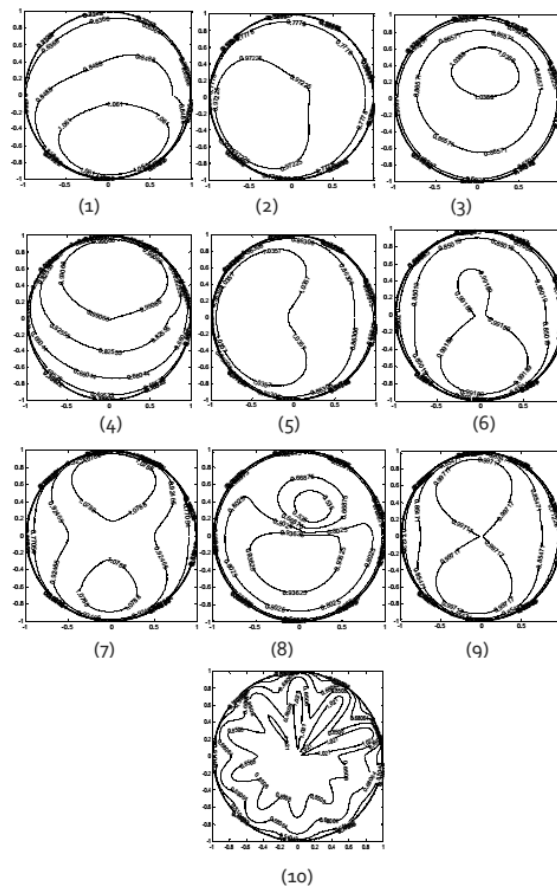
$$v = (1 - r)^{\frac{1}{n}} + mr(1 - r)^{\frac{1}{k}}f(\theta) \quad (8)$$

$v$  adalah kecepatan fluida ternormalisasi di suatu titik,  $f(\theta)$  adalah fungsi persamaan aliran dalam domain theta ( $\theta$ ),  $r$  adalah jari-jari pipa, dan  $k$ ,  $m$ ,  $n$  adalah konstanta yang besarnya tergantung pada profil aliran. Nilai  $k$ ,  $m$ ,  $n$  dan  $f(\theta)$  berbeda-beda dan informasi lebih detail bisa dilihat pada referensi [6].

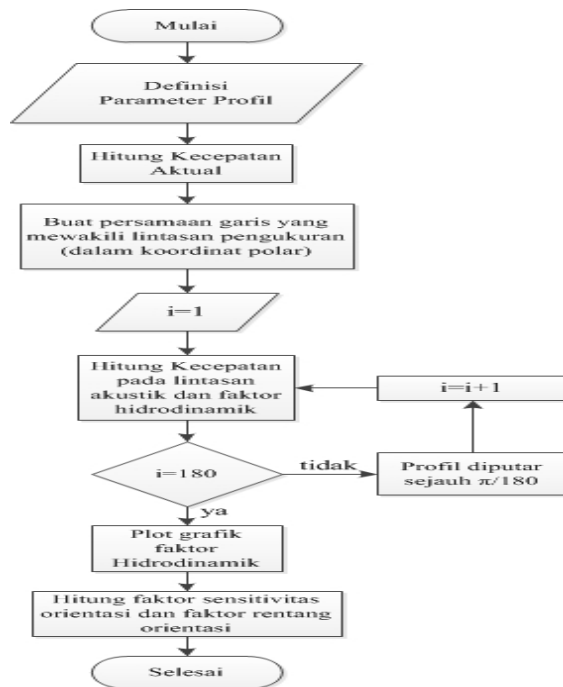
Untuk mendapatkan nilai  $H$ ,  $S$  dan  $T$  dari semua bentuk konfigurasi lintasan akustik (Gambar 2) terhadap berbagai profil aliran asimetri (Gambar 4) maka dibuat algoritma matematis seperti yang ada pada Gambar 5.

Dari hasil pengujian secara numerik, nilai faktor hidrodinamik ( $H$ ) untuk setiap lintasan akustik terhadap sepuluh bentuk profil asimetri dipresentasikan pada Tabel 1. Berdasarkan teori pada point 2.4, nilai ideal faktor hidrodinamik adalah 1. Jika nilai  $H$  suatu konfigurasi semakin mendekati 1, berarti kinerja konfigurasi tersebut semakin baik karena nilai kecepatan terukur pada lintasan akustik semakin mendekati kecepatan aktual aliran. Faktor ini bisa digunakan untuk menyatakan akurasi pengukuran secara kualitatif. Dengan mengacu pada Tabel 1, konfigurasi yang memiliki akurasi terbaik adalah DTRI dan LIN.

Sementara itu, Tabel 2 memperlihatkan hasil simulasi dari faktor sensitivitas orientasi ( $S$ ) untuk setiap konfigurasi lintasan. Nilai  $S$  yang terbaik adalah nol yang berarti tidak terjadi perubahan hasil pengukuran ketika orientasi transduser diubah-ubah.



**Gambar 4** Profil aliran asimetri pada penampang melintang pipa



Gambar 5 Flowchar dari pengujian kapabilitas berbagai konfigurasi USM terhadap profil asimetri

Tabel 1 Faktor Hidrodinamik untuk setiap konfigurasi lintasan akustik

| Prfl | diam  | orth  | three | dorth | mid   | lin   | dtri |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1    | 0,973 | 0,972 | 0,970 | 0,971 | 0,972 | 1,007 | 1,00 |
| 2    | 0,975 | 0,974 | 0,973 | 0,973 | 0,974 | 1,007 | 1,00 |
| 3    | 0,950 | 0,950 | 0,950 | 0,948 | 0,953 | 1,013 | 1,00 |
| 4    | 0,953 | 0,953 | 0,952 | 0,952 | 0,961 | 1,007 | 1,00 |
| 5    | 0,989 | 0,989 | 0,987 | 0,988 | 0,981 | 1,006 | 0,99 |
| 6    | 0,974 | 0,972 | 0,971 | 0,971 | 0,973 | 1,007 | 1,00 |
| 7    | 0,982 | 0,979 | 0,978 | 0,978 | 0,977 | 1,006 | 0,99 |
| 8    | 0,997 | 0,992 | 0,991 | 0,990 | 0,987 | 1,005 | 1,00 |
| 9    | 0,969 | 0,968 | 0,966 | 0,966 | 0,986 | 0,995 | 1,01 |
| 10   | 0,934 | 0,930 | 0,930 | 0,930 | 0,943 | 1,010 | 0,99 |

**Tabel 2 Faktor sensitivitas orientasi untuk setiap konfigurasi lintasan akustik**

| Prfl | diam  | orth  | three | dorth | mid   | lin   | dtri  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1    | 0,093 | 0,019 | 0,030 | 0,005 | 0,042 | 0,012 | 0,001 |
| 2    | 0,067 | 0,001 | 0,022 | 0,000 | 0,038 | 0,003 | 0,000 |
| 3    | 0,058 | 0,014 | 0,019 | 0,003 | 0,009 | 0,021 | 0,001 |
| 4    | 0,054 | 0,011 | 0,018 | 0,003 | 0,029 | 0,007 | 0,001 |
| 5    | 0,014 | 0,001 | 0,005 | 0,000 | 0,008 | 0,001 | 0,000 |
| 6    | 0,118 | 0,006 | 0,039 | 0,001 | 0,068 | 0,007 | 0,000 |
| 7    | 0,169 | 0,007 | 0,056 | 0,000 | 0,098 | 0,008 | 0,000 |
| 8    | 0,213 | 0,003 | 0,070 | 0,000 | 0,129 | 0,012 | 0,000 |
| 9    | 0,131 | 0,031 | 0,045 | 0,008 | 0,023 | 0,044 | 0,002 |
| 10   | 0,216 | 0,060 | 0,086 | 0,035 | 0,123 | 0,095 | 0,007 |
| rata | 0,106 | 0,015 | 0,036 | 0,005 | 0,053 | 0,021 | 0,001 |

**Tabel 3 Faktor rentang oreintasi tiap konfigurasi lintasan akustik untuk nilai p=0,2%**

| profil | diam | orth | Three | dorth | mid | lin | dtri |
|--------|------|------|-------|-------|-----|-----|------|
| 1      | 4    | 0    | 0     | 0     | 0   | 0   | 180  |
| 2      | 9    | 0    | 0     | 0     | 0   | 0   | 180  |
| 3      | 0    | 0    | 0     | 0     | 0   | 0   | 0    |
| 4      | 0    | 0    | 0     | 0     | 0   | 0   | 0    |
| 5      | 0    | 0    | 0     | 0     | 0   | 0   | 0    |
| 6      | 4    | 0    | 0     | 0     | 11  | 0   | 180  |
| 7      | 2    | 0    | 12    | 0     | 6   | 21  | 180  |
| 8      | 2    | 0    | 7     | 0     | 4   | 52  | 180  |
| 9      | 6    | 0    | 0     | 0     | 0   | 22  | 0    |
| 10     | 3    | 0    | 0     | 0     | 0   | 9   | 86   |

Dari Tabel 2 terlihat, konfigurasi DTRI dan DORT memperlihatkan nilai yang paling mendekati nol, yang artinya kedua konfigurasi tersebut yang paling baik dalam hal faktor sensitivitas orientasi.

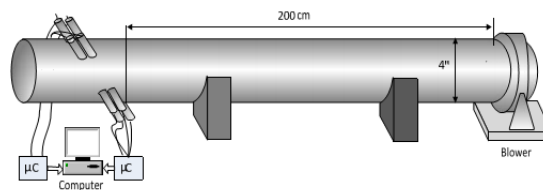
Disisi lain, nilai faktor rentang orientasi (T) dari hasil simulasi dirangkum pada Tabel 3. Pada penelitian ini digunakan nilai fraksional (p) sebesar 0,2% yang berarti, batasan kesalahan yang bisa diterima dari hasil pengukuran sebesar  $\pm 0,2\%$ . Nilai T menyatakan peluang hasil pengukuran suatu konfigurasi dalam memenuhi standar pengukuran yang ditetapkan. Semakin besar nilai T, semakin banyak orientasi yang memiliki nilai faktor hidrodinamik (H) dalam batas kesalahan yang diperbolehkan. Pada Tabel 3, konfigurasi yang memiliki nilai T terbaik adalah konfigurasi DTRI dan LIN.

Berdasarkan ketiga parameter kerja yaitu H, S dan T, maka disimpulkan bahwa konfigurasi terbaik adalah DTRI, namun karena banyaknya jumlah transduser yang digunakan serta terbatasnya ruang pada dinding pipa sebagai lokasi penempatan transduser, maka konfigurasi lintasan kedua terbaik yaitu LIN akan diimplementasikan untuk diujicoba secara eksperimen.

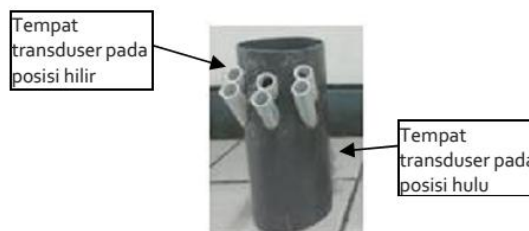
#### 4 Set-up eksperimen

Bentuk set-up eksperimen yang dibuat terlihat pada Gambar 6. Pipa yang digunakan adalah pipa PVC berdiameter 4". Agar aliran gas yang sampai pada USM telah berbentuk fully develop maka USM yang dibuat diletakkan pada jarak 20D (200 cm, D=diameter) dari blower. Selama melakukan eksperimen, blower digunakan untuk menghasilkan aliran udara dengan kecepatan konstan. Data diambil sebanyak 20 kali pada saat temperatur lingkungan sekitar 260C. Untuk membandingkan kecepatan yang terukur oleh USM yang dirancang, digunakan hot wire anemometer. Penerapan metoda waktu-tempuh simultan (point 2.3) untuk konfigurasi LIN, menyebabkan pada posisi hulu dan hilir dari USM ditempatkan masing-masingnya 6 buah transduser seperti yang terlihat pada Gambar 7.

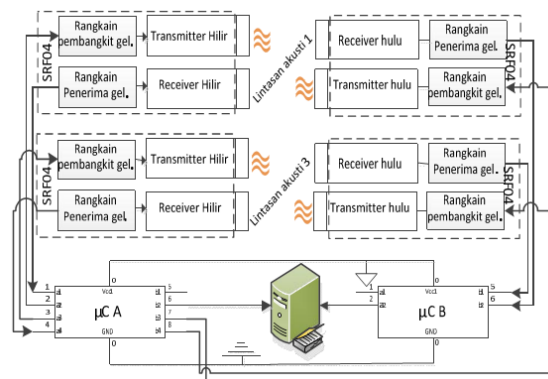
Sementara itu, sistem ultrasonik untuk mengontrol semua transduser dan pengakuisi data ada pada Gambar 8. Untuk satu lintasan akustik akan dibentuk oleh 4 transduser yang terdiri atas 2 transmitter dan 2 receiver. Sistem ultrasonik ini diawali dengan cara mengaktifkan dua transmitter secara berbarengan agar dapat memancarkan gelombang ultrasonik pada waktu yang bersamaan, tahapan ini dikendalikan oleh mikrokontroler A. Setelah itu, kedua receiver akan diaktifkan oleh mikro A dan B agar bersiaga untuk menerima seandainya gelombang ultrasonik telah sampai ke masing-masing receiver. Penggunaan dua mikro-kontroler ini penting agar dapat melakukan akuisi data secara simultan untuk dua gelombang ultrasonik yang bergerak berlawanan. Mikro A akan menghitung  $t_{hu}$  dan mikro B akan menghitung  $t_{hi}$ , yang kemudian mengirimnya ke komputer. Untuk menjamin kedua mikro bekerja pada waktu yang bersamaan, maka digunakan clock kristal yang sama serta sumber Vcc dan ground yang juga sama.



Gambar 6 Set-up eksperimen



Gambar 7 Tempat peletakan transduser kofigurasi LIN



Gambar 8. Blok diagram sistem ultrasonik metoda waktu tempuh simultan untuk lintasan akustik tunggal

## 5 Data dan analisa data

Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh perbedaan pada nilai kecepatan rata-rata hasil pengukuran kedua alat ukur sebesar 1,28 m/s seperti yang terlihat pada Gambar 9. Salah satu penyebab terjadinya perbedaan hasil pengukuran ke-dua alat tersebut adalah karakteristik dari kedua alat. Hot wire hanya mampu mengukur kecepatan fluida pada satu titik pada penampang lintang pipa, sedangkan pada USM mampu mengukur kecepatan udara disepanjang lintasan akustik. Penyebab lain dari perbedaan itu adalah masalah kalibrasi. Pada eksperimen yang dilakukan, USM yang dirancang dan digunakan pada proses pengukuran belum dikalibrasi sejak awal.



Gambar 9 Perbandingan kecepatan udara yang diukur dengan hot wire dan USM konfigurasi LIN

Proses kalibrasi flowmeter dapat dibagi menjadi 2 yaitu *dry calibration* dan *flow calibration*. Pada proses *dry calibration*, kalibrasi dilakukan pada setiap komponen alat ukur sebelum disusun menjadi kesatuan sistem. Adapun pada proses *flow calibration*, kalibrasi dilakukan pada keseluruhan sistem flowmeter yang dibangun dengan membandingkannya terhadap flowmeter standar. Pada flowmeter ultrasonik yang dirancang, kedua proses ini tidak dilakukan.

Selain faktor kalibrasi, ketidakpastian pengukuran juga dipengaruhi oleh geometri dari diameter pipa, posisi pemasangan pipa selain pipa utama, inklinasi sudut yang tidak tepat, dan lain-lain. Kesalahan-kesalahan tersebut dapat digolongkan pada jenis kesalahan sistem pengukuran. Faktor-faktor tersebut berpengaruh terhadap pengukuran waktu tempuh sesuai persamaan 1 sehingga bila nilainya tidak tepat, maka nilai kecepatan hasil pengolahan data juga tidak akan tepat.

Ditinjau dari aspek presisi, flowmeter ultrasonik yang dirancang memiliki nilai presisi sebesar 3,10%. Artinya, ketika dilakukan pengukuran, maka nilai yang diperoleh akan berada pada rentang kesalahan  $\pm 3,10\%$  dari 3,53 m/s, sehingga kecepatan aliran udara diperoleh pada rentang  $3,53 \pm 0,11$  m/s.

Sementara itu, presisi pengukuran kecepatan udara menggunakan *hot wire anemometer* sebesar 1,52%, artinya data yang diperoleh berada pada rentang  $2,25 \pm 0,03$  m/s. Dari data diatas, dapat disimpulkan bahwa USM yang dirancang telah memiliki kinerja yang baik dilihat dari tingkat kepresisian yang dimiliki.

## 6 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik, konfigurasi transduser USM dengan kinerja terbaik adalah DTRI dan LIN, namun dalam praktiknya konfigurasi DTRI tidak memungkinkan untuk dicoba karena implementasinya yang sulit, sehingga dipilih konfigurasi LIN. Berdasarkan data statistik, diperoleh nilai rata-rata kecepatan aliran udara hasil pengukuran konfigurasi LIN sebesar  $2,25 \pm 0,03$  m/s dengan menggunakan hot wire anemometer dan  $3,53 \pm 0,11$  m/s dengan menggunakan flowmeter ultrasonik yang dirancang. Presisi pengukuran dengan hot wire anemometer adalah 1,52% sedangkan presisi pengukuran dengan flowmeter yang telah dirancang adalah 3,10%. Untuk perancangan selanjutnya, disarankan menggunakan konfigurasi lintasan DTRI.

## 7 Daftar Pustaka

- [1] Jesse Yoder, "Ultrasonic Meters: A Natural Choice to Measure Gas Flow," Pipeline Gas J., 2006.
- [2] R. C. Baker, Flow measurement handbook, Industrial Design, Operating Principles. Cambridge university Press 2000, 2005.
- [3] P. I. Moore, G. J. Brown, and B. P. Stimpson, "Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles!Z: methodology," Meas. Sci. Technol., pp. 1802–1811, 2000.
- [4] E. Mandard, D. Kouam, and R. Battault, "Methodology for Developing a High-Precision Ultrasound Flow Meter and Fluid Velocity Profile Reconstruction," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol. 55, no. 1, pp. 161–172, 2008.
- [5] D. Kurniadi and A. Trisnobudi, "A Multi-Path Ultrasonic Transit Time Flow Meter Using a Tomography Method for Gas Flow Velocity Profile Measurement," Part. Part. Syst. Charact., vol. 23, no. 3–4, pp. 330–338, 2006.
- [6] L. A. Salami and B. Mech, "Transactions of the Institute of Measurement and Control asymmetric flow measurement in circular pipes," 1984.

