

## Pembuatan Prototipe Thermal Mass Flowmeter Tipe Heat Transfer untuk Pengukuran Laju Aliran Massa Udara

Ghina A. Nurdiani, Syafri Firmansyah, Farida I. Muchtadi, Faqihza Mukhlis

Program D3 Metrologi dan Instrumentasi

Fakultas Teknologi Bandung, Institut Teknologi Bandung

E-mail : ghinalmiran@gmail.com

### Abstrak

*Thermal mass flowmeter* sebagai alat ukur laju aliran massa mulai banyak digunakan dalam sektor industri migas karena memiliki akurasi yang baik untuk fluida gas dan dapat mengukur secara langsung nilai laju aliran massa tanpa ada hilang energi yang besar. Dalam penelitian ini dibuat prototipe *thermal mass flowmeter* tipe *heat transfer* sebagai media pembelajaran. Dalam perancangan, material prototipe dibuat dari bahan pipa akrilik transparan sehingga prinsip kerjanya dapat diamati secara langsung. Udara dipilih sebagai fluida yang diukur karena memiliki nilai massa jenis yang telah diketahui. Laju aliran massa dihitung berdasarkan perbedaan temperatur udara sebelum dan sesudah dipanaskan dengan memperhitungkan temperatur pemanas. Kalibrasi nilai laju aliran massa dilakukan dengan cara membandingkan hasil pengukuran prototipe dengan nilai yang didapatkan secara teoretis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe memiliki sensitivitas pengukuran naik dan turun masing-masing sebesar 1,080 dan 1,084 serta ketidakpastian pengukuran naik dan turun masing-masing sebesar  $\pm 0,642$  kg/jam dan  $\pm 0,929$  kg/jam dengan daerah kerja pengukuran 10,157 kg/jam sampai dengan 14,845 kg/jam. Dengan input yang tetap, prototipe memiliki rata-rata akurasi dan presisi masing-masing sebesar 97,158% dan 95,092%.

*Kata Kunci: thermal mass flowmeter, temperatur, laju aliran massa, udara*

### Abstract

*Thermal mass flowmeter provide high accuracy and less energy loss in gas flow measurement. In case of research, observation are not applicable on this type of flowmeter, prototype use acrylic pipe instead of metal. Air is chosen sample to be measured because of the density is known. Mass flow calculated based on heater temperature and temperature difference between upstream and downstream. Calibration procedure on the prototype is achieved by comparing the measurement result with theoretical calculation. The result of the test show that each measurement sensitivity on step up and step down are 1,080 and 1,084, measurement uncertainties are  $\pm 0,642$  kg/hr and  $\pm 0,929$  kg/hr at a range 10,157 kg/hr to 14,845 kg/hr.*

**Keyword :** *Thermal mass flowmeter, Temperature, Mass Flow, Air*

## 1 Pendahuluan

*Thermal mass flowmeter* mulai banyak digunakan pada industri migas karena memiliki akurasi yang cukup baik untuk fluida yang berwujud gas, serta dapat mengukur secara langsung laju aliran massa (*mass flow rate*) dari gas yang diukur tanpa ada hilang energi yang besar jika dibandingkan dengan instrumen lainnya, misalnya pada *orifice* yang memiliki *pressure drop* yang besar karena adanya perubahan kecepatan fluida secara mendadak saat aliran melalui penghalang [1].

*Thermal mass flowmeter* yang dioperasikan di industri biasanya memiliki perangkat kerja yang tertutup, sehingga sulit untuk mengetahui cara kerja sistem secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan sebuah prototipe dari *thermal mass flowmeter* yang berfungsi sebagai simulator sistem pengukuran untuk media pembelajaran. Terdapat dua jenis

*thermal mass flowmeter*, yaitu *heat transfer flowmeter* dan *hot wire probes flowmeter* [2]. Tipe yang akan dibuat pada penelitian ini adalah tipe *heat transfer flowmeter* karena relatif mudah dalam hal perancangan. Udara dipilih sebagai fluida yang diukur karena memiliki nilai massa jenis yang telah diketahui. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai media pembelajaran bagi pihak-pihak akademisi yang membutuhkan suatu simulasi tentang fenomena pengukuran dari *thermal mass flowmeter*.

## 2 Konsep Dasar

### 2.1 Laju Aliran Massa

Laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) adalah jumlah massa dari suatu zat yang mengalir melewati suatu permukaan per satuan waktu [3]. Laju aliran massa didefinisikan sebagai:

$$\dot{m} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

Dari persamaan (1) akan didapatkan laju aliran massa yang melalui suatu permukaan per satuan waktu.

$$\dot{m} = \rho v \cdot A = W \quad (2)$$

Dengan:

- $\rho$  = massa jenis dari fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- $v$  = laju aliran fluida ( $\text{m/s}$ )
- $A$  = luas permukaan yang dilalui ( $\text{m}^2$ )
- $W$  = laju aliran massa ( $\text{kg/s}$ )

Dari persamaan (2), dapat disimpulkan bahwa laju aliran massa ( $W$ ) merupakan hasil kali antara massa jenis fluida ( $\rho$ ) dengan luas permukaan yang dilalui ( $A$ ) dan nilai dari laju aliran fluida ( $v$ ). Nilai suatu laju aliran fluida dapat diukur dengan menggunakan anemometer. Karena luas permukaan dan massa jenis fluida telah diketahui, maka dapat ditentukan nilai dari laju aliran massa secara teori ( $W$ ). Nilai laju aliran massa tersebut yang akan menjadi acuan nilai benar dalam pengujian prototipe.

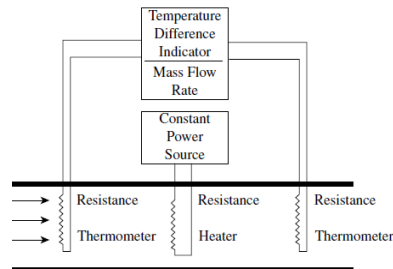
### 2.2 Heat Transfer Flowmeters

*Heat tranfer flowmeter* bekerja dengan cara mengukur kenaikan temperatur dari fluida setelah mengalami pemanasan. Dengan begitu dapat diketahui besarnya nilai temperatur fluida sebelum dipanaskan ( $T_1$ ) dan setelah dipanaskan ( $T_2$ ). Beda temperatur ( $\Delta T$ ) tersebut yang akan menjadi nilai penentu besarnya laju aliran massa dari suatu laju aliran fluida. Prinsip kerja dari *heat transfer flowmeter* berdasarkan persamaan (3):

$$Q = W C_p (T_2 - T_1) \quad (3)$$

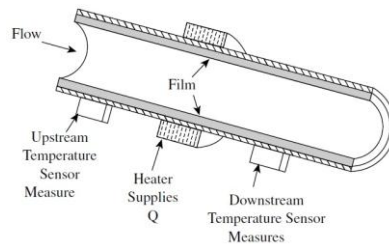
Dengan :

- $Q$  = laju aliran energi (cal/hour)  
 $W$  = laju aliran massa (kg/s)  
 $C_p$  = panas spesifik fluida (cal/kg °C)  
 $T_1$  = temperatur fluida sebelum menyerap kalor (°C)  
 $T_2$  = temperatur fluida setelah menyerap kalor (°C)



**Gambar 1** Skematis *heat transfer flowmeters* [2]

Persamaan (3) digunakan karena desain dari prototipe *thermal mass flowmeter* yang dibuat pada bagian pemasangan sensor serupa dengan Gambar 1. Namun terdapat perbedaan pada desain *heater* yang digunakan, yaitu berupa pipa logam dengan diameter yang sesuai dengan luas permukaan pipa *upstream* dan *downstream*. Gambar 2 merupakan gambar referensi dari perancangan *heater* prototipe. Desain *heater* berpengaruh terhadap perumusan  $Q$  yang digunakan.



**Gambar 2** Desain *heater* yang digunakan [2]

*Heater* dengan desain pada gambar 2 memiliki perumusan  $Q$  seperti pada persamaan (4) berikut

$$Q = hA(T_h - T_2) \quad (4)$$

Dengan:

$h$  = koefisien *heat transfer*

$A$  = luas permukaan pipa logam

$T_h$  = temperatur *heater*

$T_2$  = temperatur fluida setelah dipanaskan

Sensor temperatur *upstream* dan *downstream* diletakkan pada jarak dimana sensor tersebut hanya mengukur temperatur fluida yang mengalir sebelum melewati dan sesaat

setelah melewati *heater*, tanpa dipengaruhi oleh panas yang berasal secara langsung dari *heater*.

$$WC_p(T_2 - T_1) = hA(T_h - T_2) \quad (5)$$

$$W = \frac{hA(T_h - T_2)}{C_p(T_2 - T_1)} \quad (6)$$

Jika perumusan  $Q$  *heater* pada persamaan (4) disubstitusikan kedalam persamaan (3), akan didapatkan persamaan (5) yang merupakan perumusan untuk laju aliran massa ( $W$ ) yang sesuai dengan desain dari prototipe yang dirancang.

$$W = K \frac{(T_h - T_2)}{(T_2 - T_1)} \quad (7)$$

Dengan nilai  $h$ ,  $A$ , dan  $C_p$  yang konstan, maka nilai tersebut dapat dianggap sebagai sebuah konstanta karakteristik dari prototipe. Namun, konstanta hanya berlaku untuk mengukur satu jenis fluida. Dalam penelitian, digunakan udara sebagai fluida yang diukur.

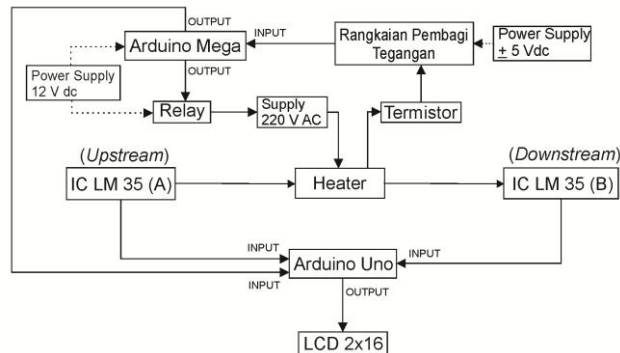
Dengan nilai  $W$  secara teoretis yang dapat diketahui melalui persamaan (2) dan nilai  $T_h$ ,  $T_1$ , dan  $T_2$  yang didapatkan melalui proses pengujian sesuai dengan persamaan (7), dibuat suatu grafik perbandingan antara kedua nilai tersebut. Nilai gradien ( $m$ ) dari persamaan garis linear yang didapatkan merupakan nilai konstanta karekteristik prototipe ( $K$ ). Dengan demikian, nilai laju aliran massa fluida yang diukur oleh prototipe ini akan dapat diketahui dengan menggunakan persamaan garis yang didapatkan tersebut.

### 2.3 Massa Jenis Udara

Massa jenis atau densitas adalah ukuran massa setiap satuan volume benda. Semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya [4]. Massa jenis rata-rata setiap benda merupakan total massa dibagi dengan total volumenya. Sebuah benda yang memiliki massa jenis lebih tinggi, misalnya besi, memiliki volume yang lebih rendah daripada benda bermassa sama yang memiliki massa jenis lebih rendah, misalnya udara. Udara memiliki massa jenis  $1,2 \text{ kg/m}^3$  pada temperatur  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nilai inilah yang akan digunakan sebagai nilai  $\rho$  yang akan dimasukkan kedalam persamaan (2) untuk mendapatkan nilai laju aliran massa teoretis.

### 3 Perancangan dan Implementasi

#### 3.1 Prinsip Kerja Prototipe



Gambar 3 Diagram blok sistem

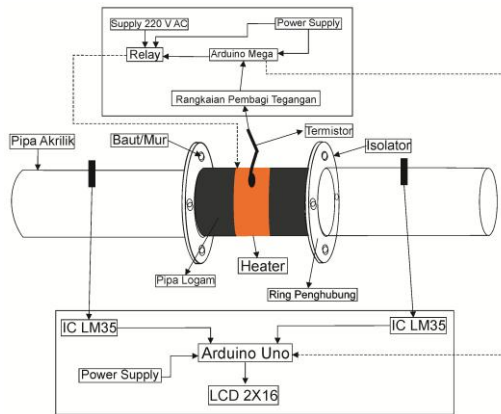
Berikut penjelasan dari Gambar 3:

1. Fluida yang menjadi media percobaan adalah udara kering dengan densitas sebesar  $1,2 \text{ kg/m}^3$  pada temperatur  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . *Blower* merupakan sumber aliran udara yang akan memberikan suatu *input* tertentu pada sistem. *Input* aliran dapat diubah dengan mengatur kecepatan dari putaran motor *blower*.
2. Temperatur *heater* diatur pada kondisi temperatur rata-rata dengan fluktuasi tertentu. Termistor mendeteksi temperatur dari *heater*. Tahanan termistor yang berubah menyebabkan tegangan keluaran dari rangkaian pembagi tegangan berubah pula. Tegangan keluaran tersebut masuk ke dalam *input* analog dari Arduino Mega. Berdasarkan *input* tersebut Arduino Mega diprogram sedemikian rupa sehingga dapat menentukan saatnya *relay* akan *on* atau *off*. *Relay* menyambungkan suplai  $220 \text{ V}_{AC}$  dengan *heater* pada kondisi awal NC (*Normally Close*). Sehingga saat *relay* pada kondisi *on/high* maka suplai *heater* akan terputus, sementara saat *off/low* suplai *heater* akan tersambung. Dengan demikian temperatur dari *heater* akan stabil pada suatu rentang.
3. Laju aliran udara yang mengalir melalui sistem akan dideteksi temperaturnya oleh sensor IC LM35 pada kondisi sebelum dipanaskan ( $T_1$ ) dan setelah dipanaskan ( $T_2$ ). Kedua data tersebut masuk ke dalam *input* analog Arduino UNO.
4. Sesuai dengan persamaan (7), temperatur dari *heater* ( $T_h$ ) juga digunakan untuk menentukan nilai dari laju aliran massa dari udara. Data temperatur *heater* ( $T_h$ ) yang diakuisisi oleh Arduino Mega ditransferkan ke Arduino UNO dengan cara mengkomunikasikan kedua Arduino tersebut menggunakan *library Easy Trasfer* (ET).
5. Nilai dari  $T_1$ ,  $T_2$ , dan  $T_h$  yang didapatkan dimasukkan kedalam persamaan linear rentang pengukuran prototipe yang telah ditentukan setelah pengujian. Arduino diprogram secara langsung akan mengkalkulasi nilai-nilai tersebut sehingga menghasilkan nilai laju aliran massa udara.
6. Nilai laju aliran massa yang didapatkan ditampilkan melalui suatu tampilan LCD 2x16.

#### 3.2 Desain Prototipe Thermal Mass Flowmeter

Secara umum, desain dari prototipe terdiri dari pipa, *heater*, dan sensor temperatur. Sensor temperatur akan mengukur temperatur udara yang mengalir melalui pipa saat

sebelum (*upstream*) dan setelah melalui *heater* (*downstream*), dan temperatur dari *heater* yang memberikan panas pada udara. Gambar 4 merupakan gambar prototipe *thermal mass flowmeter* tipe *heat transfer* yang dibuat.



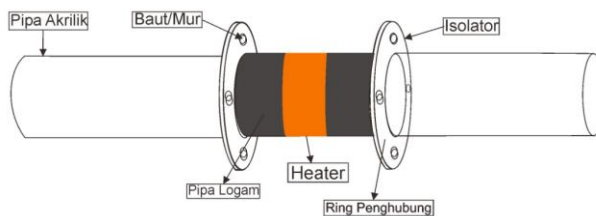
**Gambar 4 Desain prototipe**

Desain ditentukan dengan mempertimbangkan tujuan dari penelitian ini sebagai media pembelajaran. Komponen-komponen dipilih melalui proses uji coba hingga didapatkan komponen yang benar-benar sesuai. Contohnya pada sensor yang digunakan untuk mengukur laju aliran fluida, pada desain awal digunakan termistor MCP 9700, namun dikarenakan sulit untuk mencari sensor tersebut akhirnya dipilih IC LM35 yang cukup memiliki akurasi dan linearitas yang baik dan memiliki keluaran langsung berupa tegangan. Selain itu, pada konsep awal diinginkan hanya menggunakan satu buah mikrokontroler untuk semua sistem, tetapi dikarenakan hasil yang kurang baik digunakan dua buah mikrokontroler, satu sebagai kontrol temperatur dan satu lagi sebagai pengakuisisi data.

### 3.3 Pembuatan Prototipe

Komponen-komponen yang digunakan dalam pembuatan prototipe diantaranya: pipa akrilik, *heater*, Arduino UNO, Arduino Mega, termistor, sensor temperatur (IC LM35), *relay*, catu daya, dan komponen pelengkap. Pada sub bab ini akan dijelaskan proses pembuatan prototipe berdasarkan beberapa bagian, yaitu: selubung prototipe, pengontrol temperatur *heater*, dan pengakuisisi data.

Selubung prototipe merupakan suatu sistem yang akan menjadi tempat mengalirnya udara yang diukur. Selubung prototipe terdiri dari pipa akrilik dan *heater*. Gambar 5 merupakan desain dari selubung prototipe.



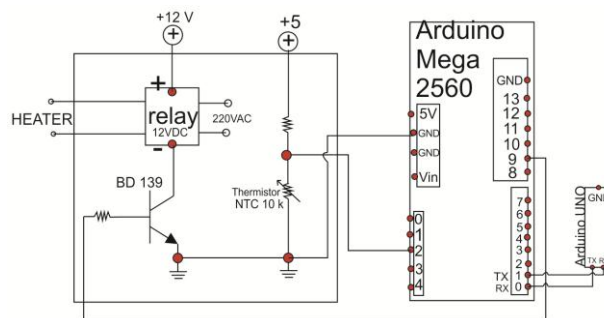
**Gambar 5 Selubung prototipe**

Pemilihan material akrilik sebagai pipa yang digunakan pada bagian *upstream* dan *downstream* bertujuan agar cara kerja dari sistem dapat langsung diamati. Dua buah pipa

akrilik tersebut memiliki ukuran diameter dalam 4,8 cm dan memiliki panjang masing-masing 45 cm. Pipa ini berfungsi sebagai tempat pemasangan IC LM35, satu pada bagian *upstream* dan satu lagi pada bagian *downstream*. Pipa disambungkan seri dengan pipa logam yang telah diselubungi dengan elemen pemanas. Udara yang akan diukur laju aliran massanya dialirkan melalui sistem tersebut. Pada bagian yang akan disambung dengan pipa logam dibuat *ring* penghubung agar dapat dipasangkan dengan pipa logam dan mencegah terjadinya kebocoran aliran udara.

*Heater* yang digunakan terbuat dari pipa logam yang dipanaskan oleh suatu elemen pemanas. Pipa logam terbuat dari bahan *stainless steel* dengan panjang 20 cm dan diameter yang sesuai dengan diameter pipa akrilik, yaitu 4,8 cm. Bahan *stainless steel* dipilih karena memiliki konduktivitas yang baik. Pipa logam diselubungi oleh elemen pemanas pada bagian tengah. Elemen pemanas memiliki daya sebesar 150 W dengan suplai 220 V. Pipa logam akan terkonduksi oleh elemen pemanas yang diatur pada temperatur rata-rata dengan fluktuasi tertentu. Dengan demikian, pipa logam akan memberikan panas pada fluida yang mengalir melalui proses konveksi.

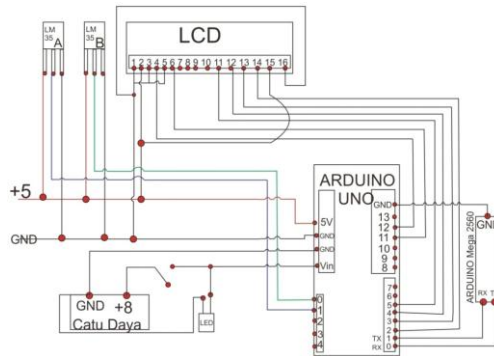
Dalam perancangan, *heater* yang merupakan bagian yang akan memberikan panas pada udara harus dikondisikan memiliki temperatur yang konstan. Namun, *heater* yang memiliki suplai 220 V<sub>AC</sub>, akan terus bertambah temperaturnya jika tidak dibatasi pada suatu rentang tertentu. Untuk itu dibuat suatu sistem untuk mengontrol temperatur *heater* agar stabil pada suatu rentang. Cara kerja dari sistem ini adalah dengan memutus dan menyambung suplai *heater*, sehingga *heater* terkondisi pada *set point* yang telah diatur. Gambar 6 merupakan gambar dari rangkaian pengontrol temperatur *heater* yang dibuat.



Gambar 6 Skematis rangkaian pengontrol temperatur heater

### 3.4 Akuisisi Data

Pengakuisisi data merupakan sistem yang akan mengolah keseluruhan data sensor, yaitu  $T_1$ ,  $T_2$ , dan  $T_h$ , sehingga menghasilkan nilai laju aliran massa dari udara. Pengolahan data didasarkan pada persamaan (7). Gambar 7 merupakan skematis dari rangkaian pengakuisisi data.



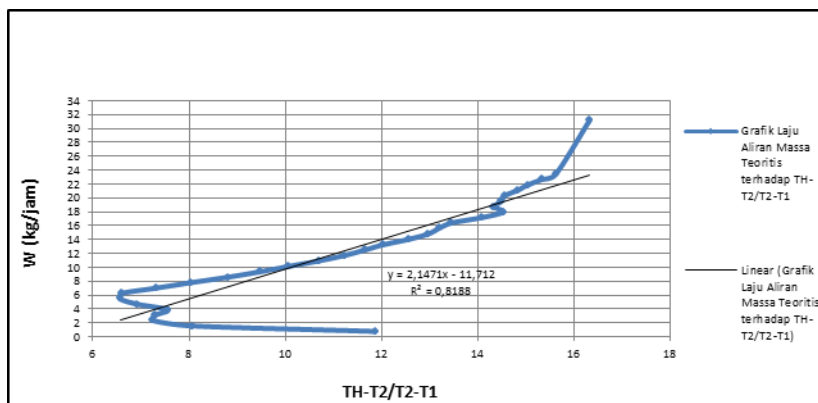
Gambar 7 Skematis rangkaian pengakuisisi data

## 4 Pengujian dan Analisis Data

### 4.1 Perbandingan Temperatur dengan Laju Aliran Massa Teoretis

Berdasarkan persamaan (7), diperlukan suatu konstanta untuk mengubah nilai temperatur menjadi nilai laju aliran massa. Untuk mendapatkan nilai konstanta tersebut, dilakukan pengujian dengan cara membandingkan laju aliran massa yang dihitung secara teoretis dengan nilai temperatur yang diperoleh. Nilai laju aliran massa teoretis dapat dihitung dengan persamaan (2). Nilai densitas udara pada suhu ruangan 27°C adalah 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Gambar 8 yang merupakan grafik perbandingan laju aliran massa secara teoretis terhadap

$$\frac{T_H - T_2}{T_2 - T_1}$$



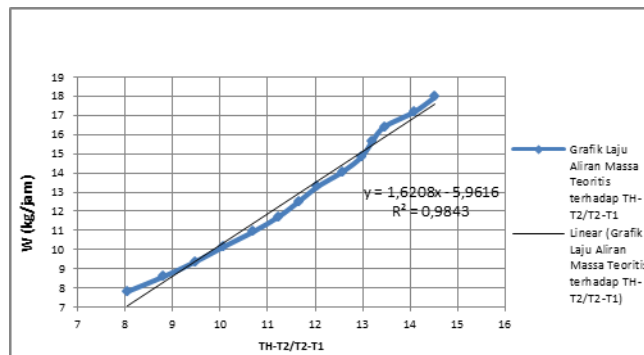
Gambar 8 Grafik laju aliran massa teoretis terhadap  $\frac{T_H - T_2}{T_2 - T_1}$

Grafik pada gambar 8 memiliki linearitas yang kurang baik dengan ditunjukkannya koefisien korelasi (R) senilai  $\sqrt{0,818} = 0,904$ . Hal ini dikarenakan adanya loncatan-loncatan nilai pada titik-titik tertentu. Hal ini dikarenakan perbedaan temperatur T1 dan T2 pada saat laju aliran udara rendah bernilai sangat kecil, sehingga nilai  $\frac{T_H - T_2}{T_2 - T_1}$  besar dan mengakibatkan hasil pengukuran tidak linier.

Oleh karena itu, ditentukan suatu rentang pengukuran agar sistem dapat menampilkan data yang linier. Dapat dilihat pada gambar 8, sistem memiliki linearitas yang baik pada



rentang pengukuran 7,81 kg/jam sampai dengan 17,9 kg/jam. Gambar 9 menunjukkan grafik data setelah dilakukan pembatasan rentang pengukuran.



**Grafik laju aliran massa teoretis terhadap TH-T2/T2-T1 (setelah dilakukan pembatasan rentang)**

Grafik pada gambar 9 menunjukkan linearitas yang sangat baik, dengan koefisien korelasi ( $R$ ) =  $\sqrt{0,984} = 0,991$ . Nilai gradien ( $m$ ) yang diperoleh yakni 1,620 merupakan konstanta pengali ( $K$ ) untuk mengonversi data temperatur menjadi data laju aliran massa dengan  $offset = -5,961$ , sesuai dengan persamaan (7). Nilai ini dimasukkan ke dalam program Arduino UNO sehingga data temperatur bisa diakuisisi menjadi nilai laju aliran massa.

## 4.2 Pengujian Kalibrasi

Setelah sistem dapat menampilkan laju aliran massa, kemudian dilakukan kalibrasi dengan anemometer standar. Nilai laju aliran yang didapatkan dari anemometer standar terlebih dahulu dikonversi menjadi nilai laju aliran massa. Tabel 1 menunjukkan data hasil kalibrasi laju aliran massa hasil pengukuran terhadap laju aliran massa teoretis.

**Tabel 1 Data hasil kalibrasi laju aliran massa (1)**

W pengukuran (kg/jam)			W teoretis (kg/jam)
Naik	Turun	Rata-rata	
9,22	9,01	9,115	7,813
10,02	10,12	10,070	8,594
10,74	10,79	10,765	9,375
11,19	11,67	11,430	10,157
12,18	11,80	11,990	10,938
12,37	12,22	12,295	11,719
13,28	13,33	13,305	12,501
14,37	13,39	13,880	13,282
14,41	13,87	14,140	14,063
14,50	14,49	14,495	14,845
15,06	14,91	14,985	15,626
15,14	15,22	15,180	16,407
15,58	16,28	15,930	17,189
15,96	17,16	16,560	17,970

**Data menunjukkan** linearitas yang sangat baik dengan nilai koefisien korelasi (R) mendekati nilai 1, yaitu =  $\sqrt{0,985} = 0,992$ . Dari data yang diperoleh, dapat dianalisis karakteristik statik dari data yang diperoleh dengan menghitung kesalahan bias dan ketidakpastian. Tabel 2 menunjukkan data perhitungan kesalahan bias untuk masing-masing nilai laju aliran massa.

Tabel 2 Data kesalahan bias

W pengukuran (kg/jam)			W teoretis (kg/jam)	Bias (kg/jam)
Naik	Turun	Rata-rata		
9.22	9.01	9.115	7.813	2.624
10.02	10.12	10.070	8.594	1.771
10.74	10.79	10.765	9.376	1.296
11.19	11.67	11.430	10.157	0.865
12.18	11.80	11.990	10.938	0.586
12.37	12.22	12.295	11.719	0.679
13.28	13.33	13.305	12.501	0.253
14.37	13.39	13.880	13.282	0.553
14.41	13.87	14.140	14.063	0.395
14.50	14.49	14.495	14.845	0.375
15.06	14.91	14.985	15.626	0.552
15.14	15.22	15.180	16.407	0.299
15.58	16.28	15.930	17.189	0.853
15.96	17.16	16.560	17.970	1.234

Berdasarkan perhitungan regresi maka akan diketahui nilai variansi dari  $W_i$ ,  $m$ , dan  $b$ . Didapatkan nilai  $s_{W_i} = 0,387$  kg/jam, dengan nilai  $s_m$  dan  $s_b$  masing-masing yaitu 0,022 dan 0,299. Dengan tingkat kepercayaan senilai 99, 7%, maka ketidakpastian dari masing-masing variabel  $W_i$ ,  $m$ , dan  $b$  akan bernilai  $\pm 3s$ . Sehingga didapatkan persamaan (8)

$$y = (0,687 \pm 0,067)x + (4,286 \pm 0,898) \quad (8)$$

dan ketidakpastian  $W_i$  sebesar  $\pm 1,161$  kg/jam. Tentunya, dengan rentang yang ditentukan, nilai ketidakpastian yang didapatkan sangatlah besar, hal ini dikarenakan nilai sensitivitas yang didapatkan kurang baik, yakni 0,687, sedangkan alat ukur yang baik adalah yang memiliki nilai sensitivitas mendekati 1. Beberapa faktor yang memengaruhi hasil pengukuran diantaranya:

1. *Blower* yang digunakan memiliki keluaran yang sangat fluktuatif. Hal ini dapat dilihat pada pembacaan anemometer standar yang berfluktuasi antara 0, 7 sampai dengan 1, 1 m/s.
2. Temperatur ruangan pada saat pengujian untuk konstanta karakteristik yang mengubah persamaan temperatur menjadi nilai laju aliran massa dan pada saat pengujian kalibrasi berbeda, masing masing 27,5°C dan 26,8°C.
3. Temperatur *heater* memiliki nilai fluktuasi yang mencapai 6°C. Dengan demikian, hasil pengukuran akan berfluktuasi mengikuti pembacaan temperatur *heater* sehingga menghasilkan nilai yang tidak akurat.

Berdasarkan nilai sensitivitas dan nilai bias yang didapatkan, dilakukan pengujian ulang dengan rentang yang dipersempit menjadi 10,157 kg/jam sampai dengan 14,845 kg/jam.

Pengujian ulang dilakukan setelah nilai gradien dan *offset* pengujian sebelumnya dimasukkan ke dalam *script* arduino sehingga diharapkan nilai laju aliran massa yang terukur hampir sama dengan nilai laju aliran massa yang dihitung secara teoretis, dengan kata lain sensitivitasnya mendekati 1. Pengujian ini dilakukan pada ruangan dengan temperatur 26,6°C. Tabel 3 merupakan tabulasi data hasil pengujian yang dilakukan.

**Tabel 3 Data hasil kalibrasi laju aliran massa (2)**

Laju Aliran Massa (kg/jam)		
Naik	Turun	Teoritis
12,164	12,181	10,157
12,839	12,341	10,939
13,648	12,693	11,720
13,851	13,033	12,501
14,899	13,961	13,283
15,372	14,291	14,064
15,852	14,439	14,845

Dari grafik tersebut dapat dilihat nilai sensitivitas untuk masing-masing pengukuran naik dan pengukuran turun sebesar 0,794 dan 0,545 yang berarti sensitivitas setelah dilakukan kalibrasi ulang masih kurang baik. Nilai fluktuasi dari temperatur *heater* merupakan salah satu dari yang berpengaruh terhadap hasil pengukuran yang dilakukan. Dengan kata lain, fluktuasi temperatur *heater* akan mengakibatkan fluktuasi hasil pengukuran. Berdasarkan data yang diperoleh, hasil pengukuran akan mendekati nilai teoretisnya pada saat temperatur *heater* berada pada rentang 170°C sampai dengan 172°C. Oleh karena itu, selanjutnya dilakukan pengujian ulang dengan pembatasan pembacaan hasil pengukuran nilai laju aliran massa hanya pada saat temperatur *heater* berada pada rentang 170°C sampai dengan 172°C. Selain itu, dapat disimpulkan pula bahwa sensitivitas pengukuran naik lebih baik daripada sensitivitas pengukuran turun. Hal ini disebabkan laju aliran energi pada saat pengukuran turun lebih lambat daripada pengukuran naik.

Berdasarkan data yang diperoleh, dilakukan kalibrasi kembali dengan mempertimbangkan kondisi yang mempengaruhi hasil pengukuran. Tentunya, pengujian dilakukan dengan memasukkan kembali nilai gradien dan *offset* pengujian kalibrasi sebelumnya. Temperatur *heater* yang berfluktuasi hingga 6°C kemudian direduksi menjadi 2°C dengan ketentuan pembacaan laju aliran massa dilakukan pada saat temperatur *heater* berada pada rentang 170 sampai dengan 172°C, diharapkan data hasil pengukuran lebih stabil dan akurat. Pengujian dilakukan pada ruangan dengan temperatur 26,1°C, sama dengan pengujian sebelumnya. Tabel 4 merupakan tabulasi data setelah dilakukan kalibrasi yang ketiga.

**Tabel 4 Data hasil kalibrasi laju aliran massa (3)**

Laju Aliran Massa (kg/jam)		
Naik	Turun	Teoritis
10,19	10,09	10,15
10,88	11,18	10,93
11,99	11,24	11,72
12,85	11,83	12,50
13,83	13,45	13,28
14,46	14,10	14,06
15,06	15,32	14,84

Hasil pengujian yang dilakukan memiliki sensitivitas yang baik dengan ditunjukkannya nilai sensitivitas untuk pengukuran naik dan turun masing-masing 1,080 dan 1,084.

Berdasarkan perhitungan regresi maka akan diketahui nilai variansi dari persamaan naik dan persamaan turun untuk masing-masing nilai  $W_o$ ,  $m$ , dan  $b$ . Didapatkan nilai  $sW_o = 0,214$  kg/jam, dengan nilai  $s_m$  dan  $s_b$  masing-masing yaitu 0,018 dan 0,241. Dengan tingkat kepercayaan senilai 99,7%, maka ketidakpastian dari masing-masing variabel  $W_o$ ,  $m$ , dan  $b$  akan bernilai  $\pm 3s$ . Sehingga didapatkan persamaan

$$y = (1,080 \pm 0,054)x - (0,748 \pm 0,723) \quad (9)$$

dan ketidakpastian  $W_o$  sebesar  $\pm 0,642$  kg/jam untuk pengukuran naik.

Untuk pengukuran turun, didapatkan nilai  $sW_o = 0,309$  kg/jam, dengan nilai  $s_m$  dan  $s_b$  masing-masing yaitu 0,026 dan 0,348. Dengan tingkat kepercayaan senilai 99,7%, maka ketidakpastian dari masing-masing variabel  $W_o$ ,  $m$ , dan  $b$  akan bernilai  $\pm 3s$ . Sehingga didapatkan persamaan  $y = (1,084 \pm 0,078)x - (1,100 \pm 1,046)$  dan ketidakpastian  $W_o$  sebesar  $\pm 0,929$  kg/jam.

Dengan nilai sensitivitas yang mendekati 1 dan ketidakpastian yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan kalibrasi yang pertama, maka kondisi yang disyaratkan pada pengujian kalibrasi yang ketiga ini merupakan batasan dari prototipe yang dibuat.

### 4.3 Pengujian Input Tetap

Setelah dilakukan pengujian untuk input yang berubah, kemudian dilakukan pengujian untuk input tetap, yakni masing-masing 10 kali pengujian untuk rentang 10,157 kg/jam sampai dengan 14,845 kg/jam dengan perubahan tiap titik sebesar 0,782 kg/jam. Pengujian dilakukan pada ruangan dengan temperatur 26,2°C. Pengujian input tetap dilakukan untuk mengetahui nilai akurasi, presisi dan bias dari prototipe. Nilai akurasi dan presisi akan semakin baik jika mendekati 100%, dan nilai bias akan semakin baik jika mendekati nol.

## 5 Kesimpulan

1. Prototipe *thermal mass flowmeter* yang dibuat dapat digunakan sebagai media pembelajaran karena menggunakan bahan pipa akrilik transparan, sehingga sistem dapat diamati secara langsung.
2. Prototipe *thermal mass flowmeter* yang dibuat dapat digunakan untuk mengukur laju aliran massa udara.
3. Prototipe *thermal mass flowmeter* memiliki daerah kerja pengukuran pada rentang 10,157 kg/jam sampai 14,845 kg/jam dengan pembacaan nilai laju aliran massa pada saat *heater* memiliki temperatur dengan rentang 170 sampai dengan 172°C.
4. Sensitivitas prototipe yang dibuat masing-masing untuk pengukuran naik dan pengukuran turun adalah 1,080 dan 1,084 dengan masing-masing *offset* sebesar 0,748 dan 1,100.
5. Nilai akurasi dan presisi rata-rata dari 8 titik pengujian input tetap memiliki nilai masing-masing 96,804% dan 95,092%.
6. Prototipe memiliki ketidakpastian pengukuran naik sebesar  $\pm 0,642$  kg/jam dan ketidakpastian pengukuran turun sebesar  $\pm 0,929$  kg/jam dengan nilai koefisien korelasi naik dan turun masing-masing 0,995 dan 0,979.

## 6 Daftar Pustaka

- [1] *Thermal Mass Flow Measurement of Fluid*. Sierra Instruments, 2008
- [2] Lipták, Béla.2003. *Process Measurement and Analysis 4th Editions*. London: CRC Press.
- [3] M. Potter, D. C. Wiggart. 2008. *Schaum's Outlines*. USA: McGraw Hill.
- [4] R. W. Fox, A. T. McDonald, P. J. Pritchard, and J. C. Leylegian. 2011. *Fluid Mechanics 8th Editions*. USA: Wiley.