

# Kalibrasi *Single-Normal Hot-Wire Probe Sigmond Cohn Alloy 851* untuk Aliran Jet Terpulsasi

**Hariyo Priambudi Setyo Pratomo**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra Surabaya  
E-mail: hariyo\_p@peter.petra.ac.id

**Klaus Bremhorst**

Mechanical Engineering and Australian Member of Engineers Australia, Pulsed Jet Laboratory  
School of Engineering, the University of Queensland

## ABSTRAK

Kalibrasi *single-normal hot-wire probe* Sigmond Cohn alloy 851 dilakukan dengan metode kalibrasi stasioner pada rentang kecepatan *exit nozzle* 2 sampai 80 meter/detik. Kalibrasi ini bertujuan untuk menentukan persamaan respon kalibrasi yang paling baik yang dinyatakan dengan akurasi *curve fit*. Dari hasil pengujian akurasi *curve fit*, persamaan *extended power-law* memberikan *curve fit* yang lebih baik daripada *curve fit* yang dihasilkan oleh persamaan *simple power-law*. Metode *look-up table* yang digunakan dapat meningkatkan akurasi *curve fit* persamaan *extended power-law* dari  $\pm 1.7\%$  menjadi  $\pm 0.03\%$ . Analisis ketidakpastian dari *root mean square* memenuhi kriteria 4% error.

**Kata kunci:** *Single normal hot-wire probe*, metode kalibrasi stasioner, persamaan *extended power-law*, persamaan *simple power-law*, metode *look-up table*.

## ABSTRACT

*Calibration of a Sigmond Cohn alloy 851 single normal hot-wire probe was performed with a stationary calibration method with a range of nozzle exit velocity from 2 up to 80 m/s. The calibration aims to determine the best calibration response equation associated with the accuracy of curve fit. The curve fit accuracy test shows that the extended power-law equation provides a better curve fit than the simple power-law equation. A look-up table method used can improve the accuracy of curve fit of the extended power-law equation from a  $\pm 1.7\%$  into  $\pm 0.03\%$  accuracy. Uncertainty analysis of root mean square value meets criteria of 4% error.*

**Keywords:** *Single normal hot-wire probe*, stationary calibration method, extended power-law equation, simple power-law equation, look-up table method.

## PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang cepat dalam peralatan penyensoran telah memungkinkan berbagai pengukuran aliran fluida dilakukan dengan berbagai sensor yang memberikan hasil-hasil pengukuran yang akurat. Untuk pengukuran berbagai aliran turbulen, salah satu jenis sensor yang banyak digunakan adalah *hot-wire anemometer*. Sebelum digunakan dalam pengukuran aliran, *hot-wire anemometer* harus dikalibrasi untuk menentukan suatu persamaan respon kalibrasi yang menyatakan suatu hubungan antara tegangan kawat (*wire voltage*, E) dengan kecepatan referensi (*reference velocity*, U). Setelah persamaan respon kalibrasi tersebut diperoleh, kemudian informasi kecepatan dalam setiap percobaan utama dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan respon tersebut.

Ada beberapa bentuk persamaan respon kalibrasi, diantaranya adalah persamaan *simple power-law* [1] dan persamaan *extended power-law* [2] yang dapat digunakan dalam konversi data. Setiap persamaan respon ini memiliki keakurasian yang dihubungkan dengan *curve fit* yang dihasilkan pada suatu rentang kecepatan *exit* yang digunakan untuk setiap percobaan. Keakurasian persamaan respon kalibrasi tersebut ditentukan oleh nilai optimum konstanta pangkat yang dipilih untuk menghasilkan suatu *curve fit* yang baik. Sehubungan dengan keakurasian *curve fit* dari persamaan respon kalibrasi tersebut, beberapa peneliti [3, 4, 5] telah mengkaji keakurasian *curve fit* dari persamaan *simple power-law* dengan rentang kecepatan referensi atau kecepatan *exit* yang berbeda-beda untuk menghasilkan nilai optimum konstanta pangkat selain nilai optimum ( $n_{opt} = 0.5$ ) yang disarankan oleh King [1]. King menggunakan rentang kece-

patan *exit* moderat dari 10–20 meter/detik, sementara Collis dan Williams [4,1] menyarankan nilai optimum konstanta pangkat sebesar 0.45 dengan rentang  $0.02 < Re < 44$  untuk menghasilkan suatu *curve fit* yang baik. Berbeda dengan para peneliti sebelumnya, Bruun [3] dan Swaminathan, Bacic *et al.*[5] menyarankan nilai optimum sebesar 0.4 – 0.45 pada kecepatan *exit* moderat tersebut digunakan untuk persamaan *simple power-law*. Lebih jauh, penelitian awal yang dilakukan oleh Bruun dan Tropea [6] menjelaskan bahwa persamaan *extended power-law* oleh Siddall dan Davies (1972) tidak mampu memberikan suatu *curve fit* yang lebih akurat dibandingkan *curve fit* dari persamaan *simple power-law* bahkan untuk suatu rentang kecepatan *exit* yang besar [6,2].

Mempertimbangkan permasalahan pemilihan persamaan respon kalibrasi untuk rentang kecepatan *exit* yang berbeda-beda tersebut, studi ini bertujuan untuk menguji keakurasian *curve fit* kedua persamaan respon tersebut dengan suatu rentang kecepatan *exit* yang lebih besar. Selanjutnya, hasil pengujian yang diperoleh digunakan sebagai referensi pemilihan persamaan respon kalibrasi yang tepat dalam pengukuran aliran jet terpulsasi. Peningkatan akurasi persamaan respon yang dipilih dapat dilakukan dengan menggunakan metode *look-up table* [7]. Parameter-parameter yang dievaluasi meliputi *normalized standard deviation*,  $\epsilon_a$  dan *sum of errors squared* (SES). Kalibrasi dilakukan pada *single normal hot-wire probe* untuk pengukuran kecepatan satu komponen (*axial velocity*).

### Prinsip Kerja Single Normal Hot-wire Probe

*Single-normal probe* adalah suatu tipe *hot-wire probe* yang paling umum digunakan sebagai sensor untuk memberikan informasi kecepatan aliran dalam arah aksial saja. *Probe* seperti ini terdiri dari sebuah kawat logam pendek yang halus (*delicate*) yang disatukan pada dua *prong* nikel atau baja yang dipanasi dengan arus listrik dan bekerja berdasarkan prinsip perpindahan panas konveksi. Jumlah perpindahan panas yang diterima *probe* dinyatakan dengan *overheat ratio* [7] yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{overheat ratio} = \frac{R_w}{R_a} \quad (1)$$

dimana  $R_w$  adalah resistansi kawat atau resistansi pengoperasian pada temperatur pengoperasian dan  $R_a$  adalah resistansi dingin pada temperatur *ambient*.

### Sistem Hot-wire Anemometer dan Spesifikasi Single-Normal Hot-wire Probe

Sistem *hot-wire anemometer* yang digunakan meliputi sebuah *single normal hot-wire probe*, DISA 55M01 main unit, 55M11 CTA booster adapter, dan 55M05 power pack. *Probe* yang digunakan dioperasikan dalam suatu mode temperatur konstan untuk

menyediakan respon frekuensi yang lebih tinggi. Dalam mode temperatur konstan, resistansi kawat,  $R_w$  dipertahankan konstan untuk memfasilitasi respon sesaat dari sensor inersia termal terhadap berbagai perubahan dalam kondisi aliran.



Gambar 1. Single normal hot-wire sensor

Kawat pada *probe* adalah suatu kawat *single normal* yang terbuat dari material Sigmund Cohn alloy 851 (79%Pt, 15%Rh, and 6%Ru) yang disatukan pada *prong* dengan teknik pengelasan titik yang dilakukan di *Mechanical Instrument Laboratory, the University of Queensland*. Kawat *probe* ini memiliki kekuatan tarik maksimum, koefisien temperatur dari *resistivity*,  $\alpha_{20}$ , dan *resistivity*,  $\chi_{20}$ , masing-masing sebesar  $1.724 \times 10^6$  kPa,  $0.7 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , dan  $30 \times 10^6 \text{ } \Omega\text{-cm}$ . Panjang kawat,  $\ell$  adalah 2 mm dengan diameter,  $d_w$  berukuran  $10.16 \text{ } \mu\text{m}$  sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 1.

### Spesifikasi Tabung Pitot

Tabung Pitot yang digunakan memiliki ukuran diameter 1 mm dan panjang 570 mm yang dibuat di *Mechanical Instrument Laboratory, the University of Queensland*. Diameter 1 mm menyatakan lubang tekanan dinamik untuk mengukur kecepatan aliran. Selama kalibrasi, Tabung Pitot dihubungkan apakah dengan *Combist micromanometer*, *inclined manometer* atau manometer tabung U untuk mengukur kecepatan *exit* aliran.

### Persamaan Respon Kalibrasi

#### Persamaan Simple Power-law

Persamaan ini diperkenalkan oleh [1] dan dirumuskan sebagai berikut:

$$E^2 = A + BU^n \quad (2)$$

dimana A dan B merupakan konstanta-konstanta kalibrasi, E merupakan tegangan kawat, n merupakan konstanta pangkat, dan U merupakan komponen kecepatan aksial.

**Persamaan *Extended Power-law***

Persamaan ini diperkenalkan oleh [2] yang diformulasikan sebagai berikut:

$$E^2 = A + BU^n + CU \tag{3}$$

dimana A, B, dan C adalah konstanta-konstanta kalibrasi dan n = 0.5.

**Persamaan *Reynolds Decomposition***

Komponen-komponen kecepatan aksial dalam Persamaan 2 dan 3 dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan *Reynolds decomposition* yang dirumuskan sebagai berikut:

$$U_i = U + u \tag{4}$$

dimana  $U_i$  merupakan kecepatan sesaat, U adalah kecepatan rata-rata, dan u merupakan komponen fluktuasi kecepatan atau turbulensi *aggregate*.

**Persamaan *Time Averaging* dan Persamaan Diskrit**

Kecepatan rata-rata dalam Persamaan 4 dapat ditentukan dari persamaan *time averaging* yang dinyatakan sebagai berikut:

$$U = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_i dt \tag{5}$$

dimana T merupakan interval waktu yang cukup lama. Persamaan 5 di atas dapat didekati dengan suatu persamaan diskrit untuk menentukan kecepatan rata-rata yang dapat digunakan terhadap penyamplingan sinyal digital selama suatu periode waktu berhingga yang dirumuskan melalui persamaan

$$\hat{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{N} \tag{6}$$

dimana  $U_i$  adalah kecepatan sinyal sesaat ke-i yang disampelkan, N adalah jumlah sampel.  $\hat{U}$  merupakan estimasi nilai U dan dalam studi ini berlaku bahwa  $\hat{U} = U$ .

**Persamaan Momen Kedua Turbulensi**

Momen-momen kedua, yang biasa juga dikenal sebagai nilai kuadrat rata-rata (*mean square value*) nilai u dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\overline{u^2} = \overline{(U_i - U)^2} \tag{7}$$

Dengan jumlah sampel yang cukup besar dalam sebuah proses penyamplingan digital, Persamaan 8 dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$\overline{u^2} = \frac{1}{(N-1)} \left[ \sum_{i=1}^N U_i^2 - NU^2 \right] \tag{8}$$

**Persamaan *Normalized Standard Deviation*,  $\epsilon_u$**

Penentuan *normalized standard deviation*,  $\epsilon_u$  [7] dari *curve fit* persamaan respon kalibrasi dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$\epsilon_u = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( 1 - \frac{U_R}{U_C} \right)^2 \right)^{1/2} \tag{9}$$

dimana  $U_C$  adalah kecepatan kalibrasi yang dihitung dan  $U_R$  adalah kecepatan kalibrasi yang diukur oleh tabung pitot

**Persamaan *Sum of Errors Squared***

Persamaan untuk menentukan *sum of errors squared* (SES) [7] dari *curve fit* persamaan respon kalibrasi dinyatakan sebagai berikut:

$$SES = \sum_{i=1}^N \left( E_R^2 - E_C^2 \right)^2 \tag{10}$$

dimana  $E_C$  adalah tegangan kalibrasi yang dihitung dan  $E_R$  adalah tegangan kalibrasi yang diukur oleh *hot-wire anemometer*.

**Analisa *Uncertainty* dan Akurasi Kalibrasi**

*Individual uncertainties* untuk nilai U dan  $\overline{u^2}$  di atas yang disebabkan oleh tingkat intensitas turbulensi dapat ditentukan dengan mempertimbangkan nilai yang sebenarnya dari U dan  $u^2$  dan nilai terukur dari  $U_R$  dan  $\overline{u_R^2}$  sebagaimana dirumuskan dalam

$$U_R = U \left( 1 + \frac{n-1}{2} \frac{\overline{u^2}}{U^2} + \frac{1}{2} h^2 \frac{\overline{w^2}}{U^2} \right) \tag{11}$$

dan

$$\overline{u_R^2} = \overline{u^2} \left( 1 + (n-1)STu + h^2 R_{uw^2} Tu \right) \tag{12}$$

dimana h adalah *pitch factor* atau *angular angle coefficient*, n adalah konstanta pangkat dari persamaan respon kalibrasi (= 0.5),  $R_{uw^2}$  adalah *cross correlation* dari komponen-komponen fluktuasi *axial* dan *azimuthal* (u and w), S merupakan *skewness*, dan Tu adalah intensitas turbulensi. *Skewness*, S dan intensitas turbulensi dalam Persamaan 12 dapat ditentukan dari persamaan-persamaan berikut:

$$S = \frac{\overline{u^3}}{(\overline{u^2})^{3/2}} \tag{13}$$

$$Tu = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{U} \tag{14}$$

Browne, Antonia *et al.* [8] menjelaskan bahwa untuk mendapatkan suatu kalibrasi yang akurat di dalam suatu 4% *error* dalam pengukuran *root mean square* komponen kecepatan berfluktuasi,  $u'$ , beberapa persyaratan  $\ell / d_w > 140$  dan  $\ell / \eta < 5$  harus dipenuhi dimana  $\ell$  merupakan panjang kawat,  $d_w$

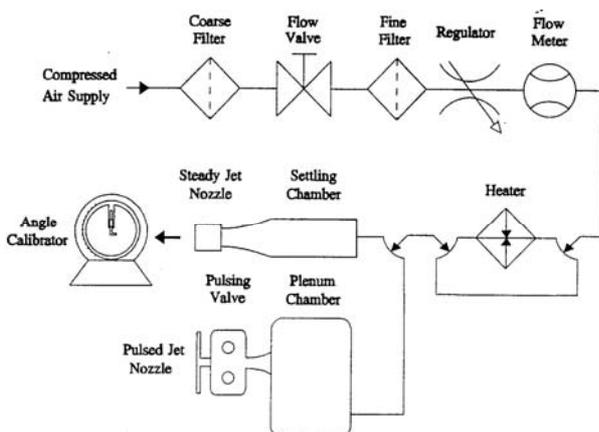
adalah diameter kawat, dan  $\eta$  adalah *Kolmogorov length scale*<sup>1</sup>.

## METODE PENELITIAN

### Teknik dan Fasilitas Kalibrasi

Studi ini menggunakan sebuah metode kalibrasi stasioner yang berarti bahwa *single-normal hot-wire probe* dipertahankan tidak bergerak selama kalibrasi. Proses kalibrasi dilakukan di *Pulsed Jet Laboratory, the University of Queensland* dengan fasilitas kalibrasi sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 2.

*Single normal probe* dan Tabung Pitot diletakkan tegak lurus terhadap arah aliran dengan menggunakan *angle calibrator* kira-kira 1 diameter *downstream* di depan aparatus *steady jet*. Jarak antara *probe* dan Tabung Pitot adalah 4 mm untuk menghindari efek interferensi aliran antara satu sama lain. Posisi 1 diameter ini untuk memfasilitasi intensitas turbulensi yang rendah dan proses ekuilibrasi antara tekanan statis,  $p_s$  dan tekanan atmosfer,  $p_{atm}$  [9,7]. Rentang kecepatan *exit* yang digunakan adalah dari 2 sampai dengan 80 meter/detik untuk memberikan kecepatan *exit* maksimum melebihi 50 meter/detik sebagaimana diharapkan untuk kecepatan *exit* pada aliran jet terpulsasi. Rentang kecepatan *exit* ini dibagi menjadi 10 kecepatan *exit* yang berbeda yang berselisih sama untuk setiap dua kecepatan yang berurutan. *Heater* dan *pulsed jet nozzle* yang diilustrasikan dalam Gambar 2 tidak digunakan untuk menghasilkan aliran inkompresibel dan kontinyu.



Gambar 2. Fasilitas Kalibrasi dan Pulsed Jet Apparatus (digambar ulang dari Gehrke 1997)

<sup>1</sup> Hal ini merupakan sebuah parameter pengukuran berbagai *eddy* yang paling kecil dalam berbagai aliran turbulen yang dirumuskan sebagai  $\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}$  dimana  $\nu$  adalah viskositas kinematis dan  $\varepsilon$  merupakan *dissipation rate* sebagaimana dijelaskan oleh [14].

### Persiapan Kalibrasi

Untuk menjaga *wire velocity sensitivity*, dipilih *overheat ratio* sebesar 1.3. Temperatur *ambient* di dalam aboratorium adalah 22.3 °C dan ruangan laboratorium ditutup rapat untuk menghindari interferensi luar terhadap aliran selama proses kalibrasi. Sebuah termokopel tipe T digunakan untuk mengukur temperatur fluida. Nilai resistansi dingin,  $R_a$  sebesar 7.17  $\Omega$  didapatkan dari pengukuran resistansi pada temperatur 22.3 °C. Nilai resistansi dingin ini sudah termasuk nilai resistansi kabel dan *lead*,  $R_L$ . Resistansi kawat  $R_w$ , termasuk kabel dan *lead*, adalah 9.32  $\Omega$ , dihitung dengan menggunakan Persamaan 1. Nilai ini kemudian diset pada DISA 55M01 main unit.

Melalui pengecekan rasio panjang kawat terhadap diameter kawat  $\ell/d_w$  dan rasio panjang kawat terhadap Kolmogorov *length scale*  $\ell/\eta$ , masing-masing sebesar 196.85 dan sebesar 16.13, maka panjang kawat yang diperlukan dapat ditentukan dimana dipersyaratkan bahwa  $\ell/\eta > 5$ . Kolmogorov *length scale* diestimasi dari nilai yang digunakan oleh [10] sebesar 0.124 mm.

### Pengolahan dan Pengkondisian Sinyal

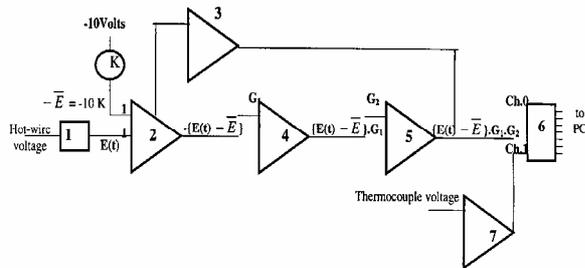
*Single normal probe* dihubungkan dengan sebuah Tektronix 2201 *oscilloscope* dan 8050A *digital voltmeter*, dua buah 737M *low-pass (L/P) filters* dan *amplifiers*, dua *signal conditioning units* (715A/B and 715 A/D inverter/amplifier/summer), sebuah 12-bit *analog-to-digital (A/D) card*, dan sebuah *personal computer* Compaq Armada E500 yang diperlengkapi dengan *data logging software* untuk melaksanakan teknik penyamplingan digital seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. *Data logging software* yang digunakan untuk akuisisi data adalah Fastaquire yang merupakan suatu versi modifikasi dari LabVIEW's *virtual instrument*.

Untuk konversi data, metode analisa kecepatan digunakan dengan menginversi Persamaan 2 dan 3 untuk menentukan kecepatan yang dihitung (*calculated velocity*) dengan substitusi Persamaan 15 ke dalam persamaan 2 dan 3 sebagaimana data kalibrasi didapatkan dari suatu proses penyamplingan digital. Persamaan 15 diperoleh dari teknik pemrosesan sinyal dan akuisisi data yang diformulasikan sebagai berikut:

$$E(t) = \left( \frac{E_{A/D \text{ card}}}{G_1 \cdot G_2} \right) + \bar{E} \quad (15)$$

dimana  $E(t)$  merupakan tegangan total,  $\bar{E}$  merupakan tegangan rata-rata atau tegangan *offset*,  $E_{A/D \text{ card}}$  adalah tegangan yang dihasilkan oleh A/D card,  $G_1$  dan  $G_2$  adalah *gain*. Selama proses penyamplingan digital, *sampling frequency*,  $f_s$  sebesar 1000 Hz dan *sampling time* sebesar 10 detik digunakan untuk 10

titik kecepatan *exit* tersebut (di dalam rentang 2 sampai dengan 80 meter/detik yang memberikan jumlah sampel, N sebesar 10,000 sampel untuk setiap titik kecepatan. Aliran turbulen yang dihasilkan oleh *steady jet* bersifat *statistically stationary* ditunjukkan oleh nilai rata-rata komponen fluktuasi ( $\bar{u} = 0$ ). Hal ini sesuai dengan penjelasan Bernard dan Wallace (2002) untuk berbagai permasalahan *spatial* atau *time averaging* [11].



1: CTA booster adapter, 2 and 4: amplifier/summer/inverter circuit, 3 and 5: amplifier and L/P filter, 6: A/D card, 7: thermocouple amplifier

**Gambar 3. Diagram Pemrosesan Sinyal dan Akuisisi Data**

**Pengujian Akurasi Persamaan Respon Kalibrasi dan Metode Look-up Table**

Untuk pengujian akurasi *curve fit* Persamaan 2, beberapa nilai konstanta pangkat, n sebesar 0.4137, 0.4143, 0.4145, 0.475, dan 0.5 digunakan sementara nilai konstanta pangkat, n sebesar 0.5 hanya digunakan untuk pengujian akurasi *curve fit* Persamaan 3 dalam rentang kecepatan *exit* tersebut. Bergantung pada nilai *normalized standard deviation* dan SES, kemudian suatu persamaan respon yang lebih akurat dapat ditentukan.

Setelah persamaan respon dipilih, kemudian metode *look-up table* digunakan untuk memperbaiki akurasi *curve fit* persamaan respon tersebut. Dalam metode ini, setiap segmen kecepatan dibagi ke dalam sejumlah *subinterval* yang sama. Setelah itu, suatu optimisasi terpisah digunakan untuk setiap segmen kecepatan untuk menentukan konstanta-konstanta kalibrasi yang baru. Akhirnya, suatu persamaan respon kalibrasi yang lebih akurat dapat direkonstruksi untuk seluruh segmen dengan *the least square curve-fitting* untuk memberikan suatu *smooth curve fit* dalam rentang kecepatan tersebut.

**Analisa Uncertainty dan Akurasi Kalibrasi**

Untuk *single normal probe*, simbol h dalam Persamaan 11 dan 12 dapat diabaikan. Bagaimanapun juga, jika simbol h dipertahankan dan simbol  $w^2$  diasumsikan sama dengan  $u^2$ , *uncertainty* dalam kedua persamaan itu akan sedikit lebih besar. Lebih jauh, perbedaan kecil dalam *uncertainty* tersebut disebabkan oleh pertimbangan

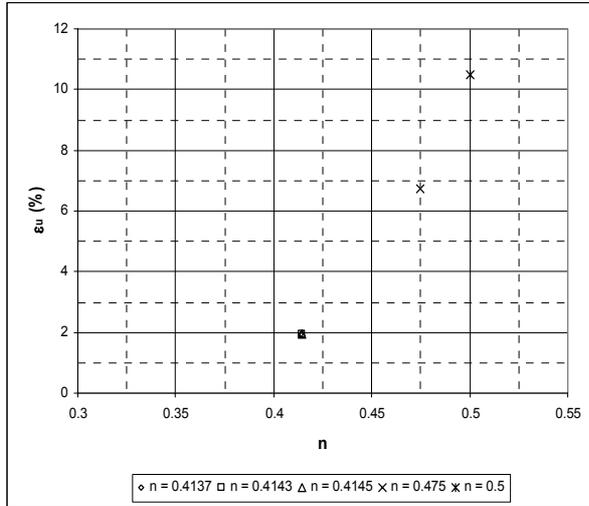
simbol h dan  $R_{inv}^2$  tidak signifikan sebagaimana nilai-nilai  $w^2$  dan Tu adalah relatif kecil dalam daerah di dekat keluaran nozzle (*near field*) dari *steady jet*.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Gambar 4 menunjukkan variasi *normalized standard deviation*,  $\epsilon_u$  terhadap beberapa eksponen dari Persamaan 2 dalam rentang kecepatan 2 – 80 meter/detik. Terlihat bahwa sebagaimana n meningkat, persentase  $\epsilon_u$  naik secara signifikan, mengindikasikan persamaan-persamaan *simple power-law* dengan n yang lebih tinggi gagal menghasilkan suatu *curve fit* yang lebih baik daripada persamaan yang sama dengan n yang lebih rendah (0.4137, 0.4143, dan 0.4145). *Curve fit* yang terbaik diberikan oleh n = 0.4143 and 0.4145 menghasilkan  $\epsilon_u = 1.9\%$ . Bagaimanapun representasi seperti ini tidak seharusnya dipertimbangkan untuk menentukan persamaan *simple power-law* sebagai preferensi karena persamaan ini mengabaikan elemen ‘CU’ dalam persamaan *extended power-law* sebagai suatu faktor koreksi akurasi [7]. Tabel 1 menunjukkan bahwa persamaan *extended power-law* memberikan suatu *curve fit* yang lebih baik (menghasilkan  $\epsilon_u = 1.7\%$  dan SES = 0.005) dari persamaan *simple power-law* dengan n = 0.4143 and 0.4145. Membandingkan hasil-hasil peneliti sebelumnya [6], *curve fit* yang lebih baik dari persamaan *extended power-law* daripada *curve fit* persamaan *simple power-law* disebabkan karena tipe kawat yang digunakan berbeda. Lebih jauh, hasil-hasil dari studi ini mengkonfirmasi penemuan-penemuan dari beberapa peneliti sebelumnya [3,5] yang mendemonstrasikan *trend* yang sama:  $\epsilon_u$  yang meningkat secara tajam sebagaimana n meningkat dalam rentang antara 0.41 hingga 0.5. Bagaimanapun, nilai-nilai  $\epsilon_u$  dari hasil-hasil terkini adalah lebih besar secara signifikan dari hasil-hasil sebelumnya dikarenakan oleh material dan ukuran kawat yang berbeda dan suatu rentang kecepatan yang lebih lebar. Hal ini menyebabkan efek-efek *disturbance* aerodinamika yang lebih besar yang menyebabkan *error* dari separasi aliran di dekat probe dan prong [12,13]. Terlepas dari hal itu, klaim bahwa persamaan *extended power-law* tidak memberikan suatu *curve fit* yang lebih baik dalam rentang kecepatan yang lebih besar tidak dapat dibuktikan sebagaimana untuk tipe kawat yang berbeda akan memberikan suatu hasil kalibrasi yang berbeda.

Dari Tabel 1, hasil-hasil studi sekarang ini menunjukkan bahwa metode *look-up table* menawarkan suatu keuntungan besar dalam mereduksi *uncertainty* yang menghasilkan *curve fit* terbaik dari persamaan respon *polynomial* orde kedua yang ditunjukkan dengan nilai-nilai  $\epsilon_u$  dan SES. Untuk studi ini, 10 titik kecepatan dibagi secara sama ke dalam 4 segmen kecepatan yang menghasilkan 4 titik dalam setiap segmennya. Untuk setiap segmen tersebut akan diperoleh persamaan kalibrasi yang

baru. Setiap segmen kecepatan dibagi menjadi 25 interval jarak yang sama dan dilakukan optimasi dengan persamaan kalibrasi yang baru.



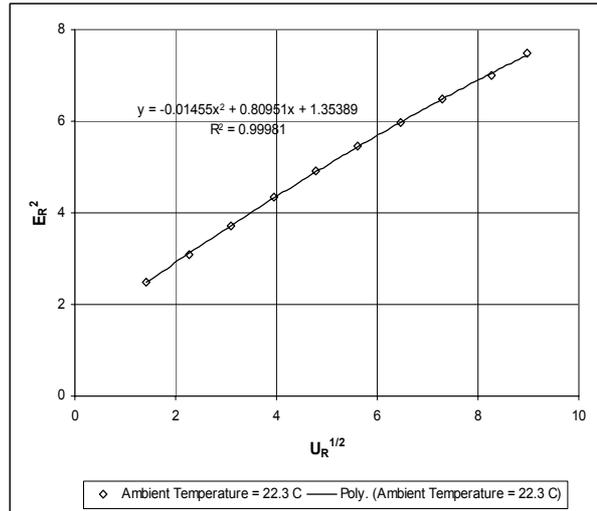
Gambar 4. Variasi  $\epsilon_u$  dari Suatu Kalibrasi Single-Normal Probe

Tabel 1. Hasil-hasil  $\epsilon_u$  dan SES

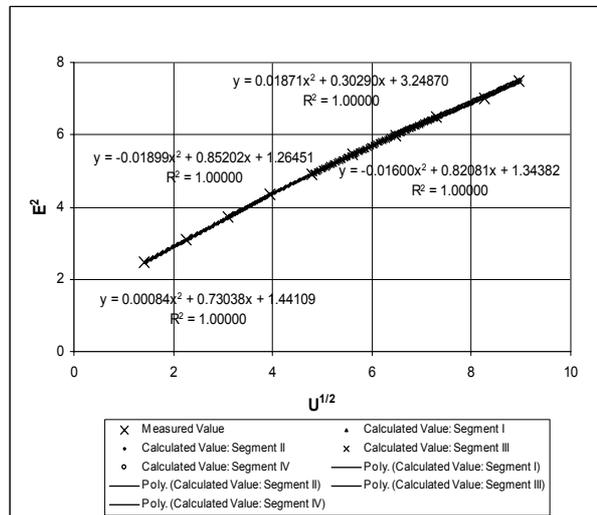
Persamaan Kalibrasi	n	$\epsilon_u$ (%)	SES
Simple power-laws	0.4137	1.9	0.007
	0.4143	1.9	0.007
	0.4145	1.9	0.007
	0.475	6.7	0.037
	0.5	10.5	0.061
Extended power-law	0.5	1.7	0.005
Extended power-law dengan metode look-up table	0.5	0.03	0.001

Beranjak dari titik ini, persamaan *extended power-law* dipilih sebagai preferensi sebagaimana persamaan ini memberikan nilai-nilai yang kecil dari  $\epsilon_u$  dan SES. Langkah selanjutnya adalah memperbaiki nilai  $\epsilon_u$ , dimana nilai  $\epsilon_u$  sama dengan 1.7 % masih dianggap cukup besar. Gambar 5–7 menjelaskan penggunaan metode *look-up table* sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya. Dari Gambar 8, variasi dalam *curve fit error* dari persamaan *extended power-law* yang baru yang ditingkatkan dengan metode *look-up table* adalah jauh lebih kecil daripada variasi *curve fit error* dari persamaan *extended power-law* tanpa metode *look-up table* dan persamaan *simple power-law*. Lebih jauh, persamaan yang baru dapat mengurangi nilai  $\epsilon_u$  dari 1.7% menjadi 0.03%.

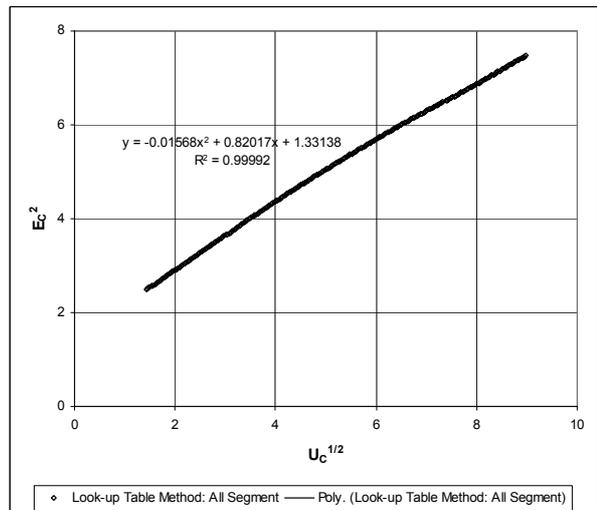
Gambar 9 menunjukkan variasi *curve fit error* tiga persamaan *extended power-law* terhadap berbagai perubahan temperatur sebesar 17°C, 17.5°C, and 18°C. Terlihat bahwa tidak ada pola yang jelas. Tabel 2 menampilkan nilai-nilai yang dihitung dari persamaan-persamaan tersebut dimana ada perbedaan-perbedaan kecil pada nilai-nilai yang dihasilkan. Oleh karena itu, tidak diperlukan metode kompensasi untuk mengabaikan perbedaan-perbedaan tersebut.



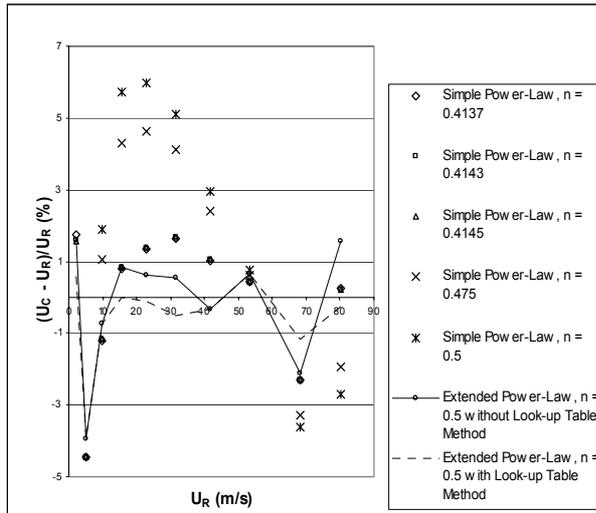
Gambar 5. Curve Fit Persamaan Extended Power-Law dalam Rentang  $U_e = 2 - 80$  m/s



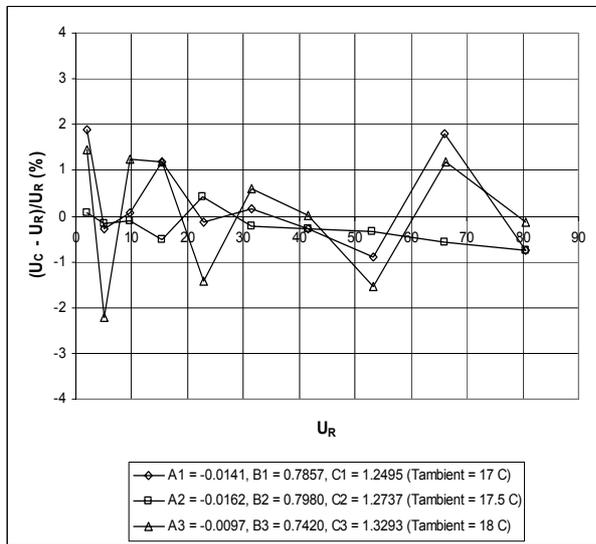
Gambar 6. Curve Fit Optimization Terpisah untuk Setiap Segmen dengan Metode Look-Up Table



Gambar 7. Curve Fit Persamaan Extended Power-Law dengan Metode Look-Up Table



Gambar 8. Variasi Error Curve Fit



Gambar 9. Variasi Error Curve Fit dari Persamaan Extended Power-Law Terhadap Perubahan Temperatur

Tabel 1. Cek Perhitungan Tegangan

Persamaan Extended power-law, n = 0.5	Kecepatan, U (m/s)	Tegangan, E (Volts)
<b>Persamaan 1:</b> A <sub>1</sub> = -0.0141; B <sub>1</sub> = 0.7857; C <sub>1</sub> = 1.2495	2.1	1.54
<b>Persamaan 2:</b> A <sub>2</sub> = -0.0162; B <sub>2</sub> = 0.7980; C <sub>2</sub> = 1.2737		
<b>Persamaan 3:</b> A <sub>3</sub> = -0.0097; B <sub>3</sub> = 0.7420; C <sub>3</sub> = 1.3293		
<b>Persamaan 1:</b> A <sub>1</sub> = -0.0141; B <sub>1</sub> = 0.7857; C <sub>1</sub> = 1.2495	71.4	2.62
<b>Persamaan 2:</b> A <sub>2</sub> = -0.0162; B <sub>2</sub> = 0.7980; C <sub>2</sub> = 1.2737		
<b>Persamaan 3:</b> A <sub>3</sub> = -0.0097; B <sub>3</sub> = 0.7420; C <sub>3</sub> = 1.3293		

Tabel 2. Persentase Relative Errors dari nilai U dan Root Mean Square

U <sub>R</sub>	Nilai terukur		Nilai sebenarnya		Error dari U (%)	Error dari $\sqrt{u^2}$ (%)
	$\sqrt{u_R^2}$	U	U	$\sqrt{u^2}$		
2.06	0.022	2.06	0.022	-0.003	0.12	
4.99	0.235	4.99	0.230	-0.055	0.21	
9.63	0.307	9.63	0.307	-0.025	0.16	
15.68	0.272	15.68	0.272	-0.008	0.11	
22.98	0.272	22.98	0.272	-0.004	0.09	
31.72	0.250	31.72	0.250	-0.002	0.07	
41.81	0.206	41.81	0.206	-0.0006	0.05	
53.22	0.192	53.22	0.192	-0.0003	0.02	
66.71	0.225	66.71	0.225	-0.0003	0.02	
76.17	7.180	76.34	7.092	-0.223	1.22	

Selanjutnya, dengan menggunakan Persamaan 11 dan 12 dan mengabaikan simbol h, *uncertainties* dari kalibrasi ditampilkan dalam Tabel 3. Terlihat bahwa nilai U sebenarnya sedikit lebih besar daripada nilai terukur U<sub>R</sub> yang menghasilkan nilai-nilai negatif *relative error*; sebaliknya *relative errors root mean square value* adalah jauh lebih besar dari *relative error* U dan memberikan nilai-nilai positif.

**KESIMPULAN**

Kalibrasi *single normal probe* telah dilakukan di dalam suatu tingkat akurasi yang baik. Persentase *relative error (uncertainties)* yang dihasilkan oleh kalibrasi adalah -0.22% untuk U dan 1.22% untuk *root mean square*. Material dan ukuran kawat yang digunakan menentukan akurasi *curve fit* yang dihasilkan serta berakibat pada penentuan persamaan respon kalibrasi yang dipilih.

Persamaan *extended power-law* menghasilkan *curve fit* yang lebih baik daripada *curve fit* persamaan *simple power-law*. Akurasi *curve fit* ini dapat diperbaiki dengan metode *look-up table* menjadi ± 0.03%. Selanjutnya, *maximum relative error* nilai *root mean square* yang dihasilkan memenuhi kriteria 4% *error* untuk pengukuran *root mean square* komponen kecepatan yang berfluktuasi, u.

**DAFTAR PUSTAKA**

- King, L. V., "On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constants of Small Platinum Wires with Applications to Hot-wire Anemometry." *Phil. Trans. Royal Society* A214, 1914, pp. 373-432.
- Siddall, R. G. and T. W. Davies, "An Improved Response Equation for Hot-wire Anemometry." *International Journal of Heat Mass Transfer*, 15, 1972. pp. 367-368.

3. Bruun, H. H., "A Note on Static and Dynamic Calibration of Constant Temperature Hot-wire Probes." *Journal of Fluid Mechanics* 76, 1976a, pp. 145-155.
4. Collis, D. C. and M. J. Williams, "Two-dimensional Convection from Heated wires at Low Reynolds numbers." *Journal of Fluid Mechanics* 6, 1959, pp. 357-384.
5. Swaminathan, M. K., R. Bacic, et al., "Improved Calibration of Hot-wire Anemometers." *Journal of Physics Engineering: Scientific Instrumentations* 16, 1983, pp. 335-338.
6. Bruun, H. H. and C. Tropea, "The Calibration of Inclined Hot-wire Probes." *Journal of Physics Engineering: Scientific Instrumentations* 18, 1985, pp. 405-413.
7. Bruun, H. H., *Hot-wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*. New York, the United States of America, Oxford University Press Inc, 1995.
8. Browne, L. W. B., R. A. Antonia, et al., "Selection of Wires and Wire spacing for X-wires." *Experiments in Fluids* 6, 1988, pp. 286-288.
9. Bremhorst, K. and J. Listijono, "Static Pressure Effects on Calibration of Velocity Transducers at Nozzle Exits." *Experiments in Fluids* 5, 1987, pp. 344-348
10. Gehrke, P. J., The Turbulent Kinetic Energy Balance of a Fully Pulsed Axisymmetric Jet. PhD Thesis, *Department of Mechanical Engineering*. Brisbane, The University of Queensland, Australia, 1997, 378 pages
11. Bernard, P. S. and J. M. Wallace, *Turbulent Flow: Analysis, Measurement, and Prediction*. New York, the United States of America, John Wiley & Sons, Inc. 2002.
12. Adrian, R. J., R. E. Johnson, et al., "Aerodynamic Disturbances of Hot-wire Probes and Directional Sensitivity." *Journal of Physics Engineering: Scientific Instrumentations* 17, 1984, pp. 62-71.
13. Comte-Bellot, G., A. Strohl, et al., "On Aerodynamic Disturbances caused by Single Hot-wire Probes." *ASME, Journal of Applied Mechanics* 38, 1971, pp. 767-774.
14. Hinze, J. O., *Turbulence*, McGraw-Hill, New York, 1975.