

PEMBUATAN DAN PENGUJIAN ANEMOMETER KAWAT PANAS TEMPERATUR KONSTAN UNTUK PENGUKURAN KECEPATAN UDARA PADA ALIRAN SWIRLING

I N. Diasta⁽¹⁾, Arianto Santoso⁽¹⁾, Priyono Sutikno⁽¹⁾, dan Uyung G. S. Dinata⁽²⁾

⁽¹⁾Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung

⁽²⁾Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas Padang

Abstrak

Untuk mempermudah dalam kalibrasi sebuah anemometer kawat panas maka pers. $E^2 = A + BU^{0.45}$, yang dijadikan persamaan acuan dalam pembuatan rangkaian elektronik anemometer kawat panas, diubah menjadi pers. $U = (1/B(E^2 - A))^{2.22}$ dengan maksud untuk memperoleh kurva kalibrasi berupa garis lurus sehingga mempermudah dalam pembuatan skalanya. Untuk mewujudkan hal tersebut maka dibuat rangkaian elektronik yang mampu menghasilkan kurva kalibrasi antara kecepatan aliran terhadap tegangan listrik menjadi linier dengan memilih IC AD 534 dan AD 538.

Anemometer kawat panas yang telah dibuat dengan prinsip-prinsip diatas selanjutnya diterapkan untuk mengukur kecepatan aliran udara dan menentukan arah alirannya. Sebagai studi kasus dipilih aliran udara swirling, yang memiliki komponen kecepatan aksial dan komponen kecepatan tangensial. Pada pengukuran kecepatan dalam aliran swirling dipergunakan dua buah kawat panas (hot wire) yang dipasang saling tegak lurus untuk mengukur komponen kecepatan aksial dan kecepatan tangensial aliran. Besar kecepatan dan arah aliran dapat ditentukan dari komponen-komponen kecepatan tersebut.

Abstract

To overcome the difficulties in calibrating a hot wire anemometer the equation $E^2 = A + BU^{0.45}$, as the reference equation in making hot wire anemometer, was changed to $U = (1/B(E^2 - A))^{2.22}$ to produce linear calibration curve. To realize this idea then an electronic circuit was designed with IC AD 534 and AD 538 as the main components.

The hot-wire anemometer was made based upon the above principles then used to measure velocity components of swirling flow, which has two components of velocity, i.e.: axial (normal) velocity and tangential velocity. In measurement of swirling flow the probe-X was used to measure axial velocity and tangential velocity simultaneously. Magnitude and direction of swirling flow were determined from those velocity components.

Keywords: Anemometer kawat panas, Probe-X, Aliran Swirling

1. PENDAHULUAN

Anemometer Kawat Panas (hot wire anemometer) adalah suatu peralatan untuk mengukur kecepatan aliran fluida kompresibel yang memiliki beberapa keunggulan yakni: respon tinggi; tidak banyak mengganggu aliran; dapat mengukur kecepatan pada jarak yang sempit seperti pada lapisan batas; dan lain-lain. Penguasaan teknologi pembuatan dan pemeliharaan anemometer kawat panas kita masih kurang, hal ini terbukti dari langkanya penggunaan anemometer kawat panas yang kita

jumpai dan ketergantungan kita terhadap negara lain masih tinggi. Masalah utama yang sering timbul dalam penggunaan anemometer kawat panas adalah kesulitan dalam memasang kembali kawat (wire) yang terputus.

Mengingat masalah tersebut diatas, maka pada penelitian ini telah dicoba untuk membuat sendiri peralatan anemometer kawat panas dengan mengacu pada anemometer kawat panas yang telah dibuat dan dipublikasikan pada beberapa literatur yang ada. Masalah-masalah lain yang tidak kalah pentingnya adalah membuat peralatan untuk menyolder kawat (welder),

mempelajari cara pemasangan kawat pada *prong*, dan pengkalibrasian anemometer kawat panas.

Anemometer kawat panas yang telah selesai dibuat dan telah dikalibrasi, selanjutnya dipakai untuk mengukur kecepatan dan menentukan arah aliran udara *swirling*. Dalam pengujian ini dipergunakan dua buah anemometer kawat panas masing-masing untuk mengukur komponen kecepatan dalam arah aksial dan tangensial. Dalam hal ini kawat (*wire*) saling tegak lurus satu sama lain pada posisi yang tetap. Besar dan arah kecepatan aliran udara pada suatu posisi dapat ditentukan dari komponen-komponen kecepatan aksial dan tangensial aliran *swirling*. Hal penting yang dipelajari dalam percobaan ini adalah kemampuan anemometer kawat panas untuk mengukur komponen-komponen kecepatan aliran dalam dua arah yang saling tegak lurus tanpa memutar *probe*.

2. PRINSIP DASAR ANEMOMETER KAWAT PANAS

Sepotong kawat konduktor berdiameter sangat kecil (orde mikron) yang diberi aliran listrik akan membangkitkan panas. Jika kawat panas tersebut diletakkan dalam medan aliran fluida maka akan terjadi perpindahan panas konveksi dari kawat ke fluida disekitarnya. Besarnya perpindahan panas yang terjadi adalah fungsi dari kecepatan aliran fluida.

Ada dua tipe anemometer kawat panas yakni anemometer kawat panas tipe arus konstan dan anemometer kawat panas tipe temperatur konstan. Pada anemometer kawat panas tipe arus konstan, sebuah kawat dipanaskan dengan cara dialiri sejumlah arus yang besarnya konstan. Kawat tersebut diletakkan dalam medan aliran fluida yang mempunyai kecepatan tertentu. Karena panas yang dihasilkan oleh arus listrik yang konstan maka temperatur dari kawat tersebut akan berubah-ubah sesuai dengan besarnya kecepatan aliran fluida. Sampai kemudian kawat tersebut mengalami kesetimbangan temperatur pada saat panas yang dihasilkan kawat disetimbangkan oleh rugi konveksi pada permukaan kawat. Temperatur inilah yang kemudian dijadikan sebagai parameter kecepatan yang akan kita ukur. Berbeda dengan tipe arus konstan maka anemometer kawat panas tipe temperatur konstan diupayakan supaya temperatur dari kawat yang dipanaskan tetap konstan. Pada saat kawat yang dialiri arus listrik dilakukan pada suatu kecepatan aliran maka akan terjadi penurunan temperatur pada kawat tersebut. Penurunan temperatur yang terjadi pada kawat tersebut akan memicu komponen elektronik untuk mengalirkan arus tambahan (arus pengeksitasi) sehingga mampu memberikan panas tambahan pada kawat. Dengan demikian temperatur dari

kawat yang mengalami penurunan tersebut akan kembali ke temperatur semula. Jadi untuk anemometer kawat panas tipe temperatur konstan, arus pengeksitasi inilah yang kemudian dijadikan sebagai parameter kecepatan aliran fluida.

Dalam keadaan setimbang, energi panas yang dibangkitkan oleh kawat sama dengan energi panas yang berpindah kedalam fluida. Perpindahan panas tersebut didominasi oleh perpindahan panas secara konveksi, yang dapat dinyatakan dengan persamaan:

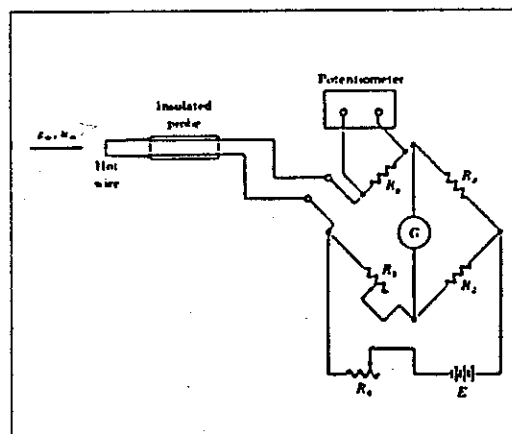
$$I^2 R_w = h A (T_w - T_f) \quad (1)$$

dimana: I = arus listrik yang melalui kawat
 R_w = resistansi kawat
 h = koefisien perpindahan panas
 A = luas permukaan kawat
 T_w = temperatur permukaan kawat
 T_f = temperatur fluida

Koefisien perpindahan panas konveksi, h , harganya bergantung pada kecepatan aliran fluida, U . Hubungan antara h dan U diberikan oleh King sebagai berikut:

$$h = C_0 + C_1 \sqrt{U} \quad (2)$$

dimana C_0 dan C_1 adalah suatu konstanta.



Gambar 1 Rangkaian *hot wire* dan resistor

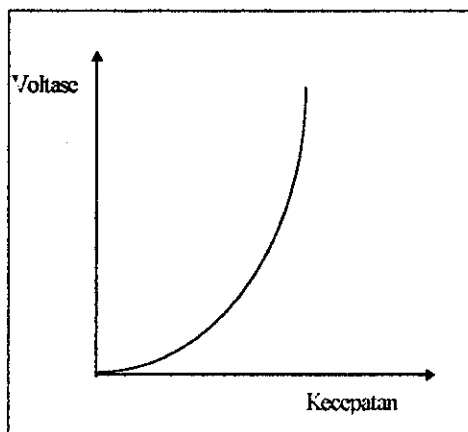
Selanjutnya kawat tersebut diatas dirangkai dengan beberapa buah resistor yang membentuk sebuah rangkaian jembatan Wheatstone, dimana kawat tersebut sebagai salah satu resistornya. Perubahan arus atau resistansi kawat panas dapat ditentukan dari perubahan beda tahanan yang terbaca pada galvanometer G seperti ditunjukkan pada gambar-1 diatas.

Menurut King, persamaan matematik yang menghubungkan antara besarnya kecepatan aliran udara dengan besaran voltase yang terjadi pada jembatan Wheatstone tidaklah berupa persamaan linier tetapi berupa persamaan dengan bilangan berpangkat seperti yang tertera dibawah ini:

$$E^2 = A + BU^n \quad (3)$$

dimana E = besarnya tegangan (Voltase)
 U = Besaran kecepatan
 n = 0.45
 A, B = koefisien konversi

Persamaan diatas merupakan persamaan dasar yang dijadikan sebagai acuan dalam pemilihan komponen elektroniknya. Untuk memudahkan penentuan berbagai komponen elektronik serta untuk memudahkan penentuan variabel kecepatan (U) maka terlebih dahulu persamaan King tersebut diubah kedalam bentuk persamaan yang lebih sederhana, sebab pada saat pengkalibrasian dari persamaan dasar King akan didapat kurva hubungan antara kecepatan dan voltase sebagai berikut :



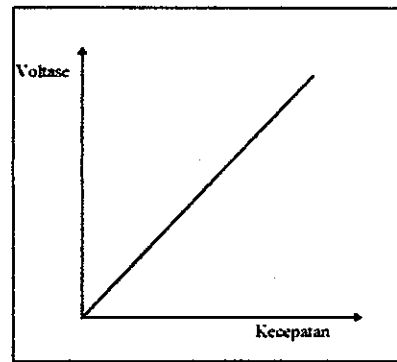
Gambar 2 Kurva kalibrasi pers. King

Untuk memudahkan dalam pengkalibrasian dan pemberian skala maka persamaan King diatas diubah menjadi persamaan berikut:

$$U = \left[\frac{1}{B}(E^2 - A) \right]^{2.22} \quad (4)$$

Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan kecepatan (U) dari masukan voltase (E), maka diperlukan paling sedikit dua komponen elektronik utama yang harus dipenuhi yang bisa mewakili persamaan diatas yakni komponen yang bisa mewakili variabel $(1/B)^{2.22}$ dan komponen elektronik yang bisa mewakili variabel $(E^2 - A)^{2.22}$.

Kurva kalibrasi persamaan King yang telah dimodifikasi berupa garis lurus seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut ini:



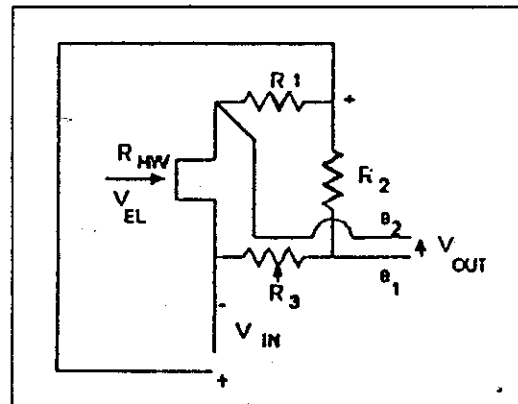
Gambar 3 Kurva kalibrasi pers. King yang telah diliniaerisasi

3. KONFIGURASI HOT WIRE ANEMOMETER TEMPERATUR KONSTAN

Sebuah anemometer kawat panas temperatur konstan terdiri dari: Sensor (*Probe* dan *Prong*), jembatan Wheatstone, *Amplifier*, *Squarer*, *Linearizer*, dan komponen-komponen tambahan lainnya.

Jembatan Wheatstone

Rangkain lengkap jembatan Wheatstone yang digunakan pada anemometer kawat panas temperatur konstan dapat dilihat pada gambar berikut.

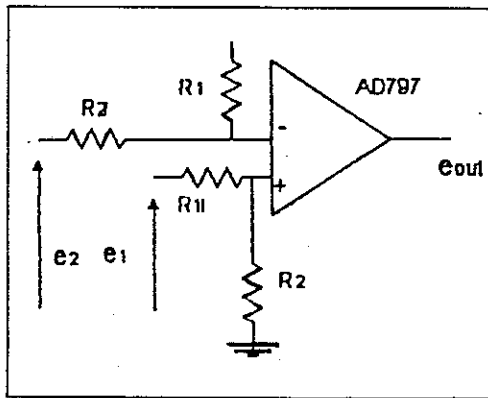


Gambar 4 Jembatan Wheatstone

Pada saat udara tidak mengalir, jembatan Wheatstone dalam keadaan setimbang ($E = 0$). Jika udara mulai mengalir maka akan terjadi perpindahan panas dari kawat ke fluida secara konveksi. Perpindahan panas tersebut mengakibatkan temperatur kawat turun. Pada anemometer kawat panas temperatur konstan, temperatur kawat besarnya dijaga konstan dengan cara menaikkan arus yang mengalir melalui kawat sehingga temperatur kawat kembali pada keadaan semula.

Amplifier

Rangkaian ini berfungsi untuk menguatkan sinyal masukan.



Gambar 5 Amplifier 1

Rangkaian diatas akan menguatkan tegangan listrik yang keluar dari jembatan Wheatstone. Besarnya penguatan dapat dihitung dengan persamaan:

$$e_{out} = \frac{R_2}{R_1} (e_{2f} - e_{1f}) \quad (5)$$

dimana:

$$e_{1f} = \frac{R_{1f}}{R_{1f} + R_2} (e_1)$$

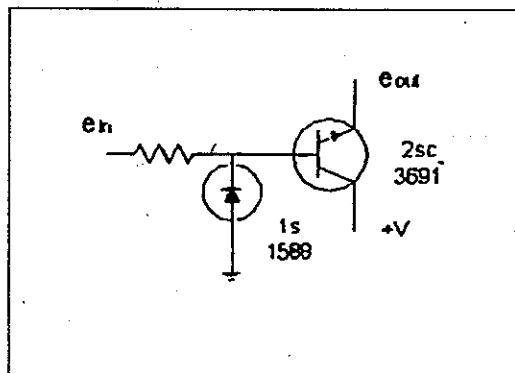
$$e_{2f} = \frac{R_{2f}}{R_{2f} + R_1} (e_2)$$

Keluaran dari amplifier-1 diperkuat kembali oleh amplifier-2.

Penguatan yang diberikan oleh amplifier-2 adalah dengan cara menambahkan keluaran dari amplifier-1 dengan suatu harga konstanta yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$e_{out} = e_m + C \quad (6)$$

dimana C adalah suatu konstanta yang bergantung pada komponen elektroniknya.



Gambar 6. Amplifier-2

Squarer

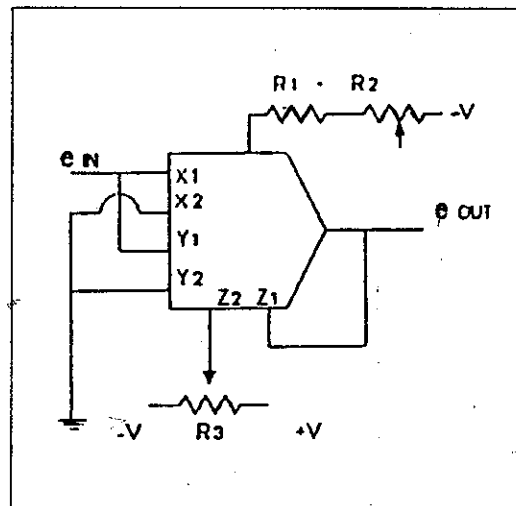
Squarer adalah rangkaian elektronik yang berfungsi untuk mengkuadratkan tegangan masukannya. Rangkaian elektronik yang bisa mengkuadratkan input tegangannya adalah rangkaian IC AD 534. Fungsi transfer IC AD 534 adalah sebagai berikut:

$$e_{out} = \frac{A(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{SF} - (z_1 - z_2) \quad (7)$$

dimana A dan SF masing-masing adalah penguatan keluaran amplifier dan faktor skala. Jika harga-harga yang dipilih adalah $x_1 = e_m = y_1$, $x_2 = y_2 = 0 = z_1$, $-15 < z_2 < +15$, $A = 1$, $-15 < SF < 0$ maka didapat:

$$e_{out} = \frac{e_m^2}{C} \quad (8)$$

nilai C diatur dengan pemilihan harga R2 dan R3. Rangkaian lengkap squarer diberikan pada gambar berikut:



Gambar 7. Squarer

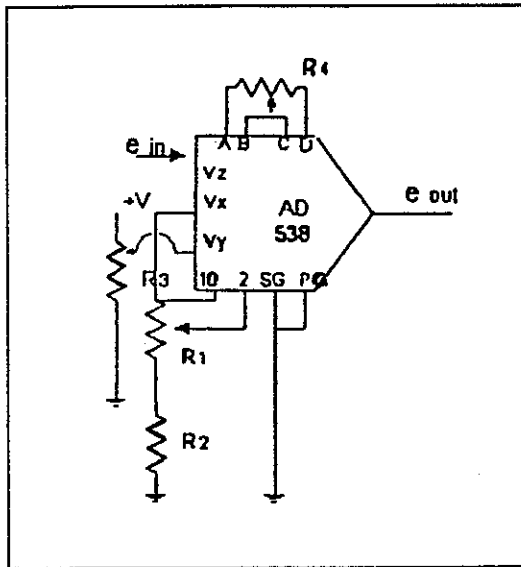
Linearizer

Untuk melinierkan tegangan keluaran dari squarer diperlukan suatu rangkaian elektronika yang mampu untuk memangkatkan dengan bilangan 2.22. Komponen yang dapat dipakai untuk melinierkan keluaran squarer adalah rangkaian IC AD 538. Rangkaian lengkap dari linearizer ditunjukkan pada gambar 8.

Fungsi transfer rangkaian IC AD 538 adalah sebagai berikut:

$$e_{out} = I_y \left(\frac{I_x}{V_x} \right)^m \quad (9)$$

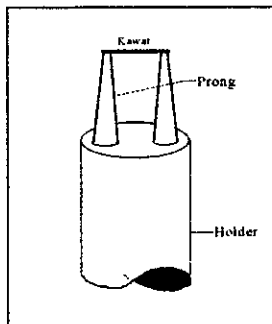
dimana $0 < V_y < +15$ dan $V_y = e_m$. Harga m diatur sedemikian rupa dengan mengatur nilai R4 untuk mendapatkan harga 2.22.



Gambar 8. Linearizer

4. PROBE

Komponen utama sebuah sensor (*probe*) terdiri dari batang pemegang (*stem*), jarum pemegang kawat (*prong*), dan kawat halus yang dilekatkan pada ujung-ujung *prong*. Sebuah *probe* dengan sensor tunggal diberikan pada gambar berikut:



Gambar 9 Probe anemometer kawat panas.

Probe kawat panas berdasarkan sensornya dapat dibagi menjadi :

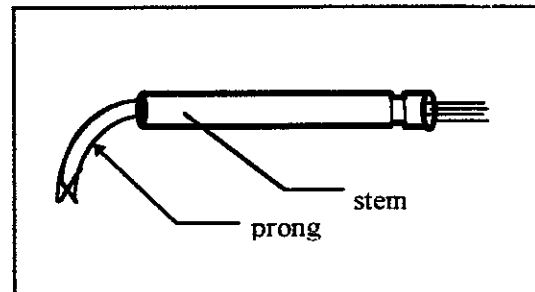
1. *probe single normal* (SN)
2. *probe single yawed* (SY)
3. *probe-X*
4. *probe triple wire* (3W)

Probe single normal (SN) dapat mengukur komponen kecepatan dalam arah aliran utama. Sebuah *probe single yawed* (SY) yang sejajar dengan arah aliran utama dapat mengukur komponen kecepatan utama dan sebuah komponen tegak lurus jika diletakkan pada posisi miring dan digunakan bersama-sama dengan *probe* SN. Jika *probe* SY diputar 360° pada sumbunya maka ketiga komponen kecepatan dan keenam tegangan Reynolds pada prinsipnya dapat diukur. *Probe-X* dapat mengevaluasi komponen kecepatan secara

simultan pada bidang *probe*. Dan dengan menggunakan *probe* 3W vektor kecepatan setiap saat dapat diukur.

Probe-X

Pengukuran dua komponen kecepatan secara simultan dapat dilakukan dengan *probe-X*. Geometri *probe-X* ditunjukkan gambar berikut:



Gambar 10. Geometri *probe-X*

Probe-X terdiri dari dua kawat miring yang berdekatan membentuk konfigurasi X. Pada analisis sinyal kedua kawat tersebut diasumsikan berada pada satu bidang. Karena itu *probe-X* versi terbaru dibuat dengan jarak yang sangat dekat 0,16 mm, contohnya DISA 55-A-32.

Pada umumnya material yang dipilih untuk *wire*-nya adalah tungsten, platinum, atau paduan platinum. Dimana masing-masing material tersebut dipilih karena mempunyai nilai perubahan tahanan terhadap temperatur yang relatif tinggi dibandingkan dengan material lainnya.

Dalam kebanyakan aplikasi, material yang paling sering dipakai adalah tungsten karena mempunyai kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan platinum ataupun paduannya. Selain itu dimensi dari material tersebut dibuat dalam ukuran mikron dengan maksud mempertinggi respon dari *probe* bila terjadi perubahan aliran dari fluida yang akan diukur kecepatannya.

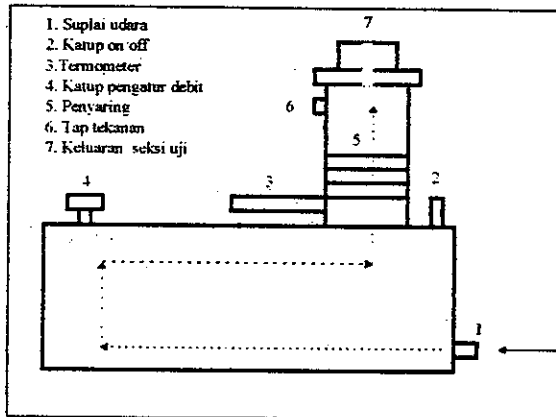
5. KALIBRASI

Rangkaian anemometer kawat panas yang telah selesai dibuat, selanjutnya dikalibrasi yaitu untuk mencari korelasi antara keluaran (yang berupa voltase) dengan kecepatan aliran udara.

Untuk mengkalibrasi anemometer kawat panas dapat dipergunakan tabung Pitot yang diletak bersama-sama dengan *probe* dalam medan aliran udara. Tegangan listrik yang terbaca pada anemometer kawat panas menunjukkan kecepatan aliran udara yang diukur dengan tabung Pitot.

Alternatif lain untuk mengkalibrasi anemometer kawat panas adalah menggunakan

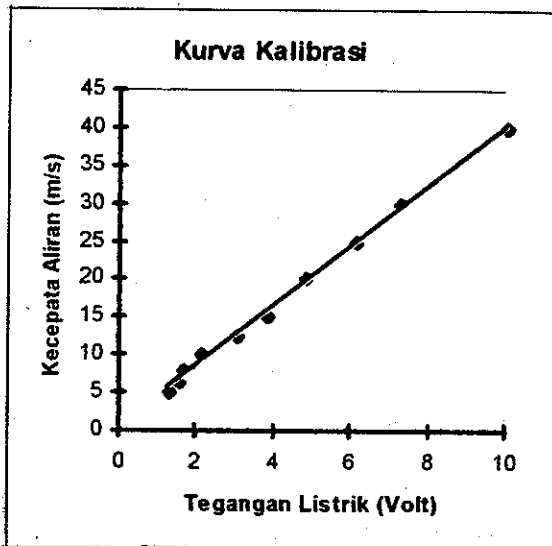
kalibrator yang dirancang khusus untuk keperluan pengkalibrasian anemometer kawat panas. Skematik sebuah kalibrator model 1125/1125R-1 yang dibuat oleh TSI Incorporated adalah sebagai berikut:



Gambar 11. Gambar skematik kalibrator

Dengan menggunakan tabel yang telah disediakan oleh pabrik pembuat, besarnya kecepatan aliran udara dapat ditentukan dari penurunan tekanan yang terjadi yang diukur melalui tap tekanan (6).

Gambar-12 menunjukkan salah satu kurva hasil kalibrasi anemometer kawat panas dengan menggunakan kalibrator Model 1125/1125R-1.



Gambar 12. Kurva hasil kalibrasi

6. ALIRAN SWIRLING

Aliran *swirling* adalah aliran yang disertai dengan pusaran. Aliran tipe ini selalu ditemui pada mesin-mesin turbo baik dengan media udara ataupun air. Fenomena ini terjadi pada mesin-mesin yang memiliki sudu-sudu (*blade*) seperti pompa, turbin, kompressor, *fan*, *blower* dan lain-lain. Aliran *swirling* dapat juga dihasilkan dengan cara membelokkan aliran aksial pada suatu saluran dengan memberikan sudu-sudu pengarah.

Besarnya *swirl* dari aliran *swirling* biasanya ditentukan dengan koefisien *swirl*, ϵ yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\epsilon = \frac{V_{\theta}}{V_a} \quad (10)$$

dimana V_{θ} adalah komponen kecepatan tangensial, V_a adalah komponen kecepatan utama (aksial) dan θ adalah sudut antara kecepatan aksial dan kecepatan tangensial.

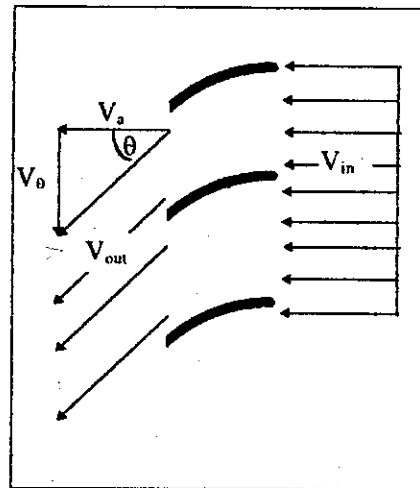
Komponen kecepatan aksial (V_a) dan kecepatan tangensial (V_{θ}) dihitung dengan menggunakan metoda jumlah dan selisih yaitu:

$$V_a = \frac{E_1 + E_2}{2} \quad (11)$$

$$V_{\theta} = \frac{E_1 - E_2}{2} \quad (12)$$

dimana E_1 dan E_2 masing-masing adalah voltase keluaran pada anemometer kawat panas-1 dan anemometer kawat panas-2.

Arah aliran keluar dari sudu-sudu pengarah akan mengalami *swirl* akibat pembelokan arah aliran oleh sudu, seperti yang digambarkan sebagai berikut :



Gambar 13. Pembelokan arah aliran oleh sudu.

7. EKSPERIMEN

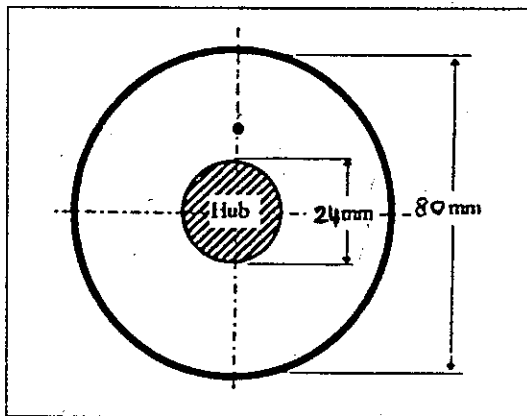
Percobaan dilakukan pada sebuah trowongan angin (*wind tunnel*). Aliran *swirling* diciptakan dengan cara membelokkan aliran udara pada seksi uji (*test section*). Pembelokan aliran udara dilakukan dengan menempatkan sudu-sudu pengarah.

Pada percobaan ini dipergunakan dua buah anemometer kawat panas (*two channel*) masing-masing untuk mengukur komponen kecepatan aksial (normal) dan komponen kecepatan

tangensial aliran. Untuk maksud tersebut, *probe* yang dipilih adalah jenis *probe-X*. Dengan menggunakan *probe* jenis ini, dimana masing-masing kawat panas dihubungkan dengan masing-masing anemometer kawat panas, pengukuran kecepatan aksial dan tangensial dapat berlangsung secara simultan tanpa perlu memutar *probe*.

Pengukuran kecepatan dilakukan pada 3 (tiga) bidang dalam arah aksial masing-masing pada jarak 294 mm, 994 mm, dan 1574 mm diukur dari ujung pipa masuk. Sedangkan dalam arah radial dilakukan pengamatan pada 29 posisi dengan radius yang berbeda.

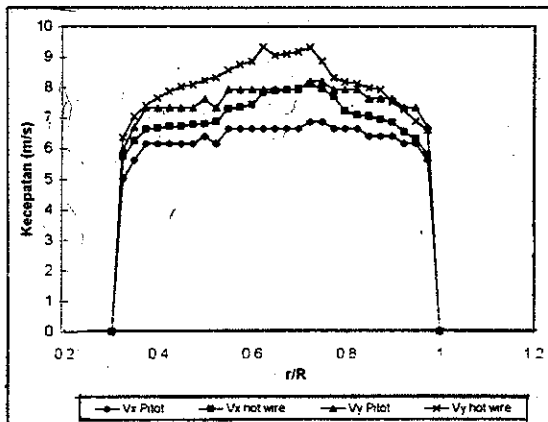
Pengukuran kecepatan aliran udara juga dilakukan dengan menggunakan tabung Pitot pada posisi-posisi pengukuran yang sama dengan posisi-posisi probe anemometer kawat panas. Data-data pengukuran dengan tabung Pitot tersebut dipergunakan sebagai data pembandingan untuk data-data kecepatan yang diperoleh dengan menggunakan anemometer kawat panas.



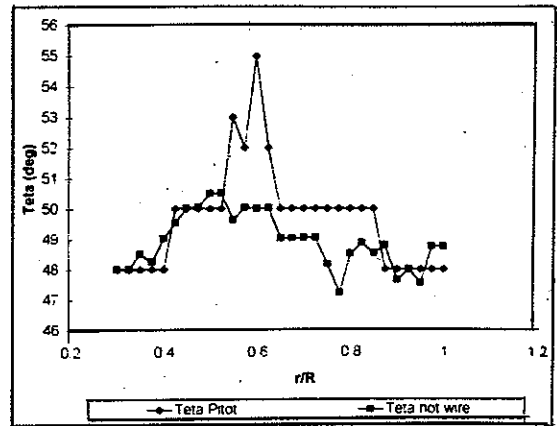
Gambar 14. Penampang lintang seksi uji

8. ANALISIS HASIL

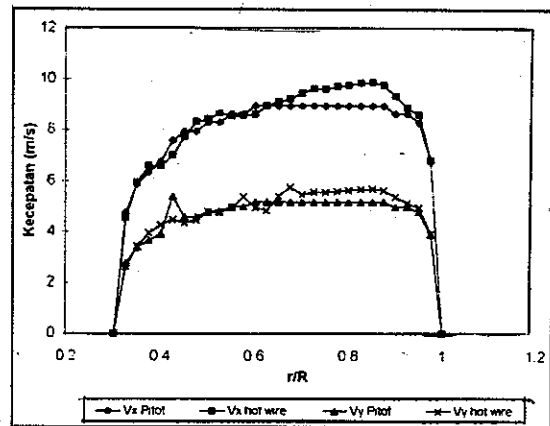
Pada gambar-gambar berikut ini ditunjukkan data-data komponen kecepatan aliran udara pada arah sumbu-x (V_x) dan dan arah sumbu-y (V_y) serta sudut masing-masing komponen kecepatan (θ).



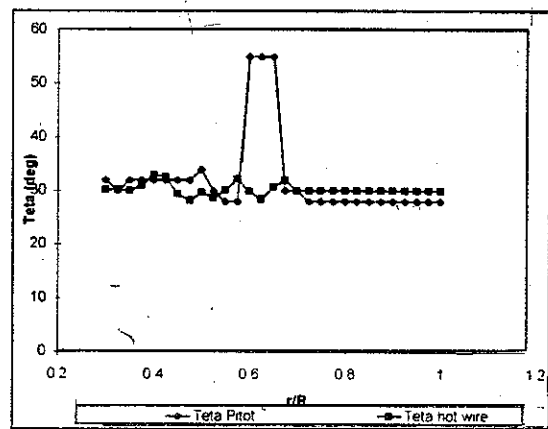
Gambar 15. Kurva komponen kecepatan pada posisi 294 mm



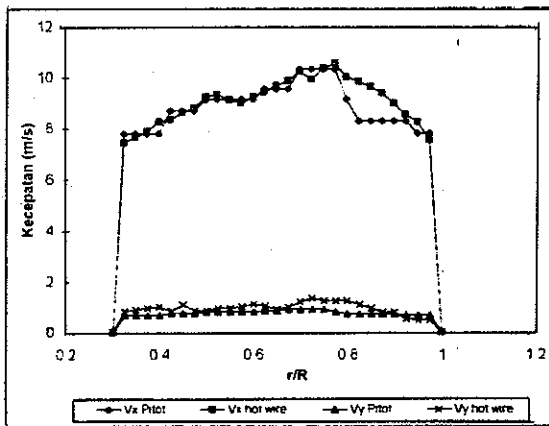
Gambar 16. Kurva sudut swirling pada posisi 294 mm



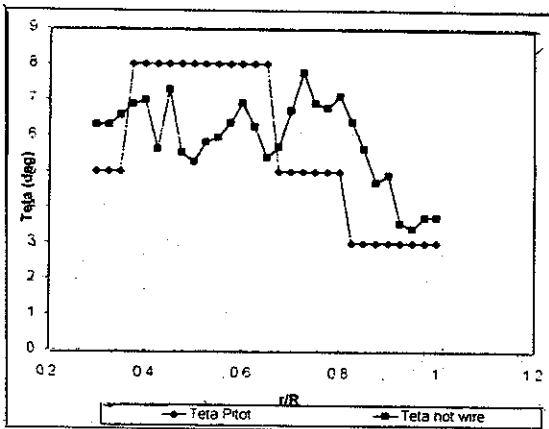
Gambar 17. Kurva komponen kecepatan pada posisi 996 mm



Gambar 18. Kurva sudut swirling pada posisi 996 mm



Gambar 19. Kurva komponen kecepatan pada



Gambar 20. Kurva sudut swirling pada posisi 1574 mm

Dari data-data pengukuran diatas dapat diamati bahwa pengukuran dengan anemometer kawat panas dapat memberikan perbedaan harga pembacaan pada jarak (r/R) yang cukup sempit, sementara pengukuran dengan tabung Pitot menunjukkan harga pembacaan yang sama.

Semakin jauh dari ujung pipa masuk akan terjadi penurunan koefisien swirling, dengan kata lain komponen kecepatan aksial semakin dominan. Penurunan koefisien swirling tersebut disebabkan oleh rugi gesek yang terjadi antar partikel-partikel fluida dan antara fluida dengan dinding saluran.

9. KESIMPULAN

Hubungan voltase-kecepatan yang linier mempermudah dalam pengkalibrasian anemometer kawat panas terutama dalam pemberian skala pembacaan. Untuk mendapatkan hubungan yang linier tersebut maka dibuat rangkaian elektronik anemometer kawat panas dengan menggunakan komponen utama IC AD-534 dan AD-538.

Pemasangan kawat pada *prong* dapat dilakukan dengan bantuan peralatan pengelas (*welder*), mikroskop, dan *multi tester*. Tingkat kesulitan pemasangan kawat pada *probe-X* lebih tinggi dibandingkan dengan *probe* tunggal.

Anemometer kawat panas yang telah dibuat dapat mengukur dengan baik pada daerah kecepatan antara 0.1 m/det. sampai 40 m/det. Pengukuran kecepatan dibawah 0.1 m/det. akan menimbulkan konveksi bebas pada kawat, sedangkan pengukuran diatas 40 m/det. mengakibatkan sinyal input pada IC akan melebihi batas maksimumnya.

Anemometer kawat panas sebagai alat ukur kecepatan aliran fluida kompresibel (*compressible*) lebih akurat dibandingkan dengan tabung Pitot sehingga dapat digunakan untuk mengukur perubahan kecepatan yang kecil.

Besar dan arah kecepatan aliran *swirling*, yang memiliki komponen kecepatan aksial dan tangensial, dapat diukur dengan mengukur kecepatan masing-masing komponen kecepatan tersebut. Komponen kecepatan tersebut dapat diukur dengan anemometer kawat panas menggunakan *probe-X* tanpa harus memutar *probe*.

10 DAFTAR PUSTAKA

1. Bruun, H.H.; *Signal Analysis of X Hot Wire Anemometry*; ASME 1990 FED Vol 97 p 41.
2. Bruun, H.H., Al Kaviem, H.H. and Badran, O.O.; *Flying Hot Wire Anemometry with X-Wire Probe*; ASME 1990 FED Vol. 97 p 81.
3. Bruun, H.H.; *Hot Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*; Oxford University Press, 1995.
4. Darsun, O. Y.; *Anemometer Kawat Panas Dua Channel Dengan Probe-X: Kaji Eksperimental Aliran Swirling*, Tugas Sarjana, UNAND, Padang, 1997.
5. Freymuth, Peter; *Instrument and Control System*, University of Colorado, 1970.
6. LeBoef, R.L. and George, W.K.; *The Calibration and Use of Non-Orthogonal Cross Wire Probes*; ASME 1990 FED Vol. 97 p. 59.
7. Marton, L.; *Method Of Experimental Physics*; Academic Press, 1981.
8. Nabhani, N., and Bruun, H.H.; *Three Component Velocity Measurement Using Multi Position Single Slant Hot Wire Technique*; Fluid Engineering Division Vol. 97 ASME 1990 p. 23.
9. Simits, A.J.; *An Introduction to Constant Temperature Hot Wire Anemometry in Supersonic Flow*; The heuristic of thermal anemometry ASME 1990 FED Vol. 97 p. 35.
10. Stainback, P.C., and Nagabushana, K.A.; *Reinvestigation of Hot Wire Anemometry Applicable to Subsonic Compressible Flow Using Fluctuation Diagram*; Journal of Fluids Engineering ASME June 1995 Vol. 117 p. 263.