

RANCANG BANGUN PENGKONDISI SINYAL TERMOKOPEL TIPE K YANG MUDAH DITUNING

Estiko Rijanto¹, Rachman Soleh², dan Sri Kadarwati²

¹⁾ Pusat Penelitian TELIMEK-LIPI, Kompleks LIPI, Jl. Cisitua No.21/154D, Bandung 40135

²⁾ Pusat Penelitian KIM-LIPI, Kawasan PUSPITEK- Serpong, Tangerang 15314

INTISARI

Untuk menjawab kebutuhan akan alat pengukur suhu cairan yang memenuhi spesifikasi dan memiliki fleksibilitas sesuai kebutuhan industri kecil dan menengah, telah dibuat sebuah alat pengukur suhu menggunakan termokopel tipe K dengan ciri-ciri: (1) memiliki rangkaian pengkondisi sinyal yang mudah di-tuning, (2) memiliki LCD, dan (3) dapat mengirim sinyal ke komputer pribadi. Rangkaian pengkondisi sinyal dilengkapi dengan filter untuk mereduksi pengaruh noise frekuensi tinggi dan detektor burn-out untuk mendeteksi terputusnya kabel. Sebuah formula kompensasi linearisasi juga telah diusulkan menggunakan pendekatan least square estimation. Hasil eksperimen menunjukkan hubungan linear antara suhu yang nampak pada LCD dan voltase yang dikirim ke komputer pribadi.

Kata kunci: suhu, pengkondisi sinyal, termokopel, LCD, burn-out, komputer pribadi.

ABSTRACT

In order to answer a need for liquid temperature measurement instrumentations which fulfill the required specifications as well as have flexibility depending on the usage by small and medium enterprises, an instrumentation has been developed using a thermocouple of type K. This instrumentation has the following characteristics: (1) possessing signal conditioning circuit which is easy to be tuned, (2) having LCD, and (3) being able to send signal to a personal computer. The signal conditioning circuit has a filter to reduce effect of high frequency noise and also has a burn-out detector to detect any cable disconnection. A linearization compensation formula is proposed based on least square estimation approach. Experiment result shows a linear relation between temperature shown by the LCD and the voltage signal sent to a personal computer

Key words: temperature, signal conditioning, thermocouple, LCD, burn-out, personal computer.

1 PENDAHULUAN

Pengukuran suhu banyak ditemukan pada proses bio-kimia dan industri manufaktur. Pada proses kontrol seperti sistem kontrol proses fermentasi diperlukan pengukuran suhu di dalam reaktor fermentasi [1], dan pada industri manufaktur seperti proses fabrikasi botol gelas diperlukan beberapa alat pengukur suhu yang memakai termokopel sebagai probe [2]. Untuk perusahaan besar, pemakaian alat pengukur suhu

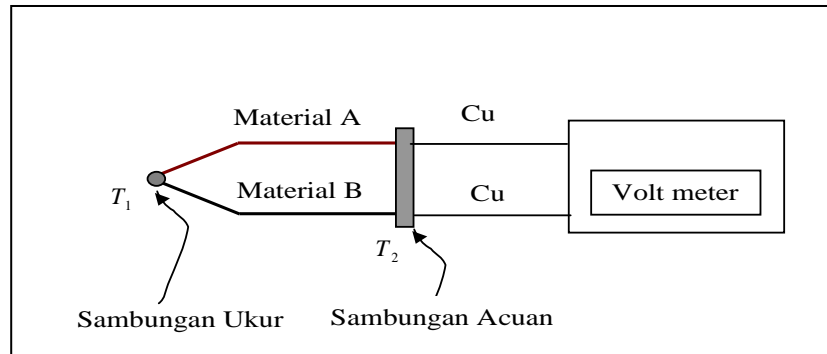
yang ada di pasar yang sesuai dengan fungsi dan spesifikasi yang diperlukan tidak menimbulkan masalah anggaran. Alat pengukur suhu yang ada di pasar global umumnya memiliki karakter sebagai berikut: (1) jika penggunaannya untuk konsumsi portable maka dilengkapi dengan display dan dijual dengan harga relatif murah, tetapi tidak dapat digunakan untuk membangun sistem kontrol karena dibungkus dengan boks yang kompak dan paten dan tidak memiliki fungsi pengiriman sinyal ke luar, (2) jika penggunaannya untuk instrumentasi sistem kontrol maka dilengkapi oleh fungsi-fungsi yang dibutuhkan, tetapi harganya menjadi mahal, (3) jika melewati masa garansi (yang umumnya 1 tahun), kerusakan yang muncul tidak mendapat layanan purna jual yang layak dan umumnya terpaksa harus membeli alat yang baru. Hal ini akan menambah biaya investasi dan biaya instalasi. Tuntutan terhadap perusahaan kecil dan menengah untuk meningkatkan produktifitas dan untuk menjaga kestabilan mutu produk, dan juga untuk dapat memenuhi standar mutu produk yang ditentukan, perlu diantisipasi dengan menyiapkan dukungan teknologi. Produsen alat pengering gabah skala kecil dan menengah misalnya, enggan memasang alat kontrol suhu, karena akan menaikkan harga alat pengering di atas angka psikologis. Untuk menjawab kebutuhan akan alat pengukur suhu yang cocok dipakai oleh perusahaan kecil dan menengah, pada makalah ini telah dikembangkan sebuah alat pengukur suhu menggunakan termokopel tipe K.

Robeth.V.M. dan Hiskia telah melakukan rancang bangun sistem signal conditioning untuk pengukuran sensor temperature berbasis mikrokontroler atmel 89c51 [3]. Makalah mereka menekankan penggunaan mikrokontroler tetapi tidak menjelaskan secara detil rekayasa rangkaian pengkondisi sinyal yang digunakan. Kekurangan pada sistem ini adalah keterbatasan resolusi dan skala suhu yang mampu diukur. Rachman Soleh dan Sri Kadarwati telah membuat rangkaian pengkondisi sinyal termokopel tipe K [4]. Tetapi, ditemukan kesulitan dalam melakukan tuning rangkaian pengkondisi sinyal yang mereka usulkan.

Makalah ini mengusulkan sebuah alat pengukur suhu menggunakan termokopel tipe K yang memiliki ciri-ciri: (1) memiliki rangkaian pengkondisi sinyal yang mudah di-tuning, (2) memiliki display LCD, dan (3) dapat mengirim sinyal ke komputer pribadi untuk mewujudkan sebuah sistem akuisisi data yang memiliki *human machine interface (HMI)* yang bersahabat dengan pengguna. Makalah ini telah disusun sebagai berikut: seksi 2 membahas tentang prinsip dasar termokopel, seksi 3 menyajikan rangkaian pengkondisi sinyal, seksi 4 menyajikan kompensasi linearisasi, seksi 5 tentang hasil eksperimen, dan seksi 6 tentang kesimpulan dan rekomendasi.

2 PRINSIP DASAR TERMOKOPEL

Termokopel merupakan salah satu sensor suhu yang banyak digunakan di industri, karena mempunyai beberapa kelebihan yaitu: (1) tahan terhadap efek getaran, (2) waktu respon pendek, (3) ukurannya kecil, (4) tidak memiliki efek self-heating, dan (5) harganya murah. Prinsip kerja tempokopel ditunjukkan pada gambar 1 [4].



Gambar 1. Prinsip kerja termokopel.

Termokopel bekerja berdasarkan efek Seebeck, mengubah perbedaan antara suhu sambungan acuan dengan suhu sambungan ukur menjadi tegangan listrik. Hubungan antara harga tegangan yang terkoreksi $V_{(t1,0)}$, harga tegangan sambungan acuan $V_{(ref,0)}$ dan harga tegangan pada tabel standar kalibrasi $V_{(t1,ref)}$ adalah:

$$V_{(t1,0)} = V_{(t1,ref)} + V_{(ref,0)} \quad (1)$$

Agar dapat digunakan dalam pengukuran, hanya material-material khusus yang digunakan sebagai termokopel. Syarat-syarat yang diperlukan agar dapat digunakan sebagai sensor adalah:

1. Memiliki sensitifitas yang tinggi, dan memiliki *linearity* yang baik.
2. Memiliki span pengukuran suhu yang lebar.
3. Memiliki *repeatability* dan stabilitas yang tinggi, dan tidak berubah sifat karena waktu.
4. Deviasi mutunya kecil.

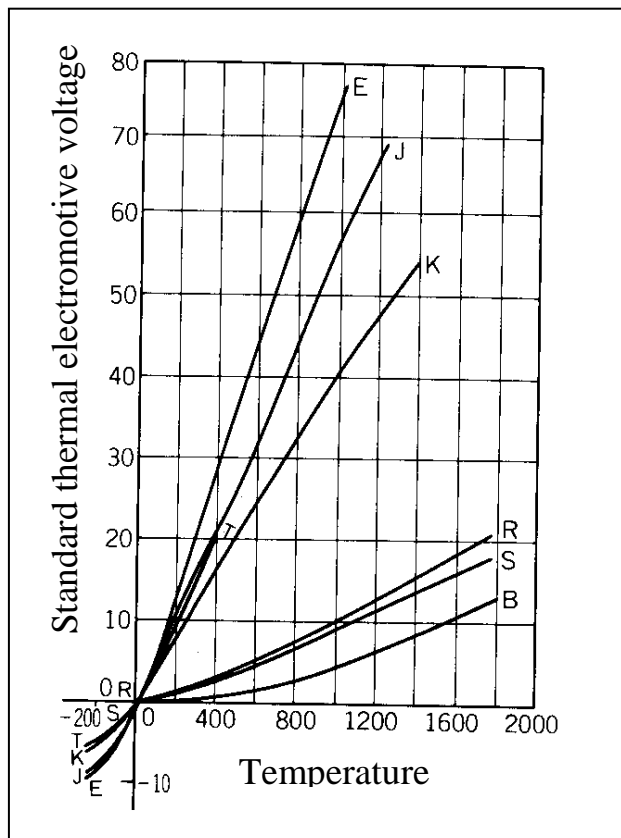
Tabel 1 di bawah ini menunjukkan beberapa jenis termokopel, material yang digunakan dan beberapa informasi tentang span pengukuran suhu, thermal electromotive force, kelebihan dan kekurangan masing-masing jenis termokopel.

Tabel 1. Beberapa Tipe Termokopel.

Tipe	Thermal electro-motive (mV)	Kelebihan	Kekurangan	Material		Span suhu (°C)
				+	-	
K	-5.891/-200°C 48.828/1200°C	<ul style="list-style-type: none"> o Paling banyak dipakai di industri. o Tahan thd lingkungan asam. o Linearity bagus. 	<ul style="list-style-type: none"> o Tdk tahan thd lingkungan basa pd suhu tinggi. o Tdk cocok utk gas CO dan SO₂. 	Chromel (90%Nickel, 10% Chromium)	Alumel (94% Nickel, 3%Manganese, 2%Alumunium, 1%Silicon).	-200~1200. [Cocok utk suhu tinggi]
J	-7.89/-200°C 42.28/750°C	<ul style="list-style-type: none"> o Thermal electro-motive besar. o Tahan thd lingkungan basa. 	<ul style="list-style-type: none"> o Tdk tahan thd lingkungan asam dan uap air di udara. o Mudah berkarat. 	Besi.	Constantan (55% Copper, 45% Nickel).	-200~750 [Cocok utk suhu sedang]
T	-5.603/-200°C 17.816/350°C	Sering dipakai pada pengukuran 200°C~100°C. Lemah thd asam, stabil terhadap lingkungan basa.	Copper akan teroksidasi (berkarat) pd suhu di atas 300°C.	Copper.	Constantan.	-200~350 [Cocok utk suhu rendah]
B	1.241/500°C 12.426/1700°C	Dapat digunakan sampai suhu tinggi. Tahan thd lingkungan asam.	Lemah thd lingkungan basa. Thermal electro-motive kecil.	70% Platinum, 30% Rhodium.	94% Platinum, 6% Rhodium.	500~1700. [Cocok utk suhu sangat tinggi]

Dari tabel 1 di atas, dapat dipilih tipe termokopel sesuai dengan kebutuhan, misalnya: untuk pengukuran suhu rendah (-200°C ~350°C) dipakai termokopel tipe T, untuk pengukuran suhu sedang (-200°C ~750°C) dipakai termokopel tipe J, untuk pengukuran suhu tinggi (-200°C ~1200°C) dipakai tipe K, dan untuk pengukuran suhu sangat tinggi (500°C ~1700°C) dipakai tipe B. Pada makalah ini telah dipilih termokopel yang paling banyak dipakai di industri yaitu termokopel tipe K.

JIS (Japan Industrial Standard) memberikan nilai tegangan keluaran termokopel dari berbagai tipe dengan suhu sambungan acuan 0 °C [5]. Gambar 2 menunjukkan nilai keluaran termokopel dari berbagai jenis berdasarkan JIS. Sedangkan tabel 2 menunjukkan standar nilai tegangan keluaran termokopel tipe K.



Tabel 2.
Standar nilai tegangan keluaran termokopel tipe K [5]

Suhu (°C)	Termokopel Tipe K (mV)
-200	-5.891
-100	-3.553
0	0
100	4.095
200	8.137
300	12.207
400	16.395
500	20.640
600	24.902
700	29.128
800	33.277
900	37.325
1000	41.269
1100	45.108
1200	48.828
1300	52.398

Gambar 2. Standar nilai tegangan keluaran termokopel [5].

Jika suhu acuan pada waktu pengukuran tidak sama dengan suhu acuan pada waktu pengukuran standar nilai tegangan keluaran termokopel, maka hasil pengukuran yang diperoleh tidak akurat. Untuk menghindari kesalahan ini maka pada termokopel perlu dilengkapi dengan rangkaian kompensasi suhu. Rangkaian ini akan melakukan konversi suhu ruang dan akan menambahkannya ke keluaran sensor termokopel.

3 RANGKAIAN PENGKONDISI SINYAL

Pada prinsipnya rangkaian pengkondisi sinyal termokopel terdiri dari rangkaian kompensasi suhu sambungan acuan dan rangkaian penguat sinyal. Komponen utama rangkaian kompensasi suhu sambungan acuan adalah IC sensor suhu. Pada makalah ini digunakan IC sensor suhu yang memiliki tegangan keluaran sebesar 10 mV/°C, misalnya LM35D (buatan Nasional Semi Konduktor) atau TMP35 (buatan Analog Device). Untuk mengurangi pengaruh gangguan noise frekuensi tinggi, maka rangkaian pengkondisi sinyal pada makalah ini dilengkapi dengan rangkaian Low Pass Filter (LPF). Rangkaian pengkondisi sinyal ini juga dilengkapi fungsi pendeteksi

pengkondisi sinyal menjadi full-scale. Terputusnya kabel dapat terdeteksi dengan melihat penampakan pada LCD yang over-flow.

Tegangan keluaran dari rangkaian pada gambar 3 didistribusi ke 3 bagian yaitu: (1) rangkaian LCD, (2) rangkaian buffer ke komputer pribadi, dan (3) rangkaian kompensasi linearisasi. Rangkaian LCD telah dibuat menggunakan komponen utama converter Analog-Digital 3.5 digit. Rangkaian ini dilengkapi dengan pembagi tegangan untuk mengatur agar supaya suhu yang terukur oleh termokopel dapat ditampilkan dengan resolusi 0.1 °C pada LCD. Rangkaian buffer ke komputer pribadi tersusun oleh penguat dan pengatur offset. Rangkaian ini diatur agar didapatkan gain 50 [mV/°C].

4 KOMPENSASI LINEARISASI

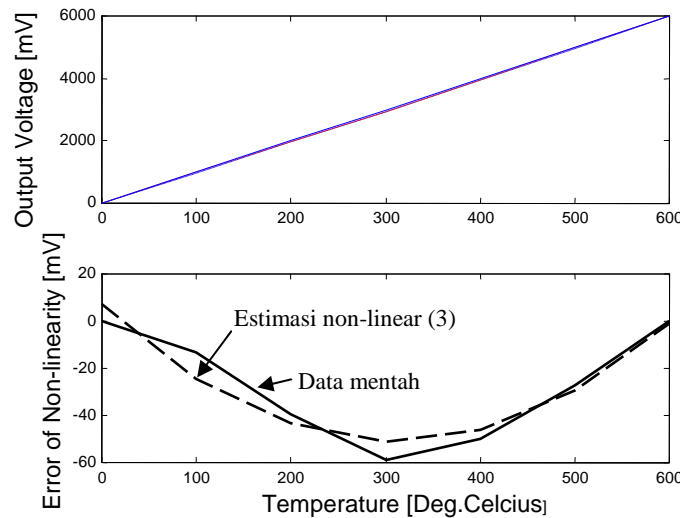
Tujuan rangkaian pengkondisi sinyal adalah mengubah suhu 0 ~600 °C menjadi tegangan listrik 0 ~6000 mV, atau untuk mewujudkan hubungan yang ideal seperti dibawah ini.

$$V_{oi} [\text{mV}] = 10 \times T_s [^\circ\text{C}] \quad (2)$$

dimana V_{oi} adalah tegangan keluaran rangkaian dan T_s adalah suhu yang dibaca oleh sensor termokopel tipe K. Seperti telah disebut di atas, dari tabel 2 termokopel jenis K diketahui bahwa tegangan listrik yang setara dengan 600 °C adalah 24.902 mV. Oleh karena itu diperlukan penguatan sebesar $6\text{V}/24.902\text{mV} = 240.94$ kali. Jika hubungan antara suhu yang terukur dengan tegangan keluaran rangkaian pengkondisi sinyal diplot, maka didapat grafik pada gambar 4 yang menunjukkan sifat non-linearity.

Garis solid pada gambar 4 bagian atas menunjukkan hubungan linear yang ideal seperti pada persamaan (2), sedangkan garis terputus pada gambar 4 bagian atas menunjukkan hubungan sebenarnya yang didapat dari tabel 2. Gambar 4 bagian bawah menunjukkan kesalahan akibat sifat non-linearity termokopel tipe K. Dapat dilihat bahwa kesalahan maksimum mencapai 1% (setara dengan 60 [mV]/6000 [mV]) pada suhu sekitar 300 °C. Garis solid didapat dari tabel 2, sedangkan garis terputus dihitung menggunakan pendekatan least square estimation (LSE). Dengan menggunakan LSE didapat pendekatan tegangan keluaran sebagai fungsi terhadap suhu dalam bentuk persamaan non-linear orde 2 sebagai berikut.

$$V_{oa} [\text{mV}] = 7.0446 + 9.6274 \cdot T_s + 0.0006 \cdot T_s^2. \quad (3)$$



Gambar 4. Hubungan antara suhu dan sifat non-linearity.

Hubungan ideal antara tegangan keluaran dengan suhu pada persamaan (2) dapat diekspresikan dalam bentuk hubungan ideal antara tegangan keluaran dengan tegangan sambungan acuan V_{in} (tegangan titik sambung + terhadap - pada gambar 3 sebagai berikut.

$$V_{oi} [mV] = 240.9445 \times V_{in} [mV]; \quad \left(240.9445 = \frac{6000 [mV]}{24.902 [mV]} \right) \quad (4)$$

Agar hubungan ideal yang linear pada persamaan (2) atau (4) terwujud, dengan memperhatikan hubungan yang sesungguhnya pada persamaan (3) yang non-linear, maka perlu dilakukan kompensasi linearisasi. Dengan menggunakan pendekatan LSE, diperoleh kompensasi linearisasi seperti dibawah ini.

$$V_{ol} [mV] = -6.7987 + 249.9101 \cdot V_{in} - 0.3482 \cdot V_{in}^2 \quad (5)$$

Untuk mewujudkan kompensasi linearisasi menggunakan rangkaian elektronika, formula (5) di atas dapat diekspresikan sbb:

$$\left. \begin{aligned} V_{ol} &= -6.80 + V_a - 5.58 \times 10^{-6} \times V_a^2 \\ V_a &= 249.91 V_{in} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

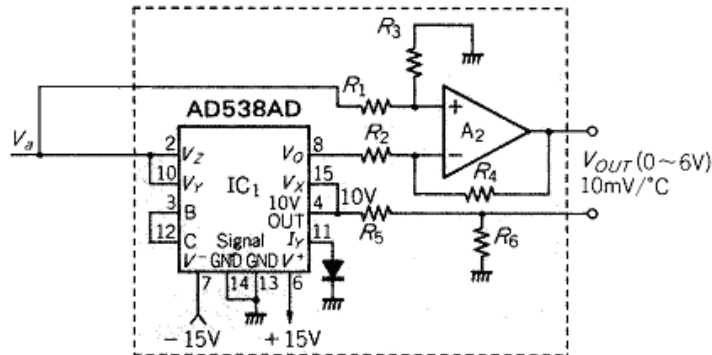
Persamaan (6) dapat diwujudkan menggunakan rangkaian seperti pada gambar 5 di bawah ini. V_a pada gambar 5 sama dengan V_{out} pada gambar 3. Dengan interkoneksi sebuah IC non-linear keluaran Analog Device AD538AD seperti pada gambar 5, fungsi transfer dari V_a ke V_o (pin no 8) adalah:

$$V_o = V_a^2 / 10000 [mV]. \quad (7)$$

Maka dari persamaan (6) dan (7) diperoleh hubungan sebagai berikut.

$$V_o = -6.80 + V_a - 0.0558 V_o [mV] \quad (8)$$

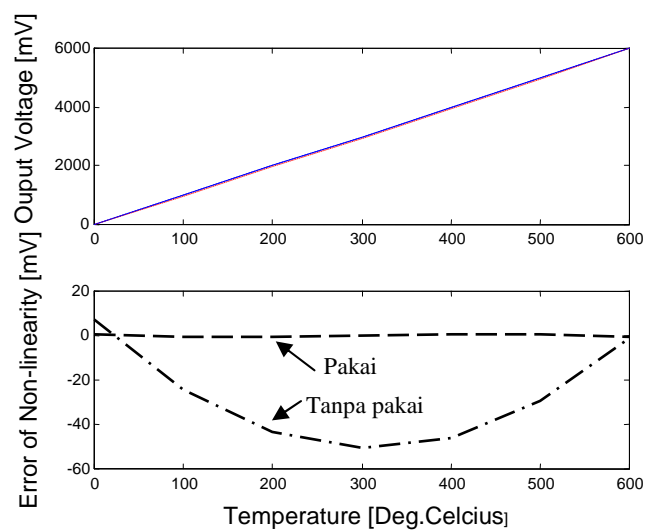
Nilai tahanan dihitung agar supaya: $R_4 / R_2 = 0.0558$, $\{(1 + R_4 / R_2) R_3\} / (R_1 + R_3) = 1$, dan nilai R_5, R_6 dihitung untuk memperoleh bias 6.8 [mV].



Gambar 5. Rangkaian kompensasi linearisasi.

Formula (5) juga dapat diwujudkan menggunakan software komputer.

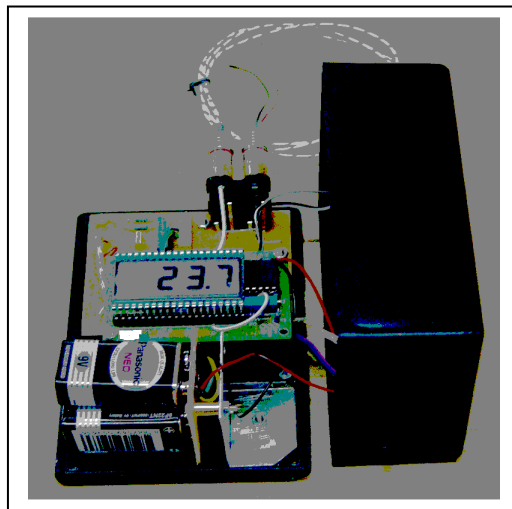
Gambar 6 menunjukkan hasil perhitungan efek kompensasi linearisasi formula (5) terhadap besarnya kesalahan akibat sifat non-linearity termokopel. Gambar 6 bagian atas adalah hubungan antara suhu yang diukur oleh termokopel dengan tegangan keluaran instrumentasi pengukur suhu. Garis solid adalah hasil dengan rangkaian kompensasi lenearisasi dan garis terputus adalah hasil tanpa kompensasi linearisasi. Gambar 6 bagian bawah adalah hubungan antara suhu yang diukur oleh termokopel dengan besarnya kesalahan. Garis dengan titik adalah hasil tanpa kompensasi linearisasi, sedangkan garis terputus adalah hasil dengan kompensasi linearisasi. Dapat dilihat bahwa pengaruh kompensasi linearisasi sangat signifikan dalam mengurangi besarnya nilai kesalahan.



Gambar 6. Efek kompensasi linearisasi.

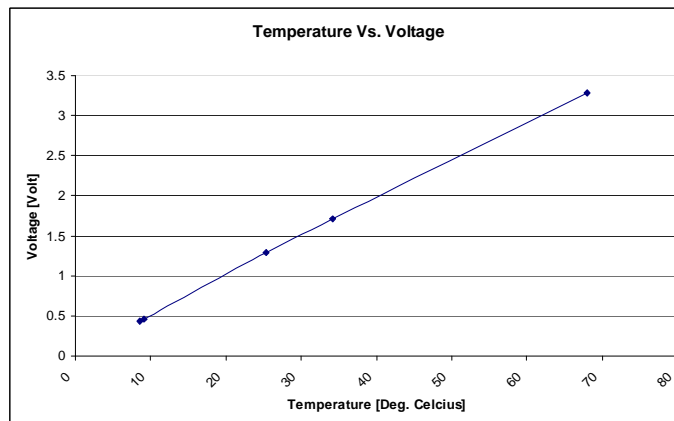
5 HASIL EKSPERIMEN

Gambar 7 adalah foto alat pengukur suhu cairan yang telah dibuat. Alat ini dapat bekerja menggunakan tenaga battery (9 Volt x3 buah) atau adaptor.



Gambar 7. Foto alat pengukur suhu yang dibuat.

Gambar 8 menunjukkan hasil eksperimen pengukuran suhu dan besarnya tegangan yang dikirim ke komputer pribadi. Dapat dilihat hubungan yang linear antara suhu dan tegangan keluaran yang dikirim ke komputer pribadi.



Gambar 8. Hasil eksperimen pengukuran suhu dan besarnya tegangan keluaran.

6 KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Dari hasil yang diperoleh, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Alat pengukur suhu cairan menggunakan termokopel tipe K yang memiliki rangkaian pengkondisi sinyal yang mudah detuning telah dibuat, dan dapat bekerja dengan baik, seperti dapat dilihat pada gambar 7 dimana LCD menunjukkan angka 23.7 yang berarti suhu yang terukur 23.7 [°C], dan juga pada gambar 8 dimana diperoleh hubungan yang linear antara suhu yang diukur dengan tegangan keluaran rangkaian yang dapat dikirim ke komputer.
2. Kompensasi linearisasi yang diusulkan dapat diterapkan untuk sistem yang memerlukan presisi tinggi. Seperti dapat dilihat pada gambar 6, angka tertinggi *kesalahan ukur dibagi span pengukuran* tanpa linearisasi mendekati 10%, sedangkan dengan linearisasi angka ini menjadi di bawah 1%. Jika alat pengukur suhu yang dibuat digunakan sebagai komponen sistem akuisisi data memakai komputer, maka formula kompensasi linearisasi yang diusulkan dapat dengan mudah diaplikasikan dengan membuat software komputer.

REFERENSI

- [1] Estiko Rijanto, *Robust Control, Theory for Application*, ISBN:979-9299, ITB Press, Bandung, 2000.
- [2] Estiko Rijanto dkk., *Alat kontrol dan metoda kontrol suhu cetakan untuk mesin fabrikasi gelas*, paten dalam bahasa Jepang, no aplikasi 2000-222777, 2000.
- [3] Robeth.V.M. dan Hiskia, “Rancang Bangun Sistem Signal Conditioning Untuk Pengukuran Sensor Temperatur Berbasis Mikrokontroler Atmel 89C51”, Prosiding Pemaparan Hasil Litbang IPT 2003, halaman B207-B218, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Bandung, 29-30 Juli 2003,
- [4] Rachman Soleh dan Sri Kadarwati, “Sensor Termokopel Tipe K Dengan Kompensasi Suhu Pengukuran Dan Tegangan Keluaran 10mV/°C”, Publikasi Ilmiah PPI-KIM 2003, halaman 104-110, Pusat Penelitian KIM LIPI, 2003.
- [5] Japan Association of Standardization, JIS C1602-1981, C1605-1982, C1610-1981, Thermocouple.