

Pemanfaatan Termokopel sebagai Sensor Suhu untuk Analisis Kelarutan Zat Terlarut

Labib Muhammad Majdi¹⁾, Igreya Mitchell Kumendong^{2)*}, Izzah Huwaidah³⁾ Muhammad Fathin Abdul Aziz⁴⁾

^{1,3,4}Program Studi Fisika, Institut Teknologi Bandung, Kota Bandung, 40132, Indonesia

²Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

*Corresponding author. E-mail: kumendongigreya@gmail.com

Diterima 15 Oktober 2024; Disetujui 30 Oktober 2024

ABSTRAK

Dalam eksperimen kimia, termokopel menawarkan solusi lebih baik daripada termometer konvensional dengan respons yang cepat, bahan yang tidak mengganggu, dan biaya yang cukup terjangkau. Penelitian ini berfokus pada pengembangan alat pengukur kelarutan berbasis termokopel yang memanfaatkan efek Seebeck untuk mendeteksi perubahan suhu dengan akurasi tinggi dan respons cepat. Alat ini dirancang menggunakan termokopel tipe-K, mikrokontroler Arduino UNO, rangkaian penguat sinyal, dan layar LCD. Metodologi penelitian meliputi perancangan, kalibrasi, serta karakterisasi sensor untuk memastikan akurasi dan presisi alat. Pengujian dilakukan pada larutan gula, dan hasilnya dibandingkan dengan data referensi kelarutan. Hasil menunjukkan bahwa alat memiliki galat rata-rata 0,348% dan standar deviasi 0,114%, membuktikan keandalannya dalam mengukur kelarutan. Kesimpulan dari penelitian ini adalah termokopel dapat dimanfaatkan secara efektif sebagai sensor suhu untuk analisis kelarutan, menawarkan solusi yang lebih efisien dan ekonomis dibandingkan metode konvensional.

Kata kunci : Termokopel, Efek Seebeck, Kelarutan, Pengukuran Suhu, Eksperimen Kimia

ABSTRACT

In chemical experiments, thermocouples offer a better solution than conventional thermometers with fast response, non-intrusive materials, and fairly affordable cost. This research focuses on developing a thermocouple-based solubility meter that utilises the Seebeck effect to detect temperature changes with high accuracy and fast response. This device is designed using a K-type thermocouple, Arduino UNO microcontroller, signal amplifier circuit, and LCD display. The research methodology includes design, calibration, and characterisation of the sensor to ensure accuracy and precision. Tests were conducted on sugar solution, and the results were compared with solubility reference data. The results show that the device has an average error of 0.348% and a standard deviation of 0.114%, proving its reliability in measuring solubility. The conclusion of this research is that thermocouples can be effectively utilised as temperature sensors for solubility analysis, offering a more efficient and economical solution than conventional methods.

Keywords : Thermocouples, Seebeck Effect, Solubility, Temperature Measurement, Chemistry Experiments

1. PENDAHULUAN

Teknik pengukuran telah menjadi sangat penting sejak awal peradaban manusia hingga sekarang. Adanya revolusi industri membawa perkembangan pesat pada instrumen baru dan teknik pengukuran yang membuat pertumbuhan besar dan cepat dalam teknologi industri baru, dimana teknik pengukuran yang baru dan bervariasi sangat dibutuhkan (Lian, 2019). Teknik pengukuran dan instrumen dalam pengukuran tersebut pada saat ini sangat banyak jenisnya, baik berdasarkan besaran yang diukur maupun dalam segi ketepatan hasil pengukurannya (Waluyanti, 2008).

Ketepatan pengukuran menjadi salah satu pertimbangan utama ketika memilih instrumen untuk aplikasi tertentu. Parameter lain, seperti sensitivitas, linearitas, dan reaksi terhadap perubahan suhu lingkungan, juga menjadi pertimbangan lebih lanjut. Atribut-atribut ini dikenal sebagai karakteristik statis suatu instrumen alat ukur dan biasanya tercantum dalam lembar data instrumen (Morris, 2001).

Suhu merupakan salah satu besaran yang menarik perhatian karena perannya dalam pengukuran besaran fisis lain dan proses reaksi kimia suatu zat senyawa (Guo et al., 2021). Salah satu contohnya adalah hubungan antara suhu dan kelarutan zat terlarut dalam larutan,

yang berkaitan erat dengan prinsip *Le Chatelier*. Dalam konteks ini, suhu yang lebih tinggi meningkatkan energi termal yang membantu memisahkan molekul zat terlarut, sehingga memperbesar kelarutan (Brlca, 1983; Linebarger, 1895).

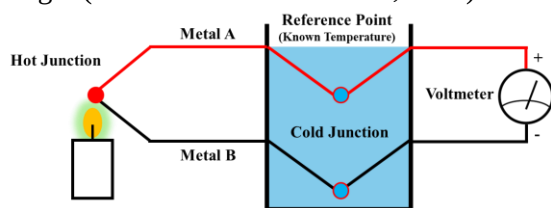
Untuk memahami hubungan ini, pengukuran suhu secara akurat sangat penting. Dalam eksperimen ini, digunakan termokopel sebagai alat ukur yang memanfaatkan efek Seebeck, menawarkan solusi yang lebih baik daripada termometer konvensional dalam hal respons cepat, keakuratan tinggi, dan biaya terjangkau. Tujuan eksperimen ini adalah untuk merancang alat ukur kelarutan dengan konversi besaran dari temperatur, dimana uji cobanya dalam menentukan kelarutan gula dalam air dan membandingkan hasil pengukuran kelarutan gula dengan kelarutan referensi.

2. KAJIAN LITERATUR

Prinsip Dasar Termokopel

Salah satu sensor suhu yang umum digunakan dan yang akan digunakan pada alat pengukuran kami yaitu termokopel. Termokopel bekerja berdasarkan efek termoelektrik yang ditemukan pada tahun 1821 oleh seebeck, yang dearang dikenal dengan efek seebeck yang dapat digunakan untuk mengukur perbedaan suhu dan suhu referensi berada pada 0°C yang sering digunakan (Genix et al., 2009). Telah ditemukan bahwa beberapa termokopel ini dapat digunakan untuk mengukur perbedaan suhu yang sangat kecil dengan akurat pada *chip* silikon (Huang et al., 2022).

Jika dua buah semikonduktor a dan b disambungkan pada suatu titik panas dan perbedaan suhu ΔT dipertahankan antara titik panas dengan titik dingin yang ditunjukkan pada Gambar 1, maka tegangan sirkuit terbuka ΔV akan berkembang di antara kabel di titik dingin (Van Herwaarden & Sarro, 1986).



Gambar 1. Proses efek seebeck pada termokopel

Efek tersebut yang dikenal dengan Efek Seebeck (*Seebeck Effect*) dengan penemunya T.

J. Seebeck (1770 - 1831), yang dapat dinyatakan secara matematis dengan Persamaan 1.

$$\Delta V = \alpha_s \Delta T \quad (1)$$

Keterangan:

ΔV : Beda potensial (V)

α_s : Koefisien seebeck (V/K)

ΔT : Perubahan temperatur (K)

Di mana alpha adalah koefisien Seebeck yang lebih umum dinyatakan dalam $\mu V/K$ (Van Herwaarden & Sarro, 1986). Termokopel dapat menunjukkan efek seebeck apabila terdiri dari kombinasi dua kabel dengan bahan berbeda. Untuk dua kabel dari bahan yang sama tidak terdapat efek seebeck karena alasan simetri. Namun, efek ini ada karena efek seebeck adalah sifat bulk dan tidak bergantung pada pengaturan spesifik kabel atau bahan dan tidak pada cara spesifik penyambungannya (Falco & Udrea, 2017).

Hubungan Suhu dan Kelarutan

Pengukuran suhu yang akurat dalam eksperimen kimia sangat penting untuk memahami dinamika kelarutan zat terlarut dalam larutan. Kelarutan zat terlarut didefinisikan sebagai jumlah maksimum zat terlarut yang dapat larut dalam pelarut pada suhu tertentu untuk menghasilkan larutan jenuh (Vermeire et al., 2022; Yusuf, 2018).

Hubungan antara kelarutan dan suhu dapat dijelaskan dengan prinsip *Le Chatelier*. Menurut prinsip *Le Chatelier*, kesetimbangan kimia akan bergeser ke arah yang melawan perubahan yang dikenakan padanya. Dalam konteks kelarutan, jika suhu dinaikkan, kesetimbangan akan bergeser ke arah yang meningkatkan kelarutan. Hal ini karena energi termal yang lebih tinggi membantu memisahkan zat terlarut menjadi partikel-partikel yang lebih kecil dan membuatnya lebih mudah larut dalam pelarut (Brlca, 1983; Nwanak, 2024). Hubungan antara kelarutan (S) dan suhu (T) dapat dijelaskan dengan Persamaan 2.

$$S = ke^{-\Delta H/RT} \quad (2)$$

Keterangan:

S : Kelarutan zat terlarut (mol/L)

k : Konstanta kelarutan

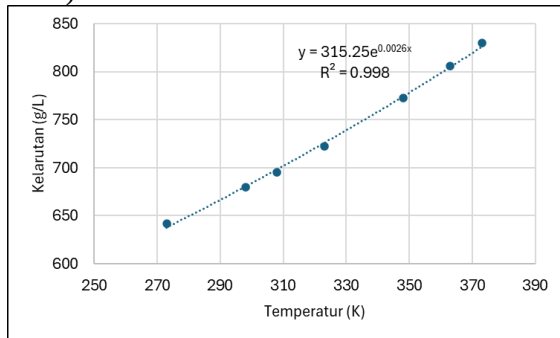
ΔH : Entalpi perubahan kelarutan (J/mol)

R : Konstanta gas ideal (8.314 J/mol·K)

T : Suhu (K)

Sukrosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$) adalah bahan utama dari gula putih yang sering digunakan dalam

kebutuhan sehari-hari yang dapat mencapai 99.7% di dalam gula putih. Gambar 2 menunjukkan grafik dari data kelarutan sukrosa dalam air yang didapatkan dari pengambilan data para peneliti dalam buku *Handbook of Aqueous Solubility Data* oleh (Yalkowsk & He, 2003).



Gambar 2. Kelarutan sukrosa terhadap temperatur

Data kelarutan terhadap temperatur ini yang nantinya akan dijadikan sebagai referensi dalam pengukuran yang akan dilakukan.

Karakteristik Statis dan Dinamis Instrumen

Ketepatan pengukuran merupakan salah satu pertimbangan ketika memilih instrumen untuk aplikasi dan pengukuran tertentu. Parameter seperti lain seperti sensitivitas, linearitas, dan reaksi terhadap perubahan suhu lingkungan juga menjadi pertimbangan lebih lanjut. Atribut-atribut ini yang dikenal sebagai karakteristik statis suatu instrumen alat ukur, biasanya tercantum dalam lembar data instrumen dan berlaku hanya di bawah kondisi kalibrasi standar yang ditentukan. Variasi karakteristik harus dipertimbangkan saat instrumen digunakan dalam kondisi lain. Berbagai karakteristik statis dari alat ukur seperti akurasi dan ketidakakuratan, presisi/pengulangan pengukuran, toleransi alat ukur, *range* atau *span*, linearitas, sensitivitas pengukuran, *threshold*, resolusi alat ukur, sensitivitas terhadap gangguan, efek histerisis, dan *dead space* (Morris, 2001).

Selain karakteristik statis yang berkaitan dengan pembacaan keadaan tetap instrumen, seperti ketepatan pembacaan, terdapat karakteristik dinamis dari instrumen pengukuran yang menggambarkan perilakunya antara waktu perubahan kuantitas yang diukur dan waktu ketika keluaran instrumen mencapai nilai tetap sebagai respons. Nilai-nilai untuk karakteristik dinamis juga terdapat dalam lembar data instrumen dan hanya berlaku ketika

instrumen digunakan dalam kondisi lingkungan yang ditentukan. Jadi di luar kondisi kalibrasi ini, beberapa variasi dalam parameter dinamis dapat diharapkan (Morris, 2001).

Dalam sistem pengukuran linier dan waktu-invarian, terdapat hubungan umum antara *input* dan *output* untuk waktu $t > 0$ yang dinyatakan oleh Persamaan 3.

$$a_n \frac{d^n q_0}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} q_0}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dq_0}{dt} + a_0 q_0 = b_m \frac{d^m q_i}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} q_i}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dq_i}{dt} + b_0 q_0 \quad (3)$$

Keterangan:

q_i : Kuantitas yang diukur

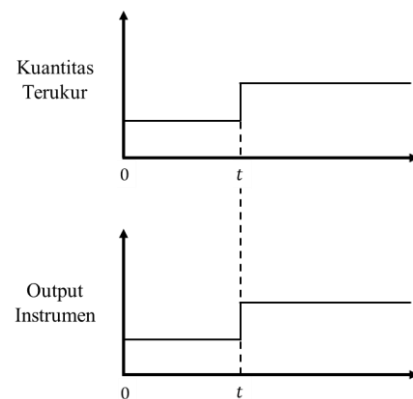
q_0 : Pembacaan *output*

$a_0 \dots a_n, b_0 \dots b_n$: Perubahan temperatur (K)

Karakteristik dinamik suatu instrumen dikatakan orde nol jika semua koefisien $a_1, \dots, a_n$ dalam persamaan 1 diasumsikan nol, maka didapatkan Persamaan 4.

$$q_0 = \frac{b_0 q_i}{a_0} = K q_i \quad (4)$$

Dengan K merupakan kontanta yang dikenal sebagai sensitivitas dari instrumen. Setelah terjadi perubahan kuantitas yang diukur pada waktu t , keluaran dari instrumen alat ukur bergerak segera ke nilai baru pada waktu yang sama t , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Karakteristik instrumen orde nol

Jika karakteristik suatu instrumen dikatakan orde satu maka semua koefisien $a_2, \dots, a_n$ dalam persamaan 1 diasumsikan bernilai nol, maka kita akan mendapatkan hubungan yang dituliskan oleh Persamaan 5.

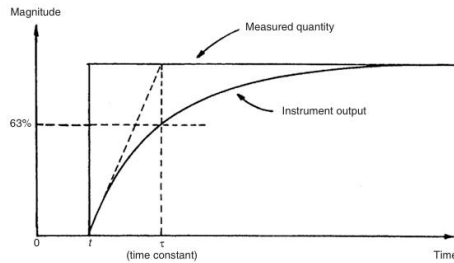
$$a_1 \frac{dq_0}{dt} + a_0 q_0 = b_0 q_i \quad (5)$$

Dengan $K = \frac{b_0}{a_0}$ dari persamaan 4 dan $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ sebagai konstanta waktu sistem, maka

didapatkan persamaan 6 sebagai nilai kuantitas *output*.

$$q_0 = \frac{Kq_i}{1 + \tau D} \quad (6)$$

Secara analitis, kuantitas *output* q_0 sebagai respons terhadap perubahan dalam q_i pada waktu t bervariasi seiring waktu dengan konstanta waktu dari respon tersebut adalah waktu yang dibutuhkan untuk kuantitas *output* q_0 mencapai 63% dari nilai akhir (Faradiba, 2020; Langari, 2012; Morris, 2001).

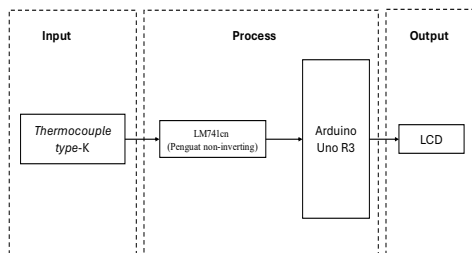


Gambar 4. Karakteristik instrumen orde pertama (Morris, 2001)

3. METODE PERCOBAAN

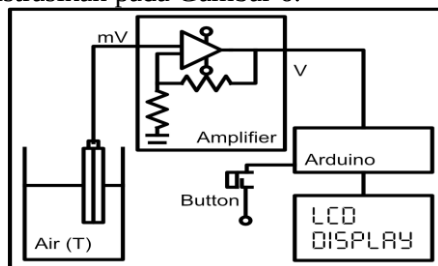
Perancangan Alat

Rancangan alat ukur yang dibuat dapat ditunjukkan pada diagram blok rangkaian sesuai Gambar 5.



Gambar 5. Diagram blok rangkaian alat ukur kelarutan

Dengan desain alat ukur yang diilustrasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Ilustrasi desain alat ukur kelarutan larutan dalam cairan

Dalam pembuatan alat ukur kelarutan larutan dalam cairan dibutuhkan termokopel, arduino UNO (*microcontroller*), LCD, *breadboard*, beberapa resistor (49,5 Ω , 99 Ω ,

dan 99 k Ω), dan kabel jumper sebagai penghubung.

Prinsip Kerja Alat

Alat ukur kelarutan yang telah dibuat ini terdiri dari empat (4) komponen utama, diantaranya yaitu: (1) 1 buah sensor termokopel type-K yang berfungsi sebagai masukan temperature yang terukur dari larutan zat terlarut pada saat proses kelarutan terjadi. (2) Rangkaian penguat *non-inverting* yang terdiri dari *op-amp* LM741CN, resistor 99 Ω dan 99 k Ω dengan penguatan yang dihasilkan sebesar 1000 kali. (3) Mikrokontroler yang digunakan yaitu arduino uno R3 yang berfungsi sebagai penerima keluaran penguat *non-inverting* sebelumnya lalu di program agar mendapatkan nilai kelarutan dari suatu zat terlarut dengan kode yang dibuat setelah melakukan karakterisasi pada sensor termokopel dan dengan menggunakan prinsip efek seebeck pada persamaan 8 dan prinsip le chatelier dengan persamaan 9. (4) LCD 16x2 yang berfungsi sebagai tampilan yang menampilkan hasil keluaran pengukuran berupa nilai kelarutan yang didapatkan dari arduino sebelumnya.

Prosedur Pembuatan dan Karakterisasi Alat

Langkah awal yang dilakukan setelah mndesain alat ukur dilakukan kalibrasi untuk karakterisasi sensor termokopel type-K untuk mendapatkan persamaan yang akan dimasukkan ke kode pemograman pada arduino agar dapat dilakukan konversi besaran dari temperatur ke kelarutan pada alat ukur.

Untuk karakterisasi sensor termokopel dilakukan pengukuran ke-I dan II pada ruangan yang sama di suhu kamar dengan rentang waktu dari pukul 15:15 hingga 15:58 dengan air panas dalam gelas styrofoam. Alat ukur yang digunakan sebagai pembanding pengukuran temperatur adalah termometer raksa, dan pengukuran tegangan dari termokopel menggunakan multimeter dengan nilai skala terkecil 0,1 mV. Selanjutnya dilakukan pengukuran ke-III pada ruangan yang berbeda dengan suhu ruang yang terukur yaitu 29°C dan pengambilan data dilakukan dengan memperhatikan perubahan suhu kurang lebih setiap 2°C. Pegukuran ke-I, II, dan III dilakukan dari temperatur tinggi ke rendah.

Pengukuran ke-IV dilakukan pada ruangan yang berbeda dengan suhu ruang yang terukur yaitu 29°C dan dilakukan pengambilan data tiap

kenaikan tegangan sebesar 0.1 mV dari temperatur rendah ke temperatur tinggi. Pengukuran IV dilakukan untuk mengecek adanya efek histerisis atau tidak dari alat ukur sebagai karakteristik statiknya.

Setelah itu, didapat grafik karakterisasi dari sensor termokopel dan persamaan yang diperoleh untuk dimasukkan ke dalam kode pemrograman arduino, dan dilakukan perangkaian alat serta pengukuran.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

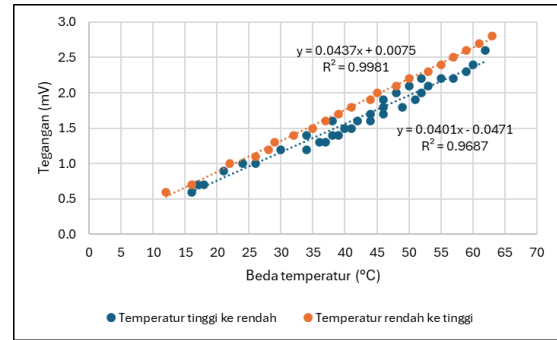
Karakterisasi Sensor

Data pengukuran I, II, III, dan IV untuk kalibrasi alat dilampirkan pada bagian lampiran. Berikut adalah hasil regresi linear dari pengukuran temperatur rendah ke tinggi serta sebaliknya yang menunjukkan efek histerisis dari alat ukur yang dibuat sebagai karakteristik statik. Karakterisasi dilakukan dengan mengukur temperatur dan tegangan pada air dengan rentan waktu tertentu pada kondisi suhu ruangan yang berbeda (25°C dan 30°C), setiap pengukuran dilakukan sebanyak 10 kali. Berikut adalah hasil data rata-rata yang didapatkan melalui pengukuran temperatur yang dapat dilihat pada Tabel 1, yang dijadikan acuan karakterisasi sensor.

Tabel 1. Data Pengukuran Karakterisasi Sensor

Pengukuran Ke-	Temperatur (°C)	dT (°C)	Tegangan (mV)
I			
(Suhu Ruangan 25°C)	52	27	1,09
II (Suhu Ruangan 25°C)	68	43	1,69
III (Suhu Ruangan 29°C)	79	50	1,93
IV (Suhu Ruangan 29°C)	70	41	1,78
Pengukuran V (Suhu Ruangan 29°C)	45	16	0,70

Dari data Tabel 1 didapatkan grafik yang direpresentasikan oleh Gambar 7.



Gambar 7. Grafik karakterisasi termokopel dengan pengukuran temperatur rendah ke tinggi dan sebaliknya

Dapat dilihat pada Gambar 7 bahwa terdapat efek histerisis namun dapat diabaikan karena ordenya yang cukup kecil pada 10^{-3} sehingga diperoleh hasil karakterisasi yang masih sangat signifikan yaitu nilai R^2 masih cukup baik, yaitu 0.9981 untuk temperatur rendah ke tinggi dan 0.9687 untuk temperatur tinggi ke rendah, dengan titik potong pada sumbu-y sangat kecil (secara teori seharusnya tidak ada tegangan ketika temperatur termokopel setara dengan suhu lingkungan) yaitu 0.0075 untuk rendah ke tinggi dan 0.0471 untuk tinggi ke rendah sehingga dapat dituliskan bahwa hubungan antara temperatur dan tegangan termokopel dinyatakan secara berturut-turut oleh persamaan 7 dan persamaan 8.

$$\Delta V \text{ (mV)} = 0.0437\Delta T \quad (7)$$

$$\Delta V \text{ (mV)} = 0.0401\Delta T \quad (8)$$

Rancangan Sistem Kerja Alat

Dari persamaan 1 tampak bahwa tegangan Seebeck bersifat linear terhadap perbedaan temperatur antara termokopel dengan suhu ruang. Dari karakterisasi sensor, diperoleh hubungan seperti persamaan 8 dan 9.

$$\Delta T = 22.88\Delta V \text{ (V)} \quad (9)$$

$$\Delta T = 24.94\Delta V \text{ (V)} \quad (10)$$

Persamaan 9 dan 10 menjadi 1000 kali dari hasil sebenarnya dikarenakan penambahan rangkaian penguat *op-amp*, karena tegangan yang dihasilkan oleh termokopel sangat kecil pada skala 10^{-3} V.

Sementara itu dari data referensi kelarutan sukrosa dalam air seperti pada Gambar 2, hubungan antara temperatur dengan kelarutan dapat dituliskan oleh persamaan 11.

$$S = 315.25e^{0.0026T} \quad (11)$$

Sehingga untuk suhu ruangan 25°C dan 29°C diperoleh konversi dari tegangan yang

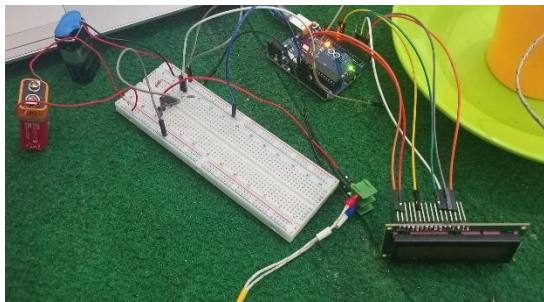
terukur menjadi kelarutan sukrosa dalam air dinyatakan oleh persamaan 12 dan 13.

$$S = 315.25e^{0.7852+0.0595\Delta V} \quad (12)$$

$$S = 691.29e^{0.7852+0.0648\Delta V} \quad (13)$$

Hasil Rakitan Alat

Dari alat-alat seperti telah disebutkan sebelumnya dan menggunakan mikrokontroler untuk menghubungkan tegangan yang terukur dengan kelarutan sesuai dengan Persamaan 12 dan 13, dirangkai alat pengukur kelarutan seperti Gambar 8.



Gambar 8. Rangkaian alat pengukur kelarutan

Pada Gambar 7 terlihat bahwa tegangan dari termokopel kemudian diperbesar sehingga yang semula berada di orde 0 – 3 mV menjadi 0 – 3 V. Sayangnya, penggunaan *op-amp* komersial seperti LM741 tidak dapat menghasilkan tegangan yang diinginkan karena tegangan termokopel yang sangat kecil. Penggunaan *instrumentation amplifier* (seperti pada Gambar 8) juga belum dapat menghasilkan penguatan hingga 1000 kali meski rangkaian sudah sesuai *datasheet*. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh rendahnya tegangan masukan yang dihasilkan dari sensor termokopel serta adanya hambatan dari komponen seperti kabel jumper dan breadboard yang mengurangi tegangan.

Oleh karena itu pada penelitian ini pengambilan data akan dilakukan secara manual, yakni mencatat tegangan dari termokopel untuk kemudian dimasukkan ke dalam Persamaan 12 supaya mendapatkan kelarutan gula.

Uji Karakteristik Statis dan Dinamis

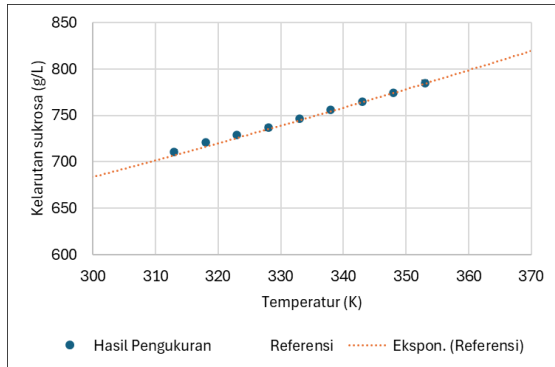
Untuk uji karakteristik statis alat ukur, dilakukan pengukuran akurasi dan presisi dari alat pengukur kelarutan gula dengan termokopel. Data diperoleh dengan melakukan pengukuran air sebanyak tiga kali dengan jeda

waktu satu jam untuk setiap pengukuran pada suhu ruang sekitar 29°C. Untuk pengukuran akurasi, hasil pengukuran dibandingkan dengan data referensi seperti pada Gambar 2 kemudian dihitung galat rata-ratanya. Semakin kecil galat rata-rata maka semakin akurat alat ukur tersebut. Sementara untuk pengukuran presisi, dihitung standar deviasi dari pengukuran kelarutan gula pada temperatur sama. Semakin kecil standar deviasinya maka semakin presisi alat ukur tersebut. Data pengukuran dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data pengukuran karakteristik alat ukur

Temperatur (K)	Tegangan (V)	Kelarutan (g/L)
Pengukuran I		
353	2,1	783,29
348	1,9	774,03
343	1,7	764,87
338	1,5	755,82
333	1,3	746,88
328	1,0	733,67
323	0,9	729,32
318	0,7	720,69
313	0,4	707,94
Pengukuran II		
353	2,1	783,30
348	1,9	774,03
343	1,7	764,87
338	1,5	755,82
333	1,3	746,88
328	1,1	738,04
323	0,9	729,32
318	0,7	720,69
313	0,5	712,17
Pengukuran III		
353	2,2	787,98
348	1,9	774,03
343	1,7	764,87
338	1,5	755,82
333	1,3	746,88
328	1,1	738,04
323	0,9	729,32
318	0,7	720,69
313	0,5	712,17

Dari data Tabel 2 didapatkan grafik yang direpresentasikan oleh Gambar 9.



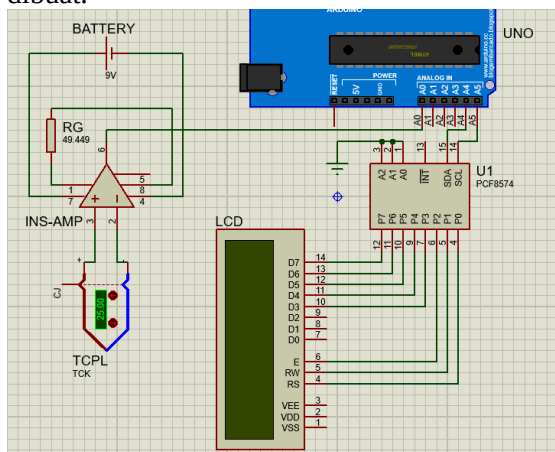
Gambar 9. Perbandingan hasil pengukuran kelarutan alat ukur dengan referensi

Pada Gambar 9 terlihat bahwa hasil alat ukur memiliki akurasi dan presisi yang sangat tinggi. Galat rata-rata alat ukur terhadap referensi hanya 0.348% dan standar deviasinya 0.8518 atau 0.114%.

Sementara untuk karakteristik dinamis alat ukur, waktu respons dari termokopel sangat kecil yaitu pada orde milisekon (Kerlin & Johnson, 2012). Hal ini cocok dengan pengukuran waktu kami menggunakan *stopwatch* berada pada orde kurang dari sekon. Oleh karena itu, alat ukur dapat dianggap bekerja pada orde nol.

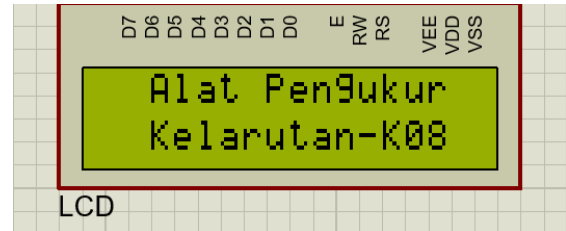
Simulasi Rangkaian

Gambar 10 adalah simulasi yang digunakan sebagai pendekatan dan alternatif untuk merepresentasikan fungsi alat yang telah dibuat.

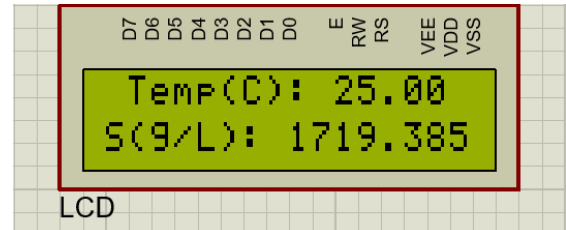


Gambar 10. Alat dalam simulasi

Dan untuk hasil keluaran ditampilkan pada LCD ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Tampilan awal LCD



Gambar 12. Tampilan nilai suhu dan kelarutan pada LCD

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan bahwa pengukuran yang telah dilaksanakan secara berulang sebanyak 3 kali didapatkan kelarutan rata-rata gula dalam air menggunakan termokopel sebesar 747.091 g/L pada rentang suhu 40°C - 80°C dengan standar deviasi yang diperoleh sebesar 0.8518 atau 0.114%. Hasil pengukuran kelarutan gula yang diperoleh berbeda sedikit dari nilai kelarutan gula referensi dengan galat sekitar 0.08% - 0.65% atau galat rata-rata dari alat ukur terhadap referensi sebesar 0,348%, adanya galat yang menunjukkan perbedaan hasil pengukuran dengan referensi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya seperti faktor lingkungan yang berbeda, alat ukur yang berbeda dari toleransi dan ketelitiannya.

Perakitan alat telah berhasil dilakukan namun tidak menghasilkan keluaran yang diinginkan, hal ini disebabkan oleh penggunaan *op-amp* komersial seperti LM741 tidak dapat menghasilkan tegangan yang diinginkan karena tegangan termokopel yang sangat kecil sehingga *output instrumentation amplifier* belum dapat menghasilkan penguatan hingga 1000. Sehingga perlu ada modifikasi dan penelitian lebih lanjut.

6. REFERENSI

Brlca, L. K. (1983). Le chatelier's principle: The effect of temperature on the solubility of solids in liquids. *Journal of Chemical Education*, 60(5). <https://doi.org/10.1021/ed060p387>

- Falco, C., & Udrea, F. (2017). On the seebeck coefficient and its temperature dependence for standard CMOS materials. *IEEE Sensors Journal*, 17(1), 30-36. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2622922>
- Faradiba. (2020). *Metode pengukuran fisika*. Jakarta: Universitas Kristen Indonesia.
- Genix, M., Vairac, P., & Cretin, B. (2009). Local temperature surface measurement with intrinsic thermocouple. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(9), 1679-1682. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.01.020>
- Guo, C., He, X., Rong, C., Lu, T., Liu, S., & Chattaraj, P. K. (2021). Local Temperature as a chemical reactivity descriptor. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 12(23), 5623–5630. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.1c01207>
- Huang, P., Fu, J., Lu, Y., Liu, J., Zhang, J., & Chen, D. (2022). An on-chip test structure to measure the seebeck coefficient of thermopile sensors. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 32(1). <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ac3be1>
- Kerlin, T. W., & Johnson, M. (2012). *Practical thermocouple thermometry (2nd Edition)*. United States of America: ISA.
- Morris, A. S. Langari, R. (2012). Measurement and instrumentation. In *Measurement and Instrumentation*. United States of America: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63052-X>
- Lian, B. (2019). Revolusi industri 4.0 dan disrupsi, tantangan dan ancaman bagi Perguruan Tinggi. *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Program Pascasarjana Universitas Pgri*, 40-45.
- Linebarger, C. E. (1895). Application of the Schroeder-Le Chatelier law of solubility to solutions of salts in organic liquids. *American Journal of Science*, s3-49(289). <https://doi.org/10.2475/ajs.s3-49.289.48>
- Morris, A. S. (2001). *Measurement and Instrumentation Principles*. Oxford: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/10/702>
- Nwanak, S. (2024). Impact of temperature on the solubility of ionic compounds in water in Cameroon. *Journal of Chemistry*, 3(2), 42–51. <https://doi.org/10.47672/jchem.2403>
- Van Herwaarden, A. W., & Sarro, P. M. (1986). Thermal sensors based on the seebeck effect. *Sensors and Actuators*, 10(3–4). [https://doi.org/10.1016/0250-6874\(86\)80053-1](https://doi.org/10.1016/0250-6874(86)80053-1)
- Vermeire, F. H., Chung, Y., & Green, W. H. (2022). Predicting Solubility Limits of Organic Solutes for a Wide Range of Solvents and Temperatures. *Journal of the American Chemical Society*, 144(24). <https://doi.org/10.1021/jacs.2c01768>
- Waluyanti, S. (2008). Alat ukur dan teknik pengukuran. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Yalkowsk, S. H., & He, Y. (2003). *Handbook of aqueous solubility data*. In Handbook of Aqueous Solubility Data. <https://doi.org/10.1201/9780203490396>
- Yusuf, Y. (2018). *Kimia dasar*. Tangerang: EduCenter Indonesia.