



Analisis Kinerja dan Akurasi Sensor Thermocouple Tipe K dalam Sistem Pengendalian Suhu Reflow Soldering

Purbo Tri Prakoso^{1*}, Bustanul Arifin², Suryani ALifah³

^{1,2,3}Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

Email: purbotriprakoso@gmail.com^{1*}

Alamat: Jl. Kaligawe Raya No.Km.4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

**Penulis korespondensi*

Abstract. The reflow soldering process is an important stage in the assembly of electronic components that requires high-precision temperature control to ensure the quality of the solder joints. This study aims to evaluate the performance of a K-type thermocouple temperature sensor integrated into the solder reflow control system. Evaluation was carried out through temperature measurements at 20 different points, ranging from 35°C to 220°C, with a focus on reading accuracy and error rate. The results of the experiment showed that the type K thermocouple sensor had an error range between 0.02°C to 0.97°C, with an average error value of 0.54°C. These findings indicate that the sensor is stable and reliable enough to be used in industrial applications that demand temperature precision. The advantages of these sensors lie in their cost efficiency, ease of integration, and responsiveness to temperature changes. Nonetheless, periodic calibration is still necessary to maintain long-term accuracy, especially in dynamic work environments. This research contributes to the development of temperature control systems in the electronic manufacturing process, especially in the selection of the right sensors to support production quality. The conclusion of this study confirms that the K-type thermocouple is a practical and economical solution in reflow soldering systems, with sufficient performance to meet industry standards.

Keywords: Periodic Calibration; Precision Control; Solder Reflow; Temperature Sensor; Thermocouple Type

Abstrak. Proses solder reflow merupakan tahapan penting dalam perakitan komponen elektronik yang memerlukan kontrol suhu presisi tinggi untuk memastikan kualitas sambungan solder. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa sensor suhu termokopel tipe K yang diintegrasikan ke dalam sistem kendali solder reflow. Evaluasi dilakukan melalui pengukuran suhu pada 20 titik berbeda, mulai dari 35°C hingga 220°C, dengan fokus pada akurasi pembacaan dan tingkat error. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sensor termokopel tipe K memiliki rentang error antara 0,02°C hingga 0,97°C, dengan nilai rata-rata error sebesar 0,54°C. Temuan ini mengindikasikan bahwa sensor tersebut cukup stabil dan andal untuk digunakan dalam aplikasi industri yang menuntut ketelitian suhu. Keunggulan sensor ini terletak pada efisiensi biaya, kemudahan integrasi, dan responsivitas terhadap perubahan suhu. Meskipun demikian, kalibrasi berkala tetap diperlukan untuk menjaga akurasi jangka panjang, terutama dalam lingkungan kerja yang dinamis. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem kendali suhu dalam proses manufaktur elektronik, khususnya dalam pemilihan sensor yang tepat untuk mendukung kualitas produksi. Kesimpulan dari studi ini menegaskan bahwa termokopel tipe K merupakan solusi praktis dan ekonomis dalam sistem solder reflow, dengan performa yang memadai untuk memenuhi standar industri.

Kata kunci: Aliran Ulang Solder; Kalibrasi Berkala; Kendali Presisi; Sensor Suhu; Termokopel Tipe

1. LATAR BELAKANG

Di industri elektronik modern, perakitan Papan Sirkuit Cetak (PCB) dengan komponen kecil (SMD) sangat mengandalkan proses otomatis yang disebut solder reflow. Kunci keberhasilan proses ini adalah pengaturan suhu yang sangat presisi, yang terbagi dalam empat tahap: pemanasan awal (*pre-heat*), penyerapan panas (*soak*), pelelehan (*reflow*), dan pendinginan (*cooling*). Setiap tahap punya peran penting; misalnya, pada tahap reflow, suhu harus cukup tinggi untuk melelehkan pasta solder dan menciptakan sambungan yang kuat,

tetapi tidak boleh terlalu panas agar tidak merusak komponen. Sedikit saja penyimpangan suhu dapat menyebabkan cacat serius seperti komponen terangkat (*tombstoning*), korsleting antar pin (*solder bridging*), atau sambungan yang rapuh (*cold joints*), yang pada akhirnya membuat produk gagal berfungsi.

Untuk memastikan suhu dalam proses reflow selalu tepat, sensor suhu memegang peranan krusial. Salah satu sensor yang paling umum digunakan di industri adalah termokopel tipe K, yang terbuat dari paduan Chromel dan Alumel. Sensor ini populer karena mampu mengukur rentang suhu yang sangat luas (dari -200°C hingga 1350°C), tahan banting, dan harganya terjangkau. Cara kerjanya memanfaatkan efek Seebeck, di mana perbedaan suhu antara dua jenis logam akan menghasilkan tegangan listrik yang bisa diukur. Meskipun spesifikasi teknisnya sudah jelas, kinerjanya di lingkungan pabrik yang sesungguhnya bisa dipengaruhi oleh berbagai gangguan, seperti sinyal yang tidak linear, interferensi elektromagnetik dari elemen pemanas, atau penurunan kualitas sensor seiring waktu. Karena itulah, pengujian langsung untuk memvalidasi performa termokopel tipe K pada sistem solder reflow yang sebenarnya—bukan sekadar di lingkungan laboratorium yang steril—menjadi sangat penting untuk memastikan keandalannya.

2. KAJIAN TEORITIS

Termokopel dan Prinsip Efek Seebeck

Termokopel adalah sensor suhu pasif yang bekerja menggunakan prinsip termoelektrik, sebuah fenomena yang ditemukan oleh Thomas Seebeck pada tahun 1821. Prinsip ini, yang dikenal sebagai Efek Seebeck, pada dasarnya menyatakan bahwa jika Anda menyambungkan dua jenis logam yang berbeda di kedua ujungnya, maka perbedaan suhu di antara kedua sambungan tersebut akan menghasilkan tegangan listrik (dalam milivolt). Besarnya tegangan yang timbul ini berbanding lurus dengan perbedaan suhunya; semakin besar perbedaan suhu, semakin besar pula tegangan yang dihasilkan.

Secara matematis, hubungan antara tegangan (V) dan perbedaan suhu (ΔT) dapat dijelaskan oleh persamaan:

$$V = \int_{T_{\text{ref}}}^{T_{\text{meas}}} S(T) dT$$

Di mana: V adalah tegangan termoelektrik yang terukur (mV). T_{meas} adalah suhu sambungan panas atau suhu yang diukur ($^{\circ}\text{C}$). T_{ref} adalah suhu sambungan dingin atau suhu referensi ($^{\circ}\text{C}$). $S(T)$ adalah koefisien Seebeck, yang merupakan fungsi dari suhu.

Termokopel tipe K menggunakan kombinasi dua paduan logam spesifik: Nikel-Kromium (Chromel) untuk kutub positif dan Nikel-Aluminium (Alumel) untuk kutub negatif. Keunggulan utama dari perpaduan ini adalah responsnya yang cenderung lurus (linier) terhadap perubahan suhu di rentang yang sangat lebar. Karakteristik inilah yang membuatnya sangat andal dan menjadi standar umum di berbagai industri.

Kompensasi *Cold Junction*

Tegangan listrik yang dihasilkan oleh termokopel sebenarnya tidak secara langsung menunjukkan suhu absolut. Sinyal tersebut hanyalah representasi dari selisih suhu antara ujung sensor yang panas (titik pengukuran, T_{mea}) dan ujung sambungan yang dingin (titik referensi, T_{ref}). Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil pengukuran yang akurat, suhu di titik referensi ini harus diketahui dan nilainya ditambahkan ke dalam perhitungan. Proses inilah yang dikenal sebagai Kompensasi Sambungan Dingin atau Cold Junction Compensation (CJC).

Dalam praktiknya, proses CJC ini dilakukan dengan menempatkan sensor suhu lain (seperti termistor, RTD, atau dioda silikon) tepat di dekat sambungan dingin termokopel. Sensor tambahan inilah yang bertugas mengukur suhu referensi secara akurat. Nilai dari sensor ini kemudian digunakan untuk menghasilkan "tegangan koreksi" yang akan ditambahkan ke tegangan asli dari termokopel. Dengan cara ini, suhu yang sesungguhnya (T_{mea}) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$T_{mea} = T_{ref} + \frac{V_{termo} + V_{CJC}}{\alpha_{avg}}$$

Di mana: V_{termo} adalah tegangan dari termokopel. V_{CJC} adalah tegangan kompensasi yang dihitung dari suhu sambungan dingin. α_{avg} adalah koefisien Seebeck rata-rata.

Kegagalan atau ketidakakuratan dalam proses CJC dapat menjadi sumber *error* utama.

Sumber *Error* dalam Pengukuran Termokopel

Berikut adalah beberapa faktor yang dapat menyebabkan pembacaan termokopel menjadi kurang akurat di dunia nyata:

- Non-Linearitas**: Hubungan antara suhu dan tegangan yang dihasilkan termokopel sebenarnya tidaklah lurus sempurna (linier), melainkan sedikit melengkung. Meskipun sirkuit modern sudah dilengkapi fitur untuk mengoreksi lengkungan ini, terkadang masih ada sedikit sisa kesalahan yang tidak terkompensasi.
- Gangguan Elektromagnetik (EMI)**: Sinyal tegangan dari termokopel sangatlah lemah, membuatnya seperti bisikan di tengah keramaian. Akibatnya, sinyal ini sangat rentan terganggu oleh "noise" dari medan magnet yang dihasilkan peralatan listrik lain seperti elemen pemanas atau motor. Gangguan ini bisa merusak sinyal asli dan mengakibatkan pembacaan suhu jadi tidak stabil.

atau salah. Akurasi Bawaan (Kalibrasi): Setiap termokopel yang diproduksi memiliki batas toleransi akurasi yang sudah ditetapkan oleh standar industri. Ini berarti, performa asli setiap sensor di lapangan mungkin akan sedikit berbeda atau meleset dari spesifikasi ideal yang tertulis di kertas. Penempatan Sensor: Posisi penempatan sensor sangatlah krusial. Jika sensor tidak menempel dengan baik atau diletakkan di lokasi yang salah, ia mungkin hanya akan mengukur suhu udara di sekitar objek, bukan suhu inti dari objek itu sendiri, sehingga memberikan data yang tidak akurat.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode kuantitatif, yaitu mengukur secara langsung performa sensor di dalam sistem solder reflow yang sesungguhnya. Peralatan yang kami gunakan adalah mesin solder reflow komersial, sebuah termokopel tipe K (dengan kelas akurasi standar) yang akan diuji, dan sebuah termometer presisi Fluke 54-IIB sebagai acuan atau referensi pembanding. Langkah-langkah pengujiannya adalah sebagai berikut: Persiapan dan Penempatan Sensor Pertama, termokopel tipe K yang akan diuji kami pasang di permukaan PCB kosong menggunakan selotip tahan panas. Posisinya diatur sedemikian rupa agar benar-benar mewakili suhu yang nantinya akan diterima oleh komponen elektronik selama proses penyolderan. Penggunaan Alat Ukur Referensi Kemudian, untuk memastikan data kami akurat, probe dari termometer referensi Fluke 54-IIB diletakkan persis di samping termokopel yang diuji. Alat Fluke ini secara rutin dikalibrasi, sehingga pembacaannya sangat tepercaya dan menjadi standar pembanding. Pengambilan Data Suhu Mesin reflow kemudian dijalankan dengan suhu yang dinaikkan secara bertahap. Di setiap tingkatan suhu, kami menunggu beberapa saat hingga kondisinya stabil. Begitu suhu stabil, data dari termokopel uji dan termometer Fluke dicatat pada waktu yang bersamaan. Proses ini kami ulangi untuk mendapatkan total 20 titik data dengan rentang suhu dari 35°C hingga 220°C, yang sudah mencakup seluruh tahapan dalam proses reflow. Menganalisis Hasil Terakhir, kami menghitung nilai *error* atau kesalahan dengan mencari selisih antara hasil bacaan termokopel uji dan termometer Fluke. Dari data yang terkumpul, kami melakukan analisis statistik untuk menemukan rata-rata kesalahan (E_{avg}), standar deviasi (σ), serta penyimpangan paling besar yang terjadi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa termokopel dapat mengikuti kenaikan suhu dengan baik. Namun, kami juga menemukan adanya lonjakan kesalahan (*error*) yang cukup besar di beberapa titik pengukuran. Rincian datanya kami sajikan dalam tabel berikut:

Tabel 1. Hasil Pengukuran Termokopel.

Suhu terukur (°C)	Suhu Thermocouple (°C)	<i>Error Suhu</i> (°C)
35	35.03	0.03
40	40.45	0.45
50	50.33	0.33
60	60.51	0.51
70	70.94	0.94
80	80.71	0.71
90	90.29	0.29
100	100.85	0.85
110	110.02	0.02
120	120.06	0.06
130	130.62	0.62
140	140.6	0.6
150	150.66	0.66
160	160.97	0.97
170	170.16	0.16
180	180.96	0.96
190	190.88	0.88
200	200.81	0.81
210	210.08	0.08
220	220.92	0.92
Error rata-rata		0.54

Dari data pada tabel 1, kita bisa melihat bahwa tingkat kesalahan (*error*) terendah yang tercatat hanya 0,02°C, sedangkan kesalahan tertinggi mencapai 0,97°C. Jika dirata-ratakan dari seluruh data, tingkat kesalahan sensor ini adalah 0,54°C. Analisis lebih dalam mengenai fluktuasi *error* ini penting untuk memahami apa yang sebenarnya terjadi. Ada beberapa kemungkinan penyebabnya:

Pengaruh Gangguan (Noise dan EMI) Lonjakan *error* yang tiba-tiba (seperti pada suhu 70,94°C dan 160,97°C) kemungkinan besar disebabkan oleh gangguan elektromagnetik (EMI). Gangguan ini bisa datang dari elemen pemanas oven atau motor kipas yang sedang bekerja keras. Karena sinyal asli dari termokopel sangat lemah, gangguan "noise" sekecil apa pun sudah bisa berdampak besar pada hasil pembacaan. Non-Linearitas Sensor Pada dasarnya,

pembacaan termokopel tidak sepenuhnya lurus (linier) seiring kenaikan suhu. Meskipun sistem modern sudah punya program untuk mengoreksi hal ini, terkadang koreksinya tidak sempurna. *Error* yang tidak konsisten (kadang rendah, kadang tinggi di suhu berbeda) bisa menjadi tanda bahwa program koreksinya kurang cocok dengan karakteristik unik dari sensor yang sedang diuji. Toleransi Pabrikasi Seperti produk massal lainnya, tidak ada dua termokopel yang 100% identik. Sedikit perbedaan dalam proses pembuatan bisa membuat setiap unit memiliki tingkat kesalahan bawaan yang berbeda. Perlu diingat, data ini adalah cerminan performa dari satu unit sensor saja. Untuk mendapat gambaran umum, pengujian perlu diulang dengan lebih banyak sampel sensor.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil analisis, kesimpulannya jelas: sensor suhu termokopel tipe K terbukti sangat baik dan bisa diandalkan untuk digunakan dalam sistem kendali solder reflow. Dengan rata-rata kesalahan hanya 0,54°C, tingkat akurasi sudah lebih dari cukup untuk kebutuhan industri. Fluktuasi *error* yang sempat muncul pun masih dalam batas wajar dan tidak sampai mengganggu fungsi utama dari sistem kendali.

Berdasarkan temuan ini, kami merekomendasikan termokopel tipe K sebagai pilihan sensor suhu yang efektif dari segi kinerja dan ekonomis dari segi biaya. Meskipun begitu, untuk menjaga performanya tetap prima, kalibrasi rutin tetap wajib dilakukan, terutama pada sistem produksi yang menuntut presisi sangat tinggi. Untuk pengembangan di masa depan, ada beberapa area yang menarik untuk diteliti lebih lanjut: Membandingkan performa termokopel dengan sensor jenis lain (seperti RTD atau inframerah) pada kondisi yang sama. Mengembangkan algoritma penyaringan sinyal (*filtering*) yang lebih canggih untuk mengurangi gangguan elektromagnetik (EMI).

DAFTAR REFERENSI

- Conseil-Gudla, H., Li, F., & Ambat, R. (2021). Reflow Residues on Printed Circuit Board Assemblies and Interaction with Humidity. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 21(4), 594–602. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2021.3120941>.
- Depiver, J. A., Mallik, S., & Harmanto, D. (2021). Solder joint failures under thermo-mechanical loading conditions—A review. *Advanced Materials and Processing Technology*, 7(1), 1–26. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1751514>.
- Guo, Y., Liu, M., Yin, M., & Yan, Y. (2022). Reliability Sensibility Analysis of the PCB Assembly concerning Warpage during the Reflow Soldering Process. *Mathematics*, 10(17). <https://doi.org/10.3390/math10173055>.

- Ko, K. W., & Cho, H. S. (2000). Solder joints inspection using a neural network and fuzzy rule-based classification method. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 23(2), 78. <https://doi.org/10.1109/6104.846932>.
- Kus, A., Isik, Y., Cakir, M. C., Coskun, S., & Özdemir, K. (2015). Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting. *Sensors (Switzerland)*, 15(1), 1274–1291. <https://doi.org/10.3390/s150101274>.
- Lam, T. L. (2021). Low-Cost Non-Contact PCBs Temperature Monitoring and Control in a Hot Air Reflow Process Based on Multiple Thermocouples Data Fusion. *IEEE Access*, 9, 123566–123574. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036527>.
- Lim, I. S. S., Chung, E. C. Y., Tan, K. B. T., & Teoh, K. S. (2015). The practicality of TRIZ based conceptual solutions in solving tombstoning defects during SMD soldering. *Chemical Engineering Research and Design*, 103, 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.09.012>.
- Ma, G., Huang, X., & Liu, S. (2021). Heat Transfer Modeling and Oven Temperature Curve Optimization of Integrated Circuit Board Reflow Soldering. *IEEE Access*, 9, 141876–141889. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120496>.
- Septiana, R., Roihan, I., & Koestoer, R. A. (2021). Denoising MAX6675 reading using Kalman filter and factorial design. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(5), 3818–3827. <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i5.pp3818-3827>.
- Tang, X. Q., Zhao, S. J., Huang, C. Y., & Lu, L. K. (2018). Thermal stress-strain simulation analysis of BGA solder joint reflow soldering process. *Proceedings - 2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology ICEPT 2018*, 981–986. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2018.8480615>.
- Tsai, T. N. (2012). Thermal parameters optimization of a reflow soldering profile in printed circuit board assembly: A comparative studi. *Applied Soft Computing Journal*, 12(8), 2601–2613. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.03.066>.
- Wahono, W. T., Winarno, T., & Fathoni, F. (2020). Implementasi Fuzzy Logic Untuk Pengontrolan Suhu Pada Proses Reflow Oven Soldering. *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, 3(1), 2. <https://doi.org/10.33795/elkolind.v3i1.59>.
- Yang, W., & Chung, D. D. L. (2021). Effect of temperature on the electrical conduction and dielectric behavior of solder. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(5), 6511–6519. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05369-9>.
- Yi, S., & Jones, R. (2020). Machine learning framework for predicting reliability of solder joints. *Soldering and Surface Mount Technology*, 32(2), 82–92. <https://doi.org/10.1108/SSMT-04-2019-0013>.