

Implementasi Metode Regresi Linear Untuk Kalibrasi dan Pengukuran Suhu pada Sensor Suhu PT100

Kartika¹, Asran², Mhd Perdiansyah Hasibuan³, Misriana⁴

e-mail: kartika@unimal.ac.id¹, asran@unimal.ac.id², ferdiansahm14@gmail.com³, misriana@pnl.ac.id⁴

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Malikussaleh, Jalan Batam – Bukit Indah, Lhokseumawe, Indonesia

⁴Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Jalan Raya Medan – Banda Aceh km. 280, Lhokseumawe, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 23 Mei 2024

Direvisi 8 Juli 2024

Diterbitkan 31 Juli 2024

Kata kunci:

Sensor suhu PT100

Kalibrasi suhu

Regresi linear

Arduino Uno

Keywords:

PT100 temperature sensor

Temperature calibration

Linear regression

Arduino Uno

ABSTRAK

Sensor suhu PT100 merupakan jenis sensor resistansi termal (RTD) yang umum digunakan dalam industri, khususnya dalam mengendalikan suhu pada ketel uap. Ketepatan pengukuran suhu sangat krusial untuk menjaga efisiensi dan keamanan operasional. Penggunaan regresi linear untuk kalibrasi dan pengukuran suhu menggunakan sensor PT100 yang terintegrasi dengan Arduino Uno dan LCD I2C diusulkan untuk meningkatkan ketepatan. Pengujian dilakukan dengan merangkai sensor PT100 dengan Arduino Uno dan LCD I2C. Data dari pengujian digunakan untuk regresi linear guna memperoleh persamaan kalibrasi. Perbandingan hasil antara sensor suhu PT100 dengan termometer digital dilakukan dengan rentang suhu 30°C hingga 75°C dengan interval 5°C, dan setiap titik suhu diuji lima kali. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengukuran suhu dengan sensor PT100 memiliki akurasi yang baik, dengan galat sebesar 0,183°C dan persentase galat rendah sebesar 0,00226%. Standar deviasi juga menunjukkan konsistensi yang baik. Integrasi sensor suhu PT100 dengan Arduino Uno dan LCD I2C, serta penggunaan regresi linear untuk kalibrasi, menghasilkan sistem pengukuran suhu yang presisi. Pengujian terhadap termometer digital menunjukkan hasil yang sangat akurat. Sistem yang dikembangkan ini dapat digunakan untuk pengukuran suhu dengan presisi tinggi pada aplikasi ketel uap.

ABSTRACT

The PT100 temperature sensor, a type RTD (resistance temperature detector), is widely employed in industries, particularly for steam boiler temperature regulation. Precise temperature measurement is vital for operational efficiency and safety maintenance. Utilizing linear regression for calibrating and measuring temperature with the PT100 sensor integrated with Arduino Uno and LCD I2C is proposed to enhance accuracy. Testing involved assembling the PT100 sensor with Arduino Uno and LCD I2C. Test data were employed for linear regression to derive the calibration equation. Measurements were conducted by comparing PT100 sensor readings with a digital thermometer across a temperature range of 30°C to 75°C at 5°C intervals, with each temperature point tested five times. Results exhibit good accuracy in temperature measurement with the PT100 sensor, featuring low error and percentage error. The standard deviation indicates consistent measurement. Integration of the PT100 temperature sensor with Arduino Uno and LCD I2C, coupled with linear regression for calibration, yields a precise temperature measurement system. Testing against a digital thermometer demonstrates highly accurate outcomes. This developed system finds application in high-precision temperature measurement for steam boiler operations.



Penulis Korespondensi:

Kartika,
Jurusan Teknik Elektro,
Universitas Malikussaleh,
Jl. Batam – Bukit Indah, Lhokseumawe, Aceh, Indonesia, 24353.
Email: Kartika@unimal.ac.id
Nomor HP/WA aktif: +62 81376893373

1. PENDAHULUAN

Sensor suhu PT100 merupakan salah satu jenis sensor resistansi termal (RTD) yang sering digunakan dalam berbagai aplikasi industri, terutama dalam pengendalian suhu pada ketel uap [1]. Ketel uap membutuhkan suhu yang sangat presisi untuk menjaga efisiensi dan keselamatan operasional. Ketidakakuratan dalam pengukuran suhu dapat menyebabkan masalah serius seperti penurunan efisiensi, peningkatan konsumsi energi, atau bahkan risiko kegagalan sistem [2]. Oleh karena itu, kalibrasi yang tepat dan pengukuran suhu yang akurat adalah aspek yang sangat penting dalam pemeliharaan dan pengoperasian ketel uap [3].

Pengukuran suhu yang akurat, sensor PT100 dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler tertentu [4]. Kombinasi ini tidak hanya memungkinkan pengolahan data secara real-time, tetapi juga memberikan kemudahan dalam menampilkan hasil pengukuran secara langsung kepada pengguna [5]. Dengan demikian, pengguna dapat memantau dan menyesuaikan suhu dengan cepat dan efisien, memastikan bahwa sistem ketel uap beroperasi dalam kondisi optimal [6]. Penggunaan Arduino Uno dan LCD I2C juga membuat sistem ini lebih fleksibel dan mudah digunakan [7].

Implementasi regresi linear untuk kalibrasi dan pengukuran suhu pada sensor PT100 adalah teknik yang sudah mapan di bidang penginderaan suhu. Penggunaan regresi linear untuk kalibrasi sensor didukung oleh berbagai studi yang menunjukkan efektivitasnya dalam meningkatkan akurasi pengukuran suhu [8]. Teknik ini memungkinkan sensor untuk memberikan hasil yang lebih akurat dan konsisten.

Salah satu aspek kunci dari regresi linear dalam kalibrasi sensor adalah kemampuannya untuk memodelkan hubungan antara keluaran sensor dan suhu aktual [9]. Hubungan ini dapat direpresentasikan oleh persamaan linear, di mana kemiringan garis menggambarkan sensitivitas sensor dan intercept menggambarkan offset atau bias. Pendekatan ini telah berhasil diterapkan pada berbagai jenis sensor suhu, termasuk DS18B20 dan LM35, yang dikenal karena akurasi dan linearitasnya yang tinggi [10]. Hal ini menunjukkan bahwa regresi linear dapat diterapkan secara luas pada berbagai jenis sensor [11].

Penggunaan regresi linear untuk kalibrasi sensor sangat penting dalam aplikasi yang membutuhkan akurasi tinggi. Contohnya adalah dalam proses industri, perangkat medis, dan penelitian ilmiah. Dalam kasus ini, bahkan kesalahan kecil dalam pengukuran suhu dapat memiliki konsekuensi signifikan. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa sensor yang digunakan dikalibrasi dengan akurat [12].

Implementasi regresi linear khususnya untuk kalibrasi sensor PT100 telah terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi pengukuran suhu. Studi telah menunjukkan bahwa regresi linear dapat digunakan untuk memodelkan perilaku non-linear sensor PT100. Dengan demikian, memungkinkan pengukuran suhu yang lebih akurat dapat dilakukan. Ini membuat regresi linear menjadi teknik yang sangat berharga dalam kalibrasi sensor PT100 [13].

Singkatnya, penggunaan regresi linear untuk kalibrasi sensor, terutama untuk sensor PT100 merupakan teknik yang sudah mapan yang telah terbukti meningkatkan akurasi pengukuran suhu. Pendekatan ini didukung oleh berbagai studi dan banyak digunakan dalam aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi. Dengan adanya teknik ini, berbagai bidang yang membutuhkan pengukuran suhu yang akurat dapat lebih terjamin kualitasnya. Regresi linear memastikan bahwa hasil pengukuran suhu lebih dapat diandalkan [14].

Tujuan penelitian dilakukan untuk implementasi metode regresi linear dalam kalibrasi dan pengukuran suhu menggunakan sensor PT100 yang terintegrasi dengan Arduino Uno dan LCD I2C. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh sistem pengukuran suhu yang lebih akurat dan andal untuk aplikasi pada ketel uap. Sistem ini



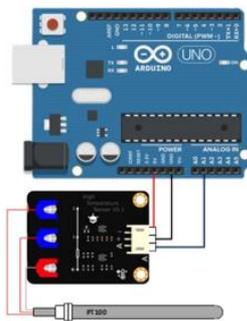
dirancang untuk meningkatkan efisiensi operasional dan keselamatan industri dengan menyediakan pengukuran suhu yang presisi dan real-time.

2. METODE PENELITIAN

Pengujian sensor suhu PT100 dilakukan untuk memastikan kemampuan sensor dalam mendeteksi suhu pada ketel uap. Pengujian ini melibatkan beberapa alat dan bahan, termasuk program pengujian, borang pengujian, termometer digital, dan sensor suhu PT100 yang dirangkai dengan Arduino Uno. Rangkaian Arduino Uno dilengkapi dengan LCD I2C untuk memudahkan pembacaan suhu yang terdeteksi.

Pengujian melibatkan komponen utama yang dihubungkan. Sensor Suhu PT100 dihubungkan dengan Arduino Uno melalui modul DFrobot temperature sensor untuk memastikan deteksi dan pengolahan sinyal yang mudah. Arduino Uno dan LCD I2C digunakan untuk membaca dan menampilkan hasil pengukuran suhu. Termometer Digital digunakan sebagai alat pembanding untuk verifikasi hasil pengukuran. Alat Kalibrasi Standar untuk mengatur suhu lingkungan selama pengujian.

Sensor suhu PT100 dihubungkan ke Arduino Uno dengan bantuan modul Dfrobot pada pin A0. LCD I2C dipasang untuk menampilkan suhu yang diukur. Program ini dirancang untuk membaca nilai resistansi dari sensor PT100, mengonversinya ke suhu, dan menampilkannya pada LCD I2C seperti Gambar 1 berikut.



Gambar 1 Rangkaian Arduino UNO dengan sensor suhu PT100

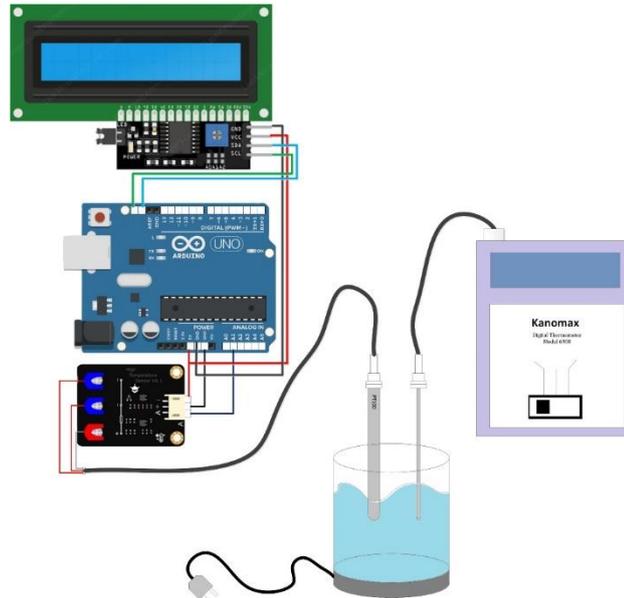
Data yang diperoleh dari pengujian akan digunakan untuk melakukan regresi linear guna memperoleh persamaan kalibrasi. Langkah ini melibatkan analisis hubungan antara resistansi sensor PT100 dengan suhu yang diukur. Persamaan regresi linear yang dihasilkan akan digunakan untuk mengonversi nilai resistansi menjadi suhu yang akurat.

Pada tahap berikutnya, data yang telah dikumpulkan dianalisis menggunakan Excel. Dalam Excel, dibuat grafik yang memplot resistansi terhadap suhu. Kemudian, fitur analisis regresi linear digunakan untuk menentukan hubungan antara resistansi dan suhu. Excel akan memberikan persamaan regresi linear yang menghubungkan kedua variabel ini. Persamaan regresi linear yang diperoleh dari Excel dapat digunakan untuk memprediksi suhu berdasarkan nilai resistansi yang dibaca oleh sensor PT100.

Perbandingan hasil pembacaan sensor suhu PT100 dengan termometer digital merek Kanomax Model 6908. Suhu diatur dalam rentang 30°C hingga 75°C dengan interval 5°C. Pada setiap titik suhu, dilakukan lima kali pengukuran untuk memastikan kestabilan dan keakuratan data.

Setiap hasil pengukuran dari sensor PT100 dan termometer digital didokumentasikan. Data yang ditampilkan pada LCD I2C dibandingkan dengan data dari termometer digital untuk setiap rentang suhu. Dokumentasi ini mencakup pencatatan nilai suhu yang ditampilkan pada layar alat ukur dan LCD I2C seperti pada Gambar 2.





Gambar 2 Skema rangkaian pengujian sensor suhu PT100

Data yang diperoleh dari pengujian dianalisis untuk mengevaluasi akurasi dan keandalan sensor PT100. Perbandingan antara hasil pengukuran sensor PT100 dan termometer digital dilakukan untuk setiap rentang suhu. Hasil evaluasi ini akan menentukan tingkat akurasi sistem dan mengidentifikasi potensi perbaikan lebih lanjut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sensor suhu dilakukan untuk memastikan nilai yang terdeteksi sensor suhu PT100 akurasi tidak jauh dari alat ukur standar. Hasil pengujian sensor suhu PT100 ini melibatkan beberapa tahapan yang telah dilakukan. Tahapan dilakukan dengan merangkai rangkaian pengujian dan membandingkan sensor suhu PT100 dengan alat ukur suhu digital Kanomax Model 6908 seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 Rangkaian pengujian sensor suhu PT100

Pada Gambar 3 menunjukkan rangkaian pengujian yang dilakukan pada sensor suhu PT100 yang menampilkan alat ukur suhu digital yang digunakan. Untuk menampilkan nilai yang didapatkan pada sensor suhu PT100 digunakan LCD I2C dan catu daya. Proses kalibrasi awal dilakukan dengan peletakan probe sensor suhu dan alat ukur Kanomax 6908 pada pemanas air yang diikuti dengan proses mencatat kenaikan suhu.

Kenaikan nilai suhu yang didapatkan, akan mendapatkan nilai selisih antara kedua alat ukur. Proses kalibrasi ini meliputi pembacaan nilai ADC sensor suhu PT100 dengan alat ukur digital sehingga mendapatkan persamaan regresi kurva kalibrasi. Proses mendapatkan kurva regresi linear dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel [15].



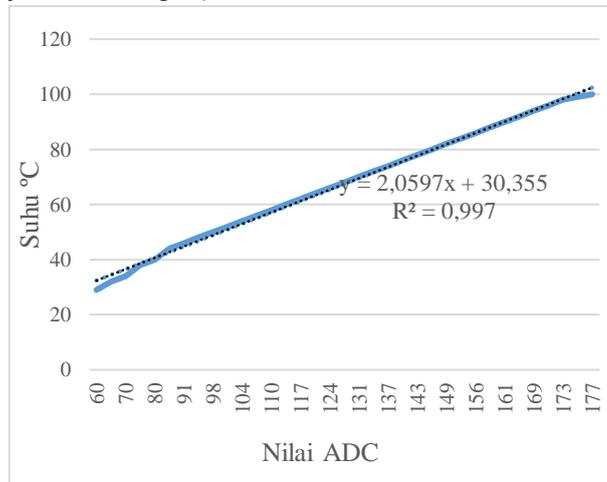
Perubahan nilai ADC yang terkoneksi antara Arduino UNO dengan sensor suhu PT100 ditampilkan pada LCD I2C. Respon suhu yang tertera pada tampilan termometer digital Kanomax 6908 didokumentasikan. Perubahan suhu dilakukan dengan suhu ruangan (29 °C) sampai air pada pemanas air mendidih (100 °C) sebagaimana pada Tabel 1 berikut.

Table 1. ADC sensor suhu PT100 dengan termometer digital Kanomax 6908

Respon suhu (°C)	ADC
29	60
32	66
34	70
38	78
40	80
44	88
46	91
48	94
50	98
52	101
54	104
56	107
58	110
60	114
62	117
64	121
66	124
68	128
70	131
72	134
74	137
76	140
78	143
80	146
82	149
84	153
86	156
88	159
90	161
92	164
94	169
96	170
98	173
99	176
100	177



Setelah mengukur nilai ADC suhu dari sensor PT100, dilakukan analisis regresi linear menggunakan Microsoft Excel. Dari analisis ini, didapatkan persamaan regresi linear $y = 2,0597x + 30,355$. Dalam persamaan tersebut, sumbu y mewakili suhu dan sumbu x mewakili nilai ADC. Berdasarkan Gambar 4, nilai R^2 yang diperoleh adalah 0.9997, yang sangat mendekati angka 1. Apabila R^2 mendekati 1, dapat dikatakan bahwa persamaan tersebut memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan dapat dijadikan sebagai persamaan dalam metode kalibrasi sensor.



Gambar 4 Regresi linier Sensor Suhu PT100 terhadap ADC

Persamaan yang didapat, akan diubah pada program kalibrasi sensor suhu PT100. Nilai ADC diubah menggunakan persamaan regresi tersebut. Setelah program diunggah ke Arduino UNO melalui Arduino IDE, kalibrasi sensor suhu PT100 dilakukan menggunakan alat ukur standar. Pengujian dilakukan berdasarkan Tabel 2, dimulai dari suhu 30°C hingga 75°C dengan kenaikan setiap 5°C, dan setiap kenaikan diuji 5 kali. Berikut merupakan proses kalibrasi sensor suhu PT100 dengan termometer digital Kanomax 6908 dilakukan.



Gambar 5 Tampilan kalibrasi sensor suhu PT100 saat suhu 30.53°C

Pada Gambar 5 menunjukkan hasil pengujian yang dilakukan pada sensor suhu PT100. Pada gambar menampilkan nilai suhu 30°C pada alat ukur Kanomax 6908 dan pada LCD I2C nilai suhu sensor suhu PT100 yang didapatkan 30.53°C. Hasil pengujian mencakup perhitungan deviasi dan rata-rata persentase galat sensor suhu PT100 dengan termometer digital akan dibandingkan seperti Tabel 2.



Table 2 Rata-rata kalibrasi sensor PT100 dengan Termometer Digital Kanomax 6908

Suhu (°C)	Alat Ukur (°C)	Sensor Suhu PT100 (°C)	Galat	Galat (%)
30	30,56	30,68	0,12	0,00004
35	35,30	35,12	0,18	0,00005
40	40,74	40,61	0,13	0,00003
45	45,42	45,69	0,27	0,00006
50	50,96	50,77	0,19	0,00004
55	55,32	55,59	0,27	0,00005
60	60,84	60,60	0,24	0,00004
65	65,26	65,39	0,13	0,00002
70	71,96	71,29	0,67	0,00009
75	75,44	75,20	0,24	0,00003

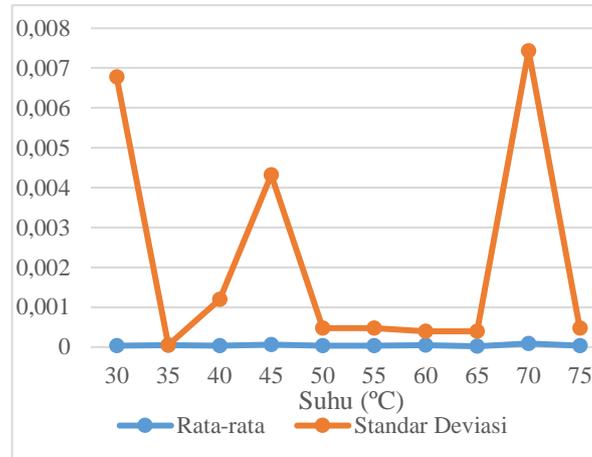
Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat pengukur suhu memiliki akurasi yang baik pada saat pengukuran suhu. Rata-rata pengukuran cenderung mendekati nilai sebenarnya dari suhu yang diukur, dengan Galat absolut dan persentase Galat rata-rata yang relatif rendah. Standar deviasi, yang mengukur sebaran data dari rata-rata, juga menunjukkan konsistensi yang baik dalam pengukuran sebagaimana yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Table 3 Standar deviasi kalibrasi sensor PT100 dengan Termometer Digital Kanomax 6908

Suhu (°C)	Alat Ukur (°C)	Sensor Suhu PT100 (°C)	Galat	Galat (%)
30	0,49	0,16	0,07	0,00678
35	0,33	0,33	0	0,00005
40	0,52	0,46	0,06	0,0012
45	0,45	0,26	0,2	0,00432
50	0,64	0,67	0,03	0,00047
55	0,25	0,24	0,01	0,00039
60	0,6	0,52	0,08	0,00131
65	0,24	0,23	0,01	0,00039
70	1,82	0,47	1,36	0,00744
75	0,22	0,22	0,01	0,00024
Rata-Rata			0,183	0,00226



Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan variasi dalam akurasi pengukuran suhu antara kasus-kasus yang berbeda. Dari analisis data, dapat dilihat bahwa pengukuran yang paling akurat terjadi pada kasus dengan nilai Galat absolut dan persentase Galat rata-rata yang paling rendah. Sementara itu, pengukuran yang paling tidak akurat adalah yang memiliki nilai Galat absolut dan persentase Galat rata-rata yang paling tinggi.



Gambar 6 Rata-rata dan standar deviasi kalibrasi sensor suhu PT100

Pengukuran yang paling baik dapat dilihat dari nilai Galat absolut dan persentase Galat rata-rata yang paling rendah. Oleh karena itu, dalam data yang diberikan, pengukuran yang paling baik adalah pada suhu 75°C, di mana Galat absolut dan persentase Galat rata-rata keduanya sangat rendah, masing-masing hanya sekitar 0,242°C dan 0,00003%. Di sisi lain, pengukuran yang paling buruk dapat dilihat dari nilai Galat absolut dan persentase Galat rata-rata yang paling tinggi. Dalam data yang diberikan, pengukuran yang paling buruk terjadi pada suhu 70°C, di mana Galat absolut dan persentase Galat rata-ratanya masing-masing sekitar 0,67°C dan 0,00009%.

Secara keseluruhan, rata-rata galat yang terjadi adalah 0,183°C dengan persentase galat rata-rata sebesar 0,00226%. Analisis ini menunjukkan bahwa sensor PT100 umumnya memiliki tingkat akurasi yang baik, namun terdapat beberapa titik suhu di mana perbedaan galat cukup signifikan, khususnya pada suhu 70°C. Persentase galat yang rendah menunjukkan bahwa sensor PT100 dapat diandalkan untuk pengukuran suhu dengan tingkat kesalahan yang minimal dalam sebagian besar kondisi pengukuran.

4. KESIMPULAN

Sensor suhu PT100, yang sering digunakan dalam pengendalian suhu ketel uap, memerlukan kalibrasi yang akurat untuk menjaga efisiensi dan keselamatan operasional. Integrasi dengan Arduino Uno dan LCD I2C memungkinkan pengolahan data real-time dan tampilan langsung hasil pengukuran, meningkatkan efisiensi dan keamanan.

Metode regresi linier terbukti efektif untuk kalibrasi sensor PT100, menghasilkan persamaan $y=2,0597x + 30,355$ dengan $R^2 = 0.9997$, menunjukkan akurasi tinggi. Pengujian menunjukkan galat dan persentase galat rendah, memastikan pengukuran suhu yang presisi. Pengujian sensor PT100 terhadap termometer digital menunjukkan hasil yang sangat akurat dengan galat dan persentase galat yang rendah. Rata-rata galat yang terjadi adalah 0,183°C dengan persentase galat rata-rata sebesar 0,00226%. Oleh karena itu, sistem pengukuran suhu yang dikembangkan menggunakan sensor PT100 dan metode regresi linier dapat digunakan suhu presisi tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Paul, A. Saikia, V. Majhi, and V. K. Pandey, "Transducers and amplifiers," in *Introduction to Biomedical Instrumentation and Its*



- Applications*, 1st ed., S. Paul, A. Saikia, V. Majhi, and V. K. B. T.-I. to B. I. and I. A. Pandey, Eds., Pushpa Gujral: Academic Press, 2022, pp. 87–167. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821674-3.00008-5>.
- [2] I. G. C. Dryden, "Boiler plant and auxiliaries," in *The Efficient Use of Energy*, 2nd ed., I. G. C. B. T.-T. E. U. of E. (Second E. DRYDEN, Ed., Butterworth: Butterworth-Heinemann, 1982, pp. 200–248. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01250-8.50019-2>.
- [3] F. S. Hidayatulloh, W. Dirgantara, and D. C. Permatasari, "Implementasi Kontrol PID Untuk Optimasi Suhu Boiler Pada Mesin Kopi Espresso," *JEECOM J. Electr. Eng. Comput.*, vol. 5, no. 2, pp. 106–114, 2023, doi: 10.33650/jeeecom.v5i2.6162.
- [4] F. Baskoro, B. Suprianto, L. Anifah, Ekohariadi, and A. Nurdiansyah, "Berpikir Kreatif Dalam Pengembangan Plug-And-Play Sistem Dan Database Case Study Sensor Suhu DHT11," *J. Zetroem*, vol. 5, no. 1, pp. 19–27, 2023, doi: 10.36526/ztr.v5i1.2585.
- [5] T. Agung Priatama, Y. Apriani, and M. Danus, "Sistem Monitoring Solar Cell Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno R3 dan Data Logger Secara Real Time," *SNITT- Politek. Negeri Balikpapan*, pp. 250–251, 2020.
- [6] S. Baldi, T. Le Quang, O. Holub, and P. Endel, "Real-time monitoring energy efficiency and performance degradation of condensing boilers," *Energy Convers. Manag.*, vol. 136, pp. 329–339, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.016>.
- [7] Y. G. V. Y. Malau and N. Nopriadi, "Perancangan Alat Sistem Kontrol Ketinggian Air Dengan Menggunakan Metode Prototype Berbasis Arduino," *Comput. Sci. Ind. Eng.*, vol. 9, no. 1, 2023, doi: 10.33884/comasiejournal.v9i1.7532.
- [8] M. Badura, P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, and P. Modzel, "Regression methods in the calibration of low-cost sensors for ambient particulate matter measurements," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 6, p. 622, 2019, doi: 10.1007/s42452-019-0630-1.
- [9] A. V. Rachmawati and M. Yantidewi, "BME280 Sensor Calibration Analysis with Linear Regression Approach for Temperature , Relative Humidity and Dew Point Measurements," vol. 7, no. 5, pp. 1589–1597, 2024, doi: 10.56338/jks.v7i5.5272.
- [10] N. Yulita, D. Setyaningsih, and I. A. Rozaq, "Karakterisasi Sensor LM35 Waterproof Untuk Mengetahui Kualitas Air Sungai Akibat Limbah Industri Berbasis IOT," *Pros. SENDI_U*, vol. 1, no. 1, pp. 978–979, 2018.
- [11] J. Chen *et al.*, "A comparison of linear regression, regularization, and machine learning algorithms to develop Europe-wide spatial models of fine particles and nitrogen dioxide," *Environ. Int.*, vol. 130, no. 2, p. 104934, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104934>.
- [12] D. Taler, T. Sobota, M. Jaremkiewicz, and J. Taler, "Control of the temperature in the hot liquid tank by using a digital PID controller considering the random errors of the thermometer indications," *Energy*, vol. 239, p. 122771, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122771>.
- [13] M. Putri Anastasia, D. Nur Ilham, and F. Atabiq, "Development of NRF24L01 Communication Module-Based Temperature Monitoring System," *Jrcs*, vol. 2, no. 1, pp. 2770–1800, 2022, [Online]. Available: <http://journal.station-it.org/index.php/jrcs>
- [14] B. H. Yusuf, I. M. S. Made, and I. K. Putra, "Pembuatan Alat Ukur Suhu Rendah Berbasis Mikrokontroler ATmega328 Menggunakan Sensor Suhu RTD PT-100 Manufacture of Low Temperature Measuring Instrument Based on ATmega328 Microcontroller Using PT-100 RTD Temperature Sensor," *Bul. Fis.*, vol. 21, no. 1, pp. 26–32, 2020.
- [15] S. W. Jarantow, E. D. Pisors, and M. L. Chiu, "Introduction to the Use of Linear and Nonlinear Regression Analysis in Quantitative Biological Assays," *Curr. Protoc.*, vol. 3, no. 6, pp. 1–56, 2023, doi: 10.1002/cpz1.801.

