

Analisis Pengaruh Jarak Elektrode terhadap Kinerja Sensor IDE Berlapis Grafit untuk Mengukur Suhu

Doni Bowo Nugroho^{(1,a)*}, Muslimah Dirayati⁽¹⁾, Dinda Yesi Liswanti
Silaban⁽¹⁾, Rina Oktavia⁽¹⁾ dan Osland First Purba⁽¹⁾

⁽¹⁾Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, 35365
Email : ^(a*)doni.nugroho@bm.itera.ac.id

Diterima (27 Juni 2024), Direvisi (10 Juli 2024)

Abstract. This study aimed to investigate the effect of the distance between electrodes on the performance of graphite-coated interdigitated electrode (IDE) sensors for temperature changes measurement. This research focused on IDE sensors that were made in two variations, namely one sensor with an electrode distance or spacing of 0.45 mm and another sensor with an electrode distance of 1.00 mm. Graphite solution was made with epoxy and methanol solvent. Then, it coated on the sensor using a dip coating technique. The sensor response was tested by observing the change in resistance to temperature variations between 30 °C and 50 °C. The results showed that the resistance of sensor decreased with increasing temperature. The characteristics of the sensors were similar to the characteristics of NTC (negative temperature coefficient) thermistor type. The sensor with an electrode distance of 1.00 mm had a sensitivity represented by the temperature coefficient of resistance (TCR), or α , of -0.045%/K and a responsiveness that could be seen from the material constant (β), of 8534.66 K. Meanwhile, the sensor with an electrode distance of 0.45 mm had α of -0.04%/K and β of 8577.87 K. Both sensors had almost the same responsiveness, although the sensor with an electrode distance of 1.00 mm was slightly better. Meanwhile, the sensitivity increased in the sensor with an electrode distance of 1.00 mm by 12.5% from the sensor with an electrode distance of 0.45 mm. These results indicated that there was a contribution of the distance between electrodes to sensor performance, both in sensor response and sensor sensitivity.

Keywords: graphite, interdigitated electrodes, temperature sensor.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jarak antara elektrode pada kinerja sensor elektrode *interdigital* atau *interdigitated electrode* (IDE) berlapis grafit untuk pengukuran perubahan suhu. Penelitian ini fokus pada sensor IDE yang dibuat dalam dua variasi, yaitu satu sensor dengan jarak elektrode sebesar 0,45 mm dan sensor lainnya dengan jarak elektrode sebesar 1,00 mm. Larutan grafit dibuat dengan *epoxy* dan pelarut metanol. Larutan tersebut dilapiskan pada sensor menggunakan teknik *dip coating*. Respons sensor diuji dengan mengamati perubahan resistansi terhadap variasi suhu antara 30 °C sampai 50 °C. Hasil pengujian menunjukkan bahwa resistansi sensor menurun seiring meningkatnya suhu. Karakteristik sensor tersebut mirip seperti sifat termistor jenis NTC (*negative temperature coefficient*). Sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm memiliki sensitivitas yang dipresentasikan oleh *temperature coefficient of resistance* (TCR) atau α sebesar -0,045%/K dan daya respons yang dapat dilihat dari konstanta material (β) sebesar 8534,66 K. Sementara itu, sensor dengan jarak elektrode 0,45 mm memiliki α sebesar -0,04%/K dan β sebesar 8577,87 K. Kedua sensor memiliki daya respons yang hampir sama meskipun sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm sedikit lebih baik. Sementara itu, sensitivitas meningkat pada sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm sebesar 12,5% dari sensor dengan jarak elektrode 0.45 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat kontribusi jarak antar elektrode terhadap kinerja sensor baik pada respons sensor dan sensitivitas sensor.

Kata kunci: elektrode interdigital, grafit, sensor suhu.

PENDAHULUAN

Perhatian terhadap alat ukur suhu meningkat di berbagai industri termasuk bidang kesehatan dan monitoring dalam beberapa tahun terakhir [1]. Alat ukur suhu yang dibutuhkan merupakan perangkat yang memiliki efisiensi dan keandalan yang baik. Oleh karena itu, pengembangan alat ukur suhu terus dilakukan untuk meningkatkan akurasi dan sensitivitasnya [2], [3].

Sensor menjadi bagian yang sangat penting dari alat ukur suhu. Perkembangan sensor suhu sangat bervariasi dari bentuk elektrode kontak hingga bentuk optik non-kontak. Sensor elektrode yang saling bertautan (*interdigital*) atau *interdigitated electrode* (IDE) merupakan sensor yang memiliki susunan elektrode yang berselang-seling. Sensor dengan susunan elektrode tersebut banyak digunakan dalam berbagai penerapan termasuk pengukuran suhu karena kemampuannya memberikan pengukuran yang akurat, luas permukaan yang besar, biaya rendah, serbaguna, dan geometrinya yang dapat disesuaikan [4], [5].

Sensor IDE sering dimodifikasi dengan lapisan tertentu untuk meningkatkan fungsinya terhadap target. Salah satu bahan yang sering dikombinasikan adalah grafit karena keunggulannya dalam konduktivitas termal dan stabilitas [6]–[9]. Bahan ini mampu meningkatkan sensitivitas dan daya respons sensor terhadap suhu [2]. Namun, pengaruh jarak antara elektrode terhadap kinerja sensor IDE berlapis grafit belum banyak dibahas [10]. Padahal, jarak antara elektrode memiliki peran signifikan dalam karakteristik sensor termasuk sensitivitas dan waktu responsnya [4], [5], [10], [11]. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami pengaruh jarak antara elektrode pada sensor IDE berlapis grafit.

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh jarak antara elektrode pada sensor IDE berlapis grafit

dalam mengukur perubahan suhu. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan untuk pengembangan sensor suhu yang lebih optimal.

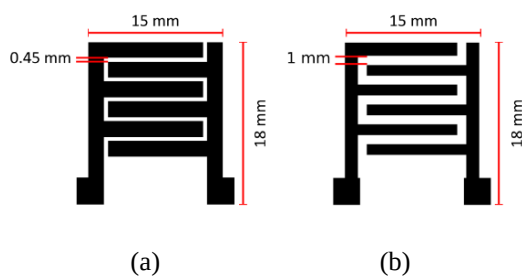
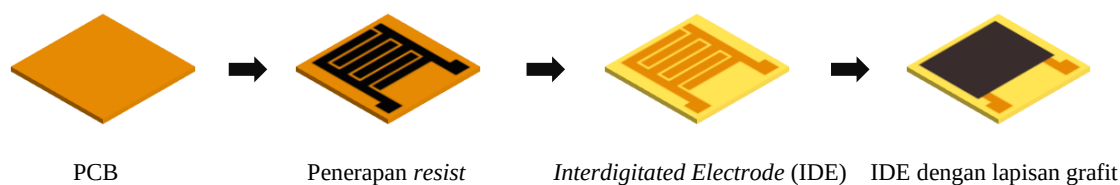
METODE PENELITIAN

Bahan

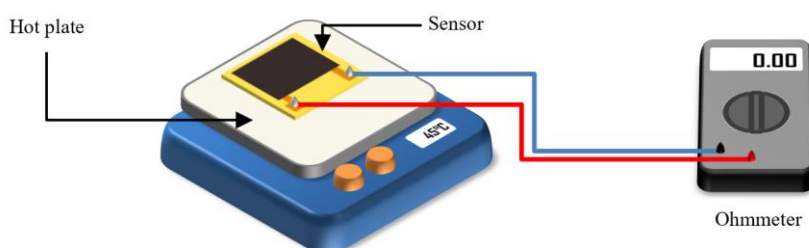
Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain grafit yang diperoleh dari gerusan pensil Faber-Castell dan epoksi yang terdiri dari resin dan agen pengeras didapat dari lem epoxy Dexton. Bahan tambahan seperti FeCl_3 , metanol, dan air yang digunakan memiliki kualitas kelas laboratorium. Proses pemurnian lanjutan tidak diterapkan pada senyawa-senyawa yang digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, papan sirkuit cetak atau *printed circuit board* (PCB) yang dilapisi tembaga digunakan sebagai elektrode sensor. Lapisan tembaga pada PCB berfungsi sebagai elemen konduktif untuk elektrode sensor. Lapisan tembaga tersebut dibersihkan dengan ampelas sebelum digunakan. Langkah ini dilakukan untuk memastikan lapisan tembaga bersih dan efektif sebagai bahan konduktif untuk elektrode sensor.

Pembuatan Elektrode *Interdigital*

Pola IDE dirancang menggunakan perangkat lunak Inkscape, lihat ilustrasi pada **Gambar 1**. Tata letak pola IDE mencakup ukuran elektrode, bentuk, dan jarak antar elektrode. IDE dibuat dalam dua variasi: yang pertama dengan jarak elektrode 0,45 mm (lihat **Gambar 1.a**) dan yang kedua dengan jarak elektrode 1 mm (lihat **Gambar 1.b**). Pembuatan IDE dan proses pelapisan grafit pada IDE diilustrasikan pada **Gambar 2**. Semua proses pembuatan dan pelapisan yang ditunjukkan dalam gambar tersebut meliputi beberapa langkah, antara lain *masking* PCB, pengetsan, pembersihan, dan pelapisan.

Gambar 1. Tata letak elektrode *interdigital*

Gambar 2. Proses pembuatan sensor IDE dengan lapisan grafit



Gambar 3. Pengaturan eksperimen untuk pengukuran suhu

Langkah pertama adalah *masking* PCB. Pada langkah ini, PCB dilapisi dengan *resist* yang merupakan lapisan pelindung. Selanjutnya dilakukan pengetsaaan. Dalam langkah pengetsaaan, dilakukan pembersihan secara selektif pada tembaga yang tidak terlingkupi *resist*. Setelah proses etsa selesai, dilakukan pembersihan menyeluruh untuk menghilangkan residu termasuk *resist* tersebut. Langkah akhir adalah pengujian untuk memverifikasi karakteristik listrik. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa PCB dengan elektrode *interdigital* tidak mengalami korsleting.

Pembuatan Larutan Grafit

Lapisan grafit dibuat dengan menyiapkan larutannya terlebih dahulu.

Larutan tersebut terdiri dari 5 wt% grafit dan 35 wt% epoxy dalam pelarut metanol. Larutan tersebut diaduk selama 30 menit pada suhu 100 °C hingga tercampur secara merata.

Pembuatan Lapisan pada Sensor

Langkah-langkah pembuatan lapisan diilustrasikan secara visual pada **Gambar 2**. Langkah-langkah ini merupakan kelanjutan dari proses sebelumnya. Pelapisan elektrode *interdigital* menggunakan larutan grafit dengan teknik *dip coating* telah berhasil dilakukan dalam pembuatan lapisan sensor. Proses ini dimulai dengan merendam elektrode dalam larutan grafit. Kemudian elektrode secara perlahan dan stabil ditarik keluar dari larutan. Setelah pelapisan, IDE

dipindahkan ke tempat pengeringan. IDE dibiarkan mengering selama 24 jam pada suhu ruangan dan tingkat kelembaban normal. Selama proses ini, pelarut dalam larutan grafit secara bertahap menguap hingga kering. Hal ini menghasilkan pembentukan lapisan padat yang menempel pada sensor IDE [12].

Pengaturan Eksperimen

Gambar 3 menunjukkan diagram skematik yang digunakan untuk mengukur resistansi sensor terhadap perubahan suhu. Skematik ini terdiri dari *hot plate*, sensor IDE berlapis grafit, kabel penghubung, dan multimeter (Uni-T, China). Sensor ditempatkan di atas *hot plate*. Kemudian, suhu divariasikan dari 30 °C hingga 50 °C. Perubahan resistansi sensor diukur menggunakan multimeter dalam mode ohmmeter. Hasil pengukuran yang diperoleh kemudian dicatat dan dianalisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

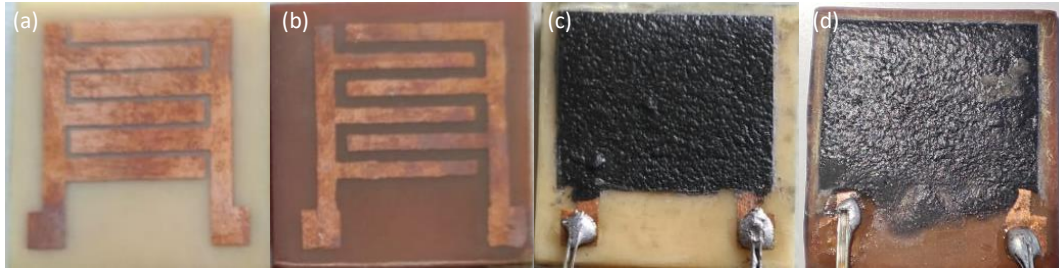
Konfigurasi Lapisan Sensor

Bentuk permukaan elektrode sensor yang dihasilkan melalui proses etsa dapat dilihat pada **Gambar 4.a–b**. Kedua elektrode sensor berhasil dibuat dengan kerapian yang memadai. Selain itu, dipastikan bahwa tidak ada bagian yang mengalami korsleting pada elektrode. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa resistansi semata-mata disebabkan oleh jarak antara elektrode. Kemudian, hasil pelapisan elektrode sensor dengan grafit dapat dilihat pada **Gambar 4.c–d**. Pelapisan elektrode dengan grafit menghasilkan lapisan yang hampir menyebar di seluruh substrat, sehingga dilakukan pemangkasan ukuran dengan cara menghilangkan bagian tepi lapisan. Ukuran akhir lapisan grafit adalah 13,5 mm untuk lebarnya dan 16,7 mm untuk panjangnya.

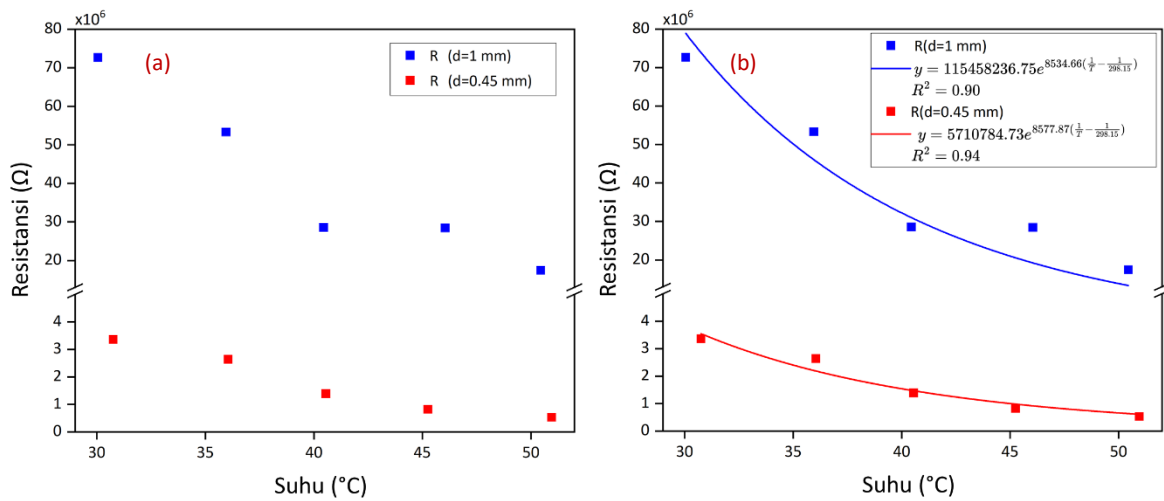
Pengaruh Jarak Elektrode terhadap Kinerja Sensor

Gambar 5.a menunjukkan respons sensor yang telah dibuat dan diukur dengan menguji sensor tersebut terhadap perubahan suhu dalam rentang 30 °C hingga 50 °C. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan sensor pada *hot plate* yang dilengkapi dengan pengukur suhu. Nilai resistansi sensor dicatat setiap kenaikan suhu sebesar 5 °C dari 30 °C hingga 50 °C. Berdasarkan hasil pengukuran (lihat pada grafik), resistansi kedua sensor menurun seiring dengan peningkatan suhu. Kondisi ini menunjukkan perilaku sensor yang dipengaruhi oleh lapisan grafit yang merupakan bahan non-logam. Bahan ini memiliki sifat konduktansi yang meningkat ketika suhu meningkat sehingga resistansi bahan menurun [13], [14].

Sensor menyerap energi termal ketika suhu meningkat, sehingga atom dan molekul dalam bahan pelapis bergetar lebih bertenaga. Peningkatan getaran termal menyebabkan transisi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Hal ini meningkatkan jumlah pembawa muatan untuk konduksi listrik. Oleh karena itu, konduktivitas bahan meningkat dan resistansi menurun [14]. Perilaku ini menunjukkan bahwa sensor berfungsi seperti termistor NTC (*negative temperature coefficient*), yang ditandai dengan penurunan resistansi seiring dengan peningkatan suhu [15]–[18]. Resistansi menurun secara eksponensial dari $73 \pm 4 \text{ M}\Omega$ menjadi $17 \pm 1 \text{ M}\Omega$ dengan peningkatan suhu dari 30 °C menjadi 50 °C pada sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm. Sementara itu, untuk sensor dengan jarak elektrode 0,45 mm, resistansi menurun secara eksponensial dari $3,36 \pm 0,01 \text{ M}\Omega$ menjadi nilai akhir $0,53 \pm 0,06 \text{ M}\Omega$ pada peningkatan suhu yang sama. Hasil ini menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dan kemungkinan besar karena variasi jarak elektrode



Gambar 4. Elektrode *interdigital* dengan jarak elektrode (a) 0.45 mm dan (b) 1 mm. Lapisan grafot pada sensor IDE dengan jarak elektrode (c) 0.45 mm dan (d) 1 mm



Gambar 5. (a) Respons sensor IDE berlapis grafit terhadap perubahan. (b) Kurva respons sensor dengan model- β

Analisis lebih lanjut untuk membandingkan sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm dan 0,45 mm dilakukan dengan memeriksa koefisien suhu resistansi atau *temperature coefficient of resistance* (TCR) (α) dan konstanta material (β). Nilai-nilai ini diperoleh dengan melakukan karakterisasi perubahan resistansi terhadap suhu menggunakan pendekatan matematika yang dikenal sebagai model-B atau model- β . TCR diturunkan menggunakan **Persamaan 1**, dan β diturunkan menggunakan **Persamaan 2** [15], [19]. Dua persamaan ini menggabungkan nilai resistansi (R_1 dan R_2) yang diperoleh pada dua suhu yang berbeda (T_1 dan T_2).

Gambar 5.b menunjukkan kurva model- β pada grafik respons terhadap

peningkatan suhu. Hasil perhitungan disajikan dalam **Tabel 1**.

$$\alpha = \left(\frac{1}{R_1} \right) \frac{(R_1 - R_2)}{(T_1 - T_2)} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \quad (2)$$

Nilai α sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm adalah -0,045%/K. Sementara itu, nilai α sensor dengan jarak elektrode 0,45

mm adalah $-0,04\%/K$. Nilai α ini merupakan ukuran persentase perubahan resistansi suatu material terhadap perubahan suhu. Nilai α yang lebih negatif menunjukkan bahwa sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm lebih sensitif terhadap perubahan suhu dibandingkan dengan sensor dengan jarak 0,45 mm [19], [20]. Selanjutnya, nilai β dari sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm adalah 8534,66 K. Sedangkan, nilai β dari sensor dengan jarak elektrode 0,45 mm adalah 8577,66 K. Nilai β merupakan konstanta material yang menunjukkan seberapa daya respons sensor. Pada kasus ini, nilai β yang lebih rendah dari sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm menunjukkan bahwa material sensor ini sedikit lebih responsif terhadap perubahan suhu dibandingkan dengan material pada sensor dengan jarak 0,45 mm [20].

Tabel 1. The temperature coefficient of resistance (TCR) (α) dan konstanta material (β) sensor.

Jarak Elektrode (mm)	TCR- α (%/K)	Konstanta Material- β (K) or ($^{\circ}C$)
0.45	-0.040	8577.87
1.00	-0.045	8534.66

Nilai α dan β untuk sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm dan 0,45 mm menunjukkan perbedaan yang relatif kecil. Namun, sensitivitas sensor (α) dengan jarak elektrode 1,00 mm meningkat sebesar 12,5% dibandingkan dengan sensor dengan jarak 0,45 mm. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan karakteristik sensor mungkin terjadi karena kontribusi pengaruh jarak antar elektrode. Di sisi lain, penelitian ini belum dapat memastikan bahwa jarak elektrode 1,00 mm merupakan jarak elektrode yang paling optimal. Oleh karena itu, untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif tentang pengaruh jarak elektrode terhadap kinerja sensor, terutama jarak elektrode yang paling optimal, diperlukan analisis lebih lanjut. Hal ini harus

mencakup rentang jarak elektrode yang lebih luas dan pertimbangan stabilitas serta keandalan sensor.

KESIMPULAN

Dua buah sensor IDE berlapis grafit telah berhasil difabrikasi untuk menganalisis pengaruh jarak elektrode terhadap kinerjanya dalam pengukuran suhu. Satu sensor memiliki jarak elektrode 1,00 mm dan yang lainnya memiliki jarak elektrode 0,45 mm. Sensor-sensor ini memiliki sifat seperti termistor jenis NTC yaitu resistansi sensor menurun saat suhu meningkat. Oleh karena itu, karakteristik respons sensor dianalisis menggunakan model- β untuk menentukan TCR (α) dan konstanta material (β). Sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm memiliki nilai α dan β masing-masing sebesar $-0,45\%/K$ dan 8534,66 K. Sementara sensor dengan jarak 0,45 mm memiliki nilai α dan β masing-masing sebesar $-0,040\%/K$ dan 8577,87 K. Kedua sensor memiliki respons yang hampir sama meskipun sensor dengan jarak elektrode 1,00 mm sedikit lebih baik. Sementara sensitivitas meningkat pada sensor dengan jarak 1,00 mm sebesar 12,5% dari sensor lainnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat kontribusi jarak antar elektrode terhadap perbedaan respons sensor dan sensitivitas sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] X. Cai, "The development and diverse applications of temperature sensors in different temperature environments," *Appl. Comput. Eng.*, vol. 37, no. 1, pp. 141–148, 2024.
- [2] W. P. Shih *et al.*, "Flexible temperature sensor array based on a Graphite-Polydimethylsiloxane composite," *Sensors*, vol. 10, no. 4, pp. 3597–3610, 2010.
- [3] D. Prasad and V. Nath, *An overview of*

- temperature sensors, vol. 476, no. Mccs 2017. Springer Singapore, 2019.
- [4] M. Vakilian and B. Y. Majlis, "Study of interdigitated electrode sensor for lab-on-chip applications," *IEEE Int. Conf. Semicond. Electron. Proceedings, ICSE*, pp. 201–204, 2014.
- [5] A. M. Al-Qahtani, S. Ali, A. Khan, and A. Bermak, "Performance Optimization of Wearable Printed Human Body Temperature Sensor Based on Silver Interdigitated Electrode and Carbon-Sensing Film," *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023.
- [6] T. Dinh, H. P. Phan, D. V. Dao, P. Woodfield, A. Qamar, and N. T. Nguyen, "Graphite on paper as material for sensitive thermoresistive sensors," *J. Mater. Chem. C*, vol. 3, no. 34, pp. 8776–8779, 2015.
- [7] Á. Mechler, J. Kopniczky, J. Kokavecz, A. Hoel, C. G. Granqvist, and P. Heszler, "Anomalies in nanostructure size measurements by AFM," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 72, no. 12, pp. 1–6, 2005.
- [8] R. A. Buerschaper, "Thermal and Electrical Conductivity of Graphite and Carbon at Low Temperatures," *J. Appl. Phys.*, vol. 15, no. 5, pp. 452–454, 2004.
- [9] Annu, S. Sharma, R. Jain, and A. N. Raja, "Review—Pencil Graphite Electrode: An Emerging Sensing Material," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, no. 3, p. 037501, 2020.
- [10] N. Khairudin *et al.*, "Effect of IDE Spacing on the Performance of ErGO Chemiresistive Humidity Sensor," *Proc. - 2021 IEEE Reg. Symp. Micro Nanoelectron. RSM 2021*, pp. 108–111, 2021.
- [11] N. Robi'ah A. M., A. Novitasari, R. Triandi, and M. Masruroh, "Studi Pengaruh Jarak Antar-Elektroda terhadap Resistansi Lapisa-n Tipis Seng Ftalosianin (ZnPc) dengan Paparan Ozon," *Natural-B*, vol. 3, no. 2, pp. 130–134, 2015.
- [12] K. Singh, V. K. Singh, S. Chauhan, N. Jain, and A. Verma, "Functionalized graphite--reinforced cross-linked poly (vinyl alcohol) nanocomposites for vibration isolator application: morphology, mechanical, and thermal assessment," *Mater. Perform. Charact.*, vol. 9, no. 1, pp. 215–230, 2020.
- [13] R. Ramalingame, C. Gerlach, C. Müller, and O. Kanoun, "Influence of Electrode Design for Temperature and Pressure Sensing Behavior of Flexible and Bio-Compatible Nanocomposites," in *2016 Nanotechnology for Instrumentation and Measurement (NANOflM)*, 2016, no. January 2017, pp. 1–4.
- [14] J. Štulík, O. Musil, F. Josefík, and P. Kadlec, "Graphene-Based Temperature Sensors—Comparison of the Temperature and Humidity Dependences," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 9, p. 1594, 2022.
- [15] A. Feteira, "Negative temperature coefficient resistance (NTCR) ceramic thermistors: An industrial perspective," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 92, no. 5, pp. 967–983, 2009.
- [16] M. Z. Bodić, S. O. Aleksić, V. M. Rajs, M. S. Damnjanović, and M. G. Kisić, "Thermally Coupled NTC Chip Thermistors: Their Properties and Applications," *Sensors*, vol. 24, no. 11, p. 3547, May 2024.
- [17] L. Huang, Z. Li, K. Li, Y. Zhang, H. Zhang, and S. Leng, "Electrical conductivity and electrical stability of Bi/Mg modified NiO ceramics for NTC thermistors," *Process. Appl. Ceram.*, vol. 17, no. 2, pp. 172–180, 2023.
- [18] A. Li, Z. Liu, X. Cai, and H. Wang, "A Study of Point Selection Strategies for

- Fitting Negative Temperature Coefficient Thermistors,” *MAPAN*, Apr. 2024.
- [19] V. S. Turkani, D. Maddipatla, B. B. Narakathu, B. J. Bazuin, and M. Z. Atashbar, “A carbon nanotube based NTC thermistor using additive print manufacturing processes,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 279, pp. 1–9, 2018.
- [20] A. Wadhwa, J. Benavides-Guerrero, M. Gratuze, M. Bolduc, and S. G. Cloutier, “All Screen Printed and Flexible Silicon Carbide NTC Thermistors for Temperature Sensing Applications,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 11, p. 2489, May 2024.