

## Perlindungan Sensor Suhu Cu/Ni dengan Nitroselulosa

Miftahus Surur, Moh. Toifur\*, Okimustava, dan Siti Zahra Helmania Putri

Lab. Sentral, Magister Pendidikan Fisika Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta 55161

Jl. Pramuka No. 42 Sidikan Umbulharjo Yogyakarta

\*E-mail: toifur@mpfis.uad.ac.id

### Abstrak

Telah dilakukan pelapisan Cu/Ni dengan nitroselulose (NC) dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan NC sebagai lapisan pelindung terhadap kepekaan dan energi aktivasi sensor. Sampel yang dipakai adalah Cu/Ni dan Cu/Ni/Cu dimana pelapisan NC pada Cu/Ni dilakukan dengan metode semprot bertekanan 1,2 Mpa. Kedua sampel sensor digunakan untuk mengukur suhu nitrogen cair (N<sub>2</sub> cair) yang suhunya divariasi dari -160°C – 0°C. Selain suhu diukur juga tegangan dan arus. Nilai kepekaan diperoleh dari slope kurva resistansi terhadap suhu, sedangkan energi aktivasi diperoleh dari slope logaritma konduktivitas terhadap satu per suhu mutlak. Dari uji kepekaan diketahui bahwa kedua sensor memiliki kecenderungan semakin peka ketika suhu diturunkan, namun adanya lapisan NC menyebabkan menurunnya kepekaan sampai 18,9% yaitu dari 3,95 Ω/°C menjadi 3,18 Ω/°C pada suhu -160°C mengikuti persamaan  $\Delta S(T)=0,10e^{-0,012T}$ . Penggunaan lapisan pelindung NC juga dapat meningkatkan energi aktivasi sebesar 1,3% yaitu dari  $(4,29 \pm 0,01) \times 10^{-9}$  eV dan  $(4,35 \pm 0,01) \times 10^{-9}$  eV. Hasil ini dapat digunakan sebagai pertimbangan bagi produsen sensor suhu bahwa penggunaan lapisan pelindung NC penting namun dapat penurunan kepekaan sensor.

**Kata kunci:** Lapisan pelindung NC, kepekaan, energi aktivasi.

### Abstract

Coating of Cu/Ni with nitrocellulose (NC) has been carried out with the aim of determining the effect of using NC as a protective film on the sensitivity and activation energy of the sensor. The samples used were Cu/Ni and Cu/Ni/Cu where the NC coating on Cu/Ni was carried out using a spray method with a pressure of 1.2 Mpa. Both sensor samples were used to measure the temperature of liquid nitrogen (liquid N<sub>2</sub>) which was varied from -160°C - 0°C. In addition to temperature, voltage and current were also measured. The sensitivity value was obtained from the slope of the resistance curve against temperature, while the activation energy was obtained from the slope of the logarithm of conductivity against one per absolute temperature. From the sensitivity test, it is known that both sensors have a tendency to be more sensitive when the temperature is lowered, but the presence of the NC layer causes a decrease in sensitivity of up to 18.9%, namely from 3.95 Ω/°C to 3.18 Ω/°C at a temperature of -160°C following the equation  $\Delta S(T)=0.10e^{-0.012T}$ . The use of NC protective layer can also increase the activation energy by 1.3%, namely from  $(4.29 \pm 0.01) \times 10^{-9}$  eV to  $(4.35 \pm 0.01) \times 10^{-9}$  eV. These results can be used as a consideration for temperature sensor manufacturers that the use of NC protective layer is important but can reduce sensor sensitivity.

**Keywords:** Thickness of the NC protective layer, absolute sensitivity, activation energy.

## PENDAHULUAN

Termometer suhu rendah merupakan salah satu alat yang banyak digunakan pada dalam bidang kesehatan untuk mendeteksi suhu vaksin covid (Jain and Gawre, 2022),

bidang pangan untuk memantau suhu makanan yang disimpan pada almari pendingin (Xiao, 2022), bidang peternakan untuk memantau suhu uap nitrogen pada termos penyimpan semen hewan (Giametta et al, 2021).

Bahan yang sering digunakan untuk sensor suhu rendah adalah platina (Toifur et al, 2019), tembaga, dan nikel (Nam and Lee, 2021), namun tak jarang menggunakan perpaduan antara tembaga (Cu) dan nikel (Ni) (Ihsan et al, 2021; Hossain, 2024). Prinsip kerja dari sensor ini adalah *Resistance Temperature Detector* (RTD) yaitu perubahan hambatan jenis jika suhu medium berubah (Sarkar, 2018; Singgih dan Toifur, 2020; Mizunami, 2000).

Beberapa sensor suhu rendah dari lapisan Cu/Ni yang disimpan di Lab. Sentral Universitas Ahmad Dahlan setelah kurang lebih 6 bulan banyak mengalami korosi (Singgih dan Toifur, 2020) sehingga sensor tidak lagi peka terhadap suhu. Oleh sebab diperlukan perlindungan terhadap sensor.

Resin merupakan salah satu bahan pelindung permukaan logam dari korosi dalam bentuk lapisan tipis (Wang, 2020; Caldona et al, 2021). Dari beberapa jenis resin, resin nitroselulosa (NC) memiliki keunggulan: cepat kering, mudah dilapiskan, menghasilkan lapisan transparan, tahan lama, dan relatif aman. Keunggulan lainnya resin termasuk bahan dielektrik sehingga tidak mengganggu kinerja dari sensor jika dialiri listrik. Namun demikian tebal resin dapat mengurangi kepekaan sensor (Vincent et al, 2024; Rameez et al, 2019).

Penggunaan lapisan pelindung juga dapat meningkatkan energi aktivasi ( $E_a$ ) yang diperlukan untuk menggerakkan elektron arus agar supaya terjadi konduksi pada sensor. Hal ini karena bertambahnya antar muka yang semula hanya antara Cu dan Ni bertambah antarmuka antara Ni dan NC. Antarmuka menyebabkan hamburan elektron arus sehingga untuk menghasilkan arus membutuhkan tambahan energi.

## METODE/EKSPERIMEN

### Penyiapan Substrat

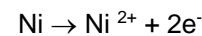
Disediakan pelat nikel berukuran 1.5 cm × 10 cm × 0,1 mm sebagai anoda. Selanjutnya disiapkan substrat tembaga komersial (PCB) dalam bentuk gelombang kotak berukuran 108 mm × 2 mm × 70 μm. Permukaan kedua bahan tersebut dibersihkan sebersih-bersihnya

dengan menggosok menggunakan kain halus yang dibubuhi autosol metal polish autosol SM583 dilanjutkan dibubuhi dengan pasta gigi sampai tampak mengkilat. Selanjutnya substrat dibilas dengan aquades dilanjutkan dengan alkohol 95% pada ultrasonic cleaner selama 15 menit. Setelah kering pelat Cu ditimbang pada neraca Ohaus PR223/E.

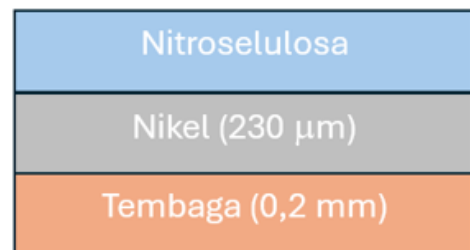
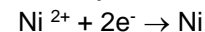
### Penyiapan Sampel Cu/Ni

Untuk menyiapkan sampel Cu/Ni digunakan reaktor elektroplating. Pelat nikel ditempatkan di anoda dan substrat tembaga di katoda pada jarak 4 cm. Kedua elektroda dicelupkan pada elektrolit yang terbuat dari campuran NiSO<sub>4</sub> (260 g), NiCl<sub>2</sub> (60 g), H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (40 g), dan aquadest (150 ml) dengan suhu 60°C. Proses elektroplating dilakukan pada tegangan 4,5 V selama 5 menit.

Reaksi kimia yang terjadi di anoda terjadi oksidasi:



Sedangkan di katoda terjadi reduksi:



Gambar 1. Susunan bahan sensor untuk penelitian

### Proses Penyemprotan NC

Tahap berikutnya substrat Cu/Ni disemprot dengan NC Enzo 5240 pada tekanan 1,2 Mpa secara merata, ditunggu sampai 15 menit sehingga lapisan NC benar-benar kering. Sampai di sini penyiapan sampel sudah selesai.

### Penentuan Tebal Lapisan Ni dan Lapisan NC

Sampel Cu/Ni dan Cu/Ni/NC ditimbang dengan neraca Ohaus PR223/E. Data berat Cu, berat Cu/Ni dan berat Cu/Ni/NC dicatat sebagai  $m_{\text{Cu}}$ ,  $m_{\text{Cu/Ni}}$ ,  $m_{\text{Cu/Ni/NC}}$ . Dari data  $m_{\text{Cu}}$ ,  $m_{\text{Cu/Ni}}$ , dan  $\rho_{\text{Ni}}$  massa jenis Ni (8,908 g/cm<sup>3</sup>), dapat ditentukan tebal lapisan Ni secara tidak

langsung melalui persamaan,

$$t_{Ni} = \frac{m_{Cu/Ni} - m_{Cu}}{\rho_{Ni} A} \quad (1)$$

Demikian pula dari data  $m_{Cu/Ni}$ ,  $m_{Cu/Ni/NC}$  dan  $\rho_{NC}$  massa jenis NC (1,23 g/mL) dapat ditentukan tebal lapisan NC ( $t_{NC}$ ) secara tidak langsung melalui persamaan,

$$t_{NC} = \frac{m_{Cu/Ni/NC} - m_{Cu/Ni}}{\rho_{NC} A} \quad (2)$$

**Penentuan Resistivitas Keping**

Resistivitas keping ( $R_s$ ) sampel Cu/Ni dan Cu/Ni/NC diukur menggunakan probe empat titik JG-ST2258C. Jika  $R_{sCu/Ni}$  lebih besar dari  $R_{sCu}$  maka elektroplating Ni berhasil karena resistivitas Ni lebih besar dari resistivitas Cu. Demikian pula jika  $R_{sCu/Ni/NC}$  nol maka pelapisan Cu/Ni dengan NC berhasil karena NC merupakan bahan non konduktif.

**Pengukuran Tegangan, Suhu, dan Arus**

Selama sensor dimasukkan pada termos nitrogen cair perlahan-lahan dengan kecepatan 1,07 cm/menit dan *sampling rate* 1 sampel/detik dilakukan pengukuran tegangan menggunakan Vernier-VP-BTA, suhu dengan sensor suhu Vernier-TCA-BTA, dan arus dengan Verniar tipe DCP-BTA. Ketiga sensor ini disambungkan ke *software* aplikasi Logger Pro sehingga datanya dapat dibaca dan direkam. Tegangan luaran sensor Cu/Ni/NC digunakan untuk mengetahui respon sensor terhadap perubahan suhu (Hossein, 2024). Jika tegangan sensor mengikuti perubahan suhu maka sensor masih bekerja dengan baik.

**Penentuan Kepekaan Sensor**

Untuk memperoleh kepekaan mutlak sensor, maka sebelumnya diawali terlebih dulu dengan membuat kurva resistansi vs suhu menurut persamaan eksponensial:

$$R(T) = A - Be^{CT} \quad (3)$$

dengan  $R$  resistansi,  $T$  suhu,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  konstanta. Kepekaan mutlak diperoleh dari slope kurva persamaan (3) (Haris and Lu, 2021) yaitu:

$$S(T) = \frac{dR(T)}{dT} = -Pe^{CT} \quad (4)$$

Dengan  $S$  kepekaan mutlak,  $P$ ,  $C$

konstanta, dan  $T$  suhu.

**Penentuan Energi Aktivasi**

Untuk menentukan energi aktivasi digunakan persamaan Arrhenius mengenai hubungan konduktivitas listrik dan suhu medium:

$$\sigma = \sigma_0 e^{E_a/kT} \quad (5)$$

dengan  $E_a$ , energi aktivasi,  $k$  konstanta Boltzmann ( $1,380649 \times 10^{-23}$  J/K),  $T$  suhu mutlak (K), dan  $\sigma_0$  konstanta kesebandingan. Nilai konduktivitas  $\sigma$  dapat diperoleh dari resistansi, panjang sampel serta luas sampel:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} \quad (6)$$

Dengan  $R$  resistansi sensor Cu/Ni atau Cu/Ni/NC,  $L$  panjang sensor (108 mm),  $A$  luas penampang sensor (216 mm<sup>2</sup>). Selanjutnya dengan mengambil logaritma normal persamaan (6) diperoleh:

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 + \left( \frac{10^3 E_a}{k} \right) \frac{1}{10^3 T} \quad (7)$$

Dengan menggambar kurva  $\ln \sigma$  vs  $1/kT$  maka dari slope grafik  $B$  diperoleh energi aktivasi,

$$E_a = \frac{Bk}{10^3} \text{ (joule)} \quad (8)$$

Sensor yang mudah dialiri arus memiliki  $E_a$  kecil. Semakin kecil  $E_a$  semakin mudah arus mengalir.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Data Fisik Sensor**

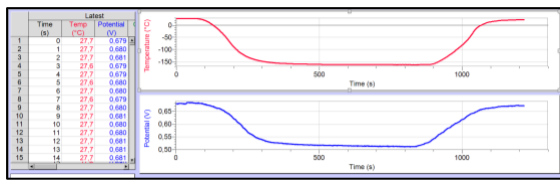
Tabel 1. Besaran-besaran pada Cu sebelum dan setelah dilapisi Ni

| No | Besaran yang diukur       | Nilai                                  |
|----|---------------------------|--|
| 1  | Resistivitas keping Cu    | (1,040 ± 0,004) x10 <sup>-3</sup> Ω/sq |
| 2  | Resistivitas keping Cu/Ni | (3,81 ± 0,02) x10 <sup>-3</sup> Ω/sq   |
| 3  | Massa pelat Cu            | (2936,08 ± 0,05) mg                    |
| 4  | Massa Cu/Ni               | (2953,16 ± 0,05) mg                    |
| 5  | Massa lapisan nikel       | (17,08 ± 0,07) mg                      |
| 6  | Tebal lapisan Ni          | (128,57 ± 0,71) μm                     |
| 7  | Tebal lapisan NC          | (19,98 ± 0,06) μm                      |

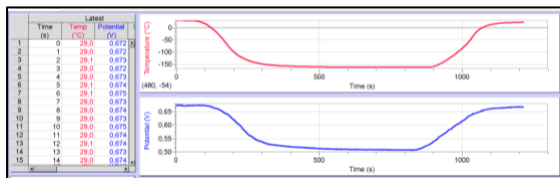
Hasil pengukuran resistivitas Cu dan Cu/Ni serta penimbangan massa Cu, Cu/Ni, Cu/Ni/NC dan tebal lapisan Ni dan lapisan NC yang dihitung menggunakan persamaan (1) dan persamaan (2) ditampilkan pada Tabel 1.

**Kurva Tegangan dan Suhu**

Pada Gambar 2 ditampilkan respon tegangan *output* berupa kurva suhu vs waktu dan potensial vs waktu untuk sensor Cu/Ni dan sensor Cu/Ni/NC.



(a)



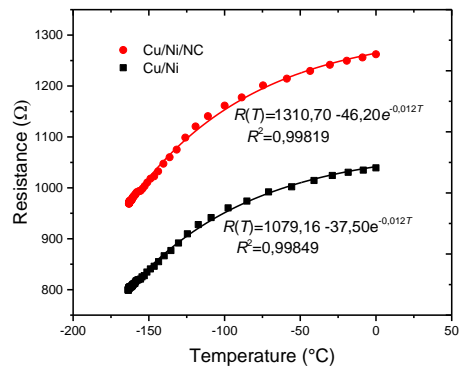
(b)

Gambar 2. Respon termokopel dan tegangan sensor pada saat dimasukkan ke dalam termos nitrogen cair -160°C – 0°C: (a) sensor Cu/Ni, dan (b) sensor Cu/Ni/NC.

Gambar 2 menunjukkan bahwa sensor Cu/Ni dan Cu/Ni/NC dapat merespon perubahan suhu sebagaimana ditunjukkan oleh termokopel baik untuk suhu turun dari 0°C – -160°C maupun suhu naik dari -160°C – 0°C. Dari hasil ini, analisis dapat dilanjutkan pada kepekaan sensor.

**Kurva Resistansi terhadap Suhu**

Pada Gambar 3 ditampilkan kurva resistansi terhadap suhu (*R* vs *T*) sesuai dengan persamaan (3). Penggunaan lapisan NC dapat menaikkan resistansi sensor Cu/Ni pada semua suhu dari -160°C – 0°C. Pada suhu -160°C resistansi Cu/Ni sebesar 823,37 Ω sedangkan resistansi Cu/Ni/NC sebesar 995,57 Ω atau terdapat kenaikan sebesar 172,20 Ω.



Gambar 3. Kurva resistansi sensor terhadap suhu dari -160°C – 0°C

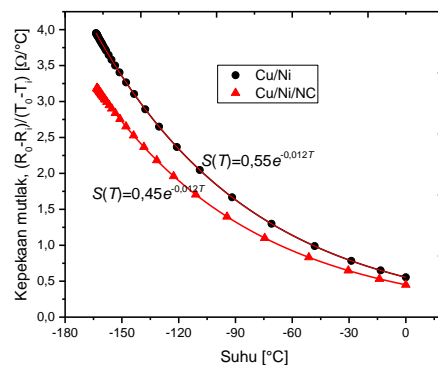
Pada suhu 0°C resistansi Cu/Ni sebesar 1041,66 Ω sedangkan resistansi Cu/Ni/NC sebesar 1264,5 Ω atau terdapat kenaikan sebesar 222,84 Ω. Persamaan yang menyatakan kenaikan resistansi Δ*R* sensor Cu/Ni setelah dilapisi NC sebagai fungsi suhu medium *T* adalah,

$$\Delta R = 231,56 - 8,72e^{-0,00127T} \tag{9}$$

Dalam bentuk persen kenaikan resistansi relatifnya pada semua suhu adalah 21%.

**Kepekaan Mutlak Sensor**

Pada Gambar 4 ditampilkan kurva kepekaan mutlak sensor pada berbagai suhu medium.



Gambar 4. Kepekaan mutlak untuk sampel Cu/Ni dan Cu/Ni/NC

Dari kurva diketahui kepekaan mutlak tiap sensor tidak sama di setiap suhu pada interval -160°C – 0°C. Semakin rendah suhu semakin

meningkat kepekaan kedua sensor. Sensor ini berjenis *Negatif Coefficient Resistance* (NCR) (Lomov et al., 2023; Kim et al., 2022; Liu et al., 2014; Toifur et al., 2020), yang unggul untuk jenis sensor suhu rendah (Jia et al., 2023) karena memiliki kepekaan dan akurasi yang bagus. Persamaan hubungan kepekaan terhadap suhu untuk sensor Cu/Ni sesuai dengan persamaan (4) adalah,

$$S_{Cu/Ni} = 0,55e^{-0,012T} \quad (10)$$

Sedangkan untuk sensor Cu/Ni/NC,

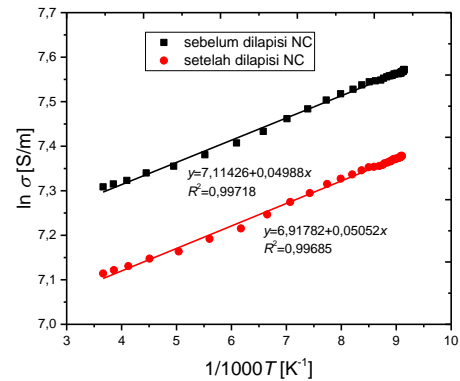
$$S_{Cu/Ni/NC} = 0,45e^{-0,012T} \quad (11)$$

Pada rentang suhu antara  $-160^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ , kepekaan Cu/Ni berkisar dari  $0,55 \Omega/^{\circ}\text{C} - 3,95 \Omega/^{\circ}\text{C}$  sedangkan setelah dilapisi NC kepekaan berkisar dari  $0,45 \Omega/^{\circ}\text{C} - 3,18 \Omega/^{\circ}\text{C}$ . Perbedaan antara persamaan (10) dan (11) hanya pada konstanta  $P$  yaitu  $0,55 \Omega/^{\circ}\text{C}$  untuk Cu/Ni dan  $0,45 \Omega/^{\circ}\text{C}$  untuk Cu/Ni/NC sedangkan konstanta eksponensial suhu kedua kurva bernilai sama yaitu  $0,012/^{\circ}\text{C}$ . Ini artinya penggunaan lapisan pelindung NC pada sensor Cu/Ni dapat mengurangi kepekaan sensor, namun tidak mengubah laju perubahan kepekaannya terhadap suhu. Dari perhitungan, diperoleh kepekaan sensor menurun hingga 18,9%. Hubungan antara berkurangnya kepekaan  $\Delta S$  terhadap suhu  $T$  dinyatakan dengan,

$$\Delta S = 0,10e^{-0,012T} \quad (12)$$

### Energi Aktivasi

Pada Gambar 5 ditampilkan energi aktivasi sensor Cu/Ni dan Cu/Ni/NC mengikuti persamaan (8).



Gambar 5. Energi aktivasi Cu/Ni dan Cu/Ni/NC

Dari slope grafik diperoleh energi aktivasi Cu/Ni adalah  $(4,298 \pm 0,009) \times 10^{-9}$  eV dan untuk Cu/Ni/NC adalah  $(4,353 \pm 0,010) \times 10^{-9}$  eV. Antara keduanya terdapat selisih sebesar 0,055 eV atau 1,3%. Walaupun kecil namun penggunaan lapisan NC berdampak pada kenaikan  $E_a$  sehingga pemakaian NC berkontribusi pada kenaikan hamburan elektron konduksi pada sensor.

Ini menunjukkan bahwa pada saat sensor digunakan untuk mengukur suhu medium maka sensor Cu/Ni/NC membutuhkan energi yang lebih besar untuk menggerakkan elektron konduksi supaya terjadi aliran arus listrik dibandingkan sensor Cu/Ni. Energi tersebut digunakan untuk mengatasi hambatan yang disebabkan oleh *interface* antara Cu dan Ni, dan antara Ni dan NC. Selain itu adanya cacat kristal dan ketidakseragaman ukuran kristal hasil elektroplating juga dapat menambah  $E_a$  (Aljubouri et al., 2024). Dari perhitungan, persentase kenaikan energi aktivasi.

Oleh karena itu kepada para produsen sensor suhu rendah umumnya dan sensor Cu/Ni khususnya penggunaan lapisan pelindung supaya dijadikan bahan pencermatan sehingga kepekaan sensor tidak terlalu turun serta energi aktivasi tidak terlalu naik.

### PENUTUP

Pada penelitian ini telah berhasil dibuat sensor suhu Cu/Ni berlapis pelindung nitroselulose (NC) setebal  $19,98 \pm 0,06 \mu\text{m}$ . Penggunaan lapisan NC dapat mengurangi kepekaan sampai 18,9% yaitu dari  $3,95 \Omega/^{\circ}\text{C}$

menjadi  $3,18 \Omega/^{\circ}\text{C}$  pada suhu  $-160^{\circ}\text{C}$  mengikuti persamaan  $\Delta S(T)=0,10e^{-0,012T}$ . Penggunaan lapisan pelindung NC juga dapat meningkatkan energi aktivasi sebesar 1,3% yaitu dari  $(4,29 \pm 0,01) \times 10^{-9}$  eV dan  $(4,35 \pm 0,01) \times 10^{-9}$  eV. Hasil ini dapat digunakan sebagai pertimbangan bagi produsen sensor suhu bahwa penggunaan lapisan pelindung NC penting untuk melindungi sensor Cu/Ni namun dapat penurunan kepekaan sensor.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada kemendikbudristek yang telah memberi dana penelitian ini melalui Hibah Tesis Magister dengan Surat Keputusan Nomor 107/E5/PG.02.00.PL/2024 dan Perjanjian/Kontrak Nomor 083/PTM/ LPPM-UAD/VI/2024.

### REFERENSI

- Aljubouri, A. A., Faisal, A. D., & Khalef, W. K. (2018). Fabrication of temperature sensor based on copper oxide nanowires grown on titanium coated glass substrate. *Materials Science-Poland*, 36(3), 460-468. <https://doi.org/10.2478/msp-2018-0051>
- Caldona, E. B., Wipf, D. O., & Smith Jr., D. W. (2021). Characterization of a tetrafunctional epoxy-amine coating for corrosion protection of mild steel. *Progress in Organic Coatings*, 151, 106045. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106045>
- Giametta, F., Perone, C., Di Iorio, M., Rusco, G., Catalano, P., & Iaffaldano, N. (2021). A New Freezing Box for the Managing of Semen Cryopreservation Process. *Chemical Engineering Transactions*, 87, 265-270. <https://doi.org/10.3303/CET2187045>
- Haris, C.T., and Lu, T.M. (2021). A PtNiGe resistance thermometer for cryogenic applications, *Rev. Sci. Instrum* (92), 1-5.
- Hossain, N., Rimon, M.I.H., Mimona, M.A., Mobarak, M.H. (2024). Prospects and Challenges of Sensor Materials: A Comprehensive Review. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering Electronics and Energy*, 7(19):100496. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100496>
- Ihsan, M., Toifur, M., Khusnani, A. (2021). Effect of Temperature of Electrolyte Solution On Cu/Ni Layer On Low-Temperature Voltage Range Measurement Performance. *Indonesian Journal of Science and Education*, 5(2), 106-110. <https://doi.org/10.31002/ijose.v5i2.3611>
- Jain, R., & Gawre, S. K. (2022, February). Monitoring and Control of COVID Vaccine Storage Temperature Using IoT and Machine Learning. In *2022 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SCEECS54111.2022.9740740>
- Jia, J., Liu, W., Zhu, H., Show, L., Li, B., Shi, Z., Cui, Q., Xu, C. (2023). Temperature Sensors Based on Negative Temperature Coefficient of ZnO Thin Films. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 99, 1-7. <https://doi.org/10.1109/TED.2023.3314400>
- Kim, C. H., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2022). Positive/negative temperature coefficient behaviors of electron beam-irradiated carbon blacks-loaded polyethylene nanocomposites. *ACS omega*, 7(51), 47933-47940. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05806>
- Liu, Z., Huo, P., Yan, Y., Shi, C., Kong, F., Cao, S., ... & Yao, J. (2024). Design of a Negative Temperature Coefficient Temperature Measurement System Based on a Resistance Ratio Model. *Sensors*, 24(9), 2780. <https://doi.org/10.3390/s24092780>
- Lomov, S. V., Akmanov, I. S., Liu, Q., Wu, Q., & Abaimov, S. G. (2023). Negative Temperature Coefficient of Resistance in Aligned CNT Networks: Influence of the Underlying Phenomena. *Polymers*, 15(3), 678. <https://doi.org/10.3390/polym15030678>
- Mizunami, T. (2000, November). A high-sensitivity cryogenic fiber-grating temperature sensor. In *Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors* (Vol. 4185, pp. 175-178).

- SPIE.  
<https://doi.org/10.1117/12.2302180>
- Nam, V.B., Lee, D. (2021). Evaluation of Ni-Based Flexible Resistance Temperature Detectors Fabricated by Laser Digital Patterning. *Nanomaterials*, 11(576),1–13.  
<https://doi.org/10.3390/nano11030576>
- Sarkar, S. (2018). Platinum RTD sensor based multi-channel high-precision temperature measurement system for temperature range- 100 C to+ 100 C using single quartic function. *Cogent Engineering*, 5(1), 1558687.  
<https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1558687>
- Singgih, S., Toifur, M. (2020). Pengukuran Nilai Resistivitas Plat Tipis Cu-Ni Hasil Elektroplating Variasi Konsentrasi Larutan dan Jarak Katoda sebagai Sensor Suhu Rendah Berbasis Resistance Temperature Detector (RTD). *Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Pendidikan Fisika*, June (2020).
- Toifur, M., Khansa, M. L., Okimustava, O., Khusnani, A., & Ridwan, R. (2020). The Effect of Deposition Time on the Voltage Range and Sensitivity of Cu/Ni as Low-Temperature Sensor Resulted from Electroplating Assisted by a Transverse Magnetic Field. *Key Engineering Materials*, 855, 185-190.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.855.185>
- Toifur, M., Khusnani, A., Okimustava. (2019). Effect of Mass Fraction of Ni in Solution on the Microstructure and Sensitivity of Cu/Ni Film as Low-Temperature Sensor. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 6(5B), 76 – 83.
- Vincent, T. A., Maddar, F. M., Chao, S., Guk, E., Sansom, J. E., Gulsoy, B., ... & Marco, J. (2024). A compatibility study of protective coatings for temperature sensor integration into sodium-ion battery cells. *Journal of Physics: Energy*, 6(2), 025002.  
<https://doi.org/10.1088/2515-7655/ad1e38>
- Wang, F., Xu, J., Xu, Y., Jiang, L., & Ma, G. (2020). A comparative investigation on cathodic protections of three sacrificial anodes on chloride-contaminated reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 246, 118476.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118476>
- Xiao, X. (2022). Facile Fabrication Of Flexible Sustainable Light Energy Harvester for Selfpowered Sensor System In Food Monitoring, *Sensors Int.* 3,100133.  
<https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100133>