

## Pembuatan Sensor SnO<sub>2</sub> untuk Memantau Multi-Parameter dalam Proses Pembusukan Makanan

Moh. Toifur\*, Indra Budi Setiawan, Ishafit, Ridlo Hajatulloh, Okimustava, Eko Susanto

Magister Pendidikan Fisika Universitas Ahmad Dahlan  
Yogyakarta 55161Jl. Pramuka No. 42 Sidikan Umbulharjo Yogyakarta

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

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sensor gas berbasis SnO<sub>2</sub> menggunakan metode elektroplating dan menguji kinerjanya dalam mendeteksi parameter-parameter lingkungan yang terkait dengan proses pembusukan makanan. Urap sayuran digunakan sebagai sampel untuk mempelajari perubahan suhu, konsentrasi CO<sub>2</sub>, kelembapan, serta resistansi sensor selama proses pembusukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor SnO<sub>2</sub> mampu merespons secara nyata terhadap perubahan suhu dan kadar CO<sub>2</sub> dengan pola penurunan resistansi yang konsisten. Sebaliknya, hubungan resistansi dengan kelembapan belum teridentifikasi secara jelas. Temuan ini menegaskan potensi sensor SnO<sub>2</sub> untuk dioptimalkan sebagai perangkat multi-parameter dalam monitoring pembusukan makanan, baik untuk aplikasi laboratorium maupun sistem kemasan cerdas, sehingga dapat mendukung peningkatan keamanan pangan dan pengurangan limbah makanan.

**Kata kunci:** SnO<sub>2</sub>, Elektroplating, Pembusukan makanan, Monitoring Multi-Parameter.

### Abstract

*This study reports the development of a tin dioxide (SnO<sub>2</sub>)-based gas sensor fabricated via the electroplating method for monitoring food spoilage. Urap vegetables were used as test samples to investigate variations in temperature, CO<sub>2</sub> concentration, humidity, and sensor resistance during the spoilage process. The results revealed that the SnO<sub>2</sub> sensor exhibited a clear response to temperature and CO<sub>2</sub> concentration, both of which showed a consistent decrease in resistance with increasing values. In contrast, no definitive correlation between resistance and humidity was observed. These findings highlight the potential of electroplated SnO<sub>2</sub> sensors as multi-parameter devices for real-time food spoilage monitoring. Such an approach could be further optimized for practical applications in smart packaging and food quality control, thereby supporting food safety and waste reduction.*

**Keywords:** SnO<sub>2</sub> sensor, electroplating, food spoilage, multi-parameter monitoring.

## PENDAHULUAN

Pengawasan kualitas makanan selama penyimpanan dan distribusi sangat penting untuk menjamin keamanan konsumen dan mengurangi pemborosan makanan. Salah satu indikator penurunan kualitas makanan adalah keberadaan senyawa organik volatil (VOC) yang dilepaskan selama proses pembusukan, seperti hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), amonia (NH<sub>3</sub>), dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Dalam beberapa kondisi, perubahan kelembapan dan suhu juga mempengaruhi kualitas makanan, terutama di

lingkungan penyimpanan tertutup. Penguraian bahan organik melibatkan aktivitas mikroba, menghasilkan CO<sub>2</sub> sebagai produk sampingan (Ratih et al., 2020). Oleh karena itu, diperlukan sensor yang dapat mendeteksi perubahan kondisi ini secara akurat dan real-time (Kumar et al. (2023). Berbagai jenis sensor gas, termasuk oksida logam dan sensor gelombang akustik permukaan, telah menunjukkan harapan dalam mendeteksi gas yang mudah menguap selama kerusakan makanan (Ma et al., 2023).

Sensor berbasis timah dioksida (SnO<sub>2</sub>) merupakan bahan yang berpotensi dapat

mendeteksi gas-gas indikator pembusukan dan perubahan kualitas udara di sekitar makanan, namun belum banyak riset praktis (Ma et al., 2023; Sun et al., 2004; Wu et al., 2011; Wang et al., 2021; Lee et al., 2021).

Beberapa peneliti yang mendorong untuk pengembangan sensor SnO<sub>2</sub> dalam bentuk nanopartikel mengungkapkan bahwa semakin kecil ukuran partikel semakin meningkat kepekaan sensor karena akan meningkatkan rasio luas permukaan terhadap volume sel satuan sehingga interaksi sensor dengan molekul gas menjadi lebih intensif (Yuliarto, 2015). Selain itu semakin kecil ukuran dapat mempercepat respon sensor (Wu et al., 2011). Sintesis sensor SnO<sub>2</sub> pada ukuran mesopori (2-50 nm) dapat mendeteksi gas berkonsentrasi rendah (Liu et al., 2023). Dari hasil peneltan Kumar et al., dan Lee, et al. menyatakan bahwa kombinasi SnO<sub>2</sub> dengan bahan lain seperti *reduced hybride composite* (rGO) dapat meningkatkan akurasi sensor (Kumar et al., 2023], (Lee et al., 2021].

Para peneliti sebelumnya kebanyakan memerankan sensor SnO<sub>2</sub> untuk mendeteksi satu gas tertentu, belum terintegrasi menjadi sensor multivariabel. Selain itu sebagian besar studi menggunakan pendekatan sensor gas berbasis SnO<sub>2</sub> yang difabrikasi melalui teknik sol-gel, sputtering, atau thermal oxidation.

Resistivitas sensor SnO<sub>2</sub> diketahui sangat sensitif terhadap kondisi lingkungan, terutama terhadap kelembapan, konsentrasi CO<sub>2</sub>, dan suhu. Kelembapan yang tinggi dapat membentuk lapisan air pada permukaan sensor, sehingga menghalangi interaksi antara gas target dan SnO<sub>2</sub> dan pada akhirnya menurunkan sensitivitas sensor (Velumani et al., 2018; Malik et al., 2017). Sementara itu, keberadaan CO<sub>2</sub> pada kadar tertentu juga mampu memodifikasi resistivitas lapisan SnO<sub>2</sub>, yang berpotensi memengaruhi akurasi dalam mendeteksi gas volatil lainnya (Lee et al., 2021). Faktor suhu turut memainkan peran penting, karena memengaruhi struktur molekular dan sifat permukaan material. Pada suhu tinggi, SnO<sub>2</sub> menjadi lebih reaktif dibandingkan pada suhu rendah, sehingga respons sensor terhadap gas target cenderung

lebih kuat.

Pada penelitian ini akan dibuat sensor SnO<sub>2</sub> dengan metode elektroplating. Metode ini memiliki beberapa keunggulan diantaranya relatif sederhana, efisien, dan berpotensi menghasilkan lapisan yang lebih seragam, berukuran nano, dengan ketebalan yang terkontrol, dan berbiaya murah (Budiana et al., 2023) sehingga dapat meningkatkan sensitivitas dan stabilitas sensor (Banurea et al., 2023). Kebaharuan dari penelitian ini terletak pada pemeranan sensor SnO<sub>2</sub> sebagai sensor yang mengintegrasikan beberapa variabel yaitu suhu, kelembapan, dan kadar CO<sub>2</sub>, yang dicakup oleh nilai resistansi sensor terhadap masing-masing variabel (Ma et al., 2023). Selain itu metode elektroplating memiliki keunggulan sebagaimana disebutkan di atas. Namun ada yang lebih penting lagi yaitu penumbuhan lapisan SnO<sub>2</sub> pada substrat Cu sehingga menjadi Cu/SnO<sub>2</sub> juga dapat menghasilkan *interface* antara Cu dan SnO<sub>2</sub> yang dapat menambah akurasi sensor (Kumar et al., 2023).

## METODE/EKSPERIMEN

### Alat dan Bahan

Bahan penelitian terdiri dari pelat Sn sebagai bahan anoda berukuran 10x1,5 x0,01 cm<sup>3</sup> dan pelat Cu sebagai katoda dalam bentuk gelombang kotak berukuran 108 mm x 2 mm x 70 μm. Serbuk SnCl<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O digunakan sebagai bahan elektrolit. Obyek yang diteliti adalah gas yang dikeluarkan oleh urap sayur campuran dari sawi, bayam, kenikir, touge, kol, dan bumbu urab berupa parutan kelapa dicampur dengan garam, bawang putih, dan gula.

Sedangkan alat penelitian terdiri dari reaktor elektroplating, pemanas larutan, oven. Alat karakterisasi terdiri dari Ohaus PR223/E untuk menimbang berat sampel, probe empat titik JG-ST2258C untuk menguji resistivitas keping, VP-BTA untuk mengukur tegangan, TCA-BTA, untuk mengukur suhu dan DCP-BTA, untuk mengukur kadar CO<sub>2</sub>, dan RH-BTA untuk mengukur kelembapan.

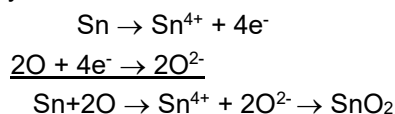
## Preparasi Substrat

Permukaan pelat Cu dan pelat Sn dibersihkan sebersih-bersihnya dengan menggosok menggunakan kain halus yang dibubuhi metal polish autosol SM583. Penghalusan dilanjutkan dengan kain halus yang dibubuhi 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.

## Proses Pembuatan Cu/SnO<sub>2</sub>

Untuk menyiapkan sampel Cu/Sn digunakan reaktor elektroplating. Pelat Sn ditempatkan di anoda dan substrat Cu di katoda pada jarak 4 cm. Kedua elektroda dicelupkan pada elektrolit yang terbuat dari campuran SnCl<sub>2</sub> (60g) dan aquadest (150 ml) dengan suhu 60°C. Proses elektroplating dilakukan pada tegangan 4,5V selama 5 menit. Selama proses elektroplating arus yang mengalir diukur menggunakan vernier DCP-BTA. Setelah selesai sampel diangkat kemudian dibersihkan dengan aquades pada ultrasonic cleaner selama 5 menit.

Setelah terbentuk lapisan Cu/Sn, selanjutnya dilakukan proses oksidasi Sn secara termal menjadi SnO<sub>2</sub> dengan memanaskan substrat di dalam *furnace* pada suhu 100° C selama 60 menit (Abdullah et al., 2018). Persamaan reaksinya,



Setelah selesai sampel ditimbang dengan neraca Ohaus PR223/E.



Gambar 1. Litografi pada substrat Cu sebelum dilapisi Sn



Gambar 2. Substrat Cu setelah dilapisi Sn

Pada Gambar 1 ditampilkan litografi substrat Cu sebelum dilapisi Sn dan pada Gambar 2 ditampilkan litografi substrat Cu setelah dilapisi Sn.

## Karakterisasi Tebal dan Resistivitas Keping Lapisan Cu/SnO<sub>2</sub>

Penentuan tebal lapisan SnO<sub>2</sub> yang terbentuk di atas substrat Cu dilakukan secara tidak langsung melalui selisih antara massa sebelum dan setelah dilapisi SnO<sub>2</sub>. Dengan menggunakan persamaan,

$$\delta_{\text{SnO}_2} = \frac{m_{\text{Cu/SnO}_2} - m_{\text{Cu}}}{\rho_{\text{SnO}_2} A_{\text{Cu/SnO}_2}} \quad (1)$$

dimana  $m_{\text{Cu}}$  massa Cu,  $m_{\text{Cu/SnO}_2}$  massa Cu/SnO<sub>2</sub>,  $\rho_{\text{SnO}_2}$  massa jenis SnO<sub>2</sub> (7,29 g cm<sup>-3</sup>), dan  $A_{\text{SnO}_2}$  adalah luas penampang SnO<sub>2</sub> maka tebal lapisan SnO<sub>2</sub> dapat diketahui.

Resistivitas keping ( $R_s$ ) Cu/SnO<sub>2</sub> ditentukan dengan alat probe 4 titik JG-ST2258C sesuai dengan persamaan:

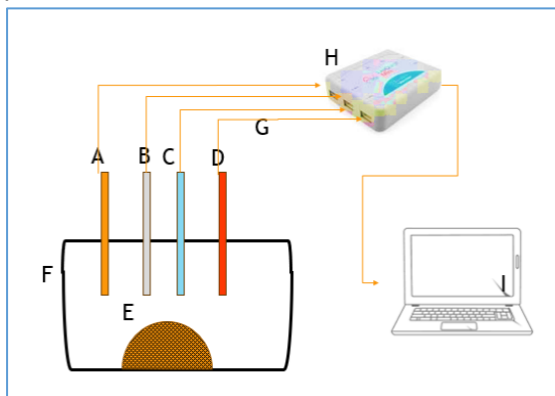
$$R_s = \frac{\pi V}{\ln 2 I} \quad (\Omega/\text{sq}) \quad (2)$$

Dengan  $V$  tegangan dan  $I$  arus. Uji resistivitas keping dilakukan sebelum ataupun setelah dideposisi (Toifur, 2014). Jika  $R_s$  Cu/SnO<sub>2</sub> lebih besar dari  $R_s$  Cu maka pelapisan berhasil karena resistivitas SnO<sub>2</sub> 4,5 x 10<sup>-3</sup> Ω cm lebih besar dari resistivitas Cu 1,68 x 10<sup>-6</sup> Ω cm. Dengan alat ini pula dapat ditentukan resistivitas dan resistansi lapisan sampel.

## Pengukuran Suhu, Kadar CO<sub>2</sub>, Kelembaban, Resistansi dan Analisisnya.

Urap sayur sebagai obyek yang diteliti ditempatkan pada toples tertutup rapat. Sensor-sensor suhu, kadar CO<sub>2</sub>, kelembaban, dan resistansi dimasukkan ke dalam toples. Keempat sensor dihubungkan dengan transduser Labquest 3 kemudian dihubungkan ke komputer melalui aplikasi loggerpro sehingga keempat parameter dapat diamati nilainya dalam bentuk angka maupun grafik

pada setiap detik selama 6 jam. Khusus untuk sensor Cu/SnO<sub>2</sub> penentuan resistansi secara tidak langsung yaitu melalui pengukuran tegangan dan arus, kemudian resistansi diperoleh dari hasil bagi antara tegangan dan arus. Skema rangkaianannya dapat dilihat pada Gambar 3 sedangkan tampilan foto ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Skema uji beberapa parameter gas urap sayur: (A) sensor suhu, (B) sensor kadar CO<sub>2</sub>, (C) sensor kelembapan, (D) sensor resistansi.



Gambar 4. Foto rangkaian alat pengambilan data penelitian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Ketebalan Lapisan SnO<sub>2</sub> dan Resistivitas Sensor

Dengan massa jenis SnO<sub>2</sub> 7,29 g/cm<sup>3</sup> dan luas substrat SnO<sub>2</sub> = 7,61 cm<sup>2</sup>, sesuai dengan persamaan (1) diperoleh tebal lapisan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Penentuan tebal lapisan SnO<sub>2</sub>

$m_{Cu}$ (g)	$m_{Cu/SnO_2}$ (g)	$\Delta m$ (g)	$\delta_{SnO_2}$ ( $\times 10^{-5}$ cm)
2,5666	2,5676	0,001	18,02

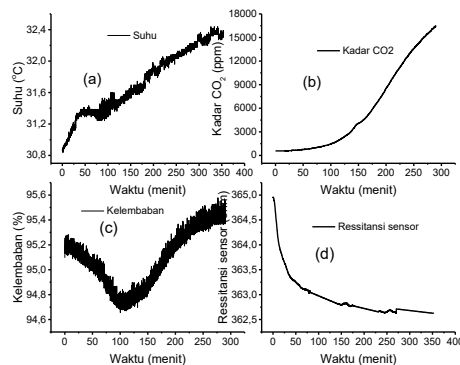
Selanjutnya dari uji resistivitas, resistivitas keping dan resistansi sebelum dan setelah diplating diperoleh data seperti ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Resistivitas Sebelum dan Sesudah Elektroplating

Ket.	Sebelum plating	Setelah plating
$\rho$	$0,545 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$	$0,793 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$
$R_s$	$3,94 \times 10^{-3} \Omega/\text{sq}$	$5,73 \times 10^{-3} \Omega/\text{sq}$
$R$	$0,869 \times 10^{-3} \Omega$	$1,263 \times 10^{-3} \Omega$

### Hubungan Suhu, Kelembapan, Kadar Gas CO<sub>2</sub>, dan Resistivitas Sensor terhadap Waktu

Pada Gambar 5 ditampilkan kurva suhu, kadar CO<sub>2</sub>, kelembapan, dan resistansi terhadap waktu selama 3 jam pembusukan urap sayur.



Gambar 5. Grafik hubungan suhu, kelembapan, gas CO<sub>2</sub>, dan resistivitas sensor terhadap waktu

Pada Gambar 5(a) suhu meningkat selama proses pembusukan 6 jam. Hal ini disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme melalui reaksi eksotermis panas. Selama pembusukan ini pula kadar CO<sub>2</sub> mengalami peningkatan seperti ditunjukkan pada Gambar 5(b). Mula-mula selama 1 jam suhu terjadi peningkatan yang tinggi, namun setelah 1 jam suhu meningkat agak turun. Meningkatnya suhu disebabkan gula pada bumbu urap melakukan fermentasi

untuk menghasilkan alkohol dan karbon dioksida. Fermentasi bersifat eksotermik yaitu setelah reaksi sistem menjadi lebih panas. Pada suhu yang naik tingkat reproduksi ragi meningkat sehingga menambah jumlah sel aktif yang berpartisipasi dalam fermentasi. Selanjutnya pada Gambar 5(c) kelembapan udara dari awal sampai 100 menit menurun, dan setelah itu meningkat. Penurunan terjadi karena panas pada awal proses pembusukan uap digunakan untuk mengeringkan sisa-sisa uap air yang menempel pada urap. Setelah 100 menit kelembapan meningkat tajam yang terjadi akibat bekerjanya mikroba sehingga dihasilkan uap panas hidrogen sulfida ( $H_2S$ ), amonia ( $NH_3$ ), dan karbon dioksida ( $CO_2$ ) [1]. Selanjutnya pada Gambar 5(d) resistansi semakin menurun dengan semakin lamanya waktu pembusukan. Ini disebabkan karena kadar gas yang mengandung senyawa organik seperti  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  dan uap alkohol yang timbul akibat pembusukan meningkat. Dalam kondisi normal permukaan permukaan  $SnO_2$  menyerap oksigen di udara untuk membentuk  $O^-$  dan  $O^{2-}$  dimana elektron diperoleh dari penangkapan oksigen terhadap elektron pada bahan  $SnO_2$  yang merupakan semikonduktor tipe n. Sementara gas-gas di atas bersifat reduktor, yang dengan sumbangan elektron-elektronnya mampu menetralkan ion-ion oksigen yang terperangkap di permukaan  $SnO_2$  tersebut dan elektron pembawa muatan  $SnO_2$  dikembalikan dari permukaan ke dalam  $SnO_2$ . Maka selama gas-gas reduktor terbentuk resistivitas  $SnO_2$  akan menurun.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi yang signifikan dalam konteks penerapan praktis pada sistem monitoring pembusukan makanan. **Pertama**, kemampuan sensor  $SnO_2$  untuk merespons secara nyata terhadap perubahan suhu dan konsentrasi  $CO_2$  menunjukkan potensinya sebagai indikator dini kerusakan makanan. Peningkatan suhu dan  $CO_2$  yang konsisten seiring waktu penyimpanan dapat dijadikan penanda awal aktivitas mikroba dan proses fermentasi yang menandai fase awal pembusukan. Dengan demikian, sensor ini dapat membantu produsen maupun konsumen dalam menentukan batas aman konsumsi suatu produk. **Kedua**, sifat multi-parameter dari sensor ini memungkinkan

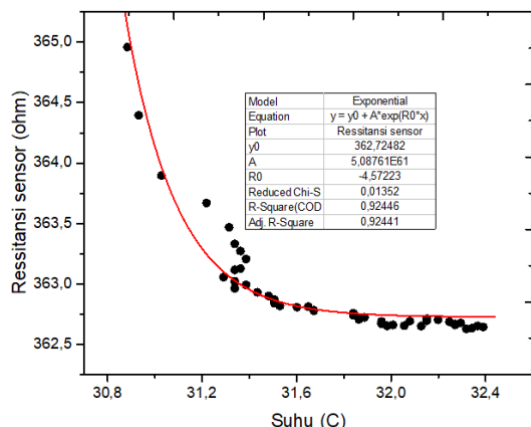
integrasi dalam sistem **smart packaging** atau wadah penyimpanan cerdas. Dengan mendeteksi suhu, kelembapan, dan gas  $CO_2$  secara bersamaan, sensor dapat memberikan gambaran lebih komprehensif mengenai kondisi makanan dibandingkan sensor tunggal. Hal ini sangat relevan untuk industri distribusi dan logistik makanan yang memerlukan sistem pemantauan real-time guna meminimalkan kerugian akibat *food loss* maupun *food waste*.

**Ketiga**, respon resistivitas  $SnO_2$  terhadap gas-gas hasil degradasi organik memperlihatkan bahwa sensor ini dapat digunakan sebagai **alat peringatan dini (early warning system)**. Dalam praktiknya, sensor dapat dihubungkan dengan sistem berbasis Internet of Things (IoT), sehingga informasi kualitas makanan dapat diakses secara langsung melalui perangkat digital. Implementasi ini tidak hanya meningkatkan keamanan pangan, tetapi juga memberi nilai tambah bagi konsumen dengan adanya transparansi kualitas produk.

Berdasar fokus dari penelitian ini adalah kinerja sensor  $Cu/SnO_2$  dalam besaran resistansi maka analisis selanjutnya adalah mencari hubungan antara suhu, kadar  $CO_2$  dan kelembapan terhadap resistansi sensor. Dengan diperolehnya hubungan ini maka sensor  $Cu/SnO_2$  dapat diperankan sebagai sensor suhu, sensor kadar  $CO_2$  dan sensor kelembapan.

### Hubungan resistansi terhadap suhu

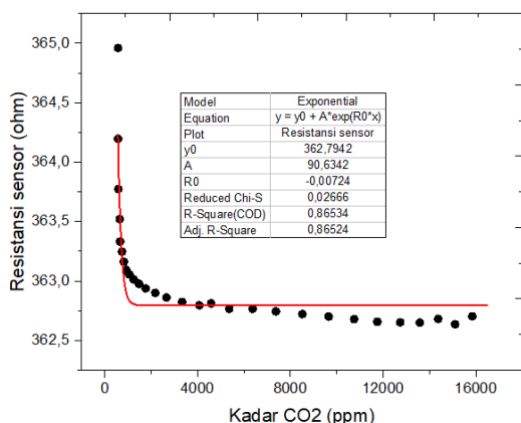
Analisa resistansi sensor  $SnO_2$  terhadap suhu ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 6. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor  $SnO_2$  bereaksi terhadap perubahan suhu. Hal tersebut dijelaskan berdasarkan sifat materialnya sebagai semikonduktor tipe n. Pada suhu rendah hingga sedang, resistansi sensor cenderung menurun seiring dengan kenaikan suhu. Penurunan ini terjadi karena energi termal yang meningkat menyebabkan lebih banyak elektron dari atom donor berpindah ke pita konduksi (ionisasi termal), sehingga konsentrasi pembawa muatan meningkat (Kim et al., 2024; Feng et al., 2022).



Gambar 6. Grafik Hubungan Resistansi Sensor Terhadap Suhu

### Hubungan resistansi terhadap kadar CO<sub>2</sub>

Hubungan resistansi sensor SnO<sub>2</sub> terhadap gas CO<sub>2</sub> juga memiliki karakteristik yang hampir sama dengan perubahan suhu. Kondisi tersebut ditunjukkan dalam Gambar 7.

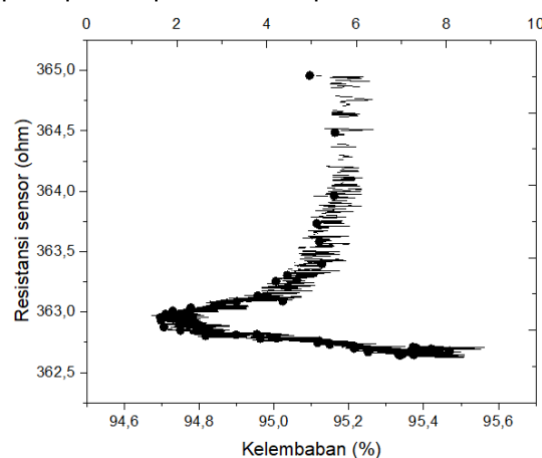


Gambar 7. Grafik hubungan Resistivitas sensor terhadap gas CO<sub>2</sub>

Penurunan resistansi sensor SnO<sub>2</sub> saat kadar CO<sub>2</sub> meningkat dapat terjadi pada sensor yang dimodifikasi secara khusus untuk merespons CO<sub>2</sub> melalui mekanisme donasi elektron. Dalam kondisi ini, molekul CO<sub>2</sub> yang berinteraksi dengan permukaan SnO<sub>2</sub> dapat menghasilkan reaksi kimia yang meningkatkan jumlah elektron dalam pita konduksi, sehingga resistansi turun. Misalnya, molekul CO<sub>2</sub> dapat bereaksi dengan molekul air (H<sub>2</sub>O) yang teradsorpsi di permukaan sensor, membentuk ion bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sambil menyumbangkan elektron ke material SnO<sub>2</sub> (Saad et al., 2024).

### Hubungan resistansi terhadap kelembaban

Kondisi yang berbeda ditunjukkan oleh hubungan resistansi sensor SnO<sub>2</sub> terhadap kelembapan udara (Gambar 8). Hubungan tersebut digambarkan pada grafik di atas. Meskipun demikian, beberapa penelitian menunjukkan resistansi sensor SnO<sub>2</sub> menurun seiring dengan peningkatan kadar kelembapan udara. Resistansi sensor SnO<sub>2</sub> dapat dipengaruhi oleh kelembapan, tetapi efeknya tidak selalu sederhana. Secara umum, peningkatan kelembapan dapat menyebabkan penurunan resistansi sensor, terutama dalam konteks gas sensor yang beroperasi pada prinsip adsorpsi dan desorpsi.



Gambar 8. Grafik Hubungan resistansi sensor terhadap kelembaban

Ketika kelembapan meningkat, molekul air dapat teradsorpsi pada permukaan SnO<sub>2</sub>, yang dapat meningkatkan konduktivitas material. Ini terjadi karena molekul air dapat berfungsi sebagai donor proton, yang meningkatkan jumlah pembawa muatan (elektron) di dalam material. Akibatnya, resistansi sensor dapat menurun (Zang et al., 2021; Li et al., 2024).

Meskipun hubungan resistansi dengan kelembapan belum terlihat jelas pada penelitian ini, potensi pengembangan lebih lanjut tetap terbuka. Optimalisasi desain sensor, misalnya dengan rekayasa ukuran partikel SnO<sub>2</sub> atau penambahan material komposit, berpotensi meningkatkan sensitivitas terhadap kelembapan. Hal ini penting karena kelembapan merupakan salah satu faktor dominan yang memengaruhi laju pembusukan,

khususnya pada produk pangan segar.

## PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian, sensor gas berbasis SnO<sub>2</sub> yang dibuat dengan metode elektroplating memiliki respon terhadap gas-gas yang dikeluarkan oleh urap sayuran pada saat pembusukan. Respon tersebut dinyatakan dengan perubahan suhu, kadar CO<sub>2</sub>, kelembaban, dan resistansi terhadap waktu pembusukan urap sayur.

Selain itu juga dihasilkan hubungan antara resistansi dengan suhu, kadar CO<sub>2</sub> dan kelembaban. Semakin tinggi suhu dan kadar oksigen maka resistansi sensor semakin menurun. Namun pada penelitian ini tidak diperoleh hubungan resistansi dan kelembaban. Walau demikian hasil ini tetap memberikan landasan penting bagi penelitian lanjutan guna meningkatkan sensitivitas sensor terhadap faktor tersebut.

Untuk aplikasi sensor ini dapat diintegrasikan dalam sistem penyimpanan makanan yang aman sebagai indikator dini pembusukan makanan.

## REFERENSI

- Abdullah, N., Ismail, N. M., & Nuruzzaman, D. M. (2018). Preparation of tin oxide (SnO<sub>2</sub>) thin films using thermal oxidation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 319(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012022>
- Banurea, R., Nasution, T. I., Nainggolan, I., Balyan, M., & Lubis, N. S. (2023). Characterization of the sensing properties of zinc oxide chitosan as an acetone sensor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2672(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2672/1/012002>
- Budiana, B., Situmorang, C. B., Maulidiah, H. M., & Puspita, W. R. (2023). Effect of current, voltage, temperature, and time variations on thickness of steel using elektroplating process. *Jurnal Integrasi*, 15(2), 97–103. <https://doi.org/10.30871/ji.v15i2.6519>
- Feng, Z., Gaiardo, A., Valt, M., Fabbri, B., Casotti, D., Krik, S., Vanzetti, L., Della Ciana, M., Fioravanti, S., Caramori, S., Rota, A., & Guidi, V. (2022). Investigation on sensing performance of highly doped Sb/SnO<sub>2</sub>. *Sensors*, 22(3), 1233. <https://doi.org/10.3390/s22031233>
- Kim, T., & Kim, H.-D. (2024). The superior response and high reproducibility of the memristor-integrated low-power transparent SnO<sub>2</sub> gas sensor. *Micromachines*, 15(12), 1411. <https://doi.org/10.3390/mi15121411>
- Kumar, A., Castro, M., & Feller, J. F. (2023). Review on sensor array-based analytical technologies for quality control of food and beverages. *Sensors*, 23(8), 4017. <https://doi.org/10.3390/s23084017>
- Lee, S., Kim, S., Nam, G. B., Eom, T. H., & Jang, H. W. (2022). Chemoresistive gas sensors for food quality monitoring. *Journal of Semiconductor Technology and Science*, 22(4), 244–258. <https://doi.org/10.5573/JSTS.2022.22.4.244>
- Lee, Z. Y., Hawari, H. F., Djaswadi, G. W., & Kamarudin, K. (2021). A highly sensitive room temperature CO<sub>2</sub> gas sensor based on SnO<sub>2</sub>-rGO hybrid composite. *Materials*, 14(3), 522. <https://doi.org/10.3390/ma14030522>
- Li, P., Wang, Y., Chen, J., Zhang, L., & Zhou, Q. (2024). A high-performance humidity sensor based on 3D porous SnO<sub>2</sub>-encapsulated MCM-48 for real-time breath monitoring and contactless gesture detection. *Materials Advances*, 5(3), 456–468. <https://doi.org/10.1039/D3MA00866E>
- Liu, P., Wang, J., Jin, H., Ge, M., Zhang, F., Wang, C., Sun, Y., & Dai, N. (2023). SnO<sub>2</sub> mesoporous nanoparticle-based gas sensor for highly sensitive and low concentration formaldehyde detection. *RSC Advances*, 13, 2256–2264. <https://doi.org/10.1039/D2RA06745E>
- Ma, M., Yang, X., Ying, X., Shi, C., Jia, Z., & Jia,

- B. (2023). Applications of gas sensing in food quality detection: A review. *Foods*, 12(21), 1–21. <https://doi.org/10.3390/foods12213966>
- Malik, R., Tomer, V. K., Chaudhary, V., Dahiya, M. S., Sharma, A., Nehra, S. P., Duhan, S., & Kailasam, K. (2017). An excellent humidity sensor based on In–SnO<sub>2</sub> loaded mesoporous graphitic carbon nitride. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(21), 14134–14143. <https://doi.org/10.1039/C7TA02860A>
- Ratih, Y. W., Sohilait, D. A., & Widodo, R. A. (2020). Uji aktivitas dekomposisi dari beberapa inokulum komersial pada berbagai jenis bahan berdasarkan jumlah CO<sub>2</sub> yang terbentuk. *Jurnal Tanah dan Air (Soil Water Journal)*, 15(2), 93–101. <https://doi.org/10.31315/jta.v15i2.4004>
- Saad, R., Abdelkarem, K., El Sayed, A. M., Shaban, M., Ahmed, I. A., Tammam, M. T., & Hamdy, H. (2024). Characterization and enhanced carbon dioxide sensing performance of spin-coated Na- and Li-doped and Co-doped cobalt oxide thin films. *RSC Advances*, 14(49), 36852–36867. <https://doi.org/10.1039/d4ra06847e>
- Sun, Y., Huang, X., Meng, F., & Liu, J. (2004). Study of influencing factors of dynamic measurements based on SnO<sub>2</sub> gas sensor. *Sensors*, 4(6–7), 95–104. <https://doi.org/10.3390/s40670095>
- Toifur, M. (2014). Memahami resistivitas berbagai jenis probe arus-tegangan. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI Jateng DIY*, April, 1–7. Retrieved from <http://hfi-diyjateng.or.id/>
- Velumani, M., Meher, S. R., & Alex, Z. C. (2018). Impedometric humidity sensing characteristics of SnO<sub>2</sub> thin films and SnO<sub>2</sub>–ZnO composite thin films grown by magnetron sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(15), 3999–4010. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-8342-z>
- Wang, Y., Liu, L., Sun, F., Li, T., Zhang, T., & Qin, S. (2021). Humidity-insensitive NO<sub>2</sub> sensors based on SnO<sub>2</sub>/rGO composites. *Frontiers in Chemistry*, 9, Article 681313. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.681313>
- Wu, Q.-H., Li, J., & Sun, S.-G. (2011). Nano SnO<sub>2</sub> gas sensors. *Current Nanoscience*, 6(5), 525–538. <https://doi.org/10.2174/157341310797574934>
- Yulianto, B., Gumilar, G., & Septiani, N. L. W. (2015). SnO<sub>2</sub> nanostructure as pollutant gas sensors: Synthesis, sensing performances, and mechanism. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, Article 694823. <https://doi.org/10.1155/2015/694823>
- Zhang, Y., Liu, J., Wang, H., Chen, X., & Li, Z. (2021). Preparation and research of a high-performance ZnO/SnO<sub>2</sub> humidity sensor. *Sensors*, 21(1), 123–135. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35009835/>