

Pembangunan Penderia Gas Toluena Berasaskan Komposit Logam Oksida-Grafin

(Development of Acetone Gas Sensor Based on Metal Oxide-Graphene Based Composite)

Puteri Nur Aisyah Abd Rahim^a, Norazreen Abd Aziz^{a*}, Mohd Rofei Mat Hussin^b & Mohd Faizol Abdullah^b

^aDepartment of Electrical, Electronic and Systems Engineering, Faculty of Engineering & Built Environment,
 Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

^bMIMOS Berhad, Malaysia

*Corresponding author: norazreen@ukm.edu.my

Received 24 October 2025, Received in revised form 7 June 2026
 Accepted 7 July 2026, Available online 30 September 2026

ABSTRACT

Toluene is one of volatile organic compound gases that contain toxins that can harm human health even at low concentration. Therefore, a high-sensitivity toluene gas sensor is important to detect toluene gas that is released at low concentration in the environment. The method of synthesizing the sensing materials using the CVD method using high-tech equipment causing the production cost of sensors to become expensive and sensing materials that are made up of metal oxide only operate at high temperature. This study is to develop a highly sensitive Metal Oxide-Graphene-based toluene gas sensor that can detect the composition of toluene gas at low concentrations. This Metal Oxide-Graphene sensing material will be synthesized using a simple and cheap technique. The selectivity, responsivity and stability of the toluene gas sensor developed will be analysed. The sensing material of this sensor will be synthesized, and the sensor will be developed and tested for its sensitivity to toluene gas. Material characterization will be done to examine its crystal shape and plane as well as the morphology of the material and to confirm the presence of graphene in the synthesized sensing material. The Metal Oxide-Graphene sensing material synthesized in this study is Titanium Oxide-RGO through hydrothermal method. This TiO-RGO sensing material has a nanosphere morphology and is in the form of nanocrystalline anatase. In conclusion, this TiO-RGO sensor can detect toluene gas at a concentration of 6 ppm with a response rate of 0.604% at room temperature in a condition of relative humidity of 7±%.

Keywords: Gas sensor; toluene; graphene; titanium oxide

ABSTRAK

Toluena merupakan salah satu gas sebatian organik meruap yang mengandungi toksik yang dapat membahayakan kesihatan manusia walaupun dibebaskan adalah pada tahap rendah. Justeru, penderia gas toluena yang berkepekaan tinggi adalah penting untuk membantu mengesan kadar pembebasan gas toluena yang rendah pada persekitaran. Kaedah mengukur gas sedia ada yang menggunakan alat kromatograf adalah tidak efisien oleh kerana peralatannya yang besar. Kaedah sintesis bahan peka menggunakan kaedah CVD menggunakan peralatan yang berteknologi tinggi menjadikan kos penghasilan penderia mahal. Selain itu, penderia yang bahan pekanya yang menggunakan logam oksida sahaja beroperasi pada suhu tinggi. Oleh itu, kajian ini adalah untuk membangunkan penderia gas toluena berasaskan Logam Oksida-Grafin berkepekaan tinggi yang boleh mengesan komposisi gas toluena pada kepekatan yang rendah pada suhu bilik. Bahan peka Logam Oksida-Grafin ini akan disintesis menggunakan teknik yang mudah dan murah. Dalam pada itu, pemilihan, tahap tindak balas serta kestabilan penderia gas toluena yang dibangunkan akan dianalisa. Bahan peka penderia ini akan disintesis dan penderia akan dibangunkan dan diuji kepekaannya

terhadap gas toluena. Pencirian bahan akan dilakukan bagi meneliti bentuk kristal dan satahnya serta morfologi bahan dan menentusahkan kehadiran grafin di dalam bahan peka yang disintesis. Setelah itu, hasil daripada pengujian kepekaan penderia serta pencirian bahan peka yang dijalankan akan dianalisa. Bahan peka Logam Oksida-Grafin yang disintesis di dalam kajian ini ialah Titanium Oksida-RGO melalui kaedah hidroterma. Bahan peka TiO-RGO ini bermorfologi nanosfera dan berbentuk nanokristal anatase. Kesimpulannya, penderia TiO-RGO ini boleh mengesan gas toluena pada kepekatan 6 ppm dengan kadar tindak balas 0.604% pada suhu bilik dengan kelembapan relatif 7±%.

Keywords: Penderia gas; toluena; grafin; titanium oksida

PENGENALAN

Toluena ialah cecair jernih dan tidak berwarna yang tersejat dengan cepat menjadi wap apabila terdedah kepada udara pada suhu bilik. Ia mempunyai bau yang tajam atau manis dan nama IUPAC sistematiknya ialah metilbenzena dan mempunyai molekul formula C₇H₈. Toluena ditemui secara semula jadi dalam minyak mentah, dan digunakan di dalam proses penapisan minyak dan pembuatan cat, lakuer, bahan letupan dan gam. Di kawasan persendirian seperti rumah, toluena boleh didapati dalam pencair cat, pembersih berus cat, pengilat kuku, gam, dakwat dan pencuci kotoran. Toluena juga terdapat dalam buangan ekzos kereta dan asap rokok. Apabila toluena tertumpah ke dalam tanah atau dilupuskan secara tidak betul, ia boleh meresap ke dalam tanah dan mencemarkan telaga serta sungai berdekatan. Toluena boleh kekal tidak berubah untuk masa yang lama di dalam tanah atau air yang tidak bersentuhan dengan udara.

Pencemaran udara dalam bangunan telah menjadi kebimbangan disebabkan oleh kepekatan kimia dalam bangunan yang tinggi dan kebanyakan manusia menghabiskan masa di dalam bangunan. Pendedahan kepada toluena kebiasaannya adalah melalui pernafasan. Antara gejala keracunan toluena ialah sakit kepala, pening, euforia, loya, muntah, dan ketidakseimbangan elektrolit (Breyse 2018).

Dapat dilihat kini, penyelidikan tentang penderia gas semakin giat dijalankan. Terdapat pelbagai jenis penderia gas sedia ada seperti antaranya (Aziz et al. 2022) penderia gas pemangkin, penderia gas elektrokimia, penderia gas inframerah, penderia gas optik, penderia gas rintangan kimia dan penderia gas SAW. Penderia gas perintang kimia

mempunyai struktur sederhana. Oleh itu, kos pembuatan mereka adalah sangat rendah (Dey 2018).

Kaedah untuk mengukur gas yang sedia ada seperti kromatograf menggunakan peralatan yang besar (Bartle & Myers 2002) menjadikan ia agak tidak efisien dan tidak sesuai untuk diletakkan di pelbagai tempat. Penderia gas toluena yang menggunakan hanya bahan peka logam oksida pula didapati hanya berfungsi pada suhu operasi yang tinggi (Subin David et al. 2020). Hal ini menyebabkan penderia perlu dibekalkan dengan kuasa tinggi. Terdapat juga penderia gas toluena yang mampu beroperasi pada suhu bilik menggunakan kaedah sintesis *Chemical Vapor Deposition* (CVD) (Pyo et al. 2019). Namun, sintesis bahan peka melalui kaedah CVD menggunakan peralatan yang berteknologi tinggi menjadikan kos penghasilan bahan peka tersebut mahal.

Jadual 1 menunjukkan 15 kajian penderia gas VOC dalam tempoh tujuh tahun lalu daripada 2017 sehingga 2021 yang menggunakan pelbagai bahan peka yang dapat mengesan gas toluena dan gas VOC yang lain melalui kaedah sintesis yang berbeza. Berdasarkan Jadual 1, dapat dilihat bahawa terdapat kajian yang membangunkan penderia yang dapat mengesan kehadiran gas pada kepekatan rendah namun beroperasi pada suhu tinggi dan kajian yang menghasilkan penderia bersuhu bilik dapat mengesan kehadiran gas pada kepekatan yang agak tinggi.

Oleh itu, tujuan kajian ini adalah untuk membangunkan bahan peka yang berkepekatan tinggi yang boleh mengesan komposisi gas toluena pada kepekatan yang rendah dan beroperasi pada suhu bilik. Seterusnya, bahan penderia gas toluena berasaskan bahan terdop grafin akan disintesis menggunakan teknik yang mudah dan murah.

JADUAL 1. Penderia gas dengan bahan peka berbeza dan kaedah sintesis berbeza dalam mengesan gas VOC berbeza

Bahan peka	Gas yang dikesan	Kepekatan penderia terhadap gas (ppm)	Suhu beroperasi (°C)	Kaedah sintesis bahan peka	Kajian
Logam oksida	Toluena	500	200	Hidroterma	Zhang et al. 2019
Logam oksida	Toluena	200	180	Hidroterma	Zhang et al. 2020
Logam oksida	Toluena	100	225	Solvoterma	Wang et al. 2019
Logam oksida	Toluena	50	175	<i>Spray pyrolysis</i>	Wang et al. 2021
RGO	Toluena	300	27	<i>Chemical reduction</i>	Minitha et al. 2018

bersambung...

...sambungan

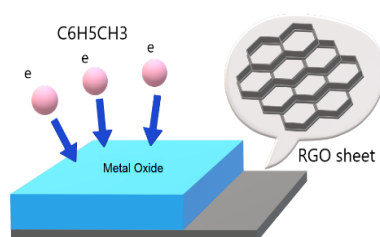
RGO-Logam oksida	Toluena	500	27	CVD	Seekaew et al. 2019
RGO-Logam oksida	Toluena	1	250	Precipitation	Pargoletti et al. 2020
RGO-Logam oksida	Toluena	100	300	Solvoterma	Hassan et al. 2017
RGO-Logam oksida	Toluena	5	120	Hidroterma	Bai et al. 2016
TMD	Toluena	100	27	Solvoterma	Taufik et al. 2020
TMD-Grafin	Nitrogen dioksida	0.2	75	Solvoterma	Shao et al. 2019
TMD-Grafin	Formaldehid	10	27	Hidroterma	Wang et al. 2020
TMD-Grafin	Nitrogen dioksida	4	27	Exfoliation	Yan et al. 2020
TMD-Grafin	Nitrogen dioksida	1	27	Exfoliation	Paolucci et al. 2019
TMD-Grafin	Nitrogen dioksida	1	27	Solvoterma	Yi et al. 2020

METODOLOGI

MEKANISMA PENDERIAAN GAS TMD-GRAFIN

Mekanisma penerimaaan bahan berasaskan grafin dan logam oksida adalah berasaskan mekanisme penyerapan dan pemindahan caj (Hashtroudi et al. 2020). Titanium Oksida (TiO) adalah merupakan contoh logam oksida yang digunakan dalam mengesan gas VOC. Pemindahan elektron dari grafin oksida terturun (RGO) ke permukaan logam oksida membawa kepada peningkatan kepekatan elektron dalam lapisan TiO serta peningkatan kepekatan lubang dalam lapisan RGO. Oleh itu, berlaku penurunan dalam kerintangan filem hibrid.

Lapisan penyusutan sedemikian memperkenalkan medan elektrostatis yang kuat berhampiran permukaannya. Medan elektrostatis ini meningkatkan penceraian molekul sasaran yang membawa kepada pengurangan tenaga pengaktifan untuk penyerapan atau penyahjerapan spesies sasaran pada suhu operasi yang rendah (Shafiei et al. 2018). Apabila terdedah kepada gas penurunan seperti toluena, elektron dijerap oleh logam oksida-RGO yang membawa kepada peningkatan kawasan *electron-depletion* di bahagian logam oksida dan penurunan dalam kawasan *hole-depletion* di bahagian RGO merujuk kepada Rajah 1.

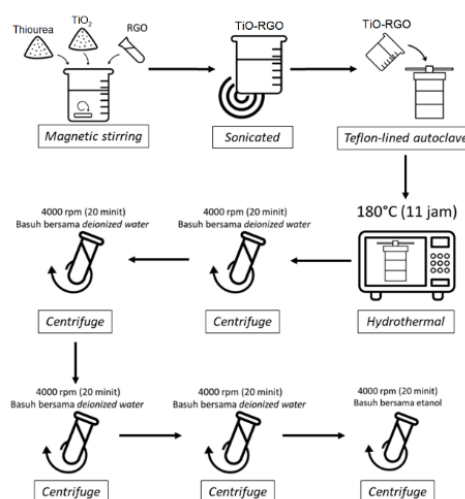


RAJAH 1. Pemindahan elektron daripada gas toluena kepada lapisan TMD-RGO

KAEDAH SINTESIS TITANIUM OKSIDA-RGO

Antara bahan-bahan yang diperlukan untuk mensintesis bahan peka TiO-RGO ialah thiourea ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$), titanium dioksida (TiO_2), larutan grafin oksida (4.0 mg/ml), air ternyahion (DI) dan etanol.

1.7435 g thiourea dan 1.7466 g titanium dioksida telah dimasukkan ke dalam 0.39 ml larutan grafin oksida (4.0 mg/ml) untuk dikacau. Sebatian tersebut akan disonikasi selama 25 minit dan dialihkan ke dalam *teflon-lined autoclave*. Kemudian, *teflon-lined autoclave* tersebut akan dimasukkan ke dalam pembakaran untuk dibakar selama 11 jam pada suhu 180°C . Setelah disejukkan secara semula jadi, sebatian tersebut akan menjalani proses sentrifugasi. Bahan TiO-RGO akan dibasuh selama empat kali bersama air ternyahion. Basuhan terakhir akan menggunakan etanol. Hasil mendapan tersebut akan disimpan. Proses mensintesis TiO-RGO ini dapat dirujuk pada Rajah 2.

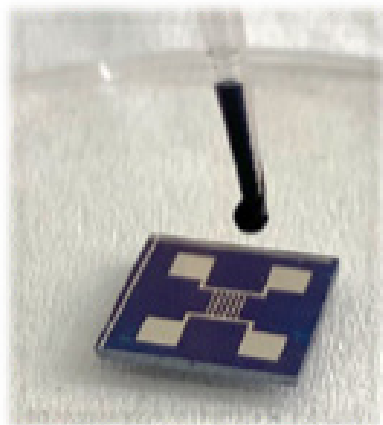


RAJAH 2. Proses mensintesis bahan peka TiO-RGO

PEMBANGUNAN PENDERIA

Pembangunan penderia gas toluena dimulakan dengan mencuci *Interdigitated electrode* (IDE) yang telah dibangunkan oleh penyelidik MIMOS.

Setelah dikeringkan, bahan peka yang telah siap disintesis di *dropcast* sebanyak 300 μ L menggunakan mikropipet pada IDE untuk mencipta kawasan aktif untuk gas penderia seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.

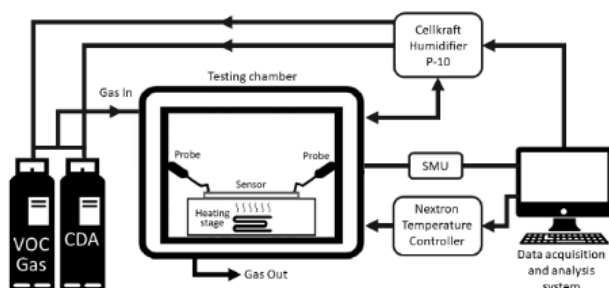


RAJAH 3. bahan peka TiO-RGO keatas IDE

PENGUJIAN KEPEKAAN PENDERIA

Rajah 4 menunjukkan peralatan pengukuran yang digunakan untuk menyiasat kepekaan penderiaan terhadap C₇H₈.

Bagi memastikan pengukuran yang konsisten, tempoh aliran toluena dihidupkan dan dimatikan telah ditetapkan pada kadar yang sama untuk semua ukuran. Untuk merekodkan tindak balas dan kelajuan pemulihan, ukuran direkodkan secepat mungkin kerana CDA telah diperkenalkan di dalam ruang gas. Selepas 45 saat, C₇H₈ akan dilepaskan ke dalam ruang serta-merta.



RAJAH 4. Kaedah pengujian penderia terhadap C₇H₈

Tindak balas penderia, R_s dikira dengan perubahan dalam rintangan apabila terdedah kepada analit C₇H₈ dan

udara iaitu CDA dalam kajian ini seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (1), yang mana R_g ialah rintangan dengan kehadiran gas C₇H₈ dan R_a ialah rintangan elektrik penderia gas semasa terdedah kepada CDA sahaja. Sementara itu, masa tindak balas digambarkan sebagai masa yang diperlukan untuk penderia C₇H₈ bertindak balas pada 90% daripada tahap tepu dan masa pemulihan ialah jumlah masa yang diperlukan untuk memulihkan 10% daripada nilai awal apabila terdedah kepada udara. Kepekaan (unit=%/ppm) bagi penderia TiO-RGO dikira daripada perubahan R_s untuk pelbagai kepekatan gas toluena.

$$R_s = \frac{R_a - R_g}{R_a} \times 100\% \quad (1)$$

PENCIRIAN BAHAN PEKA

Bahan peka merupakan elemen yang paling penting bagi penderia gas. Bahan peka yang disintesis akan menentukan kestabilan, kepemilihan, kepekaan dan tindakbalas penderia terhadap gas. Terdapat beberapa bahan peka yang mendapat perhatian meluas dikalangan para penyelidik kerana sangat berpotensi untuk mengesan gas-gas VOC. Antara bahan peka tunggal yang sering digunakan adalah logam oksida (MO), grafin oksida terturun (RGO), transition metal dichalcogenides (TMD). Oleh kerana terdapat beberapa kelemahan dalam bahan peka tunggal dari segi tindak balas, ciri pemulihan dan pemilihan yang lemah, para penyelidik menumpukan kajian ke atas bahan nanokomposit yang menggabungkan beberapa bahan tunggal untuk menjadikannya lebih efektif. Antara bahan nanokomposit yang mendapat perhatian adalah logam oksida-RGO dan TMD-RGO.

Terdapat tiga jenis pencirian yang akan dilakukan ke atas bahan peka iaitu Mikroskop Pengimejan Elektron Pelepasan Medan (FESEM), Analisis Pembelauan X-Ray dan Spektroskopi Raman. FESEM adalah untuk menganalisa struktur mikro dan morfologi nanokomposit TiO-RGO manakala analisis pembelauan X-Ray adalah untuk menganalisa jenis kristal dan satahnya. Spektroskopi Raman adalah untuk menganalisa kehadiran grafin di dalam bahan komposit yang disintesis.

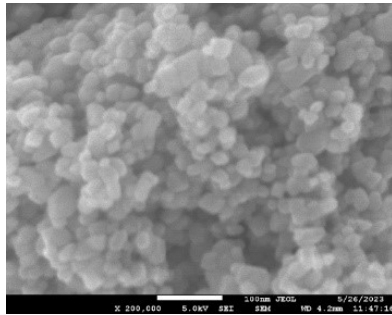
ANALISIS HASIL KAJIAN

Hasil pencirian bahan peka akan dianalisis untuk mengesan kehadiran grafin oksida terturun, jenis kristal dan morfologi serta sifat permukaan komposit TiO-RGO. Antara parameter yang diambil kira semasa analisis tindak balas penderia terhadap gas toluena ialah kestabilan, kepemilihan, kepekaan, kadar tindak balas dan kebolehulangan.

HASIL DAN PERBINCANGAN

MIKROSKOP PENGIMEJAN ELEKTRON PELEPASAN MEDAN (FESEM)

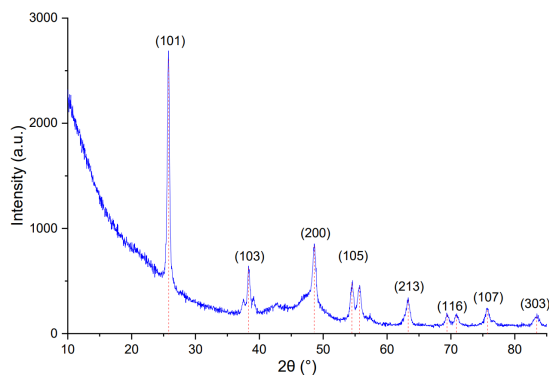
Mikroskop Pengimejan Elektron Pelepasan Medan (FESEM) digunakan bagi menganalisa morfologi bahan peka. Morfologi bahan peka TiO-RGO menunjukkan bahawa bahan peka ini berbentuk nanosfera seperti yang ditunjukkan pada Rajah 5.



RAJAH 5. Morfologi bahan peka TiO-RGO

ANALISIS PEMBELAUAN X-RAY (XRD)

Analisis pembelauan X-Ray ini dijalankan untuk menentukan jenis kristal dan satah bahan peka yang disintesis. Rajah 6 menunjukkan hasil analisis pembelauan X-Ray yang dijalankan ke atas bahan peka TiO-RGO. Hasil pembelauan ini dapat dilihat bahawa ia hampir sama dengan kajian sebelum ini yang menggunakan bahan peka titanium dioksida-RGO (Huang et al. 2020). Hasil analisis pembelauan X-Ray ini, dapat disimpulkan bahawa bahan peka TiO-RGO ini kristalnya berbentuk nanokristal anatase iaitu merupakan salah satu daripada struktur kristal tetragonal.

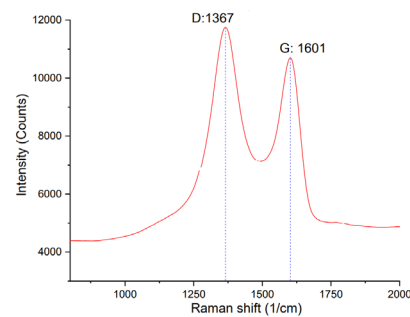


RAJAH 6. Analisis pembelauan X-Ray bagi bahan peka TiO-RGO

SPEKTROSKOPI RAMAN

Spektroskopi Raman dijalankan terhadap bahan peka TiO-RGO untuk menentusahkan kehadiran grafina oksida terturun dalam bahan peka yang disintesis. Jalur D dan jalur G pada spektrum Raman bagi grafina lazimnya akan berada pada 1350 cm^{-1} dan 1583 cm^{-1} masing-masing seperti dalam kajian lepas (Balasubramani et al. 2023). Jalur D menunjukkan ketidaksempurnaan atau kecacatan pada struktur grafina tersebut manakala jalur G menunjukkan susunan struktur dan kualiti pada kekisi grafina tersebut.

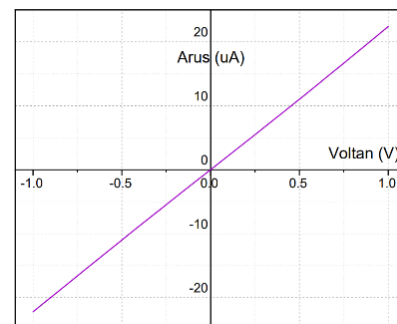
Rajah 7 menunjukkan spektrum Raman bagi bahan peka TiO-RGO yang dihasilkan. Berdasarkan daripada rajah tersebut, dapat dilihat bahawa keamatan jalur D lebih tinggi daripada jalur G dan ini menunjukkan bahawa pada grafina tersebut terdapat kecacatan dan ketidaksempurnaan yang lebih tinggi. Tapak kecacatan ini penting bagi penerima kerana ia akan menjadi tapak penyerapan terhadap gas VOC.



RAJAH 7. Spektrum Raman bagi bahan peka TiO-RGO

PENCIRIAN IV

Ciri IV adalah penting untuk menentukan kawasan operasi, kecekapan, lineariti dan ciri prestasi penerima. Merujuk kepada Rajah 8, perintang kimia ini bersifat ohmik dan mempamerkan hubungan berkadar terus antara voltan dan arus serta menghasilkan garis lurus pada lengkung IV.

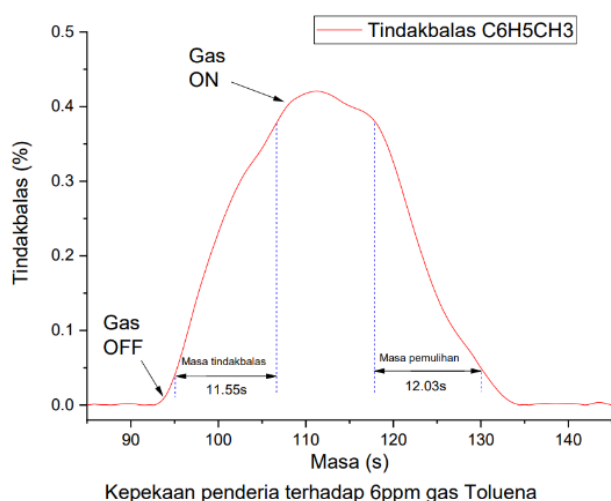


RAJAH 8. Spektrum Raman bagi bahan peka TiO-RGO

KADAR TINDAK BALAS

Kadar tindak balas terhadap gas merujuk kepada kepekaan dan tindak balas penderia gas terhadap kehadiran atau kepekatan gas tertentu. Ia mengukur perubahan dalam rintangan penderia sebagai tindak balas kepada perubahan dalam kepekatan gas.

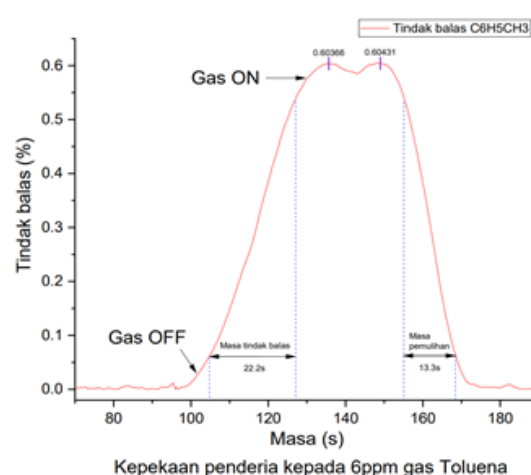
Rajah 9 menunjukkan kadar tindak balas penderia terhadap 6 ppm gas toluena pada suhu bilik dengan kadar kelembapan relatif $7\pm$ bersama 1 nlpm CDA. Penderia TiO-RGO ini mengambil masa 11.55 saat untuk mencapai 90% tindak balas penuh setelah menjerap gas toluena dan masa pemulihannya setelah gas dinyahjerap ialah 12.03 saat.



RAJAH 9. Kadar tindak balas penderia TiO-RGO terhadap gas toluena

KEPEKAAN

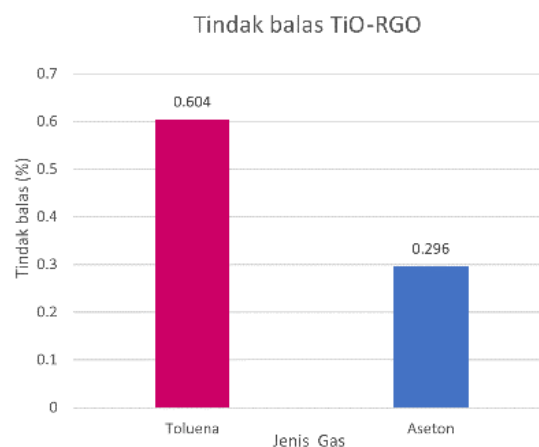
Kepekaan penderia gas merujuk kepada keupayaan penderia untuk mengesan dan bertindak balas terhadap perubahan dalam kepekatan gas sasaran. Ia mengukur keberkesanan penderia dalam menukar perubahan dalam kepekatan gas kepada isyarat elektrik yang boleh diukur. Kepekaan yang tinggi adalah salah satu ciri penderia yang penting penderia gas bagi mengesan kepekatan gas rendah, membolehkan sistem amaran awal untuk potensi bahaya. Kepekaan penderia TiO-RGO ini boleh dilihat pada Rajah 10 yang mana penderia memberikan tindak balas sebanyak 0.604% apabila didedahkan kepada 6 ppm gas toluena dan 1 nlpm CDA. Penderia ini diuji dengan kadar kelembapan relatif sebanyak $7\pm\%$ pada suhu bilik.



RAJAH 10. Kepekaan penderia terhadap gas toluena

KEPEMILIHAN

Kepemilihan ialah keupayaan penderia untuk mengesan dan bertindak balas secara khusus kepada gas tertentu sambil meminimumkan atau mengabaikan pengaruh atau gangguan gas lain yang terdapat dalam persekitaran serta faktor persekitaran. Penderia hanya memberikan 0.296% tindak balas terhadap gas aseton berbanding gas toluena sebanyak 0.604% seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 11. Dapat disimpulkan bahawa penderia TiO-RGO ini lebih peka terhadap gas toluena berbanding gas aseton.

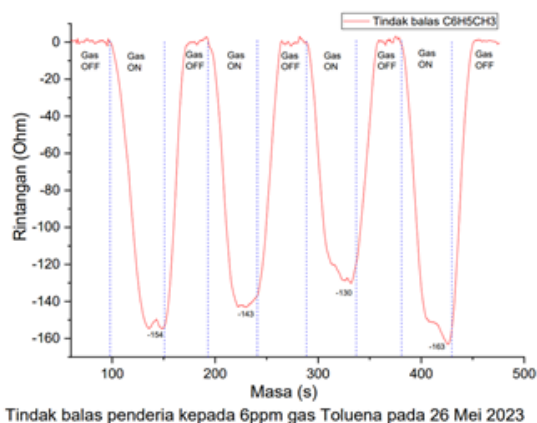


RAJAH 11. Tindak balas penderia apabila didedahkan kepada dua gas yang berbeza

KESTABILAN

Kestabilan ialah keupayaan penderia gas untuk memberikan tindakbalas yang sama yang telah dihasilkan untuk parameter penderia dalam tempoh masa tertentu. Kestabilan ialah keupayaan penderia untuk memberikan ukuran yang

tepat dan boleh berulang kali tanpa kesusahan atau kemerosotan yang ketara dalam sifat penderiaannya. Kestabilan ialah faktor kritikal dalam aplikasi penderiaan gas kerana ia dapat memastikan kebolehpercayaan, ketepatan dan ketekalan jangka panjang sensor dalam mengesan dan mengukur kepekatan gas. Penderia gas yang stabil akan mempamerkan perubahan minimum dalam isyarat keluaran dan ciri tindak balasnya dalam tempoh operasi yang panjang. Penderia hanya didedahkan kepada 1 nlpm CDA sahaja selama 45 saat pada $7\pm\%$ kadar kelembapan relatif pada suhu bilik. Setelah itu, penderia didedahkan kepada 6 ppm gas toluena bersama 1 nlpm CDA pada $7\pm\%$ kadar kelembapan relatif selama 45 saat pada suhu bilik. Kitaran ini diulang sebanyak empat kali bagi menilai kestabilan perubahan rintangan pada penderia apabila didedahkan kepada 6 ppm gas toluena. Rajah 12 menunjukkan tindak balas penderia terhadap empat kitaran pengujian.



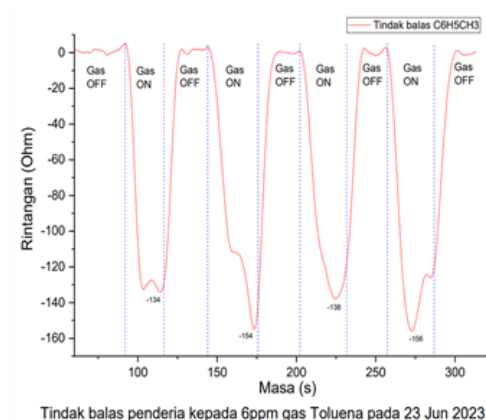
RAJAH 12. Tindak balas penderia kepada 4 kitaran gas toluena

KEBOLEHULANGAN

Kebolehulangan adalah keupayaan penderia untuk menghasilkan semula tindak balas yang sama untuk kepekatan gas yang sama di bawah keadaan yang sama secara konsisten. Setelah hampir sebulan, penderia telah diuji sekali lagi di bawah keadaan yang sama.

Hasil pengujian kali kedua ini boleh dilihat pada Rajah 13. Pada kitaran pertama purata nilai perubahan rintangan apabila penderia terdedah kepada gas toluena ialah 147.5 Ohm dan purata nilai perubahan rintangan pada pengujian kali kedua ialah 145.5 Ohm. Berdasarkan keadaan ini dapat

disimpulkan bahawa bahan TiO-RGO ini masih berfungsi dengan baik dapat memberikan tindak balas yang stabil pada pengujian kali kedua dalam jarak masa satu bulan.

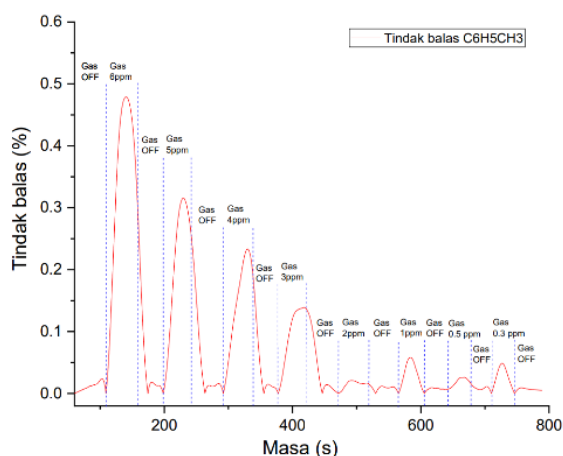


RAJAH 13. Tindak balas penderia TiO-RGO pada pengujian kali kedua

HAD PENGESANAN

Had pengesanan ialah kuantiti atau kepekatan terendah analit yang boleh dikesan dengan pasti dengan kaedah analisis yang dilaksanakan yang dapat dikesan daripada pengukuran sampel yang mengandungi analit yang boleh dibezakan daripada kepekatan yang diperoleh daripada pengukuran sampel kosong.

Kepekaan penderia terhadap kepekatan gas toluena yang berbeza telah diuji bagi mengenal pasti had pengesanan penderia. Pengujian bermula dengan pendedahan penderia kepada 1 nlpm CDA dengan kadar kelembapan relatif $7\pm\%$ pada suhu bilik tanpa kehadiran gas toluena selama 45 saat. Setelah itu, penderia didedahkan kepada 6 ppm gas toluena selama 45 saat. Gas toluena akan dimatikan untuk 45 saat kemudian dan akan didedahkan semula kepada gas toluena berkepekatan 5 ppm untuk 45 saat yang seterusnya. Proses akan berulang dan kepekatan gas toluena yang didedahkan kepada penderia berkurangan kepada 4 ppm, 3 ppm, 2 ppm, 1 ppm, 0.5 ppm dan 0.3 ppm. Tindak balas penderia terhadap kepekatan gas toluena yang berbeza dapat dirujuk pada Rajah 14. Dapat dilihat bahawa penderia TiO-RGO ini masih mampu memberikan tindak balas apabila didedahkan kepada nilai kepekatan gas toluena yang terendah iaitu 0.3 ppm.



RAJAH 14. Tindak balas penderia terhadap kepekatan gas toluena yang berbeza

KESIMPULAN

Bahan peka penderia Logam Oksida-Grafin yang disintesis ialah TiO-RGO melalui kaedah hidroterma. Hasil daripada pencirian bahan yang dilakukan, morfologi dan bentuk kristal TiO-RGO ini dapat dikenal pasti bermorfologi nanosfera dan bentuk kristalnya ialah nanokristal anatase. Grafin oksida terturun juga telah disahkan kehadirannya di dalam bahan peka yang disintesis melalui spektroskopi Raman.

Setelah tindak balas penderia terhadap gas toluena dianalisa, dapat disimpulkan objektif kajian ini telah tercapai yang mana penderia yang dibangunkan berkepekatan tinggi dan dapat mengesan gas toluena pada komposisi yang rendah iaitu 0.3 ppm. Penderia ini boleh mengesan kehadiran gas toluena pada kepekatan yang rendah iaitu 6 ppm apabila diuji dalam keadaan kelembapan relatif $7\pm\%$. Penderia gas toluena yang dibangunkan juga memberikan kepemilihan yang baik berbanding gas aseton.

Penderia juga dapat bertindak balas dengan cepat sebaik sahaja gas toluena didedahkan pada kadar masa sekitar 11.55 saat dan boleh kembali kepada keadaan asal dengan pantas dengan kadar masa 12.03 saat apabila gas toluena dimatikan. Tahap kestabilan penderia yang dibangunkan juga boleh dikategorikan dalam kelas yang baik kerana masih memberikan respons yang sama apabila didedahkan kepada beberapa pusingan ON-OFF gas toluena. Bukan itu sahaja, penderia gas toluena yang dibangunkan ini boleh beroperasi pada suhu bilik.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan ucapan terima kasih yang tidak terhingga MIMOS Berhad kerana memberi kebenaran untuk menjalankan kajian ini dan Universiti Kebangsaan Malaysia atas sokongan kewangan mereka di bawah Geran Universiti Penyelidikan (GUP-2024-048).

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Aziz, N. A., Abdullah, M. F., Badaruddin, S. A. M., Hussin, M. R. M., Manaf, H. A. 2022. Highly Sensitive Sub-ppm CH_3COOH Detection by Improved Assembly of Sn_3O_4 -RGO Nanocomposite. *Molecules* 27 (24), 8707
- Bai, S., Du, L., Sun, J., Luo, R., Li, D., Chen, A. & Liu, C.C. 2016. Preparation of reduced graphene oxide/ Co_3O_4 composites and sensing performance to toluene at low temperature. *RSC Advances* 6(65): 60109–60119.
- Balasubramani, V., Vignesh, R., Liu, B. & Sridhar, T.M. 2023. Electrochemical impedance spectroscopic investigation on detection of H_2S gas using 2D TiO_2/rGO nano-composites. *Applied Surface Science Advances* 16.
- Bartle, K.D. & Myers, P. 2002. History of gas chromatography.
- Breyse, P. 2018. Department Of Health And Human Services Fiscal Year 2018 Agency for Toxic Substances & Disease Registry Justification of Estimates for Appropriation Committee.
- Dey, A. 2018. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. Elsevier Ltd.
- Hashtroudi, H., MacKinnon, I.D.R. & Shafiei, M. 2020. Emerging 2D hybrid nanomaterials: Towards enhanced sensitive and selective conductometric gas sensors at room temperature. *Journal of Materials Chemistry C*. Royal Society of Chemistry.
- Hassan, M., Wang, Z.H., Huang, W.R., Li, M.Q., Liu, J.W. & Chen, J.F. 2017. Ultrathin tungsten oxide nanowires/reduced graphene oxide composites for toluene sensing. *Sensors (Switzerland)* 17(10).
- Huang, G., Li, Y., Chen, C., Chen, C., Yue, Z., Yue, Z., Zhai, W., Li, M. & Yang, B. 2020. Hydrogen Oxide gas sensor based on titanium dioxide/amino-functionalized graphene quantum dots coated photonic crystal fiber. *Journal of Physics D: Applied Physics* 53(32).

- Minitha, C.R., Anithaa, V.S., Subramaniam, V. & Rajendra Kumar, R.T. 2018. Impact of Oxygen Functional Groups on Reduced Graphene Oxide-Based Sensors for Ammonia and Toluene Detection at Room Temperature. *ACS Omega* 3(4): 4105–4112.
- Paolucci, V., Emamjomeh, S.M., Ottaviano, L. & Cantalini, C. 2019. Near room temperature light-activated ws₂-decorated rgo as no₂ gas sensor. *Sensors (Switzerland)* 19(11).
- Pargoletti, E., Verga, S., Chiarello, G.L., Longhi, M., Cerrato, G., Giordana, A. & Cappelletti, G. 2020. Exploring SN_x ti_{1-x} o₂ solid solutions grown onto graphene oxide (GO) as selective toluene gas sensors. *Nanomaterials* 10(4).
- Pyo, S., Choi, J. & Kim, J. 2019. Improved photo- and chemical-responses of graphene via porphyrin-functionalization for flexible, transparent, and sensitive sensors. *Nanotechnology* 30(21).
- Seekaew, Y., Wisitsoraat, A., Phokharatkul, D. & Wongchoosuk, C. 2019. Room temperature toluene gas sensor based on TiO₂ nanoparticles decorated 3D graphene-carbon nanotube nanostructures. *Sensors and Actuators, B: Chemical* 279: 69–78.
- Shafiei, M., Bradford, J., Khan, H., Piloto, C., Wlodarski, W., Li, Y. & Motta, N. 2018. Low-operating temperature NO₂ gas sensors based on hybrid two-dimensional SnS₂-reduced graphene oxide. *Applied Surface Science* 462: 330–336.
- Shao, S., Che, L., Chen, Y., Lai, M., Huang, S. & Koehn, R. 2019. A novel RGO-MoS₂-CdS nanocomposite film for application in the ultrasensitive NO₂ detection. *Journal of Alloys and Compounds* 774: 1–10.
- Subin David, S.P., Veeralakshmi, S., Sandhya, J., Nehru, S. & Kalaiselvam, S. 2020. Room temperature operatable high sensitive toluene gas sensor using chemiresistive Ag/Bi₂O₃ nanocomposite. *Sensors and Actuators, B: Chemical* 320.
- Taufik, A., Asakura, Y., Kato, H., Kakihana, M., Saleh, R., Sekino, T. & Yin, S. 2020. 1T/2H-MoS₂ engineered by in-situ ethylene glycol intercalation for improved toluene sensing response at room temperature. *Advanced Powder Technology* 31(5): 1868–1878.
- Wang, J., Deng, H., Li, X., Yang, C. & Xia, Y. 2020. Visible-light photocatalysis enhanced room-temperature formaldehyde gas sensing by MoS₂/rGO hybrids. *Sensors and Actuators, B: Chemical* 304.
- Wang, T., Liu, S., Sun, P., Wang, Y., Shimanoe, K. & Lu, G. 2021. Unexpected and enhanced electrostatic adsorption capacity of oxygen vacancy-rich cobalt-doped In₂O₃ for high-sensitive MEMS toluene sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical* 342.
- Wang, X., Chen, F., Yang, M., Guo, L., Xie, N., Kou, X., Song, Y., Wang, Q., Sun, Y. & Lu, G. 2019. Dispersed WO₃ nanoparticles with porous nanostructure for ultrafast toluene sensing. *Sensors and Actuators, B: Chemical* 289: 195–206.
- Yan, W., Lv, C., Zhang, D., Chen, Y., Zhang, L., Ó Coileáin, C., Wang, Z., Jiang, Z., Hung, K.M., Chang, C.R. & Wu, H.C. 2020. Enhanced NO₂ Sensitivity in Schottky-Contacted n-Type SnS₂ Gas Sensors. *ACS Applied Materials and Interfaces* 12(23): 26746–26754.
- Yi, N., Cheng, Z., Li, H., Yang, L., Zhu, J., Zheng, X., Chen, Y., Liu, Z., Zhu, H. & Cheng, H. 2020. Stretchable, ultrasensitive, and low-temperature NO₂ sensors based on MoS₂@rGO nanocomposites. *Materials Today Physics* 15.
- Zhang, R., Gao, S., Zhou, T., Tu, J. & Zhang, T. 2020. Facile preparation of hierarchical structure based on p-type Co₃O₄ as toluene detecting sensor. *Applied Surface Science* 503.
- Zhang, Y., Jia, C., Wang, Q., Kong, Q., Chen, G., Guan, H. & Dong, C. 2019. Highly Sensitive and Selective Toluene Sensor of Bimetallic Ni/Fe-MOFs Derived Porous NiFe₂O₄ Nanorods. *Industrial and Engineering Chemistry Research*.