

## Pembuatan Profil Udara Hembusan Pernapasan Perokok dan Non Perokok Berbasis Sensor CCS-811 dan *Volatile Organic Compound*

Sabila Alhadawiah<sup>1</sup>, Arif Budianto<sup>1\*</sup>, Rahadi Wirawan<sup>1</sup>, Ni Ketut Anggriani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia.

DOI: 10.29303/geoscienceed.v6i1.506

### Article Info

Received: 10 September 2024

Revised: 4 November 2024

Accepted: 6 November 2024

### \*Correspondence:

Phone: +62 812-3733-3845

**Abstrak:** VOC merupakan sekelompok senyawa organik yang mudah menguap ke atmosfer dan mempunyai berbagai dampak terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. VOC merupakan faktor penting dalam pembentukan ozon troposfer dan aerosol organik sekunder, yang menjadi komponen utama pembentukan polusi udara. VOC dapat terkandung di dalam udara sisa pernapasan manusia, dengan konsentrasi yang berbeda-beda dan sangat bergantung dengan kondisi metabolisme tubuh, kebiasaan, makanan yang dikonsumsi, dan lain sebagainya. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi konsentrasi TVOC dari udara hembusan nafas (*exhaled breath*) yang kemudian dijadikan sebagai profil udara yang dapat membedakan klasifikasi perokok atau non perokok. Penelitian ini menggunakan 50 sampel nafas yang dibagi ke dalam dua klasifikasi utama, yakni perokok dan non perokok. Udara bersih terfilter digunakan sebagai variabel kontrol. Sampel nafas diukur konsentrasi VOC menggunakan sebuah e-nose berbasis sensor CCS-811 yang sudah dikalibrasi dan diuji menggunakan komparator dan beberapa gas, seperti: gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), dan formaldehida (CH<sub>2</sub>O). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem e-nose berbasis sensor CCS-811 dapat membaca gas VOC dengan rata-rata pembacaan yang dihasilkan sebesar 0-1156 ppb dengan tingkat kesalahan relatif <50%. Keseluruhan hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem cukup sensitif terhadap gas CH<sub>2</sub>O dan C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, namun tidak sensitif terhadap gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S. Berdasarkan pada hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa sistem dapat secara sensitif dan selektif mendeteksi senyawa VOC pada jenis C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH dan CH<sub>2</sub>O dengan nilai akurasi >50%. Hasil pembacaan sistem pada sampel nafas perokok dan non perokok dapat menghasilkan tiga zona konsentrasi TVOC yang selanjutnya menjadi profil has TVOC yang dihembuskan oleh kelompok sampel. Terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara konsentrasi TVOC perokok dan non perokok. Sistem dapat membedakan antara perokok dan non perokok dengan akurasi pembacaan >90%.

**Kata kunci:** e-nose; perokok; sensor; sistem pernapasan; *volatile organic compound*.

**Citation:** Alhadawiah, S., Budianto, A., Wirawan, R., & Anggriani, N.K. (2024). Pembuatan Profil Udara Hembusan Pernapasan Perokok dan Non Perokok Berbasis Sensor CCS-811 dan Volatile Organic Compound. *Journal Pendidikan, Sains, Geologi dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6 (1), 101-106

### Pendahuluan

Emisi udara merupakan salah satu ancaman nyata di bidang kualitas udara saat ini (Galvan et al., 2022; Strategy, 2023). Salah satu emisi tersebut adalah senyawa yang mudah menguap atau VOC (*volatile organic compound*) (Jia et al., 2019; Mečiarová et al., 2017).

Total VOC atau yang biasa disingkat sebagai emisi jenis TVOC ini merupakan bagian alami dari udara yang dihirup oleh makhluk hidup dan juga dihasilkan dari berbagai proses alami seperti pernapasan manusia dan hewan, serta serangkaian reaksi pembakaran, seperti penggunaan minyak bumi, gas alam, maupun

pembakaran biomassa (Ge et al., 2018; Hu et al., 2017; Widhowati et al., 2021; Zhao et al., 2016).

VOC tergolong dalam gugus karbon yang memiliki ciri-ciri berat molekul rendah, titik didih rendah, dan kelarutan lebih rendah dalam air, serta sangat mudah menguap dan melayang di udara (Li et al., 2021). VOC memiliki sifat unik, yaitu mampu menguap dalam kondisi sekitar. VOC didefinisikan sebagai senyawa karbon selain karbon monoksida, karbon dioksida, asam karbonat, karbonat logam, dan ammonium karbonat yang berpartisipasi dalam reaksi fotokimia di atmosfer. VOC yang berkarakteristik beracun dan mudah menguap, serta dilepaskan ke lingkungan ini dianggap sebagai faktor penting dalam pencemaran udara dan menyebabkan kerusakan serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Mečiarová et al., 2017).

Emisi VOC dihasilkan dari berbagai mekanisme dan proses metabolisme biologis, seperti hasil emisi produk sampingan dari kegiatan industri dan komersial, gas polusi dari lalu lintas jalan raya, dan berperan penting dalam pembentukan ozon dan partikulat. VOC merupakan polutan utama, namun memiliki perbedaan antara polutan primer, prekursor polutan sekunder, dan polutan sekunder. Hal tersebut dapat menimbulkan berbagai dampak pada manusia, lingkungan dan perekonomian. Paparan VOC dapat menyebabkan iritasi saluran udara dan menyebabkan gejala saluran pernapasan seperti pilek, batuk, dan radang tenggorokan. Paparan polusi udara seperti nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), *particulate matter* jenis *fine particle* (PM<sub>2.5</sub>), dan VOC dalam jangka panjang dari kendaraan dan aktivitas industri dikaitkan dengan peningkatan risiko gangguan mental seperti kecemasan, depresi, dan penurunan kognitif. Peningkatan paparan polusi yang terus menerus memperburuk kesehatan mental, terutama di kalangan masyarakat yang tinggal di daerah paparan polusi berat. Selain itu, polusi udara memicu respons stres fisiologis dan psikologis, yang semakin memperburuk dampaknya terhadap kesehatan secara keseluruhan (Aghaei et al., 2021; Chen et al., 2024).

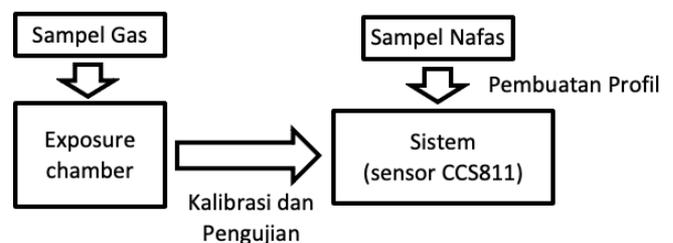
VOC yang dihembuskan secara alamiah dari sistem pernapasan manusia memiliki konsentrasi yang beragam (Barker et al., 2006; Cazzola et al., 2015; Hakim et al., 2012; Miekisch et al., 2004). Variasi konsentrasi ini dimungkinkan untuk digunakan sebagai biomarker akan kondisi atau kebiasaan tertentu seseorang yang membedakannya dengan orang lain, seperti konsumsi alkohol, konsumsi obat terlarang, kebiasaan merokok, dan lain sebagainya. Di sisi lain, konsentrasi VOC hasil dari sistem pernapasan seseorang dan fungsionalisasinya sebagai biomarker perokok-non perokok belum dikembangkan. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi

konsentrasi TVOC dari udara hembusan nafas (*exhaled breath*) yang kemudian dijadikan sebagai profil udara yang dapat membedakan klasifikasi perokok atau non perokok.

## Metode

**Pengujian Sistem.** Sistem pengukuran konsentrasi TVOC dikembangkan dalam bentuk e-nose berbasis sebuah sensor CCS-811. Sensor jenis digital ini dipilih karena sensitivitasnya yang baik akan pendeteksian gas VOC. Sensor ini dihubungkan ke sebuah mikrokontroler untuk pembacaan konsentrasi TVOC. Sistem e-nose ini kemudian diuji dengan empat gas yang berbeda setelah dikalibrasi dengan udara bersih terfilter. Sampel gas tersebut adalah gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), dan formaldehida (CH<sub>2</sub>O) untuk mengidentifikasi selektivitasnya terhadap beberapa jenis gas VOC tersebut. Pengujian ini dilakukan di dalam sebuah *chamber* tertutup berbahan akrilik (Budianto et al., 2021; Widhowati et al., 2021; Yani et al., 2024) agar diperoleh konsentrasi yang konsisten. Pengujian dilakukan selama 100 s ( $t = 100$  s) dengan mempertimbangkan faktor volume *chamber* ( $V$ ), laju alir udara ( $v$ ), dan luas lubang ( $A$ ) keluaran e-nose (**Gambar 1**).

**Pengambilan Sampel Nafas.** Setelah terkalibrasi, e-nose digunakan untuk mengukur konsentrasi VOC yang ada di dalam udara sisa pernapasan. Tahapan ini dilakukan terhadap 50 sampel udara sisa pernapasan perokok dan non perokok (**Gambar 1**) dengan jumlah tiap-tiap klasifikasi atau kelompok sebesar 25 sampel. Pengukuran konsentrasi VOC di udara pernapasan ini ditujukan untuk identifikasi besar konsentrasi VOC yang akan dijadikan profil udara pernapasan.



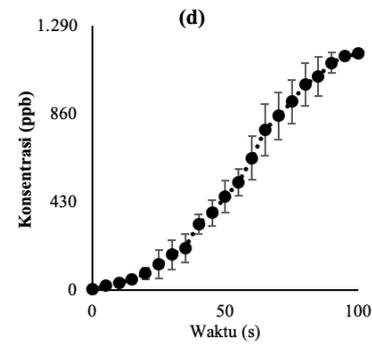
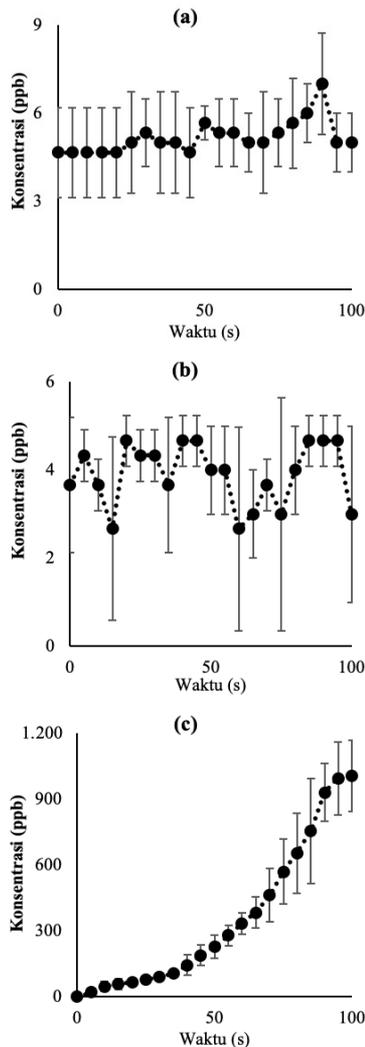
**Gambar 1.** Skema pengujian sistem dan pengambilan data sampel nafas

**Pembuatan Profil Gas Pernapasan.** Konsentrasi VOC ( $C_{ii}$ ) yang diukur dengan e-nose kemudian diklasifikasi dalam bentuk *plotting* kurva. Hasil *plotting* kemudian dinyatakan sebagai sebuah profil udara pernapasan dengan dua area utama: P(+) yang menyatakan daerah perokok dan P(-) yang menginterpretasikan daerah non perokok. Adapun zona atau daerah perpotongan yang

mungkin timbul ditunjukkan dengan kode P(+)/P(-). Keseluruhan data hasil percobaan diuji secara statistik dengan tes ANOVA.

### Hasil dan Pembahasan

**Gambar 2** berikut menginterpretasikan hasil pengujian respon menggunakan berbagai macam gas. Pada sampel gas pertama, sistem diberi gas H<sub>2</sub>S dengan konsentrasi yang diketahui sebesar 100 ppm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan ini memiliki pembacaan yang kurang sensitif, dengan tingkat konsentrasi yang terukur sebesar 3 ppb hingga 9 ppb (**Gambar 2a**). Rerata pembacaan hanya sebesar 5 ppb. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor yang digunakan di dalam sensor tidak sensitif terhadap gas H<sub>2</sub>S.

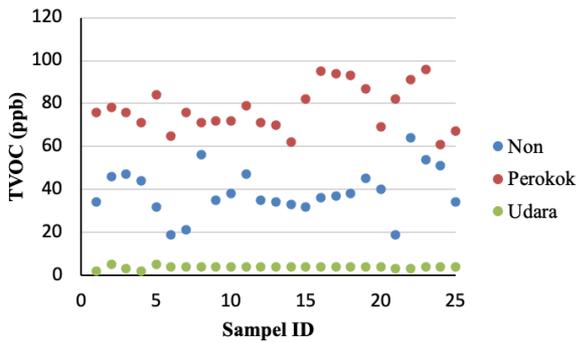


**Gambar 2.** Hasil pengukuran konsentrasi sampel gas pada sistem e-nose.

Pada sampel kedua (**Gambar 2b**), yakni menggunakan gas CO<sub>2</sub> dengan konsentrasi awal 400 ppm, respon yang ditunjukkan oleh sistem adalah 0 ppb hingga 6 ppb. Konsentrasi sebesar 4 ppb adalah konsentrasi terbesar yang terbaca untuk paparan 400 ppm gas CO<sub>2</sub>. Adapun rata-rata yang terbaca sebesar 4 ppb. Jika dibandingkan dengan pembacaan gas H<sub>2</sub>S, nilai ini sedikit lebih kecil (hanya selisih 1 ppb).

Pada sampel gas ketiga yang diuji (**Gambar 2c**), hasil pengukuran menunjukkan pembacaan konsentrasi gas etanol yang merupakan salah satu jenis VOC. Gas yang digunakan memiliki konsentrasi sebesar 100 ppm. Respon yang ditunjukkan oleh sistem adalah 0 ppb hingga 1022 ppb. Konsentrasi terbesar yakni sebesar 1022 ppb, yang terbaca pada detik kedua puluh. Nilai terkecil, 0 ppb, hanya terbaca pada detik awal pengukuran. Adapun rata-rata yang terbaca sebesar 352 ppb. Jika dibandingkan dengan pembacaan gas H<sub>2</sub>S, nilai ini jauh lebih besar (selisih >300 ppb). Pada **Gambar 3d**, diinterpretasikan hasil pengujian menggunakan gas keempat, yakni CH<sub>2</sub>O (100 ppm). Gas yang tergolong senyawa aldehida ini menghasilkan respon pembacaan sebesar 3 ppb hingga 1158 ppb. Respon yang dihasilkan merupakan respon terbaik jika dibandingkan dengan ketigas gas lainnya. Rata-rata pembacaan yang dihasilkan sebesar 1156 ppb dengan tingkat kesalahan relatif <50%. Keseluruhan hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem cukup sensitif terhadap gas CH<sub>2</sub>O dan C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, namun tidak sensitif terhadap gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S.

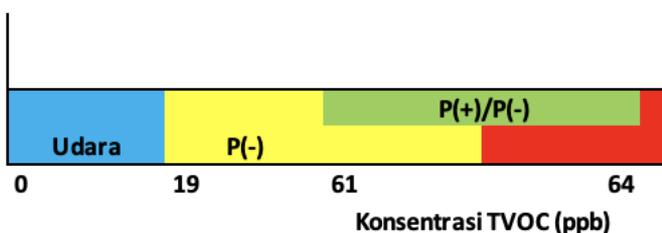
**Gambar 3** berikut mendeskripsikan hasil pembuatan profil gas sisa pernapasan, yang merujuk pada sampel perokok dan perokok dalam tinjauan konsentrasi TVOC yang terbaca oleh sistem. Data yang diperoleh ini berdasarkan pada pengukuran konsentrasi senyawa total VOC yang berhasil diukur oleh sistem.



**Gambar 3.** Hasil pengukuran konsentrasi TVOC pada sampel nafas.

Adapun sampel nafas yang diukur sejumlah 50 sampel. Gambar tersebut secara rinci menggambarkan adanya perbedaan yang sangat signifikan antara konsentrasi TVOC perokok dan non perokok ( $p < 0.05$ ). Tampak bahwasannya sampel nafas perokok relatif memiliki konsentrasi TVOC yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel nafas non perokok. Pada kelompok perokok, konsentrasi TVOC berkisar antara 61 ppb hingga 96 ppb. Rata-rata konsentrasi TVOC pada klasifikasi perokok adalah 78 ppb. Nilai ini berbeda cukup signifikan dengan klasifikasi non perokok dan udara bersih (kontrol), yakni dengan rata-rata sebesar 39 ppb. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa konsentrasi TVOC rata-rata sampel nafas non perokok tepat 50% lebih rendah jika dibandingkan dengan sampel nafas perokok, dan lebih dari 9 kali lipat nilai kontrol udara bersih (rata-rata 4 ppb).

Data pada pengukuran konsentrasi TVOC pada sampel nafas selanjutnya diinterpretasikan dalam bentuk profil gas TVOC hasil pernapasan manusia untuk klasifikasi perokok dan perokok. Pembuatan profil gas pernapasan ini menghasilkan tiga kelompok yang berbeda, yang disimbolkan oleh P+, P-, dan P+/P-. Kode P+ menunjukkan kelompok sampel nafas perokok aktif, sedangkan kode P- menginterpretasikan kelompok non perokok. Adapun kode P+/P- mengindikasikan zona irisan yang memiliki kesamaan pembacaan, antara kemungkinan kelompok perokok aktif, perokok pasif, atau kondisi non perokok yang memiliki kemiripan nilai konsentrasi TVOC. Interpretasi ini ditunjukkan oleh **Gambar 4**.



**Gambar 4.** Profil konsentrasi gas TVOC yang dihirup oleh sampel perokok dan non perokok.

Dapat dilihat pada **Gambar 4**, bahwasannya zona profil untuk kelompok P+ berada pada sisi kanan (warna merah), dengan ambang batas konsentrasi TVOC sebesar 64 ppb. Pada kelompok non perokok (P-), ambang batas konsentrasi TVOC yakni antara 19 ppb hingga 61 ppb. Terdapat zona irisan (warna hijau) yang merupakan zona kesamaan atau probabilitas antara P(+) ataukah P(-), yakni pada konsentrasi 61-62 ppb.

Hasil penelitian ini menunjukkan adanya potensi penggunaan sensor gas resistif atau sejenisnya menjadi sebuah sistem pengidentifikasian biomarker serupa *electric nose* (e-nose) yang bekerja secara invasif. Sebagaimana penelitian sebelumnya, Penelitian pendahulu lainnya melakukan penelitian tentang potensi deteksi COVID-19 secara noninvasif menggunakan teknologi *electronic-nose* dan biomarker metabolik VOC, hasilnya yang diperoleh dari digunakannya peralatan elektronik eksperimental dan komersial yang dapat secara akurat mendeteksi emisi campuran VOC pada hembusan nafas manusia. Terdapat suatu jenis metabolit biomarker VOC inang, biomarker VOC khusus pada COVID-19 disebabkan oleh perubahan jalur metabolisme inang terkait pathogenesis virus SARS-CoV-2 (Ayouni et al., 2021; Yakoh et al., 2021). Penelitian pendahulu ini menunjukkan adanya kelebihan identifikasi biomarker via udara hembusan pernapasan, yakni melalui analisis senyawa VOC pada nafas yang dapat mendeteksi perubahan metabolik yang relevan dengan infeksi, memberikan wawasan baru dalam diagnosis penyakit. Meskipun teknologi ini menunjukkan kemampuan yang bagus, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menstandarkan metode ini secara klinis sebelum dapat diterapkan secara luas dalam praktik pada bidang medis.

VOC terbukti terkandung di dalam udara pernapasan sebagai senyawa unik yang mudah menguap dan berpotensi untuk *biomarker detection* skala *preliminary study*. Meskipun sangat bergantung pada jenis sensor dan karakteristik instrumentasi dan kelistrikan, performa sebuah e-nose dalam kajian VOC yang dilengkapi dengan teknologi kecerdasan buatan dapat meningkatkan akurasi dan target prediksi (Dang et al., 2024; Zhang et al., 2022). VOC dalam nafas yang berfungsi sebagai biomarker berpotensi dikembangkan menjadi teknologi diagnostik non-invasif untuk mendeteksi penyakit tingkat lanjut adenoma dan kanker kolorektal, hasilnya yaitu bahwa analisis nafas dengan teknologi *e-nose* yang digunakan pada penelitian dapat membedakan profil VOC pada pasien CRC (*Colorectal Cancer*). Terdapat perbedaan profil VOC yang

dihembuskan antara pasien-pasien yang dianalisis dengan *e-nose*. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa pasien AA (*advanced adenomas*) memiliki profil VOC yang berbeda-beda. Analisis VOC telah digunakan untuk mendeteksi beberapa jenis kanker seperti kanker paru-paru, kanker payudara, kanker prostat, kanker lambung, dan kanker esofagus, serta penyakit gastrointestinal seperti *Inflammatory Bowel Disease - IBD*, *helicobacter pylori* lambung, dan penyakit celiac. Meskipun hasil penelitian ini perlu divalidasi dalam penelitian selanjutnya, temuan ini menunjukkan bahwa proses patologis di dalam tubuh dapat mempengaruhi profil VOC, dan setiap penyakit memiliki ciri khas VOC nya sendiri. Penelitian lain juga menunjukkan adanya penggunaan metode statistik dan kecerdasan buatan dengan menggunakan alat *e-nose*.

### Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa sistem dapat secara sensitif dan selektif mendeteksi senyawa VOC pada jenis  $C_2H_5OH$  dan  $CH_2O$  dengan nilai akurasi >50%. Hasil pembacaan sistem pada sampel nafas perokok dan non perokok dapat menghasilkan tiga zona konsentrasi TVOC yang selanjutnya menjadi profil VOC yang dihembuskan oleh kelompok sampel. Terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara konsentrasi VOC perokok dan non perokok. Sistem dapat membedakan antara perokok dan non perokok dengan akurasi pembacaan >90%.

### Ucapan Terima Kasih

Seluruh penulis mengucapkan terima kasih yang sebanyak-banyaknya kepada tim penelitian *placebo effect* di Laboratorium Fisika Lanjut - Instrumentasi dan Biofisika, FMIPA, Universitas Mataram.

### Daftar Pustaka

- Aghaei, S. M., Aasi, A., Farhangdoust, S., & Panchapakesan, B. (2021). Graphene-like BC<sub>6</sub>N nanosheets are potential candidates for detection of volatile organic compounds (VOCs) in human breath: A DFT study. *Applied Surface Science*, 536(August 2020), 147756. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147756>
- Ayouni, I., Maatoug, J., Dhoub, W., Zammit, N., Fredj, S. Ben, Ghammam, R., & Ghannem, H. (2021). Effective public health measures to mitigate the spread of COVID-19: a systematic review. *BMC Public Health*, 21(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-11111-1>
- Barker, M., Hengst, M., Schmid, J., Buers, H. J., Mittermaier, B., Klemp, D., & Koppmann, R. (2006). Volatile organic compounds in the exhaled breath of young patients with cystic fibrosis. *European Respiratory Journal*, 27(5), 929-936. <https://doi.org/10.1183/09031936.06.00085105>
- Budianto, A., Wardoyo, A. Y. P., Masruroh, M., Dharmawan, H. A., & Nurhuda, M. (2021). Performance test of an aerosol concentration measurement system based on quartz crystal microbalance. *Journal of Physics: Conference Series*, 1811, 1-8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012033>
- Cazzola, M., Segreti, A., Capuano, R., Bergamini, A., Martinelli, E., Calzetta, L., Rogliani, P., Ciapriani, C., Ora, J., Paolesse, R., Di Natale, C., & D'Amico, A. (2015). Analysis of exhaled breath fingerprints and volatile organic compounds in COPD. *COPD Research and Practice*, 1(1), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s40749-015-0010-1>
- Chen, F., Zhang, W., Mfarrej, M. F. B., Saleem, M. H., Khan, K. A., Ma, J., Raposo, A., & Han, H. (2024). Breathing in danger: Understanding the multifaceted impact of air pollution on health impacts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116532>
- Dang, Y., Reddy, Y. V. M., & Cheffena, M. (2024). Facile E-nose based on single antenna and graphene oxide for sensing volatile organic compound gases with ultrahigh selectivity and accuracy. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 419. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136409>
- Galvan, L. P. C., Bhatti, U. A., Campo, C. C., & Trujillo, R. A. S. (2022). The nexus between CO<sub>2</sub> emission, economic growth, Trade Openness: Evidences from middle-income trap countries. *Frontiers in Environmental Science*, 10(July), 1-16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.938776>
- Ge, J. C., Kim, H. Y., Yoon, S. K., & Choi, N. J. (2018). Reducing volatile organic compound emissions from diesel engines using canola oil biodiesel fuel and blends. *Fuel*, 218(January), 266-274. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.045>
- Hakim, M., Broza, Y. Y., Barash, O., Peled, N., Phillips, M., Amann, A., & Haick, H. (2012). Volatile organic compounds of lung cancer and possible biochemical pathways. *Chemical Reviews*, 112(11), 5949-5966. <https://doi.org/10.1021/cr300174a>
- Hu, N., Tan, J., Wang, X., Zhang, X., & Yu, P. (2017). Volatile organic compound emissions from an engine fueled with an ethanol-biodiesel-diesel blend. *Journal of the Energy Institute*, 90(1), 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.10.003>
- Jia, C., Cao, K., Valaulikar, R., Fu, X., & Sorin, A. B. (2019). Variability of total volatile organic

- compounds (Tvoc) in the indoor air of retail stores. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23). <https://doi.org/10.3390/ijerph16234622>
- Li, B., Ho, S. S. H., Li, X., Guo, L., Chen, A., Hu, L., Yang, Y., Chen, D., Lin, A., & Fang, X. (2021). A comprehensive review on anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) emission estimates in China: Comparison and outlook. *Environment International*, 156, 106710. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106710>
- Mečiarová, L., Vilčeková, S., Burdová, E. K., & Kiselák, J. (2017). Factors effecting the total volatile organic compound (TVOC) concentrations in slovak households. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph14121443>
- Miekisch, W., Schubert, J. K., & Noeldge-Schomburg, G. F. E. (2004). Diagnostic potential of breath analysis - Focus on volatile organic compounds. *Clinica Chimica Acta*, 347(1-2), 25-39. <https://doi.org/10.1016/j.cccn.2004.04.023>
- Strategy, G. A. (2023). Circular economy reinforcement to diminish GHG emissions: A grey DEMATEL approach. *Evergreen*, 10(01), 389-403.
- Widhowati, A. A., Wardoyo, A. Y. P., Dharmawan, H. A., Nurhuda, M., & Budianto, A. (2021). Development of a portable volatile organic compounds concentration measurement system using a CCS811 air quality sensor. *IEEE Xplore*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISESD53023.2021.9501642>
- Yakoh, A., Pimpitak, U., Rengpipat, S., Hirankarn, N., Chailapakul, O., & Chaiyo, S. (2021). Paper-based electrochemical biosensor for diagnosing COVID-19: Detection of SARS-CoV-2 antibodies and antigen. *Biosensors and Bioelectronics*, 176(December 2020), 112912. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112912>
- Yani, A., Wardoyo, A. Y. P., Anggraeni, D., & Budianto, A. (2024). Development of a Measurement System of Ethanol Gas Based on TGS-2600, TGS-2603, and MQ-138 Sensors. *AIP Conference Proceedings*, 3132(1). <https://doi.org/10.1063/5.0211681>
- Zhang, K., Cheng, J., Hong, Q., Dong, W., Chen, X., Wu, G., & Zhang, Z. (2022). Identification of changes in the volatile compounds of robusta coffee beans during drying based on HS-SPME/GC-MS and E-nose analyses with the aid of chemometrics. *Lwt*, 161(January), 113317. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113317>
- Zhao, D. A. N., Crain, N., Azimi, P., Zhao, D., Pouzet, C., Crain, N. E., & Stephens, B. (2016). Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop 3D printers with ... Emissions of Ultra fine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with. *Environmental Science & Technology*, January. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04983>