

DOI: <https://doi.org/10.21009/JRSKT.101.05>

Validasi Metode Analisis Kandungan Nitrogen Dioksida di Lingkungan Kerja menggunakan Metode Griess-Saltzman

Fauzan Mujahid Al Faruqi¹, Dwi Purnomo^{2,*}

¹ Prodi Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka, Rawamangun, Jakarta Timur, DKI Jakarta 13220, Indonesia

² Pusat Hiperkes dan Keselamatan Kerja, Jl. Ahmad Yani, Cempaka Putih Timur, Kec. Cempaka Putih, Jakarta Pusat, DKI Jakarta 10510, Indonesia

*Email: dwipurnomoipb75@gmail.com

Informasi Artikel

Diterima: 10/05/2024

Direvisi: 01/07/2024

Online: 15/07/2024

Edisi: 15/07/2024

Abstrak

Nitrogen dioksida merupakan adalah gas beracun yang dihasilkan terutama sebagai produk sampingan dari proses pembakaran seperti mesin mobil, pembangkit listrik, dan asap rokok. Gas NO_2 dapat menyebabkan berbagai penyakit pernafasan akut. Karne NO_2 termasuk polutan berbahaya, maka dibutuhkan pemantauan pada NO_2 untuk membuat lingkungan lebih aman dan bersih. Dalam pemantauan konsentrasi NO_2 di udara ambien terdapat suatu metode yang telah ditetapkan dalam SNI:7119-2:2017. Metode tersebut diperlukan diuji kembali agar sesuai dengan ketentuan dalam pengujian kadar NO_2 di lingkungan kerja yang memiliki nilai ambang batas yang berbeda dengan udara ambien. Untuk mencapai hal tersebut harus dilakukan validasi metode sebagai pemenuhan syarat bahwa metode dapat diaplikasikan dalam analisa. Validasi metode tersebut dilakukan penentuan linearitas, batas deteksi dan batas kuantifikasi, uji presisi dan akurasi metode, ketahanan dan ketangguhan metode uji, dan estimasi ketidakpastian pengukuran. Hasil menunjukkan bahwa dari seluruh parameter uji telah memenuhi syarat keberterimaan.

Kata kunci: lingkungan kerja, metode griess-saltzman, nitrogen dioksida

Abstract

Nitrogen dioxide is a toxic gas produced mainly as a by-product of combustion processes such as automobile engines, power plants, and cigarette smoke. NO_2 gas can cause various acute respiratory diseases. Since NO_2 is a hazardous pollutant, it is necessary to monitor NO_2 to make the environment safer and cleaner. In monitoring the concentration of NO_2 in ambient air, there is a method that has been established in SNI: 7119-2: 2017. The method needs to be tested again so that it is in accordance with the provisions in testing NO_2 levels in the work environment

which has a different threshold value from ambient air. To achieve this, method validation must be carried out as a fulfillment of the requirement that the method can be applied in analysis. The validation of the method is carried out by determining linearity, detection limit and limit of quantification, precision and accuracy test of the method, durability and robustness of the test method, and estimation of measurement uncertainty. The results show that all test parameters have met the acceptance requirements.

Keywords: *griess-saltzman method, nitrogen dioxide, work environment*

Pendahuluan

Nitrogen dioksida (NO₂) adalah gas yang sangat beracun yang dihasilkan terutama sebagai produk sampingan dari proses pembakaran seperti mesin mobil, pembangkit listrik, dan asap rokok (Niepsch et al., 2022). Nitrogen dioksida merupakan polutan udara utama dengan implikasi kesehatan yang signifikan, seperti peningkatan risiko kanker paru-paru, dan memiliki resiko tinggi penyakit yang berhubungan dengan pernafasan (Zhang et al., 2023) selain itu, polutan Nitrogen dioksida diyakini menyebabkan kanker karena reaktivitasnya yang tinggi dengan materi genetik dan pelarut organik sehingga membentuk nitrosamin (Wenzel et al., 2022). Segala bentuk nitrogen oksida (NO₂) pada tingkat lebih dari 1 ppm dapat menyebabkan kerusakan serius pada sistem pernafasan dan jaringan paru-paru manusia (Perez-Lauterbach et al., 2019). Molekul kecil dapat menembus jauh ke dalam bagian sensitif paru-paru sehingga menyebabkan atau memperburuk penyakit pernafasan seperti emfisema dan bronkitis atau memperburuk penyakit jantung (Dailah, 2022). NO₂ juga merupakan oksidan yang kuat dan karena kemampuannya untuk menyerap radiasi matahari yang terlihat dan mengatur kapasitas pengoksidasi troposfer bebas, yang sangat penting untuk memperkirakan konsentrasi ozon (Shah et al., 2023). Tidak hanya itu, NO₂ juga merupakan sumber terjadinya hujan asam (Prakash et al., 2022), yang dipancarkan dari pembakaran bahan bakar fosil pada kendaraan dan proses industri kemudian bereaksi dengan uap air di atmosfer dan menghasilkan asam nitrat, yang kemudian mengendap sebagai hujan asam (Fatima, 2021). Dampak kerusakan lingkungan dari hujan asam sangat besar (Chang et al., 2023), mempengaruhi ekosistem, tanah, badan air, dan kesehatan manusia. Sebagai contoh, hujan asam menyebabkan pengasaman tanah, yang mengganggu keseimbangan unsur hara dan meningkatkan mobilitas logam beracun, sehingga berdampak buruk pada pertumbuhan tanaman dan aktivitas mikroba tanah (Alrawi, 2022), merusak bangunan dan mencemari sumber air (Liu et al., 2022). Dari berbagai risiko bahaya gas NO₂, pemantauan NO₂ sangat penting untuk membuat lingkungan lebih aman dan bersih (Suganthi et al., 2023).

Dalam pemantauan konsentrasi NO₂ terdapat suatu metode yang telah ditetapkan dalam SNI:7119-2:2017. Dimana pemantauan polutan NO₂ dilakukan dengan metode adsorpsi dengan larutan penjerap *Griess-Saltzman* yang membentuk senyawa *azo dye* merah (Cerrato-Alvarez et al., 2021). Pemantauan tersebut merupakan metode yang sering digunakan karena kesederhanaan, kepekaan, dan keefektifan biayanya serta prinsip kerjanya (Tian et al., 2017). Untuk memantau nitrogen dioksida (NO₂) secara efektif, tersedia berbagai alat dan teknologi, masing-masing dengan keunggulan dan kekurangan masing-masing (Hambir & Jagtap, 2023). Pada penelitian ini, penentuan konsentrasi dari NO₂ ditentukan dengan spektrofotometer UV-Vis dengan panjang gelombang 550 nm (Yang et al., 2023). Adapun metode penentuan NO₂ di lingkungan kerja dilakukan dengan metode yang sama. Metode tersebut diperlukan diuji kembali agar sesuai dengan ketentuan dalam pengujian kadar NO₂ di lingkungan kerja yang memiliki nilai ambang batas yang berbeda dengan udara ambien. Untuk mencapai hal tersebut harus dilakukan validasi metode sebagai pemenuhan syarat bahwa metode dapat diaplikasikan dalam analisa. Validasi metode tersebut dilakukan penentuan linearitas, batas deteksi dan

batas kuantifikasi, uji presisi dan akurasi metode, ketahanan dan ketangguhan metode uji, dan estimasi ketidakpastian pengukuran.

Metode

Pembuatan Larutan Penjerap

Pembuatan larutan penjerap Griess-Saltzman dibuat dengan melarutkan 5 g asam sulfanilat anhidrat dengan 140 mL asam asetat glasial dan aquades hingga kurang lebih 800 mL. Kemudian larutan dipindahkan dalam labu ukur 1000 mL dan ditambahkan 10 mL aseton dan 20 mL larutan induk N-(1-naftil)-etilendiamin dihidroklorida (NEDA)

Pembuatan Larutan Standar Nitrogen Dioksida

Pembuatan larutan standar dilakukan dengan menambahkan larutan induk nitrit dalam labu ukur 25 mL dengan jumlah yang berbeda-beda. Larutan induk tersebut kemudian dilarutkan dengan larutan penjerap Griess-Saltzman.

Pengambilan Sampel Udara

Pengambilan sampel dilakukan dengan merakit pompa penghisap udara dengan selang berbahan silikon, flow meter, dan midget impinger. Larutan penjerap sebanyak 10 mL dituang ke dalam midget impinger dan pompa dinyalakan dengan mengatur kecepatan alirnya menjadi 0,4 L/menit selama 60 menit.

Uji Kuantitatif Nitrogen Dioksida

Sampel udara yang telah diambil kemudian diuji dengan spektrofotometer UV-Vis. Pengujian dilakukan dengan memasukkan sampel ke dalam kuvet dan diukur absorbansinya pada panjang gelombang 550 nm. Konsentrasi NO_2 dalam sampel dapat dihitung dengan rumus.

$$C = \frac{b}{V_u} \times \frac{V_l}{25} \times 1000 \quad (1)$$

Keterangan:

- C : konsentrasi NO_2 di udara ($\mu\text{g}/\text{Nm}_3$);
- b : jumlah NO_2 dari contoh uji hasil perhitungan dari kurva kalibrasi (μg);
- V_u : volume udara yang dihisap dikoreksi pada kondisi normal 25°C , 760mmHg (Nm_3);
- V_l : volume akhir larutan penjerap (mL);
- 25 : volume larutan standar dalam labu ukur;
- 1.000 : konversi liter ke m^3 .

Uji Linearitas

Linearitas dari pengujian sampel NO_2 dilakukan dengan menggunakan nilai regresi persamaan matematik. Pengujian linearitas dilakukan dengan persamaan garis lurus dengan metode kuadrat terkecil dari hubungan konsentrasi dan absorbansi dari larutan standar.

Uji Batas Deteksi (LOD) dan Batas Kuantifikasi (LOQ)

Penentuan LOD dan LOQ dilakukan secara statistik melalui garis regresi linier dari kurva kalibrasi. Untuk mendapatkan data LOD dan LOQ dilakukan pengukuran absorbansi blanko sebanyak kurang lebih 7 kali sehingga didapatkan nilai dari standar deviasi.

Uji Presisi

Data presisi dilakukan dengan mengukur absorbansi dari sampel udara. Untuk penentuan kadar dari NO₂ dilakukan pengukuran sebanyak 10 kali. Dari hasil pengukuran tersebut dihitung rata-rata kadar NO₂ pada sampel.

Uji Akurasi

Uji akurasi dilakukan dengan metode perbandingan nilai pengukuran dengan nilai sebenarnya dari suatu larutan standar pada konsentrasi tertentu. Larutan standar dengan konsentrasi tertentu dianalisis dengan pengulangan sebanyak 10 kali. Nilai akurasi dihitung dengan %*trueness* yang merupakan rasio antara hasil yang diperoleh dan hasil yang sebenarnya.

Uji Ketangguhan

Untuk menguji ketangguhan dan kekuatan suatu metode dilakukan pengukuran dengan peralatan dan dengan analisis yang berbeda. Sehingga dilakukan suatu variasi penggunaan kuvet dan spektrofotometer UV Vis dengan spesifikasi atau merek yang berbeda.

Uji Estimasi Ketidakpastian Pengukuran

Ketidakpastian pengukuran dapat dilakukan dengan perhitungan standar deviasi. Pada tahap ini dilakukan pengukuran nilai ketidakpastian pada tiap sumber seperti kemurnian bahan yang digunakan, berat bahan, dan volume bahan.

Hasil dan Pembahasan

Pembuatan Larutan Penjerap

Larutan penjerap dibuat dengan melarutkan 5 gram asam sulfanilat anhidrat atau 5,5 gram asam sulfanilatmonohidrat dalam 140 mL asam asetat glasial dalam gelas piala 1000 mL. Kemudian ditambahkan aquades hingga kurang lebih 800 mL. Larutan kemudian dipindahkan ke dalam labu ukur 1000 mL dan ditambahkan 10 mL aseton dan larutan N-(1-naftil)-etilendiamin dihidroklorida (NEDA) 20 mL. Larutan induk NEDA dibuat dengan melarutkan 0,1 gram NEDA dalam 100 mL aquades. Lalu ditambahkan aquades hingga tera dan dihomogenkan. Larutan penjerap disimpan di dalam botol gelap dan diletakkan di lemari pendingin agar tetap stabil.

Pembuatan Larutan Standar

Pembuatan larutan standar dilakukan dengan melarutkan larutan induk nitrit dengan konsentrasi berbeda dalam labu ukur 25 mL. Larutan induk nitrit dibuat dengan melarutkan NaNO₂ yang telah dikeringkan dalam suhu 105°C selama 2 jam. Kemudian NaNO₂ yang telah dikeringkan sebanyak 0,12330 gram dituang ke dalam labu ukur 50 mL dan dilarutkan dengan aquades hingga tera. Untuk setiap 1 mL larutan induk nitrit didapatkan konsentrasi sebesar 20,05 µg.

Dari larutan induk tersebut dibuat larutan standar nitrit dengan melarutkan 1 mL larutan induk nitrit dalam 100 mL labu ukur dengan aquades. Deret standar dibuat dengan menambahkan larutan standar sebanyak 0; 0,02; 0,03; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 mL pada labu ukur 25 mL dan ditambahkan dengan larutan penjerap hingga tera. Larutan standar dihomogenkan dan ditunggu hingga 15 menit agar pembentukan warna sempurna. Absorbansi larutan standar diukur dengan spektrofotometer 550 nm.

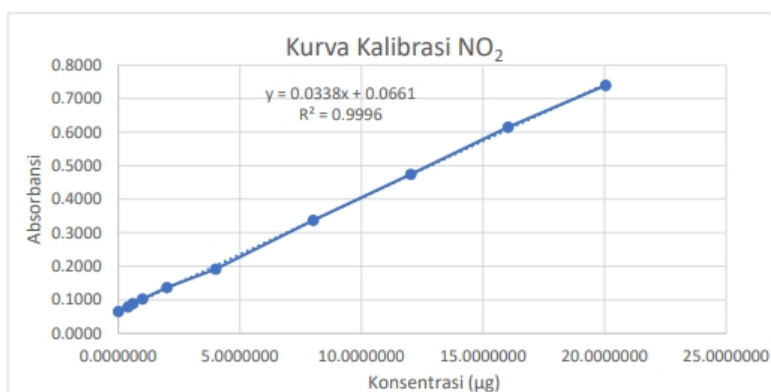
Pengambilan Sampel Udara

Pengambilan sampel udara dilakukan pada rentang waktu pukul 09.00 - 12.00. Adapun pengambilan sampel dilakukan dalam ruangan di suatu instansi. Sampel diambil dengan melewati

udara sebanyak 0,4 liter/menit ke larutan penjerap Griess-Saltzman sebanyak 10 mL dalam botol penjerap dengan posisi di area pernapasan dan tidak terkena sinar matahari secara langsung. Dilakukan pengambilan sampel selama 1 jam dengan memperhatikan suhu dan tekanan udara di ruangan tersebut.

Uji Linearitas

Uji linearitas dilakukan dengan membuat grafik hubungan antara absorbansi dan konsentrasi dari beberapa seri larutan standar NO₂ dengan rentang 0-200 µg pada panjang gelombang 550 nm. Linearitas dinyatakan dengan nilai koefisien determinasi (R²) yang didapatkan dari persamaan linear y = ax + b. Nilai linearitas digunakan untuk mengetahui kemampuan standar, sehingga dapat membuktikan adanya hubungan linier antara konsentrasi analit dengan respon detektor pada rentang tertentu.



Gambar 1. Kurva Kalibrasi NO₂

Persamaan regresi linear yang didapatkan dari pengukuran deret standar NO₂ pada panjang gelombang 550 nm yaitu $y = 0,0338x + 0,0661$ dengan nilai koefisien determinasi (R²) 0,9996. Nilai regresi linear tersebut menunjukkan hasil yang baik karena memiliki nilai R² > 0,990. Hasil tersebut dinyatakan valid dan memiliki hubungan yang linear terhadap konsentrasi analit dan detektor.

Berdasarkan kurva tersebut ditentukan juga *Limit of Linearity* (LoL) untuk menentukan batas keberterimaan dari rentang kerja metode pengujian. Penetapan LoL dilakukan dengan mengukur absorbansi standar terendah dan tertinggi hingga 10 kali dan dilakukan uji F_{tabel} untuk membandingkan dua simpangan baku.

Tabel 1. Perbandingan F_{tabel} Dan F_{hitung}

F _{tabel}	F _{hitung}
1,208333333	5,351

Hasil uji F menunjukkan bahwa nilai F_{hitung} ≤ F_{tabel} sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan tingkat kepercayaan 99%, untuk rentang kerja 0,401 µg hingga 20,05 µg merupakan rentang kerja dari metode pengujian dan 20,05 µg merupakan bataslinearitas atau LoL. Hal ini dikarenakan Jika F_{hitung} ≤ F_{tabel} dengan tingkat kepercayaan 99% (α = 0,01), maka dapat disimpulkan bahwa kedua data hasil pengulangan pengujian memiliki presisi yang tidak beda nyata.

Uji Batas Deteksi (LOD) dan Batas Kuantifikasi (LOQ)

Pada penentuan LOD dan LOQ dapat ditentukan melalui kurva kalibrasi dari uji linearitas. Pengukuran terhadap larutan standar pada rentang konsentrasi 0,401 µg hingga 20,05 µg.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Lod Dan Loq

LOD (μg)	LOQ (μg)
0,050234	0,167447

Berdasarkan hasil pengukuran secara statistik didapatkan nilai LOD 0,050383 μg dan LOQ 0,167943 μg . Nilai ini menunjukkan konsentrasi analit terendah dan kuantitas terkecil yang dapat ditetapkan oleh suatu metode dengan diaplikasikan secara lengkap pada metode yang digunakan dengan kondisi yang disepakati di laboratorium uji. Dapat disimpulkan bahwa nilai LOD dan LOQ dapat diterima dan dinyatakan valid untuk pengujian sampel NO_2 di lingkungan kerja.

Uji Presisi

Penentuan nilai presisi ditentukan oleh nilai standar deviasi (SD) dan %standar deviasi relatif (%RSD) dari pengulangan (*repeatability*). Uji presisi dapat diterima apabila % RSD yang diperoleh masuk dalam batas kriteria keberterimaan yaitu % RSD < 0,67CV Horwitz.

Tabel 3. Uji Presisi

Nama	Hasil (%RSD)	Batas Keberterimaan (0,67 CV Horwitz)
STD-1	0,142	12,30
STD-9	0,411	6,83

Didapatkan hasil dimana nilai %RSD dari standar-1 yaitu 0,14989 dan untuk standar-9 yaitu 0,00259. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai %RSD < 0,67 CV Horwitz sehingga dapat disimpulkan bahwa metode pengujian memiliki presisi yang baik dikarenakan memenuhi batas keberterimaan. Dapat dinyatakan bahwa nilai presisi dapat diterima dan metode ini valid untuk digunakan pada pengujian di lingkungan kerja.

Uji Akurasi

Uji akurasi (*trueness*) dilakukan untuk memperoleh kedekatan hasil yang diperoleh dengan hasil yang sebenarnya. Keakuratan metode ini dilakukan dengan mengukur absorbansi larutan standar-5 dengan konsentrasi 4,009756 μg sebanyak 10 kali pengulangan.

Tabel 4. Uji Akurasi

No	Absorbansi	Target	Hasil	Trueness (%R)	Bias
1	0,191	4,009756	3,6932	92,10574	7,894265
2	0,192	4,009756	3,7227	92,8414	7,158596
3	0,191	4,009756	3,6932	92,10574	7,894265
4	0,192	4,009756	3,7227	92,8414	7,158596
5	0,191	4,009756	3,6932	92,10574	7,894265
6	0,191	4,009756	3,6932	92,10574	7,894265
7	0,192	4,009756	3,7227	92,8414	7,158596
8	0,192	4,009756	3,7227	92,8414	7,158596
9	0,191	4,009756	3,6932	92,10574	7,894265
10	0,191	4,009756	3,6932	92,10574	7,894265
Rata - rata				92,4	7,6

Hasil pengujian menunjukkan bahwa trueness memiliki nilai 92,4% dan bias 7,6% sehingga dapat disimpulkan bahwa metode ini memiliki akurasi yang baik. Hal ini dikarenakan nilai dari trueness masih berada dalam batas keberterimaan yaitu 75-120%, sedangkan bias dapat diterima jika nilai *trueness* diterima. Maka metode ini dapat diterima dan data dapat dinyatakan valid untuk digunakan.

Uji Ketangguhan

Ketangguhan metode merupakan derajat ketertiruan hasil analisis dari sampel yang sama dalam suatu kondisi uji yang berbeda atau dapat disebut sebagai tidak adanya pengaruh dalam pengujian sampel terhadap hasil uji. Hasil pengukuran dinyatakan dalam standar deviasi dan standar deviasi relatif.

Tabel 5. Uji Ketangguhan

Keterangan	Sampel 1 (Abs)
Analisis 1	0.117
Analisis 2	0.12
Rata-rata	0.1185
SD	0.00212132
%RSD	1.79014375

Pengujian sampel NO₂ dengan spektrofotometer UV-Vis yang dilakukan oleh analisis yang berbeda menghasilkan nilai standar deviasi relatif sebesar 1,7901%. Hal ini menunjukkan bahwa metode ini memiliki ketangguhan terhadap variasi analisis yang memenuhi kriteria karena memiliki nilai standar deviasi relatif < 2%.

Estimasi Ketidakpastian Pengukuran

Pada penentuan kadar NO₂ di udara dengan spektrofotometer UV-Vis terdapat sumber ketidakpastian seperti faktor pengenceran, ketidakpastian volume, maupun faktor repeatabilitas.

Tabel 6. Estimasi Ketidakpastian Pengukuran

Sumber ketidakpastian	Nilai x	Satuan	$\mu(x)$	$\mu(x/x)$
Labu ukur 50 mL	50	mL	0,034641016	0,00069282
Labu ukur 100 mL	100	mL	0,08660254	0,000866025
Labu ukur 25 mL	25	mL	0,023094011	0,00092376
Pipet volumetrik 1 mL	1	mL	0,004618802	0,004618802
Repeatabilitas	1		0,000179505	0,000179505
			μ_{gab}	0,004842405

Berdasarkan sumber ketidapastiannya ditentukan nilai estimasi ketidakpastian pada tiap sampel yang dapat dihitung dengan mengalikan konsentrasi tiap sampel dengan $4,8 \times 10^{-3}$.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dan hasil data yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa metode analisis untuk menentukan kadar NO₂ dalam sampel udara di lingkungan kerja telah memenuhi semua kriteria keberterimaan. Hal ini terlihat dari parameter uji linearitas, batas deteksi (LOD) dan batas kuantifikasi (LOQ), akurasi, presisi, dan ketangguhan yang telah terpenuhi. Selain

itu, diperlukan perhitungan estimasi ketidakpastian pengukuran. Oleh karena itu, data yang diperoleh dapat dianggap valid dan dapat digunakan untuk melakukan analisis secara berkala pada sampel tersebut.

Daftar Pustaka

- Alrawi, A. T. (2022). Assessment of the effects of acid rain on the biosphere in Mosul City / Iraq. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 29(2), 22–27. <https://doi.org/10.25130/tjes.29.2.4>
- Cerrato-Alvarez, M., Frutos-Puerto, S., Arroyo, P., Miró-Rodríguez, C., & Pinilla-Gil, E. (2021). A portable, low-cost, smartphone assisted methodology for on-site measurement of NO₂ levels in ambient air by selective chemical reactivity and digital image analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 338, 129867–129867. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129867>
- Chang, J., Xu, Y.-F., Xiao, J., Wang, L., Jiang, J.-Q., & Guo, J.-X. (2023). Influence of acid rain climate environment on deterioration of shear strength parameters of natural residual expansive soil. *Transportation Geotechnics*, 42, 101017. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101017>
- Dailah, H. G. (2022). Therapeutic Potential of Small Molecules Targeting Oxidative Stress in the Treatment of Chronic Obstructive Pulmonary Disease (COPD): A Comprehensive Review. *Molecules*, 27(17), 5542. <https://doi.org/10.3390/molecules27175542>
- Fatima, F. (2021). A review on acid rain: An environmental threat. *Pure and Applied Biology*, 10(1). <https://doi.org/10.19045/bspab.2021.100032>
- Hambir, S., & Jagtap, S. (2023). Nitrogen dioxide gas-sensing properties of hydrothermally synthesized WO₃ NH₂O nanostructures. *Royal Society Open Science*, 10(4). <https://doi.org/10.1098/rsos.221135>
- Liu, Z., Shi, Z., Wei, H., & Zhang, J. (2022). Acid rain reduces soil CO₂ emission and promotes soil organic carbon accumulation in association with decreasing the biomass and biological activity of ecosystems: A meta-analysis. *CATENA*, 208, 105714. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105714>
- Niepsch, D., Clarke, L. J., Tzoulas, K., & Cavan, G. (2022). Spatiotemporal variability of nitrogen dioxide (NO₂) pollution in Manchester (UK) city centre (2017–2018) using a fine spatial scale single-NO_x diffusion tube network. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(11). <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01149-w>
- Perez-Lauterbach, D., Nahum, R., Ahmad, H., Topeff, J. M., Dossick, D., Cole, J. B., & Arens, A. M. (2019). Dose-Dependent Pulmonary Injury Following Nitrogen Dioxide Inhalation From Kinepak™ Detonation. *the Journal of Emergency Medicine (S.I. Online)*, 57(2), 177–180. <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2019.03.028>
- Prakash, J., Agrawal, S. B., & Agrawal, M. (2022). Global Trends of Acidity in Rainfall and Its Impact on Plants and Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1). <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01051-z>
- Shah, V., Jacob, D. J., Dang, R., Lamsal, L. N., Strobe, S. A., Steenrod, S. D., Boersma, K. F., Eastham, S. D., Fritz, T. M., Thompson, C., Peischl, J., Bourgeois, I., Pollack, I. B., Nault, B. A., Cohen, R. C., Campuzano-Jost, P., Jimenez, J. L., Andersen, S. T., Carpenter, L. J., & Sherwen, T. (2023). Nitrogen oxides in the free troposphere: implications for tropospheric oxidants and the interpretation of satellite NO₂ measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(2), 1227–1257. <https://doi.org/10.5194/acp-23-1227-2023>
- Suganthi, K., Vinoth, E., Sudha, L., Bharathi, P., & Navaneethan, M. (2023). Manganese (Mn²⁺) doped hexagonal prismatic zinc oxide (ZnO) nanostructures for chemiresistive NO₂ sensor. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 380, 133293–133293. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133293>
- Tian, Y., Zhang, X., Shen, H., Liu, A., Zhao, Z., Chen, M.-L., & Chen, X.-W. (2017). High Time-Resolution Optical Sensor for Monitoring Atmospheric Nitrogen Dioxide. *Analytical Chemistry*, 89(24), 13064–13068. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b03578>

- Wenzel, J., Schmidt, F., Blumrich, M., Amberg, A., & Czich, A. (2022). Predicting DNA-Reactivity of N-Nitrosamines: A Quantum Chemical Approach. *Chemical Research in Toxicology*, 35(11), 2068–2084. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.2c00217>
- Yang, Y., Wang, J., Zhang, Z., & Lin, G. (2023). Study on the concentration retrieval of SO₂ and NO₂ in mixed gases based on the improved DOAS method. *RSC Advances*, 13(28), 19149–19157.
- Zhang, Y. Q., Luo, A., Chen, S. R., Ju, X., Chen, X. Y., Zhang, W. J., & Hao, Y. T. (2023). Causal links between long-term exposure to NO₂ and the risk of cardiovascular hospitalization. *PubMed*, 44(6), 885–890. <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112338-20221122-00989>

