

NANOMATERIAL BERBASIS GRAFENA UNTUK DETEKSI SENYAWA HIDROKARBON AROMATIK POLISIKLIK: REVIEW

Andi Eka Kartika¹, Satria Putra Jaya Negara^{1*}

¹Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, State University of Makassar, Makassar 90244, South Sulawesi.

ARTICLE INFORMATION

Received: 30, Maret, 2026
Accepted: 23, April, 2026
Published: 02, Juni, 2026

KEYWORD

Grafena; Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs); Sensor Lingkungan

Graphene; Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs); Environmental Sensors;

CORRESPONDING AUTHOR

Nama : Satria Putra Jaya Negara
Address: Jl. Daeng Tata Raya, Bonto Duri Ward, Tamalate Sub-district, Makassar City
E-mail: satria.putra.jaya.negara@unm.ac.id
No. Tlp : +6282347705328

ABSTRACT

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) merupakan senyawa pencemar organik yang bersifat toksik, mutagenik, dan karsinogenik sehingga memerlukan metode deteksi yang sensitif dan selektif. Artikel review ini bertujuan untuk mengkaji perkembangan nanomaterial berbasis grafena dalam aplikasi sensor untuk deteksi PAH. Kajian dilakukan melalui studi literatur terhadap 58 artikel ilmiah yang diterbitkan pada rentang tahun 2015–2026 dan diperoleh dari berbagai basis data ilmiah. Material yang dikaji meliputi grafena, graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO), dan graphene quantum dots (GQDs) yang diaplikasikan pada sensor elektrokimia, fluoresensi, dan surface-enhanced Raman scattering (SERS). Hasil kajian menunjukkan bahwa material berbasis grafena mampu meningkatkan sensitivitas dan selektivitas sensor melalui luas permukaan yang tinggi serta kemampuan transfer elektron yang cepat. Sebagian besar sensor yang direview menunjukkan batas deteksi pada tingkat nanomolar, dengan nilai terendah mencapai $0,0028 \mu\text{g L}^{-1}$ untuk deteksi benzo[a]pirena menggunakan sensor SERS berbasis AuNS@rGO. Selain itu, sensor berbasis grafena telah berhasil diaplikasikan pada berbagai sampel nyata, seperti air sungai, partikulat udara, urin, serta produk pangan dengan recovery mencapai 89,20–107%. Temuan ini menunjukkan bahwa nanomaterial berbasis grafena merupakan kandidat yang sangat menjanjikan untuk pengembangan sensor PAH yang cepat, sensitif, dan efisien, meskipun masih diperlukan upaya untuk meningkatkan stabilitas, selektivitas, dan reproduksibilitas material.

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are toxic, mutagenic, and carcinogenic organic pollutants that require sensitive and selective detection methods. This review aims to discuss the development of graphene-based nanomaterials for sensor applications in PAH detection. A total of 58 scientific articles published between 2015 and 2026 were systematically reviewed. The materials examined include graphene, graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO), and graphene quantum dots (GQDs) applied in electrochemical, fluorescence, and surface-enhanced Raman scattering (SERS) sensors. The review demonstrates that graphene-based materials significantly enhance sensor performance due to their high surface area and rapid electron transfer capability. Most reported sensors achieved nanomolar-level detection limits, with the lowest limit of detection reaching $0.0028 \mu\text{g L}^{-1}$ for benzo[a]pyrene using an AuNS@rGO-based SERS sensor. Furthermore, graphene-based sensors have been successfully applied to real samples, including river water, airborne particulate matter, urine, and food products, with recovery values ranging from 89.20% to 107%. These findings highlight the strong potential of graphene-based nanomaterials for the development of rapid, sensitive, and efficient PAH sensing platforms, although challenges related to material stability, selectivity, and reproducibility remain.

PENDAHULUAN

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) merupakan kelompok senyawa organik yang tersusun atas dua atau lebih cincin aromatik yang terbentuk dari proses pembakaran tidak sempurna bahan organik seperti minyak bumi, batu bara, biomassa, bahan bakar fosil, dan limbah industri (S. R. Ali et

al., 2025; Montano et al., 2025). Senyawa ini banyak ditemukan di lingkungan, baik pada tanah, air, udara, maupun produk pangan akibat aktivitas antropogenik dan proses alami. PAH menjadi perhatian utama dalam bidang lingkungan dan kesehatan karena sifatnya yang persisten, hidrofobik, serta mampu terakumulasi dalam organisme hidup (Vijayanand et al., 2023).

Keberadaan PAH di lingkungan dapat menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap kesehatan manusia maupun ekosistem (Venkatraman et al., 2024). Beberapa senyawa PAH diketahui bersifat toksik, mutagenik, dan karsinogenik sehingga paparan jangka panjang dapat meningkatkan risiko gangguan kesehatan seperti kerusakan sistem pernapasan, gangguan reproduksi, kerusakan DNA, serta berbagai jenis kanker (Rigi et al., 2025). Selain itu, akumulasi PAH dalam rantai makanan dapat menyebabkan pencemaran berkelanjutan dan mengganggu keseimbangan ekosistem. Tingginya tingkat bahaya dari senyawa ini menyebabkan PAH dikategorikan sebagai polutan prioritas yang memerlukan pengawasan ketat.

Mengingat dampak negatif yang ditimbulkan, deteksi dan pemantauan PAH menjadi aspek yang sangat penting dalam pengendalian kualitas lingkungan serta keamanan pangan. Metode deteksi yang memiliki sensitivitas tinggi diperlukan untuk mengidentifikasi keberadaan PAH meskipun pada konsentrasi yang sangat rendah. Deteksi dini memungkinkan dilakukannya tindakan pencegahan dan mitigasi secara lebih cepat sehingga dapat mengurangi risiko pencemaran yang lebih luas. Selain itu, pengembangan metode analisis yang cepat dan akurat juga mendukung pelaksanaan regulasi lingkungan dan pengawasan kualitas produk industri.

Berbagai metode konvensional telah digunakan untuk analisis PAH, seperti kromatografi gas (*Gas Chromatography/GC*) (Kuznetsova, 2026), kromatografi cair kinerja tinggi (*High Performance Liquid Chromatography/HPLC*) (Fernandes-lage et al., 2026), dan spektrometri massa (Kim & Kim, 2026). Meskipun metode-metode tersebut memiliki tingkat akurasi dan sensitivitas yang tinggi, penerapannya masih memiliki beberapa keterbatasan, antara lain memerlukan instrumen yang mahal, prosedur preparasi sampel yang kompleks, waktu analisis yang relatif lama, serta membutuhkan operator yang terlatih. Keterbatasan tersebut mendorong perlunya pengembangan metode alternatif yang lebih sederhana, cepat, ekonomis, dan memiliki sensitivitas tinggi.

Beberapa tahun terakhir, material berbasis grafena (*grafena-based nanomaterials*) telah menarik perhatian sebagai material potensial dalam pengembangan sensor untuk deteksi PAH (Oluwafemi et al., 2024; Shamloo et al., 2024). Grafena memiliki karakteristik unik seperti luas permukaan yang tinggi, konduktivitas listrik yang sangat baik, stabilitas kimia yang tinggi, serta kemampuan transfer elektron yang cepat (Ramoso et al., 2025; Samara et al., 2025). Modifikasi grafena menjadi berbagai turunannya seperti grafena oxide (GO), reduced grafena oxide (rGO), dan komposit grafena dengan nanopartikel logam dapat meningkatkan performa sensor dalam mendeteksi senyawa target. Dengan sifat-sifat tersebut, material berbasis grafena berpotensi menghasilkan sistem deteksi PAH yang lebih sensitif, selektif, cepat, dan efisien dibandingkan metode konvensional (Auta et al., 2026; Zamernan & Saleh, 2025). Oleh karena itu, pengembangan sensor berbasis grafena menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk analisis PAH pada berbagai aplikasi lingkungan dan industri.

Review ini menyajikan gambaran terkini mengenai pemanfaatan grafena dan turunannya, yaitu graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO), dan graphene quantum dots (GQDs), untuk deteksi PAH menggunakan sensor elektrokimia, fluoresensi, dan surface-enhanced Raman scattering (SERS). Selain membahas karakteristik material dan performa analitik sensor, artikel ini juga merangkum aplikasi pada sampel nyata serta tantangan dan prospek pengembangan sensor berbasis grafena untuk pemantauan lingkungan.

METODE

Artikel ini disusun menggunakan metode studi literatur (*literature review*) dengan mengkaji berbagai publikasi ilmiah yang membahas penggunaan nanomaterial berbasis grafena untuk deteksi senyawa hidrokarbon aromatik polisiklik (*polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs*). Proses pencarian literatur dilakukan secara sistematis melalui beberapa basis data ilmiah, yaitu Scopus, ScienceDirect, Web of Science, PubMed, dan Google Scholar.

Pencarian artikel menggunakan kombinasi kata kunci seperti: "graphene", "graphene oxide", "reduced graphene oxide", "graphene quantum dots", "polycyclic aromatic hydrocarbons", "PAHs detection", "electrochemical sensor", "fluorescence sensor", dan "surface-enhanced Raman scattering (SERS)". Kata kunci tersebut dikombinasikan menggunakan operator Boolean (AND, OR) untuk memperoleh literatur yang relevan.

Artikel yang dipertimbangkan merupakan publikasi yang diterbitkan dalam rentang tahun 2015–2026 untuk memperoleh informasi terkini mengenai perkembangan material berbasis grafena dan aplikasinya sebagai sensor PAH. Dari hasil pencarian awal diperoleh sekitar 112 artikel dari berbagai basis data.

Kriteria inklusi yang digunakan meliputi: (1) artikel penelitian asli dan artikel review yang dipublikasikan pada jurnal bereputasi; (2) artikel yang membahas grafena, graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO), graphene quantum dots (GQDs), atau nanokomposit berbasis grafena; (3) artikel yang melaporkan aplikasi material tersebut untuk deteksi PAH menggunakan metode elektrokimia, fluoresensi, atau SERS; serta (4) artikel yang tersedia dalam bahasa Inggris. Adapun kriteria eksklusi meliputi artikel yang tidak membahas deteksi PAH secara langsung, prosiding konferensi tanpa naskah lengkap, artikel duplikat, dan publikasi dengan data yang tidak memadai.

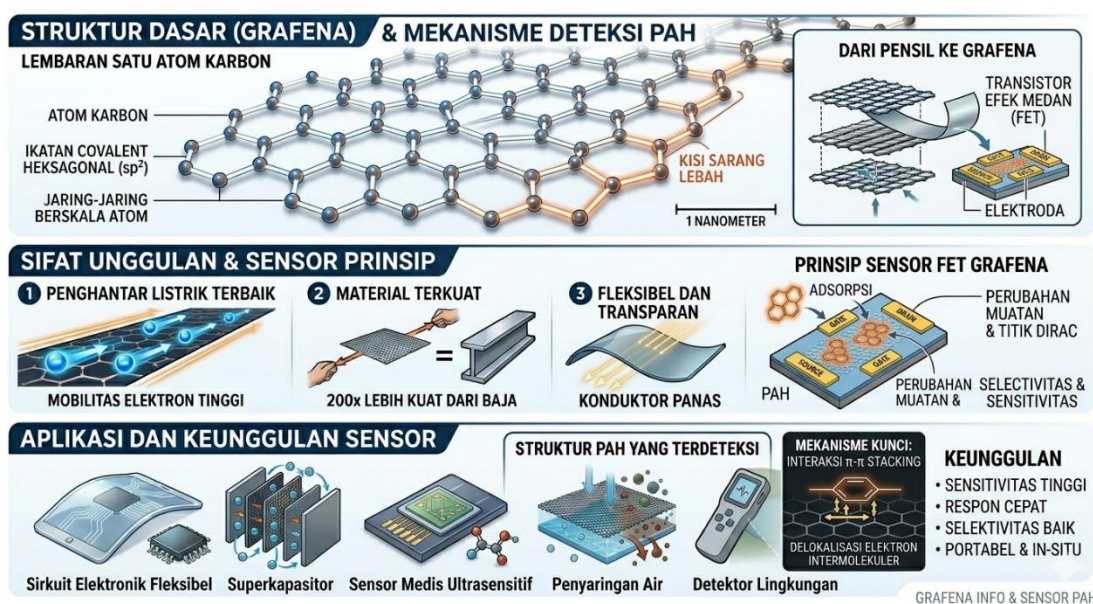
Proses seleksi artikel dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu identifikasi, penyaringan, evaluasi kelayakan, dan inklusi. Pada tahap identifikasi diperoleh 112 artikel. Setelah penghapusan artikel duplikat dan penyaringan berdasarkan judul serta abstrak, tersisa 82 artikel. Selanjutnya dilakukan evaluasi teks lengkap (full-text assessment) sehingga diperoleh 58 artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan digunakan sebagai sumber utama dalam penyusunan review ini.

NANOMATERIAL BERBASIS GRAFENA

A. Grafena

Grafena merupakan material dua dimensi yang tersusun atas atom karbon dengan hibridisasi sp^2 yang membentuk struktur kisi heksagonal menyerupai sarang lebah (Shaker et al., 2025). Material ini pertama kali menarik perhatian karena memiliki kombinasi sifat fisik, kimia, dan elektronik yang sangat unggul dibandingkan material karbon lainnya. Grafena menunjukkan konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, luas permukaan spesifik yang besar, kekuatan mekanik yang sangat baik, serta stabilitas kimia yang tinggi (Ramoso et al., 2025; Samara et al., 2025). Karakteristik tersebut menjadikan grafena sebagai salah satu material yang banyak dikembangkan pada berbagai bidang, termasuk energi, elektronik, biomedis, dan sensor lingkungan.

Pengembangan sistem sensor, luas permukaan grafena yang tinggi memberikan lebih banyak situs aktif untuk interaksi dengan molekul target. Selain itu, mobilitas elektron yang tinggi memungkinkan transfer elektron berlangsung lebih cepat sehingga dapat meningkatkan sensitivitas deteksi. Kemampuan ini sangat penting dalam mendeteksi senyawa pada konsentrasi rendah, termasuk senyawa pencemar lingkungan seperti PAH, yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur dan aplikasi grafena-based nanomaterials

Beberapa turunan grafena juga telah banyak dikembangkan untuk meningkatkan performa material sesuai kebutuhan aplikasi tertentu. Salah satu turunannya adalah *grafena oxide* (GO), yaitu material grafena yang mengandung gugus oksigen seperti hidroksil (-OH), epoksi (-O-), dan karboksil (-COOH).

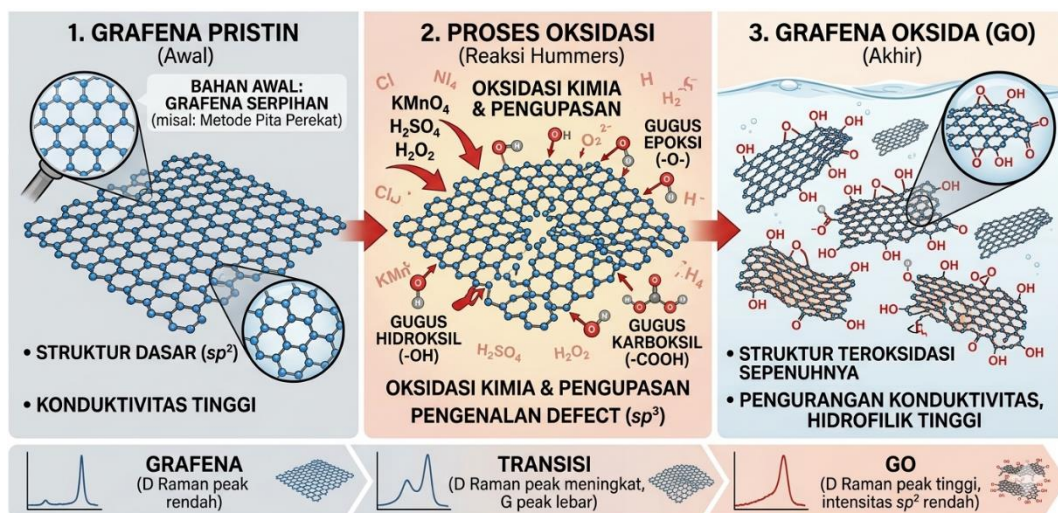
Keberadaan gugus fungsi tersebut meningkatkan sifat hidrofilik dan mempermudah proses fungsionalisasi dengan material lain. Akan tetapi, penambahan gugus oksigen dapat menurunkan konduktivitas listrik grafena (Apsey et al., 2025).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, GO dapat direduksi menjadi *reduced grafena oxide* (rGO). Material rGO memiliki konduktivitas listrik yang lebih tinggi dibandingkan GO karena sebagian gugus oksigen telah dihilangkan, meskipun masih mempertahankan beberapa gugus fungsional yang dapat meningkatkan interaksi dengan molekul target. Oleh karena itu, rGO sering digunakan dalam aplikasi sensor elektrokimia karena mampu meningkatkan sensitivitas dan respon sinyal (Shi et al., 2024).

Penggabungan grafena dengan nanopartikel logam atau material nanokomposit lainnya juga telah menjadi strategi yang banyak dikembangkan. Kombinasi tersebut dapat menghasilkan efek sinergis berupa peningkatan luas permukaan aktif, percepatan transfer elektron, serta peningkatan selektivitas terhadap senyawa tertentu. Pada deteksi PAH, interaksi π - π antara struktur aromatik PAH dengan permukaan grafena dapat meningkatkan adsorpsi molekul target sehingga menghasilkan sensitivitas deteksi yang lebih baik (Li et al., 2025).

B. Grafena-Oxide (GO)

GO merupakan salah satu turunan grafena yang diperoleh melalui proses oksidasi lembaran grafena atau grafit sehingga menghasilkan material dengan berbagai gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaannya (Ghulam et al., 2022; Negara et al., 2023) (Gambar 2). Gugus fungsi tersebut meliputi gugus hidroksil (-OH), epoksi (-O-), karbonil (>C=O), dan karboksil (-COOH) yang tersebar pada bagian basal maupun tepi lembaran grafena. Keberadaan gugus oksigen ini menyebabkan GO memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan grafena murni, terutama dalam hal sifat kimia, hidrofilisitas, dan kemampuan fungsionalisasi (Apsey et al., 2025; Negara et al., 2023).



Gambar 2. Pembentukan Grafena-Oxide dari Grafena

Salah satu keunggulan utama GO adalah sifat hidrofiliknya yang tinggi sehingga material ini mudah terdispersi dalam air maupun berbagai pelarut polar (Negara et al., 2023). Karakteristik tersebut memberikan keuntungan dalam proses sintesis komposit, modifikasi permukaan, serta pengembangan berbagai aplikasi sensor. Gugus fungsi oksigen pada GO juga berperan sebagai situs aktif yang memungkinkan interaksi dengan berbagai molekul melalui ikatan hidrogen, interaksi elektrostatik, maupun interaksi π - π (Rahdar et al., 2025). Kemampuan tersebut menjadikan GO sangat potensial sebagai material adsorben dan material aktif dalam sistem deteksi.

GO telah banyak digunakan sebagai material pendukung maupun material aktif karena memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi. Luas permukaan yang besar memungkinkan peningkatan jumlah situs interaksi dengan molekul target sehingga dapat meningkatkan sensitivitas sensor (Negara et al., 2023). Pada deteksi senyawa PAH, GO dapat berinteraksi dengan struktur aromatik PAH melalui interaksi π - π antara cincin aromatik PAH dengan jaringan karbon pada permukaan GO. Interaksi tersebut meningkatkan proses adsorpsi molekul target dan membantu meningkatkan respon sensor (Mogashane et al., 2024; Niruba et al., 2023).

Meskipun demikian, GO memiliki keterbatasan berupa konduktivitas listrik yang relatif rendah dibandingkan grafena murni. Penurunan konduktivitas ini disebabkan oleh rusaknya sebagian struktur

karbon sp^2 akibat proses oksidasi dan adanya gugus oksigen yang mengganggu jalur perpindahan electron (Apsey et al., 2025). Oleh karena itu, berbagai penelitian mengembangkan modifikasi GO melalui reduksi parsial menjadi *reduced grafena oxide* (rGO) atau penggabungan dengan nanopartikel logam, polimer konduktif, serta material nanokomposit lainnya untuk meningkatkan performa elektrokimia.

Pengembangan komposit berbasis GO telah menunjukkan peningkatan karakteristik sensor seperti sensitivitas, stabilitas, selektivitas, dan batas deteksi yang lebih rendah. Selain itu, kemudahan sintesis, biaya produksi yang relatif rendah, serta kemampuan modifikasi yang tinggi menjadikan GO sebagai material yang menjanjikan dalam pengembangan sensor modern untuk aplikasi lingkungan, biomedis, dan industri.

C. Reduce Grafena-Oxide (rGO)

rGO merupakan material turunan grafena yang diperoleh melalui proses reduksi GO untuk menghilangkan sebagian gugus fungsi oksigen yang terdapat pada permukaannya. Proses reduksi dapat dilakukan menggunakan metode kimia, termal, elektrokimia, maupun metode ramah lingkungan (*green reduction*) menggunakan ekstrak tumbuhan atau biomolekul tertentu (Hasan et al., 2026). Tujuan utama proses reduksi adalah mengembalikan sebagian jaringan karbon sp^2 yang telah terganggu selama proses oksidasi sehingga sifat konduktivitas listrik material dapat ditingkatkan.

Dibandingkan GO, rGO memiliki kandungan gugus oksigen yang lebih sedikit dan struktur karbon sp^2 yang lebih terorganisasi. Berkurangnya gugus oksigen memungkinkan jalur transfer elektron menjadi lebih baik sehingga rGO menunjukkan konduktivitas listrik yang lebih tinggi (Shi et al., 2024). Selain itu, rGO masih mempertahankan sebagian gugus fungsi oksigen sehingga tetap memiliki kemampuan untuk dimodifikasi atau dikombinasikan dengan material lain. Kombinasi sifat tersebut menjadikan rGO sebagai material yang menarik untuk berbagai aplikasi, terutama dalam bidang sensor, penyimpanan energi, dan katalisis.

Salah satu karakteristik penting rGO adalah luas permukaan spesifik yang tinggi. Struktur lembaran dua dimensi rGO menyediakan area aktif yang luas untuk adsorpsi molekul target dan meningkatkan jumlah situs reaksi pada permukaan material. Dalam sistem sensor, karakteristik ini dapat meningkatkan sensitivitas karena lebih banyak molekul target yang dapat berinteraksi dengan permukaan material aktif. Selain itu, struktur rGO yang tipis dan berlapis memungkinkan difusi analit yang lebih cepat sehingga mempercepat respon sensor (Teli et al., 2025; Tladi et al., 2024).

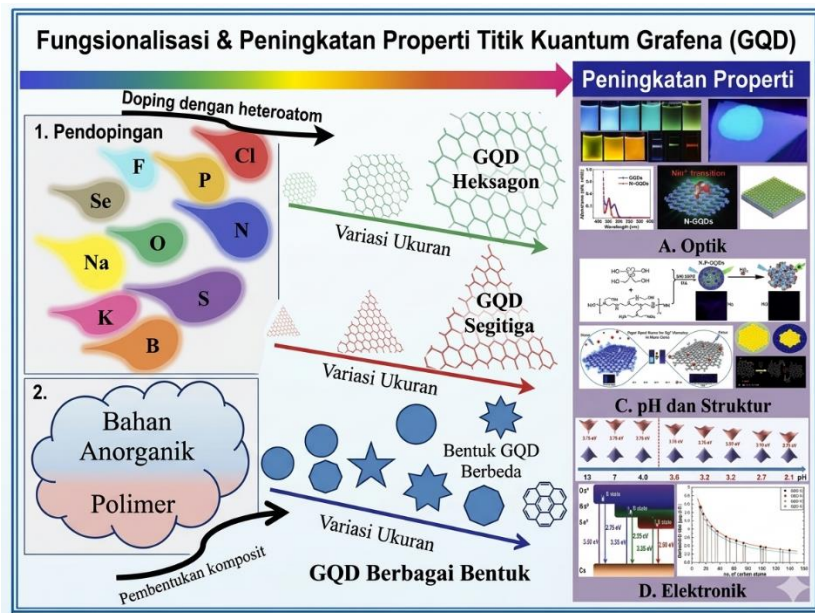
Deteksi PAH, rGO menunjukkan potensi yang sangat baik karena adanya interaksi $\pi-\pi$ antara struktur aromatik PAH dengan jaringan karbon aromatik pada permukaan rGO (Sun et al., 2024). Interaksi ini meningkatkan kemampuan adsorpsi molekul PAH dan memperkuat sinyal deteksi. Konduktivitas tinggi yang dimiliki rGO juga mendukung transfer elektron yang cepat sehingga dapat meningkatkan sensitivitas dan menurunkan batas deteksi sensor (Shi et al., 2024).

Meskipun memiliki karakteristik yang unggul, rGO masih memiliki beberapa keterbatasan, salah satunya kecenderungan lembaran material untuk mengalami agregasi akibat gaya *van der Waals*. Agregasi dapat menurunkan luas permukaan efektif dan mengurangi kinerja sensor. Oleh karena itu, banyak penelitian mengembangkan komposit berbasis rGO dengan nanopartikel logam, oksida logam, polimer konduktif, atau material karbon lainnya. Penggabungan tersebut menghasilkan efek sinergis berupa peningkatan stabilitas, selektivitas, aktivitas elektrokimia, dan sensitivitas sensor (Sharma et al., 2024).

Secara keseluruhan, kombinasi konduktivitas listrik yang tinggi, luas permukaan besar, kemampuan transfer elektron yang cepat, serta kemudahan modifikasi menjadikan rGO sebagai salah satu material paling menjanjikan dalam pengembangan sensor modern. Dalam aplikasi deteksi PAH, penggunaan rGO berpotensi menghasilkan sistem analisis yang lebih cepat, sensitif, dan efisien dibandingkan metode konvensional.

D. Grafena Quantum Dots (GQDs)

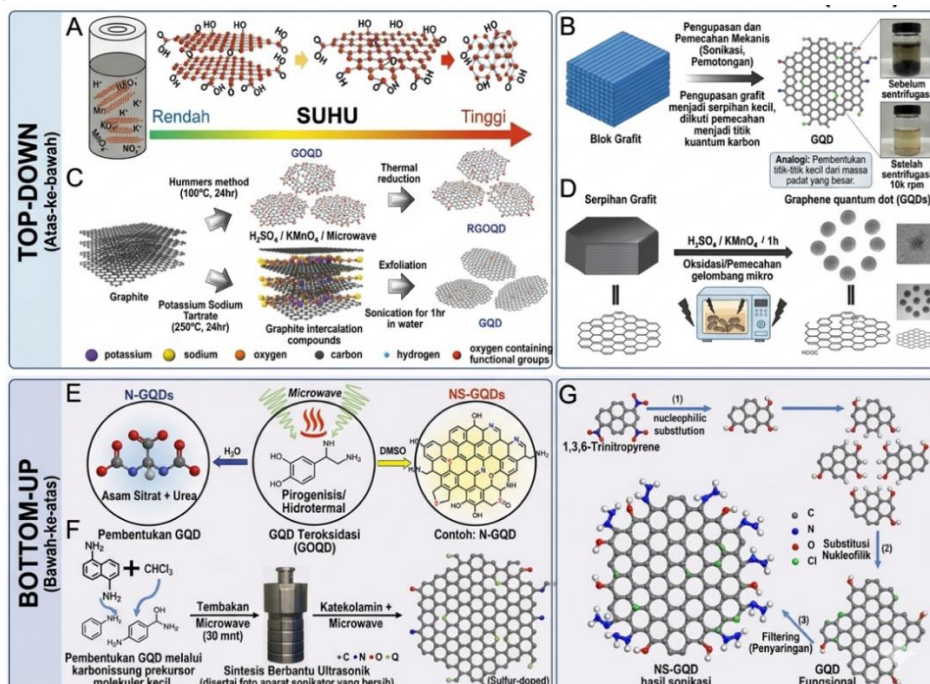
Grafena Quantum Dots (GQDs) merupakan nanomaterial karbon berdimensi nol (*zero-dimensional carbon nanomaterials*) yang tersusun atas fragmen kecil grafena dengan ukuran umumnya kurang dari 20 nm. Berbeda dengan grafena lembaran dua dimensi, GQDs memiliki efek *quantum confinement* dan efek tepi (*edge effect*) yang menghasilkan sifat optik dan elektronik unik. Karakteristik tersebut menjadikan GQDs menarik untuk berbagai aplikasi, termasuk sensor, bioimaging, katalisis, perangkat optoelektronik, dan pemantauan lingkungan (Jan et al., 2025).



Gambar 3. Tampilan grafis memperlihatkan proses fungsionalisasi GQDs melalui berbagai metode (Jan et al., 2025)

GQDs memiliki beberapa karakteristik unggul seperti luas permukaan tinggi, stabilitas kimia yang baik, kelarutan tinggi dalam berbagai pelarut, toksisitas yang relatif rendah, serta biokompatibilitas yang baik (Trivedi et al., 2026), dengan metode sintesis baik bottom-up dan top-down (**Gambar 4**). Selain itu, keberadaan gugus fungsi seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), dan karbonil (>C=O) pada permukaan GQDs mempermudah proses modifikasi kimia maupun pembentukan komposit dengan material lain. Kemampuan modifikasi tersebut memungkinkan peningkatan selektivitas dan sensitivitas terhadap molekul target tertentu.

Salah satu karakteristik utama GQDs adalah sifat fluoresensi yang kuat. Sifat ini berasal dari kombinasi efek ukuran kuantum dan distribusi tingkat energi elektronik pada struktur GQDs. Intensitas fluoresensi GQDs dapat berubah ketika terjadi interaksi dengan molekul tertentu melalui mekanisme transfer elektron atau transfer energi. Oleh karena itu, GQDs banyak digunakan sebagai material sensor berbasis fluoresensi untuk mendeteksi ion logam, biomolekul, senyawa organik, dan polutan lingkungan.



Gambar 4. Strategi sintesis top-down GQDs dan strategi sintesis bottom-up GQDs (Wu et al., 2025)

Deteksi PAH, QGDs memiliki kemampuan interaksi yang baik dengan molekul aromatik melalui interaksi π - π antara cincin aromatik PAH dan struktur karbon pada QGDs. Interaksi tersebut dapat memengaruhi karakteristik fluoresensi maupun sifat elektrokimia QGDs sehingga menghasilkan perubahan sinyal yang dapat digunakan sebagai indikator keberadaan PAH (B. Ali et al., 2021). Ukuran partikel yang kecil juga meningkatkan luas permukaan aktif dan mempercepat transfer elektron, sehingga dapat meningkatkan sensitivitas sistem deteksi.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, QGDs juga menghadapi beberapa tantangan, seperti pengendalian distribusi ukuran partikel, konsistensi sifat optik, dan proses sintesis yang masih memerlukan optimasi (Kashif et al., 2025). Berbagai pendekatan telah dilakukan untuk meningkatkan performa QGDs, seperti doping menggunakan atom nitrogen, sulfur, atau fosfor, serta pembentukan nanokomposit dengan logam maupun material berbasis grafena lainnya. Modifikasi tersebut dapat meningkatkan sifat elektronik, intensitas fluoresensi, dan stabilitas material.

Secara keseluruhan, QGDs menunjukkan potensi yang sangat besar dalam pengembangan sensor modern karena menggabungkan karakteristik grafena dengan fenomena kuantum yang unik. Sifat fluoresensi tinggi, luas permukaan besar, transfer elektron cepat, serta kemudahan modifikasi menjadikan QGDs sebagai kandidat material yang menjanjikan untuk aplikasi deteksi PAH dan berbagai senyawa pencemar lainnya.

GRAFENA-BASED SENSOR FOR PAH DETECTION

Nanomaterial berbasis grafena telah menjadi salah satu material paling menjanjikan dalam pengembangan sensor untuk deteksi senyawa hidrokarbon aromatik polisiklik (polycyclic aromatic hydrocarbons/PAHs). Grafena dan turunannya seperti grafena oxide, reduced grafena oxide, serta grafena quantum dots memiliki sifat fisikokimia yang sangat mendukung untuk aplikasi sensor. Selain itu, grafena mudah dimodifikasi dengan berbagai nanopartikel logam, polimer, maupun material karbon lainnya untuk meningkatkan performa sensor. Berdasarkan prinsip deteksinya, sensor berbasis grafena untuk PAH umumnya dibedakan menjadi sensor elektrokimia, sensor fluoresensi, dan sensor berbasis optical atau surface-enhanced Raman scattering (SERS).

A. Electrochemical Sensor

Sensor elektrokimia berbasis grafena merupakan salah satu metode yang paling banyak dikembangkan untuk deteksi senyawa hidrokarbon aromatik polisiklik (PAHs) karena menawarkan sensitivitas tinggi, respon cepat, biaya analisis rendah, serta kemudahan miniaturisasi perangkat (Liu et al., 2014). Pada sensor ini, grafena umumnya digunakan sebagai material modifikasi elektroda untuk meningkatkan transfer elektron dan memperbesar luas permukaan aktif elektroda. Struktur dua dimensi grafena dengan jaringan karbon sp^2 terkonjugasi memungkinkan mobilitas elektron yang sangat baik sehingga mampu meningkatkan efisiensi proses elektrokimia selama deteksi analit (Lee et al., 2019). Selain itu, luas permukaan grafena yang besar memberikan lebih banyak situs aktif untuk adsorpsi molekul PAH pada permukaan elektroda.

Untuk meningkatkan sensitivitas sensor, grafena sering dikombinasikan dengan nanopartikel logam seperti emas (AuNPs), perak (AgNPs), platinum (PtNPs), dan paladium (PdNPs) (Call & Logan, 2011; Dou et al., 2019). Nanopartikel logam berfungsi sebagai katalis elektrokimia yang mempercepat reaksi redoks PAH, sedangkan grafena bertindak sebagai penghantar elektron yang efisien. Kombinasi ini menghasilkan efek sinergis yang mampu meningkatkan sensitivitas dan menurunkan batas deteksi (Parnianchi et al., 2018).

Selain nanopartikel logam, kombinasi grafena dengan carbon nanotubes (CNTs) juga banyak digunakan untuk meningkatkan luas permukaan aktif elektroda dan memperbaiki kestabilan mekanik sensor (Parnianchi et al., 2018). Teknik elektrokimia yang umum digunakan meliputi cyclic voltammetry (CV), differential pulse voltammetry (DPV), square wave voltammetry (SWV), dan electrochemical impedance spectroscopy (EIS) (Kumunda et al., 2021).

Sensor elektrokimia berbasis grafena telah berhasil digunakan untuk mendeteksi berbagai jenis PAH pada konsentrasi sangat rendah. Sebagai contoh, Amin et al., (2025) mengembangkan sensor elektrokimia berbasis binary grafena nanoplatelets/electrochemically reduced grafena oxide pada screen-printed carbon electrode (GNP/EG/SPCE) untuk deteksi benzo[a]pirena pada particulate matter udara. Sensor tersebut menunjukkan batas deteksi sebesar $0,026 \mu\text{M}$ dengan sensitivitas dan selektivitas yang baik terhadap senyawa target. Selain itu, Pang et al., (2020) melaporkan penggunaan SPE berbasis reduced grafena oxide (E-rGO/SPE) untuk deteksi 2-hydroxynaphthalene, 3-hydroxyphenanthrene, and

1-hydroxypyrene yang menghasilkan batas deteksi pada tingkat nanomolar (10,1 nM; 15,3 nM; and 20,4 nM) dan berhasil diaplikasikan pada sampel urin Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa material berbasis grafena mampu meningkatkan transfer elektron dan adsorpsi analit secara efektif sehingga sangat potensial untuk aplikasi monitoring lingkungan.

Meskipun demikian, beberapa tantangan masih dihadapi dalam pengembangan sensor elektrokimia berbasis grafena, seperti fouling pada permukaan elektroda akibat akumulasi senyawa organik, interferensi dari senyawa aromatik lain yang memiliki struktur serupa, serta kestabilan sensor dalam penggunaan jangka panjang. Selain itu, reproduksibilitas sintesis material grafena dan homogenitas modifikasi permukaan elektroda juga masih menjadi perhatian utama untuk pengembangan aplikasi sensor secara komersial (Ren, 2025).

B. Fluorescence Sensor

Sensor fluoresensi berbasis grafena merupakan salah satu metode yang banyak dikembangkan untuk deteksi senyawa hidrokarbon aromatik polisiklik (PAHs) karena memiliki sensitivitas tinggi, prosedur analisis sederhana, serta kemampuan deteksi yang cepat. Dalam sistem ini, grafena dan turunannya umumnya berperan sebagai fluorescence quencher akibat kemampuannya dalam mentransfer energi dan elektron secara efisien. Grafena oxide (GO) menjadi material yang paling sering digunakan karena memiliki gugus oksigen fungsional seperti hidroksil, epoksi, dan karboksilat yang memungkinkan dispersi baik dalam media air serta interaksi kuat dengan molekul fluoresen. Ketika fluorofor berada dekat dengan permukaan GO, intensitas fluoresensi akan menurun akibat proses quenching yang dipicu oleh transfer energi atau transfer elektron. Kehadiran molekul PAH kemudian mempengaruhi interaksi antara fluorofor dan permukaan grafena sehingga menghasilkan perubahan intensitas fluoresensi yang dapat diukur secara kuantitatif (Zheng & Wu, 2017). Selain GO, grafena quantum dots (GQDs) juga banyak digunakan karena memiliki sifat fluoresensi intrinsik, stabilitas fotokimia yang tinggi, biokompatibilitas baik, dan toksisitas rendah. GQDs mampu menghasilkan emisi fluoresensi yang kuat sehingga sangat potensial digunakan dalam aplikasi sensor optik untuk deteksi PAH pada konsentrasi rendah (Fan et al., 2015).

Mekanisme deteksi pada sensor fluoresensi berbasis grafena umumnya melibatkan fluorescence resonance energy transfer (FRET), photoinduced electron transfer, maupun interaksi hidrofobik antara molekul PAH dan permukaan grafena (Prabakaran et al., 2022). Selain itu, interaksi π - π stacking antara cincin aromatik PAH dan struktur sp^2 grafena juga berkontribusi dalam meningkatkan sensitivitas sensor melalui peningkatan adsorpsi analit pada permukaan material (H. Li & Papadakis, 2023). Untuk meningkatkan performa analitik, grafena sering dikombinasikan dengan quantum dots, carbon dots, maupun nanopartikel logam sehingga dapat meningkatkan stabilitas sinyal fluoresensi, selektivitas, dan memperluas rentang deteksi sensor.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sensor fluoresensi berbasis grafena mampu mendeteksi PAH pada tingkat jejak (trace level) dengan respon cepat dan sensitivitas tinggi. Sebagai contoh, S. A. & P. B. C., (2020) mengembangkan sensor fluoresensi berbasis grafena quantum dots (GQDs) untuk deteksi pirena pada sampel air lingkungan. Sensor tersebut menunjukkan respon fluoresensi yang baik dengan batas deteksi sebesar $0,242 \times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ untuk CA-GQDs dan $0,325 \times 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$ untuk GO-GQDs, serta menghasilkan recovery 97–107% pada sampel air lingkungan. Selain itu, Chen et al., (2022) mengembangkan strategi sensor fluoresensi sederhana dan cepat untuk deteksi berbagai PAHs menggunakan array sensor fluoresensi berbasis film komposit *carbon quantum dots/polyvinyl alcohol* (CDs/PVA). Sensor tersebut memanfaatkan mekanisme *inner filter effect* (IFE) sehingga mampu menghasilkan sidik jari kimia unik untuk setiap PAH. Melalui analisis pengenalan pola multivariat, sensor ini berhasil mendeteksi dan membedakan 16 PAH prioritas dengan akurasi klasifikasi mencapai 100% dan batas deteksi serendah 57 nM. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa material berbasis grafena sangat potensial untuk aplikasi deteksi PAH secara cepat dan sensitif. Namun demikian, beberapa tantangan masih dihadapi, seperti quenching non-spesifik, pengaruh matriks sampel kompleks, serta kestabilan fluorofor selama penyimpanan dan penggunaan berulang sehingga optimasi desain sensor masih terus dikembangkan untuk meningkatkan performa aplikasi praktisnya (Zheng & Wu, 2017).

C. SERS Sensor

Sensor berbasis surface-enhanced Raman scattering (SERS) merupakan metode yang sangat sensitif untuk identifikasi dan deteksi PAH. Teknik SERS bekerja berdasarkan peningkatan intensitas hamburan Raman molekul analit yang berada di dekat permukaan material plasmonik seperti nanopartikel emas atau perak (Zhang et al., 2023).

Dalam sistem SERS berbasis grafena, grafena berfungsi sebagai substrat pendukung yang mampu meningkatkan adsorpsi molekul PAH melalui interaksi π - π stacking. Selain itu, grafena dapat mengurangi fluoresensi latar belakang sehingga sinyal Raman menjadi lebih jelas dan stabil (Xu et al., 2013). Reduced grafena oxide (rGO) merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan dalam sensor SERS karena memiliki konduktivitas tinggi dan luas permukaan besar. Substrat berbasis rGO yang dikombinasikan dengan AgNPs atau AuNPs mampu mendeteksi berbagai jenis PAH pada konsentrasi sangat rendah bahkan hingga tingkat nanomolar (Wang et al., 2020).

Penggunaan sensor SERS berbasis grafena telah banyak dilaporkan untuk deteksi berbagai PAH pada sampel lingkungan maupun pangan. Sensor SERS berbasis gold nanostars@reduced grafena oxide (AuNS@rGO) telah dikembangkan untuk deteksi benzo[a]pirena pada produk pangan seperti ayam dan daging panggang. Reduced grafena oxide berperan sebagai adsorben benzo[a]pirena melalui interaksi π - π stacking, sedangkan gold nanostars menghasilkan hotspot plasmonik yang mampu memperkuat sinyal Raman secara signifikan. Sensor tersebut menunjukkan sensitivitas yang sangat tinggi dengan rentang linear 0,1–10000 $\mu\text{g L}^{-1}$ dan batas deteksi sebesar 0,0028 $\mu\text{g L}^{-1}$. Selain itu, pengujian pada sampel ayam menunjukkan nilai recovery sebesar 89,20–100,80%, sehingga membuktikan bahwa metode ini memiliki akurasi dan aplikasi yang baik untuk analisis sampel pangan nyata (Zhang et al., 2023). Struktur hibrida reduced grafena oxide–Ag nanoparticle (rGO–AgNP) berbantuan micelle CTAB dikembangkan untuk deteksi PAH nonpolar menggunakan metode SERS. CTAB berfungsi menangkap molekul PAH dan meningkatkan dispersi rGO–AgNP dalam larutan. Substrat ini menunjukkan performa SERS yang baik, stabil terhadap paparan laser, serta mampu mendeteksi pirena dan perilena dengan batas deteksi masing-masing 10^{-6} M dan 10^{-7} M. Selain itu, dua jenis PAH dapat dideteksi secara simultan berdasarkan puncak Raman karakteristiknya (Jiang et al., 2015).

D. Analytical Performance and Real Sampel Applications

Tabel berikut menunjukkan beberapa contoh aplikasi sensor berbasis grafena untuk deteksi senyawa hidrokarbon aromatik polisiklik (PAHs) pada berbagai jenis sampel nyata. Parameter analitik seperti *linear range* dan *limit of detection* (LOD digunakan untuk mengevaluasi performa sensor yang dikembangkan.

Tabel 1. Aplikasi Sensor Berbasis Grafena

Grafena Material	Target PAH	Detection Method	Linear Range	LOD	Real Sample	Reference
AuNS@rGO	Benzo[a]pyrene	SERS	0,1–10000 $\mu\text{g L}^{-1}$	0,0028 $\mu\text{g L}^{-1}$	Sampel ayam dan daging kambing panggang.	(Zhang et al., 2023)
GNP/EG/SPCE	Benzo[a]pyrene	Voltammetry	0,2–2,5 and 2,5–12 μM	0,026 μM	Partikulat udara	(Amin et al., 2025)
NH ₂ -MIL-101(Fe)/TRGO/GC E	Chrysene	Voltammetry	0,1–240 μM	0,037 μM	Tanah dan air sungai	(Karuppiyah et al., 2025)
PAMAM/Cr-MOF/GO	1-Hydroxy-pyrene	Voltammetry	0,1–1,0 dan 1,0–6,0 μM	0,075 μM	Urin	(Cui et al., 2021)
CA-GQDs	Pyrene	Fluorescence	0,5–7,0 $\times 10^{-6}$ mol L^{-1}	0,242 $\times 10^{-6}$ mol L^{-1}	Air sungai	(S. A. & P. B. C., 2020)
GO-GQDs	Pyrene	Fluorescence	0,5–7,0 $\times 10^{-6}$ mol L^{-1}	0,325 $\times 10^{-6}$ mol L^{-1}	Air sungai	(S. A. & P. B. C., 2020)
TC4/AuNPs/ERGO-SPCE	Anthracene	Elektrokimia	1–7 μM	0,0625 μM	Sampel Lingkungan	(Zainal et al., 2021)
Fe ₃ O ₄ /GO/Au	Benzo[a]pyrene	SERS	5 $\mu\text{g L}^{-1}$ to 10 mg L^{-1}	3,8 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Air sungai	(Q. Li et al., 2025)

Berdasarkan data pada Tabel 1, sensor berbasis grafena menunjukkan performa analitik yang sangat baik dalam deteksi berbagai jenis PAH. Sebagian besar sensor memiliki batas deteksi pada tingkat nanomolar, menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap analit target. Kombinasi grafena dengan material lain umumnya memberikan peningkatan sensitivitas akibat efek sinergis antara konduktivitas grafena dan aktivitas katalitik nanopartikel logam. Hal tersebut menunjukkan bahwa sensor berbasis grafena memiliki akurasi dan potensi aplikasi yang baik untuk analisis lingkungan secara langsung.

CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES

Pengembangan sensor berbasis *grafena-based nanomaterials* untuk deteksi PAH telah menunjukkan kemajuan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Material seperti grafena, *grafena oxide*, *reduced grafena oxide*, dan *grafena quantum dots* menawarkan berbagai keunggulan berupa luas permukaan tinggi, konduktivitas listrik yang baik, sensitivitas tinggi, serta kemampuan modifikasi permukaan yang fleksibel (Apsey et al., 2025; Ramoso et al., 2025; Shi et al., 2024). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa material berbasis grafena mampu meningkatkan performa sensor dalam mendeteksi PAH pada konsentrasi rendah dengan waktu respon yang cepat (B. Ali et al., 2021; Li et al., 2025; Mogashane et al., 2024; Niruba et al., 2023; Sun et al., 2024). Meskipun demikian, penerapan sensor berbasis grafena dalam aplikasi nyata masih menghadapi berbagai tantangan yang perlu diselesaikan agar teknologi ini dapat digunakan secara luas dan berkelanjutan.

Salah satu tantangan utama dalam pengembangan sensor berbasis grafena adalah stabilitas material. Material grafena dan turunannya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, pH, serta keberadaan zat kimia lain yang dapat memengaruhi karakteristik permukaan dan performa sensor. Pada material GO dan rGO, perubahan struktur akibat oksidasi lanjutan atau agregasi nanosheet dapat menyebabkan penurunan luas permukaan aktif dan konduktivitas listrik. Selain itu, beberapa nanokomposit berbasis grafena juga mengalami degradasi performa akibat pelepasan nanopartikel logam dari permukaan material selama penggunaan berulang. Ketidakstabilan tersebut dapat menyebabkan penurunan sensitivitas, perubahan respon sinyal, dan berkurangnya umur pakai sensor.

Untuk mengatasi permasalahan stabilitas, berbagai strategi telah dikembangkan, seperti modifikasi permukaan menggunakan polimer konduktif, pengembangan material hibrida, dan penggunaan metode sintesis yang lebih terkontrol (Ahmadipour et al., 2025; Jagga, 2026). Penambahan polimer atau material pendukung tertentu dapat meningkatkan stabilitas mekanik dan mencegah agregasi lembaran grafena. Selain itu, optimasi metode penyimpanan dan kondisi operasional sensor juga menjadi aspek penting dalam mempertahankan performa material dalam jangka panjang. Pengembangan grafena dengan struktur tiga dimensi (*3D grafena*) juga mulai menarik perhatian karena mampu meningkatkan kestabilan struktur sekaligus mempertahankan luas permukaan aktif yang tinggi (Umar et al., 2023; Xiao et al., 2023).

Tantangan berikutnya adalah selektivitas sensor terhadap interferensi dari senyawa lain. Dalam sampel lingkungan nyata, PAH biasanya berada bersama berbagai senyawa organik maupun ion lain yang dapat menghasilkan sinyal serupa dan mengganggu proses deteksi. Interferensi ini menjadi masalah serius karena dapat menurunkan akurasi dan reliabilitas hasil analisis. Meskipun grafena memiliki sensitivitas tinggi, material ini pada dasarnya memiliki sifat adsorpsi yang relatif non-spesifik terhadap berbagai senyawa aromatik sehingga masih diperlukan upaya untuk meningkatkan selektivitas sensor.

Beberapa pendekatan telah dilakukan untuk meningkatkan selektivitas, salah satunya melalui fungsionalisasi permukaan grafena menggunakan biomolekul, polimer selektif, atau nanopartikel logam tertentu. Modifikasi tersebut dapat menciptakan situs pengikatan spesifik terhadap molekul PAH tertentu sehingga mengurangi pengaruh interferensi (Abdolahpur et al., 2025; Qamar et al., 2024). Selain itu, penggunaan teknik *molecularly imprinted polymers* (MIP) yang dikombinasikan dengan grafena juga menunjukkan potensi yang besar dalam meningkatkan kemampuan pengenalan molekul target secara selektif (Qin et al., 2024). Pengembangan sensor multi-sinyal dan integrasi teknologi kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) untuk analisis pola sinyal juga menjadi arah penelitian yang menjanjikan dalam meningkatkan akurasi deteksi pada sampel kompleks.

Reproduksibilitas sintesis material berbasis grafena juga menjadi tantangan penting dalam pengembangan sensor PAH. Hingga saat ini, berbagai metode sintesis grafena dan turunannya masih menghasilkan variasi karakteristik material yang cukup besar, seperti perbedaan ukuran lembaran, jumlah gugus fungsi, tingkat reduksi, hingga distribusi nanopartikel pada permukaan material. Variasi tersebut dapat menyebabkan perbedaan performa sensor antar batch produksi sehingga menyulitkan proses standarisasi dan komersialisasi.

Tabel 2. Tantangan dan prospek pengembangan grafena-based nanomaterials sebagai sensor PAH

Aspek	Tantangan	Dampak	Future Perspectives
Stabilitas Material	Grafena dan turunannya rentan mengalami agregasi, oksidasi lanjutan, dan penurunan konduktivitas akibat kondisi lingkungan.	Menurunkan sensitivitas, stabilitas sinyal, dan umur pakai sensor.	Pengembangan grafena 3D, pelapisan polimer konduktif, dan optimasi kondisi penyimpanan sensor.
Selektivitas terhadap Interferensi	Adanya senyawa organik lain dalam sampel lingkungan dapat menghasilkan sinyal yang mengganggu deteksi PAH.	Mengurangi akurasi dan reliabilitas hasil analisis.	Fungsionalisasi permukaan, penggunaan molecularly imprinted polymers (MIP), dan integrasi AI untuk analisis sinyal.
Reproduksibilitas Sintesis	Variasi metode sintesis menghasilkan perbedaan ukuran, gugus fungsi, dan konduktivitas material.	Performa sensor tidak konsisten antar batch produksi.	Standarisasi metode sintesis dan pengembangan green synthesis yang lebih reproducible.
Aplikasi Portable Sensor	Sebagian besar sensor masih berbasis laboratorium dan memerlukan instrumen kompleks.	Sulit diaplikasikan untuk monitoring lapangan secara real-time.	Pengembangan sensor miniatur berbasis IoT, perangkat fleksibel, dan integrasi smartphone.
Pengembangan Nanokomposit Baru	Diperlukan material dengan sensitivitas dan selektivitas lebih tinggi.	Performa sensor masih terbatas pada kondisi tertentu.	Pengembangan komposit grafena dengan nanopartikel logam, MOFs, dan heteroatom-doped grafena.

Sebagai contoh, proses sintesis GO menggunakan metode Hummers yang dimodifikasi sering menghasilkan tingkat oksidasi yang berbeda tergantung kondisi reaksi dan kualitas bahan awal. Demikian pula pada sintesis rGO, metode reduksi yang berbeda dapat menghasilkan konduktivitas dan struktur permukaan yang tidak seragam. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan metode sintesis yang lebih sederhana, terkontrol, dan reproducible untuk menghasilkan material dengan kualitas yang konsisten. Penggunaan pendekatan *green synthesis* berbasis biomaterial juga mulai dikembangkan sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis (El-shabasy et al., 2026; Gijare et al., 2024).

Selain aspek material, tantangan lain yang sangat penting adalah pengembangan sensor portable untuk aplikasi lapangan. Sebagian besar penelitian sensor berbasis grafena masih dilakukan pada skala laboratorium menggunakan instrumen yang relatif kompleks. Padahal, aplikasi nyata dalam pemantauan lingkungan membutuhkan perangkat yang praktis, ringan, mudah digunakan, dan mampu memberikan hasil secara real-time. Pengembangan sensor portable menjadi sangat penting untuk mendukung monitoring kualitas lingkungan secara langsung di lokasi pencemaran.

Kemajuan teknologi elektronik fleksibel dan perangkat mikrofluida memberikan peluang besar dalam pengembangan sensor portable berbasis grafena. Integrasi grafena dengan elektroda miniatur, sistem *wireless*, dan perangkat berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan pengembangan sistem monitoring PAH yang lebih efisien dan otomatis. Selain itu, penggunaan smartphone sebagai platform pembacaan sinyal sensor juga mulai dikembangkan karena lebih praktis dan mudah diakses (Savas, 2025). Tantangan utama dalam pengembangan sensor portable adalah mempertahankan sensitivitas dan stabilitas sensor meskipun dalam ukuran perangkat yang kecil dan kondisi lingkungan yang bervariasi.

Di sisi lain, pengembangan nanokomposit baru berbasis grafena menjadi salah satu fokus utama dalam penelitian sensor modern. Kombinasi grafena dengan berbagai material seperti nanopartikel logam, oksida logam, *metal-organic frameworks* (MOFs), polimer konduktif, dan material karbon lainnya bertujuan untuk menghasilkan efek sinergis yang dapat meningkatkan performa sensor secara signifikan. Nanokomposit tersebut mampu meningkatkan luas permukaan aktif, mempercepat transfer elektron, meningkatkan stabilitas, serta memperbaiki selektivitas terhadap molekul target.

Sebagai contoh, kombinasi rGO dengan nanopartikel emas atau perak dapat meningkatkan sensitivitas elektrokimia melalui peningkatan aktivitas katalitik dan konduktivitas Listrik (Alatawi et al., 2022; Yaseen et al., 2024). Sementara itu, integrasi grafena dengan MOFs menawarkan struktur pori yang besar dan kemampuan adsorpsi tinggi terhadap molekul PAH (Nguyen et al., 2025). Pengembangan material berbasis heteroatom-doped grafena, seperti nitrogen-doped grafena atau sulfur-doped grafena, juga menunjukkan peningkatan performa sensor akibat perubahan distribusi elektron pada struktur karbon (Denis, 2022).

Ke depan, pengembangan sensor berbasis grafena diperkirakan akan semakin mengarah pada sistem deteksi yang lebih cerdas, portabel, dan ramah lingkungan. Integrasi teknologi nanomaterial

dengan kecerdasan buatan, perangkat wearable, dan sistem monitoring berbasis IoT berpotensi menghasilkan platform deteksi PAH yang lebih akurat dan efisien. Selain itu, pengembangan metode sintesis yang murah, sederhana, dan berkelanjutan akan menjadi faktor penting dalam memperluas aplikasi teknologi ini pada skala industri maupun pemantauan lingkungan secara global.

Secara keseluruhan, meskipun masih menghadapi berbagai tantangan seperti stabilitas material, selektivitas, reproduksibilitas sintesis, dan implementasi perangkat portable, grafena-based nanomaterials tetap menunjukkan prospek yang sangat menjanjikan sebagai material sensor untuk deteksi PAH. Dengan terus berkembangnya teknologi nanomaterial dan rekayasa sensor, diharapkan sistem deteksi berbasis grafena di masa depan dapat memberikan performa yang lebih baik, biaya lebih rendah, serta mampu mendukung pengawasan lingkungan secara cepat dan akurat.

KESIMPULAN

Nanomaterial berbasis grafena seperti grafena, graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO), dan graphene quantum dots (GQDs) menunjukkan potensi yang sangat besar dalam pengembangan sensor untuk deteksi senyawa hidrokarbon aromatik polisiklik (PAHs). Karakteristik utama berupa luas permukaan tinggi, konduktivitas listrik yang baik, kemampuan transfer elektron yang cepat, serta kemudahan modifikasi permukaan menjadikan material berbasis grafena mampu meningkatkan sensitivitas, selektivitas, dan batas deteksi sensor hingga tingkat nanomolar. Berbagai metode deteksi seperti sensor elektrokimia, fluoresensi, dan surface-enhanced Raman scattering (SERS) telah berhasil diaplikasikan pada berbagai sampel nyata seperti air sungai, partikulat udara, urin, serta produk pangan. Kombinasi grafena dengan nanopartikel logam, metal-organic frameworks (MOFs), polimer konduktif, dan material karbon lainnya menghasilkan efek sinergis yang semakin meningkatkan performa sensor. Meskipun demikian, pengembangan sensor berbasis grafena masih menghadapi beberapa keterbatasan seperti stabilitas material, selektivitas terhadap interferensi senyawa lain, reproduksibilitas sintesis, serta pengembangan perangkat portable untuk aplikasi lapangan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut terkait optimasi sintesis material, pengembangan nanokomposit baru, serta integrasi teknologi sensor dengan sistem portable dan Internet of Things (IoT) agar aplikasi sensor berbasis grafena dapat digunakan secara lebih luas, efisien, dan berkelanjutan dalam monitoring lingkungan maupun keamanan pangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdolahpur, F., Andrew, J., Guo, Z., Chakraborty, S., Monikh, F. A., & Varsou, D. (2025). *Surface functionalization of grafena-based materials Surface Functionalization of Grafena-Based Materials : Biological Behavior , Toxicology , and Safe-By-Design Aspects*. <https://doi.org/10.1002/adbi.202100637>
- Ahmadipour, M., Saqlain, M., & Athar, M. (2025). Results in Engineering Modification strategies of conductive polymers with advanced carbon materials for energy and environmental solutions. *Results in Engineering*, 28(August), 107168. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107168>
- Alatawi, H., Alsefri, S., & Moore, E. (2022). *Electrochemical Synthesis of Reduced Grafena Oxide / Gold Nanoparticles in a Single Step for Carbaryl Detection in Water*.
- Ali, B., Jahdaly, A., Elsadek, M. F., Ahmed, B. M., Farahat, F., Taher, M. M., & Khalil, A. M. (2021). *Outstanding Grafena Quantum Dots from Carbon Source for Biomedical and Corrosion Inhibition Applications : A Review*.
- Ali, S. R., Anwar, Y., & Ali, H. M. (2025). *Environmental Impacts , Health Risks , and Biodegradation Strategies of Fluorene and Other Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. 19(January), 2429–2440. <https://doi.org/10.22207/JPAM.19.4.39>
- Amin, F., Kim, S., Baek, S.-Y., Yim, Y.-H., Karuppiah, C., & Lee, H. J. (2025). Hydrophobic interaction-driven binary 2D grafena layers integrated sensor for electrochemical detection of carcinogenic benzo[a]pyrene in airborne particulate matter. *Microchemical Journal*, 218, 115629. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.115629>
- Apsey, H., Hill, D., Mccoy, T. M., Villeda-hernandez, M., Faul, C. F. J., & Alexander, S. (2025). Journal of Colloid And Interface Science Conductive hydrophobic grafena oxide films via laser-scribed surface modification. *Journal of Colloid And Interface Science*, 687(January), 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.02.055>
- Auta, M., Alhamdu, I., Diekola, M., Saka, A., Ahmed, Y., Aderemi, M., Abdallahi, A., & Shola, K.

- (2026). FlatChem Grafena-based materials for the treatment of contaminants in groundwater : A systematic review. *FlatChem*, 56(November 2025), 100999. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2026.100999>
- Call, D. F., & Logan, B. E. (2011). A method for high throughput bioelectrochemical research based on small scale microbial electrolysis cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 26(11), 4526–4531. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2011.05.014>
- Chen, L., Tian, X., Li, Y., Yang, C., Huang, Y., & Nie, Y. (2022). Rapid and sensitive screening of multiple polycyclic aromatic hydrocarbons by a reusable fluorescent sensor array. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127694. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127694>
- Cui, H., Cui, S., Tian, Q., Zhang, S., Wang, M., Zhang, P., Liu, Y., Zhang, J., & Li, X. (2021). Electrochemical Sensor for the Detection of 1-Hydroxypyrene Based on Composites of PAMAM-Regulated Chromium-Centered Metal–Organic Framework Nanoparticles and Grafena Oxide. *ACS Omega*, 6(46), 31184–31195. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04765>
- Denis, P. A. (2022). *Heteroatom Codoped Grafena: The Importance of Nitrogen*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06010>
- Dou, N., Zhang, S., & Qu, J. (2019). Simultaneous detection of acetaminophen and 4-aminophenol with an electrochemical sensor based on silver–palladium bimetal nanoparticles and reduced grafena oxide. *RSC Advances*, 9(54), 31440–31446. <https://doi.org/10.1039/C9RA05987C>
- El-shabasy, R. M., Zayed, A., Farag, M. A., & Shoueir, K. R. (2026). Materials Today Sustainability Green synthesis of relevant and sustainable bio-applications of few-layer grafena : A multi-faceted review and future perspectives. *Materials Today Sustainability*, 33(November 2025), 101259. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101259>
- Fan, Z., Li, S., Yuan, F., & Fan, L. (2015). Fluorescent grafena quantum dots for biosensing and bioimaging. *RSC Advances*, 5(25), 19773–19789. <https://doi.org/10.1039/C4RA17131D>
- Fernandes-lage, E., Alves, M. J., Moura, C., Garcia, J., & Fernandes-lage, E. (2026). *Optimization and Validation of the SBSE – HPLC – FLD Method for the Determination of Priority Pollutants PAHs in Several Water Matrices*.
- Ghulam, A. N., L, A., Hazeem, L., Backx, B. P., Bououdina, M., & Bellucci, S. (2022). *Grafena Oxide (GO) Materials — Applications and Toxicity on Living Organisms and Environment*.
- Gijare, M. S., Chaudhari, S. R., Ekar, S., Shaikh, S. F., Al-enizi, A. M., Pandit, B., & Garje, A. D. (2024). Journal of Photochemistry & Photobiology, A : Chemistry Green synthesis of reduced grafena oxide (rGO) and its applications in non-enzymatic electrochemical glucose sensors. *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*, 450(July 2023), 115434. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.115434>
- Hasan, R., Habib, A., & Chakrabarty, S. (2026). Results in Chemistry Environmentally sustainable synthesis of reduced grafena oxide using Piper chaba stem extract and its adsorbent efficacy towards wastewater treatment. *Results in Chemistry*, 20(August 2025), 103034. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2026.103034>
- Jagga, D. (2026). Grafena and its derivatives : From synthesis pathways to emerging technological frontiers. *Materials Research Bulletin*, 198(November 2025), 114016. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2026.114016>
- Jan, A., Batool, M., Akram, S., Hussain, A., Ahmad, W., Wani, W. A., Ahmad, R., Ahmad, J., & Kannan, P. (2025). Functionalized Grafena Quantum Dots (FGQDs): A review of their synthesis , properties , and emerging biomedical applications. *Carbon Trends*, 18(July 2024), 100442. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2024.100442>
- Jiang, M., Qian, Z., Zhou, X., Xin, X., Wu, J., Chen, C., Zhang, G., Xu, G., & Cheng, Y. (2015). CTAB micelles assisted rGO–AgNP hybrids for SERS detection of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(33), 21158–21163. <https://doi.org/10.1039/C4CP04888A>
- Karuppiah, C., Kim, S., Lee, S. Y., Lee, G., Ahmed, I., Jhung, S. H., Baek, S.-Y., Yim, Y.-H., Alam, R., Kim, M.-S., & Lee, H. J. (2025). Synergistic NH₂-MIL-101(Fe)/thermally reduced grafena oxide composite integrated voltammetric sensor for carcinogenic chrysene in particulate matter.

- Sensors and Actuators B: Chemical*, 445, 138539. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.138539>
- Kashif, M., Ahmad, S., Goyal, A., Yousef, M., Kuttiani, J., Alhseinat, E., & Chrysikopoulos, C. V. (2025). From synthesis to applications : Exploring the potential of grafena quantum dots in water treatment. *Environmental Research*, 286(P2), 122877. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122877>
- Kim, Y., & Kim, S. (2026). Food Chemistry : X Evaluation of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) mass concentrations in smoke generated during pork belly grilling over charcoal. *Food Chemistry: X*, 34(January), 103558. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2026.103558>
- Kumunda, C., Adekunle, A. S., Mamba, B. B., Hlongwa, N. W., & Nkambule, T. T. I. (2021). Electrochemical Detection of Environmental Pollutants Based on Grafena Derivatives: A Review. *Frontiers in Materials*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.616787>
- Kuznetsova, O. V. (2026). Talanta Development and validation of a gas chromatography – mass spectrometry (GC-MS) method for analyzing the polycyclic aromatic hydrocarbons in microplastics. *Talanta*, 306(March), 129757. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2026.129757>
- Lee, J.-H., Park, S.-J., & Choi, J.-W. (2019). Electrical Property of Grafena and Its Application to Electrochemical Biosensing. *Nanomaterials*, 9(2), 297. <https://doi.org/10.3390/nano9020297>
- Li, H., & Papadakis, R. (2023). Fluorescence Imaging Enhanced by Members of the Grafena Family: A Review. In *Fluorescence Imaging - Recent Advances and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.113228>
- Li, Q., Zheng, Q., Shi, J., Yan, Y., Guo, X., & Yang, H. (2025). Magnetic optimizing surface-enhanced Raman scattering (SERS) strategy of detection and in-situ monitoring of photodegradation of Benzo[a]pyrene in water. *Analytica Chimica Acta*, 1336, 343466. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343466>
- Li, Q., Zheng, Q., Shi, J., Yan, Y., Guo, X., & Yang, H. (2025). Analytica Chimica Acta Magnetic optimizing surface-enhanced Raman scattering (SERS) strategy of detection and in-situ monitoring of photodegradation of Benzo [a] pyrene in water. *Analytica Chimica Acta*, 1336(November 2024), 343466. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343466>
- Liu, S., Wei, M., Zheng, X., Xu, S., & Zhou, C. (2014). Highly sensitive and selective sensing platform based on π - π interaction between tricyclic aromatic hydrocarbons with thionine–grafena composite. *Analytica Chimica Acta*, 826, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.04.010>
- Mogashane, T. M., Maree, J. P., & Mokoena, L. (2024). *Adsorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Wastewater Using Iron Oxide Nanomaterials Recovered from Acid Mine Water : A Review*.
- Montano, L., Baldini, G. M., Piscopo, M., Liguori, G., Lombardi, R., Ricciardi, M., Esposito, G., Pinto, G., Fontanarosa, C., & Spinelli, M. (2025). *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Environment : Occupational Exposure , Health Risks and Fertility Implications*.
- Negara, S. P. J., Raya, I., Maming, M., & Natsir, H. (2023). *Synthesis of Grafena Oxide from Batteries Carbon Waste*. 050024.
- Nguyen, C. T., Tec-caamal, E. N., Natarajan, A., & Thanh, N. C. (2025). iScience Review New strategies and advancements in the synthesis of metal organic frameworks for PAHs removal. *ISCIENCE*, 28(6), 112561. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112561>
- Niruba, H., Tan, K., Shih, Y., Doong, R., Manu, B., & Ding, J. (2023). Journal of Hazardous Materials Advances Surface interaction of tetrabromobisphenol A , bisphenol A and phenol with grafena-based materials in water : Adsorption mechanism and thermodynamic effects. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9(October 2022), 100227. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100227>
- Oluwafemi, S., Majooni, Y., Moayed, M., Rezvani, H., Kapadia, M., & Yousefi, N. (2024). Chemosphere Grafena-based nanomaterials for the removal of emerging contaminants of concern from water and their potential adaptation for point-of-use applications. *Chemosphere*, 355(March), 141728. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141728>
- Pang, Y., Huang, Y., Li, W., Yang, N., & Shen, X. (2020). Electrochemical Detection of Three Monohydroxylated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Electroreduced Grafena Oxide

- Modified Screen-printed Electrode. *Electroanalysis*, 32(7), 1459–1467. <https://doi.org/10.1002/elan.201900692>
- Parnianchi, F., Nazari, M., Maleki, J., & Mohebi, M. (2018). Combination of grafena and grafena oxide with metal and metal oxide nanoparticles in fabrication of electrochemical enzymatic biosensors. *International Nano Letters*, 8(4), 229–239. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0253-3>
- Prabakaran, G., Velmurugan, K., David, C. I., & Nandhakumar, R. (2022). Role of Förster Resonance Energy Transfer in Grafena-Based Nanomaterials for Sensing. *Applied Sciences*, 12(14), 6844. <https://doi.org/10.3390/app12146844>
- Qamar, S., Ramzan, N., & Aleem, W. (2024). Grafena dispersion , functionalization techniques and applications : A review. *Synthetic Metals*, 307(February), 117697. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2024.117697>
- Qin, J., Tang, H., Qu, G., Pan, K., Wei, K., & Lv, J. (2024). Preparation of molecularly imprinted electrochemical sensors for selective detection of hydroxyl radicals based on reduced grafena oxide nanosilver (rGO / AgNPs) composites. *Microchemical Journal*, 199(September 2023), 110006. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110006>
- Rahdar, S., Dehghan, A., Davoudi, M., & Shams, M. (2025). Results in Engineering Functionalized grafena oxide for Cr (VI) removal : A systematic review of functional groups , mechanisms , and environmental implications. *Results in Engineering*, 28(September), 107385. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107385>
- Ramoso, J. P., Rasekh, M., & Balachandran, W. (2025). *Grafena-Based Biosensors : Enabling the Next Generation of Diagnostic Technologies — A Review*.
- Ren, H. (2025). Grafena and Its Derivatives for Electrochemical Sensing. *Sensors*, 25(7), 1993. <https://doi.org/10.3390/s25071993>
- Rigi, P., Kamani, H., Ansari, H., Mohammadi, L., & Dargahi, A. (2025). *Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds (PAHs) in grilled meats in Zahedan city of Iran*. 1–21.
- S. A., N., & P. B. C., F. (2020). Development of a turn-on grafena quantum dot-based fluorescent probe for sensing of pyrene in water. *RSC Advances*, 10(21), 12119–12128. <https://doi.org/10.1039/C9RA10153E>
- Samara, F., Obaideen, K., Moyet, M., Darra, R., Venkatesh, G., & Kanan, S. (2025). *Energy Conversion and Management : X Environmental advantages and current trends of grafena-based materials for energy storage*. 28(September).
- Savas, S. (2025). *Smartphone-Integrated Electrochemical Devices for Contaminant Monitoring in Agriculture and Food : A Review*. 1–33.
- Shaker, L. M., Abdulamier, A. A., & Al-amiery, A. A. (2025). Grafena-based materials for next-generation energy storage : Progress , challenges , and future outlook. *Journal of Alloys and Compounds*, 1036(July), 182079. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.182079>
- Shamloo, E., Shokri, S., Sadighara, P., Fallahizadeh, S., Ghasemi, A., Abdi-moghadam, Z., Rezagholizade-shirvan, A., & Mazaheri, Y. (2024). Food Chemistry : X Application of nanomaterials for determination and removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in food products : A review. *Food Chemistry: X*, 24(August), 101833. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101833>
- Sharma, R., Kumar, H., Yadav, D., Saini, C., Kumari, R., Kumar, G., Babu, A., Pandit, V., & Ayoub, M. (2024). Synergistic advancements in nanocomposite design : Harnessing the potential of mixed metal oxide / reduced grafena oxide nanocomposites for multifunctional applications. *Journal of Energy Storage*, 93(May), 112317. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112317>
- Shi, Z., Han, L., & Dong, Y. (2024). Electrochemical sensor based on reduced grafena oxide paste electrode for detection of gemcitabine as a chemotherapy drug in breast cancer. *Alexandria Engineering Journal*, 102(May), 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.116>
- Sun, Y., Sun, W., Li, J., Zhang, T., Zhao, W., & Xiang, G. (2024). Highly graphitized porous carbon / reduced grafena oxide for ultrahigh enrichment and ultrasensitive determination of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Hazardous Materials*, 462(July 2023), 132699.

- <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132699>
- Teli, A. M., Mane, S. M., Bknalkar, S. A., Mishra, R. K., & Jeon, W. (2025). *Grafena-Based Gas Sensors : State-of-the-Art Developments for Gas Sensing Applications*. 1–39.
- Tladi, B. C., Tshabalala, Z. P., Kroon, R. E., Swart, H. C., & Motaung, D. E. (2024). Influence of reduced grafena oxide layer on sensing characteristics of Co₃O₄ / rGO nanocomposite towards Liquefied Petroleum Gas (LPG). *Journal of Alloys and Compounds*, 1007(February), 176464. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.176464>
- Trivedi, R., Malode, D., Umekar, M., & Shidhaye, S. (2026). Next Nanotechnology Grafena quantum dots : Synthesis , applications , and future directions in bioimaging and cancer therapy. *Next Nanotechnology*, 9(January 2025), 100326. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100326>
- Umar, E., Ikram, M., Haider, J., Nabgan, W., & Imran, M. (2023). *Journal of Environmental Chemical Engineering 3D grafena-based material : Overview , perspective , advancement , energy storage , biomedical engineering and environmental applications a bibliometric analysis*. 11(May).
- Venkatraman, G., Giribabu, N., Sakthi, P., Muttiah, B., Kumar, V., Alagiri, M., Shafinaz, P., & Rahman, A. (2024). Chemosphere Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies : A detailed review. *Chemosphere*, 351(July 2023), 141227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141227>
- Vijayanand, M., Ramakrishnan, A., & Subramanian, R. (2023). Polyaromatic hydrocarbons (PAHs) in the water environment : A review on toxicity , microbial biodegradation , systematic biological advancements , and environmental fate. *Environmental Research*, 227(March), 115716. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115716>
- Wang, S., Cheng, J., Han, C., & Xie, J. (2020). A Versatile SERS Sensor for Multiple Determinations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Its Application Potential in Analysis of Fried Foods. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/4248029>
- Wu, R., Cao, Y., Chen, Z., & Zhu, J. (2025). *Fluorescent grafena quantum dots : Properties regulation , sensing applications , and future prospects ☆*. 4(January). <https://doi.org/10.1016/j.asems.2025.100140>
- Xiao, W., Li, B., Yan, J., Wang, L., Huang, X., & Gao, J. (2023). Three dimensional grafena composites : preparation , morphology and their multi-functional applications. *Composites Part A*, 165(November 2022), 107335. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107335>
- Xu, W., Mao, N., & Zhang, J. (2013). Grafena: A Platform for Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. *Small*, 9(8), 1206–1224. <https://doi.org/10.1002/sml.201203097>
- Yaseen, S., Emerson, P., Selvaraj, M., Sultana, W., & Bharathi, D. (2024). Effects of AgO incorporation with 2D rGO nanocomposite characteristics and its beneficial electrochemical detection of acetaminophen. *Inorganic Chemistry Communications*, 164(April), 112453. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112453>
- Zainal, P. N. S., Alang Ahmad, S. A., Lim, H. N., & Ling, I. (2021). Development of Electrochemical Sensor Based on Thiolated Calixarene-Functionalized Gold Nanoparticles for the Selective Recognition of Anthracene. *IEEE Sensors Journal*, 21(5), 5703–5710. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3038916>
- Zameran, N. I., & Saleh, N. (2025). *Grafena-based magnetic covalent organic frameworks and deep eutectic solvent functionalized adsorbents for polycyclic aromatic hydrocarbons : a review*.
- Zhang, L., Wang, X., Chen, C., Wang, R., Qiao, X., Waterhouse, G. I. N., & Xu, Z. (2023). A surface-enhanced Raman scattering sensor for the detection of benzo[a]pyrene in foods based on a gold nanostars@reduced grafena oxide substrate. *Food Chemistry*, 421, 136171. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136171>
- Zheng, P., & Wu, N. (2017). Fluorescence and Sensing Applications of Grafena Oxide and Grafena Quantum Dots: A Review. *Chemistry – An Asian Journal*, 12(18), 2343–2353. <https://doi.org/10.1002/asia.201700814>