

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kanker merupakan salah satu penyebab kematian terbesar di dunia dengan menempati urutan nomor dua dan hampir 17,5% dari seluruh kematian di dunia diakibatkan oleh kanker pada tahun 2021 menurut data *World Health Organization* (WHO). Diperkirakan angka kematian akibat kanker pada tahun 2022 adalah sekitar 10 juta orang di seluruh dunia (Abas dkk., 2024). Beberapa pengobatan diajukan untuk pengobatan kanker antara lain adalah kemoterapi, radioterapi, dan operasi pengangkatan sel kanker. Akan tetapi pengobatan secara konvensional menimbulkan efek samping serius serta kurang selektif dalam menargetkan sel kanker dibandingkan sel normal. Dalam upaya untuk meningkatkan selektifitas, dapat dilakukan dengan menggabungkan senyawa obat dengan zat pembawa berbasis nanomaterial. Salah satu nanomaterial yang dapat digunakan adalah Grafena Quantum Dot (GQD). Selain itu pengobatan kanker juga dapat dilakukan dengan menggunakan tanaman obat alami biaya yang murah, keefektifannya, dan risiko efek samping minimal (Yadav dkk., 2024).

GQD merupakan struktur nano karbon luminesensi berdimensi nol berbentuk sebuah cakram terkonjugasi π yang terdiri dari beberapa lapisan lembaran nano grafena dengan diameter kurang 10 nm dan ketebalan kurang dari 100nm (Mahto dkk., 2024). GQD dapat diaplikasikan sebagai sensor kimia, biosensing, bioimaging, fotokatalis, pengiriman obat (*drug delivery*). Dibandingkan dengan quantum dot semikonduktor konvensional yang sebelumnya

telah banyak digunakan, GQD memiliki beberapa keunikan seperti emisi fluoresensi yang dapat diatur dan stabilitas fisikokimia serta fotokimia yang sangat baik (Lim dkk., 2015).

Sintesis GQD dapat dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu pendekatan *top-down* dan *bottom-up*. Pendekatan “*Top-down*” atau “atas ke bawah” menggunakan sumber daya karbon yang lebih besar seperti grafit, *graphene*, dan karbon aktif untuk dipecah menjadi unsur-unsur yang lebih kecil menggunakan bantuan seperti ablasi laser, elektrokimia, dan debit lengkung. Bahan dasar yang biasanya digunakan adalah karbon terhibridisasi sp^2 yang tidak mempunyai celah energi atau celah pita yang efisien. Pendekatan tersebut memiliki kelemahan pemurnian hasil sintesis memerlukan biaya dan mahal dan morfologi serta distribusi ukuran GQD tidak dapat dikontrol secara akurat. Pendekatan “*Bottom-up*” menggunakan karbon kecil seperti asam amino, polimer, karbohidrat, dan sisa material untuk digabungkan agar menghasilkan GQD dengan berbagai macam teknik seperti hidrotermal/solvothermal. Combustion, pirolisis, dan iradiasi gelombang mikro. Metode pendekatan ini menghasilkan ukuran dan struktur GQD berdasarkan beberapa faktor seperti pelarut, struktur molekul prekursor, dan kondisi reaksi seperti suhu, tekanan, waktu, reaksi, dll. Metode ini memiliki keunggulan dalam hal operasi yang mudah, biaya murah, dan kemudahan penggunaan untuk produksi dalam skala besar (Karami dkk., 2024).

Pendekatan “*bottom-up*” dengan menggunakan metode hidrotermal memiliki keunggulan menghasilkan karena menghasilkan kristal dengan ukuran seragam, biaya yang murah, sintesis yang cepat, serta peralatan yang dibutuhkan

tidak terlalu banyak. Metode ini juga memberikan kemudahan karena dapat menggunakan pelarut akuades serta produk yang dihasilkan memiliki tingkat toksisitasnya relatif rendah (Mahto dkk., 2024). Limbah biomassa batang padi dapat dimanfaatkan menjadi prekursor untuk membuat GQD karena memiliki kandungan lignoselulosa yang lignoselulosa yang mengandung selulosa 38%, hemiselulosa 25%, dan lignin 12%. Dibandingkan dengan limbah biomassa lainnya, batang padi memiliki selulosa dan lignin yang rendah namun tinggi kandungan hemiselulosanya (Hung dkk., 2020). Kandungan karbon yang terdapat pada limbah batang padi tersebutlah yang nantinya akan dimanfaatkan dan diubah menjadi nano karbon berupa GQD.

GQD dapat dilakukan *doping* dengan beberapa heteroatom bertujuan untuk meningkatkan sifat kimia dan elektronik dari GQD. Salah heteroatom yang dapat digunakan adalah nitrogen. Adanya *doping* nitrogen ke dalam struktur GQD dapat meningkatkan kompatibilitas menjadi semakin tinggi dengan memancarkan emisi fluoresensi biru (Khodadadei dkk., 2017). Pancaran emisi biru yang dihasilkan GQD yang terdoping nitrogen juga lebih baik dan stabil dibandingkan dengan GQD tanpa doping. Hal tersebut memungkinkan untuk melakukan pelacakan pergerakan GQD sebagai *nanocarrier* di dalam sel atau jaringan tubuh secara *realtime* (X. Liu & Sun, 2023). Bertambahnya jumlah gugus fungsional ke dalam GQD juga membuat GQD kurang beracun bagi sel-sel tubuh dan menciptakan situs atau tempat untuk membentuk ikatan yang lebih kuat dengan molekul obat. Peningkatan itu memastikan obat dapat diangkut dengan efisien menuju sel target (Chen dkk., 2013).

Cengkeh (*Syzygium aromaticum* L.) merupakan rempah yang sudah sering digunakan dalam keperluan medis karena memiliki berbagai komponen aktif seperti eugenol yang dapat bertindak sebagai antioksidan, antiinflamasi, dan antikanker. Senyawa eugenol (4-alil-2-metoksifenol) adalah minyak yang dapat digunakan sebagai antikanker karena memiliki beberapa efek seperti menginduksi kematian sel kanker, menghentikan siklus sel, menghambat migrasi sel kanker, metastasis, dan angiogenesis di beberapa lini sel kanker (Zari dkk., 2021). Secara tinjauan struktur, eugenol memiliki cincin benzena dengan gugus alil ($-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}_2$) pada posisi para, metoksi ($-\text{OCH}_3$), dan hidroksil ($-\text{OH}$) pada posisi orto yang dapat dimodifikasi sehingga menghasilkan senyawa turunan yang lebih bermanfaat dengan sifat kimia yang baik (Prasetya dkk., 2019). Keberadaan gugus-gugus tersebut memberikan sifat reaktif tinggi dan kemampuan berinteraksi dengan berbagai molekul biologis lainnya.

Meskipun memiliki banyak keunggulan dalam pengobatan antikanker, eugenol juga memiliki beberapa kelemahan seperti stabilitas kimianya yang rendah, rentan terhadap oksidasi, dan mudah terserap melalui beberapa organ. Untuk meningkatkan stabilitas kimianya, eugenol dapat dipolimerisasi kationik dengan menggunakan katalis asam seperti BF_3 menghasilkan polieugenol rantai pendek. Selain itu, eugenol juga dapat dilakukan dimerisasi membentuk dieugenol atau dehidroeugenol. Sejauh ini belum terdapat penelitian yang meneliti mengenai sifat antikanker yang dimiliki oleh polieugenol maupun dehidroeugenol. Selain itu, penerapan nanomaterial sebagai pembawa eugenol menuju sel target juga dapat

dilakukan sehingga pengobatan dapat berjalan dengan lebih efektif dan mengurangi efek samping yang tidak diinginkan.

Penelitian ini memiliki inovasi untuk membuat material kombinatorial berbasis GQD sebagai zat pembawa serta eugenol dan turunannya sebagai potensi obat untuk terapi kanker. GQD disintesis menggunakan pendekatan *bottom-up* yakni hidrotermal. Dilakukan polimerisasi eugenol menjadi polieugenol dan dimerisasi eugenol menjadi dieugenol.

I.2 Tujuan Penelitian

1. Melakukan sintesis dan karakterisasi GQD dan N-GQD dari limbah biomassa batang padi sisa hasil pertanian melalui metode hidrotermal.
2. Melakukan sintesis dan karakterisasi eugenol dan turunannya, yakni polieugenol dan dieugenol.
3. Melakukan sintesis, pengkajian, dan pengoptimalisasian material kombinatorial GQD/eugenol/polieugenol/dieugenol sebagai obat dalam terapi kanker melalui uji viabilitas pada sel kanker dan antioksidan.

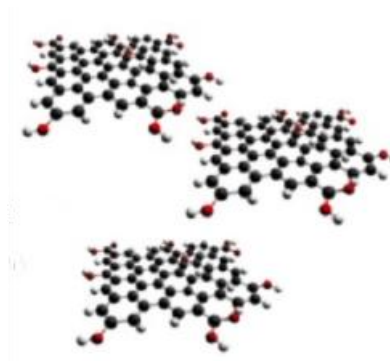
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Grafena Quantum Dot (GQD)

II.1.1 Definisi dan Struktur GQD

Grafena Quantum Dot (GQD) merupakan struktur nano karbon luminesensi berdimensi nol berbentuk sebuah cakram terkonjugasi π yang terdiri dari beberapa lapisan lembaran nano grafena dengan diameter kurang 10 nm dan ketebalan kurang dari 100nm (Mahto dkk., 2024). GQD dapat diaplikasikan sebagai sensor kimia, *biosensing*, *bioimaging*, fotokatalis, pengiriman obat (*drug delivery*). Dibandingkan dengan quantum dot semikonduktor konvensional yang sebelumnya telah banyak digunakan, GQD memiliki beberapa keunikan seperti emisi fluoresensi yang dapat diatur dan stabilitas fisikokimia serta fotokimia yang sangat baik (Lim dkk., 2015). GQD ditunjukkan pada **Gambar II.1**.



Gambar II.1 Struktur GQD (Saadh dkk., 2024)

II.1.2 Sifat Fisikokimia GQD

Grafena Quantum Dot (GQD) memiliki struktur hibridisasi sp^2 yang memunculkan daerah konjugasi dengan berbagai kandungan gugus fungsional

seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), amina (-NH₂), dan epoksi (-C-O-C) yang terletak pada permukaan dan tepi dari GQD. Keberadaan gugus-gugus tersebut memberikan stabilitas koloidal yang sangat baik dalam media berair karena sifatnya yang hidrofilik (Ahirwar dkk., 2017). Kehadiran gugus-gugus fungsional tersebut juga memungkinkan adanya doping dengan nitrogen maupun sulfur untuk meningkatkan sifat elektronik dan optik dari GQD (Sun dkk., 2025).

Fenomena photoluminescence (PL) GQD yang menonjol bergantung pada panjang gelombang eksitasi. Selain itu kondisi pH larutan, ukuran partikel, dan tingkat oksidasi juga dapat mempengaruhi warna emisi cahaya yang dimunculkan oleh GQD saat ditembakkan oleh panjang gelombang eksitasi tertentu. Hal tersebut disebabkan adanya efek *quantum confinement* dan gugus tepi yang meningkatkan transisi elektronik GQD (Pierrat & Gaumet, 2020). Stabilitas kimia GQD penting agar dapat diaplikasikan di berbagai sektor. GQD menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap oksidan karena ukurannya yang lebih kecil dengan rasio tepi ke permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan grafena. Namun GQD juga masih dapat mengalami oksidasi dalam keadaan tertentu seperti suhu yang tinggi atau kehadiran oksidator kuat (Li dkk., 2017).

Dalam sifat kelistrikan, GQD mendapatkan sifat konduktivitas listriknya dari grafena dengan *band gap* terbuka yang memungkinkannya diaplikasikan sebagai perangkat penyimpan energi, biosensor, dan optoelektronik. GQD menunjukkan stabilitas yang tinggi dan fotoluminesensi yang baik meskipun terkena oleh sinar UV maupun pemanasan pada suhu sedang (Saadh dkk., 2024). Sifat fisikokimia GQD yang memiliki luas permukaan besar dengan ukuran yang

kecil, struktur aromatik π terkonjugasi, hidrofilik, dan fotoluminesensi yang terkontrol menjadikan GQD adalah senyawa yang cukup ideal untuk berbagai macam aplikasi seperti *drug delivery*, bioimaging, sensor kimia, dan bahan dalam superkapasitor (Thangadurai dkk., 2022).

II.1.3 Sintesis GQD

GQD dapat disintesis menggunakan dua pendekatan, yaitu pendekatan *top-down* dan *bottom-up*. Pendekatan “*Top-down*” atau “atas ke bawah” menggunakan sumber daya karbon yang lebih besar seperti grafit, grafena, dan karbon aktif untuk dipecah menjadi unsur-unsur yang lebih kecil menggunakan bantuan seperti ablasi laser, elektrokimia, dan debit lengkung. Bahan dasar yang biasanya digunakan adalah karbon terhibridisasi sp^2 yang tidak mempunyai celah energi atau celah pita yang efisien. Pendekatan tersebut memiliki kelemahan pemurnian hasil sintesis memerlukan biaya dan mahal dan morfologi serta distribusi ukuran GQD tidak dapat dikontrol secara akurat (Saadh dkk., 2024).

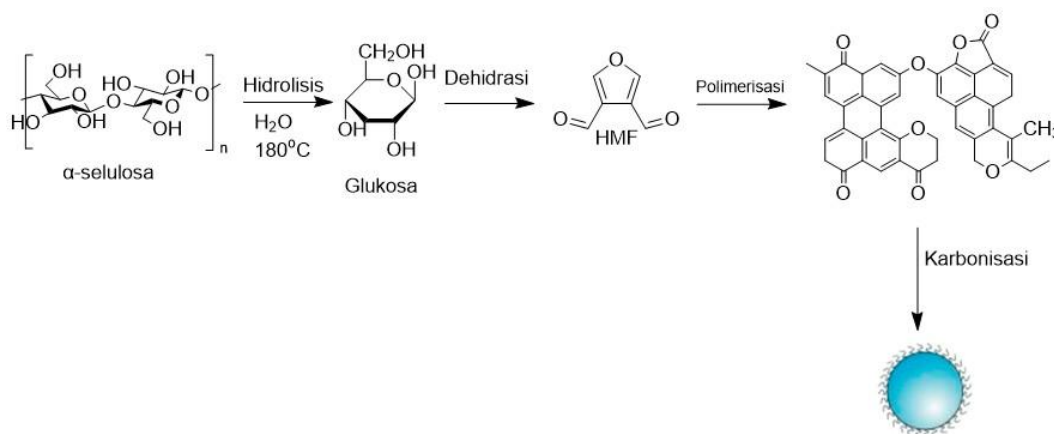
Pendekatan “*Bottom-up*” menggunakan karbon kecil seperti asam amino, polimer, karbohidrat, dan sisa material untuk digabungkan agar menghasilkan GQD dengan berbagai macam teknik seperti hidrotermal/solvothermal, *combustion*, pirolisis, dan iradiasi gelombang microwave. Metode pendekatan ini menghasilkan ukuran dan struktur GQD berdasarkan beberapa faktor seperti pelarut, struktur molekul prekursor, dan kondisi reaksi seperti suhu, tekanan, waktu, reaksi, dll. Metode ini memiliki operasi yang mudah, biaya murah, dan kemudahan penggunaan untuk produksi dalam skala besar (Karami dkk., 2024).

II.1.4 Metode Sintesis Hidrotermal

Sintesis GQD dengan metode hidrotermal merupakan salah satu dari pendekatan *bottom-up* dengan prekursor berupa molekul sederhana yang banyak mengandung unsur karbon. Sintesis hidrotermal memiliki keuntungan kemudahan dalam operasi, biaya murah, dan kemudahan penggunaan untuk produksi dalam skala besar (Karami dkk., 2024). Sintesis GQD dengan metode hidrotermal dapat dilakukan dengan menggunakan pelarut akuades sehingga produk yang dihasilkan memiliki tingkat toksisitas yang relatif rendah. Sintesis menggunakan metode hidrotermal dilakukan dengan menggunakan pelarut berupa akuades di dalam sebuah wadah tertutup (autoklaf) sehingga memunculkan lingkungan dengan tekanan dan suhu yang tinggi (Mahto dkk., 2024). Secara umum mekanisme *bottom-up* GQD dari prekursor kecil melibatkan proses karbonisasi dan polimerisasi. Limbah biomassa yang mengandung banyak unsur karbon dari selulosa, lignoselulosa, maupun hemiselulosa akan mengalami hidrolisis membentuk komponen yang lebih kecil lalu mengalami polimerisasi dan penutupan cincin hingga membentuk cincin aromatik (Z. Wang dkk., 2025).

Hasil yang didapatkan pada metode ini dipengaruhi oleh suhu, waktu, dan prekursor. Semakin tinggi suhu dan lamanya reaksi berjalan akan mengakibatkan GQD yang dihasilkan memiliki ukuran partikel yang lebih besar dengan pergeseran merah. Pengaturan suhu yang moderat seperti suhu 180-220°C selama 6-10 jam menghasilkan GQD dengan ukuran yang lebih seragam dan peningkatan efisiensi luminesensi (B. Wang dkk., 2025). Pemilihan prekursor dalam pembuatan GQD juga dapat mempengaruhi hasil. Penggunaan limbah biomassa sering kali juga

sudah mengandung unsur heteroatom seperti nitrogen maupun fosfor yang dapat ikut terikat juga ke dalam struktur GQD (Facure dkk., 2022). Mekanisme reaksi yang mungkin terjadi saat proses hidrotermal ditunjukkan pada **Gambar II.2**.



Gambar II.2 Mekanisme reaksi hidrotermal

II.1.5 Doping Nitrogen pada GQD

GQD dapat didoping dengan nitrogen karena ukuran atom, struktur, dan elektron valensi ganda yang mirip sehingga memudahkan atom nitrogen untuk berikatan dengan karbon. GQD terdoping nitrogen sering disebut sebagai N-GQD. Sumber nitrogen bisa didapatkan dari urea, etilendiamin, maupun etilendiamintetraasetat. Doping nitrogen mampu meningkatkan sifat elektronik dan kimia serta kelarutan dari GQD (Kaur dkk., 2024). N-GQD mampu meningkatkan kemampuan GQD dalam menyerap cahaya lalu mengemisikannya kembali (Z. Wang dkk., 2025). GQD yang terdoping dengan etilendiamin maupun urea memiliki fluoresensi yang kuat sehingga cocok untuk *bioimaging* dan sensor logam. Selain itu GQD juga menghasilkan *Quantum Yield* (QY) yang lebih tinggi dan lebih banyak gugus fungsional aktif (Zhang dkk., 2019). Hadirnya nitrogen dapat

mengubah struktur GQD menjadi lebih cacat pada permukaannya yang mengakibatkan perilaku GQD tidak bergantung pada eksitasi (Z. Wang dkk., 2025).

II.1.6 Aplikasi GQD

Grafena Quantum Dot (GQD) dapat diaplikasikan pada berbagai bidang karena memiliki ukuran yang kecil, sifat fotoluminesensi yang bagus, stabilitas kimia yang baik, dan biokompatibilitas yang tinggi. GQD dapat dimanfaatkan pada bidang lingkungan, biomedis, energi, elektronik, dan biosensor kimia. GQD dapat dimanfaatkan sebagai deteksi ion logam yang berperan sebagai polutan di lingkungan berair dengan daya serapnya yang tinggi terhadap molekul target (Saadh dkk., 2024). Selain itu GQD juga dapat menjadi katalis dalam reaksi redoks seperti enzim peroksidase sehingga dapat membantu dalam reaksi degradasi molekul redoks seperti H_2O_2 menjadi radikal hidroksil (Deng dkk., 2019).

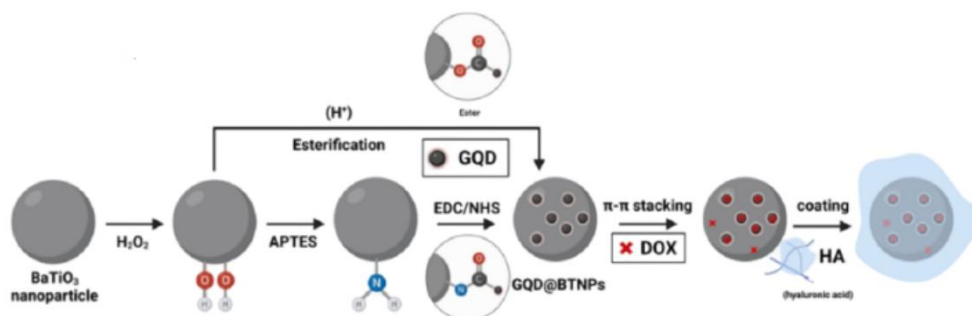
Peran GQD dalam biosensor dan diagnostik salah satunya dapat mendeteksi dan memonitor secara *real time* pelepasan sitokin dengan adanya sifat sensitivitas GQD yang tinggi terhadap perubahan lingkungan kimiawi (G. Liu dkk., 2017). GQD juga dapat menjadi *bioimaging* untuk mendeteksi tumor dengan adanya isotop radioaktif sehingga dapat memetakan tumor seperti glioblastoma. Dengan sifatnya yang seperti itu, GQD juga menunjukkan kemampuan dalam mendeteksi jaringan kanker yang akan maupun sedang berkembang (Tehrani dkk., 2025).

GQD dapat digunakan sebagai pembawa obat (*drug delivery*) untuk kemoterapi dalam upaya untuk mengatasi penyakit kanker. GQD mampu untuk mengangkut obat doxorubicin secara efisien ke dalam sel target dengan pelepasan obat secara terkontrol sehingga efektif dalam mengatasi sel kanker (J. H. Lin dkk.,

2024). GQD juga dapat berperan dalam apoptosis (kematian sel terprogram) pada sel kanker. Mekanisme yang dilakukan GQD adalah dengan meningkatkan *Reactive Oxygen Species* (ROS) di dalam sel kanker sehingga akan memicu kerusakan mitokondria akibat dari meningkatnya stres oksidatif. Selain itu GQD juga dapat menghentikan jalannya siklus sel kanker pada fase G0/G1 atau G2/M (Ku dkk., 2023).

II.1.7 GQD sebagai Pembawa Obat Antikanker

Obat dalam terapi kanker masih kurang optimal karena memiliki beberapa kekurangan seperti ekskresi yang cepat, selektivitas yang rendah, dan metabolisme yang cepat. Penggabungan obat seperti metotreskat (MTX) dengan pembawa yang memiliki ukuran cukup kecil akan meningkatkan sifat penghantaran dan selektivitas MTX. Kompleks obat dan pembawa yang cukup kecil mampu secara efisien untuk mencapai sel yang ingin dituju sehingga memberikan ekskresi yang minimal selama proses penghantaran (Khodadadei dkk., 2017).



Gambar II.3 Mekanisme GQD sebagai *nanocarrier* (J. H. Lin dkk., 2024)

Mekanisme pengikatan antara GQD dengan berbagai macam obat salah satunya kurkumin bersifat π - π *stacking* dan ikatan hidrogen. Model pengikatan seperti itu terjadi karena masing-masing senyawa memiliki beberapa gugus yang

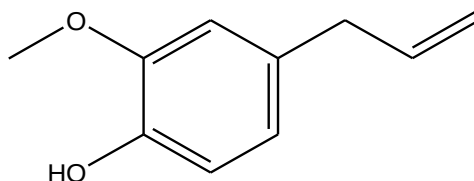
mengandung hidrogen seperti -COOH, -OH, dan -NH₂ (Ghanbari dkk., 2021). N-GQD yang berhasil disintesis oleh Khodadadei dkk. (2017) menunjukkan bahwa MTX bebas berdifusi dengan cepat ke dalam dan keluar sel kanker sehingga menghasilkan sitotoksitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan MTX-(N-GQD) dalam waktu 24 jam. Sebaliknya saat waktu inkubasi yang digunakan melebihi 24 jam, MTX-(N-GQD) memiliki sifat sitotoksitas yang lebih tinggi dibandingkan MTX bebas yang menunjukkan bahwa pengikatan dengan N-GQD akan memperpanjang efek sitotoksik dari obat yang dimuat. Efek sitotoksik yang lama membuat MTX-(N-GQD) lebih efektif dalam pengobatan jangka panjang dibandingkan dengan MTX bebas yang efek sitotoksiknya lebih singkat. Selain itu sistem penghantaran obat dengan GlcN-GQD termuat kurkumin untuk membunuh sel kanker MCF-7 menunjukkan hasil pelepasan berkelanjutan dan terkendali dengan sitotoksitas yang lebih rendah terhadap sel normal sehingga efek samping dapat dikurangi (Ghanbari dkk., 2021).

II.2 Eugenol

II.2.1 Sumber dan Struktur Kimia Eugenol

Eugenol merupakan senyawa aromatik dari kelompok fenol yang memiliki aroma khas dan mudah dijumpai pada minyak atsiri cengkeh (*Syzygium aromaticum*). Selain itu, eugenol juga dapat dijumpai pada kayu manis (*Cinnamomum spp.*), pala (*Myristica fragrans*), dan daun salam (*Laurus nobilis*) meskipun dalam jumlah yang lebih sedikit. Eugenol memiliki rumus kimia C₁₀H₁₂O₂. Minyak cengkeh tersebut didapat dengan cara penyulingan uap dari seluruh bagian pada tanaman cengkeh. Hasil yang didapatkan pada minyak cengkeh

mengandung sebanyak 70% hingga 90% senyawa eugenol (Hikmah & Rahim, 2018).



Gambar II.4 Struktur Eugenol

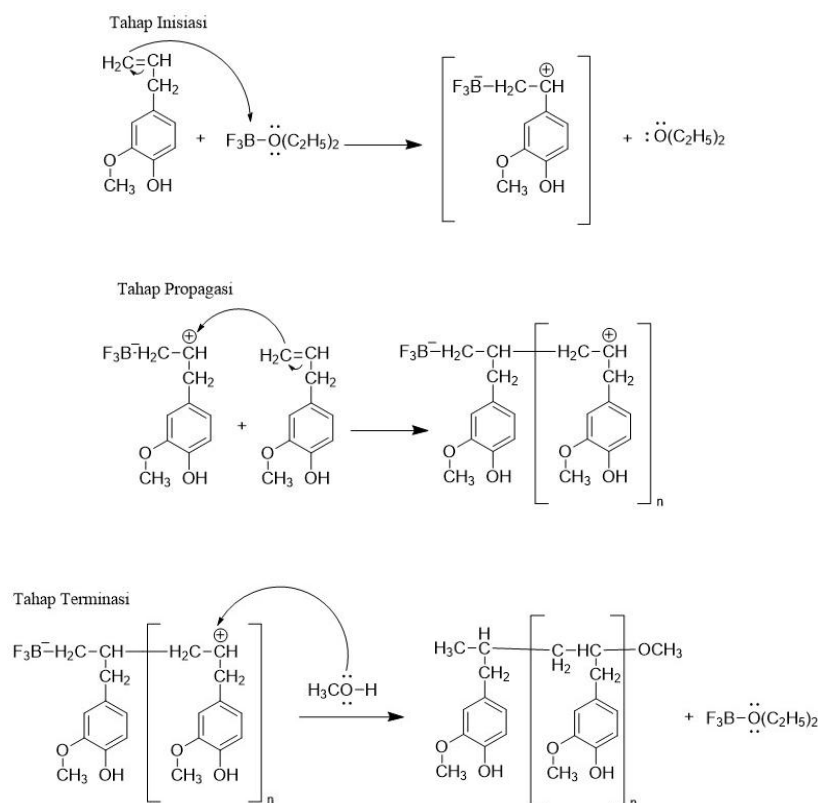
Senyawa eugenol memiliki gugus aktif seperti hidroksil, alil, dan cincin aromatik yang dapat dimodifikasi secara kimia menjadi turunan eugenol lainnya. Keberadaan gugus-gugus tersebut memberikan sifat reaktif yang tinggi dan kemampuan berinteraksi dengan berbagai molekul biologis lainnya sehingga memiliki banyak keuntungan karena modifikasi senyawa turunan eugenol dapat meningkatkan sifat-sifat dari eugenol itu sendiri (Ngadiwiyanana, 2005).

II.2.2 Modifikasi Kimia Eugenol

Modifikasi eugenol menjadi senyawa turunannya dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan sifat-sifat eugenol. Beberapa senyawa turunan eugenol antara lain adalah ester eugenol, derivat metakrilat, derivat eugenolol, derivat triazol, isoeugenol, serta dihidroeugenol. Derivat metakrilat eugenol dapat diaplikasikan sebagai penguat dalam merekatkan antarmuka resin-dentin dengan mengurangi penyerapan air dan memadatkan kepadatan ikatan silang jaringan polimer (Alkattan dkk., 2022). Ester eugenol dapat diaplikasikan untuk antioksidan pada kosmetik dengan cara memberikan perlindungan jangka panjang mengenai *Reactive Oxygen Species* (ROS) di lapisan kulit dalam (Makuch dkk., 2020). Derivat triazol eugenol diaplikasikan sebagai antimalaria. Hasil yang didapatkan

menyatakan terdapat antimalaria jauh lebih tinggi melalui pengujian secara *in vivo* dan *in vitro* dibandingkan dengan eugenol (Jyoti dkk., 2024). Turunan senyawa eugenol berupa isoeugenol memiliki banyak pengaplikasian seperti sebagai agen anti inflamasi, antijamur, antibakteri, dan molekul bioaktif.

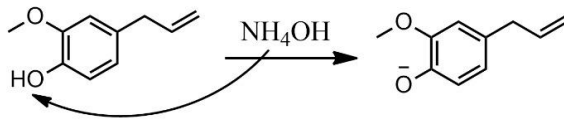
Polieugenol dapat diperoleh dengan cara mereaksikan senyawa eugenol menggunakan polimerisasi. Polimerisasi merupakan reaksi penggabungan monomer-monomer menjadi sebuah molekul polimer dengan berat molekul yang lebih besar. Polimerisasi dikelompokkan menjadi dua, yakni polimerisasi adisi dan polimerisasi kondensasi (Annisa & Helwani, 2015). Polimerisasi adisi merupakan reaksi polimerisasi dengan pembukaan ikatan rangkap menjadi ikatan tunggal untuk kemudian monomer-monomer saling terikat karena pembukaan ikatan tunggal tersebut. Sedangkan polimerisasi kondensasi merupakan reaksi polimer dengan menggabungkan monomer-monomer untuk menghasilkan polimer dan produk sampingan seperti air (Tjahjanti, 2018). Dalam mereaksikan monomer eugenol menjadi polieugenol, dilakukan polimerisasi adisi kationik dengan bantuan katalis. eugenol tersebut dilakukan dengan menggunakan berbagai macam katalis. Tahap mekanisme polimerisasi eugenol terdiri dari tiga tahapan, yaitu inisiasi, propagasi, dan terminasi. Tahap propagasi dimulai pada saat katalis $\text{BF}_3\text{O}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ menghasilkan ion karbanium. Kemudian tahapan dilanjutkan dengan propagasi yakni rantai polimer semakin tumbuh dan semakin memanjang akibat ikatan yang terbentuk antara satu monomer dengan monomer yang lainnya. Lalu tahap inisiasi terjadi saat rantai polimer berhenti memanjang karena adanya penambahan metanol (Prasetya dkk., 2023).



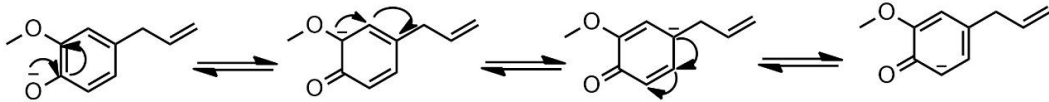
Gambar II.5 Mekanisme polimerisasi eugenol (Prasetya dkk., 2019)

Eugenol juga dapat dilakukan dimerisasi membentuk dieugenol maupun dehidroeugenol. Proses tersebut melibatkan penggunaan ammonium hidroksida yang mengubah eugenol menjadi eugenol fenolat karena sifat basa yang dapat menarik proton dari gugus hidroksil yang terdapat di eugenol. Kemudian eugenol fenolat mengalami oksidasi menjadi radikal fenoksi karena adanya $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ yang merupakan agen pengoksidasi. Adanya ferrosianida mampu mengkatalisis reaksi kopling oksidatif radikal (Alni dkk., 2019).

Pembentukan ion fenolat



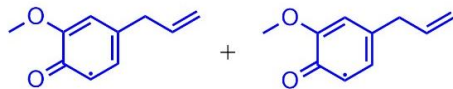
Resonansi ion fenolat



Pembentukan radikal fenoksi



Pembentukan dimer eugenol



Gambar II.6 Mekanisme dimerisasi eugenol (Alni dkk., 2019)

II.2.3 Aktivitas Biologis Eugenol dan Turunannya

Eugenol dan senyawa turunannya memiliki fungsi sebagai antioksidan, antiinflamasi, antimikroba, dan antikanker sehingga dapat dikatakan sebagai senyawa dengan potensi terapeutik yang luas di bidang farmasi maupun kedokteran. Eugenol mampu secara efektif dalam menghambat terjadinya peroksidasi lipid dan menstabilkan membran sel sehingga dapat berperan penting untuk menjadi pelindung terhadap stres oksidatif yang dapat memicu penyakit berbahaya seperti penyakit jantung dan kanker (Nisar dkk., 2021). Aktivitas tersebut muncul karena keberadaan gugus hidroksil pada eugenol dan turunannya yang mampu menangkal radikal bebas serta mencegah kerusakan sel karena oksidasi (Roy dkk., 2025).

Eugenol dan turunannya juga mampu berperan sebagai antiinflamasi dengan cara menghambat ekspresi berbagai macam mediator inflamasi seperti enzim COX-2. Eugenol menekan jalur transkripsi sehingga dapat mengatasi penyakit inflamasi kronis yang juga berhubungan pada penyakit penuaan dini dan kanker (Yin Wang dkk., 2022). Eugenol memiliki aktivitas antimikroba yang telah terbukti pada berbagai macam mikroorganisme patogen, baik gram positif maupun gram negatif serta jamur. Hal tersebut dapat terjadi karena eugenol merusak integritas membran sel mikroba, menyebabkan kebocoran sel, dan mengganggu fungsi enzimatik dari sel mikroba patogen sehingga memberikan potensi eugenol dan turunannya sebagai alternatif antimikroba alami dan pengawet makanan (Olaimat dkk., 2024).

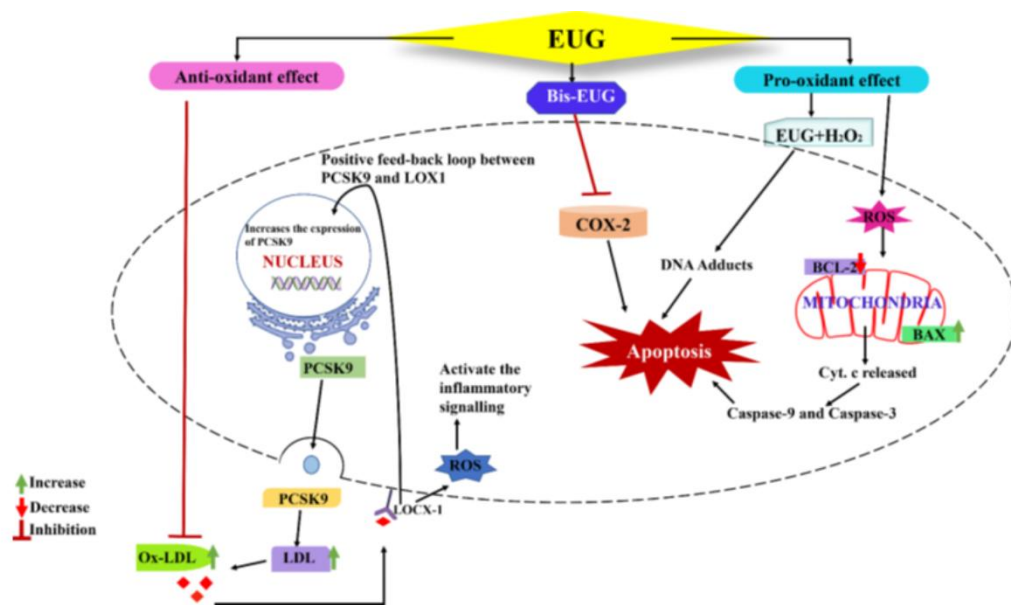
Aktivitas antikanker eugenol juga menunjukkan hasil yang bagus. Eugenol dan turunannya dapat menginduksi secara apoptosis pada berbagai macam sel kanker seperti payudara, kolon, leukimia, dan serviks. Sel kanker dapat dirusak oleh eugenol dengan cara meningkatkan produksi ROS pada sel kanker sehingga terjadi gangguan keseimbangan redoks sel dan kerusakan mitokondria (Alwan dkk., 2024). Selain itu, eugenol juga mampu menurunkan ekspresi enzim anti apoptotik dan meningkatkan enzim pro apoptotik pada sel kanker. Siklus sel kanker di fase tertentu seperti G0/G1 atau G2/M juga dapat dihentikan oleh eugenol dengan menurunkan ekspresi gen siklin (Begum dkk., 2022).

II.2.4 Mekanisme Eugenol dan Turunannya sebagai Antioksidan

Senyawa eugenol dan turunannya merupakan senyawa fenolik yang mampu untuk menyumbangkan elektron atau atom hidrogen ke radikal bebas. Donor atom hidrogen atau elektron kepada senyawa radikal bebas akan mengakibatkan radikal

bebas berubah menjadi radikal yang stabil (Roy dkk., 2025). Kemampuan antioksidan eugenol dan turunannya diukur dengan melihat penurunan absorbansi yang terjadi pada panjang gelombang reagen radikal bebas dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Nilai IC_{50} akan menunjukkan konsentrasi antioksidan yang dibutuhkan untuk menangkal atau menangani 50% radikal bebas seperti DPPH atau ABTS⁺ dalam larutan. Nilai IC_{50} yang semakin rendah menunjukkan kemampuan antioksidan yang bagus. Pengujian antioksidan juga dilakukan dengan membandingkan IC_{50} antara sampel dengan senyawa yang terbukti sebagai antioksidan seperti asam askorbat maupun asam galat (Elgushe dkk., 2024).

II.2.5 Mekanisme Eugenol dan Turunannya dalam Terapi Kanker



Gambar II.7 Aktivitas antikanker eugenol (Begum dkk., 2022)

Eugenol merupakan senyawa utama dalam minyak atsiri cengkeh yang dapat digunakan sebagai senyawa antikanker. Mekanisme antikanker yang dimiliki oleh eugenol diawali dengan eugenol yang mampu menghasilkan *reactive oxygen species* (ROS) secara signifikan di dalam sel target. Eugenol juga menunjukkan

aktivitas mengganggu fungsi mitokondria serta redoks dari sel kanker. Gangguan yang ditimbulkan melalui redoks sel itu terjadi karena adanya penurunan kadar glutathione (GSH) dan protein tiol intraseluler yang berfungsi menjaga kestabilan mitokondria (Yoo dkk., 2005).

Eugenol selain bekerja sebagai agen pro-apoptotik juga dapat bekerja sebagai antiproliferasi dan anti-inflamasi. Kehadiran eugenol dapat mengakibatkan terhentinya siklus sel pada fase G0/G1 atau G2/M. Hal tersebut terjadi karena adanya penurunan jumlah protein proliferasi dan gen siklin serta peningkatan protein penghambat berupa *Cyclin Dependent Kinase* (DPK) yang berperan dalam melakukan penghambatan transisi fase siklus suatu sel (Begum dkk., 2022). Eugenol dapat menekan peradangan kronis yang berkorelasi terhadap pertumbuhan dan perkembangan dari kanker dengan cara menurunkan ekspresi gen inflamasi. Penurunan gen inflamasi tersebut akan menurunkan peradangan kronis yang terjadi oleh sel kanker (Begum dkk., 2022).

Selain itu, eugenol juga dapat bekerja sebagai agen anti-metastasis dengan cara menghambat ekspresi enzim *metalloproteinase* (MMP-2 dan MMP-9) yang merupakan agen degradasi matriks ekstraseluler. Eugenol juga menurunkan ekspresi VEGF dan reseptor VEGFR1 yang penting untuk proses angiogenesis tumor. Kombinasi eugenol dengan kemoterapi konvensional seperti doxorubixin atau cisplatin dapat meningkatkan apoptosis dan menurunkan toksisitas terhadap sel normal. Eugenol juga dapat menghambat *cancer stem cells* melalui degradasi β -catenin yang berfungsi untuk regenerasi tumor (Zari dkk., 2021).

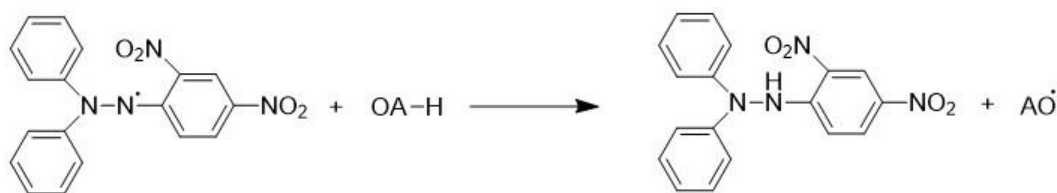
II.3 Antioksidan

Radikal bebas merupakan atom yang memiliki satu atau lebih elektron tidak berpasangan sehingga menjadi sangat reaktif. Di dalam tubuh, radikal bebas dapat ditemukan melalui proses alami dari metabolisme atau paparan polusi, radiasi, dan asap pembakaran (Taswin & Nurjanah, 2021). Jika radikal bebas yang terakumulasi di dalam tubuh sudah melewati batas atau berlebihan, dapat menyebabkan kerusakan sel melalui proses stress oksidatif. Proses tersebut merupakan keadaan ketidakseimbangan jumlah radikal bebas dengan sistem pertahanan berupa antioksidan tubuh sehingga menyebabkan kerusakan dan penyakit degeneratif seperti kardiovaskular, diabetes, dan kanker (Arnanda & Nuwarda, 2019).

Terdapat dua macam radikal bebas, yakni endogen dan eksogen. Radikal bebas endogen adalah hasil dari metabolisme pemecahan makronutrien berupa karbohidrat, lemak, dan protein di dalam tubuh. Sedangkan radikal bebas eksogen dihasilkan oleh lingkungan di luar tubuh, seperti paparan berbagai bahan kimia, polusi udara, sinar ultraviolet, olahan makanan, maupun asap kendaraan (Indalifiany dkk., 2023). Antioksidan merupakan senyawa yang dapat mengubah radikal bebas yang dihasilkan melalui proses metabolisme atau faktor eksternal seperti lingkungan sehingga dihasilkan senyawa yang tidak berbahaya atau reaktif seperti radikal bebas (Tuğlu dkk., 2025). Zat antioksidan bekerja dengan cara mendonorkan elektron bebas untuk radikal bebas sehingga dapat mengurangi, menghambat, dan menetralkan jumlah radikal bebas di dalam tubuh (Wahyuni dkk., 2021).

Beberapa metode umum yang dapat digunakan untuk uji antioksidan adalah DPPH, FRAP, ABTS, dan ORAC. Metode ABTS (*2,2-azinobis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid*) mengukur kemampuan senyawa antioksidan dalam menangkal radikal bebas menggunakan larutan radikal ABTS⁺ berwarna biru kehijauan. Metode ABTS cenderung digunakan pada sampel yang memiliki kelarutan baik di dalam air maupun lemak (Suryani dkk., 2024). Metode FRAP (*Ferric Reducing Antioxidant Power*) dilakukan dengan mengujikan sampel untuk mengetahui kemampuannya dalam mereduksi Fe³⁺ menjadi Fe²⁺. Metode ini menghasilkan nilai yang menunjukkan kapasitas reduksi total dari sampel (Yustiana dkk., 2019). Metode ORAC (*Oxygen Radical Absorbance Capacity*) mengukur kemampuan sampel dalam menangkal radikal peroksil. Metode ini lebih cocok digunakan untuk sistem berbasis biologis (Figueroa dkk., 2023).

Metode DPPH (2,2 difenil-1-pikrilhidrazil) dapat memberikan informasi mengenai reaktivitas senyawa yang diuji dengan suatu radikal bebas. DPPH memiliki warna ungu tua dengan penyerapan cahaya paling banyak di panjang gelombang 517nm. Pendonoran elektron bebas kepada suatu radikal bebas akan mengakibatkan elektron tersebut menjadi berpasangan sehingga terjadinya perubahan warna dan struktur yang semula radikal bebas menjadi senyawa yang stabil. Perubahan warna tersebut dapat dideteksi melalui instrumen Spektrofotometer UV-Vis yang mana jumlah elektron yang didonorkan akan sebanding dengan penghilangan warna violet gelap (Jelita dkk., 2019; Markus dkk., 2025). Reaksi penangkalan radikal bebas DPPH oleh senyawa antioksidan ditampilkan pada **Gambar II.8**.



Gambar II.8 Mekanisme Reaksi DPPH dengan Antioksidan (Markus dkk., 2025)

II.4 Antikanker

Senyawa antikanker bertujuan untuk menghambat pertumbuhan dan kelangsungan hidup suatu sel kanker dengan cara bekerja melalui berbagai mekanisme biologis. Mekanisme antikanker dapat berupa penghambatan enzim kinase, penargetan protein spesifik, induksi stress oksidatif dan ROS, gangguan mikrostruktur sel, induksi apoptosis, dan autofagi, serta aktivitas epigenetik (Begum dkk., 2022). Hal tersebut menunjukkan bahwa senyawaan yang mampu menghasilkan *reactive oxygen species* (ROS) secara signifikan di dalam sel target kemudian merusak fungsi mitokondria serta redoks dari sel kanker. Gangguan yang ditimbulkan tersebut mengakibatkan adanya penurunan kadar glutathione (GSH) dan protein tiol intraseluler yang berfungsi menjaga kestabilan mitokondria (Yoo dkk., 2005). Selain itu menghambat siklus sel pada fase G0/G1 atau G2/M. Hal tersebut terjadi karena adanya penurunan jumlah protein proliferasi dan gen siklin serta peningkatan protein penghambat berupa *Cyclin Dependent Kinase* (DPK) yang berperan dalam melakukan penghambatan transisi fase siklus suatu sel (Begum dkk., 2022).

II.5 Uji Viabilitas Sel

Uji viabilitas sel merupakan metode yang dilakukan dengan tujuan untuk menentukan persentase sel hidup dalam sebuah populasi tertentu. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat toksisitas suatu material maupun pengembang dalam terapi sel. Prinsip utama dalam uji viabilitas sel terbagi menjadi dua, yakni pengukuran integritas membran sel (metode *trypan blue*) dan aktivitas metabolik sel (metode MTT) (Chung dkk., 2015). Metode *trypan blue* dilakukan dengan mencampur suspensi sel dengan pewarna *trypan blue* lalu sel yang membrannya masih utuh akan menolak pewarna sehingga tampak bening. Metode tersebut memiliki keunggulan dalam kecepatan dan sederhananya perlakuan, namun memiliki keterbatasan karena hanya menghitung secara manual serta hanya memberikan gambaran biner mengenai sel yang hidup dan mati (Kristensen dkk., 2018).

Metode MTT (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5 diphenyltetrazolium bromide) merupakan salah satu uji kolorimetri yang mengukur aktivitas metabolik sel. Metode MTT memiliki prinsip bahwa kemampuan dari enzim dehidrogenasi aktif pada sel hidup mampu mereduksi garam MTT berwarna kuning menjadi kristal formazan berwarna ungu yang tidak larut. Jumlah formazan yang dihasilkan mencerminkan jumlah sel yang masih hidup dan aktif. Pengukuran dilakukan dengan melarutkan kembali kristal formazan yang terbentuk lalu diukur absorbansinya menggunakan instrumen pada panjang gelombang 595 nm (Seidl & Zinkernagel, 2013). Keunggulan metode ini adalah presisi yang sangat baik dalam

hal kuantitatif sehingga sangat efektif digunakan dalam skrining (Stepanenko & Dmitrenko, 2015).

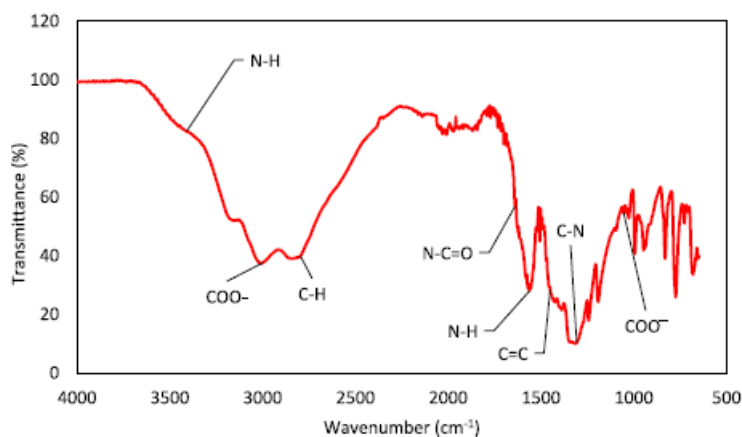
II.6 Metode Analisis

II.6.1 *Fourier Transform Infra Red (FTIR)*

Fourier Transform Infra Red yang biasa disingkat dengan FTIR merupakan salah satu instrumen pengujian berdasarkan penyerapan sinar inframerah (IR) oleh molekul atau senyawa. Spektroskopi FTIR digunakan untuk mengidentifikasi struktur suatu senyawa kimia dengan memanfaatkan interaksi yang terjadi antara radiasi sinar inframerah dengan materi. Saat analit ditembakkan sinar inframerah akan terjadi penyerapan oleh analit sementara sebagian lainnya akan diteruskan (Mohamed dkk., 2017). Ketika sinar inframerah tersebut dipancarkan ke analit, molekul akan menyerap sebagian energi untuk melakukan getaran sehingga molekul akan menyerap energi inframerah pada energi tertentu sehingga akan menghasilkan puncak-puncak spektra yang berbeda. Puncak yang spesifik tersebut dapat menunjukkan gugus fungsi tertentu seperti karbonil (C=O), hidroksil (-OH), atau amina (-NH₂) sesuai dengan frekuensi serapan khas yang dimiliki suatu gugus fungsi. Hasil spektrum tersebut berupa spektrum sumbu x merupakan bilangan gelombang dan sumbu y merupakan persentase transmitansi (Shukla, 2025).

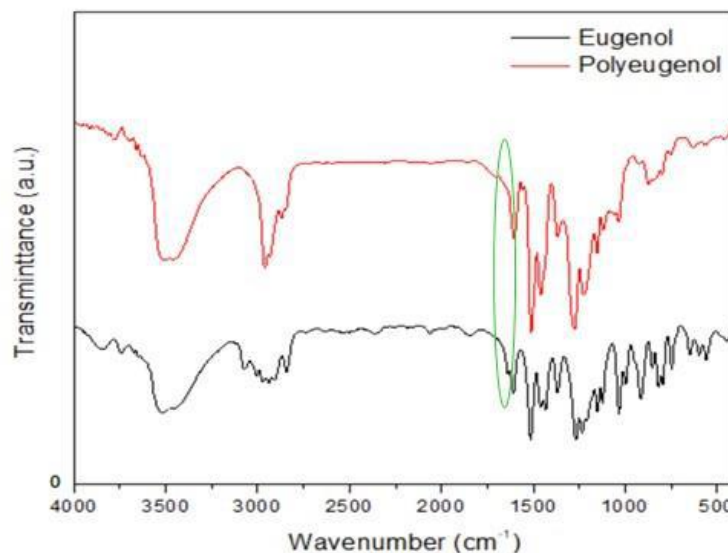
Gugus fungsi khas yang dimiliki oleh GQD adalah hidroksil dan karbonil. Vibrasi N-H dan O-H ditunjukkan pada bilangan gelombang melebar sekitar 3400 cm⁻¹, vibrasi regangan C-H pada bilangan gelombang 2940 cm⁻¹, vibrasi C=O pada bilangan gelombang 1645 cm⁻¹, vibrasi C=N pada bilangan gelombang 1400 cm⁻¹,

dan vibrasi C=C pada bilangan gelombang 1562 cm^{-1} (Yang dkk., 2024). Spektrum GQD ditunjukkan pada **Gambar II.9**.



Gambar II.9 Spektra FTIR Grafena Quantum Dot (GQD) (Raeispour dkk., 2024)

Gugus fungsi eugenol dan polieugenol tidak jauh berbeda. Namun pada polieugenol tidak terdapat gugus fungsi binil ($-\text{CH}-\text{CH}_2$) pada bilangan gelombang sekitar 1400 cm^{-1} . Gugus vinil yang semula terdapat pada eugenol akan hilang pada senyawa polieugenol karena telah terjadi polimerisasi dengan gugus fungsi tersebut sebagai penghubung antar monomer polieugenolnya. Gugus fungsi yang terdapat pada eugenol dan polieugenol adalah fenol ($-\text{OH}$), metoksi ($-\text{OCH}_3$), dan alkena ($\text{C}=\text{C}$). Vibrasi O-H, vibrasi C-H sp^3 , vibrasi $-\text{OCH}_3$, vibrasi $\text{C}=\text{C}$ aromatik akan muncul berturut-turut pada bilangan gelombang $3448,72\text{ cm}^{-1}$, $2931,8\text{ cm}^{-1}$, 1226 cm^{-1} untuk regangan C-O, dan 1604 cm^{-1} (Hikmah & Rahim, 2018). Spektrum FTIR senyawa eugenol dan polieugenol ditunjukkan pada **Gambar II.10**.



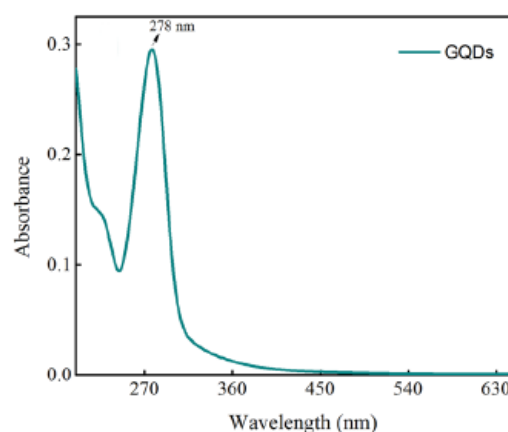
Gambar II.10 Spektra FTIR Eugenol dan Polieugenol (Prasetya dkk., 2019)

II.6.2 Spektrofotometer UV-Vis

Spektrofotometer UV-Vis adalah alat yang dipakai untuk mengukur seberapa banyak cahaya yang diserap oleh sampel. Alat ini bekerja pada dua rentang panjang gelombang, yaitu sinar ultraviolet (200-400 nm) dan cahaya tampak (400-800 nm). Spektrofotometer UV-Vis memiliki prinsip kerja yang didasarkan pada hukum Lambert-Beer yang mana adanya hubungan antara konsentrasi dengan jumlah cahaya yang dapat diserap (Khalid dkk., 2024). Teknik analisis ini dapat mempelajari transisi elektronik molekul terutama dalam senyawa yang mengandung gugus kromofor atau terkonjugasi. Selain itu teknik ini juga dapat menghitung konstanta disosiasi, estimasi *band gap* material semikonduktor, dan kecepatan reaksi dengan cepat namun tanpa merusak sampel (Payá dkk., 2015).

GQD memiliki serapan pada panjang gelombang di bawah 300 nm. Serapan pada panjang gelombang 278 nm yang tajam menunjukkan adanya transisi elektron

π ke π^* dari gugus C=C aromatik yang mengindikasikan adanya hibridisasi sp^2 (Isha dkk., 2024). Selain itu juga dapat menunjukkan puncak pada panjang gelombang sekitar 340 nm yang merupakan transisi elektronik dari elektron n ke π^* dari gugus C=O (Yang dkk., 2024). Spektra UV-Vis ditunjukkan pada **Gambar II.11**.

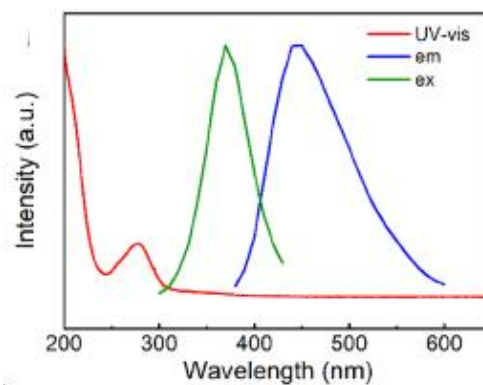


Gambar II.11 Spektra UV-Vis GQD (Isha dkk., 2024)

II.6.3 Spektrofotometer Fluoresensi

Spektrofotometer fluoresensi digunakan untuk menganalisis kekuatan pendaran dari GQD. Prinsip spektrofotometer fluoresensi yakni penembakan sampel berupa larutan dengan sinar. Sampel tersebut akan menyerap sebagian energi foton untuk melakukan eksitasi dan sebagian lainnya digunakan untuk memancarkan pendaran atau emisi. Intensitas cahaya yang dipancarkan setelah sampel menyerap cahaya pada panjang gelombang tersebutlah yang dilakukan pengukuran (Singh dkk., 2021). Senyawa GQD dianalisis menggunakan instrumen ini bertujuan untuk mengamati sifat fotoluminesensi yang sangat khas dari material berbentuk nano (Karami dkk., 2024).

GQD memiliki pendaran berwarna biru muda saat disinari cahaya ultraviolet dengan panjang gelombang 365 nm. GQD memiliki panjang gelombang ideal untuk eksitasi pada 360 nm sedangkan emisi optimal didapatkan pada panjang gelombang 440 nm. Nilai emisi fluoresensi GQD akan bergeser atau berbeda tergantung pada eksitasi yang dipancarkan kepada sampel (Mu dkk., 2024). Spektra fluoresensi GQD diperlihatkan pada **Gambar II.12**.



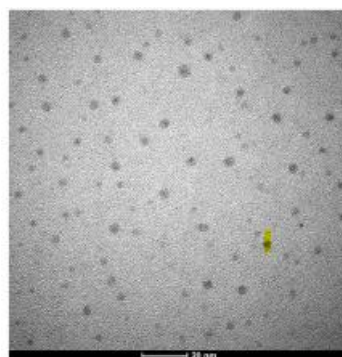
Gambar II.12 Spektra Fluoresensi GQD (Yin Wang dkk., 2022)

II.6.4 Transmission Electron Microscope (TEM)

Transmission Electron Microscope yang biasa disingkat sebagai TEM merupakan instrumen untuk analisis yang digunakan untuk mengamati ukuran, morfologi, dan struktur internal suatu material. Prinsip kerja instrumen TEM adalah penembakan berkas elektron berenergi tinggi melalui sampel yang sangat tipis. Saat elektron melewati sampel, terjadi pembelokkan, penerusan, maupun penyebaran sehingga akan membentuk citra berdasarkan interaksi elektron dengan struktur di dalam suatu material (Y. Lin dkk., 2021).

Instrumen TEM menjadi salah satu instrumen penting dalam menganalisis GQD untuk menentukan ukuran, bentuk, dan distribusi partikel GQD yang biasanya

memiliki rentang ukuran 2 hingga 10 nm. Citra TEM GQD akan menunjukkan titik-titik kecil berwarna gelap dengan bentuk bulat bahkan bisa memiliki ukuran kurang dari 5 nm (Fatima dkk., 2025). Citra TEM GQD dapat dilihat pada **Gambar II.13**.



Gambar II.13 Citra TEM GQD (Isha dkk., 2024)

II.6.5 *Nuclear Magnetic Resonance (NMR)*

Nuclear Magnetic Resonance yang biasa disingkat NMR merupakan instrumen untuk menganalisis struktur senyawa kimia. Prinsip dari NMR adalah spektroskopi yang mana dapat digunakan pada senyawa organik maupun anorganik. Spektroskopi NMR dapat menganalisis struktur suatu senyawa dengan memanfaatkan resonansi inti atom tertentu seperti ^1H dan ^{13}C yang memiliki spin (Casabianca, 2020). Resonansi merupakan transisi energi antar level spin pada saat inti atom yang ditempatkan pada suatu medan magnet kuat lalu dikenai dengan gelombang radio dengan frekuensi tertentu. Spektrum NMR dihasilkan dari pancaran sinyal elektromagnetik yang ditangkap detektor pada saat inti kembali ke keadaan dasar setelah mengalami eksitasi. Spektrum NMR tersebut memberikan informasi mengenai lingkungan kimia atom, jumlah relatif proton (hasil integrasi), konstanta kopling antar atom, dan interaksi antar spin (*splitting/multiplet*). Meskipun penggunaan instrumen NMR cukup mahal, hasil yang didapatkan

cukup akurat untuk mengetahui struktur dari sintesis senyawa baru (Yuan dkk., 2023).

II.6.6 *Quantum Yield* (QY)

Quantum Yield (QY) merupakan parameter penting dalam menganalisis senyawa berfluoresensi untuk menentukan efisiensi suatu molekul dalam menggunakan cahaya yang diserap menjadi cahaya yang dipancarkan (emisi). Rasio jumlah foton yang dipancarkan terhadap rasio jumlah foton yang diserap menghasilkan nilai *quantum yield*. Semakin tinggi nilai QY suatu senyawa maka semakin efisien juga senyawa tersebut dalam memancarkan cahaya setelah tereksitasi. Pengukuran QY umumnya dilakukan dengan membandingkan intensitas fluoresensi sampel dengan standar yang sudah diketahui nilai QY-nya seperti kuinin sulfat, rhodamin B, dan rhodamine 6G dalam keadaan yang sama (Udhayakumari, 2023). Penelitian yang dilakukan oleh Kaur dkk. (2024) menggunakan kuinin sulfat dengan persentase QY sebesar 54% sebagai standar sehingga didapatkan QY sampel sebesar 83%.