

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara tropis dengan keanekaragaman hayati tinggi memiliki produksi buah-buahan melimpah sepanjang tahun, didukung oleh iklim stabil dan lahan pertanian luas sehingga menjadi produsen utama buah tropis di Asia Tenggara. Berdasarkan data BPS (2024), produksi buah pisang meningkat hingga 93,5 juta kuintal pada 2024, disusul pepaya 12 juta kuintal, nanas 27,4 juta kuintal, jeruk siam 24,4 juta kuintal, dan buah naga 3,3 juta kuintal. Produksi ini menghasilkan limbah kulit buah dalam jumlah besar yang belum dimanfaatkan optimal, padahal limbah tersebut kaya senyawa bioaktif dan karbon. Limbah tersebut berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak ditangani. Oleh karena itu, pemanfaatannya menjadi material bernilai tambah seperti CQDs berbasis nanoteknologi menjadi solusi potensial, mendukung pengurangan pencemaran, dan penerapan ekonomi sirkular dalam pertanian berkelanjutan.

CQDs termasuk dalam kelompok material nano-karbon yang memiliki ukuran partikel kurang dari 10 nanometer dan menampilkan karakteristik optik istimewa seperti intensitas fotoluminesensi tinggi, kemampuan transfer muatan yang efisien, serta biokompatibilitas yang sangat baik. Struktur utama CQDs terdiri atas inti karbon berikatan sp^2/sp^3 yang diperkaya dengan gugus fungsi seperti hidroksil, karbonil, dan karboksilat, menjadikannya sangat aktif secara kimia dalam berinteraksi dengan berbagai ion atau molekul target (Dong dkk., 2024; Mankoti dkk., 2024; J. Wu dkk., 2023). CQDs lebih unggul dari pada berbahan logam berat,

seperti kadmium dan timbal, karena lebih aman bagi lingkungan, tidak beracun, larut dalam air, serta mudah dimodifikasi secara kimia. Berbagai limbah organik seperti kulit pisang, pepaya, jeruk, nanas, dan buah naga, serta residu pertanian lain seperti kulit bawang, tebu, dan ampas kopi telah dimanfaatkan sebagai sumber karbon dalam pembuatan CQDs. Sumber limbah ini mengandung senyawa karbon alami seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang berpotensi tinggi untuk dikonversi menjadi CQDs sekaligus mendukung penerapan ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah berkelanjutan (Dong dkk., 2024; J. Wu dkk., 2023).

Sintesis CQDs dari limbah biomassa umumnya dilakukan melalui metode *bottom-up* yang lebih ramah lingkungan dan efisien dibandingkan *top-down*, dengan metode hidrotermal sebagai teknik utama. Proses ini melibatkan pemanasan biomassa seperti kulit jeruk, pisang, dan daun bambu dalam autoklaf pada suhu 120–240 °C selama 4–24 jam untuk menghasilkan partikel CQDs berukuran 2–8 nm dengan fluoresensi biru cerah (Dong dkk., 2024; J. Wu dkk., 2023). Metode hidrotermal menjadi salah satu pendekatan sintesis CQDs dari limbah biomassa yang paling banyak diterapkan karena mampu menghasilkan partikel yang homogen, stabil secara struktur, serta memiliki sifat optik yang tinggi dan ramah lingkungan dibandingkan metode lain seperti metode *microwave*, ultrasonikasi, dan pirolisis dengan limbah (Mankoti dkk., 2024).

CQDs memiliki aplikasi luas, mulai dari sensor logam berat seperti Fe^{3+} , Hg^{2+} , dan Cr^{3+} (Lee dkk., 2014; M. Li dkk., 2019; Sahoo dkk., 2020; Shen dkk., 2017), agen fotokatalis untuk degradasi senyawa organik, hingga pupuk nano yang meningkatkan efisiensi fotosintesis dan ketahanan tanaman (Dong dkk., 2024).

Selain itu, CQDs juga digunakan dalam *bioimaging*, penghantaran obat (John dkk., 2020), serta sebagai material elektroda untuk superkapasitor dan baterai (J. Wu dkk., 2023).

Pupuk CQDs merupakan inovasi material nano-karbon yang berkembang pesat dalam bidang pertanian. CQDs memiliki ukuran partikel kurang dari 10 nm dan bersifat larut air, ramah lingkungan, serta biokompatibel tinggi, sehingga dapat dijadikan sebagai pupuk nano (Alengebawy dkk., 2021). Secara mekanisme, CQDs dapat menembus jaringan tanaman melalui dinding sel, membran plasma, dan bahkan mencapai kloroplas, tempat berlangsungnya fotosintesis. CQDs berfungsi sebagai agen peningkat fotosintesis melalui percepatan transfer elektron dan peningkatan efisiensi penggunaan cahaya (Chowmasundaram dkk., 2023).

Berbagai studi terdahulu telah mengevaluasi aktivitas dan prospek aplikasi CQDs dalam sektor pertanian. Chowmasundaram dkk. (2023) melaporkan bahwa penyemprotan daun menggunakan CQDs pada jagung dan gandum secara signifikan meningkatkan luas permukaan daun, kadar klorofil, serta akumulasi biomassa tanaman dibandingkan kontrol. Secara keseluruhan, pemanfaatan CQDs sebagai pupuk tidak hanya meningkatkan produktivitas pertanian, tetapi juga membuka jalur baru dalam integrasi nanoteknologi ke dalam sistem pertanian cerdas. Oleh sebab itu, penelitian terkait sintesis dan aplikasi pupuk CQDs berbahan limbah kulit buah sangat penting untuk dikembangkan secara sistematis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara kuantitatif pengaruh variasi waktu sintesis dan konsentrasi larutan CQDs terhadap pertumbuhan tanaman pakcoy, dengan bahan dasar berasal dari kombinasi limbah kulit buah.

Meskipun sintesis CQDs dari biomassa tunggal telah banyak diteliti, eksplorasi penggunaan kombinasi berbagai limbah kulit buah sebagai prekursor masih tergolong minim. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan pupuk nano yang berkelanjutan, mudah diproduksi dan ramah lingkungan.

I.2 Tujuan Penelitian

1. Mensintesis CQDs berbahan dasar kombinasi kulit buah naga, jeruk, nanas, pepaya, dan pisang menggunakan metode hidrotermal
2. Menentukan karakteristik CQDs dengan menggunakan berbagai instrumen, seperti spektrometer fotoluminesensi, FTIR, dan PSA.
3. Menentukan aktivitas CQDs sebagai pupuk tambahan terhadap pertumbuhan pakcoy.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

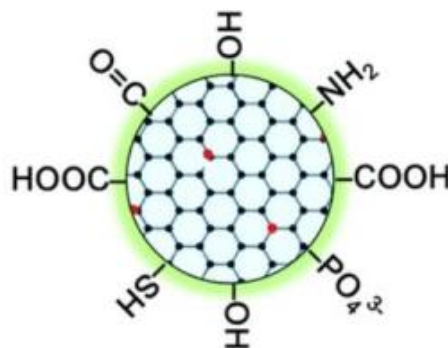
II.1 CQDs

II.1.1 Definisi

Carbon Quantum Dots (CQDs) merupakan jenis nanomaterial berbasis karbon dengan ukuran partikel yang sangat kecil, yakni kurang dari 10 nanometer. Struktur CQDs tersusun atas inti karbon (*core*) yang terdiri dari hibridisasi sp^2 dan sp^3 , serta permukaan (*surface*) yang dipenuhi oleh berbagai gugus fungsi aktif seperti hidroksil ($-OH$), karboksilat ($-COOH$), karbonil ($C=O$), eter ($C-O-C$), dan nitrogen ($-NH_2$) (Gambar II.1) (Hong dkk., 2022). Gugus-gugus ini berikatan kovalen secara langsung dengan struktur karbon inti, sehingga meningkatkan kelarutan dalam air, memperbesar aktivitas kimia permukaan, serta memudahkan proses fungsifikasi lebih lanjut sesuai kebutuhan aplikasi. Menurut Hong dkk. (2022), ukuran CQDs yang berkisar antara 2 hingga 10 nm ekuivalen dengan 10 sampai 50 atom per partikel, yang secara signifikan meningkatkan rasio luas permukaan terhadap volumenya. Ukuran yang sangat kecil ini juga menyebabkan munculnya efek *quantum confinement*, yaitu perubahan sifat optik karena tingkat energi menjadi diskrit. Efek ini memungkinkan CQDs memancarkan warna cahaya yang berbeda tergantung pada dimensinya, dimana ukuran lebih kecil menghasilkan emisi biru berenergi tinggi, sedangkan ukuran lebih besar menyebabkan emisi bergeser ke arah merah berenergi rendah.

Proses pembuatan CQDs secara umum terbagi menjadi dua pendekatan, yaitu metode *top-down* dan *bottom-up*. Pendekatan *top-down* dilakukan dengan

cara memecah struktur karbon berukuran besar seperti grafit, grafena, atau *nanotube* menggunakan perlakuan ekstrem, misalnya dengan teknik *arc discharge*, ablasi laser, atau elektrolisis. Sebaliknya, pendekatan *bottom-up* dilakukan dengan menyintesis partikel dari prekursor molekul kecil seperti glukosa, asam sitrat, atau limbah biomassa melalui metode hidrotermal, pirolisis berbantuan gelombang mikro, atau sonikasi. Pendekatan *bottom-up* dianggap lebih unggul karena lebih ramah lingkungan dan memungkinkan kontrol sintesis yang lebih presisi. Setelah proses sintesis, langkah pemurnian menjadi hal penting karena produk yang dihasilkan biasanya mengandung campuran senyawa karbon amorf dan residu. Oleh karena itu, pemisahan dilakukan menggunakan teknik dialisis, kromatografi kolom, atau ultrafiltrasi untuk memperoleh CQDs dengan distribusi ukuran yang seragam dan kemurnian tinggi. Kombinasi antara struktur inti karbon dan gugus fungsi yang aktif di permukaan menjadikan CQDs sangat ideal untuk berbagai aplikasi, seperti *bioimaging*, sensor kimia, fotokatalisis, perangkat optoelektronik, hingga pupuk nano ramah lingkungan untuk sistem pertanian hidroponik (Liu dkk., 2020).



Gambar II. 1 Struktur CQDs (Hong dkk., 2022)

II.1.2 Bahan Baku

II.1.2.1 Buah Naga

Tanaman buah naga termasuk ke dalam keluarga *Cactaceae*, dengan klasifikasi ilmiah (Salomi dkk., 2021) sebagai berikut:

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Divisi	: <i>Magnoliophyta</i>
Kelas	: <i>Magnoliopsida</i>
Subkelas	: <i>Caryophyllidae</i>
Ordo	: <i>Caryophyllales</i>
Famili	: <i>Cactaceae</i>
Genus	: <i>Hylocereus</i>
Spesies	: <i>Hylocereus polyrhizus</i>

Tanaman buah naga (*Hylocereus polyrhizus*) memiliki kandungan senyawa bioaktif yang melimpah, terutama pada bagian kulitnya yang selama ini kurang dimanfaatkan. Berdasarkan uji fitokimia dan histokimia, kulit buah naga merah (*H. polyrhizus*) mengandung berbagai senyawa metabolit sekunder seperti fenolik, flavonoid, dan alkaloid (Husna & Nugroho, 2023; Larasati dkk., 2024). Senyawa-senyawa ini memiliki gugus fungsi seperti -OH (hidroksil), -COOH (karboksil). Sintesis CQDs melalui metode hidrotermal, kulit buah naga dapat diolah untuk menghasilkan CQDs berukuran kecil (3–6 nm), berdispersi baik dalam air, serta menunjukkan fluoresensi dapat disesuaikan. Karakterisasi kimia dari CQDs hasil ekstraksi mengungkap keberadaan gugus fungsi hidroksil (-OH), karbonil (C=O), dan karboksilat (-COOH), serta ikatan C=C aromatik dan doping nitrogen (N-

pyridinic), yang berperan penting dalam sifat optiknya serta sensitivitas terhadap ion logam seperti Fe^{3+} (J. Tan & Zhou, 2024).

II.1.2.2 Jeruk

Tanaman jeruk termasuk dalam famili *Rutaceae* dan memiliki klasifikasi (Shravan dkk., 2018) sebagai berikut:

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Divisi	: <i>Magnoliophyta</i> ,
Kelas	: <i>Dicotyledons</i>
Subkelas	: <i>Sapindales</i>
Ordo	: <i>Rosidae</i>
Famili	: <i>Rutaceae</i>
Genus	: <i>Citrus</i>
Spesies	: <i>Citrus sinensis</i>

Kulit buah jeruk mengandung berbagai senyawa kimia aktif seperti flavonoid, asam askorbat, polifenol, dan limonen yang dikenal memiliki sifat antioksidan tinggi dan gugus fungsi reaktif seperti $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, dan $-\text{C}=\text{O}$ (Sari & Amborowati, 2024; Wardani dkk., 2024). Dalam penelitian terbaru, kulit jeruk mandarin telah berhasil digunakan sebagai prekursor untuk sintesis CQDs melalui metode hidrotermal, dimana senyawa glukosa dan asam askorbat berperan penting dalam proses karbonisasi untuk membentuk partikel karbon nano (1–2 nm) (Salsabilla dkk., 2024).

II.1.2.3 Nanas

Tanaman nanas termasuk dalam kelompok tumbuhan berbunga dari famili *Bromeliaceae* dan memiliki klasifikasi ilmiah (A. Sharma dkk., 2024) sebagai berikut:

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Filum	: <i>Tracheobionta</i>
Kelas	: <i>Liliopsida</i>
Ordo	: <i>Poales</i>
Famili	: <i>Bromeliaceae</i>
Genus	: <i>Ananas</i>
Spesies	: <i>Ananas comosus</i>

Kulit buah nanas yang umumnya dianggap limbah, ternyata mengandung senyawa bioaktif penting seperti fenolik, flavonoid, vitamin C, karotenoid, tanin, saponin, dan steroid (Azizan dkk., 2020; Fauzi dkk., 2023). Senyawa-senyawa tersebut mampu berkontribusi dalam reaksi karbonisasi dan pasivasi permukaan selama proses hidrotermal. Menurut studi oleh Vandarkuzhali dkk. (2018), kulit nanas berhasil disintesis menjadi CQDs dengan ukuran 2–3 nm dan efisiensi fluoresensi tinggi ($QY \approx 42\%$) menggunakan metode hidrotermal tanpa bahan kimia tambahan. Kombinasi kandungan lignoselulosa (selulosa 40–46%, hemiselulosa 16–20%, lignin 12–16%) serta senyawa polifenol (Vandarkuzhali dkk., 2018)

II.1.2.4 Pepaya

Tanaman pepaya merupakan spesies tropis dari famili *Caricaceae*, dengan klasifikasi ilmiah (Karunamoorthi dkk., 2014) sebagai berikut:

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Divisi	: <i>Magnoliophyta</i>
Kelas	: <i>Magnoliopsida</i>
Subkelas	: <i>Dilleniidae</i>
Ordo	: <i>Violales</i>
Famili	: <i>Caricaceae</i>
Genus	: <i>Carica</i>
Spesies	: <i>Carica papaya</i>

Kulit pepaya sebagai limbah agroindustri diketahui kaya akan senyawa metabolit sekunder seperti alkaloid, flavonoid, saponin, tanin, dan sedikit triterpenoid (Astuti dkk., 2023; Srivastava dkk., 2025). Senyawa-senyawa ini penting dalam proses sintesis CQDs karena menyediakan gugus aktif untuk reaksi karbonisasi dan pasivasi permukaan. Menurut studi oleh Hesam dkk. (2023), kulit pepaya berhasil digunakan sebagai prekursor alami dalam sintesis CQDs melalui metode hidrotermal tanpa tambahan bahan kimia, menghasilkan partikel CQDs berukuran 1–8 nm dengan emisi fotoluminesensi tinggi dan aktivitas antimikroba serta fotokatalitik yang signifikan terhadap pewarna metilen biru, dengan efisiensi degradasi mencapai 87% dalam 135 menit (Hesam dkk., 2023).

II.1.2.5 Pisang

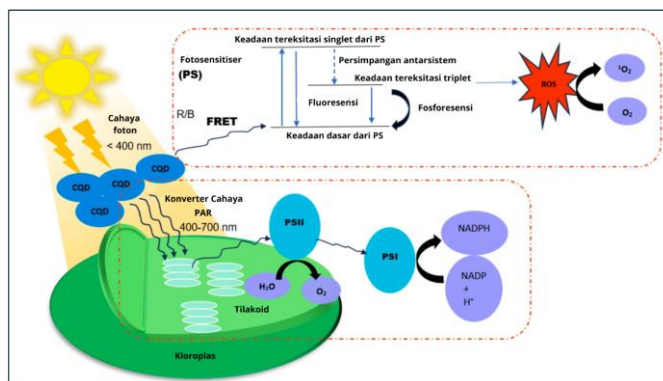
Tanaman pisang merupakan anggota dari famili *Musaceae*, yang diklasifikasikan (Qamar & Shaikh, 2018) sebagai berikut:

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Divisi	: <i>Magnoliophyta</i>
Kelas	: <i>Liliopsida</i>
Ordo	: <i>Zingiberales</i>
Famili	: <i>Musaceae</i>
Genus	: <i>Musa</i>
Spesies	: <i>Musa paradisiacal Linn</i>

Kulit pisang mengandung berbagai senyawa kimia penting seperti karbohidrat (pati dan gula reduksi), vitamin C, flavonoid, tanin, saponin, dan senyawa alkaloid. Senyawa-senyawa ini kaya akan gugus fungsi seperti -OH, -COOH, dan -NH₂ yang sangat mendukung proses karbonisasi dan pembentukan permukaan aktif dalam sintesis CQDs (Trisakti dkk., 2018). Penelitian oleh Atchudan dkk. (2021) berhasil mensintesis CQDs dari kulit pisang melalui metode hidrotermal tanpa penambahan bahan kimia, menghasilkan partikel dengan ukuran rata-rata ~5 nm, fluoresensi biru kuat di bawah sinar UV (λ_{ex} 365 nm), QY sebesar 20%, serta stabilitas fotoluminesensi tinggi (Atchudan dkk., 2021). CQDs yang dihasilkan menunjukkan biokompatibilitas tinggi dan berhasil digunakan untuk aplikasi *bioimaging* pada nematoda secara *in vivo*, menunjukkan potensi besar sebagai bahan nano ramah lingkungan untuk aplikasi biomedis dan optoelektronik.

II.1.3 CQDs sebagai Pupuk Berbasis Material Nano (*Nanofertilizer*)

CQDs merupakan nanomaterial karbon berukuran kurang dari 10 nm yang termasuk dalam kategori berdimensi nol, serta dikenal memiliki karakteristik fotoluminesensi tinggi, biokompatibilitas yang baik, kestabilan terhadap cahaya, dan tingkat toksisitas yang sangat rendah. Kombinasi sifat tersebut menjadikan CQDs sebagai kandidat unggul untuk dimanfaatkan dalam pertanian berkelanjutan, khususnya sebagai pupuk berbasis nanomaterial (*nanofertilizer*) yang berfungsi meningkatkan efisiensi fotosintesis tanaman (Gambar II.2). CQDs bekerja dengan meniru fungsi pigmen alami dalam tumbuhan, yaitu bertindak sebagai antena cahaya buatan yang menyerap spektrum cahaya dari ultraviolet hingga inframerah, lalu mentransfer energi atau elektron ke pusat reaksi kloroplas, sehingga meningkatkan pembentukan ATP dan NADPH. Chandra dkk. (2014) mengungkapkan bahwa CQDs mampu menempel secara kuat pada permukaan kloroplas dan mempercepat laju transfer elektron, yang berdampak langsung pada peningkatan oksigen dan aktivitas reaksi *Hill* dalam tahap terang fotosintesis. Aktivitas CQDs dalam praktik lapangan telah diuji menggunakan beberapa metode aplikasi seperti perendaman benih, perendaman akar, dan penyemprotan daun, dengan metode foliar spray menjadi pilihan paling efisien karena mampu meningkatkan ketersediaan hayati serta efisiensi penyerapan CQDs oleh jaringan tanaman. Studi oleh Chowmasundaram dkk. (2023) melaporkan bahwa CQDs dapat menembus jaringan daun melalui jalur apoplastik dan simplastik, mencapai mesofil, serta berikatan langsung dengan kloroplas untuk mendukung proses fotosintesis secara optimal.



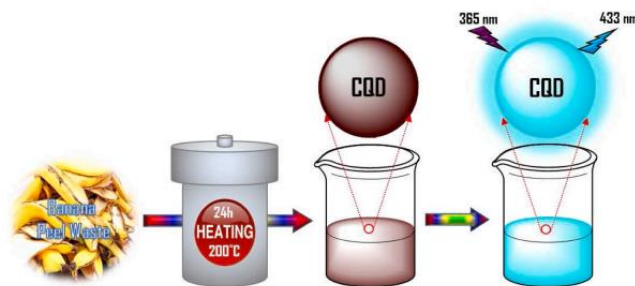
Gambar II. 2 Mekanisme transfer elektron CQDs/kloroplas di bawah cahaya putih dan cahaya R/B (Chowmasundaram dkk., 2025)

Penelitian lanjutan oleh Chowmasundaram dkk. (2025) pada tanaman *Brassica juncea* dalam sistem hidroponik menunjukkan bahwa aplikasi foliar dengan dosis 150 ppm CQDs secara signifikan meningkatkan jumlah daun, luas permukaan daun, tinggi tanaman, serta biomassa segar dan kering. Selain peningkatan morfologi, parameter fisiologis seperti laju asimilasi karbon dioksida meningkat sebesar 58% dan aktivitas enzim Rubisco naik sebesar 33%, yang berkontribusi langsung terhadap produktivitas tanaman. Penelitian lain oleh Tan dkk. (2021) menunjukkan bahwa aktivitas CQDs tidak terbatas pada satu jenis tanaman, tetapi juga terbukti meningkatkan efisiensi fotosintesis pada tanaman C3 seperti padi dan tanaman C4 seperti jagung, melalui peningkatan konduktansi stomata dan laju asimilasi karbon tanpa menimbulkan gejala toksik. Lebih lanjut, Wang dkk. (2021) membuktikan bahwa modifikasi struktur CQDs melalui doping nitrogen (N-CDs) menghasilkan peningkatan efisiensi konversi cahaya, dan mempercepat transfer elektron. Aplikasi foliar N-CDs pada jagung mampu meningkatkan berat kering akar sebesar 72,30%, berat batang 55,75%, serta hasil panen hingga 24,50%. Dengan demikian, baik CQDs murni maupun bentuk

termodifikasi seperti N-CDs menunjukkan potensi luar biasa sebagai *nanofertilizer* ramah lingkungan yang mampu mengoptimalkan fotosintesis, memperkuat pertumbuhan vegetatif, dan meningkatkan produktivitas hasil panen dalam sistem pertanian modern dan berkelanjutan.

II.2 Hidrotermal

Metode hidrotermal merupakan salah satu teknik yang sering digunakan dalam sintesis CQDs dengan pendekatan *bottom-up*. Proses ini melibatkan karbonisasi bahan organik di bawah tekanan dan suhu tinggi menggunakan reaktor tertutup, seperti autoklaf yang dilapisi *polytetrafluoroethylene* (PTFE). Metode ini memungkinkan konversi molekul kecil menjadi domain karbon sp^2 , menghasilkan CQDs dengan ukuran partikel yang relatif seragam. Keunggulan utama dari teknik ini adalah kemampuannya untuk menghasilkan CQDs dengan sifat fluoresensi yang dapat diatur melalui pengendalian komposisi bahan baku dan kondisi proses (Yang dkk., 2023).



Gambar II. 3 Skema Hidrotermal (Atchudan dkk., 2021)

Gambar II.3 menunjukkan proses konversi limbah kulit pisang menjadi CQDs melalui tiga tahap utama, yaitu dehidrasi senyawa fitokimia, polimerisasi menjadi struktur makromolekul, dan karbonisasi pada suhu tinggi dalam autoklaf tertutup, menghasilkan partikel nano fluoresensi yang stabil, larut dalam air, dan

biokompatibel tanpa memerlukan agen pasivasi tambahan. Metode hidrotermal juga dianggap ramah lingkungan karena memanfaatkan bahan alami sebagai prekursor, seperti limbah organik. CQDs yang dihasilkan melalui metode ini memiliki berbagai gugus fungsi, seperti -OH dan -COOH, yang memberikan sifat hidrofilik sekaligus meningkatkan biokompatibilitasnya. Selain itu, metode ini memungkinkan produksi dan modifikasi permukaan CQDs berlangsung secara bersamaan, menjadikannya lebih efisien dibandingkan teknik lain. Sebagai contoh, penelitian menunjukkan bahwa dengan mengatur rasio bahan baku atau kondisi reaksi (seperti tingkat keasaman atau kebasaan), panjang gelombang emisi CQDs dapat disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan aplikasi tertentu (Yang dkk., 2023).

II.3 Pupuk

Pupuk merupakan bahan yang digunakan untuk menambah unsur hara pada tanah atau tanaman guna menunjang pertumbuhannya, terdiri atas dua jenis utama yaitu organik dan anorganik. Pupuk organik berasal dari bahan alami seperti kompos dan kotoran hewan, sedangkan pupuk anorganik berasal dari sintesis kimia dan umumnya mengandung nitrogen (N), fosfor (P), serta kalium (K) (Hartati dkk., 2014). Pupuk organik bekerja melalui proses dekomposisi yang merangsang aktivitas mikroorganisme dan melepaskan nutrisi secara perlahan, sedangkan pupuk anorganik mudah larut dalam air dan langsung diserap oleh akar tanaman. Kombinasi keduanya sering memberikan hasil optimal, karena pupuk anorganik menyediakan nutrisi instan, sementara pupuk organik menjaga keseimbangan hara jangka panjang. Aktivitas pupuk dipengaruhi oleh jenis, dosis, waktu aplikasi, dan

kesesuaian dengan kondisi tanah seperti pH dan kandungan bahan organik. (Hartati dkk., 2014).

II.4 Pakcoy

Tanaman pakcoy termasuk dalam klasifikasi ilmiah tumbuhan berbunga yang memiliki sistem pembuluh. Klasifikasi tanaman pakcoy (Rochfort & Jones, 2011) adalah sebagai berikut:

Kingdom	: <i>Plantae</i>
Divisi	: <i>Magnoliophyta</i>
Kelas	: <i>Magnoliopsida</i>
Ordo	: <i>Brassicales</i>
Family	: <i>Brassicaceae</i>
Genus	: <i>Brassica rapa L</i>

Tanaman pakcoy dikenal sebagai sayuran daun yang memiliki karakter morfologi khas, seperti daun berbentuk roset, lebar, dan berwarna hijau mengilap. Setiap helai daunnya memiliki pelepah tebal dan berair, yang berfungsi menyimpan nutrisi dan mendukung metabolisme tumbuhan. Batang pakcoy tergolong pendek namun menggembung, sedangkan sistem perakarannya terdiri atas akar tunggang dan serabut yang mendukung efisiensi penyerapan hara. Ketika mencapai fase generatif, tanaman ini menghasilkan bunga kuning kecil yang berkembang menjadi buah polong berisi biji bulat berukuran kecil. Selain itu, pakcoy mengandung berbagai nutrisi penting, seperti vitamin A, C, dan K, serta mineral seperti kalsium, magnesium, fosfor, dan zat besi. Tanaman ini juga kaya akan senyawa bioaktif, terutama glukosinolat, flavonoid, dan antioksidan yang berperan dalam menjaga

kesehatan tubuh serta menghambat perkembangan sel abnormal. Studi oleh (Luo dkk., 2022) menunjukkan bahwa *Brassica rapa*, termasuk pakcoy, mengandung glukosinolat yang memberikan perlindungan terhadap stres oksidatif dan memiliki potensi antikanker.

Dalam praktik pertanian modern, pakcoy menjadi tanaman yang sangat ideal untuk sistem hidroponik karena memiliki siklus pertumbuhan cepat, adaptasi tinggi terhadap lingkungan terkontrol dan dapat memanennya dalam waktu 30 hingga 45 hari setelah tanam, menjadikannya sayuran ekonomis dan efisien untuk dibudidayakan. Selain itu, struktur pakcoy yang sederhana memudahkan peneliti dalam mengamati respons pertumbuhan terhadap perlakuan tertentu, seperti aplikasi pupuk berbasis CQDs.

II.5 Hidroponik

Hidroponik adalah teknik menanam tanpa menggunakan tanah, dimana akar tanaman memperoleh nutrisi langsung dari larutan air yang mengandung unsur hara esensial seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Nutrisi ini diserap melalui media tanam inert seperti *rockwool*, pasir, sekam, atau *cocopeat* yang berfungsi menopang akar tanpa menyuplai zat hara. Sistem ini terdiri dari beberapa jenis, seperti NFT, DWC, *drip system*, *ebb and flow*, aeroponik, dan *wick*. Dibandingkan dengan pertanian konvensional, hidroponik lebih efisien karena hemat air hingga 90%, mempercepat pertumbuhan tanaman, dan bisa diterapkan di lahan sempit seperti *rooftop* atau *greenhouse* (EI-Kazzaz, 2017).



Gambar II. 4 Sistem hidroponik *wick* (Dewi dkk., 2022)

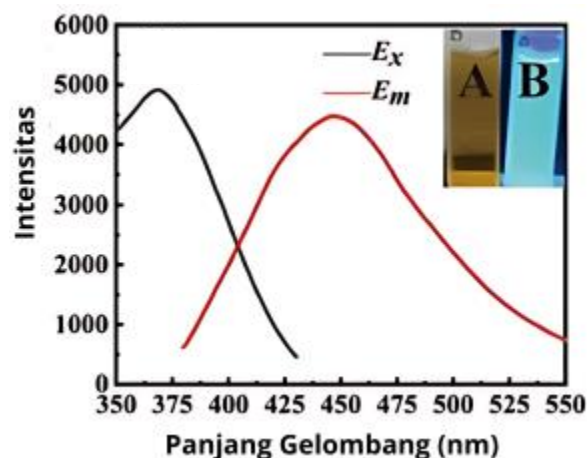
Metode hidroponik yang paling sederhana dan mudah diaplikasikan adalah sistem *wick* (Gambar II.4), yang bekerja tanpa bantuan pompa atau listrik, melainkan mengandalkan prinsip kapilaritas untuk mengalirkan larutan nutrisi dari wadah penampung ke akar tanaman melalui sumbu (*wick*) yang menyerap larutan secara terus-menerus. Sistem *wick* menggunakan pot berisi media tanam seperti sekam bakar, vermikulit, atau *cocopeat*, serta meletakkan sumbu yang menghubungkan larutan nutrisi di bagian bawah dengan media tanam di bagian atas. Karena sistem ini sangat sederhana, banyak digunakan dalam skala rumah tangga, pendidikan, atau percobaan awal di laboratorium. Dewi dkk., (2022) menerapkan sistem *wick* untuk menanam kacang hijau (*Vigna radiata*) menggunakan pupuk organik cair hasil fermentasi limbah batik dan tahu yang telah didegradasi oleh jamur *Aspergillus sp.*, dan hasilnya menunjukkan bahwa pemberian pupuk organik cair dengan konsentrasi 20 mL/1000 mL mampu menghasilkan tinggi tanaman terbaik, yakni 19,83 cm dalam waktu 7 hari.

II.6 Karakterisasi Material

II.6.1 Spektrofotometer Fotoluminesensi

Spektrofotometer fotoluminesensi merupakan alat analitik yang digunakan untuk mengukur cahaya yang dipancarkan oleh suatu material setelah menyerap energi dari sinar UV atau cahaya tampak, dan sangat penting dalam karakterisasi

CQDs. Emisi cahaya ini dikenal sebagai PL, yang terbagi menjadi dua jenis, yaitu fluoresensi dengan waktu emisi sangat singkat ($<10^{-8}$ detik) dan fosforesensi yang terjadi lebih lambat karena melibatkan transisi ke keadaan triplet. Prinsip kerja spektrofotometer PL meliputi tiga tahap: eksitasi sampel dengan cahaya (250–400 nm), transisi elektron ke tingkat energi lebih tinggi, dan pengukuran cahaya yang dipancarkan saat kembali ke keadaan dasar. Spektrum emisi CQDs bervariasi dalam rentang 435–750 nm, mencakup warna biru hingga merah, dengan pergeseran spektrum (*red shift*) yang bergantung pada ukuran partikel dan struktur permukaan. Emisi ini dapat berasal dari inti partikel karena efek *quantum confinement* atau dari permukaan akibat keberadaan gugus fungsi seperti $-\text{COOH}$ dan $-\text{NH}_2$ (Hagiwara dkk., 2021)



Gambar II. 5 Spektra eksitasi, dan emisi CQDs (Han dkk., 2024)

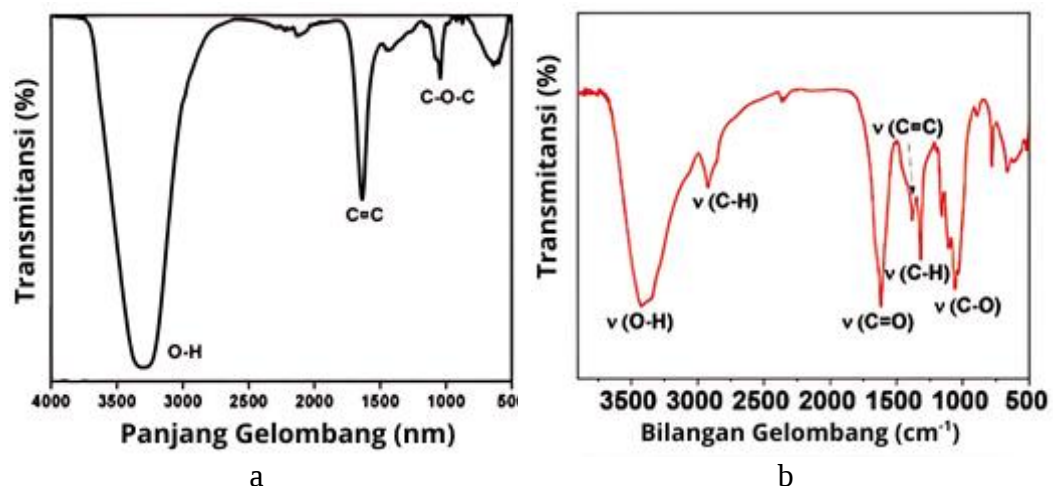
Gambar II.5 menunjukkan spektra eksitasi dan emisi dari hasil sintesis CQDs. Fluoresensi pada CQDs terjadi melalui proses eksitasi saat cahaya UV diserap dan elektron naik ke tingkat energi lebih tinggi, lalu emisi terjadi saat elektron kembali ke keadaan dasar dan memancarkan cahaya. CQDs dari limbah kulit buah naga menunjukkan eksitasi pada 365 nm dan emisi maksimum 445 nm,

dengan rentang emisi 405–506 nm yang bergantung pada panjang gelombang eksitasi karena variasi ukuran partikel dan gugus fungsi ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$) Tan & Zhou, (2024). Sementara itu, N-CQDs hasil doping nitrogen dari campuran kulit buah jeruk, pisang, dan naga menunjukkan eksitasi pada 370 nm dan emisi pada 445 nm (Han dkk., 2024).

II.6.2 Spektrofotometer *InfraRed*

Spektroskopi FTIR merupakan metode analisis instrumental yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur molekul serta komposisi kimia dari suatu bahan berdasarkan interaksi antara radiasi inframerah dengan ikatan kimia dalam molekul. Setiap jenis ikatan kimia memiliki frekuensi serapan inframerah yang khas, sehingga menghasilkan spektrum unik yang dapat digunakan sebagai “sidik jari” untuk menentukan keberadaan gugus fungsi, seperti metil ($-\text{CH}$), hidroksil ($-\text{OH}$) dan karbonil ($-\text{C}=\text{O}$), secara tepat dan efisien (Dhillon dkk., 2024). Dalam praktiknya, berkas sinar inframerah pertama-tama dipancarkan melalui interferometer, kemudian diarahkan ke sampel untuk menghasilkan interferogram. Data interferogram tersebut kemudian diolah menggunakan transformasi Fourier sehingga menghasilkan spektrum absorbansi terhadap panjang gelombang. Spektrum ini memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis baik secara kualitatif maupun kuantitatif, tergantung pada kekuatan dan posisi pita serapan. Untuk memperoleh hasil yang akurat, sampel umumnya disiapkan dalam bentuk larutan, film tipis, atau serbuk halus, serta harus dikondisikan pada suhu dan kelembapan yang stabil supaya sinyal tidak terganggu oleh faktor eksternal.

Spektroskopi FTIR sering digunakan untuk mengkarakterisasi bahan karbon hasil sintesis dari limbah biomassa, termasuk dalam studi mengenai CQDs. Gambar II.6 menunjukkan rentang panjang gelombang yang umum digunakan dalam analisis FTIR berada antara 4000 hingga 400 cm^{-1} , yang mencakup berbagai zona vibrasi ikatan fungsi (H. Xu dkk., 2025). Penelitian terhadap CQDs yang disintesis menunjukkan adanya pita serapan signifikan di sekitar 3400 cm^{-1} yang mengindikasikan gugus hidroksil ($-\text{OH}$), kemudian di kisaran 1630–1650 cm^{-1} yang menunjukkan adanya gugus karbonil ($\text{C}=\text{O}$), serta di rentang 1000–1100 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus eter ($\text{C}-\text{O}$). Kehadiran gugus polar ini memberikan kontribusi penting terhadap kelarutan CQDs dalam air dan kestabilan fluoresensi yang dihasilkannya. Dengan demikian, informasi dari spektrum FTIR dapat digunakan untuk memahami struktur permukaan CQDs, yang sangat relevan untuk penerapan di bidang kimia lingkungan dan biomedis.



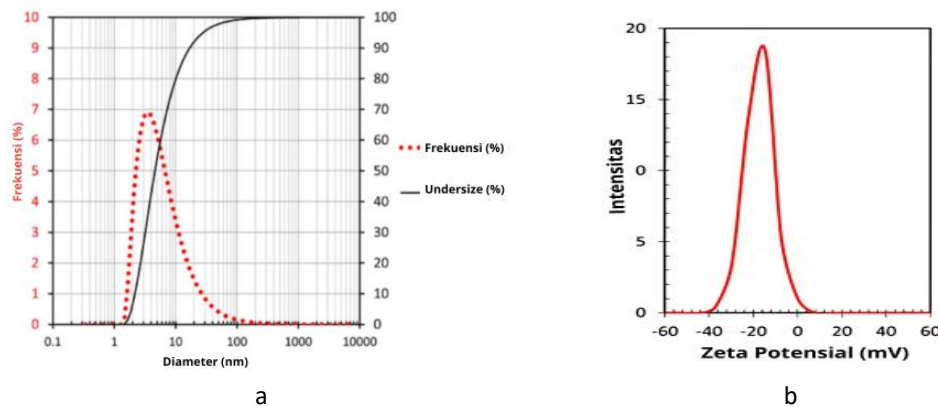
Gambar II. 6 Spektrum FTIR CQDs (a) kulit nanas; (b) kulit buah naga (J. Tan & Zhou, 2024; Vandarkuzhali dkk., 2018)

Penelitian terdahulu oleh Vandarkuzhali dkk., (2018) yang mengeksplorasi CQDs dari kulit nanas juga menunjukkan pola spektrum FTIR. Menurut studi

tersebut, ditemukan dua puncak dominan pada 3315 cm^{-1} dan 1040 cm^{-1} yang masing-masing mewakili keberadaan gugus -OH dan gugus eter C-O-C seperti ditampilkan pada Gambar II.6a. Sementara itu, pada Gambar II.6b, penelitian yang dilakukan Tan & Zhou, (2024) spektrum FTIR hasil sintesis dari kulit buah naga menunjukkan puncak pada 3420 cm^{-1} (gugus -OH), 2940 dan 2855 cm^{-1} (C-H alifatik), 1635 cm^{-1} (C=O), serta 1060 cm^{-1} (C-O). Hasil ini menegaskan bahwa spektroskopi FTIR mampu memberikan bukti kuat mengenai adanya gugus fungsi aktif yang terdapat pada permukaan CQDs. Identifikasi gugus fungsi tersebut sangat penting untuk memahami sifat kimia dan fisik dari CQDs, khususnya dalam kaitannya dengan fungsifikasi permukaan yang memengaruhi stabilitas, fluoresensi, dan kemampuan interaksinya dengan lingkungan. Oleh karena itu, FTIR menjadi salah satu alat analitik utama yang dapat mendukung pengembangan material berbasis CQDs untuk aplikasi berkelanjutan seperti sensor kimia, teknologi *bioimaging*, dan remediasi lingkungan (Dhillon dkk., 2024; H. Xu dkk., 2025).

II.6.3 *Particel Size Analyzer* (PSA) dan Zeta Potensial

Particle Size Analyzer (PSA) merupakan alat untuk mengukur distribusi ukuran partikel dalam bentuk serbuk, suspensi, atau aerosol dengan prinsip dasar hamburan cahaya. Pada metode *Laser Diffraction* (LD), cahaya laser diarahkan melalui sel sampel dan menghasilkan pola hamburan yang ditangkap oleh detektor sudut, lalu dianalisis menggunakan algoritma Mie atau Fraunhofer untuk menentukan distribusi ukuran partikel berdasarkan volume.



Gambar II. 7(a) PSA dan (b) Zeta Potensial (Setianto dkk., 2024)

Salah satu parameter penting dalam karakterisasi CQDs adalah analisis ukuran partikel dan stabilitas koloidnya, yang secara umum ditentukan menggunakan PSA dan zeta potensial. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Setianto dkk. (2024), CQDs dari prekursor ekstrak asap rokok berhasil disintesis melalui metode hidrotermal. Hasil karakterisasi PSA (Gambar II.7a) menunjukkan bahwa rata-rata diameter partikel CQDs sebesar 6,3 nm, yang menunjukkan bahwa partikel berada dalam skala nano, sesuai dengan karakteristik khas CQDs. Sementara itu, hasil pengukuran zeta potensial (Gambar II.7b) menunjukkan nilai $-17,5$ mV, yang menunjukkan bahwa permukaan partikel bermuatan negatif akibat adanya gugus fungsi seperti karboksilat ($-\text{COOH}$), hidroksil ($-\text{OH}$), dan amino ($-\text{NH}_2$) (Setianto dkk., 2024).