

Potensi *Carbon dots* Kulit Nanas dan Belimbing Wuluh untuk Mengendalikan Infeksi *Tobacco mosaic virus* dan Kutu Daun

Zahrotul Huriyah¹, Tri Asmira Damayanti^{1*}, Sugeng Santoso¹ dan Akhiruddin Maddu²

¹Departemen Proteksi Tanaman IPB, Jl. Kamper, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

²Departemen Fisika IPB, Jl. Meranti, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

*Alamat korespondensi: triadys@apps.ipb.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima: 24-01-2026

Direvisi: 14-04-2026

Dipublikasi: 03-05-2026

ABSTRACT/ABSTRAK

Potential of *Carbon dots* derived Pineapple Peel and Bilimbi to Control *Tobacco mosaic virus* Infection and Aphid

Keywords:

Antiviral, *Aphis gossypii*, Bioinsecticide, *Carbon dots*, *Tobacco mosaic virus*

Tobacco mosaic virus (TMV) and aphids are pivotal pests in agriculture. Pest management strategy so far by using synthetic chemical. Nowadays, the trend in pest management is toward eco-friendly methods. The use of Carbon dots (CDs) in pest management is a promising agent for sustainable agriculture; however, the research is still limited. This study synthesized CDs-derived pineapple peel and bilimbi and evaluate their potential to control TMV and aphids. CDs were characterized for their optical trait, functional groups, and morphology. Antiviral activities were assessed against TMV on *Chenopodium amaranticolor* by foliar spraying before and after virus inoculation. Insecticidal efficacy against *Aphis gossypii* was evaluated by direct application of CDs at 400 ppm. Both CDs were successfully synthesized, with sizes ranging from 5.5 to 9.8 nm, and exhibiting amorphous and crystalline forms, with characteristics optical features and functional groups typical of carbon dots. The carbon dots treatments markedly prolonged TMV incubation period compared to control. Foliar spray application of CDs before or after virus inoculation was comparably effective, inhibiting necrotic local lesions by 31% to 91%, depending on CDs type and concentration. At 400 ppm, CDs demonstrated promise as a bioinsecticide against aphids, achieving up to 55% mortality. These finding suggest both CDs act as resistance inducers, offer antiviral and insecticide activity.

Kata Kunci:

Antivirus, *Aphis gossypii*, Bioinsektisida, *Carbon dots*, *Tobacco mosaic virus*

Tobacco mosaic virus (TMV) dan kutu daun merupakan organisme pengganggu tanaman (OPT) yang penting dalam bidang pertanian. Strategi pengendalian OPT umumnya menggunakan bahan kimia sintetis. Saat ini tren pengelolaan OPT mengarah pada penggunaan metode yang ramah lingkungan. Pemanfaatan *Carbon dots* (CDs), dalam pengelolaan OPT merupakan salah satu agens yang menjanjikan untuk pertanian yang berkelanjutan, namun risetnya masih terbatas. Penelitian ini menyintesis CDs dari kulit nanas dan belimbing wuluh serta mengevaluasi potensinya dalam mengendalikan TMV dan kutu daun. CDs dikarakterisasi berdasarkan sifat optik, gugus fungsi, dan morfologi. Aktivitas antivirus diuji terhadap TMV pada tanaman indikator *Chenopodium amaranticolor* dengan penyemprotan daun sebelum dan sesudah inokulasi virus. Aktivitas insektisida CDs diuji terhadap *Aphis gossypii* melalui penyemprotan langsung pada kutu daun pada konsentrasi 400 ppm. Kedua jenis CDs berhasil disintesis dengan ukuran 5,5 sampai 9,8 nm dengan bentuk amorf dan kristal, serta memiliki karakter optik dan gugus fungsi yang khas sebagai CDs. Perlakuan CDs secara nyata memperpanjang masa inkubasi TMV

dibandingkan kontrol. Aplikasi CDs dengan cara penyemprotan baik sebelum atau sesudah inokulasi virus menunjukkan keefektifan yang sebanding dengan tingkat penghambatan gejala lesio lokal nekrotik berkisar 31%–91% tergantung jenis CDs dan konsentrasi. Pada konsentrasi 400 ppm, CDs berpotensi sebagai bioinsektisida menyebabkan mortalitas kutu daun hingga 55%. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua jenis CDs berpotensi sebagai penginduksi ketahanan tanaman, memiliki aktivitas antivirus, dan insektisida.

PENDAHULUAN

Virus tumbuhan merupakan salah satu patogen obligat yang menginfeksi berbagai komoditas pertanian, termasuk tanaman sayuran dengan kehilangan hasil mencapai 98% (Anikina *et al.*, 2023). Kelompok *Tobamovirus* dan *Potyvirus* memiliki kisaran inang luas dan telah dilaporkan menginfeksi tanaman sayuran di Indonesia pada famili *Solanaceae* (Damayanti & Kurniawati, 2022), dan *Cucurbitaceae* (Damayanti *et al.*, 2021), serta *Fabaceae* (Damayanti *et al.*, 2009). Sebagian besar penyakit virus ini menyebabkan gejala mosaik dan ditularkan melalui serangga vektor, terutama kutu daun. Salah satu anggota penting *Tobamovirus* adalah *Tobacco mosaic virus* (TMV) yang memiliki stabilitas partikel sangat tinggi dan mampu menginfeksi berbagai tanaman inang, baik secara tunggal maupun campuran. TMV telah dilaporkan menginfeksi mentimun di Indonesia sejak tahun 2018 dengan gejala mosaik, malformasi, dan perubahan ukuran pada daun maupun buah, serta menginfeksi cucurbit lainnya (Damayanti *et al.*, 2019; Listihani *et al.*, 2018). Infeksi TMV mengakibatkan kehilangan hasil berkisar 19%–33% pada tomat, 25% pada tembakau, dan kerusakan yang signifikan pada cabai (Rao & Reddy, 2020). Tingkat kerugian yang tinggi dan kisaran inang yang luas menunjukkan bahwa pengendalian virus, khususnya TMV masih menjadi tantangan besar.

Kutu daun berperan sebagai vektor utama virus tumbuhan, terutama virus mosaik dari kelompok *Potyvirus* yang ditransmisikan secara non-persisten, sehingga penularan terjadi dalam waktu singkat (Whitfield *et al.*, 2015). Kutu daun *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) memiliki dinamika populasi tinggi yang mempercepat penyebaran virus di lapangan. Kepadatan populasi dan kemunculan individu bersayap meningkatkan kemampuan penularan ke tanaman inang baru. Infeksi *Potyvirus* oleh kutu daun mencapai tingkat tinggi dalam periode inokulasi singkat (Noveriza dkk., 2012). TMV tidak ditularkan oleh serangga vektor, namun memiliki kisaran inang luas, bersama *Potyvirus* yang

ditularkan kutu daun berisiko meningkatkan infeksi campuran dan kompleksitas epidemi di lapangan.

Petani umumnya menggunakan bahan kimia sintesis untuk mengendalikan serangga baik vektor virus maupun tidak karena efek kematian yang cepat, namun aplikasi yang tidak tepat justru mengakibatkan pencemaran lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia. Residu *methomyl* dilaporkan telah melewati ambang batas yang diperbolehkan di lapangan (Kostik, 2014). Oleh karena itu, diperlukan strategi pengendalian hama dan penyakit virus lebih ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk menekan virus dan vektor secara terpadu.

Pengelolaan virus secara biologi menggunakan agens hayati dan bahan alami ekstrak tanaman telah menunjukkan keefektifan yang cukup tinggi (Purnamawati dkk., 2019; Putri & Damayanti, 2020). Selain itu, kombinasi cara kultur teknis dan bahan alami di lapangan juga terbukti efektif menekan infeksi virus dan populasi serangga vektor kutu daun (Kasim *et al.*, 2024; Cahyati dkk., 2023). Namun, penggunaan ekstrak kasar daun tanaman secara langsung memiliki keterbatasan dalam stabilitas, konsistensi efektivitas, dan kebutuhan bahan baku yang banyak. Kehadiran nanoteknologi dapat memformulasikan senyawa bioaktif ekstrak tanaman dan metal dalam bentuk nanopartikel (NP) berukuran <100 nm yang lebih stabil dan efisien. NP memiliki stabilitas fungsional di lingkungan biologis dan berpeluang sebagai *carrier capacity* (Joo *et al.*, 2010). Nanopartikel ekstrak daun bugenvil dilaporkan mampu menekan gejala lesio lokal nekrotik oleh infeksi *Bean common mosaic virus* strain *Blackeye cowpea* (Islami dkk., 2024). Biosintesis Cu_2O -NP dan AgNP mampu mengendalikan infeksi TMV dan *Cucumber mosaic virus* strain *Soybean* (Putri *et al.*, 2025; Arridho, 2025). Namun, penggunaan NP berbasis logam yang tidak terkontrol dalam jangka panjang berpotensi menimbulkan isu toksisitas lingkungan.

Carbon dots (CDs) merupakan nanomaterial berbasis karbon yang tengah mendapat perhatian

besar sebagai salah satu pendekatan berkelanjutan dalam dunia pertanian yang relatif lebih aman terhadap lingkungan dibandingkan NP berbasis logam. CDs memiliki sifat unik, berukuran <10 nm, solubilitas tinggi, biokompatibel, dan toksisitas sangat rendah (*neglectable*) dengan karakteristik khas berpendar di bawah penyinaran ultraviolet (Salsabilla dkk., 2024). CDs dapat disintesis dengan strategi *bottom-up* dan *top-down* dari berbagai sumber alami dari biomassa tanaman, diantaranya dari kulit nanas dan belimbing wuluh dalam penelitian ini, kedua bahan yang banyak ditemukan di lingkungan sekitar rumah. Selama ini, CDs telah dimanfaatkan dalam dunia medis sebagai agens *bioimaging*, sensor, dan *drug delivery*. Kajian CDs dari *ethylenediamine* dengan *cysteine* sebagai *capping/reducing agent* yang disintesis dengan metode *hydrothermal* terbukti dapat menurunkan keparahan gejala, titer virus *Cotton leaf curl Multan virus (Begomovirus)* dan meningkatkan ketahanan tanaman pada tanaman model *Nicotiana benthamiana* yang diinokulasi dengan metode agroinfiltrasi (Farooq *et al.*, 2024). Hal ini menunjukkan CDs memiliki karakteristik fungsional yang berpotensi dikaji pemanfaatannya dalam mengendalikan infeksi virus dan serangga vektor. Pemanfaatan CDs berbasis bahan kimia sebagai agens antivirus tumbuhan telah dilaporkan sebelumnya (Farooq *et al.*, 2024), namun pengembangan CDs berbasis biomassa tanaman untuk mengendalikan virus tumbuhan dan serangga vektor belum ada kajiannya di Indonesia. Sampai saat ini, belum terdapat laporan ilmiah mengenai pemanfaatan CDs yang disintesis dari kulit nanas dan belimbing wuluh atau lainnya untuk mengendalikan virus tumbuhan dan kutu daun. TMV dan kutu daun dipilih sebagai objek penelitian karena TMV memiliki stabilitas dan virulensi tinggi, mudah ditularkan, dan kisaran inangnya luas, sedangkan kutu daun merupakan hama yang polifag dan berperan penting sebagai vektor virus tumbuhan di lapangan. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan menyintesis dan mengkarakterisasi CDs dari kulit nanas dan belimbing wuluh, serta menguji potensi pemanfaatannya dalam mengendalikan infeksi *Tobacco mosaic virus* dan kutu daun *A. gossypii*.

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Juni sampai Desember 2025. Sintesis dan karakterisasi CDs

di Laboratorium Biofisika dan Nanostruktur, Departemen Fisika IPB. Perbanyakkan inokulum TMV di Laboratorium Virologi Tumbuhan, sedangkan penyiapan tanaman uji dan uji kemampuan CDs terhadap TMV dilakukan di Rumah Kaca Cikabayan, Departemen Proteksi Tanaman IPB. Identifikasi dan perbanyakkan kutu daun, serta uji aktivitas insektisida CDs terhadap kutu daun dilakukan di Laboratorium Ekologi dan Biosistemika Serangga, Departemen Proteksi Tanaman IPB.

Sintesis *Carbon dots*

Carbon dots disintesis dengan strategi *bottom-up* menggunakan metode *microwave* dan metode *hydrothermal*. Sintesis CDs dengan *microwave* mengikuti prosedur yang digunakan Isnaeni *et al.*, (2018) dengan modifikasi pada sumber karbon dan lamanya waktu pemanasan. Buah belimbing wuluh dan kulit nanas dihaluskan dalam akuabides dengan rasio 1:1 (b/v) menggunakan *blender*. Masing-masing ekstrak tanaman disaring untuk memisahkan larutan dari ampasnya. Kemudian, ekstrak tanaman dimasukkan dalam mangkuk tahan panas, dipanaskan dalam *microwave* sampai berubah warna. Karbon yang terbentuk dicirikan dengan adanya kerak pada dasar mangkuk, kemudian kerak yang terbentuk digerus menjadi bubuk karbon dan dilarutkan dengan akuabides menjadi larutan stok CDs (1.000 ppm).

Sintesis CDs dengan metode *hydrothermal* dilakukan mengikuti prosedur Nalwi dkk., (2023) dengan modifikasi sumber karbon dan suhu pemanasan. Masing-masing ekstrak tanaman dimasukkan ke dalam *teflon liner* dalam *autoclave vessel*, kemudian dipanaskan pada suhu 200 °C. Sebagai pembanding digunakan bahan kimia asam askorbat (*ascorbic acid*). Karbon yang terbentuk dicirikan dengan pembentukan larutan kecokelatan. Larutan ini disaring untuk memisahkan bubuk karbon. Bubuk karbon dikeringkan dalam oven pada suhu 60 °C selama semalam. Bubuk karbon kering selanjutnya dilarutkan dengan akuabides menjadi larutan stok CDs (1.000 ppm). Sebelum digunakan, larutan disentrifugasi dan dipurifikasi dengan *syringe filter* 0,22 µm PES.

Karakterisasi *Carbon dots*

Hasil sintesis CDs dikarakterisasi menggunakan *spectrophotometer photoluminescence* (PL), spektroskopi fourier transform infrared (FTIR), UV-Vis *spectrophotometer*, dan *high resolution transmission electron microscope* (HR-TEM). UV-

Vis mengukur penyerapan cahaya pada panjang gelombang 200–700 nm sedangkan PL mengukur spektrum emisi fotoluminesensi pada panjang gelombang eksitasi 405 nm, di Departemen Fisika IPB. FTIR menganalisis gugus fungsional pada permukaan CDs dengan mengukur spektrum serapan inframerah yang khas pada berbagai ikatan kimia dengan metode *Attenuated Total Reflection*, di Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara (FTMD) ITB. Bentuk dan ukuran CDs diamati dengan *High resolution* TEM di Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi (PPNN) ITB.

Perbanyak Inokulum TMV

Sumber inokulum TMV merupakan koleksi Laboratorium Virologi Tumbuhan, Departemen Proteksi Tanaman, IPB. Tanaman tembakau (*Nicotiana tabacum*) berumur 2 minggu setelah pindah tanam, diinokulasi secara mekanis dengan TMV. Inokulum TMV dibuat dengan cara daun sakit digerus dengan nitrogen cair menggunakan mortar dan pistil steril yang kemudian ditambahkan 0,01 M bufer fosfat pH 7,0 mengandung 1% β -*mercaptoethanol* dengan perbandingan 1:200 (b/v). Sap tanaman segera dioleskan ke permukaan daun tembakau yang telah diberi karborundum 600 mesh dan didiamkan 1-3 menit, kemudian daun disemprot dengan akuades untuk menghilangkan sisa karborundum. Tanaman kemudian dipelihara sampai bergejala dan digunakan sebagai sumber inokulum setelah dikonfirmasi ELISA (data tidak ditampilkan).

Penyiapan Tanaman *Chenopodium amaranticolor*

Tanaman indikator untuk pengujian ini adalah *Chenopodium amaranticolor*. Tanaman ini merupakan inang rentan yang dapat menunjukkan respons gejala lesio lokal nekrotik (LLN) dengan cepat sehingga mudah diamati/dihitung (Lantos *et al.*, 2023). Benih *C. amaranticolor* disemai pada baki semai hingga berumur 14 hari setelah tanam (HST), kemudian dipindahtanam dalam pot berukuran 35 × 23 × 26 cm³ yang berisi media tanam berupa campuran tanah: pupuk kandang: arang sekam dengan perbandingan 2:1:1 (b/b). Pupuk NPK diberikan sesuai dosis anjuran dimulai pada satu minggu setelah bibit dipindahtanam. Tanaman dipelihara hingga berumur 35–45 HST untuk digunakan sebagai tanaman uji.

Uji Kemampuan CDs dalam Menekan Gejala Lesio Lokal Nekrotik (LLN) oleh Infeksi TMV

Pengujian ini bertujuan menguji keefektifan CDs dalam menghambat gejala lesio lokal nekrotik (LLN), menyeleksi cara aplikasi dan menentukan konsentrasi yang terbaik dalam menghambat pembentukan LLN karena infeksi mekanis TMV pada tanaman *C. amaranticolor*. Tanaman indikator *C. amaranticolor* merupakan inang rentan yang menimbulkan gejala lesio lokal dalam waktu singkat. Tanaman ini umum digunakan dalam diagnosis virus dan juga dalam menyeleksi agens hayati, nabati atau lainnya termasuk nanopartikel yang berpotensi digunakan dalam pengelolaan virus tumbuhan. Keefektifan suatu agens/cara pengendalian virus pada tanaman ini ditunjukkan dalam banyak sedikitnya LLN yang muncul dibandingkan kontrol, sehingga banyak dimanfaatkan dalam seleksi konsentrasi dan penentuan cara aplikasi agens pengendalian virus (Putri *et al.*, 2025; Islami *et al.*, 2024).

Konsentrasi masing-masing CDs yang diuji yakni 100, 200, 300, dan 400 ppm. Pengujian dilakukan dengan rancangan acak lengkap (RAL). Tiap perlakuan terdiri atas 10 daun tanaman *C. amaranticolor* sebagai ulangan. Larutan CDs pada masing-masing konsentrasi ditambahkan surfaktan komersial Agristik (0,05%) sebagai perekat dan perata. Perlakuan CDs dilakukan dengan penyemprotan daun dengan waktu aplikasi; (1) 24 jam sebelum, dan (2) 24 jam sesudah inokulasi TMV dengan volume semprot 50 ml per 10 daun tanaman. Inokulasi mekanis TMV dilakukan dengan cara yang sama seperti saat perbanyak inokulum. Sap diinokulasikan pada setengah daun (*half leaf*) tanaman indikator. Tanaman uji diamati setiap hari hingga bergejala. Parameter yang diamati adalah masa inkubasi, jumlah LLN, dan akumulasi virus secara serologi. Masa inkubasi diamati setelah dilakukan inokulasi hingga awal munculnya gejala LLN pada daun tanaman *C. amaranticolor*. Perhitungan jumlah LLN dilakukan pada seluruh daun tanaman *C. amaranticolor* yang diberi perlakuan CDs kemudian dibandingkan dengan kontrol tanpa perlakuan CDs. Tingkat hambatan relatif (THR) ditentukan dengan formula yang diadopsi dari El Gamal *et al.*, (2022):

$$\text{THR} = \frac{\sum \text{LLN Kontrol} - \sum \text{LLN Perlakuan}}{\sum \text{LLN Kontrol}} \times 100\%$$

Identifikasi dan Perbanyak Kutu Daun

Kutu daun *A. gossypii* yang diperoleh dari lapangan dibebasviruskan dengan cara dipelihara dan

diberi makan daun talas muda sehat yang masih menggulung untuk memperoleh individu kutu daun bebas virus. Nimfa baru dipindahkan dan dipelihara pada tanaman mentimun sehat sampai menjadi imago pada suhu 21–27 °C. Imago diidentifikasi berdasarkan buku identifikasi kutu daun Blackman & Eastop, (2000). Kutu daun untuk pengujian dipelihara pada tanaman mentimun yang sehat sampai siap digunakan.

Uji Aktivitas Insektisida CDs terhadap Kutu Daun

Aktivitas insektisida CDs terhadap kutu daun diuji dengan metode semprot secara langsung terhadap kutu daun. Daun mentimun sehat diletakkan dalam cawan petri tertutup yang diinfestasi dengan 25 imago kutu daun tidak bersayap untuk setiap perlakuan. Kutu daun disemprot larutan CDs sebanyak 3 ml menggunakan konsentrasi terbaik yang diperoleh dari hasil pengujian CDs pada tanaman indikator (400 ppm). Kontrol dalam perlakuan berupa akuabides dengan surfaktan. Percobaan diulang sebanyak 5 kali. Parameter yang diamati adalah mortalitas kutu daun pada 12, 24, dan 48 jam setelah perlakuan semprot CDs (JSS).

Analisis Data

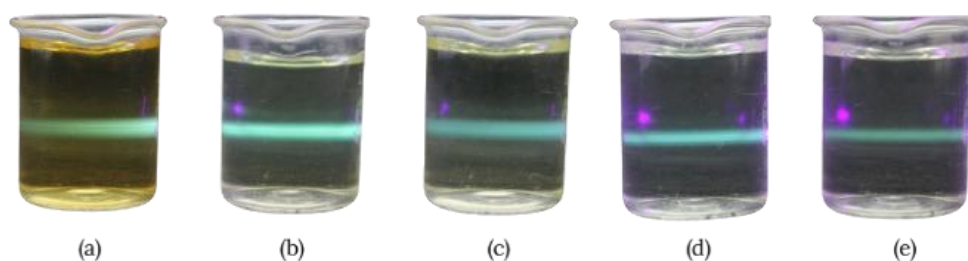
Seluruh data hasil pengujian ditabulasi menggunakan perangkat lunak *Microsoft Office Excel*, kemudian dianalisis secara parametrik menggunakan *analysis of variance (Anova)* dan uji

lanjut Tukey pada taraf nyata 5%. Analisis gejala lesio lokal nekrotik dilakukan secara non-parametrik menggunakan uji *Kruskal-Wallis* dan uji lanjut Dunn pada taraf nyata 5%. Kedua analisis dilakukan dengan perangkat lunak R. Studio.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik *Carbon dots* Kulit Nanas dan Belimbing Wuluh

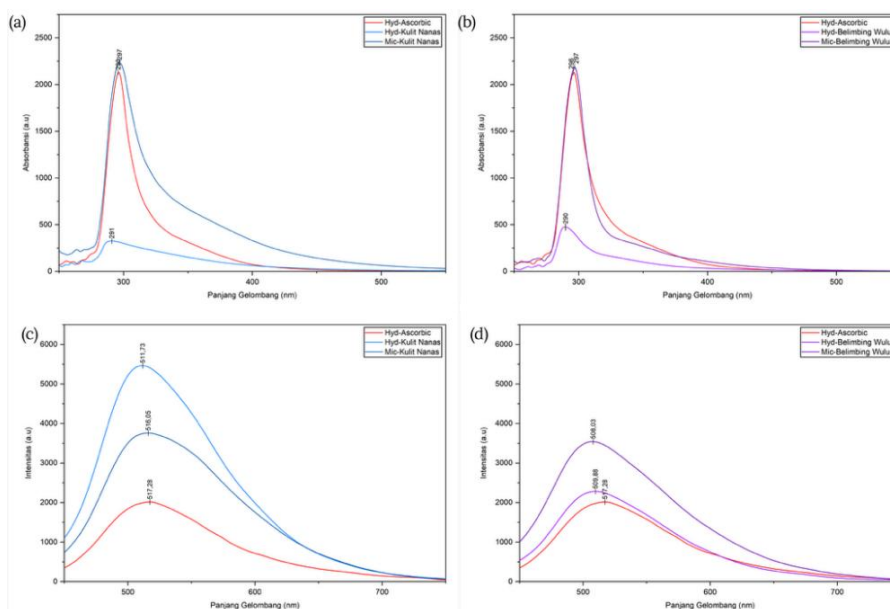
Carbon dots (CDs) berhasil disintesis dengan metode *microwave* dan *hydrothermal* dari ekstrak kulit nanas dan belimbing wuluh dalam bentuk bubuk CDs. Masing-masing bubuk CDs memiliki keunggulan mudah terdispersi dalam air. Sifat dispersibilitas air yang baik merupakan ciri terbentuknya CDs dengan gugus fungsi hidrofilik seperti gugus –OH atau –COOH (Tur dini *et al.*, 2025). Secara sederhana, keberhasilan terbentuknya larutan CDs ditandai dengan adanya karakteristik khas fluoresensi berupa tembusan cahaya berwarna *cyan blue* hingga toska dari penyinaran menggunakan laser *ultraviolet* 405 nm (Gambar 1). Fenomena ini disebut *quantum confinement*, yang terjadi ketika ukuran suatu partikel dikurangi mencapai skala nanometer sehingga mengalami pergeseran sifat optik (Neikov & Yefimov, 2019). Hasil yang sama juga ditunjukkan dari hasil sintesis bahan kimia asam askorbat.



Gambar 1. Fluoresensi larutan CDs dengan laser ultraviolet. CDs kulit nanas (a) dan belimbing wuluh (b) yang disintesis dengan metode *microwave*, dan CDs kulit nanas (c), belimbing wuluh (d) dan asam askorbat (e) yang disintesis dengan metode *hydrothermal*.

Seluruh CDs menunjukkan kemampuan penyerapan di daerah *ultraviolet* yang merupakan ciri umum material CDs dan berpotensi dimanfaatkan dalam bidang *sensing*. Masing-masing CDs memiliki satu puncak serapan pada rentang panjang gelombang sama yakni 290–297 nm, yang berarti CDs memiliki satu ikatan atom dominan (Gambar 2a-b). Menurut Yuniarti & Nurlaela (2023), puncak serapan terbagi dalam dua kelompok utama yakni 200–400

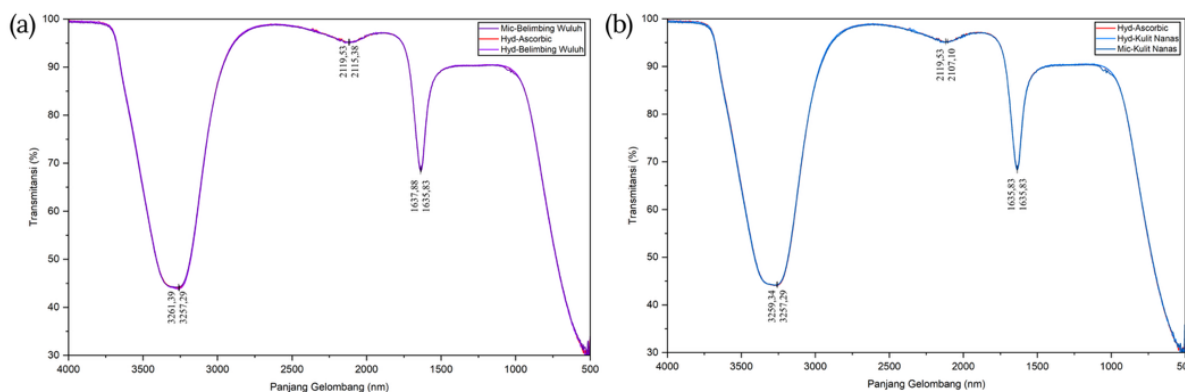
nm transisi $\pi-\pi^*$ sebagai ikatan C=C dan 300–500 nm transisi $n-\pi^*$ sebagai ikatan C=O. Ikatan ini akan memengaruhi tingkat energi dalam penyerapan cahaya, sehingga semakin ke arah kanan akan menunjukkan fenomena pergeseran merah (*red-shift*). Metode sintesis menggunakan *microwave* menghasilkan tingkat serapan yang lebih tinggi, sehingga CDs yang terbentuk berpotensi memiliki kandungan gugus kromofor lebih banyak.



Gambar 2. Karakteristik optik berupa puncak spektrum. UV-Vis CDs kulit nanan (a), UV- Vis belimbing wuluh (b), PL CDs kulit nanan (c), dan PL belimbing wuluh (d).

Secara keseluruhan, CDs memiliki puncak serapan eksitasi dari spektrum *photoluminescence* (PL) pada panjang gelombang 507–520 nm, yakni emisi berwarna hijau; berarti CDs memiliki sifat luminans kuat (Gambar 2c-d). Pada dasarnya, CDs memiliki karakteristik optik absorbansi kuat di wilayah ultraviolet (200–400 nm) dan fluoresens emisi warna merah hingga biru (380–680 nm). Emisi berwarna merah menunjukkan puncak serapan eksitasi >589 nm, kuning 538–598 nm, hijau 507–538 nm, dan biru <507nm (Liu *et al.*, 2020). Luminans lemah terjadi ketika puncak spektrum PL berada pada

panjang gelombang 200–400 nm sedangkan luminans kuat pada 380–750 nm. Perpaduan karakter penyerapan cahaya dan intensitas luminans menjadikan CDs berpotensi sebagai alternatif pengembangan *probe* sinyal ganda serapan dengan koreksi timbal balik sehingga sensor lebih akurat (Lu *et al.*, 2021). Pada panjang gelombang eksitasi sama, larutan CDs dari bahan alami menunjukkan intensitas PL lebih tinggi dibandingkan CDs asam askorbat, yang berarti memiliki kemampuan memancarkan foton lebih banyak sehingga terlihat lebih terang.



Gambar 3. Puncak spektrum FTIR CDs kulit nanan (a), dan belimbing wuluh (b).

Coates (2000) menyatakan bahwa gugus fungsi aktif pada masing-masing larutan CDs terdiri atas ikatan O–H, C=C, dan –NCS seperti halnya yang ditemukan pada penelitian ini (Gambar 3). Puncak yang kuat dan luas pada 3257–3261 cm^{-1} merupakan gugus hidroksil dari air sebagai pelarut ekstrak.

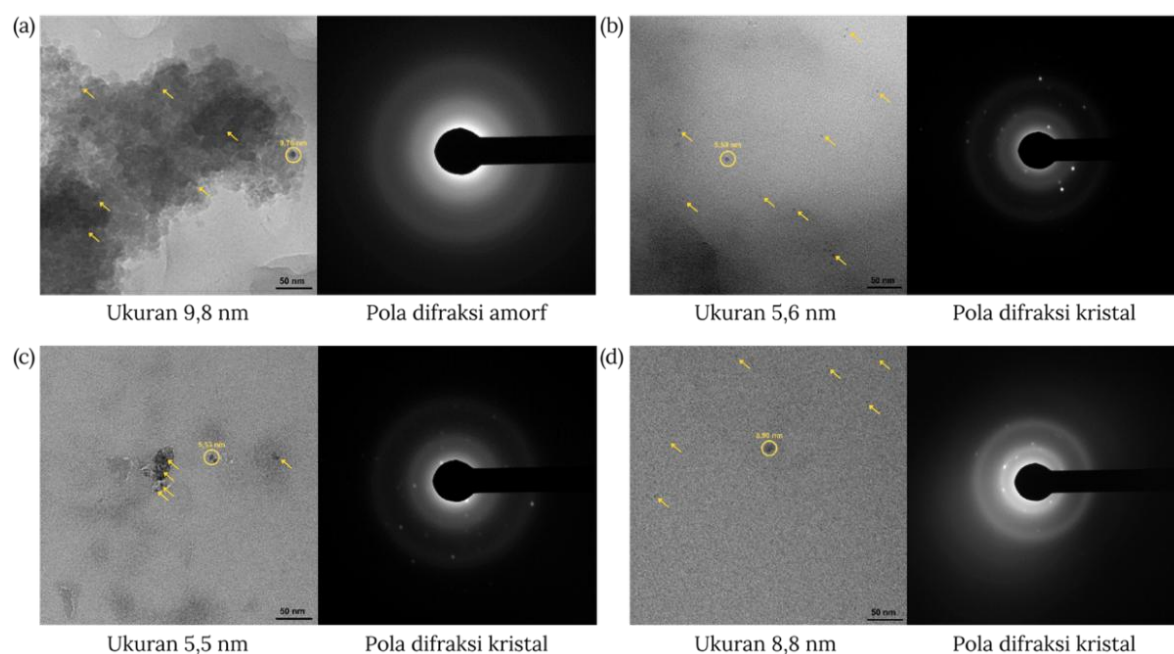
Puncak dengan tekuk tajam pada 1635–1637 cm^{-1} merupakan gugus alkena yang sangat mudah mengalami reaksi adisi elektrofilik. Puncak dengan peregangan pada 2107–2119 cm^{-1} merupakan gugus –NCS yang umumnya berasal dari senyawa alami tanaman berupa glukosinolat yang dipecah oleh

enzim mirosinase. CDs dari bahan alami memiliki unsur utama karbon (C) sebagai karakteristik umum CDs, oksigen (O) berupa gugus karboksil, hidroksil, maupun karbonil, serta hidrogen (H) yang melekat pada gugus permukaan, sehingga stabilitas interaksi biologis dapat terjaga dengan baik (Ozyurt *et al.*, 2023).

Berdasarkan HR-TEM, seluruh CDs membentuk pola difraksi kristal kecuali CDs kulit nanas yang disintesis dengan *microwave* membentuk pola difraksi amorf (Gambar 3). HR-TEM menunjukkan ukuran CDs <10 nm tetapi persebarannya masih beragam. Pola difraksi kristal terbentuk dari struktur atom yang tersusun secara berulang dan teratur sedangkan pola difraksi amorf dari struktur atom yang tersusun tidak teratur. Hasil sintesis dengan metode *hydrothermal* cenderung menunjukkan pola difraksi kristal karena karbonisasi berlangsung di dalam *autoclave* pada suhu dan tekanan tinggi dalam periode waktu lebih lama

sehingga pembentukan partikel lebih terkontrol (Turdini *et al.*, 2025).

CDs kulit nanas yang disintesis dengan metode *hydrothermal* berukuran 5,53 nm, lebih kecil dibandingkan dengan CDs yang disintesis dengan metode *microwave* yakni 9,76 nm. Penelitian sebelumnya juga melaporkan CDs kulit nanas yang disintesis dengan metode *hydrothermal* memiliki ukuran lebih kecil yakni 2,1 nm (Vandarkuzhali *et al.*, 2018). CDs belimbing wuluh yang disintesis dengan metode *hydrothermal* maupun *microwave* menunjukkan persebaran ukuran yang lebih merata dibandingkan CDs kulit nanas, masing-masing berukuran 8,80 dan 5,59 nm. Material dengan ukuran lebih kecil memiliki rasio luas permukaan terhadap volume lebih tinggi, sehingga reaktivitas dan interaksi antar molekul meningkat. Partikel yang lebih kecil cenderung memiliki kemampuan penetrasi lebih baik ke permukaan sel dan meningkatkan efisiensi kontak dengan partikel target.



Gambar 4. Morfologi dan pola difraksi kristal CDs diamati dengan HR-TEM. CDs kulit nanas (a) dan belimbing wuluh (b) yang disintesis dengan metode *microwave*, dan CDs kulit nanas (c) dan belimbing wuluh (d) yang disintesis dengan metode *hydrothermal*.

Potensi Aktivitas CDs sebagai Antivirus

CDs yang telah disintesis dan dikarakterisasi, kemudian diuji potensinya sebagai antivirus terhadap *Tobacco mosaic virus* (TMV) pada tanaman indikator *C. amaranticolor*. Aplikasi semprot daun CDs pada 24 jam sebelum maupun sesudah inokulasi TMV mampu menunda masa inkubasi sehari lebih lama

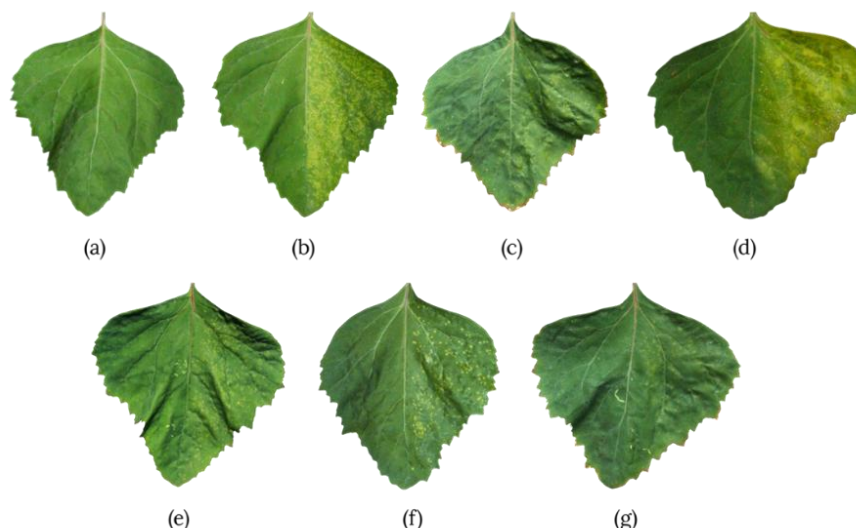
dibandingkan daun kontrol sakit tanpa CDs (Tabel 1). Gejala infeksi TMV pada daun *C. amaranticolor* diawali lesio lokal klorotik dan berubah menjadi lesio lokal nekrotik. Makin tinggi konsentrasi CDs, jumlah LLN makin sedikit; pada konsentrasi tertinggi gejala berupa *pin point* (Gambar 5).

Jumlah LLN pada tanaman perlakuan CDs terdeteksi secara nyata lebih sedikit dibandingkan LLN pada tanaman kontrol sakit tanpa perlakuan. Perlakuan CDs baik sebelum atau setelah inokulasi TMV, secara nyata menghambat gejala LLN dibandingkan kontrol sakit tanpa perlakuan, dengan tingkat hambatan relatif berkisar 31%–91% bergantung jenis CDs dan konsentrasi. Pada konsentrasi 100 dan 200 ppm, aplikasi semprot CDs tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan antarjenis CDs, namun mampu menekan LLN mencapai 71% (Tabel 2). Kedua CDs menunjukkan kemampuan menekan LLN lebih baik dibandingkan aplikasi semprot kontrol CDs asam askorbat.

Tabel 1. Masa inkubasi gejala lesio lokal nekrotik pada daun *C. amaranticolor* kontrol dan perlakuan CDs

Konsentrasi (ppm)	Masa inkubasi (hari setelah inokulasi)			
	100	200	300	400
Kontrol sehat	-	-	-	-
Kontrol sakit	2,6 a	2,6 a	2,6 a	2,6 a
Penyemprotan CDs sebelum inokulasi TMV				
Mic Kulit nanas	3,2 bc	3,6 b	3,4 b	3,2 b
Mic Wuluh	3,0 abc	3,4 b	3,1 b	3,5 b
Hyd Kulit nanas	3,7 b	3,6 b	3,7 b	3,1 b
Hyd Wuluh	3,4 bc	3,5 b	3,5 b	3,5 b
Hyd Asam askorbat	3,5 bc	3,6 b	3,2 b	3,6 b
Penyemprotan CDs sesudah inokulasi TMV				
Mic Kulit nanas	3,6 bc	3,7 b	3,6 b	3,3 b
Mic Wuluh	2,9 ac	3,7 b	3,5 b	3,3 b
Hyd Kulit nanas	3,3 bc	3,4 b	3,3 b	3,4 b
Hyd Wuluh	2,9 ac	3,1 ab	3,4 b	3,6 b
Hyd Asam askorbat	3,4 bc	3,6 b	3,4 b	3,2 b

Keterangan: Angka-angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda nyata pada uji *Kruskal-Wallis* dengan uji lanjut *Dunn* pada taraf 5%. Mic = Microwave, Hyd = Hydrothermal.



Gambar 5. Gejala lesio lokal nekrotik oleh TMV pada daun *Chenopodium amaranticolor*. Kontrol sehat (a), kontrol sakit (b), CDs asam askorbat (c), 100 ppm (d), CDs 200 ppm (e), CDs 300 ppm (f), dan CDs 400 ppm (g).

Berdasarkan tingkat hambatan relatif (THR) (Tabel 2). Namun, CDs asam askorbat, pada LLN, aplikasi semprot CDs sebelum inokulasi TMV menunjukkan penekanan tertinggi mencapai 91% dan aplikasi semprot sesudahnya mencapai 87% konsentrasi 400 ppm baik perlakuan sebelum atau sesudah inokulasi TMV, CDs kulit nanas (*microwave*, *hydrothermal*) dan CDs belimbing wuluh

(*hydrothermal*) setelah inokulasi TMV menunjukkan keefektifan tinggi dan tidak berbeda nyata. Kemampuan penekanan LLN baik pada sebelum maupun sesudah inokulasi TMV mengindikasikan bahwa potensi CDs bersifat sebagai penginduksi ketahanan tanaman dan bersifat antivirus. Penekanan LLN pada aplikasi semprot sebelum inokulasi virus menunjukkan potensi CDs mampu meningkatkan resistensi tanaman melalui *induced systemic resistance* atau *priming*. Sebaliknya, penekanan LLN pada aplikasi semprot Cu₂O-NP sesudah inokulasi virus menunjukkan bersifat antivirus yang merusak partikel TMV (Putri *et al.*, 2025).

Deteksi serologi daun *C. amaranticolor* dengan antiserum spesifik TMV pada daun perlakuan 5 hari setelah perlakuan CDs menunjukkan nilai absorbansi

ELISA (NAE) lebih rendah dibandingkan dengan kontrol terinfeksi TMV tanpa perlakuan CDs. Perlakuan penyemprotan sebelum inokulasi TMV menunjukkan NAE rata-rata berkisar 0,126–0,205 dan NAE rata-rata 0,125–0,194 pada perlakuan CDs setelah inokulasi TMV. Titer TMV antarperlakuan CDs baik sebelum atau sesudah inokulasi TMV dan kontrol sehat menunjukkan NAE yang tidak berbeda nyata; TMV terdeteksi negatif. Kontrol terinfeksi TMV tanpa perlakuan CDs menunjukkan TMV terdeteksi positif dengan rata-rata NAE 0,267 dan kontrol sehat dengan rata-rata NAE 0,122 (data tabel tidak ditampilkan). Hal ini mengindikasikan bahwa penyemprotan CDs mampu menekan virus nyata lebih rendah dibandingkan kontrol terinfeksi TMV tanpa CDs baik pada perlakuan penyemprotan CDs sebelum dan sesudah inokulasi TMV.

Tabel 2. Jumlah lesio lokal nekrotik pada daun *C. amaranticolor* kontrol dan Perlakuan CDs

Konsentrasi (ppm)	Jumlah LLN				Tingkat hambatan relatif LLN (%)			
	100	200	300	400	100	200	300	400
Kontrol sehat	0 c	0 c	0 f	0 f	100 a	100 a	100 a	100 a
Kontrol sakit	339 a	359 a	339 a	339 a	0 c	0 d	0 e	0 e
Penyemprotan CDs sebelum inokulasi TMV								
Mic Kulit nanas	182 b	106 b	79 cd	39 de	46 b	69 bc	77 c	88 bc
Mic Wuluh	204 b	150 b	97 bc	31 e	40 b	56 bc	71 cd	91 b
Hyd Kulit nanas	194 b	97 b	85 c	51 bcd	43 b	71 b	75 c	85 cd
Hyd Wuluh	233 b	127 b	125 b	34 de	31 b	62 bc	63 d	90 b
Hyd Asam askorbat	228 b	116 b	72 cde	59 bc	33 b	66 bc	79 bc	83 d
Penyemprotan CDs sesudah inokulasi TMV								
Mic Kulit nanas	198 b	119 b	47 de	63 b	42 b	65 bc	86 b	81 d
Mic Wuluh	199 b	140 b	46 e	43 cde	41 b	59 bc	86 b	87 bc
Hyd Kulit nanas	202 b	136 b	72 cde	62 b	41 b	60 bc	79 bc	82 d
Hyd Wuluh	196 b	153 b	90 c	61 b	42 b	55 c	73 c	82 d
Hyd Asam askorbat	221 b	142 b	89 c	65 b	35 b	58 bc	74 c	81 d

Keterangan: Angka-angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda nyata berdasarkan Anova dengan uji lanjut Tukey pada taraf 5%. LLN = Lesio lokal nekrotik, Mic = Microwave, Hyd = Hydrothermal.

Potensi CDs dari *ethylenediamine* dan *cysteine* sebagai *capping agent* terhadap infeksi *Cotton leaf curl Multan virus* menunjukkan terjadinya peningkatan ekspresi gen imunitas *calmodulin-dependent protein kinase* (CaMK), *mitogen-activated protein kinase* (MAPK), serta *serine/thionine protein kinase* (STPKs). CDs juga mengganggu replikasi virus melalui mekanisme *alternative splicing* pada regulasi pasca-transkripsi berupa hilangnya kode genetik CCAGCAG, sehingga terjadi *frameshift* atau pergeseran runutan asam amino. Pergeseran tersebut mengakibatkan terbentuknya *consensus* baru “EFRH” yang dapat menginduksi perubahan konformasi *heterogeneous*

nuclear ribonucleoproteins (hnRNP) dalam mekanisme pertahanan tanaman terhadap virus (Farooq *et al.*, 2025). Efek antivirus CDs dari ampas tebu terhadap SARS-CoV-2 dan *Herpes simplex virus-1* dilaporkan terjadi pada tahap awal infeksi, karena gugus CDs yang bermuatan positif membentuk ikatan elektrostatis dengan permukaan virus, sehingga penempelan dan masuknya virus terhambat (Tohamy *et al.*, 2025). Kajian potensi CDs berbasis bahan tanaman untuk mengendalikan virus dan kutu daun masih baru dilakukan dalam penelitian ini. Mekanisme terkait enzim pertahanan yang terlibat dan jalur pergerakan CDs dalam jaringan tanaman belum dapat diperoleh dari

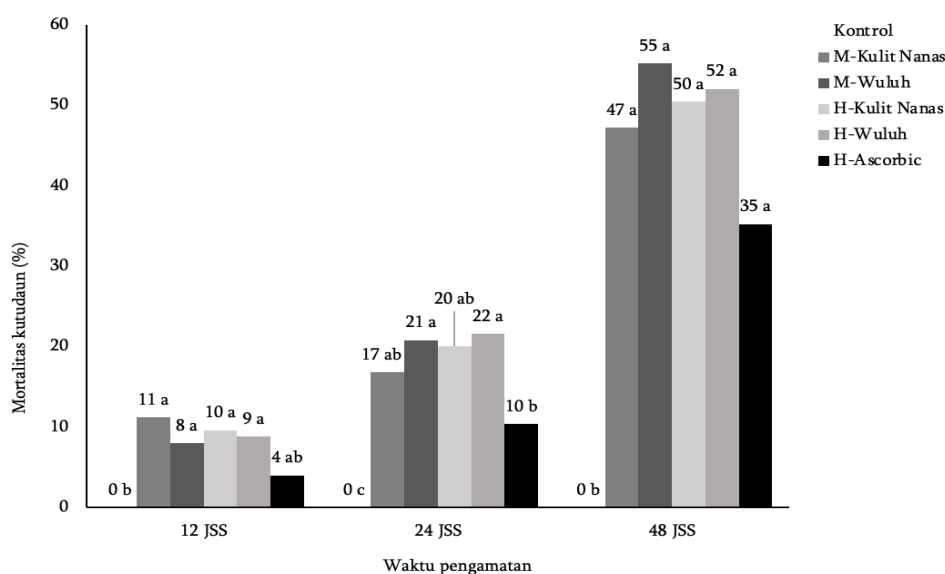
tanaman indikator yang bergejala lokal, selain data kemampuannya menekan TMV secara kuantitatif dan cara aplikasi berdasarkan jumlah LLN yang muncul. Penelitian lebih lanjut pada tanaman inang alami virus akan dilakukan selanjutnya untuk mengungkap mekanisme kedua CDs dalam mengendalikan TMV, dan virus-virus lainnya yang ditularkan oleh kutu daun.

Potensi Aktivitas CDs sebagai Nanobio-insektisida

Kutu daun yang diperoleh dari lapangan merupakan *A. gossypii* dengan bentuk tubuh membulat, tungkai panjang dan ramping, sepasang antena tegak, serta warna tubuh beragam dari kuning kehijauan hingga hijau kehitaman. Secara mikroskopis, *A. gossypii* menunjukkan ciri morfologi

yang khas yakni sepasang kornikel dan kauda pada ujung abdomen (data tidak ditampilkan). Kutu daun merupakan hama penting bersifat polifag pada berbagai tanaman dan berperan sebagai serangga vektor pada berbagai virus tumbuhan (Whitfield *et al.*, 2015), khususnya dari kelompok virus terbesar dari *Potyvirus*.

Aplikasi semprot langsung CDs pada kutu daun *A. gossypii* mampu menyebabkan mortalitas berkisar 35%–55% pada pengamatan 48 JSS (Gambar 6). Mortalitas tersebut masih lebih rendah dibandingkan insektisida komersial umumnya, namun telah menunjukkan adanya potensi sebagai bioinsektisida. Oleh karena itu, pengembangan sintesis CDs melalui *dopping* perlu dilakukan untuk meningkatkan keefektifannya.



Gambar 6. Efek insektisidal CDs terhadap kutu daun *A. gossypii*. JSS-jam setelah perlakuan semprot

Kulit nanas dan belimbing wuluh mengandung senyawa bioaktif bromelin, tanin, oxalat, pitat, saponin, polifenol, dan flavonoid (Husniah & Gunata, 2000; Insan *et al.*, 2019). Konsentrasi flavonoid yang tinggi dapat mengakibatkan kematian pada serangga hama, sehingga banyak dimanfaatkan sebagai biopestisida. Secara umum, senyawa yang menempel akan masuk melalui pori-pori tubuh kemudian menyebar ke seluruh tubuh dan mengakibatkan rusaknya aktivitas serangga (Yusup dkk., 2022).

Senyawa bioaktif dalam bentuk nanomaterial dapat mengakibatkan gangguan pada metabolisme protein dan pertahanan sel larva yang ditunjukkan dengan terbentuknya ikatan ligan pada reseptor *olfactory*, β -pinene, dan 1-phellandrene (Maritza &

Gozali, 2026). Setelah menjadi CDs, bukan senyawa bioaktif yang berperan menyebabkan mortalitas kutu daun, namun CDs dengan ukurannya < 10 nm memungkinkan terjadinya interaksi langsung antara CDs dengan membran sel serangga, sehingga kerusakan terjadi lebih cepat. CDs kulit nanas dan CDs belimbing wuluh tidak menunjukkan perbedaan yang nyata terhadap CDs asam askorbat sebagai pembanding. Hal ini dikarenakan masing-masing CDs memiliki gugus fungsi yang sama, sehingga aktivitas biologis yang terbentuk relatif sama. Namun, perlakuan CDs menunjukkan keefektifan nyata lebih tinggi menyebabkan mortalitas kutu daun dibandingkan kontrol tanpa perlakuan.

SIMPULAN

Carbon dots (CDs) berhasil disintesis dari biomassa kulit nanas dan belimbing wuluh berukuran <10 nm dengan karakter optik dan gugus fungsional yang khas sebagai CDs. Aplikasi semprot CDs menunjukkan potensinya sebagai penginduksi ketahanan, memiliki aktivitas antivirus dan nanobioinsektisida dalam pengelolaan virus tumbuhan dan kutu daun vektor yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Kajian terkait mekanisme CDs dalam mengendalikan virus dan kutu daun pada inang alami perlu dikaji lebih mendalam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian didanai dari hibah penelitian skema Pendidikan Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU), Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi dengan SK No. 0419/C3/DT.05.00/2025, Surat Perjanjian No. 006/C3/DT.05.00/PL/2025 dan nomor sub-kontrak 23203/IT3.D10/PT.01.03/P/B/2025 atas nama TAD untuk mendanai penelitian ZH.

DAFTAR PUSTAKA

- Anikina, I, A Kamarova, K Issayeva, S Issakhanova, N Mustafayeva, M Insebayeva, A Mukhamedzhanova, SM Khan, Z Ahmad, LH Lho, H Han, and A Raposo. 2023. Plant protection from virus: a review of different approaches. *Frontiers in Plant Science*. 14:1–2. DOI: doi.org/10.3389/fpls.2023.1163270.
- Arridho, S. 2025. Priming Nanopartikel Perak (AgNPs) untuk Peningkatan Produksi dan Mutu Benih Kedelai pada Cekaman Biotik dan Abiotik [disertasi]. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Blackman, RL, and VP Eastop. 2000. *Aphids on the World's Crops: An Identification and Information Guide*. Wiley. London.
- Cahyati, I, TA Damayanti, dan S Santoso. 2023. Kombinasi tanaman penghalang, kitosan, dan ekstrak daun bugenvil untuk pengelolaan virus pada tanaman kedelai. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*. 19(4):166–175. DOI: doi.org/10.14692/jfi.19.4.166-175.
- Coates, J. 2000. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. In: Meyers RA. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Chichester: John Wiley & Sons. 10815-10837 pp.
- Damayanti, TA, and F Kurniawati. 2022. *Pepper mild mottle virus* infection in cayenne and sweet pepper in Indonesia. *Australasian Plant Disease Notes*. 17:4. DOI: doi.org/10.1007/s13314-022-00451-5.
- Damayanti, TA, M Rahmatilah, Listihani, SH Hidayat, and SH Wiyono, S. 2021. *Cucurbit aphid-borne yellows virus* (CABYV) infecting melon and bitter melon in Java, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 948. doi:10.1088/1755-1315/948/1/012023.
- Damayanti, TA, I Sholihah, Listihani, SH Hidayat, and S Wiyono. 2019. New natural host of *Tobacco mosaic virus* on three cucurbits in Java, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 468. DOI: doi.org/10.1088/1755-1315/468/1/012034.
- Damayanti, TA, OJ Alabi, RA Naidu, and A Rauf. 2009. Severe outbreak of a yellow mosaic disease on the yard long bean in Bogor, West Java. *Hayati Journal of Biosciences*. 16(2): 78–82. https://doi.org/10.4308/hjb.16.2.78
- Damayanti, TA, T Nurjannah, Listihani, SH Hidayat, and S Wiyono. 2022. Characterization of a variant isolate of *Zucchini yellow mosaic virus* infecting green kabocha (*Cucurbita maxima* L.) in Bogor, Indonesia. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*. 55(11):121–128. DOI: doi.org/10.1080/03235408.2021.2003604.
- El Gamal, AY, MM Atia, T El Sayed, MI Abou-Zaid, and MR Tohamy. 2022. Antiviral activity of chitosan nanoparticles for controlling plant-infecting viruses. *South African Journal of Science*. 118(1/2). DOI: doi.org/10.17159/sajs.2022/10693.
- Farooq, T, MD Hussain, D Liu, A Kamran, Z He, Y Tang, and Y She. 2025. Nanoscale carbon quantum dots activated antiviral immune responses and modulated the heterogeneous nuclear ribonucleoprotein interface by inducing differential alternative splicing. *Biochemistry and Physiology*. 212:106452. DOI: doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106452.
- Farooq, T, MD Hussain, Y Wang, A Kamran, M Umar, Y Tang, Z He, and X She. 2024. Enhanced antiviral defense against begomoviral infection in *Nicotiana*

- benthamiana* through strategic utilization of fluorescent carbon quantum dots to activate plant immunity. *Journal of Nanobiotechnology*. 22:707–730. DOI: doi.org/10.1186/s12951-024-02994-4.
- Husniah, I, dan AF Gunata. 2020. Ekstrak kulit nanas sebagai antibakteri. *Jurnal Penelitian Perawat Profesional*. 2:85–90. DOI: https://doi.org/10.37287/jppp.v2i1.51
- Insan, RR, A Faridah, A Yulastri, and R Holinesti. 2019. Using belimbing wuluh (*Averhoa blimbi* L.) as a functional food processing product. *Jurnal Pendidikan Tata Boga dan Teknologi*. 1:47–55. DOI: 10.24036/jptbt.v1i1.7
- Islami, NF, TA Damayanti, S Santoso, dan Akhiruddin. 2024. Nanopartikel kitosan dan ekstrak daun bugenvil: karakterisasi dan aplikasinya untuk mengendalikannya *Bean common mosaic virus* strain *Blackeye Cowpea*. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*. 20:88–100. DOI: doi.org/10.14692/jfi.20.2.88-100.
- Isnaeni, I Rahmawati, R Intan, and M Zakaria. 2018. Photoluminescence study of carbon dots from ginger and galangal herbs using microwave technique. *Journal of Physics*. 985:1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/985/1/012004
- Joo, VS, TG Ramasamy, R Murugan, and ZS Haidar. 2010. Nanoncology: a state-of-art update. *Journal of Bionanoscience*. 4:1–13. https://doi.org/10.1166/jbns.2010.1034
- Kasim, NN, TA Damayanti, SH Hidayat, and S Santoso. 2024. The effectiveness of integrated management packages in controlling aphid-borne virus infections on groundnut in South Sulawesi, Indonesia. *Agrivita Journal of Agricultural Science*. 46:303–319. DOI: doi.org/10.17503/agrivita.v46i2.4320.
- Kostik, V. 2014. Determination of pesticide residues in plant-based foods from the Republic of Macedonia. *Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2:124–129. DOI: doi.org/10.11648/j.jfns.
- Lantos, E, R Krämer, KR Richert-Pöggeler, E Maiss, J König, and T Nothnagel. 2023. Host range and molecular and ultrastructural analyses of *Asparagus virus 1* pathotypes isolated from garden asparagus *Asparagus officinalis* L. *Frontiers in Plant Science*. 14:1187563. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1187563
- Listihani, SH Hidayat, S Wiyono, and TA Damayanti. 2018. First report of *Tobacco Mosaic Virus* on cucumber [*Cucumis sativus* (L.)] in Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 197:012043. DOI: doi.org/10.1088/1755-1315/197/1/012043.
- Lu J, R Li, and Yang B. 2020. Carbon dots: a new type of carbon-based nanomaterial with wide applications. *ACS Central Science*. 6(12):2179–2195. DOI: doi.org/10.1021/acscentsci.0c01306.
- Lu, S, Z Li, X Fu, Z Xie, and M Zheng. 2021. Carbon dots-based fluorescence and UV–vis absorption dual-modal sensors for Ag⁺ and l-cysteine detection. *Dyes and Pigments*. 187:109126.
- Maritza, RA, dan IN Gozali. 2026. Sintesis nanopartikel (AgNPs) ekstrak adas pagar berbasis proteomik sebagai larvasida nyamuk *Aedes aegypti*. *Jurnal Cendekia Jenius*. 3(2).
- Nalwi, R, A Maddu, M Kurniati, dan J Jumardin. 2023. Analisis sifat optik nano partikel karbon berbahan daun pandan wangi (*Pandanus amaryllifolius*) dengan metode sintesis hidrotermal. *Journal Online of Physics*. 8:58–69. DOI: doi.org/10.22437/jop.v8i3.26728.
- Neikov, OD, and NA Yefinov. 2019. Nanopowders. In *Handbook of Non-Ferrous metal Powder; Technologies and Applications*. 2nd Edition. Neikov OD, SS Naboychenko dan NA Yefinov ScienceDirect. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100543-9.00009-9.
- Noveriza, R, G Suastika, SH Hidayat, dan U Kartosuwondo. 2012. Penularan *Potyvirus* penyebab penyakit mosaik pada tanaman nilam melalui vektor *Aphis gossypii*. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*. 8: 65–72. DOI: doi.org/10.14692/jfi.8.3.65.
- Ozyurt, D, M Al Kobaisi, RK Hocking, and B Fox. 2023. Properties, synthesis, and applications of carbon dots: A review. *Carbon Trends*. 12:100276. DOI: doi.org/10.1016/j.cartre.2023.100276.
- Purnamawati, I, TA Damayanti, dan Giyanto. 2019. Potensi bakteri agens hayati untuk menekan infeksi *Cucumber mosaic virus* (CMV) pada

- melon (*Cucumis melo* L.). Jurnal Agroekoteknologi. 12: 94–101. DOI: doi.org/10.21107/agrovigor.v12i2.5834.
- Putri, HR, A Maddu, S Nurulita, F Kurniawati, and TA Damayanti. 2024. Green synthesis of Cu₂O nanoparticles: characterization and application to control *Tobacco mosaic virus* infection. Journal of General Plant Pathology. 91:51–61. DOI: doi.org/10.1007/s10327-024-01206-z.
- Putri, MM, and TA Damayanti, 2020. Utilization of plant extracts to suppress *Squash mosaic virus* infection on ridged gourd (*Luffa acutangula* [L.Roxb]). Journal of Tropical Plant Pests and Diseases 20:108–115. DOI: doi.org/10.23960/jhptt.220108-115.
- Rao, GP, and MG Reddy. 2020. Overview of yield losses due to plant viruses. Applied Plant Virology. Elsevier. 531–562 pp.
- Salsabilla, SU, DH Kusumawati, dan F Fitriana. 2024. Karakteristik *carbon dots* (C-dots) dari buah jeruk mandarin (*Citrus reticulata*) yang disintesis menggunakan metode hidrotermal. Jurnal Inovasi Fisika Indonesia. 13:60–73. DOI: doi.org/10.26740/ifi.v13n3.p60-73.
- Tohamy, H-AS, M El-Sakhawy, SA Al-Daim, and AN El Taweel. 2025. Antiviral potential of sugarcane bagasse-derived carbon quantum dots against SARS-CoV-2, and herpes simplex virus-1. Discover Applied Sciences. 7:1420. DOI: doi.org/10.1007/s42452-025-07836-y.
- Turdini, S, D Mulyadi, dan LM Yuningsih. 2025. Hydrothermal synthesis of carbon dots derived from biomass: a simple and sustainable approach. Jurnal Biologi Tropis. 25(3). DOI: 10.29303/jbt.v25i3.9842
- Vandarkuzhali, SAA, S Natarajan, S Jeyabalan, G Sivaraman, S Singaravadivel, S Muthusubramanian, and B Viswanathan. 2018. Pineapple peel-derived carbon dots: applications as sensor, molecular keypad lock, and memory device. ACS Omega. 3: 12584–12592. DOI: doi.org/10.1021/acsomega.8b01146.
- Whitfield, AE, BW Falk, and D Rotenberg. 2015. Insect vector-mediated transmission of plant viruses. Virology. 479:278–289. DOI: doi.org/10.1016/j.virol.2015.03.026.
- Yuniarti, E, and A Nurlaela. 2023. Synthesis and characterization of optical properties of carbon quantum dots (CQD) based on mustard green (*Brassica juncea* L) leaf with urea addition. Jurnal Kimia Valensi. 9:253–260. DOI: doi.org/10.15408/jkv.v9i2.34164.
- Yusup, IR, D Kurniawan, DR Julianti, L Fakhriah, dan LN Awalliyah, 2022. Biopestisida dari ekstrak dedaunan untuk membasmi hama tanaman di Jawa Barat. Jurnal Ilmiah Ilmu Pertanian. 5:24–29. DOI: doi.org/10.33096/agrotek.v5i2.164.