

STUDI KOMPARASI SERAPAN DAN GUGUS FUNGSI DARI CARBON NANO DOTS (CNDs) TERDOPING FeCl_3 DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT (TKKS)

¹⁾Ima Putriana, ²⁾Nailul Hasan, ^{3)*}Nur Aini Fauziyah

¹⁾ Prodi Fisika, Fakultas Teknik & Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur email: 22037010004@student.upnjatim.ac.id

²⁾ Prodi Fisika, Fakultas Teknik & Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur email: nailul.hasan.fisika@upnjatim.ac.id

^{3)*} Prodi Fisika, Fakultas Teknik & Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur email: nur.aini.fisika@upnjatim.ac.id

Abstrak

Carbon Nano Dots (CNDs) merupakan material nanokarbon yang memiliki ukuran <10 nm yang memiliki sifat optik menarik serta memiliki potensi pada berbagai bidang seperti sensor dan bioimaging. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis CNDs dari limbah biomassa Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan kulit semangka menggunakan metode microwave dengan penambahan urea sebagai agen pasivasi nitrogen serta penambahan FeCl_3 sebagai modifikasi permukaan untuk mempengaruhi sifat material optik. Karakterisasi dilakukan menggunakan UV-Vis dan *Fourier Transform Inframerah* (FTIR). Hasil UV-Vis menunjukkan puncak serapan pada rentang 290 – 300 nm yang berkaitan dengan transisi $\pi - \pi^*$ dari somain karbon sp^2 terkonjugasi. Sampel berbasis kulit semangka menunjukkan intensitas serapan yang lebih tinggi dibandingkan TKKS yang mengindikasikan pembentukan domain karbon yang lebih baik. Analisis FTIR identifikasi gugus fungsi O-H, C=C, dan Fe-O, serta pita baru pada $400\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ yang mengonfirmasi keberhasilan doping FeCl_3 . Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa biomassa dapat dimanfaatkan sebagai prekursor ramah lingkungan untuk sintesis CNDs dan modifikasi menggunakan urea serta FeCl_3 yang berpotensi mempengaruhi struktur permukaan dan respon material optik.

Kata Kunci: *Carbon Nano Dots*, TKKS, Kulit Semangka, FeCl_3 , Bioimaging

Abstract

Carbon Nano Dots (CNDs) are carbon nanomaterials with a size <10 nm that possess interesting optical properties and have potential in various fields such as sensors and bioimaging. This research aims to synthesize Carbon Nano Dots (CNDs) from the biomass of Empty Fruit Bunches of Oil Palm (TKKS) and watermelon rind using the microwave method with the addition of urea as a nitrogen passivation agent and the addition FeCl_3 as a surface modifier to influence the optical properties of the material. Characterization was performed using UV-Vis and *Fourier Transform Infrared* (FTIR). The UV-Vis result showed an absorption peak in the range of 290 – 300 nm, which is related to the $\pi - \pi^*$ transition of conjugated sp^2 carbon domains. Watermelon rind-based samples showed higher absorption intensity compared to TKKS, indicating better formation of carbon domains. FTIR analysis identified functional groups O-H, C=C, and Fe-O, as well as a new band at $400\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ that confirmed the successful doping of FeCl_3 . The result of this study indicate that biomass can be utilized as an environmentally friendly precursor for the synthesis of CNDs and modified using urea and FeCl_3 , which has the potential to affect the surface structure and optical response of the material.

Keywords: *Carbon Nanoparticles*, TKKS, Watermelon Rind, FeCl_3 , Bioimaging

I. PENDAHULUAN

Perkembangan nanomaterial berbasis karbon menjadi pusat perhatian di beberapa dekade terakhir karena sifatnya yang unik sehingga mendukung pengaplikasiannya dalam beberapa aspek salah satunya pada biomedis dan teknologi [1]. Salah satu nanomaterial yang berkembang pesat adalah *Carbon Nano Dots* (CNDs), karena memiliki ukuran partikel yang sangat kecil yaitu <10 nm dan memiliki sifat fluoresensi yang tinggi, biokompabilitas baik, fotostabilitas, toksisitas rendah, dan stabilitas kimia yang baik [2]. Sejak pertama kali ditemukan pada tahun 2004 oleh Scrivens melalui pemurnian *single-walled carbon nanotube*.

Seiring perkembangan ilmu pengetahuan, CNDs terus dikembangkan karena sifat optiknya yang dapat dimodifikasi melalui rekayasa permukaan atau doping [3]. CNDs memiliki sifat yang berpotensi untuk dikembangkan menjadi material multifungsi [4]. Khususnya CNDs adalah sifat fluoresensi yang berpotensi memiliki kemampuan menyerap dalam bidang *bioimaging*, bio sensor, fotokatalis, hingga *drug delivery* [5]. Dalam konteks *bioimaging*, CNDs dapat menghasilkan warna fluoresensi yang lebih tinggi dibandingkan konvensional [6]. CNDs memiliki sifat yang unik dan ramah lingkungan seperti tidak mudah foto bleaching, serta mampu memvisualisasikan sel, jaringan hingga biomolekul secara *real time* [3].

Seiring perkembangan teknologi dan ilmu pengetahuan, CNDs dapat dibuat dari berbagai macam bahan salah satunya limbah biomassa sebagai sumber karbon [4]. Salah satu limbah yang dapat dijadikan bahan dasar CNDs adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang merupakan limbah legnoselulosa sehingga dapat dijadikan sumber karbon dalam pembuatan CNDs [7]. Selain limbah TKKS, limbah dari rumah tangga seperti kulit semangka juga dapat dijadikan sebagai sumber karbon karena mengandung selulosa, pektin, sirkulin, dan karotenoid (Gultom, 2024). Kandungan yang ada pada kulit semangka mendukung pembuatan CNDs dengan penambahan doping untuk memancarkan sebaran emisi yang dihasilkan [8].

Seiring dengan perkembangannya, metode-metode sintesis CNDs terus dikembangkan dan divariasikan dengan penambahan doping untuk menunjang hasilnya [9]. Metode sintesis CNDs dikategorikan menjadi 2 yaitu *top-down* dan *bottom-up*. Berbagai pendekatan teknik sintesis seperti solvothermal, *microwave*, hidrotermal, pirolisis, ultrasonikasi, oksidasi elektrokimia, dan oksidasi kimia [10]. Salah satu teknik yang sering digunakan adalah teknik *microwave* yang dinilai memiliki kecepatan reaksi yang efisiensi energi dan distribusi panas lebih merata [11]. Selain itu, teknik *microwave* lebih efektif karena dapat dilakukan pada skala laboratorium [12]. Pada penelitian terdahulu, hasil sintesis dari teknik *microwave* menunjukkan sifat fluoresensi yang baik serta memiliki potensi sebagai bahan material aplikasi *bioimaging* dengan variasi suhu pemanasan [13]. Namun, belum ada penelitian sintesis CNDs dengan penambahan urea sebagai bahan aditif dan FeCl_3 sebagai doping untuk menunjang sifat optik CNDs.

Pada penelitian sebelumnya telah melaporkan sintesis CNDs dari biomassa menggunakan metode hidrotermal maupun *microwave*, seperti dari tongkol jagung, kulit buah, dan limbah organik lainnya. Namun, sebagian besar penelitian hanya fokus pada satu jenis prekursor dan belum mengkaji secara komparatif pengaruh perbedaan komposisi biomassa terhadap karakter optik CNDs yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Hasan dkk tahun 2025, menyatakan bahwa potensi *Carbon Dots* berbasis biomassa yang di doping oleh nitrogen mencakup fungsionalisasi permukaan sehingga meningkatkan selektivitas [14]. Selain itu, studi

mengenai kombinasi pasivasi nitrogen menggunakan urea dan soping logam ion Fe^{3+} secara simultan pada CNDs berbasis TKKS dan kulit semangka masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kebaruan dalam aspek komperatif prekursor biomassa serta pendekatan modifikasi ganda (*nitrogen passivation* dan Fe-doping) untuk memahsmi mekanisme peningkatan sifat optik secara lebih sistematis. Berdasarkan urian tersebut, penelitian in difokuskan pada sintesis CNDs dari limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan kulit semangka menggunakan teknik *microwave* dengan penambahan urea dan didoping dengan FeCl_3 . Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan material *bioimaging* yang ekonomis, ramah lingkungan dan menjadi trobosan pengolahan limbah biomassa menjadi material bernilai tinggi.

II. METODE PENELITIAN

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini berfokus pada sintesis *Carbon Nano Dots* dari TKKS dan limbah kulit semangka dengan metode *microwave*. Metode *microwave* melibatkan pemanasan cepat dengan menggunakan gelombang mikro dalam rfeaktiv tertutup, sehingga dinilai dapat mempercepat proses karbonisasi dan pembentukan struktur nanodots dari bahan organik. Penelitian ini juga melibatkan penggunaan bahan aditif berupa urea dan doping dari *Iron III Chloride* (FeCl_3) pada proses sintesis yang bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas dan sifat optiknya. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan material CNDs yang memiliki sifat fluoresensi pdan potensi aplikasi material *bioimaging*.

B. Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mensintesis CNDs berbasis biomassa yaitu TKKS dan kulit semnagka, untuk mengkaji pengaruh variasi parameter sintesis terhadap karakterisasi material. Variasi dilakukan oada massa urea sebagai sumber nitrogen dengan massa 1 g dan 2 g dan konsentrasi FeCl_3 sebagai doping dengan konsentrasi 10^{-1} dan 10^{-3} . Sintesis dilakukan menggunakan metode *microwave* 450 Watt dengan waktu reaksi konstan selama 80 menit.

C. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini mellaui serangkaian atahapan proses sintesis dan karakterisasi material *Carbon Nano Dots* (CNDs) yang berbasis TKKS dan kulit semangka. Data dikumpulkan berupa data kuantitatif dari hasil karakterisasi menggunakan instrumen Spektrometer UV-Vis dan FTIR (*Fourier Transform Infared*). Data dikumpulkan melalui tahapan berikut:

1. Proses sintesis sampel

Sinteiss CNDs dilakukan menggunakan dua sumber biomassa, yaitu dari TKKS dan kulit semangka. Pada sampel TKKS, proses dimulai dengan karbonisasi menggunakan oven pada suhu 500°C selama 3 jam, kemudian dicuci dengan akuades. Setelah proses pencucian sanpel kemudian dikeringkan dengan menggunakan *hotplate* pada suhu 120°C , dan diayak hingga berukuran 300 mesh. Sementara itu, sampel kulit semangka diproses dengan pencucian, pemotongan, dan penghalusan dnegan cara di blender sampai menjadi jus. Setelah sampel jadi jus kulit semangka kemudian di saring dan di panaskan menggunakan *hoteplate* selama 40 menit. Setelah dipanaskan, larutan kemudian diriidiiasi menggunakan *microwave* pada 450W selama 20 menit, kemudian dikeringkan menggunakan oven 500°C selama 3 jam. Setelah di oven kemudian diayak hingga 300 mesh. Setelah kedua bahan telah menjadi serbuk, sebanyak 0,05 g serbuk dilarutkan dalam akuades

dan kembali diradiasi menggunakan *microwave* selama 80 menit dan di sentrifugasi pada 500 rpm selama 10 menit.

Tahap berikutnya, dilakukan penambahan urea sebagai bahan aditif dengan variasi massa 0-4 g yang dicampurkan dengan larutan sampel hingga mencapai volume 200 mL, kemudian diiridasi selama 80 menit dan kemudian di sentrifugasi. Selain bahan aditif, sampel juga ditambahkan doping berupa FeCl_3 dengan konsentrasi 10^{-1} mol, dan 10^{-3} mol, kemudian dicampurkan secara langsung dengan sampel CNDs sebagai tahap doping untuk meningkatkan sifat optik yang dimiliki CNDs.

2. Karakterisasi Sampel

Sampel yang telah disentrifugasi kemudian dikarakterisasi melalui karakterisasi Spektroskopi UV-Vis dan FTIR (*Fourier Transform Infrared*). Karakterisasi spektroskopi UV-Vis dilakukan untuk mengidentifikasi pembentukan struktur karbon konjugasi dan membandingkan kualitas optik antara sampel. Karakterisasi FTIR (*Fourier Transform Infrared*) dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi permukaan CNDs. Data FTIR ini dapat menentukan keberhasilan pembentukan gugus fungsi baru setelah penambahan urea dan doping FeCl_3 . Data yang di peroleh dari hasil karakterisasi kemudian di analisis secara sistematis menggunakan instrumen laboratorium agar informasi yang diperoleh akurat, valid dan dapat dianalisis sesuai tujuan.

3. Kode dan Komposisi Sampel

Untuk memudahkan pengenalan pada proses analisis dan karakterisasi, setiap sampel diberikan kode tertentu sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Kode Sampel dan Variasi Komposisi Sintesis CNDs Berbasis TKKS dan Kulit Semangka dengan Penambahan Urea dan Doping FeCl_3

Kode Sampel	Limbah Biomassa	Urea (g)	FeCl_3 (M)
TKKS	TKKS	-	-
TKKS-U	TKKS	V	-
TKKS-U-Fe	TKKS	V	-
KS	Kulit Semangka	-	-
KS-U	Kulit Semangka	V	-
KS-U-Fe	Kulit Semangka	V	V

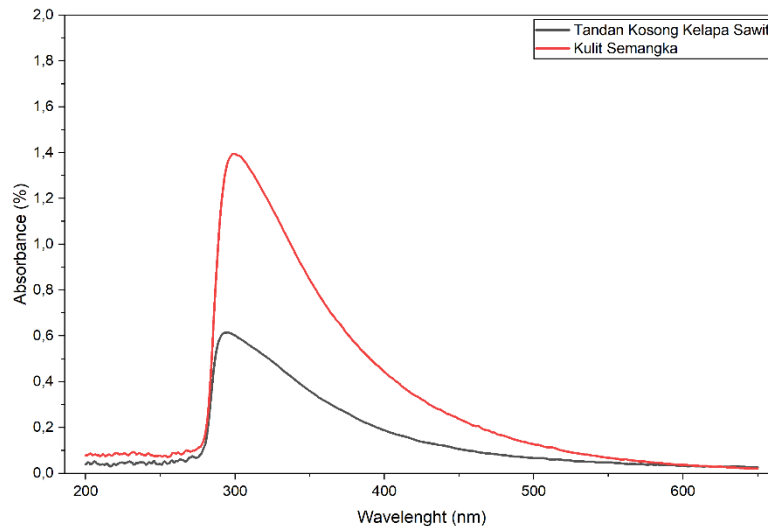
D. Teknik Pengolahan Data

Data hasil penelitian dianalisis secara deskriptif berdasarkan interpretasi spektrum UV-Vis dan FTIR dilakukan dengan membandingkan nilai λ_{max} dan intensitas absorbansi antar sampel untuk memulai pengaruh penambahan urea dan doping FeCl_3 , serta mengonfirmasi keberhasilan sintesis melalui kemunculan puncak transisi $\pi - \pi^*$ pada 290 – 300 nm. Analisis FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi permukaan dengan mengamati perubahan pita serapan pada jarak 3.200 – 3.500 cm^{-1} (O-H atau N-H), 1.600 – 1700 cm^{-1} (C=C), 1400 – 1500 cm^{-1} (C-N atau C-O), dan 500 – 700 cm^{-1} sebagai indikator pembentukan ikatan Fe-O. Seluruh data kemudian divalidasi dengan membandingkan sampel kontrol dan sampel termodifikasi untuk menilai efek aditif terhadap struktur kimia dan sifat optik. Kemudian data disajikan dalam bentuk grafik dan uraian interpretatif.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Hasil Spektroskopi UV-Vis

Analisis hasil spektroskopi UV-Vis dilakukan untuk mempelajari respon optik dan memastikan terbentuknya struktur karbon konjugasi pada sampel CNDs. Spektra yang diperoleh memberikan informasi mengenai transisi elektronik yang berkaitan dengan struktur dan kondisi permukaan material. Perbandingan profil spektra antar sampel digunakan untuk menilai pengaruh variasi prekursor, penambahan urea, dan doping FeCl_3 terhadap intensitas serapan dan posisi puncak serapan. Munculnya karakteristik puncak pada jarak panjang gelombang 200 – 600 nm yang menjadi indikator keberhasilan sintesis serta perubahan optik yang terjadi akibat komposisi material.

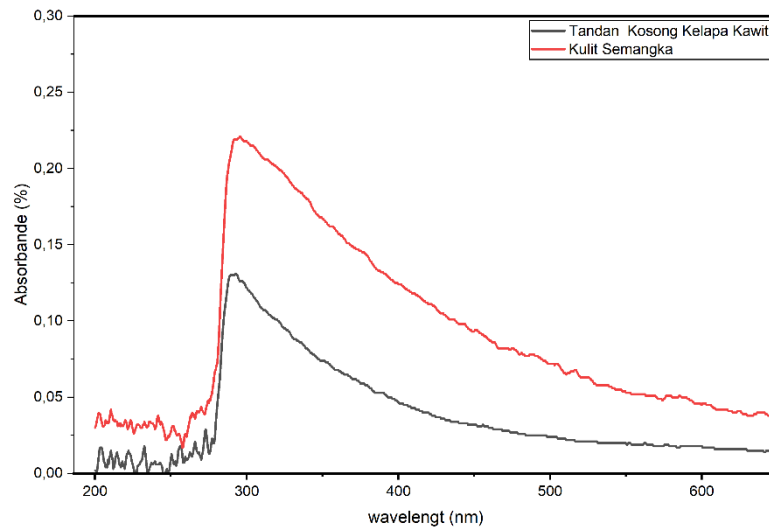


Gambar 1. Spektra UV-Vis Sampel TKKS dan KS

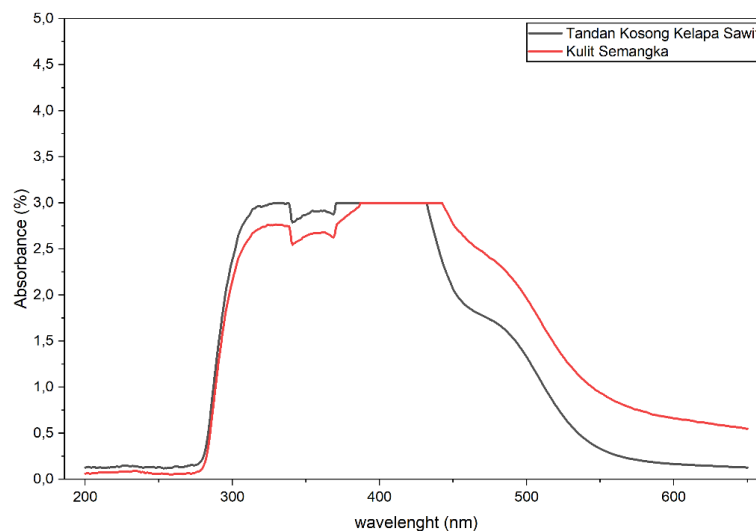
Berdasarkan **Gambar 1**. Spektra yang dihasilkan oleh sampel TKKS dan kulit semangka menunjukkan puncak absorpsi kuat pada panjang gelombang 290 – 300 nm, yang menunjukkan adanya indikasi transisi $\pi - \pi^*$ dari struktur yang terbentuk. Transisi $\pi - \pi^*$ mengonfirmasi bahwa sampel berhasil membentuk karbon [11]. CNDs dari kulit semangka memiliki intensitas absorpsi yang lebih tinggi serta ekor serapan yang lebih panjang dibandingkan CNDs dari TKKS. Fenomena ini mengindikasikan adanya fraksionasi sp^2 yang lebih dominan serta kontribusi yang lebih signifikan terhadap keadaan permukaan [15]. Perbedaan ini mengindikasikan CNDs dari kulit semangka memiliki kualitas optik lebih baik dan potensi fotoluminesensi yang lebih kuat dibandingkan CNDs dari TKKS [16].

Berdasarkan **Gambar 2** spektra UV-Vis yang dihasilkan dari sampel CNDs dari TKKS dan kulit semangka yang telah dicampurkan bahan aditif berupa urea dengan massa 2 g menghasilkan grafik yang menunjukkan bahwa kedua sampel tersebut memiliki puncak absorpsi pada 290 – 300 nm. Puncak absorpsi yang dihasilkan mengindikasikan transisi $\pi - \pi^*$ yang merupakan ciri khas CNDs telah berhasil terbentuk [17]. Puncak ini menegaskan bahwa urea memiliki peran dalam pasivasi permukaan melalui penyediaan gugus nitrogen, yang dapat meningkatkan delokalisasi elektron dan kestabilan struktur karbon [18]. Selain puncak utama, spektra menunjukkan adanya ekor serapan yang memanjang hingga 600 nm. Rentang serapan yang lebih luas menunjukkan bahwa kondisi permukaan atau transisi $n - \pi$ terjadi karena perubahan fungsi permukaan, yang dikaitkan dengan sifat fotoluminesensi. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan urea tidak

hanya mempengaruhi struktur inti karbon, tetapi juga meningkatkan kualitas permukaan sehingga menghasilkan respon optik dan kinerja CNDs yang lebih baik [19].



Gambar 2. Spektra UV-Vis Sampel TKKS-U2 dan KS-U2

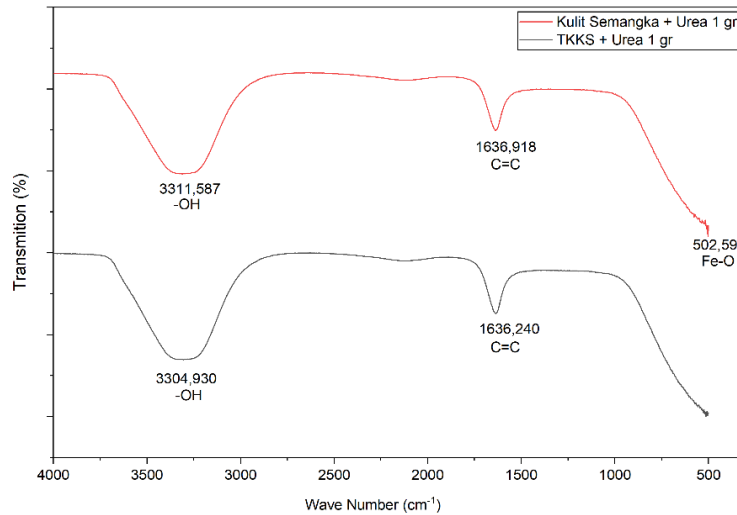


Gambar 3. Spektra UV-Vis Sampel TKKS-U2-Fe dan KS-U2-Fe

Berdasarkan **Gambar 3** spektra UV-Vis dari sampel yang telah ditambahkan doping berupa FeCl_3 dengan konsentrasi 10^{-1} menghasilkan transisi elektron $\pi - \pi^*$ pada panjang gelombang 250 - 300 nm sebagai karakterisasi terbentuknya struktur karbon terkonjugasi. Namun, CNDs dari kulit semangka menunjukkan penyerapan yang lebih tinggi serta rentang respon optik lebih luas dibandingkan TKKS, sehingga lebih potensial sebagai material bioimaging karena sifat optiknya kuat dan stabil [16]. Disamping itu, pada Gambar 3 merupakan sampel dengan perlakuan penambahan urea 2g dan doping FeCl_3 dengan konsentrasi 10^{-1} memiliki puncak absorbansi pada panjang gelombang 250 - 300 nm. Namun terdapat puncak yang hilang karena penambahan doping yang terlalu pekat. Peningkatan intensitas serapan setelah penambahan urea dan doping FeCl_3 dapat dijelaskan melalui mekanisme modifikasi struktur elektronik CNDs. Urea berperan sebagai sumber nitrogen yang dapat membentuk ikatan C-N dan N-H pada permukaan, sehingga meningkatkan densitas elektron dan menciptakan keadaan cacat permukaan baru [20]. Sementara itu, doping Fe^{3+}

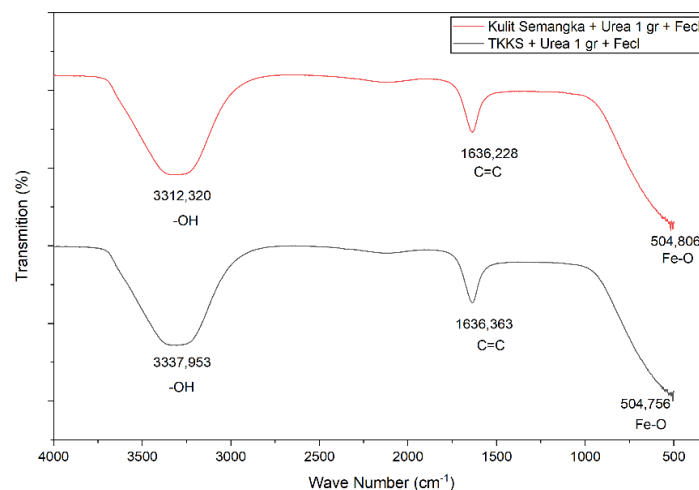
berpotensi berinteraksi dengan gugus oksigen pada permukaan CNDs, membentuk ikatan koordinasi Fe-O [21]. Interaksi ini dapat memodifikasi distribusi elektron π pada domain sp^2 terkonjugasi dan memperluas delokalisasi elektron. Namun pada konsentrasi doping yang terlalu tinggi, ion Fe^{3+} dapat bertindak sebagai pusat *quenching* yang menurunkan intensitas absorpsi akibat terjadinya rekombinasi non-radiatif [22].

B. Analisis Hasil FTIR



Gambar 4. Spektra FTIR Samepl TKKS-U1 dan KS-U1

Berdasarkan Gambar 4 spektrum FTIR karakterisasi puncak pada $3100 - 3400 \text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan bahwa adanya gugus fungsi O - H atau , serta gugus fungsi C = C pada puncak $1630 - 1690 \text{ cm}^{-1}$, dan Fe - O pada puncak $400 - 600 \text{ cm}^{-1}$. Berdasarkan Gambar 4, ikatan O - H TKKS menghasilkan puncak pada $3304,930 \text{ cm}^{-1}$ sedangkan untuk kulit semangka menghasilkan puncak pada $3311,587 \text{ cm}^{-1}$. Pada ikatan C = C untuk TKKS menghasilkan puncak $1636,240 \text{ cm}^{-1}$ sedangkan kulit semangka menghasilkan puncak $1636,918 \text{ cm}^{-1}$. Pada gugus fungsi Fe - O hanya tampak pada sampel kulit semangka dengan puncak yang diperoleh sebesar $502,598 \text{ cm}^{-1}$. Hasil ini telah terkonfirmasi terbentuknya Carbon Nano Dots (CNDs) dengan fungsional permukaan dari proses penambahan urea pada proses sintesis [7].



Gambar 5. Spektra FTIR Sampell TKKS-U1-Fe dan KS-U1-Fe

Gambar 5. Menunjukkan bahwa beberapa pita serapan khas yang mengindikasikan adanya gugus fungsi pada permukaan CNDs. Pada kedua sampel puncak lebar berada pada rentang $3100\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$, rentang ini mengidentifikasi bahwa terbentuknya gugus fungsi O – H. Hal ini menunjukkan adanya ikatan hidrogen dan kontribusi urea sebagai sumber nitrogen [23]. Berdasarkan Gambar 5, ikatan O – H TKKS menghasilkan puncak pada $3337,953\text{ cm}^{-1}$ sedangkan untuk kulit semangka menghasilkan puncak pada $3312,320\text{ cm}^{-1}$. Pada ikatan C = C untuk TKKS menghasilkan puncak $1636,363\text{ cm}^{-1}$ sedangkan kulit semangka menghasilkan puncak $1636,228\text{ cm}^{-1}$. Disamping itu, pita serapan muncul lagi pada puncak serapan $400\text{--}600\text{ cm}^{-1}$, yang mengidentifikasi adanya ikatan Fe – O. Pada TKKS menghasilkan puncak $504,756\text{ cm}^{-1}$ dan pada kulit semangka menghasilkan puncak $504,806\text{ cm}^{-1}$ yang membuktikan bahwa FeCl_3 berhasil terintegrasi ke dalam struktur CNDs. Secara keseluruhan, data FTIR menunjukkan bahwa proses sintesis menghasilkan CNDs dengan gugus fungsi aktif yang mengandung sifat hidrofilik dan kestabilan optik, dan interaksi biologi untuk aplikasi bioimaging [24].

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Penelitian ini berhasil mensintesis Carbon Nano Dots (CNDs) dengan bahan dasar limbah biomassa, yaitu Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan kulit semangka. Sintesis dilakukan dengan menggunakan microwave dengan penambahan bahan pasivasi yaitu urea dan FeCl_3 sebagai agen doping. Hasil UV-Vis menunjukkan puncak serapan pada rentang $290\text{--}300\text{ nm}$ yang mempresentasikan transisi $\pi - \pi^*$ sebagai indikator terbentuknya karbon terkonjugasi. Sampel dari kulit semangka menunjukkan daya serap yang lebih tinggi dibandingkan TKKS, hal ini menandakan bahwa kualitas optiknya lebih baik. Analisis FTIR mengidentifikasi gugus fungsi O-H atau N-H, C=O, dan C-O, serta pita baru pada $500\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ yang mengonfirmasi keberhasilan doping FeCl_3 melalui pembentukan ikatan Fe-O. Modifikasi permukaan menggunakan urea dan doping FeCl_3 meningkatkan jumlah gugus permukaan aktif, meningkatkan sifat hidrofilisitas, dan meningkatkan stabilitas optik material.

Penelitian ini tidak hanya menunjukkan keberhasilan sintesis CNDs berdasarkan biomassa TKKS dan kulit semangka, tetapi juga menjelaskan bahwa perbedaan komposisi prekursor secara signifikan mempengaruhi densitas domain sp^2 dan keadaan permukaan yang terbentuk. Modifikasi menggunakan urea sebagai sumber nitrogen dan doping Fe^{3+} terbukti berperan dalam mengubah struktur elektronik melalui pembentukan keadaan cacat dan interaksi koordinasi Fe-O yang berkontribusi terhadap peningkatan respon material optik. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi pada pemahaman mekanisme modifikasi ganda (pasivasi nitrogen dan doping ion logam) pada CNDs berbasis limbah biomassa sebagai strategi peningkatan sifat optik untuk aplikasi bioimaging.

B. Saran

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengoptimalkan sintesis parameter seperti *microwave*, waktu reaksi, dan pH agar diperoleh struktur CNDs yang lebih homogen dan stabil secara optik. Karakterisasi tambahan seperti TEM, PL, dan XRD juga perlu dilakukan untuk memperkuat struktur dan mekanisme emisi. Selain itu, uji aplikasi lebih lanjut pada bioimaging atau biosensing penting dilakukan untuk memvalidasi potensi implementasi yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kaur, P., & Verma, G. (2022). Converting fruit waste into carbon dots for bioimaging applications. *Materials Today Sustainability*, 18, 100137. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100137>
- [2] Cordova, A. G., Krishnaraj Rajkishore, S., Devadharshini, K. P., Moorthy, P. S., Reddy, V. S., Kalyan, K., Sunitha, R., Prasanthrajan, M., Maheswari, M., Subramanian, K. S., Sakthivel, N., & Sakrabani, R. (2023). *Novel Synthesis of Carbon Dots from Coconut Wastes and Its Potential as Water Disinfectant*. <https://doi.org/10.3390/su151410924>
- [3] Das, S., Mondal, S., & Ghosh, D. (2023b). Carbon quantum dots in bioimaging and biomedicines. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1333752. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1333752/XML>
- [4] Guo, L., Li, L., Wang, X., Zhang, Y., & Cui, F. (2023). Synthesis of pH-Sensitive Nitrogen-Doped Carbon Dots with Biological Imaging Function and Their Application in Cu²⁺ and Fe²⁺ Determination by Ratiometric Fluorescent Probes. *ACS Omega*, 8(40), 37098–37107. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.3C04596>
- [5] Jayasekhar Babu, P., Saranya, S., Singh, Y. D., Venkataswamy, M., Raichur, A. M., & Doble, M. (2021). Photoluminescence carbon nano dots for the conductivity based optical sensing of dopamine and bioimaging applications. *Optical Materials*, 117, 111120. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111120>
- [6] Kayani, K. F., Ghafoor, D., Mohammed, S. J., & Shatery, O. B. A. (2024). Carbon dots: synthesis, sensing mechanisms, and potential applications as promising materials for glucose sensors. *Nanoscale Advances*, 7(1), 42–59. <https://doi.org/10.1039/D4NA00763H>
- [7] Maslahat, M., Kamalia, E., & Arrisujaya, D. (2022). SINTESIS DAN KARAKTERISASI MIKRO PARTIKEL KARBON AKTIF TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT. *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*, 7(02). <http://dx.doi.org/10.23960%2Faec.v7i02.2022.p177-188Anal.Enviro.Chem>
- [8] Fatimah, S., Isnaeni, I., & Tahir, D. (2018). Sintesis dan Karakterisasi Fotoluminisens Carbon Dots Berbahan Dasar Organik dan Limbah Organik. *POSITRON*, 7(2), 37. <https://doi.org/10.26418/positron.v7i2.22660>
- [9] Rodwihok, C., Tam, T. Van, Choi, W. M., Suwannakaew, M., Woo, S. W., Wongratanaphisan, D., & Kim, H. S. (2022). Preparation and Characterization of Photoluminescent Graphene Quantum Dots from Watermelon Rind Waste for the Detection of Ferric Ions and Cellular Bio-Imaging Applications. *Nanomaterials* 2022, Vol. 12, Page 702, 12(4), 702. <https://doi.org/10.3390/NANO12040702>
- [10] Elugoke, S. E., Uwaya, G. E., Quadri, T. W., & Ebenso, E. E. (2024). Carbon Quantum Dots: Basics, Properties, and Fundamentals. In *ACS Symposium Series* (Vol. 1465, hal. 3–42). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2024-1465.ch001>
- [11] Prasasti, R. I., Jannah, R., Wati, A. N. B., Kusumandari, K., & Isnaeni, I. (2022). Synthesis of carbon dots based on corn cobs as heavy metal ion sensors using the microwave method. *Journal of Physics: Theories and Applications*, 6(2), 97–96. <https://doi.org/10.20961/jphystheor-appl.v6i2.59347>
- [12] Oktaviani, Z. N., Wahyuni, D., Nurhanisa, M., & Artikel, R. (n.d.). Sintesis Karbon Aktif dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Aktivator Gelombang Mikro dan Pengujian Kualitas Berdasarkan SNI 06-3730-1995 ARTICLE INFO ABSTRAK. <https://www.ejournal.unib.ac.id/index.php/nmj>
- [13] Ren, J., Opoku, H., Tang, S., Edman, L., & Wang, J. (2024). Carbon Dots: A Review with Focus on Sustainability. *Advanced Science*. <https://doi.org/10.1002/ADVS.202405472>
- [14] Hasan, M., Baheerathan, B., Sutradhar, S., Shahbandinejad, R., Rakshit, S., Kozinski, J., Li, D., Hu, Y., & Kang, K. (2025). Microwave-assisted synthesis of biomass-derived N-doped carbon dots for metal ion sensing. *Carbon Research*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s44246-025-00215-7>
- [15] Nidhisha, V., Gopal, R., Anjali, C., Amrutha, T. P., Arunima, K. K., Praveen, V. K., & Kizhakayil, R. N. (2024). *Nanoscale Advances probing solvent interactions* †. 1535–1547. <https://doi.org/10.1039/d3na00799e>
- [16] Sun, J., Ullah, M., Awan, U. A., Ali, H., Wahab, A., Khan, S. U., Naeem, M., Ruslin, M., Mustopa, A. Z., & Hasan, N. (2024). Carbon Dots: New Rising Stars in the Carbon Family for Diagnosis and Biomedical Applications. *Journal of Nanotheranostics* 2025, Vol. 6, Page 1, 6(1), 1. <https://doi.org/10.3390/JNT6010001>
- [17] Gultom, E. (2024). Sintesis Dan Karakterisasi Carbon Dots Dari Kulit Semangka Dengan Metode Hidrotermal. *CHEDS: Journal of Chemistry, Education, and Science*, 8(2). <https://doi.org/10.30743/cheds.v7i1.10223>
- [18] Prado, M. B., Truong, N. T., & Wanekaya, A. K. (2023). Improving the quantum yield of nitrogen-doped carbon dots by varying dopant ratios and pH. *Sensors and Actuators Reports*, 6, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2023.100165>
- [19] Yorozyua, H., Ashrafi, N. E., Sato, K., Islam, A., Fukae, R., Tagashira, Y., Iimori, T., Yorozyua, H., Ashrafi, N. E., Sato, K., Islam, A., Fukae, R., Tagashira, Y., & Iimori, T. (2025). Synthesis and Fluorescence Mechanism of Nitrogen-Doped

- Carbon Dots Utilizing Biopolymer and Urea. *Molecules* 2025, Vol. 30, 30(9). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES30092068>
- [20] Olla, C., Cappai, A., Porcu, S., Stagi, L., Fantauzzi, M., Casula, M. F., Mocci, F., Corpino, R., Chiriu, D., Ricci, P. C., & Carbonaro, C. M. (2023). Exploring the Impact of Nitrogen Doping on the Optical Properties of Carbon Dots Synthesized from Citric Acid. *Nanomaterials*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/nano13081344>
- [21] Chen, W., Cole, I., Ball, A. S., & Yin, H. (2025). Metal-Doped Carbon Dots as Heterogeneous Fenton Catalysts for the Decolourisation of Dyes – Activity Relationships and Mechanistic Insights. *C-Journal of Carbon Research*, 11(4), 1–31. <https://doi.org/10.3390/c11040087>
- [22] Ali, M. S., Bhunia, N., Ali, M. S., Karmakar, S., Mukherjee, P., & Chattopadhyay, D. (2023). Fluorescent N-doped carbon quantum dots: A selective detection of Fe^{3+} and understanding its mechanism. *Chemical Physics Letters*, 825, 140574. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2023.140574>
- [23] Hulupi, M., Sofiyani, N., Amalia Nuriana, R., Indarti, R., & Abdilah, F. (2022). Sintesis dan Karakterisasi Carbon Nanodots dengan Metode Microwave Assisted Extraction [Synthesis and Characterization of Carbon Nanodots with Microwave Assisted Extraction]. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 8(2), 120–126. <https://doi.org/10.22487/kovalen.2022.v8.i2.15910>
- [24] Sujana, G. A. P. P., Sumadiyasa, M., & Isnaeni, I. (2020). Sintesis Carbon Dot Dengan Bahan Dasar Asam Sitrat Menggunakan Metode Pemanasan Secara Berulang di Dalam Oven Microwave. *Buletin Fisika*, 22(1), 29. <https://doi.org/10.24843/bf.2021.v22.i01.p05>