

SINTESIS DAN KARAKTERISASI SENYAWA TURUNAN PORFIRIN BERBASIS EUGENOL MENGGUNAKAN *MICROWAVE-ASSISTED ORGANIC SYNTHESIS (MAOS)*

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF PORPHYRIN DERIVATIVE COMPOUNDS BASED ON EUGENOL USING MICROWAVE-ASSISTED ORGANIC SYNTHESIS (MAOS)

MUTIARA HUNafa¹, EMMY YUANITA², MARIA ULFA³

¹ Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram.
Jl. Majapahit, No. 62, Gomong, Kec. Selaparang, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat. 83115
*email: mutiarahunafa@gmail.com

Abstrak. Senyawa porfirin memiliki karakter sebagai pemeka cahaya (*sensitizer*) sehingga dapat berperan dalam berbagai bidang, yaitu *Photodynamic Therapy (PDT)* dan *Dye Synthesis Solar Cell (DSSC)*. Porfirin dan turunannya dapat disintesis menggunakan senyawa prekursor pirol, aldehid dan katalis asam. Sintesis turunan porfirin pada penelitian ini dilakukan menggunakan senyawa prekursor pirol, eugenol dan asam asetat glasial. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *Microwave-Assisted Organic Synthesis (MAOS)* dengan yield 5,77%. Proses pemurnian yang digunakan adalah kolom kromatografi gravitasi (KKG) menggunakan eluen *n*-heksana : etil asetat (9:11) dan dilanjutkan dengan karakterisasi *Ultraviolet-Visible (UV-Vis)* dan *Fourier Transform Infrared (FTIR)*. Hasil karakterisasi UV-Vis mengkonfirmasi terbentuknya senyawa turunan porfirin yang ditunjukkan dengan adanya pita Soret (Soret band) pada panjang gelombang 422 nm dan pita Q (Q band) pada panjang gelombang 515, 557, 594 dan 651 nm. Terbentuknya pita Soret dan pita Q merupakan ciri khas dari senyawa porfirin.

Kata kunci: porfirin, MAOS, eugenol

Abstract. *Porphyrin compounds have the character of being a light sensitizer so they can play a role in various fields, namely Photodynamic Therapy (PDT) and Dye Synthesis Solar Cell (DSSC). Synthesis of porphyrins and their derivatives can be synthesized using pyrrole precursor compounds, aldehydes and acid catalysts. The synthesis of porphyrin derivatives in this study was carried out using pyrrole precursor compounds, eugenol and glacial acetic acid. The method used in this research was Microwave-Assisted Organic Synthesis (MAOS) with a yield of 5.77%. The purification process used was column gravity chromatography (KKG) using n-hexane eluent : ethyl acetate (9:11) and continued with Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fourier Transform Infrared (FTIR) characterization. The UV-Vis characterization results confirmed the formation of porphyrin derivative compounds as indicated by the presence of the Soret band at a wavelength of 422 nm and the Q band at wavelengths of 515, 557, 594 and 651 nm. The formation of the Soret band and Q band is a characteristic characteristic of porphyrin compounds and their derivatives.*

Key words: porphyrin, MAOS, eugenol.

PENDAHULUAN

Porfirin merupakan senyawa makrosiklik aromatik dengan 18 delokalisasi elektron π dan memiliki ciri khas, yaitu berwarna ungu (*porphua*). Secara struktur porfirin mempunyai empat unit pirol dan empat atom karbon penghubung atau yang dapat disebut jembatan metin. Porfirin merupakan salah satu molekul fungsional yang memiliki peran penting dalam berbagai bidang penelitian ilmiah, karena sifat elektronik dan optiknya

yang unik (Hiroto dkk., 2017). Perubahan sifat elektronik dan optik pada porfirin dipengaruhi oleh substituen yang berikatan pada atom pusat struktur porfirin sehingga dapat meningkatkan kelarutan porfirin (Pia dkk., 2021).

Senyawa porfirin merupakan molekul fungsional yang penting dalam kelas kromofor organik sehingga memiliki peran dalam berbagai bidang (Shi, dkk., 2021). Senyawa porfirin dan turunannya memiliki peran dalam berbagai bidang, terutama pada bidang kedokteran, yaitu sebagai terapi fotodinamik (*Photodynamic Therapy*) PDT dalam pengobatan kanker (Xue, dkk., 2019). Porfirin juga dapat berperan sebagai *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC). Porfirin memiliki karakter sebagai pemeka cahaya (*sensitizer*). Konsep penggunaan pewarna pada senyawa porfirin sebagai pemeka cahaya muncul dari keberadaan gugus kromofor senyawa organik (Al Rizqi, dkk., 2015). Oleh karena itu porfirin juga dinamakan sebagai pigmen kehidupan (*pigments of life*) (Timotius dan Kurniadi, 2017).

Sintesis porfirin umumnya dilakukan menggunakan prekursor aldehid, pirol dan dipirometan (Hiroto, dkk., 2017). Salah satu sumber aldehid alami adalah vanilin. Secara alami untuk mendapatkan senyawa vanilin dapat diisolasi dari buah vanila (*Vanilla planifolia Andrews*) (Widajanti, dkk., 2002). Namun, seiring dengan bertambahnya laju kebutuhan dunia akan vanilin, maka selain dihasilkan dari isolasi buah vanilin sebagian besar produksi vanilin dilakukan dengan sintesis kimia (Shyamala, dkk., 2007). Salah satu cara untuk mensintesis vanilin, yaitu menggunakan eugenol. Eugenol dapat digunakan sebagai bahan awal sintesis suatu senyawa karena adanya tiga gugus fungsional yang terikat pada gugus alil, hidroksi dan metoksi (Lusiana dan Siswata, 2003). Salah satu tanaman penghasil eugenol adalah cengkeh. Cengkeh merupakan tanaman khas Indonesia dan merupakan salah satu komoditas ekspor minyak atsiri (Rahman, dkk., 2022).

Sintesis senyawa tetrafenilporfirin (TPP) dapat dilakukan dengan metode *non-konvensional* atau menggunakan metode *green synthesis*. Metode *green synthesis* merupakan salah satu metode yang tidak menggunakan banyak pelarut dalam proses reaksinya. Kelebihan dari metode *green synthesis* adalah ramah lingkungan dan efisien (Al Hakimi, dkk., 2018). Metode *green synthesis* lebih ramah lingkungan karena reaksi terjadi tanpa adanya pelarut, seperti pada metode *Microwave Assisted Organic Synthesis* (MAOS) (Palou, 2007). Metode MAOS adalah metode *non-konvensional* yang

digunakan untuk mensintesis senyawa organik yang lebih cepat dengan *yield* yang lebih tinggi, produk samping yang lebih sedikit, waktu yang lebih cepat dalam proses pemurnian, efisien dan lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan metode konvensional (refluks) (Kholidanata, dkk., 2022). Sintesis TPP telah dilakukan oleh Kholidanata (2022) menggunakan benzaldehid, pirol dan asam propionat sebagai katalis asam. Metode yang digunakan pada sintesis TPP adalah metode (MAOS) selama 10 menit dengan *yield* 9,77%.

Berdasarkan pada pemaparan di atas maka telah dilakukan penelitian yang berfokus pada sintesis senyawa turunan porfirin berbasis eugenol menggunakan metode MAOS dan menganalisis karakteristik dari senyawa turunan porfirin berbasis eugenol. Senyawa turunan porfirin disintesis menggunakan metode MAOS (Sun, dkk., 2019 dan Kholidanata, dkk., 2022).

MATERI DAN METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian Penelitian ini dilaksanakan pada bulan September 2022 sampai dengan bulan Maret 2023 dan bertempat di Laboratorium Kimia Lanjut, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram.

Prosedur Kerja

1. Sintesis Porfirin

Senyawa turunan porfirin akan disintesis dengan memodifikasi metode yang dilakukan oleh Sun, dkk. (2019) dan Kholidanata, dkk. (2022). Senyawa turunan porfirin akan disintesis menggunakan metode MAOS. Adapun metode sintesis senyawa turunan porfirin terbagi menjadi dua bagian, yaitu;

1. Sintesis senyawa turunan porfirin

Sintesis senyawa turunan porfirin dilakukan dengan mereaksikan piridin (0,4 mL), eugenol (0,7 mL) dan asam asetat glasial (2,5 mL) pada botol vial terpisah. Campuran yang sudah homogen kemudian dicampurkan dengan pirol (0,34 mL), kemudian ditambahkan silika gel G60 hingga campuran berbentuk seperti pasta. Campuran yang sudah homogen akan membentuk warna coklat

kehitaman, campuran kemudian dimasukkan ke dalam *microwave* oven selama 30 menit dengan daya 100 watt.

2. Pemurnian senyawa turunan porfirin

Pemurnian senyawa turunan porfirin dilakukan mengacu pada penelitian Kholidanata, dkk., 2022. Hasil sintesis turunan porfirin akan membentuk padatan hitam. Silika yang berwarna hitam kemudian ditambahkan kloroform hingga membasahi seluruh padatan silika. Hasil sintesis turunan porfirin yang masih tercampur dengan silika hitam kemudian disonikasi selama 30 menit dan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan residu dan filtrat. Filtrat berwarna kehitaman kemudian dievaporasi. Terbentuk kristal pada dinding labu yang kemudian ditambahkan kloroform dan dimurnikan dengan KKG. Eluen yang digunakan adalah *n*-heksana : etil asetat dengan perbandingan (9:11). Fraksi berwarna hijau ditampung kemudian dilakukan monitoring menggunakan KLT yang dilanjutkan dengan evaporasi untuk menguapkan pelarut yang terikat pada hasil sintesis senyawa turunan porfirin.

2. Karakterisasi senyawa turunan porfirin

Karakterisasi porfirin dengan spektrofotometer UV-Vis memiliki ciri khas, yaitu absorbansi yang kuat pada daerah UV dan *Visible*. Absorbansi senyawa turunan porfirin pada spektrum UV-Vis dapat diamati pada pita serapan 350 – 450 nm atau yang disebut pita Soret (*Soret band*). Pita yang tidak terlalu intens disebut pita Q yang dapat diamati pada 450-700 nm (Yuan, 1995).

Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil sintesis kemudian diolah menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Yield = \frac{H_{eks}}{H_{teo}} \times 100\%$$

Ket:

H_{eks} = Hasil eksperimen

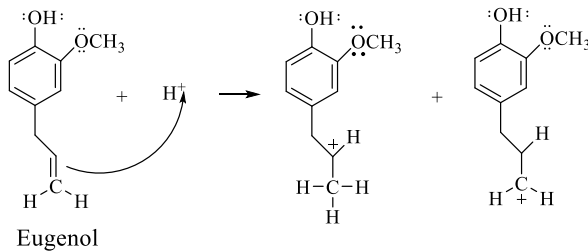
H_{teo} = Hasil teoritis

HASIL DAN DISKUSI

Hasil

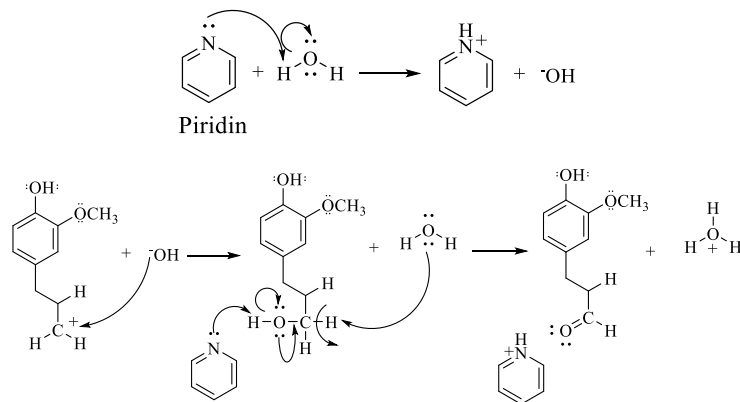
a. Sintesis Senyawa Turunan Porfirin

Sintesis senyawa turunan porfirin dilakukan menggunakan metode MAOS dengan mereaksikan eugenol dengan pirol sebagai reagen utama dan ditambahkan asam asetat glasial sebagai katalis asam dan piridin untuk pengoksidasi eugenol. Penelitian ini berfokuskan pada sintesis senyawa turunan porfirin berbasis eugenol menggunakan metode MAOS. Tahap sintesis diawali dengan mereaksikan eugenol dengan asam asetat glasial sebagai sumber H^+ (karbokation) yang bertujuan untuk memprotonasi eugenol.



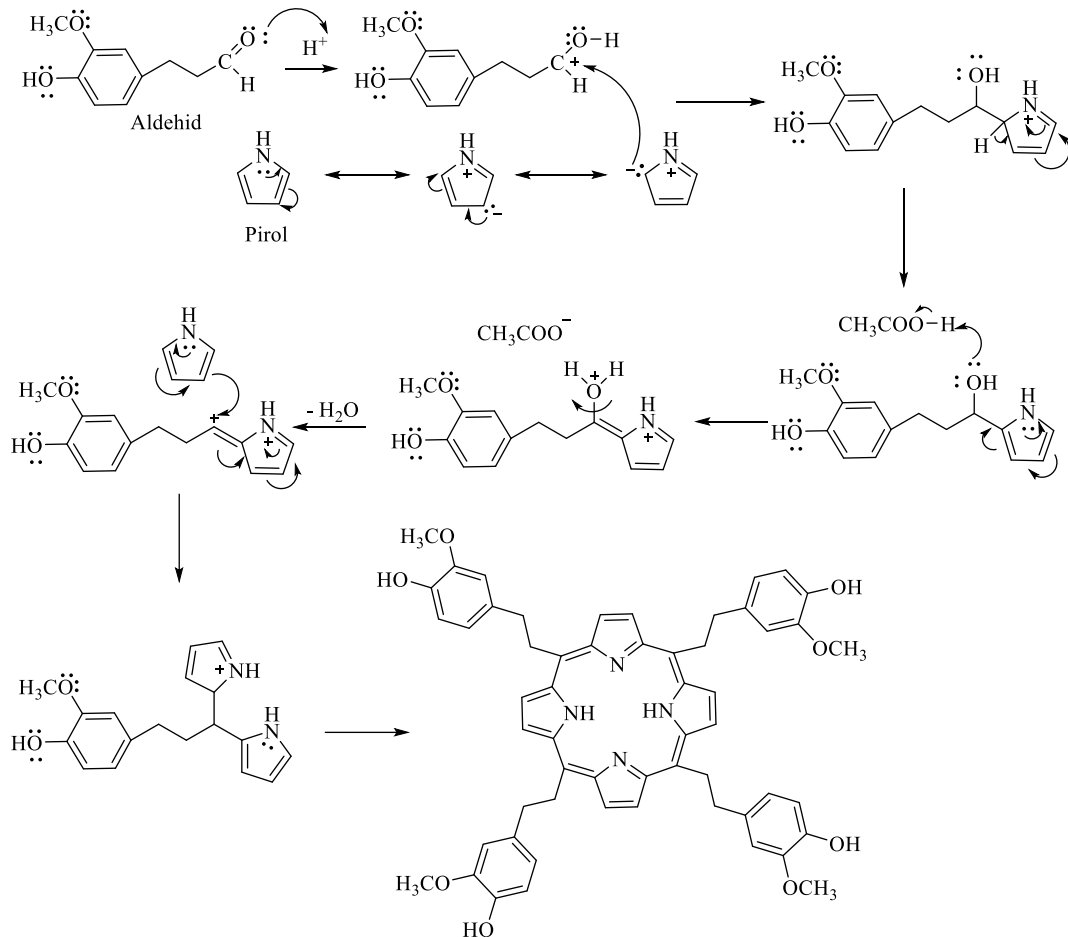
Gambar 1 Usulan mekanisme reaksi protonasi eugenol dengan asam asetat glasial.

Berdasarkan pada Gambar 1 terdapat dua jenis kemungkinan karbokation yang terbentuk dari reaksi eugenol dengan asam asetat glasial. Piridin kemudian direaksikan dengan larutan campuran yang bertujuan untuk mengoksidasi eugenol yang telah membentuk karbokation sehingga dapat membentuk ikatan karbonil. Terbentuknya karbokation merupakan tahap awal mekanisme pembentukan cincin porfirin.



Gambar 2 Pembentukan aldehyd dari eugenol

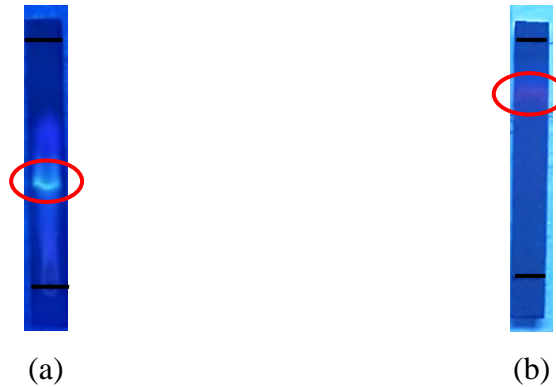
Tahapan reaksi selanjutnya, yaitu menggabungkan campuran (eugenol, piridin dan asam asetat glasial) yang sudah homogen dengan pirol pada mortar kemudian ditambahkan silika G60 hingga terbentuk pasta dan berwarna coklat kehitaman. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam microwave oven dengan daya 100 W selama 30 menit. Usulan mekanisme reaksi dapat diamati pada Gambar 3.



Gambar 3 Usulan mekanisme reaksi senyawa turunan porfirin.

Hasil sintesis pada penelitian ini menghasilkan senyawa turunan porfirin dengan yields 5,77% sesuai dengan perhitungan yang terdapat pada. Senyawa hasil sintesis yang berwarna kehijauan dapat diamati pada proses pemurnian (KKG). KKG dilakukan dengan eluen *n*-heksana : etil asetat (9:11) dengan fase diam berupa silika gel G60 no 1.07734.1000 yang kemudian dilanjutkan dengan proses monitoring menggunakan KLT. Eluen yang digunakan pada uji KLT, yaitu *n*-heksana : etil asetat (6:4) dan diamati di bawah sinar UV pada panjang gelombang 365 nm. Hasil monitoring dapat diamati pada Gambar 4.4, terdapat perbedaan, yaitu pada hasil sintesis pada senyawa yang belum dilakukan pemurnian menunjukkan beberapa

spots (noda) yang terbentuk dengan warna nyala biru, sedangkan pada hasil sintesis pada senyawa yang sudah dilakukan pemurnian menunjukkan satu noda berwarna merah. Selain itu terdapat juga perbedaan nilai R_f (*Retardation Factor* atau *Rate of Flow*).

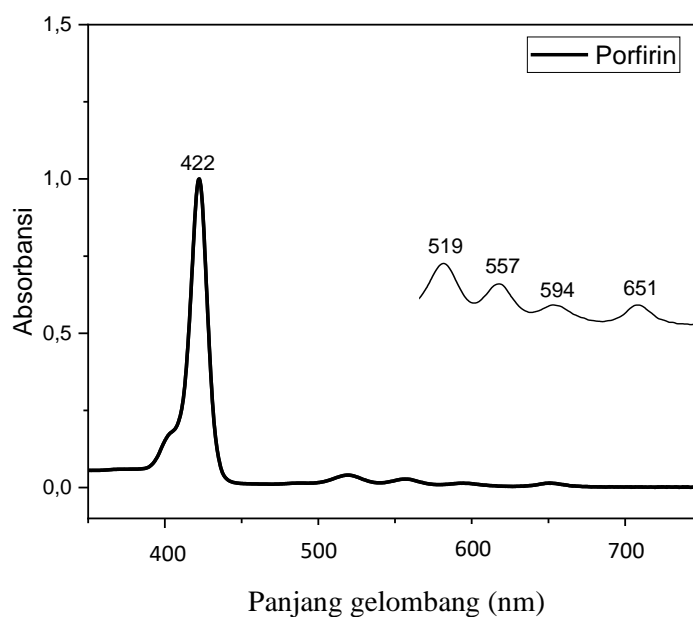


Gambar 4 KLT hasil sintesis (a) sebelum pemurnian; (b) setelah pemurnian.

R_f merupakan faktor yang digunakan untuk dapat menggambarkan perpindahan noda pada plat KLT. Sedangkan nilai R_f adalah suatu parameter yang menyatakan posisi noda pada fase diam setelah mengalami elusi (Gandjar dan Rohman, 2012). Faktor-faktor yang menyebabkan nilai R_f bervariasi meliputi dimensi dan jenis ruang, sifat dan ukuran lempeng, arah aliran fase gerak, volume dan komposisi fase gerak, kondisi kesetimbangan, kelembaban, dan metode persiapan sampel KLT sebelumnya (Wulandari, 2011). Namun, perbedaan nilai R_f juga dapat terjadi karena noda yang ditetaskan memiliki konsentrasi yang lebih kecil sehingga tidak dapat terdeteksi, begitupun sebaliknya (Lestari dan Santoso, 2021).

b. Karakterisasi Senyawa Turunan Porfirin

Hasil sintesis senyawa turunan porfirin yang disintesis menggunakan metode MAOS kemudian dikarakterisasi untuk membuktikan terbentuk atau tidaknya cincin porfirin. Karakterisasi pertama dapat dilakukan dengan UV-Vis. Hasil karakterisasi menggunakan spektrofotometer UV-Vis menunjukkan hasil yang mirip seperti penelitian Kholidanata, dkk. (2022), yaitu terbentuk dua jenis transisi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.

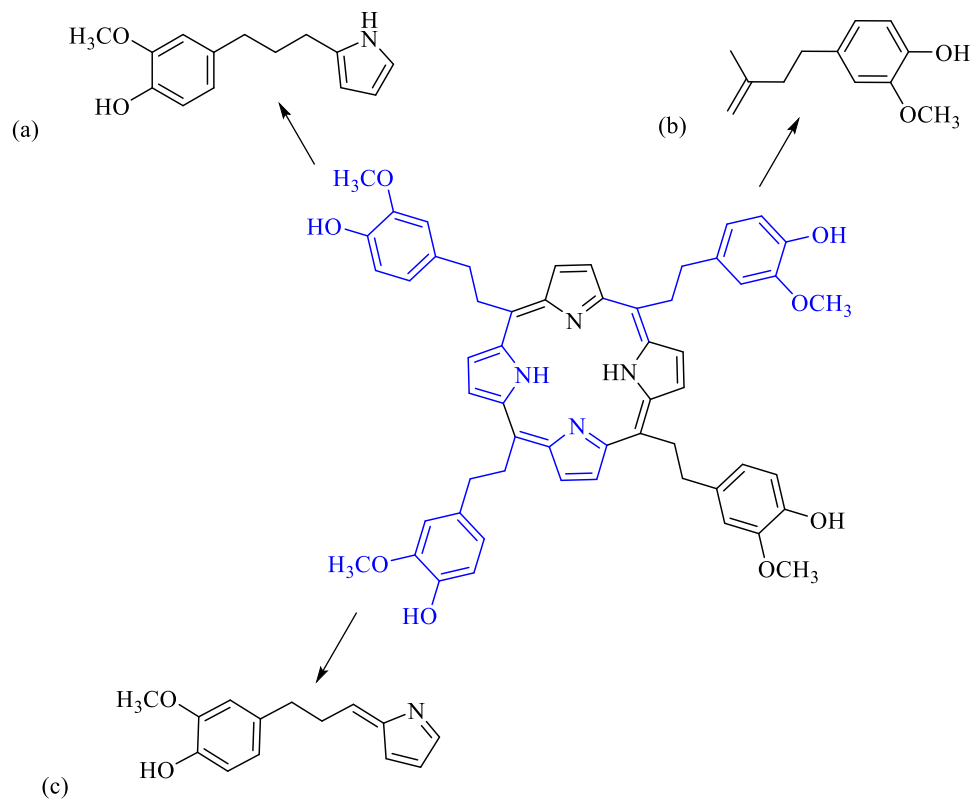


Gambar 5 Spektrum UV-Vis senyawa turunan porfirin.

Transisi pertama pada senyawa porfirin dan turunannya berasal dari keadaan dasar ke keadaan eksitasi kedua ($S_0 \rightarrow S_2$) yang menghasilkan pita Soret (B band) dengan rentang 380-500 nm. Transisi kedua berasal dari keadaan dasar ke keadaan transisi pertama ($S_0 \rightarrow S_1$) yang disebut Q band (pita Q) dengan rentang 500-700 nm (Giovannetti, 2012). Hasil penelitian senyawa turunan porfirin memiliki pita Soret pada panjang gelombang 422 nm sedangkan pada serapan pita Q memiliki empat absorbansi pada panjang gelombang 529, 557, 594 dan 651 nm. Panjang gelombang pita Soret dan pita Q hasil sintesis juga dapat dibandingkan dengan panjang gelombang hasil komputasi. Kimia komputasi adalah cabang kimia yang menggunakan hasil kimia teori yang diterjemahkan ke dalam program komputer untuk menghitung sifat-sifat molekul dan perubahannya (Prianto, 2010). Model senyawa menggunakan metode komputasi *Density Functional Theory* (DFT). Metode ini dipilih karena dapat dapat memberikan data yang akurat dan signifikan seauai dengan hasil eksperimen laboratorium (Pamungkas dan Sanjaya, 2013). Metode DFT yang digunakan dalam penelitian ini adalah default spin. Sedangkan fungsional yang digunakan adalah fungsional hybrid (B3LYP) dengan set basis yang digunakan adalah 3-21G.

Pita Q hasil sintesis dengan panjang gelombang 557 nm memiliki kemiripan dengan panjang gelombang pita Q hasil komputasi, yaitu 557,14 nm dengan

monomer pada Gambar 6 (a). Pita Q hasil sintesis dengan panjang gelombang 651 nm memiliki kemiripan dengan panjang gelombang pita Q hasil komputasi, yaitu 678 nm yang ditunjukkan pada Gambar 6 (b). Monomer yang sama juga menunjukkan pita Soret hasil komputasi dengan panjang gelombang 400,96 yang mendekati dengan pita Soret hasil sintesis, yaitu 422 nm. Pita Q pada panjang gelombang 519 nm tidak jauh berbeda dengan pita Q hasil komputasi, yaitu 512 nm yang ditunjukkan pada monomer Gambar 6 (c). Monomer yang sama juga menunjukkan puncak pada panjang gelombang 593 nm, dimana pada panjang gelombang ini mendekati dengan panjang gelombang pita Q 594 nm.



Gambar 6 Monomer (a) Pita Q1, (b) Pita Q2 dan Pita Soret, (c) Pita Q3.

Tabel 1 Perbandingan panjang gelombang pita Soret dan pita Q hasil sintesis, literatur dan hasil komputasi.

	Panjang gelombang (nm)		
	*	**	***
Pita Soret	417	422	400,96
Pita Q ₁	516	519	512
Pita Q ₂	549	557	557,14
Pita Q ₃	589,5	593	594
Pita Q ₄	645	651	678

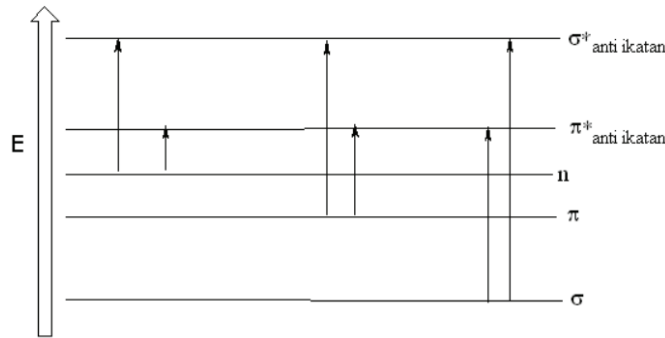
Keterangan : * Kholidanata, dkk. (2022)

** Hasil sintesis

*** Hasil komputasi

Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian (Kholidanata, dkk., 2022) seperti pada Tabel 1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panjang gelombang pada serapan UV-Vis tidak jauh berbeda dengan hasil yang diperoleh. Perbedaan 0,5 - 1,0 nm pada pita Soret dan pita Q tidak berarti bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara senyawa yang diperoleh (Kholidanata, 2015).

Spektrum UV-Vis menunjukkan absorbansi yang kuat pada daerah 400 – 450 nm (transisi $\pi \rightarrow \pi^*$, pita Soret) dan daerah 500 – 700 nm (pita Q). Intensitas inilah yang memunculkan warna ungu atau *porphua* (ungu) (Gottfried, 2015). Intensitas dan warna dari porfirin dipengaruhi oleh elektron π terkonjugasi yang tinggi (Giovanetti, 2012).



Gambar 7 Tipe transisi elektronik dalam molekul organik (Suhartati, 2017).

Namun pada hasil sintesis senyawa turunan porfirin sebelum KKG berwarna hijau. Intensitas warna ini disebabkan karena ikatan rantai terkonjugasi yang lebih sedikit sehingga panjang gelombang yang diserap juga lebih pendek atau disebut pergeseran biru (*blueshift*) (Dachriyanus, 2004). Hal ini karena ikatan konjugasi yang sedikit akan menghasilkan *set* orbital baru dengan jarak yang lebih lebar sehingga energi yang dibutuhkan untuk eksitasi elektron semakin besar. Besarnya energi yang dibutuhkan untuk eksitasi elektron mempengaruhi panjang gelombang yang diserap dimana sesuai rumus Einstein pada teori Planck, yaitu panjang gelombang yang diserap berbanding terbalik dengan energi yang dikeluarkan untuk bereksitasi (Kim dan Bohandy, 1981).

$$E = h \cdot \nu \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

Keterangan:

E = Energi (J)

h = Konstanta planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js)

v = Frekuensi (Hz)

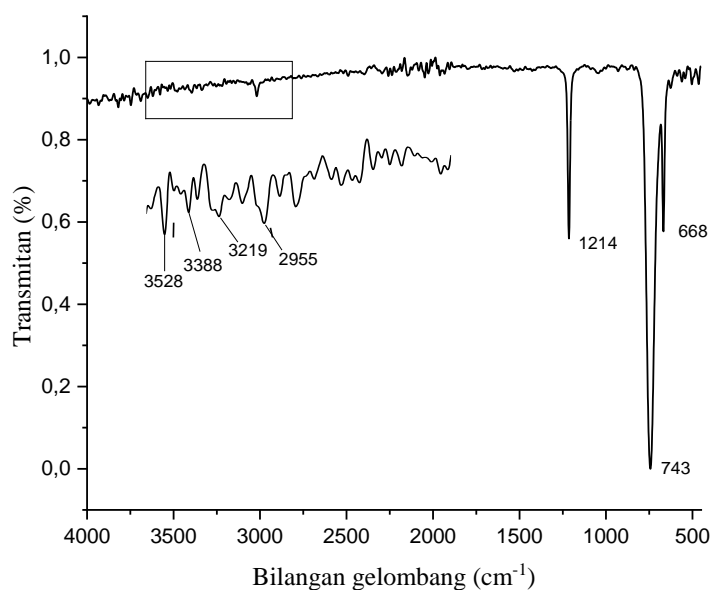
c = Kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)

λ = Panjang gelombang (m) atau (\AA)

Selain teori tersebut terdapat juga teori bahwa perubahan warna serapan (warna ungu menjadi hijau) dapat disebabkan oleh suasana asam. Perubahan warna ini juga dapat dikaitkan dengan protonasi. Protonasi atom N pada pusat porfirin menyebabkan pergeseran cenderung ke arah pergeseran merah (*redshift*) atau pergeseran biru (*blueshift*). Dua atom N pada pusat cincin porfirin yang tidak terprotonasi akan menghasilkan pergeseran merah pada pita Soret dan Q, begitupun sebaliknya. Pita Soret yang intens akan menyebabkan pergeseran cenderung ke arah pergeseran merah tergantung dengan substituen *meso* yang berikatan dengan cincin porfirin (Conradie, dkk., 2021).

Karakterisasi selanjutnya, yaitu pengujian FTIR. Pengujian FTIR dilakukan untuk mengetahui informasi terkait ikatan kimia. Ikatan kimia tersebut diindikasikan dengan pita-pita yang berbeda. Spektrum FTIR yang digunakan berada pada *range* $500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$. Spektrum serapan infra merah senyawa hasil sintesis (Gambar 7) menunjukkan adanya serapan pada bilangan gelombang 3388 cm^{-1} yang menunjukkan adanya vibrasi N-H pada pirol yang didukung dengan adanya pita tajam pada bilangan gelombang 743 cm^{-1} , 3219 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi C-H pada fenil, 1214 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi C-N yang didukung dengan adanya pita pada bilangan gelombang 668 cm^{-1} .

Vibrasi N-H pada spektrum FTIR tidak terlalu terlihat hal ini dapat dijelaskan melalui teori *frontier orbital*. Berdasarkan *frontier orbital*, selama terdapat orbital kosong (*unoccupied orbital*) pada bagian yang akan bereaksi dari suatu molekul dan terdapat orbital terisi (*occupied orbital*) dari bagian molekul yang lain maka akan terjadi tarik menarik yang menghasilkan ikatan (Fleming, 1976). Dalam hal ini ikatan N-H bertumpang tindih atau berinteraksi. Hal ini tergantung pada kecenderungan substituen yang berikatan dengan atom nitrogen pada pusat porfirin. Substituen tersebut dapat berikatan dengan N-H. Satu atom donor yang ada pada substituen dapat berikatan dengan atom pusat pada cincin porfirin (Castro, dkk., 2015).



Gambar 4.8 Spektrum FTIR senyawa turunan porfirin.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa senyawa turunan porfirin berhasil disintesis menggunakan prekursor pirol dan eugenol dengan metode MAOS membentuk senyawa turunan porfirin dengan yield 5,77%. Karakterisasi dari senyawa turunan porfirin dapat diuji menggunakan spektrofotometer UV-Vis dan juga FTIR. Berdasarkan spektrum UV-Vis terbentuknya pita Soret pada panjang gelombang 422 nm dan pita Q pada panjang gelombang 519, 557, 594 dan 651 nm mengkonfirmasi adanya terbentuknya senyawa turunan porfirin yang didukung dengan uji FTIR. Karakterisasi FTIR menunjukkan bilangan gelombang 3394 cm^{-1} ; 3019 cm^{-1} ; 1214 cm^{-1} ; 743 cm^{-1} . Bilangan gelombang 3394 cm^{-1} menunjukkan adanya ikatan N-H pada pirol yang didukung dengan munculnya bilangan gelombang 743 cm^{-1} ; 3019 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi C-H pada fenil; 1214 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi C-N yang didukung dengan adanya pita pada bilangan gelombang 668 cm^{-1} .

DAFTAR PUSTAKA

Al Rizqi, D. F. M., Widyapuspa, A. H., dan Setyawati, H., 2015, Sistem Dye-Sensitized Solar Cell Terkombinasi dengan Organic Light-Emitting Diode Sebagai Sumber Penerangan Berbasis Green Chemistry, *ReTII*, 1(1):584-592.

- Castro, K. A., Silva, S., Pereira, P. M., Simoes, M. M., Neves, M. D. G. P., Cavaleiro, J. A., dan Nakagaki, S., 2015, Galactodendritic Porphyrinic Conjugates as New Biomimetic Catalysts for Oxidation Reactions. *Inorganic Chemistry*, 54(9), 4382-4393.
- Conradie, J., Wamser, C. C., dan Ghosh, A., 2021, Understanding Hyperporphyrin Spectra: TDDFT Calculations on Diprotonated Tetrakis (*p*-aminophenyl) Porphyrin. *The Journal of Physical Chemistry A*, 125(46), 9953-9961.
- Fleming, I., 1976, *Frontier Orbitals and Organic Chemical Reactions*, John Wiley New York, New York.
- Giovannetti, R., 2012, The Use of Spectrophotometry UV-Vis for The Study of Porphyrins, *Macro to Nano Spectroscopy*, 1(1): 87-108.
- Gottfried, J. M., 2015, Surface Chemistry of Porphyrins and Phthalocyanines, *Surface Science Reports*, 70(3): 259-379.
- Hiroto, S., Miyake, Y., dan Shinokubo, H., 2016, Synthesis and Functionalization of Porphyrins Through Organometallic Methodologies, *Chemical reviews*, 117(4): 2910-3043.
- Kholidanata, F., Pradipta, A. R., Yuliana, E., dan Hanafi., 2022, Sintesis Senyawa Organik Zat Pemeka Cahaya (Dyes): Tetrafenilporfirin (TPP) dengan Metode Microwave Assisted Organic Synthesis Termodifikasi (S-MAOS), *Warta Akab*, 46(1): 40-44.
- Kim, B. F., Bohandy, J., 1981, Spectroscopy of Porphyrins, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 3(2): 153-163.
- Lusiana, R. A., dan Siswanta, D., 2003, Sintesis Oktileugeniloksi Etanoat dari Eugenol. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 6(1): 6-10.
- Palou, R. M., 2007, Ionic Liquid and Microwave - Assisted Organic Synthesis: A "Green" and Synergic Couple, *Journal of the Mexican Chemical Society*, 51(1): 252-264.
- Pamungkas, G., dan Sanjaya, I. G. M., 2013, kajian Teoritis Untuk Menentukan Celah Energi Porfirin Terkonjugasi Logam Kalsium Menggunakan Teori Fungsional Kerapatan (DFT), *UNESA Journal of Chemistry*, 2(1): 54-61.
- Pia, J. E., Hussein, B. A., Skrypai, V., Sarycheva, O., dan Adler, M. J., 2021, Porphyrin Silanes, *Coordination Chemistry Reviews*, 449(1): 214183.
- Prianto, B., 2010, *Pemodelan Kimia Komputasi*, Peneliti Bidang Material Dirgantara, LAPAN, 1(1): 6-9.

- Rahman, N. A., Ajiza, M., Anggorowati, D. A., Rastini, F. E. K., dan Mustiadi, L., 2022, Clove Leaf Distillation Using Briquette Fuel with Starch and Molasses As A Binder, *Materials Today: Proceedings*, 1(1).
- Shi, Y., Zhang, F., dan Linhardt, R. J., 2021, Porphyrin-Based Compounds and Their Applications in Materials and Medicine, *Dyes and Pigments*, 188(1): 109136.
- Shyamala, B. N., Naidu, M. M., Sulochanamma, G., dan Srinivas, P., 2007, Studies on the Antioxidant Activities of Natural Vanilla Extract and Its Constituent Compounds Through in Vitro Models, *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(19): 7738-7743.
- Suhartati, T., 2017, *Dasar-Dasar Spektrofotometri UV-Vis dan Spektrometri Massa untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik*, AURA, Bandar Lampung.
- Sun, Z., Jiao, S., Li, F., Wen, J., Yu, Y., Liu, Y., dan She, Y., 2019, Acid Activation and Chemical Oxidation in the Synthesis of Meso-Tetraphenylporphyrin Using A Mixed-Solvent System, *Asian Journal of Organic Chemistry*, 8(4): 542-548.
- Timotius. H. K., Kurniadi. I., 2017, *Heme: Biosintesis, Degradasi, serta Kelainan yang dapat menyertai*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Widajanti, W., Suwarso, W. P., Utari, T., dan Purwaningsih, H., 2002, Aplikasi Reaksi Katalisis Heterogen Untuk Pembuatan Vanilin Sintetik (3-Hidroksi-2-Metoksi-Benzaldehida) dari Eugenol (4-Alil-2-Metoksifenol) Minyak Cengkeh, *Makara Sains*, 6(3): 142-148.
- Xue, X., Lindstrom, A., dan Li, Y., 2019. Porphyrin-Based Nanomedicines for Cancer Treatment, *Bioconjugate chemistry*, 30(6): 1585-1603.