

Kompleks Besi(II) Dengan Ligan 3-BPP : Review

Iron(II) Complex with 3-BPP Ligand : Review

Fitriani*, Djulia Onggo, Irma Mulyani
Program Studi Kimia FMIPA Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

*E-mail: bungafi3ani@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.26874/jkk.v4i1.74>

Received: 22 Feb 2021, Revised: 30 May 2021, Accepted: 30 May 2021, Online: 31 May 2021

Abstrak

Perubahan dua keadaan spin elektronik di bawah pengaruh suhu, tekanan dan medan magnet merupakan fenomena Transisi Spin atau *Spin Crossover* (SCO). Transisi spin dapat terjadi pada senyawa kompleks berstruktur oktahedral dengan kekuatan medan ligan sedang, salah satunya adalah ligan 2,6-bis (pyrazol-3-yl)pyridine atau ligan 3-bpp. Kompleks transisi spin banyak diteliti karena berpotensi kuat dijadikan sebagai material elektronik, seperti sensor, saklar molekular dan penyimpanan data. Kompleks besi(II) dengan ligan 3-bpp telah menunjukkan karakteristik SCO yang meliputi pola dan suhu transisi berlainan, yang bergantung pada jenis anion penyeimbang. Kompleks dengan anion berbeda tersebut menunjukkan fenomena SCO akibat perubahan suhu dengan pola transisi serentak. Namun demikian, adanya air hidrat dalam molekul kompleks mengakibatkan suhu transisi semakin meningkat tetapi pola transisi berubah dari serentak menjadi perlahan. Beberapa penelitian senyawa kompleks Fe(II)-3bpp telah terbukti menunjukkan karakter SCO, bergantung pada jenis anion penyeimbang maupun adanya molekul air hidrat. Oleh karena itu, kompleks tersebut dapat menjadi peluang dalam pengembangan material SCO guna meningkatkan fungsi dan aplikasi dari kompleks Fe(II)-3bpp sebagai material elektronik.

Kata kunci: Kompleks Besi(II), Ligan 3-bpp, Transisi Spin

Abstract

The change of two different spin electronic states under the influence of temperature, pressure and light irradiation is known as the Spin Transition or Spin Crossover (SCO) phenomenon. Spin transition exists on octahedral complexes with an intermediate ligand field, one of the ligands is 2,6-bis (pyrazol-3-yl)pyridine or 3-bpp. Spin transition complexes were intensively investigated because they are highly potential candidates for electronic materials, such as sensors, molecular switches and information storages. The iron(II) complex with 3-bpp ligand has shown SCO characteristics including different transition pattern and transition temperature which were influenced by type of the counter anions. The iron(II) complexes with different types of counter anions have exhibited SCO phenomenon, due to the effect of temperature with abrupt transition. However, the presence of hydrate water in the iron(II) complex results in the higher temperature transition. In addition of that, the transition pattern has changed from the abrupt transition into the gradual transition types. Several studies of SCO properties of the complex Fe(II)-3-bpp reported that the transition type and the temperature transition were influenced by the type of counter anion and the amount of hydrate molecules. With various transition patterns and transition temperatures, the potential of Fe(II)-bpp complexes as SCO materials is more interesting to explored.

Keywords: Iron(II) Complex, 3-bpp Ligand, Spin Crossover



1 Pendahuluan

Kompleks besi(II) yang memiliki struktur geometri oktahedral merupakan salah satu senyawa kompleks yang menarik untuk dipelajari sifat magnetnya. Adanya ion besi(II) dengan konfigurasi elektron d^6 memiliki dua kemungkinan sifat magnet yaitu sifat diamagnetik (keadaan spin rendah) dan sifat paramagnetik (keadaan spin tinggi). Sifat magnet tersebut sangat bergantung pada jenis ligan yang berikatan pada ion besi(II) tersebut. Beberapa jenis ligan dapat menghasilkan kompleks besi(II) yang memiliki perubahan keadaan spin rendah dan keadaan spin tinggi yang reversibel, di antaranya yang telah banyak diteliti adalah ligan 2,6-bis(pyrazol-3-yl)pyridine atau disingkat ligan 3-bpp. Perubahan keadaan spin tersebut dikenal sebagai *Spin Crossover* (SCO) atau transisi spin. Transisi spin pada suatu kompleks besi(II) dapat terjadi akibat pengaruh eksternal seperti suhu, tekanan maupun radiasi cahaya [1].

Fenomena transisi spin umumnya terjadi pada kompleks dengan ion logam transisi yang memiliki konfigurasi d^4 sampai d^7 . Kompleks tersebut dapat berada dalam keadaan spin rendah (LS = *Low Spin*) atau spin tinggi (HS = *High Spin*) tergantung pada sifat medan ligan. Keadaan spin rendah akan terjadi pada kompleks yang memiliki ligan kuat, sebaliknya ligan lemah dapat menghasilkan kompleks dengan keadaan spin tinggi. Khusus pada kompleks oktahedral ion besi(II) yang memiliki konfigurasi d^6 , fenomena transisi spin terjadi secara drastis. Hal ini dapat diamati melalui perubahan sifat fisik seperti perubahan sifat magnetik dan perubahan warna. Selain itu, fenomena transisi spin juga mempengaruhi panjang ikatan antara ion besi(II) dengan atom donor pada ligan.

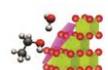
Transisi spin umumnya diamati melalui perubahan nilai momen magnetik pada variasi suhu. Suhu pada kondisi jumlah fraksi keadaan spin tinggi sama dengan jumlah fraksi keadaan spin rendah disebut sebagai suhu transisi ($T_{1/2}$). Suhu transisi merupakan salah satu parameter penting untuk pemanfaatan kompleks besi(II) sebagai material sensor [2]. Dalam pengembangan material sensor, suhu transisi senyawa kompleks SCO yang diharapkan yaitu di sekitar suhu ruang. Hal ini memudahkan untuk mengamati perubahan keadaan spin tanpa adanya perlakuan khusus seperti pemanasan atau pendinginan yang ekstrem. Namun demikian, suhu transisi senyawa kompleks SCO sebagai

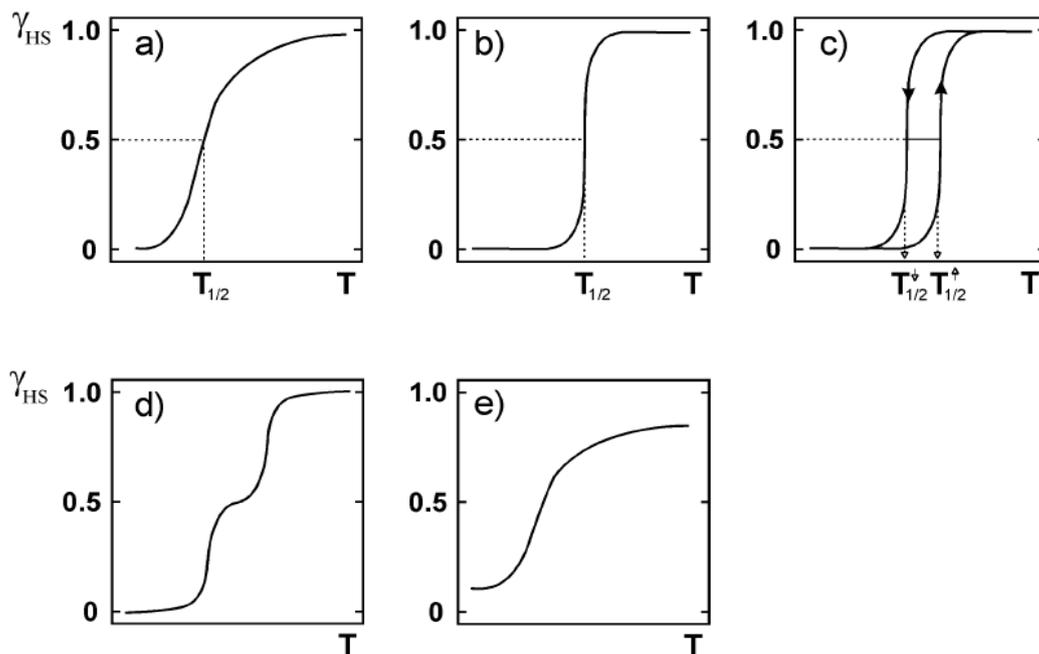
material sensor dapat disesuaikan dengan tujuan penggunaan, seperti aplikasi sensor untuk suhu di atas atau di bawah suhu ruang.

Hasil pengamatan perubahan nilai momen magnet pada berbagai variasi suhu ditampilkan sebagai kurva transisi spin, yang menggambarkan pola transisi. Besarnya nilai momen magnetik dapat dikonversi sebagai fraksi keadaan spin tinggi (γ_{HS}). Karena itu pola perubahan keadaan spin rendah ke spin tinggi atau sebaliknya untuk senyawa SCO dapat digambarkan sebagai fraksi spin tinggi fungsi temperatur. Terdapat 5 jenis pola transisi yaitu (a) perlahan, dimana perubahan keadaan spin terjadi pada rentang suhu yang panjang (b) serentak, dimana perubahan fraksi spin tinggi terjadi pada rentang suhu yang sangat pendek (c) serentak disertai histeresis, (d) bertahap, dimana perubahan terjadi dengan dua tahap dan (e) tidak tuntas atau tidak lengkap, dimana perubahan ke keadaan spin rendah terjadi sangat lambat. Kelima jenis pola transisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 1 [3].

Pola transisi yang dikehendaki untuk material SCO yaitu pola transisi serentak yang disertai histeresis. Pola histeresis diamati pada kurva transisi spin senyawa SCO yang memiliki nilai $T_{1/2}$ pada proses pemanasan ($T_{1/2\uparrow}$) yang berbeda dengan nilai $T_{1/2}$ pada proses pendinginan ($T_{1/2\downarrow}$). Selain itu, material SCO yang memiliki selisih $T_{1/2\uparrow}$ dan $T_{1/2\downarrow}$ yang lebar pada pola transisi merupakan salah satu parameter penting untuk menentukan potensi suatu material sebagai penyimpan data [1].

Penelitian mengenai senyawa kompleks besi(II) sebagai material SCO telah banyak dilakukan [4], salah satunya adalah senyawa kompleks besi(II) dengan ligan 3-bpp. Fenomena sifat SCO untuk kompleks Fe(II)-3bpp tersebut diamati dari perubahan warna pada kondisi suhu yang berbeda. Kompleks Fe(II)-3bpp berwarna merah bata pada suhu rendah dan berwarna kuning pada suhu tinggi, dimana perubahan warna tersebut berlangsung secara reversibel. Perubahan warna akibat suhu dikenal sebagai efek termokromik. Untuk sifat magnetnya, kompleks Fe(II)-3bpp yang berwarna merah bata bersifat diamagnetik (LS) dan yang berwarna kuning bersifat paramagnetik (HS) [5]. Hasil pengamatan ini menunjukkan bahwa ligan 3-bpp merupakan ligan *intermediate*, yang menyebabkan terjadinya transisi spin pada kompleks Fe(II)-3bpp.





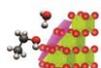
Gambar 1. Jenis pola transisi: (a) perlahan, (b) serentak, (c) serentak disertai histeresis, (d) bertahap, dan (e) tidak tuntas (Sumber: Gutlich dan Goodwin, 2004) [3]

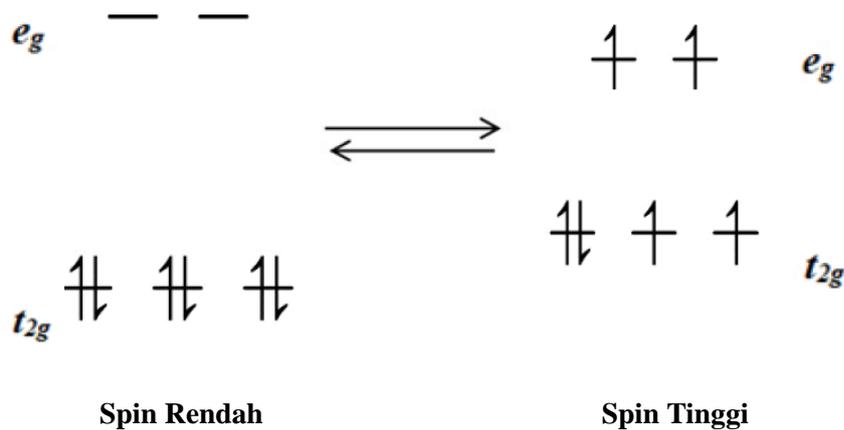
2 Keistimewaan Ion Besi(II)

Besi termasuk golongan logam transisi dengan nomor atom 26 yang memiliki konfigurasi elektron $[\text{Ar}] 3d^6 4s^2$. Ketika elektron pada orbital $4s^2$ dilepaskan maka akan terbentuk ion besi(II) dengan konfigurasi elektron $3d^6$. Keenam elektron pada orbital $3d$ tersebut mengisi lima jenis orbital d , yaitu d_{xy} , d_{xz} dan d_{yz} , $d_{x^2-y^2}$ dan d_z^2 . Ketika ion besi(II) berikatan dengan suatu ligan, orbital d ion besi(II) mengalami pembelahan menjadi t_{2g} dan e_g yang kemudian menghasilkan kompleks oktahedral. Keadaan e_g terdiri dari orbital $d_{x^2-y^2}$ dan d_z^2 yang memiliki tingkat energi yang lebih tinggi dari keadaan t_{2g} yang terdiri dari orbital d_{xy} , d_{xz} dan d_{yz} [6].

Selisih energi antara t_{2g} dengan e_g disebut energi pembelahan orbital d yang dinyatakan dengan simbol $10 Dq$ atau Δ_o . Suatu senyawa kompleks dapat memiliki nilai Δ_o besar atau kecil, sangat berkaitan dengan kekuatan ligan yang berkoordinasi dengan ion logam. Pada kompleks dengan medan ligan yang kuat menghasilkan nilai Δ_o yang besar dan memiliki nilai energi pemasangan elektron (*pairing*

energy) P yang lebih kecil dari nilai Δ_o . Nilai P menggambarkan energi Coulomb gaya tolak menolak antar elektron. Pada medan ligan yang kuat, nilai Δ_o lebih besar dari nilai P . Hal ini menunjukkan bahwa ligan yang kuat dapat mengimbangi gaya tolak menolak antar elektron. Sebaliknya pada medan ligan lemah, nilai $\Delta_o < P$. Pada keadaan medan ligan lemah, energi yang diperlukan untuk elektron berpasangan lebih besar dibandingkan nilai Δ_o sehingga elektron cenderung tidak berpasangan [7]. Untuk kompleks yang memiliki nilai Δ_o relatif sama dengan nilai P , ligan pada kompleks tersebut menghasilkan medan ligan *intermediate*. Ligan *intermediate* tersebut memungkinkan terjadinya transisi elektron pada keadaan spin rendah ke keadaan spin tinggi atau sebaliknya ($LS \rightleftharpoons HS$) pada suatu kompleks. Keadaan ini dikenal sebagai *Spin Crossover*. Transisi elektron tersebut terjadi akibat adanya pengaruh luar seperti perubahan suhu, tekanan maupun radiasi cahaya. Proses transisi elektron dari keadaan spin rendah ke keadaan spin tinggi atau sebaliknya ditunjukkan pada Gambar 2 [8].

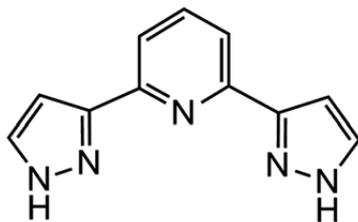




Gambar 2. Transisi elektron pada kompleks besi(II)
(Sumber: Gutlich dkk., 2013) [8]

3 Keistimewaan Ligan 3-bpp

Ligan 3-bpp atau 2,6-bis(pyrazol-3-yl)pyridine merupakan salah satu jenis ligan tridentat beratom donor nitrogen yang tidak bermuatan. Penamaan 3-bpp ini dikarenakan cincin piridin berkoordinasi dengan karbon posisi 3 pada cincin pirazol. Perbedaannya dengan ligan terpiridin terletak pada dua cincin pirazol yang dimiliki oleh ligan 3-bpp. Ligan 3-bpp memiliki kekuatan lebih rendah dibandingkan dengan ligan terpiridin yang memiliki tiga cincin piridin. Hal ini disebabkan oleh dua cincin pirazol yang terikat pada cincin piridin memiliki lingkaran lima dengan kekuatan yang relatif lebih lemah dibandingkan lingkaran enam pada cincin piridin. Oleh karena itu, ligan 3-bpp termasuk dalam kelompok ligan berkekuatan menengah (*intermediate*). Struktur ligan 2,6-bis(pyrazol-3-yl)pyridine ditunjukkan pada Gambar 3 [9].



Gambar 3.

Struktur ligan 2,6-bis(pyrazol-3-yl)pyridine
(Sumber: Halcrow, 2014) [9]

Ligan 3-bpp telah berhasil disintesis pertama kali oleh Lin dan Lang [10] menghasilkan serbuk padat berwarna putih dan memiliki rentang titik leleh 257 – 259 °C. Hasil karakterisasi ligan 3-bpp dengan spektrofotometer inframerah menunjukkan adanya serapan pada bilangan

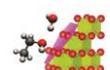
gelombang 3176 cm^{-1} , 1600 cm^{-1} , 1471 cm^{-1} , 1558 cm^{-1} dan 800 cm^{-1} , masing-masing mengindikasikan adanya ikatan pada N – H *stretching*, C – C *stretching*, N – H *bending*, C = C – N *pyridine*, dan C – H *aromatic* [11].

Ligan 3-bpp memiliki potensi membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air ataupun molekul lain yang memiliki atom dengan keelektronegatifan tinggi, karena adanya dua atom hidrogen yang melekat pada dua atom nitrogen dari cincin pirazol. Interaksi ikatan hidrogen dengan molekul air ataupun dengan molekul yang memiliki atom dengan keelektronegatifan tinggi dimungkinkan dapat mempengaruhi pola transisi dan suhu transisi. Dalam penelitian King dkk. [12] sintesis kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2][\text{Au}(\text{CN})_2]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ diperoleh pola transisi perlahan sedangkan dalam penelitian Djemel dkk. [13] sintesis kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2][\text{Au}(\text{CN})_2]_2$ anhidrat diperoleh pola transisi bertahap dan serentak.

4 Karakteristik Kompleks Besi(II) dengan Ligan 3-bpp

Studi variasi jenis anion penyeimbang (A) pada kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2]\text{A}$ telah dilakukan sejak lama oleh Goodwin dan Sugiyarto [14]. Hasil sintesis menunjukkan bahwa pola transisi spin kompleks Fe(II)-3bpp dipengaruhi oleh jenis anion penyeimbang. Adapun jenis anion penyeimbang yang telah digunakan pada sintesis kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2]\text{A}$ yaitu BF_4^- , PF_6^- , Br^- , I^- dan CF_3SO_3^- [5] [15] [16].

Pada kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2](\text{BF}_4)_2$ memiliki pola transisi serentak dengan histeresis sedangkan kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2](\text{PF}_6)_2$ memiliki pola transisi serentak namun tidak tuntas. Pola



transisi serentak merupakan pola transisi yang mendukung fungsi material sebagai sensor sedangkan adanya histeresis dapat mendukung peran sebagai material memori. Kompleks dengan anion iodida, $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2]\text{I}_2$ memiliki pola transisi serentak dengan histeresis dimana suhu transisi sedikit lebih tinggi dari kompleks yang sama dengan anion BF_4^- . Untuk kompleks dengan anion bromida, $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2]\text{Br}_2$ memiliki pola transisi serentak namun efek histeresis tidak muncul. Kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2]^{2+}$ dengan anion *triflate* (CF_3SO_3^-) yang mengandung gugus trifluoro, suhu transisi meningkat dan mendekati suhu ruang, tetapi pola transisi berubah menjadi dua tahap.

Suhu transisi juga dipengaruhi oleh jumlah molekul air hidrat, umumnya molekul air hidrat yang semakin banyak dapat meningkatkan suhu transisi. Sebagai contoh kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2](\text{PF}_6)_2$ monohidrat dan dihidrat, suhu transisi semakin meningkat namun terjadi perubahan pola transisi dari serentak menjadi perlahan. Efek hidrat pada pola transisi kemungkinan berkaitan dengan adanya interaksi ikatan hidrogen antara atom H pada ligan 3-bpp dengan atom O pada ligan H_2O . Semakin banyak ikatan hidrogen tersebut dapat menyebabkan molekul kompleks menjadi besar dan meningkatkan suhu transisi. Hal ini dikarenakan ukuran kompleks menjadi lebih besar, sehingga ikatan Fe-N menjadi lebih kuat dan jarak ikatannya menjadi lebih pendek. Ini menstabilkan keadaan spin rendah sehingga suhu transisi bergeser ke suhu yang lebih tinggi [5]. Selain itu, penelitian menggunakan anion *nicotinate* ($\text{C}_6\text{H}_4\text{NO}_2$) menghasilkan kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2](\text{C}_6\text{H}_4\text{NO}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ yang memiliki pola transisi serentak pada proses pemanasan dengan suhu transisi naik di sekitar suhu ruang. Ikatan hidrogen diamati antara atom O pada ligan H_2O dengan atom H pada ligan 3-bpp dan dengan atom H pada anion *nicotinate*, yang ditunjukkan pada struktur kristal tunggal kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2](\text{C}_6\text{H}_4\text{NO}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [17].

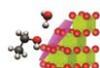
Pengembangan kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2]^{2+}$ juga dilakukan dengan menggunakan anion kompleks logam transisi seperti anion *nitroprusside* $[\text{Fe}(\text{CN})_5(\text{NO})]^{2-}$ yang mengandung ion logam Fe(III). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2][\text{Fe}(\text{CN})_5(\text{NO})]$ berada dalam keadaan spin rendah dan berwarna merah bata pada suhu rendah (99 K). Pengukuran susceptibilitas magnetik diperoleh nilai momen magnetik sebesar 1,3 BM. Pada suhu ruang (298 K),

kompleks tersebut berubah menjadi warna kuning dan berada pada keadaan spin tinggi dengan nilai momen magnetik sebesar 5,4 BM. Sifat magnetik tersebut jelas dapat diindikasikan dengan terjadinya fenomena transisi dari keadaan spin rendah ke keadaan spin tinggi dalam besi(II) dengan tipe serentak, tuntas dan disertai histeresis. Namun demikian, suhu transisi yang dihasilkan masih jauh di bawah suhu ruang dengan suhu transisi naik sebesar 184 K dan suhu transisi turun sebesar 181 K, sehingga diperoleh lebar histeresis sebesar 3 K [18].

Selain perubahan sifat magnetik, fenomena transisi spin juga dapat dideteksi dari perubahan panjang ikatan antara ion besi(II) dengan atom donor nitrogen. Hal ini diamati pada struktur kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2][\text{Fe}(\text{CN})_5(\text{NO})]$, yang dianalisa dengan difraksi sinar-X kristal tunggal pada suhu 100 K dan 294 K. Hasil difraktogram sinar-X kompleks tersebut menunjukkan bahwa panjang ikatan Fe-N (ligan 3-bpp) rata-rata sebesar 1,958 Å pada suhu 100 K dan 2,174 Å pada suhu 294 K [18]. Data tersebut memberikan indikasi bahwa fenomena transisi spin terjadi pada kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2][\text{Fe}(\text{CN})_5(\text{NO})]$.

Selanjutnya pengembangan sintesis kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2]\text{A}$ juga dilakukan dengan menggunakan anion kompleks sianida, yaitu $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2][\text{M}(\text{CN})_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($\text{M} = \text{Ag}; \text{Au}$) [12]. Kedua kompleks tersebut memiliki pola transisi perlahan dengan suhu transisi di sekitar suhu ruang. Selanjutnya penelitian tersebut dimodifikasi oleh Djemel dkk. [13] menggunakan reaksi metatesis dalam pelarut metanol guna mengurangi keberadaan molekul air yang tergabung dalam kompleks, seperti pada penelitian King dkk., [12] kompleks yang dihasilkan memiliki pola transisi dan suhu transisi yang berbeda dibandingkan dengan kompleks hidratnya. Kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2][\text{Au}(\text{CN})_2]_2$ menunjukkan pola transisi bertahap dan serentak dengan suhu transisi di atas suhu ruang dan diperoleh lebar histeresis untuk masing-masing tahap sebesar 45 K ($T_{1/2\uparrow} = 370$ K dan $T_{1/2\downarrow} = 415$ K) dan 10 K ($T_{1/2\uparrow} = 420$ K dan $T_{1/2\downarrow} = 430$ K) [13].

Berdasarkan uraian di atas, pola transisi dan suhu transisi untuk material SCO dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu jenis anion penyeimbang dan jumlah hidrat pada kompleks. Selain itu, pemilihan jenis pelarut juga menjadi salah satu faktor penting dalam sintesis senyawa kompleks $[\text{Fe}(3\text{-bpp})_2]\text{A}$. Untuk memahami pengaruh jenis anion penyeimbang dan jumlah hidrat terhadap pola transisi dan suhu transisi



senyawa kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2]\text{A}$, maka perlu dilakukan kajian yang cukup luas untuk berbagai jenis anion penyeimbang dan strategi sintesis untuk menghasilkan kompleks hidrat ataupun anhidrat. Hasil yang diharapkan dalam kajian tersebut adalah untuk memperoleh kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2]\text{A}$ yang memiliki suhu transisi pada suhu ruang dengan pola transisi serentak yang berpotensi sebagai material baru senyawa SCO.

5 Manfaat Kompleks Besi(II) dengan Ligan 3-bpp

Kompleks besi(II) dengan ligan 3-bpp merupakan senyawa kompleks yang memiliki karakteristik transisi spin atau *Spin Crossover* (SCO) yang dapat mengalami perubahan dari keadaan spin rendah ke keadaan spin tinggi atau sebaliknya. Senyawa kompleks dengan karakteristik SCO dapat digunakan untuk berbagai keperluan di antaranya sebagai saklar maupun sensor akibat pengaruh suhu, tekanan maupun radiasi cahaya. Kompleks yang dapat digunakan sebagai material sensor adalah kompleks yang memiliki pola transisi spin tipe serentak di sekitar atau di atas suhu ruang, sehingga pemilihan senyawa kompleks untuk material sensor berdasarkan pola transisi spin kompleks tersebut [2].

Selain digunakan sebagai material sensor, senyawa kompleks dengan karakteristik SCO juga dapat digunakan sebagai material penyimpan data atau memori. Kompleks yang dapat digunakan sebagai penyimpan data harus memiliki pola transisi spin tipe serentak yang disertai sifat histeresis. Sifat histeresis adalah sifat yang dimiliki senyawa dengan perubahan transisi pada suhu yang berbeda. Semakin lebar perbedaan suhu transisi naik dan suhu transisi turun, maka semakin baik senyawa kompleks tersebut berpotensi sebagai material memori [1].

6 Kesimpulan

Peluang untuk penelitian senyawa kompleks SCO masih sangat luas, dikarenakan karakteristik dari material SCO sangat dipengaruhi oleh jenis ligan, jenis anion penyeimbang, jumlah hidrat pada kompleks maupun strategi sintesis. Khusus pada penelitian yang terkait dengan kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2]\text{A}$ masih banyak peluang dalam mempelajari jenis anion penyeimbang maupun strategi sintesis untuk menghasilkan kompleks hidrat ataupun anhidrat. Hasil penelitian tersebut diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah mengenai pengaruh jenis anion penyeimbang dan jumlah hidrat terhadap sifat magnet, pola transisi

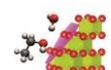
dan suhu transisi senyawa SCO. Selain itu, kondisi sintesis senyawa kompleks $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2]\text{A}$ yang memiliki jenis variasi anion penyeimbang (A), merupakan informasi penting dalam pengembangan teknik sintesis maupun teknik rekristalisasi untuk memperoleh kristal tunggal pada sintesis senyawa kompleks SCO.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Kementerian Keuangan Republik Indonesia yang membantu pendanaan pendidikan dan penelitian yang diberikan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Kimia FMIPA ITB yang sudah memberikan dukungan selama penelitian program S-3.

Daftar Pustaka

- [1]. Halcrow MA. Spin-crossover Compounds with Wide Thermal Hysteresis. *Chem Lett.* 2014;43(8):1178–88. Available from: <http://dx.doi.org/10.1246/cl.140464>
- [2]. Hayami S, Holmes SM, Halcrow MA. Spin-state switches in molecular materials chemistry. *J Mater Chem C.* 2015;3(30):7775–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1039/c5tc90128f>
- [3]. Gütllich P, Goodwin HA. Spin Crossover—An Overall Perspective. *Topics in Current Chemistry.* Springer Berlin Heidelberg; p. 1–47. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/b13527>
- [4]. Craig GA, Roubeau O, Aromí G. Spin state switching in 2,6-bis(pyrazol-3-yl)pyridine (3-bpp) based Fe(II) complexes. *Coord Chem Rev [Internet].* 2014;269:13–31. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ccr.2014.02.002>
- [5]. Sugiyarto KH, Craig DC, Rae AD, Goodwin HA. Structural, Magnetic and Mössbauer Spectral Studies of Salts of Bis[2,6-bis(pyrazol-3-yl)pyridine]iron(II)—a Spin Crossover System. *Aust J Chem.* 1994;47(5):869. Available from: <http://dx.doi.org/10.1071/ch9940869>
- [6]. Housecroft C, Sharpe AG. *Inorganic Chemistry.* Fourth. Edinburg Gate, England: Pearson Education; 2012.
- [7]. Miessler G, Tarr DA. *Inorganic Chemistry.* 4th ed. New Jersey: Prentice Hall International Inc.; 2010.



- [8]. Gütlich P, Gaspar AB, Garcia Y. Spin state switching in iron coordination compounds. *Beilstein J Org Chem.* 2013/02/15. 2013;9:342–91. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23504535>
- [9]. Halcrow MA. Recent advances in the synthesis and applications of 2,6-dipyrazolylpyridine derivatives and their complexes. *New J Chem.* 2014;38(5):1868–82. Available from: <http://dx.doi.org/10.1039/c3nj00835e>
- [10]. Lin Y, Lang SA. Novel two step synthesis of pyrazoles and isoxazoles from aryl methyl ketones. *J Heterocycl Chem.* 1977;14(2):345–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/jhet.5570140240>
- [11]. Gamez P, Steensma RH, Driessen WL, Reedijk J. Copper(II) compounds of the planar-tridentate ligand 2,6-bis(pyrazol-3-yl)pyridine. *Inorganica Chim Acta [Internet].* 2002;333(1):51–6. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/s0020-1693\(02\)00754-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0020-1693(02)00754-5)
- [12]. King P, Henkelis JJ, Kilner CA, Halcrow MA. Four new spin-crossover salts of $[\text{Fe}(\text{3-bpp})_2]^{2+}$ (3-bpp=2,6-bis[1H-pyrazol-3-yl]pyridine). *Polyhedron.* 2013;52:1449–56. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.poly.2012.03.038>
- [13]. Djemel A, Stefanczyk O, Marchivie M, Trzop E, Collet E, Desplanches C, et al. Solvatomorphism-Induced 45 K Hysteresis Width in a Spin-Crossover Mononuclear Compound. *Chem - A Eur J.* 2018;24(55):14760–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/chem.201802572>
- [14]. Goodwin HA, Sugiyarto KH. Lattice trapping of metastable quintet state bis(2,6-bis(pyrazol-3-yl)pyridine)iron(II) bis(tetrafluoroborate), a spin crossover system, and kinetics of the quintet-singlet transformation. *Chem Phys Lett.* 1987;139(5):470–4. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2614\(87\)80593-6](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2614(87)80593-6)
- [15]. Sugiyarto KH, Goodwin HA. Coordination of Pyridine-Substituted Pyrazoles and Their Influence on the Spin State of Iron(II). *Aust J Chem.* 1988;41(11):1645. Available from: <http://dx.doi.org/10.1071/ch9881645>
- [16]. Buchen T, Gütlich P, Sugiyarto KH, Goodwin HA. High-Spin \rightarrow Low-Spin Relaxation in $[\text{Fe}(\text{bpp})_2](\text{CF}_3\text{SO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ after LIESST and Thermal Spin-State Trapping—Dynamics of Spin Transition Versus Dynamics of Phase Transition. *Chem - A Eur J.* 1996;2(9):1134–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/chem.19960020915>
- [17]. Jornet-Mollá V, Giménez-Saiz C, Romero F. Synthesis, Structure, and Photomagnetic Properties of a Hydrogen-Bonded Lattice of $[\text{Fe}(\text{bpp})_2]^{2+}$ Spin-Crossover Complexes and Nicotinate Anions. *Crystals.* 2018;8(11):439. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/cryst8110439>
- [18]. Sugiyarto KH, McHale W-A, Craig DC, Rae AD, Scudder ML, Goodwin HA. Spin transition centres linked by the nitroprusside ion. The cooperative transition in bis(2,6-bis(pyrazol-3-yl)pyridine)iron(ii) nitroprusside. *Dalt Trans.* 2003;(12):2443. Available from: <http://dx.doi.org/10.1039/b301218b>

