

TINJAUAN PENGGUNAAN MATERIAL FOTOKATALIS UNTUK PENINGKATAN REAKSI DEGRADASI SIANIDA

Rahmat Setiawan Mohar, Haswi Poerwandanu Soewoto, Wahyu Garinas

Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Mineral, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)
Gedung 820 Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan, Banten 15314

Email : rahmat.setiawan@bppt.go.id

Abstract

Gold mining activities account for most of the cyanide pollution worldwide. Cyanide is a highly toxic and dangerous substance even at considerably low concentration. Therefore a waste management system is prominently necessary to be conducted in a proper manner. One of simple methods for cyanide detoxification is employing photocatalytic materials. This paper discusses various photocatalytic materials as well as the effectiveness of the photocatalytic method in enhancing the cyanide degradation reaction.

Kata Kunci : Sianida, Fotokatalis, Detoksifikasi, Degradasi.

1. PENDAHULUAN

Sianida banyak terdapat dalam limbah pembuangan berbagai macam industri. Pertambangan emas merupakan penyumbang cemaran sianida terbanyak di dunia (Kuyucak dan Akcil 2013; Ritcey, 2005). Selain itu, sianida juga banyak terdapat pada limbah industri bahan kimia, serat tekstil, dan petrokimia (Bozzi dkk, 2004; Kuyucak dan Akcil, 2013).

Sianida adalah bahan cemaran yang sangat beracun dan berbahaya meskipun pada konsentrasi yang rendah (Bozzi dkk, 2004; Chiang dkk, 2002; Farrokhi dkk, 2013; Saleh dkk, 2010), sehingga keberadaannya memerlukan penanganan yang tepat. Beberapa metode detoksifikasi sianida telah diterapkan pada industri pertambangan emas, antara lain dekomposisi alami dan dekomposisi kimia (Chiang dkk, 2002; Kuyucak dan Akcil, 2013; Ritcey, 2005). Akan tetapi, dekomposisi alami dinilai sangat lambat dalam mengurangi jumlah sianida sampai dengan ambang batas yang diizinkan dan tidak efisien secara biaya karena memerlukan kolam penampungan tailing yang sangat besar. Demikian pula dengan dekomposisi kimia yang juga kurang efisien karena memerlukan bahan kimia yang terus-menerus ditambahkan pada setiap proses sianidasi emas.

Di sisi lain, penggunaan material fotokatalis pada reaksi dekomposisi cemaran sianida telah banyak diteliti. Metode ini dianggap sebagai salah satu alternatif yang tidak memerlukan bahan kimia yang dipakai secara kontinu untuk mendekomposisi limbah cemaran. Oleh karena itu, metode ini dinilai jauh lebih ramah lingkungan dan

lebih efisien secara biaya. Proses fotokatalitik itu sendiri pun hanya memerlukan bantuan cahaya (foton) sebagai sumber energi untuk mengaktivasi material fotokatalis tersebut.

Tujuan penulisan makalah ini adalah memberikan tinjauan mengenai material fotokatalis yang paling banyak digunakan. Makalah ini membahas mekanisme fotokatalitik dan beberapa pengembangan dari material fotokatalis yang paling banyak digunakan serta kompilasi hasil penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti terkait dengan efektivitas material fotokatalis dalam meningkatkan reaksi degradasi sianida.

2. METODOLOGI

Penulisan tinjauan ini menggunakan metodologi deskriptif kualitatif dengan menjabarkan dan membandingkan hasil penelitian yang dilaporkan di berbagai artikel ilmiah.

3. PEMBAHASAN

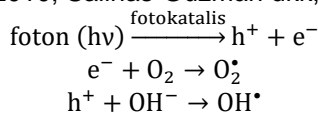
Mekanisme Fotokatalitik

Reaksi fotokatalitik adalah reaksi kimia yang dipercepat oleh adanya material fotokatalis dengan bantuan dari foton.

Mekanisme kerja fotokatalis dapat dijelaskan sebagai berikut. Foton dengan energi yang sesuai dengan celah pita energi mengeksitasi elektron pada material fotokatalis dari tingkat energi valensi menuju ke tingkat energi konduksi dan membentuk *hole* pada tingkat pita valensi. Elektron yang

tereksitasi pada tingkat energi konduksi bersifat mobil dan kemudian mengikat oksigen terlarut membentuk radikal oksigen (O_2^*), sedangkan *hole* yang terbentuk pada tingkat energi valensi mengikat elektron pada ion OH^- yang terdapat pada air sehingga membentuk radikal hidroksil (OH^*). Spesies-spesies O_2^* dan OH^* inilah yang berperan dalam mendekomposisi zat-zat cemar (Chiang dkk, 2002; Ijadpanah-Saravi dkk, 2016; Maya-Treviño dkk, 2018; Saleh dkk, 2010; Salinas-Guzmán dkk, 2010).

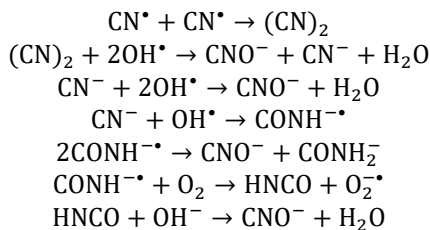
Berikut ini adalah reaksi pembentukan spesies-spesies O_2^* dan OH^* (Chiang dkk, 2002; Farrokhi dkk, 2013; Ijadpanah-Saravi dkk, 2016; Saleh dkk, 2010; Salinas-Guzmán dkk, 2010).



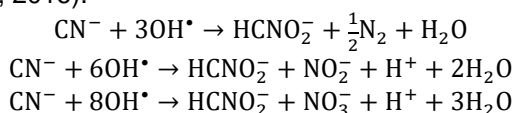
Apabila di dalam larutan terdapat ion sianida (CN^-) yang merupakan cemar, maka terjadi reaksi seperti di bawah ini.



Radikal sianida (CN^*) yang terbentuk dari reaksi tersebut akan beraksi membentuk ion sianat yang efektifitasnya lebih rendah sesuai dengan persamaan-persamaan reaksi di bawah ini (Chiang dkk, 2002; Farrokhi dkk, 2013; Ijadpanah-Saravi dkk, 2016; Saleh dkk, 2010; Salinas-Guzmán dkk, 2010).



Pada tahap akhir, ion sianat terdekomposisi karena bereaksi dengan OH^* membentuk bikarbonat, nitrat, dan nitrit berdasarkan persamaan reaksi berikut (Chiang dkk, 2002; Ijadpanah-Saravi dkk, 2016).



Material fotokatalis

Di antara berbagai material fotokatalis, titanium dioksida (TiO_2) dan seng oksida (ZnO) merupakan yang paling banyak digunakan dan paling efektif sebagai fotokatalis dalam reaksi dekomposisi sianida (Bozzi dkk, 2004; Farrokhi dkk, 2013; Janczarek dan Kowalska, 2021; Saleh dkk, 2010). TiO_2 dan ZnO memiliki kemampuan menyerap foton untuk teraktivasi pada rentang spektrum panjang gelombang yang lebar untuk

dapat membentuk radikal hidroksil (OH^*) dan oksigen radikal (O_2^*) di dalam larutan air (Ijadpanah-Saravi dkk, 2016; Janczarek dan Kowalska, 2021; Jayashree dan Ashokkumar, 2018; Saleh dkk, 2010; Salinas-Guzmán dkk, 2010; Zhao dkk, 2017). Kemampuan aktivasi pada TiO_2 dan ZnO ini tidak lepas dari struktur pita energi dan sifatnya yang secara intrinsik memiliki cacat-cacat pada kisi kristalnya yang membentuk tingkat-tingkat energi di antara celah pita energinya (Janczarek dan Kowalska, 2021; Jayashree dan Ashokkumar 2018; Mohar dkk, 2019; 2020; Zhao dkk, 2017). TiO_2 dalam bentuk anates memiliki celah pita energi 3.2 eV dan sangat banyak cacat alamiah kisi kristal berupa vakansi oksigen sehingga mampu menyerap cahaya hijau dan merah dan memiliki rapat elektron yang sangat tinggi (Zhao dkk, 2017). Sedangkan ZnO memiliki celah pita energi 3.37 eV dan cacat alamiah kisi kristal dominan berupa vakansi oksigen dan interstisi seng yang menjadikan ZnO memiliki rapat elektron yang tinggi dan mampu menyerap foton pada panjang gelombang cahaya tampak dengan rentang yang sangat besar (Bagabas dkk, 2013; Mohar dkk, 2019, 2020).

Sebagai material fotokatalis yang paling populer, TiO_2 banyak dilaporkan dalam beberapa artikel ilmiah mengenai efektifitas fotokatalitiknya terhadap CN^- (Baeissa, 2015; Bozzi dkk, 2004; Chiang dkk, 2002; Farrokhi dkk, 2013; Ijadpanah-Saravi dkk, 2016; Koohestani dan Sadrnezhad 2016; Salinas-Guzmán dkk, 2010). Ijadpanah-Saravi dkk (2016) mempelajari dekomposisi fotokatalitik CN^- menggunakan nanopartikel TiO_2 dengan dua fasa (rutil dan anates) di bawah pencahayaan ultraviolet (UV). Pada pengujian dengan variasi pH larutan dan konsentrasi TiO_2 yang dimasukkan ke dalam larutan, hasil optimal yang didapat untuk dekomposisi CN^- adalah pada pH 11 (Ijadpanah-Saravi dkk, 2016). Chiang dkk (2002) dan Koohestani dan Sadrnezhad (2016) memodifikasi TiO_2 dengan doping CuO untuk mendapatkan laju reaksi degradasi fotokatalitik CN^- yang lebih tinggi. Modifikasi lain pada TiO_2 juga dilaporkan oleh Baeissa (2015) melalui pembuatan komposit dengan sulfur (S), dan diperoleh hasil bahwa kadar optimum S untuk laju reaksi fotokatalitik CN^- tertinggi di bawah pencahayaan floresens biru dengan filter UV adalah 0.3% rasio berat S/ TiO_2 .

Peningkatan efektifitas fotokatalitik ZnO melalui berbagai jenis modifikasi juga banyak diinvestigasi pada beberapa penelitian untuk meningkatkan kinerja fotokatalitiknya terhadap CN^- (Bagabas dkk, 2013; Karunakaran dkk, 2010, 2011; Maya-Treviño dkk, 2018; Saleh dkk, 2010;

Salinas-Guzmán dkk, 2010). Salinas-Guzman dkk (2010) memodifikasi ZnO melalui proses sol-jel dan sensitasi menggunakan pewarna kobalt ftalosianin (CoPc) untuk mendapatkan laju reaksi dekomposisi fotokatalitik CN^- lebih tinggi di bawah cahaya tampak. Maya-Trevino dkk (2018) juga menginvestigasi pengaruh sensitasi tembaga ftalosianin (CuPc) terhadap efektivitas reaksi dekomposisi CN^- pada ZnO yang diproses secara sol-jel. Saleh dkk (2010) menggabungkan *multi-walled carbon nanotube* (MWCNT) dan ZnO menjadi komposit yang memiliki efektivitas fotokatalitik lebih baik terhadap CN^- pada pencahayaan menggunakan laser Nd-doped yttrium aluminium garnet (Nd:YAG) pada panjang gelombang 355 nm. Karunakaran dkk (2011) membuat nanokomposit ZnO/TiO₂ yang memiliki kinerja fotokatalitik terhadap CN^- lebih baik dibandingkan TiO₂ tanpa penambahan ZnO. Selain modifikasi di atas, penambahan doping elemen Ce (Karunakaran dkk, 2010) dan senyawa CuO

(Bagabas dkk, 2013) juga dilaporkan dapat meningkatkan kemampuan nanopartikel ZnO dalam mendetoksifikasi cemaran CN^- .

Tabel 1 dan Tabel 2 menampilkan penjabaran beberapa macam modifikasi yang dilakukan untuk meningkatkan efektivitas fotokatalitik TiO₂ dan ZnO, secara berurutan.

Tinjauan mengenai efek pengotor Cu pada larutan

Limbah tailing sisa pengolahan emas umumnya mengandung banyak pengotor berupa berbagai macam mineral. Di antara mineral-mineral tersebut, terdapat kandungan Cu yang merupakan elemen ikutan Au (Ritcey, 2005). Keberadaan Cu dalam larutan air mengandung CN^- telah diketahui mempengaruhi mekanisme dekomposisi kimia CN^- yang dianggap menguntungkan karena mempercepat laju reaksi, seperti yang telah dilaporkan pada beberapa

Tabel 2. Modifikasi-modifikasi untuk meningkatkan efektivitas fotokatalitik TiO₂ yang dilaporkan pada beberapa artikel.

Penulis	Metode modifikasi	Capaian penelitian untuk laju degradasi fotokatalitik sianida tertinggi
Baeissa (2015)	Pembuatan material fotokatalitik komposit S-TiO ₂	Kondisi optimum pada 3% berat S
Chiang dkk (2002)	Doping CuO terhadap TiO ₂	Kondisi optimum pada 0.1% rasio atom Cu/Ti
Ijadpanah-Saravi dkk (2015)	TiO ₂ dengan dua fasa: rutil dan anates	Kondisi optimum pada pH 11
Koohestani dan Sadrnezhad (2016)	Doping CuO terhadap TiO ₂	Kondisi optimum pada 7.5% berat CuO

Tabel 1. Modifikasi-modifikasi untuk meningkatkan efektivitas fotokatalitik ZnO yang dilaporkan pada beberapa artikel.

Penulis	Metode modifikasi	Capaian penelitian yang signifikan terhadap laju degradasi fotokatalitik sianida
Bagabas dkk (2013)	Doping CuO terhadap ZnO	Kondisi optimum pada 3% rasio berat CuO/ZnO
Karunakaran dkk (2010)	Doping Ce terhadap ZnO	Ce-ZnO memiliki efektivitas lebih tinggi daripada ZnO dan CeO yang masing-masing berdiri sendiri
Karunakaran dkk (2011)	Pembuatan material fotokatalitik komposit ZnO/TiO ₂	ZnO/TiO ₂ efektivitas lebih tinggi daripada TiO ₂ yang berdiri sendiri
Maya-Trevino dkk (2018)	Sensitasi ZnO dengan tembaga-ftalosianin (CuPc)	ZnO yang disensitasi dengan CuPc 0.1% berat memiliki efektivitas melampaui TiO ₂ pada pencahayaan UV maupun cahaya tampak dan CuPc 0.5% berat memiliki efektivitas melampaui TiO ₂ baik pada cahaya tampak
Saleh dkk (2002)	Pembuatan material fotokatalitik komposit MWCNT/ZnO	Komposit MWCNT/ZnO memiliki efektivitas lebih tinggi daripada ZnO dan MWCNT yang masing-masing berdiri sendiri
Salinas-Guzman dkk (2010)	Proses sol-jel terhadap ZnO dan sensitasi ZnO dengan kobalt-ftalosianin (CoPc)	ZnO yang diproses dengan metode sol-jel memiliki efektivitas lebih tinggi TiO ₂ dan ZnO yang disensitasi dengan CoPc memiliki efektivitas yang lebih tinggi lagi.

artikel ilmiah (Kuyucak dan Akcil, 2013; Ritcey, 2005).

Hal serupa juga teramati pada reaksi dekomposisi fotokatalitik, di mana laju degradasi fotokatalitik CN⁻ juga meningkat dengan adanya Cu, sehingga beberapa peneliti justru sengaja memasukkan Cu dalam bentuk senyawa CuO untuk memodifikasi material fotokatalis (Bagabas dkk, 2013; Chiang dkk, 2002; Koohestani dan Sadrnezhad 2016). Chiang dkk (2002) memodifikasi TiO₂ dengan CuO, dan didapatkan hasil laju reaksi degradasi fotokatalitik CN⁻ tertinggi pada konsentrasi doping 0.10% rasio atom Cu/Ti. Sedangkan Koohestani dan Sadrnezhad (2016) mendapatkan bahwa efisiensi dan laju degradasi fotokatalitik CN⁻ tertinggi didapatkan pada 7.5 %berat CuO dalam material fotokatalis komposit TiO₂/CuO. Selain TiO₂ yang efektivitasnya bertambah dengan modifikasi tersebut, ZnO juga dilaporkan mengalami peningkatan efektivitas dengan perlakuan yang sama, seperti dilaporkan oleh Bagabas dkk (2013) yang mendapatkan kadar optimum pada 3 %berat CuO/ZnO.

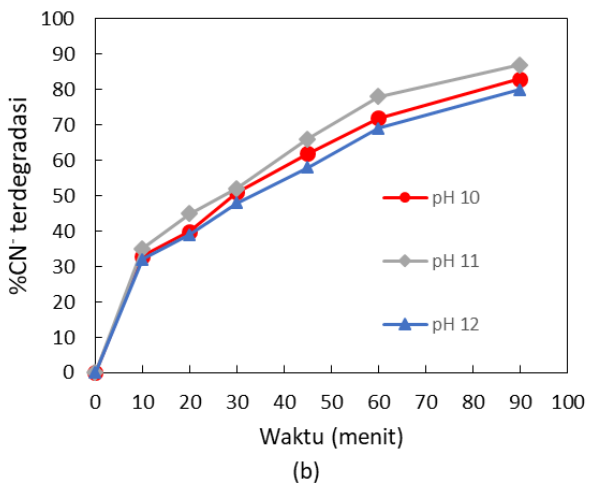
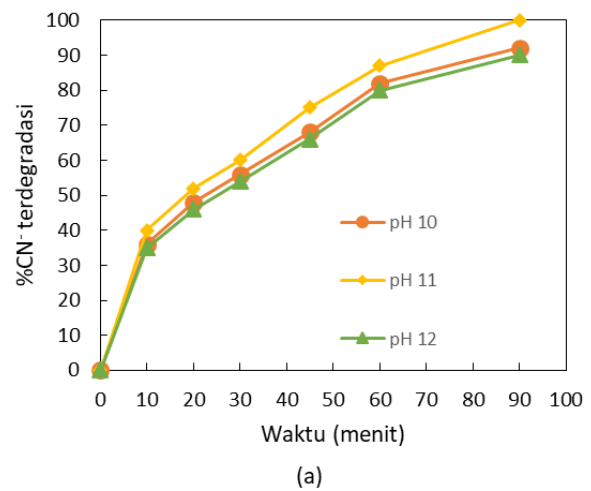
Tinjauan mengenai efek pH larutan

Beberapa penulis melaporkan bahwa pH juga berpengaruh pada reaksi degradasi fotokatalitik CN⁻, di mana pH yang rendah cenderung menghasilkan laju degradasi fotokatalitik CN⁻ yang rendah pula (Farrokhi dkk, 2013; Ijadpanah-Saravi dkk, 2016). Hal ini tidak lepas dari mekanisme reaksi fotokatalitik yang melibatkan pembentukan spesies OH[•] yang diperlukan pada reaksi tersebut (Ijadpanah-Saravi dkk, 2016). Larutan dengan pH rendah memiliki konsentrasi ion OH⁻ yang sedikit sehingga OH[•] yang terbentuk juga sedikit.

Oleh karena adanya pengaruh pH seperti yang dijelaskan di atas, beberapa peneliti cenderung melakukan eksperimen reaksi degradasi foto-katalitik CN⁻ pada pH tinggi (Baeissa 2015; Chiang dkk, 2002; Ijadpanah-Saravi dkk, 2016; Karunakaran dkk, 2011, 2010; Koohestani dan Sadrnezhad, 2016; Maya-Treviño dkk, 2018; Salinas-Guzmán dkk, 2010). Ijadpanah-Saravi dkk (2016) mendapatkan efektivitas TiO₂ dua fasa tertinggi pada pH 11 pada konsentrasi TiO₂ 0.5 g/l dan 1 g/l (Gambar 1).

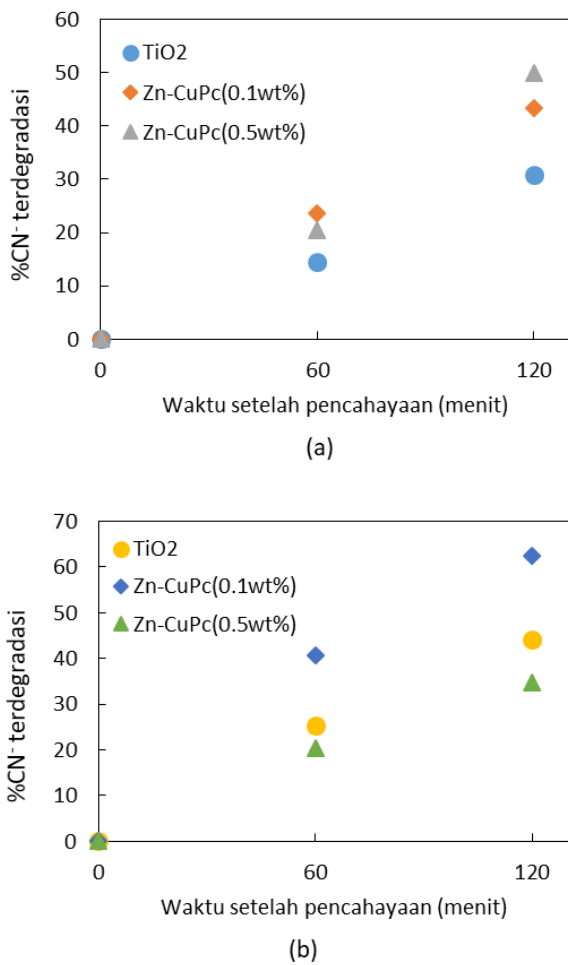
TiO₂ dan ZnO dalam bentuk nanopartikel memiliki kinerja fotokatalitik terhadap CN⁻ berbeda tergantung dari pH larutan. Umumnya, TiO₂ memiliki efektivitas yang lebih baik daripada ZnO pada pH tinggi Akan tetapi, perlakuan doping elemen Ce (Karunakaran dkk, 2010) dan sensitasi (Maya-Treviño dkk, 2018; Salinas-Guzmán dkk, 2010) dapat menjadikan ZnO juga efektif sebagai fotokatalis untuk degradasi CN⁻ pada pH tinggi. Hal

tersebut berkaitan dengan penyerapan foton yang mengaktivasi fotokatalis (akan dibahas lebih lanjut). Gambar 2 menunjukkan bahwa perlakuan proses sol gel pada ZnO (ZnOsg) dan perlakuan sol gel disertai dengan sensitasi menggunakan CoPc (ZnOCOPc) juga dapat menaikkan efektivitas degradasi fotokatalitik ZnO terhadap CN⁻ sampai melampaui TiO₂ pada pH 11 (Salinas-Guzman dkk, 2010). Gambar 3 memperlihatkan perbedaan efektivitas degradasi fotokatalitik CN⁻ dengan material fotokatalis TiO₂ dan ZnO yang disensitasi dengan CuPc pada pH 11, di mana terlihat sensitasi dengan 0.1% berat CuPc pada ZnO memiliki laju degradasi fotokatalitik CN⁻ lebih unggul dibandingkan TiO₂ (Maya-Treviño dkk,



Gambar 1. Pengaruh pH pada efektivitas TiO₂ dua fasa (rutil-anates) terhadap reaksi degradasi fotokatalitik CN⁻. (a) pada konsentrasi TiO₂ 0.5 g/l dan (b) pada konsentrasi TiO₂ 1 g/l. (data diperoleh dari Ijadpanah-Saravi dkk (2016))

2018).

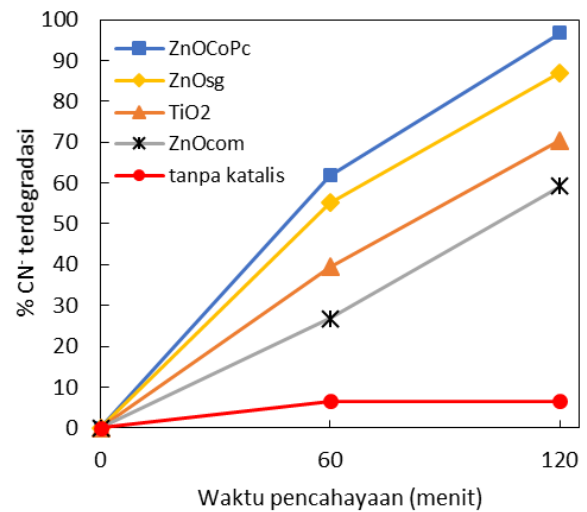


Gambar 3. Perbandingan reaksi degradasi fotokatalitik CN⁻ pada material fotokatalis TiO₂ dan ZnO yang disensitasi Cu-ftalosanin (CuPc) 0.1% berat dan 0.5% berat di bawah pencahayaan (a) cahaya tampak dan (b) UV. Percobaan dilakukan pada pH 11. (data diambil dari Maya-Trevino dkk, 2018)

Tinjauan mengenai penyerapan foton untuk aktivasi fotokatalis

Foton yang ideal digunakan untuk reaksi fotokatalitik adalah foton dengan panjang gelombang yang sesuai dengan besar celah pita energi material fotokatalis (Mohar dkk, 2019). Untuk material fotokatalis seperti TiO₂ dan ZnO, foton yang ideal untuk mengaktifkannya berada pada rentang panjang gelombang UV. Akan tetapi, pencahayaan alami yang didapat dari sinar matahari tidak memungkinkan fotokatalis mendapatkan UV dengan intensitas yang cukup. Oleh karena itu, spektrum foton lain seperti cahaya tampak juga harus bisa dimanfaatkan dengan baik oleh fotokatalis.

Untuk membuat material fotokatalis yang baik untuk keperluan detoksifikasi CN⁻, suatu



Gambar 2. Perbandingan reaksi degradasi fotokatalitik CN⁻ pada material fotokatalis TiO₂, ZnO yang dibeli secara komersial (ZnOcom), ZnO yang diproses secara sol gel (ZnOsg), dan ZnO yang diproses sol gel dan disensitasi dengan Co-ftalosanin (ZnOCOPc) yang diujicobakan pada pH 11 menggunakan cahaya tampak menggunakan lampu halogen. (data diambil dari Salinas-Guzman dkk, 2010)

material harus dapat memanfaatkan sumber foton alami yaitu sinar matahari yang terdiri spektrum foton dengan panjang gelombang yang lebar, bukan hanya terdiri dari UV, tetapi juga cahaya tampak, infra merah, dll. Seperti telah dibahas sedikit sebelumnya di atas, TiO₂ dan ZnO memiliki beberapa tingkat energi di dalam celah pita energinya akibat adanya cacat kisi kristal yang memungkinkan TiO₂ dan ZnO untuk menyerap foton dalam rentang panjang gelombang cahaya tampak (Bagabas dkk, 2013; Janczarek dan Kowalska, 2021; Jayashree dan Ashokkumar, 2018; Mohar dkk, 2019, 2020; Zhao dkk, 2017). Kemampuan menyerap cahaya tampak tersebut tentunya dapat ditingkatkan dengan merekayasa cacat-cacat kisi kristal (Janczarek dan Kowalska, 2021; Jayashree dan Ashokkumar, 2018; Mohar dkk, 2016). Selain itu, pemberian doping elemen juga memunculkan tingkat energi di antara celah pita energi selain mendorong terjadinya terbentuknya cacat-cacat alamiah yang lebih banyak (Janczarek dan Kowalska 2021; Mohar dkk, 2020).

Modifikasi proses pembuatan dan sensitasi juga dapat meningkatkan penyerapan foton sehingga menaikkan kinerja suatu material fotokatalis seperti yang dilaporkan oleh Salinas-Guzman dkk (2010) yang membandingkan reaksi dekomposisi fotokatalitik CN⁻ di bawah cahaya tampak pada beberapa jenis fotokatalis: TiO₂, ZnO

komersial (ZnOcom), ZnO yang diproses secara sol-jel (ZnOsg), dan ZnO yang diproses secara sol-jel dan disensitasi dengan kobalt ftalosianin (ZnO-CoPc). ZnOcom memiliki kinerja lebih rendah dibandingkan TiO₂, namun ZnOsg dan ZnO-CoPc kinerjanya meningkat secara signifikan melampaui TiO₂ (Salinas-Guzmán dkk, 2010). Hal serupa juga dilaporkan oleh Maya-Trevino dkk (2018) yang mengamati reaksi dekomposisi fotokatalitik CN⁻ di bawah pencahayaan UV dan cahaya tampak pada ZnO yang diproses secara sol-jel dan disensitasi dengan CuPc (ZnCu) dan membandingkannya dengan TiO₂. Terlihat bahwa penambahan 0.1% berat CuPc mampu meningkatkan efektivitas fotokatalitik ZnO terhadap CN⁻ dengan sangat signifikan sehingga melampaui TiO₂ baik pada pencahayaan UV maupun cahaya tampak, dan ZnO dengan penambahan 0.5% berat CuPc memiliki efektivitas melampaui TiO₂ pada cahaya tampak (Maya-Treviño dkk, 2018).

4. KESIMPULAN

Penggunaan material fotokatalis untuk mempercepat laju degradasi sianida merupakan metode alternatif yang ramah lingkungan dan lebih efisien dari segi biaya karena reaksi fotokatalitik hanya memerlukan bantuan cahaya dan material fotokatalis dapat digunakan berulang-ulang sehingga tidak memerlukan bahan kimia yang ditambahkan secara kontinu. Oleh karena itu, penggunaan material fotokatalis dapat dipertimbangkan untuk diaplikasikan pada proses pengolahan limbah pertambangan emas yang mengandung sianida.

TiO₂ dan ZnO merupakan material fotokatalis yang paling banyak digunakan di antara berbagai material fotokatalis telah dipelajari oleh para peneliti. Hal ini terkait dengan sifat kedua material tersebut yang dapat menyerap cahaya pada berbagai spektrum panjang gelombang karena adanya cacat-cacat kisi kristal yang menimbulkan adanya tingkat energi pada celah pita energinya.

Berdasarkan tinjauan pada makalah ini, terlihat bahwa berbagai faktor dapat mempengaruhi efektivitas fotokatalis, terutama TiO₂ dan ZnO, seperti pH larutan, kondisi pencahayaan, dan modifikasi dari material fotokatalis. Berbagai cara untuk meningkatkan efektivitas TiO₂ dan ZnO pada reaksi degradasi fotokatalitik CN⁻ yang menjadi tinjauan pada makalah ini antara lain modifikasi proses pembuatan, pengembangan komposit, pemberian doping elemen, dan sensitasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Baeissa, E. S. 2015. "Synthesis and Characterization of Sulfur-Titanium Dioxide Nanocomposites for Photocatalytic Oxidation of Cyanide Using Visible Light Irradiation." *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis* 36(5):698–704.
- Bagabas, Abdulaziz, Mohamed F. A. Aboud, Reda M. Mohamed, Zeid AL-Othman, Ahmad S. Alshammari, Emad S. Addurihem. 2013. "Synthesis, Characterization, and Cyanide Photodegradation over Cupric Oxide-Doped Zinc Oxide Nanoparticles." Pp. 327–38 pada *ACS Symposium Series Vol. 1124*. Washington, DC: American Chemical Society.
- Bozzi, A., I. Guasaquillo, J. Kiwi. 2004. "Accelerated Removal of Cyanides from Industrial Effluents by Supported TiO₂ Photocatalysts." *Applied Catalysis B: Environmental* 51(3):203–11.
- Chiang, K., R. Amal, T. Tran. 2002. "Photocatalytic Degradation of Cyanide Using Titanium Dioxide Modified with Copper Oxide." *Advances in Environmental Research* 6(4):471–85.
- Farrokhi, Mehrdad, Jae Kyu Yang, Seung Mok Lee, Mehdi Shirzad-Siboni. 2013. "Effect of Organic Matter on Cyanide Removal by Illuminated Titanium Dioxide or Zinc Oxide Nanoparticles." *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 11(1):1.
- Ijadpanah-Saravi, Hossein, Saeed Dehestaniathar, Ahmad Khodadadi-Darban, Mehdi Zolfaghari, Saeed Saeedzadeh. 2016. "Photocatalytic Decomposition of Cyanide in Pure Water by Biphasic Titanium Dioxide Nanoparticles." *Desalination and Water Treatment* 57(43):20503–10.
- Janczarek, Marcin dan Ewa Kowalska. 2021. "Defective Dopant-Free TiO₂ as an Efficient Visible Light-Active Photocatalyst." *Catalysts* 11(8):978.
- Jayashree, Swaminathan dan Meiyazhagan Ashokkumar. 2018. "Switchable Intrinsic Defect Chemistry of Titania for Catalytic Applications." *Catalysts* 8(12):601.
- Karunakaran, C., G. Abiramasundari, P. Gomathisankar, G. Manikandan, V. Anandi. 2011. "Preparation and Characterization of ZnO-TiO₂ nanocomposite for Photocatalytic Disinfection of Bacteria and Detoxification of Cyanide under Visible Light." *Materials Research Bulletin* 46(10):1586–92.
- Karunakaran, Chockalingam, Paramasivan Gomathisankar, Govindasamy Manikandan. 2010. "Preparation and Characterization of Antimicrobial Ce-Doped ZnO Nanoparticles for Photocatalytic Detoxification of Cyanide."

- Materials Chemistry and Physics 123:585–94.
- Koohestani, Hassan dan Sayed Khatiboleslam Sadrnezhaad. 2016. “*Photocatalytic Degradation of Methyl Orange and Cyanide by Using TiO₂/CuO Composite.*” *Desalination and Water Treatment* 57(46):22029–38.
- Kuyucak, Nural dan Ata Akcil. 2013. “*Cyanide and Removal Options from Effluents in Gold Mining and Metallurgical Processes.*” *Minerals Engineering* 50–51:13–29.
- Maya-Treviño, M. L., J. L. Guzmán-Mar, L. Hinojosa-Reyes, A. Hernández-Ramírez. 2018. “*Synthesis and Photocatalytic Activity of ZnO-CuPc for Methylene Blue and Potassium Cyanide Degradation.*” *Materials Science in Semiconductor Processing* 77:74–82.
- Mohar, R. S., Isnaeni, G. Hadiko. 2019. “*Synthesis of Immobilized Nanostructured ZnO Grown on Glass and Its Photocatalytic Activity for Cyanide Degradation.*” P. 012013 pada IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 541.
- Mohar, Rahmat Setiawan, S. Iwan, Dede Djuhana, Cuk Imawan, Adhi Harmoko, Vivi Fauzia. 2016. “*Post-Annealing Effect on Optical Absorbance of Hydrothermally Grown Zinc Oxide Nanorods.*” P. 20024 pada AIP Conference Proceedings. Vol. 1729. AIP Publishing.
- Mohar, Rahmat Setiawan, Iwan Sugihartono, Vivi Fauzia, Akrajas Ali Umar. 2020. “*Dependence of Optical Properties of Mg-Doped ZnO Nanorods on Al Dopant.*” *Surfaces and Interfaces* 19:100518.
- Ritcey, Gordon M. 2005. “*Tailings Management in Gold Plants.*” *Hydrometallurgy* 78:3–20.
- Saleh, Tawfik A., M. A. Gondal, Q. A. Drmosh. 2010. “*Preparation of a MWCNT/ZnO Nanocomposite and Its Photocatalytic Activity for the Removal of Cyanide from Water Using a Laser.*” *Nanotechnology* 21(49):495705.
- Salinas-Guzmán, R. R., J. L. Guzmán-Mar, L. Hinojosa-Reyes, J. M. Peralta-Hernández, A. Hernández-Ramírez. 2010. “*Enhancement of Cyanide Photocatalytic Degradation Using Sol-Gel ZnO Sensitized with Cobalt Phthalocyanine.*” *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 54(1):1–7.
- Zhao, Huilei, Fuping Pan, Ying Li. 2017. “*A Review on the Effects of TiO₂ Surface Point Defects on CO₂ Photoreduction with H₂O.*” *Journal of Materiomics* 3(1):17–32.