



MODIFIED TITANIUM OXIDE WITH METAL DOPING AS PHOTOCATALYST IN PHOTOCHEMICAL WATER SPLITTING

Haris Prayudha Setyawan dan Okta Suryani*

Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Jln. Prof. Dr. Hamka Air Tawar, Padang, 25131, Indonesia;

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 Nov 2023,

Revised 14 Jan 2024,

Accepted 18 Jan 2024,

Available online 30 Jan 2024

Keywords:

- ✓ Titanium oxide
- ✓ Metal doping
- ✓ Photocatalyst
- ✓ Photochemical water splitting
- ✓ Renewable energy

*corresponding author:

okta.suryani.os@fmipa.unp.ac.id

Phone: +6285333770638;

<https://doi.org/10.31938/jsn.v14i1.652>

ABSTRACT

This article focuses on the modification of titanium oxide (TiO_2) using metal doping to improve its photocatalytic activity in photochemical water splitting systems. TiO_2 is a widely used photocatalyst, which has a wide band gap energy and rapid recombination of photogenerated electron-hole pairs, thus reducing the efficiency of photochemical water splitting systems. Metal doping, such as Pt, Cu, Fe, and V metals can lower the band gap energy of the photocatalyst, increase the absorption of visible light, and reduce electron-hole recombination. Modified TiO_2 shows promising results in photochemical water splitting, utilising a wider range of visible light from the solar spectrum thereby improving the efficiency of the photochemical water splitting system.

ABSTRAK

Modifikasi Titanium Oksida dengan Doping Logam sebagai Fotokatalis pada Photochemical Water Splitting

Artikel ini berfokus pada modifikasi titanium oksida (TiO_2) menggunakan doping logam untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitiknya dalam sistem *photochemical water splitting*. TiO_2 merupakan fotokatalis yang banyak digunakan, memiliki energi celah pita yang lebar dan rekombinasi yang cepat pasangan elektron-hole yang dihasilkan secara fotogenerasi, sehingga menurunkan efisiensi dari sistem *photochemical water splitting*. Doping logam, seperti logam Pt, Cu, Fe, dan V dapat menurunkan energi celah pita fotokatalis, meningkatkan absorpsi cahaya tampak, dan mengurangi rekombinasi elektron-hole. TiO_2 yang dimodifikasi menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam pemisahan air secara fotokimia, dengan memanfaatkan cahaya tampak yang lebih luas dari spektrum matahari sehingga meningkatkan efisiensi sistem *photochemical water splitting*.

Kata Kunci: Titanium Oksida; Doping Logam; Fotokatalisis; *Photochemical Water Splitting*; Energi terbarukan

PENDAHULUAN

Dunia global saat ini menghadapi dua permasalahan utama, yaitu krisis energi yang disebabkan oleh menipisnya cadangan energi fosil sebagai sumber energi utama dan dampak penggunaan energi fosil terhadap lingkungan global, seperti perubahan iklim akibat emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari pembakaran energi fosil. Gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (N_2O) terperangkap di atmosfer dan meningkatkan suhu rata-rata global. Perubahan iklim dapat menyebabkan berbagai masalah, seperti kekeringan, kebakaran hutan, kenaikan permukaan laut, banjir, kerusakan ekosistem, kepunahan berbagai spesies, dan kerugian ekonomi (Harjanto, 2016).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dengan memanfaatkan prinsip fotosintesis, pemecahan molekul air menjadi hidrogen menggunakan energi matahari, merupakan metode konversi energi yang menjanjikan untuk menyimpan energi matahari dalam bentuk bahan bakar kimia (Suryani *et al.*, 2019). Hal ini disebabkan karena hidrogen yang dihasilkan merupakan bahan bakar dengan densitas energi yang tinggi dan memenuhi persyaratan energi bersih karena tidak menghasilkan CO_2 pada saat pembakaran. Proses pemecahan molekul air ini dikenal sebagai *water splitting*.

Salah satu sistem *water splitting* yang menarik minat cukup besar beberapa tahun terakhir, karena merupakan salah satu metode yang paling menjanjikan untuk produksi energi hidrogen dalam skala besar, adalah *photochemical*



water splitting. Photochemical water splitting merupakan suatu sistem pemisahan molekul air (H_2O) menjadi gas hidrogen (H_2) dan air (O_2) oleh fotokatalis dengan bantuan cahaya matahari (Maeda & Domen, 2010). Proses ini merupakan salah satu metode produksi hidrogen yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca. Hidrogen yang dihasilkan dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang memiliki nilai kalor tinggi dan tidak menimbulkan polusi saat dibakar (Kawawaki *et al.*, 2021).

Titanium oksida (TiO_2) merupakan salah satu material semikonduktor yang banyak digunakan sebagai fotokatalis dalam sistem *photochemical water splitting*, karena memiliki keunggulan seperti stabilitas tinggi, kelimpahan, dan toksisitas yang rendah (Eidsvåg *et al.*, 2021; Suryani *et al.*, 2019). Namun, titanium oksida juga memiliki beberapa kelemahan, seperti aktivitas fotokatalitik rendah, memiliki nilai energi celah pita yang cukup lebar (3,0 eV) yang hanya mampu menyerap cahaya matahari pada daerah UV, yang merupakan 4% dari spektrum matahari, serta rekombinasi elektron-hole tinggi yang mengurangi efisiensi *photochemical water splitting* (Eidsvåg *et al.*, 2021; Jaafar *et al.*, 2017). Oleh karena itu, perlu dilakukan modifikasi terhadap titanium oksida untuk meningkatkan kinerja *photochemical water splitting*.

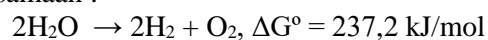
Salah satu metode modifikasi yang efektif adalah doping logam, seperti Pt, Cu, Fe, dan V. Doping logam dapat mempengaruhi sifat struktur, morfologi, optik, elektronik, dan fotokatalitik dari titanium oksida. Doping logam dapat menurunkan *band gap* titanium oksida, meningkatkan absorpsi cahaya tampak, mengurangi rekombinasi elektron-lubang, meningkatkan konduktivitas elektronik, dan menambah situs aktif permukaan (Tian *et al.*, 2021). Artikel ini memberikan gambaran mengenai bagaimana doping logam dapat meningkatkan efisiensi fotokatalitik TiO_2 . Kajian ini juga mencakup beberapa jenis logam yang digunakan dalam doping dan bagaimana mereka memengaruhi aktivitas fotokatalitik TiO_2 . Oleh karena itu, tinjauan ini memberikan wawasan baru tentang potensi doping logam dalam meningkatkan kinerja TiO_2 sebagai fotokatalis dalam *photochemical water splitting*. Artikel ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan *photochemical water splitting* sebagai teknologi produksi hidrogen yang hemat energi dan ramah lingkungan.

PHOTOCHEMICAL WATER SPLITTING

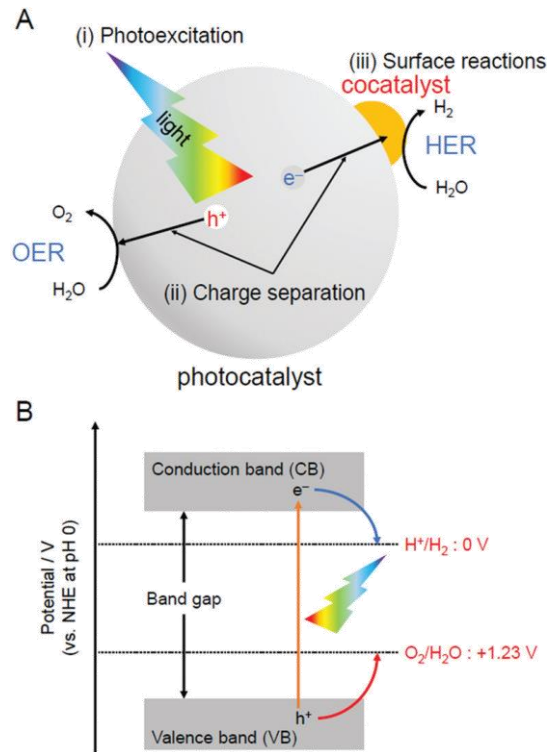
Photochemical water splitting merupakan suatu sistem pemisahan molekul air (H_2O) menjadi gas hidrogen (H_2) dan air (O_2) oleh fotokatalis dengan bantuan cahaya matahari (Maeda & Domen, 2010). Reaksi yang terjadi merupakan reaksi fotokatalitik yang dapat menghasilkan hidrogen secara langsung dari air dan sinar matahari. Oleh karena itu, reaksi pemecahan air secara fotokatalitik dianggap sebagai salah satu reaksi produksi energi terbersih bagi kehidupan manusia (Kawawaki *et al.*, 2021).

Percobaan *water splitting* atau pemecahan molekul air pertama kali dilakukan oleh dua ilmuwan Jepang bernama Fujishima dan Honda pada tahun 1972 dengan menggunakan titanium oksida (TiO_2) sebagai fotoanoda dan platina (Pt) sebagai katoda (Jaafar *et al.*, 2017). Eksperimen ini menunjukkan kemungkinan menggunakan sinar matahari untuk menghasilkan hidrogen dan oksigen dari air, yang berpotensi digunakan sebagai sumber energi yang bersih dan terbarukan. Penemuan ini telah membuka jalan untuk penelitian lebih lanjut di bidang energi matahari dan memiliki implikasi yang signifikan untuk mengatasi tantangan energi global.

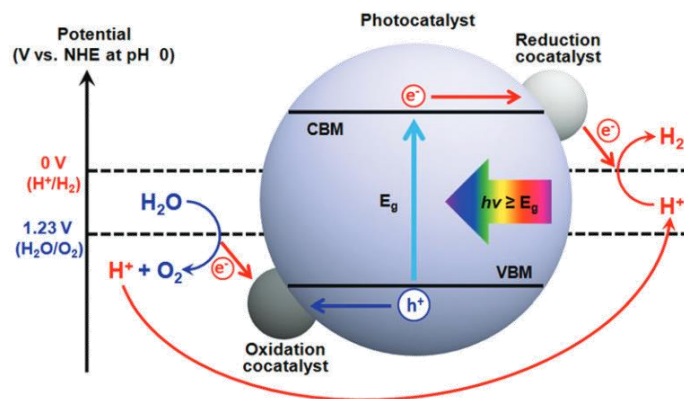
Produksi hidrogen melalui *water splitting* menggunakan energi matahari merupakan salah satu pendekatan yang paling penting dalam konversi energi matahari menjadi energi kimia. Dalam proses ini, energi yang diberikan oleh radiasi matahari disimpan dalam ikatan kimia hidrogen diatomik, menggunakan air sebagai satu-satunya reaktan (Wang *et al.*, 2019). Secara keseluruhan air dipecah menjadi hidrogen dan oksigen seperti yang ditunjukkan dalam persamaan :



Untuk mendorong reaksi pemecahan air, semikonduktor tereksitasi oleh foton yang memiliki energi lebih besar dari celah pita. Dalam hal ini, elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi sementara *hole* tetap berada di pita valensi. Elektron dan *hole* yang dihasilkan fotogenerasi ini masing-masing mampu mereduksi H^+ dan oksidasi H_2O , jika bagian bawah pita konduksi terletak pada potensi yang lebih negatif daripada potensi reduksi H^+ menjadi H_2 (0 V vs NHE pada pH = 0). Selain itu, bagian atas pita valensi harus berada pada nilai yang lebih positif daripada potensi oksidasi H_2O menjadi O_2 (1,23 V vs NHE pada pH = 0) (Wang *et al.*, 2019).



Gambar 1. (A) Skema Reaksi Fotokatalitik: (i) Fotoeksitasi, (ii) Pemisahan Muatan, dan (iii) Reaksi Permukaan. (B) Hubungan antara Struktur Pita Semikonduktor dan Potensial Redoks Pemisahan Air. Sumber : (Kawawaki *et al.*, 2021)



Gambar 2. Skema Fotokatalisis Sumber : (Wang *et al.*, 2019)

Gambar 1 menggambarkan model dasar pemisahan air pada fotokatalis semikonduktor. Ketika semikonduktor menyerap cahaya dengan energi yang lebih besar dari celah pita, elektron tereksitasi dari pita valensi yang terisi ke pita konduksi yang tidak terisi, menghasilkan elektron tereksitasi dan *hole* sebagai langkah pertama (Takata & Domen, 2017). Selanjutnya, pasangan elektron-hole yang dihasilkan berdifusi ke

permukaan partikel fotokatalis dan menimbulkan reaksi reduksi-oksidasi berikut: *Hydrogen evolution reaction* (HER) oleh reduksi H⁺ :

$$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$$
Oxygen evolution reaction (OER) oleh oksidasi H₂O :

$$2\text{H}_2\text{O} + 4\text{h}^+ \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+$$
 (Kim *et al.*, 2019; Takata & Domen, 2017).

Hydrogen dan oksigen diproduksi dari air melalui tiga proses berikut: (i) eksitasi elektron dari pita valensi (VB) ke pita konduksi (CB) dari fotokatalis dengan iradiasi cahaya, (ii) transfer muatan elektron tereksitasi dan *hole* ke permukaan fotokatalis, dan (iii) reduksi dan oksidasi air oleh elektron tereksitasi dan *hole* (Kawawaki *et al.*, 2021).

Secara teoritis, ketika tepi bawah CB fotokatalis semikonduktor berada di sisi negatif dari potensial reduksi air (0V vs *normal hydrogen electrode* (NHE)), reaksi reduksi air berlangsung dan diproduksi H₂ (*hydrogen evolution reaction*, HER). Jika tepi atas VB fotokatalis semikonduktor berada di sisi positif dari potensial oksidasi air (1,23 V vs NHE), maka reaksi oksidasi air berlanjut dan dihasilkan O₂ (*oxygen evolution reaction*, OER) (Kawawaki *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2019).

FOTOKATALIS

Fotokatalis adalah zat yang mempercepat reaksi kimia melalui keberadaan katalis saat terkena cahaya (Renganathan *et al.*, 2015). Fotokatalis digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk produksi bahan bakar terbarukan (Wang *et al.*, 2019), pengolahan air limbah, dan fotodegradasi polutan organik (Jiang *et al.*, 2021). Proses fotokatalisis merupakan suatu proses perubahan laju reaksi kimia akibat dari pengaruh radiasi cahaya pada rentang spektrum tertentu dengan melibatkan suatu katalis (Aroob *et al.*, 2023).

Skema dari fotokatalisis dapat dilihat dari Gambar 2, dimana terdapat empat tahapan penting dalam proses fotokatalisis, yaitu: (i) penyerapan cahaya untuk menghasilkan pasangan elektron-*hole*; (ii) pemisahan muatan tereksitasi; (iii) transfer elektron dan *hole* ke permukaan fotokatalis; (iv) reaksi redoks pada permukaan fotokatalis (Kim *et al.*, 2019; Zhu & Wang, 2017). Penyerapan cahaya dan fotoeksitasi elektron-*hole* yang dihasilkan merupakan faktor utama yang menentukan reaksi fotokatalitik. Fotokatalis yang digunakan dalam reaksi fotokatalitik biasanya merupakan bahan semikonduktor, seperti titanium dioksida (TiO₂) atau seng oksida (ZnO) (Mandade, 2021).

Secara umum, suatu fotokatalis terdiri dari partikel semikonduktor dan nanopartikel *co*-katalis, sehingga fotokatalis merupakan suatu bahan yang bifungsional. Semikonduktor berfungsi sebagai penyerap cahaya dan penghasil

muatan, sedangkan *co*-katalis mendorong reaksi redoks permukaan dengan kontrol kinetik (Takata & Domen, 2017).

Semikonduktor merupakan bahan yang konduktivitas listriknya berada diantara konduktor dan isolator. Ada dua jenis semikonduktor yaitu semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik. Semikonduktor intrinsik dibuat sangat murni secara kimiawi, dan hanya terdiri dari satu jenis elemen. Contoh semikonduktor intrinsik adalah silikon dan germanium. Semikonduktor ekstrinsik adalah semikonduktor yang tidak murni atau didoping (Balkan *et al.*, 2021).

Pada *water splitting system*, semikonduktor yang digunakan sebagai fotokatalis harus memenuhi beberapa syarat, diantaranya memiliki nilai celah pita atau *bandgap* di atas 1,23 eV (Wang *et al.*, 2019), pita valensi atau *valance band* semikonduktor harus terletak pada potensial yang lebih negatif dari potensial reduksi H⁺ menjadi hidrogen (-0,61 V vs Ag/AgCl, pH = 7), dan lebih positif dari potensial oksidasi H₂O menjadi oksigen (0,62 V vs Ag/AgCl, pH = 7) (Susilo, 2021). Apabila semikonduktor bereaksi dengan cahaya, seperti cahaya matahari, maka akan tercipta pasangan elektron dan *hole*. Elektron kemudian akan bereaksi dengan ion H⁺ untuk menghasilkan gas hidrogen. Sedangkan, *hole* akan bereaksi dengan air menghasilkan ion H⁺ dan oksigen (Kim *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019).

Ada beberapa semikonduktor yang digunakan sebagai fotokatalis diantaranya TiO₂ (Suryani *et al.*, 2019), CuO (Aroob *et al.*, 2023), ZnO (Aprilia *et al.*, 2020), WO₃ (Liu *et al.*, 2019), BiVO₄ (Chen *et al.*, 2020), dan SrTiO₃ (Tian *et al.*, 2023). Titanium oksida (TiO₂) merupakan semikonduktor yang sering digunakan sebagai fotokatalis, hal ini karena kelebihan TiO₂ itu sendiri yaitu memiliki stabilitas yang tinggi, kelimpahan, dan toksisitas yang rendah (Eidsvåg *et al.*, 2021; Suryani *et al.*, 2019). TiO₂ memiliki nilai *band gap* atau celah pita yang cukup lebar (3,0-3,2 eV) sehingga membutuhkan sinar UV untuk eksitasi, menyebabkan hanya sebagian kecil dari keseluruhan spektrum matahari yang diserap dan tingkat rekombinasi elektron-*hole* yang tinggi (Rahman *et al.*, 2019).

Tembaga (II) oksida (CuO) merupakan semikonduktor yang memiliki celah pita yang sempit yaitu 2,1 hingga 2,71 eV (Aroob *et al.*, 2023). Hal ini membuat CuO dapat bertindak sebagai fotokatalis karena memiliki daya serap matahari tinggi dan daya pancar termal rendah (Muliastri, 2018). Aroob *et al.* (2023) melakukan

penelitian mengenai nanopartikel CuO (NPs) dan menunjukkan bahwa CuO NPs dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik.

Zinc oxide (ZnO) adalah semikonduktor anorganik yang memiliki stabilitas termal yang baik, *non-toxic*, serta memiliki nilai *band gap* (celah pita) yang cukup lebar yaitu 3,37 eV (Nurullita & Zainul, 2022). *Band gap* yang lebar ini menyebabkan energi yang diperlukan untuk eksitasi elektron cukup tinggi, sehingga eksitasi elektron pada ZnO dapat terjadi ketika menyerap cahaya pada panjang gelombang < 368 nm (Nurullita & Zainul, 2022). Struktur kristal dari ZnO yang paling stabil adalah *wurtzite*. Kelebihan ZnO sebagai fotokatalis yaitu mempunyai reaktivitas permukaan yang tinggi serta efisiensi fotokatalis yang besar (Aprilia *et al.*, 2020).

Tungsten trioksida (WO_3) merupakan semikonduktor yang memiliki struktur heksagonal / kubik simetris, dengan *band gap energy* yang kecil sehingga memiliki aktivitas fotokatalitik yang baik. WO_3 memiliki celah pita yang lebih kecil (2,5-2,8 eV) daripada TiO_2 (3,2 eV) dan memiliki beberapa kelebihan lain seperti biaya yang murah, tidak beracun dan daya oksidasi yang tinggi pada *hole* pita valensi. Dalam beberapa tahun terakhir, WO_3 telah dipelajari sebagai fotokatalis dalam banyak aplikasi seperti degradasi pewarna organik dan *water splitting* (Liu *et al.*, 2019).

Bismut vanadat (BiVO_4) adalah jenis semikonduktor tipe-n yang memberikan respon di daerah cahaya tampak. BiVO_4 telah digunakan sebagai fotokatalis untuk berbagai aplikasi, termasuk *water splitting*, reduksi karbon dioksida dan produksi oksigen (Chen *et al.*, 2020; Feng *et al.*, 2017; Nguyen *et al.*, 2020). BiVO_4 memiliki energi celah pita yang sempit yaitu $\sim 2,4$ eV, penyerapan cahaya tampak yang baik, dan karakteristik fisik serta kimia yang unik, membuatnya menjadi kandidat yang baik untuk dapat digunakan sebagai fotokatalis dalam memanen energi cahaya matahari (Malathi *et al.*, 2018). Meskipun BiVO_4 memiliki celah pita yang lebih sempit dari TiO_2 , efisiensi BiVO_4 sebagai fotokatalis fase tunggal dibatasi oleh rekombinasi yang tidak diinginkan dari elektron tereksitasi dan *hole*. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi fotokatalitik dan pemisahan elektron dan *hole* BiVO_4 dapat dicapai dengan mengontrol morfologi dan aspek kristalografi BiVO_4 (Nguyen *et al.*, 2020).

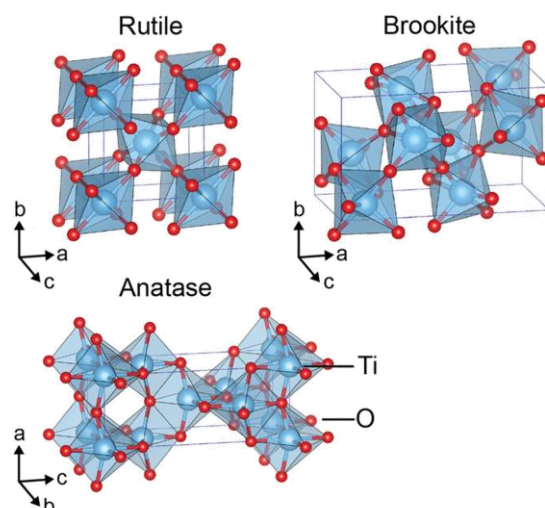
Stronsium titanat (SrTiO_3) merupakan semikonduktor potensial yang dapat digunakan sebagai fotokatalis terutama untuk proses

pemisahan air atau *water splitting* (Patial *et al.*, 2020; Phoon *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2023). Jika dibandingkan dengan celah pita TiO_2 , tepi pita SrTiO_3 untuk pita konduksi (CB) berada sekitar 200 mV lebih negatif dibanding TiO_2 . SrTiO_3 juga memiliki kelebihan seperti stabilitas termal dan kimia yang tinggi. Selain itu, dilaporkan bahwa Sr^{2+} dari struktur tersebut mampu menerima elektron pada pita konduksi fotokatalis untuk membentuk Sr^+ . Kemudian, Sr^+ yang terbentuk juga dapat mengangkut elektron untuk menghasilkan O^{2-} untuk dekomposisi senyawa organik, yang menahan rekombinasi pembawa muatan yang dihasilkan fotogenerasi (Phoon *et al.*, 2019). Oleh karena itu, SrTiO_3 mendapat perhatian dari banyak peneliti pada tahun terakhir ini karena sifat fotokatalitiknya. Namun, celah pita SrTiO_3 murni ditemukan sebesar 3,2 eV, dengan kata lain, SrTiO_3 hanya aktif secara fotokatalitik di bawah daerah UV ($\lambda < 387,5$ nm) (Guan *et al.*, 2022).

TITANIUM OKSIDA SEBAGAI FOTOKATALIS

Titanium oksida (TiO_2), atau juga dikenal sebagai titania, merupakan oksida alami dari logam titanium. Titania telah banyak dipelajari oleh para peneliti karena biayanya yang murah, efisiensi yang tinggi, dan stabilitasnya (Suryani *et al.*, 2019). Kekurangan dari titania yaitu rekombinasi elektron-*hole* tinggi dan tidak dapat diaktifkan dengan penyinaran tampak atau *visible*, tetapi dapat diaktifkan dengan penyinaran ultraviolet atau UV (Susilo, 2021). Keunggulannya dibandingkan semikonduktor lain termasuk *inert* secara biologis dan kimiawi, relatif mudah digunakan dan diproduksi, stabil secara fotokatalitik, mampu mengkatalisis reaksi secara efisien, dan sifatnya yang *nontoxic* sehingga tidak memiliki risiko yang tinggi bagi manusia atau lingkungan (Eidsvåg *et al.*, 2021).

Titania memiliki tiga struktur polimorf yaitu rutil, *brookite*, dan *anatase*. Tiga struktur polimorf dari titania dapat dilihat dari gambar 3 berikut. Struktur *brookite* memiliki kisi kristal ortorombik, sementara itu rutil dan *anatase* memiliki kisi kristal tetragonal. Di antara ketiga struktur ini, bentuk rutil lebih stabil daripada polimorf lain (Jiang *et al.*, 2021). Untuk *water splitting* atau pemecahan molekul air secara fotokatalitik polimorf yang paling banyak digunakan adalah TiO_2 rutil dan *anatase* (Eidsvåg *et al.*, 2021).



Gambar 3. Struktur Kristal Polimorf TiO_2 Rutile (Tetragonal), Brookite (Ortorombik), dan Anatase (Tetragonal).

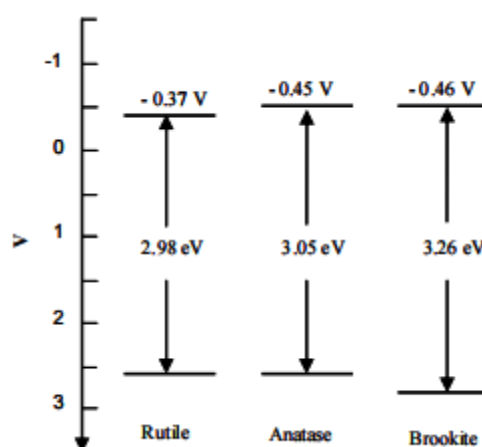
Sumber : (Haggerty et al., 2017)

Rutile merupakan struktur polimorf yang paling stabil, sedangkan *anatase* dan *brookite* bersifat metastabil dan mudah berubah menjadi rutile ketika dipanaskan. *Anatase* merupakan fase yang biasanya ditemukan dalam sintesis TiO_2 dengan metode sol-gel, sedangkan *brookite* sering diamati sebagai produk samping ketika pengendapan dilakukan dalam media asam pada suhu rendah. *Brookite* murni tanpa rutile atau *anatase* cukup sulit untuk dibuat. sehingga, sampai saat ini, sifat fotokatalitiknya belum banyak dipelajari (Di Paola et al., 2013).

Gambar 4 menunjukkan potensial elektrokimia dari TiO_2 dan tingkat energi titania. Energi celah pita titania murni adalah sekitar 3,0-3,2 eV, sehingga hanya dapat menyerap sinar ultraviolet di bawah 400 nm. Di lingkungan alami, sinar ultraviolet kurang dari 10%. Hal ini sangat mempengaruhi efisiensi dari fotokatalis titania (Jiang et al., 2021). Untuk membuat fotokatalis titania dapat menyerap cahaya tampak atau *visible* dan cahaya inframerah-dekat (*near-infrared*) serta dapat meningkatkan efisiensi fotokatalitik, fotokatalis perlu dimodifikasi (Jiang et al., 2021; Suryani et al., 2019). Saat ini, ada tiga cara untuk meningkatkan efisiensi kinerja fotokatalitik titania yaitu mengoptimalkan ukuran dan morfologi struktur (Kustiningsih et al., 2011), fotosensitisasi (Suryani et al., 2019), dan penambahan doping (Jiang et al., 2021; Tian et al., 2021).

Beberapa peneliti telah mengembangkan berbagai modifikasi morfologi titania, diantaranya *nanotubes*, *nanowires*, *nanofiber*, dan nanopartikel. Dari beberapa modifikasi morfologi yang disebutkan, titania *nanotubes* merupakan

morfologi yang memiliki beberapa kelebihan dibandingkan bentuk nano lainnya. Kelebihan titania *nanotube* diantaranya yaitu memiliki luas permukaan yang lebih besar, kemampuan untuk mengubah ion, dan aktifitas fotokatalis yang tinggi (Kustiningsih et al., 2011). Ini sejalan dengan hasil penelitian Kustiningsih et al. (2011) yang melakukan penelitian mengenai pengaruh morfologi titania terhadap produksi hidrogen dari air. Ia melaporkan bahwa morfologi *nanotube* memungkinkan luas permukaan yang jauh lebih besar daripada nanopartikel.



Gambar 4. Potensial Elektrokimia dari Tepi Pita *Anatase*, *Brookite*, dan *Rutile* pada pH = 7

Sumber : (Di Paola et al., 2009)

Selain dengan mengoptimalkan ukuran dan morfologi struktur fotokatalis, fotosensitisasi juga dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi

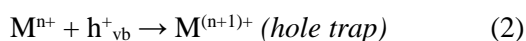
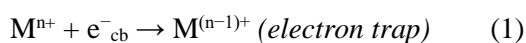
reaksi dari fotokatalitik TiO₂. fotosensitisasi dapat meningkatkan efisiensi fotokatalisis dengan memperluas rentang spektrum cahaya yang dapat diserap oleh fotokatalis dan meningkatkan jumlah pasangan elektron-hole yang dihasilkan oleh fotokatalis. Suryani *et al.* (2019) melaporkan bahwa pewarna BODIPY dengan daya serap tinggi mampu menyerap energi cahaya hingga daerah inframerah-dekat dengan kemampuan untuk mendorong proses oksidasi air ketika digabungkan dengan fotokatalis.

TITANIA DOPING

Titania yang dimodifikasi dengan doping logam dapat menyebabkan pergeseran penyerapan cahaya ke panjang gelombang yang lebih panjang karena menyediakan lokasi situs aktif tambahan pada permukaan titania. Hal ini dapat meningkatkan potensi titania dalam produksi hidrogen sebagai energi terbarukan. Doping dengan menggunakan kation logam (baik logam transisi ataupun logam mulia) merupakan strategi penting untuk mengatur celah pita dan sifat dari titania sebagai fotokatalis pada pemecahan molekul air atau *water splitting* (Aljar *et al.*, 2020).

Pemuatan logam pada permukaan titania telah menjadi rute yang paling efektif untuk meningkatkan pemisahan elektron-hole. Doping dengan logam membantu menghasilkan tingkat energi donor di atas pita valensi TiO₂ atau tingkat akseptor di bawah pita konduksi TiO₂ (Gambar 5). Hal ini membantu menurunkan energi celah pita dan akibatnya meningkatkan aktivitas fotokatalis (Aljar *et al.*, 2020).

Penambahan doping logam pada titania juga dapat berfungsi sebagai *electron trapping*. *Electron trapping* mengacu pada fenomena dimana elektron terkurung atau terlokalisasi di wilayah atau material tertentu, akibatnya dapat menekan laju rekombinasi dari pasangan elektron-hole (Ratnawati & Slamet, 2012), sesuai dengan mekanisme di bawah ini,



dimana tingkat energi untuk Mⁿ⁺/M⁽ⁿ⁻¹⁾⁺ berada di bawah tepi pita konduksi dan tingkat energi untuk Mⁿ⁺/M⁽ⁿ⁺¹⁾⁺ di atas tepi pita valensi (Jiang *et al.*, 2021).

Modifikasi dengan Platina (Pt)

Platina (Pt) adalah logam keperakan mengkilap dengan aktivitas kimiawi yang rendah. Logam ini stabil di udara dan lingkungan yang lembap. Tingkat oksidasi platinum adalah +2 hingga +6, yang dengan mudah membentuk senyawa koordinasi dan memiliki kelenturan, konduktivitas termal, dan konduktivitas listrik yang baik. Platina adalah logam mulia yang dapat meningkatkan fotoefisiensi TiO₂ (Vaiano *et al.*, 2016).

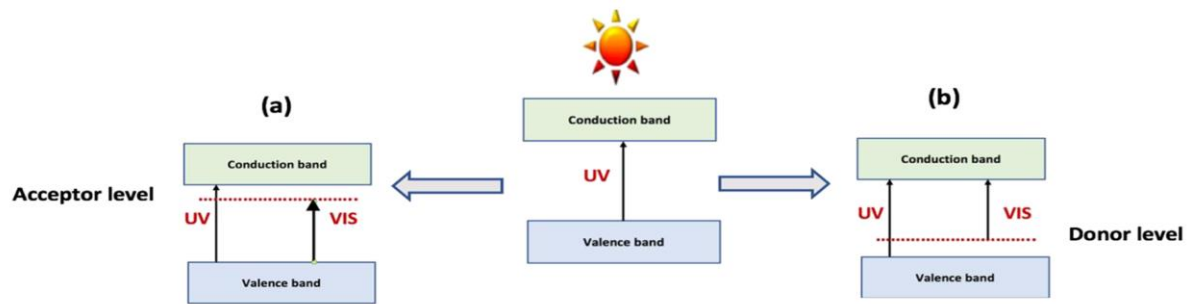
Kustiningsih *et al.* (2011) melaporkan bahwa penggunaan doping platina pada titania dengan morfologi *nanotubes* dapat menurunkan energi *band gap* titania menjadi 2,97 eV dan meningkatkan penyerapan terhadap cahaya tampak pada serapan gelombang antara 411nm hingga 442 nm. Fakhruddinova *et al.* (2022) juga melaporkan bahwa modifikasi titania dengan platina dalam konsentrasi rendah (hingga 1 wt.%) meningkatkan aktivitas fotokatalitik yang cukup tinggi, dengan laju evolusi hidrogen yang meningkat hingga ~ lima kali lipat. Modifikasi dengan Pt juga membuat proses fotogenerasi pembawa muatan menjadi jauh lebih efisien.

Modifikasi dengan Besi (Fe)

Besi (Fe) adalah logam berkilau, lentur, dan berwarna abu-abu keperakan yang dikenal dalam empat bentuk kristal yang berbeda. Besi juga merupakan elemen yang relatif reaktif. Ion besi dapat hadir dalam bentuk keadaan oksidasi +2 (besi (II), "*ferrous*") dan +3 (besi (III), "*ferric*") (Ali *et al.*, 2017).

Besi (Fe) memiliki konfigurasi elektron setengah terisi (3d⁵) dan jari-jari ionik yang mirip dengan Ti⁴⁺ yaitu 0,55 Å, sedangkan Ti⁴⁺ memiliki jari-jari ionik yaitu 0,61 Å (Aritonang & Syahbanu, 2020). Oleh karena itu, ion Fe³⁺ dapat dengan mudah dimasukkan ke dalam kisi kristal TiO₂. Hal ini karena jari-jari ionik Fe³⁺ mirip dengan Ti⁴⁺ yang memungkinkannya untuk dengan mudah masuk ke dalam struktur kristal TiO₂. Penggabungan ion Fe³⁺ ke dalam kisi TiO₂ dapat memiliki implikasi penting untuk berbagai aplikasi, seperti fotokatalisis (Ali *et al.*, 2017).

Aritonang dan Syahbanu melakukan penelitian mengenai sintesis titania menggunakan doping Fe³⁺ dengan metode anodisasi, mereka melaporkan bahwa Fe³⁺ yang didoping pada titania dapat menurunkan nilai energi *band gap* hingga 2,91 eV, dengan serapan panjang gelombang maksimum yaitu 424,35 nm (Aritonang & Syahbanu, 2020).



Gambar 5. Ilustrasi Skematis Doping Logam. (a) Tingkat Energi Akseptor dan (b) Tingkat Energi Donor

Sumber : (Aljar *et al.*, 2020)

Modifikasi dengan Tembaga (Cu)

Tembaga (Cu) adalah doping terbaik dalam mengatur celah pita atau *band gap* dari titania karena dapat menggeser penyerapan cahaya ke daerah *visible*. Tembaga bertindak sebagai perangkat pembawa muatan untuk transfer interfisial rekombinasi elektron-hole. Jari-jari ionik Cu^{2+} (0,68 Å) juga lebih dekat dengan Ti^{4+} (0,61 Å), yang memungkinkannya untuk dengan mudah masuk ke dalam struktur kristal titania (Jiang *et al.*, 2021). Selain itu, doping tembaga mengubah luas permukaan titania, sehingga lebih banyak molekul pewarna yang dapat teradsorpsi ke permukaan titania. Doping tembaga akan menggeser penyerapan cahaya ke daerah *visible*. Oleh karena itu, penggabungan Cu ke dalam kisi titania dapat meningkatkan efisiensi fotokatalitik (Raguram & Rajni, 2022). Riyani (2012) melaporkan bahwa penambahan Cu sebagai doping logam dalam sintesis titania menggunakan metode fotodeposisi dapat mengubah morfologi dari fotokatalis titania dan menurunkan nilai energi *band gap* hingga 2,25 eV, sehingga dimungkinkan TiO_2/Cu dapat aktif pada cahaya tampak.

Modifikasi dengan Vanadium (V)

Doping vanadium (V) memberikan strategi yang menjanjikan untuk meningkatkan fotoaktivitas titania di bawah cahaya *visible*. Hal ini karena orbital 3d vanadium dapat mengubah celah pita titania sehingga fotokatalis TiO_2/V dapat menyerap cahaya tampak. TiO_2/V dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik titania melalui keberadaan muatan yang dihasilkan secara fotogenerasi dan perluasan spektrum serapan yang lebih efisien dibandingkan dengan logam lainnya (Jiang *et al.*, 2021).

Belfaa *et al.* (2018) melaporkan bahwa doping vanadium ke dalam kisi kristal TiO_2 menunjukkan penurunan energi celah pita dari

3,18 eV menjadi 2,6 eV. Energi celah pita yang lebih rendah memiliki efek positif pada aktivitas fotokatalitik, karena reaksi fotokatalitik dapat diaktifkan oleh foton dengan energi yang lebih rendah. Hal ini dapat dijelaskan oleh keadaan elektronik dopan dan matriks TiO_2 . Berdasarkan perhitungan DFT, transisi elektron dapat terjadi dari tingkat energi ($\text{V}^{5+}/\text{V}^{4+}$) ke pita konduksi dalam celah pita TiO_2 , yaitu tingkat energi vanadium yang berada tepat di bawah pita konduksi TiO_2 atau dari transisi d-d elektron V 3d ke Ti 3d. Hal ini membuat tingkat energi baru yang dibuat di bawah pita konduksi TiO_2 bertanggung jawab untuk aktivasi katalis di bawah radiasi cahaya tampak. Dengan demikian, titania yang didoping vanadium memiliki kemampuan menyerap cahaya tampak dan menunjukkan pergeseran merah pada spektrum UV-Vis. Hasil reaksi fotokatalitik menunjukkan bahwa titania yang didoping vanadium memiliki aktivitas yang lebih tinggi daripada titania murni di bawah iradiasi cahaya tampak.

Titania yang telah dimodifikasi dengan doping logam, terbukti dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitiknya. Hal ini menjadikannya bahan yang sangat baik untuk digunakan sebagai fotokatalis dalam sistem *photochemical water splitting*. Doping logam pada titania dapat memperluas jangkauan spektrum penyerapan cahaya oleh titania ke spektrum cahaya tampak dari sinar matahari. Meskipun modifikasi titania dengan doping logam menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang baik, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan proses doping dan untuk mengeksplorasi aplikasi potensial lainnya dari titania yang dimodifikasi.

KESIMPULAN

Water splitting atau pemecahan molekul air memainkan peranan penting dalam menghasilkan

energi bersih dalam bentuk hidrogen. Pemilihan fotokatalis yang sesuai dan penerapan strategi yang efektif merupakan hal yang sangat penting untuk mencapai tingkat produksi hidrogen yang lebih tinggi. Titania dianggap sebagai fotokatalis yang menjanjikan, tetapi kinerjanya masih rendah, terutama karena pemanfaatan cahaya tampak yang rendah. Oleh karena itu, perlu dilakukan modifikasi terhadap titania untuk meningkatkan kinerja *water splitting*. Salah satu modifikasi titania adalah dengan menggunakan doping logam. Berdasarkan hasil penelitian, doping logam dapat menurunkan *band gap* titania, meningkatkan absorpsi cahaya tampak, mengurangi rekombinasi elektron-hole, dan menambah situs aktif permukaan. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan proses doping dan untuk mengeksplorasi aplikasi potensial lainnya dari titania yang dimodifikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, T., Tripathi, P., Azam, A., Raza, W., Ahmed, A. S., Ahmed, A., & Muneer, M. (2017). Photocatalytic performance of Fe-doped TiO₂ nanoparticles under visible-light irradiation. *Materials Research Express*, 4(1), 015022. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa576d>
- Aljar, M. A. A., Zulqarnain, M., Shah, A., Akhter, M. S., & Iftikhar, F. J. (2020). A review of renewable energy generation using modified titania for photocatalytic water splitting. *AIP Advances*, 10(7), 070701. <https://doi.org/10.1063/5.0006196>
- Aprilia, A., Putri Hanavi, D., Safriani, L., Bahtiar, A., Suryaningsih, S., & Rahayu Dwi Agustini, R. (2020). Sifat fotokatalitik serbuk ZnO terdoping aluminium dalam mendegradasi larutan metil biru. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 4(1), 34–45. <https://doi.org/10.24198/jiif.v4i1.26143>
- Aritonang, A. B., & Syahbanu, I. (2020). Sintesis TiO₂/Ti terdoping logam Fe³⁺ menggunakan metode anodisasi dengan bantuan sinar tampak. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 3(8), 45–52.
- Aroob, S., Carabineiro, S. A. C., Taj, M. B., Bibi, I., Raheel, A., Javed, T., Yahya, R., Alelwani, W., Verpoort, F., Kamwilaisak, K., Al-Farraj, S., & Sillanpää, M. (2023). Green synthesis and photocatalytic dye degradation activity of CuO nanoparticles. *Catalysts*, 13(3), 502. <https://doi.org/10.3390/catal13030502>
- Balkan, N., Erol, A., Balkan, N., & Erol, A. (2021). *Intrinsic and extrinsic semiconductors*. 37–78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44936-4_2
- Belfaa, K., Lassoued, M. S., Ammar, S., & Gadri, A. (2018). Synthesis and characterization of V-doped TiO₂ nanoparticles through polyol method with enhanced photocatalytic activities. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(12), 10269–10276. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9080-6>
- Chen, S.-H., Jiang, Y.-S., & Lin, H. (2020). Easy synthesis of BiVO₄ for photocatalytic overall water splitting. *ACS Omega*, 5(15), 8927–8933. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00699>
- Di Paola, A., Bellardita, M., Ceccato, R., Palmisano, L., & Parrino, F. (2009). Highly active photocatalytic TiO₂ powders obtained by thermohydrolysis of TiCl₄ in water. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(34), 15166–15174. <https://doi.org/10.1021/jp904673e>
- Di Paola, A., Bellardita, M., & Palmisano, L. (2013). Brookite, the least known TiO₂ photocatalyst. *Catalysts*, 3(1), 36–73. <https://doi.org/10.3390/catal3010036>
- Eidsvåg, H., Bentouba, S., Vajeeston, P., Yohi, S., & Velauthapillai, D. (2021). TiO₂ as a photocatalyst for water splitting—an experimental and theoretical review. *Molecules*, 26(6), 1687. <https://doi.org/10.3390/molecules26061687>
- Fakhrutdinova, E., Reutova, O., Maliy, L., Kharlamova, T., Vodyankina, O., & Svetlichnyi, V. (2022). Laser-based synthesis of TiO₂-Pt photocatalysts for hydrogen generation. *Materials*, 15(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/ma15217413>

- Feng, Y., Cheng, H., Han, J., Zheng, X., Liu, Y., Yang, Y., & Zhang, L. (2017). Chlorophyll sensitized BiVO₄ as photoanode for solar water splitting and CO₂ conversion. *Chinese Chemical Letters*, 28(12), 2254–2258. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2017.10.025>
- Guan, X., Zong, S., Tian, L., Zhang, Y., & Shi, J. (2022). Construction of SrTiO₃–LaCrO₃ solid solutions with consecutive band structures for photocatalytic H₂ evolution under visible light irradiation. *Catalysts*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/catal12101123>
- Haggerty, J. E. S., Schelhas, L. T., Kitchaev, D. A., Mangum, J. S., Garten, L. M., Sun, W., Stone, K. H., Perkins, J. D., Toney, M. F., Ceder, G., Ginley, D. S., Gorman, B. P., & Tate, J. (2017). High-fraction brookite films from amorphous precursors. *Scientific Reports*, 7(1), 15232. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15364-y>
- Harjanto, N. T. (2016). Dampak lingkungan pusat listrik tenaga fosil dan prospek pltn sebagai sumber energi listrik nasional. *PIN Pengelolaan Instalasi Nuklir*, 01.
- Jaafar, S. N. H., Minggu, L. J., Arifin, K., Kassim, M. B., & Wan, W. R. D. (2017). Natural dyes as TiO₂ sensitizers with membranes for photoelectrochemical water splitting: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.118>
- Jiang, D., Otitoju, T. A., Ouyang, Y., Shoparwe, N. F., Wang, S., Zhang, A., & Li, S. (2021). A review on metal ions modified TiO₂ for photocatalytic degradation of organic pollutants. *Catalysts*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/catal11091039>
- Kawawaki, T., Kataoka, Y., Ozaki, S., Kawachi, M., Hirata, M., & Negishi, Y. (2021). Creation of active water-splitting photocatalysts by controlling cocatalysts using atomically precise metal nanoclusters. *Chemical Communications*, 57(4), 417–440. <https://doi.org/10.1039/D0CC06809H>
- Kim, J. H., Hansora, D., Sharma, P., Jang, J.-W., & Lee, J. S. (2019). Toward practical solar hydrogen production – an artificial photosynthetic leaf-to-farm challenge. *Chemical Society Reviews*, 48(7), 1908–1971. <https://doi.org/10.1039/C8CS00699G>
- Kustiningsih, I., Mareta, H., Mustofa, D., & Slamet. (2011). Pengaruh morfologi TiO₂ dan dopant platina terhadap produksi hidrogen dari air dengan metode fotokatalisis. *Indonesian Journal of Materials Science*, 14(1), 11–16.
- Liu, X., Zhai, H., Wang, P., Zhang, Q., Wang, Z., Liu, Y., Dai, Y., Huang, B., Qin, X., & Zhang, X. (2019). Synthesis of a WO₃ photocatalyst with high photocatalytic activity and stability using synergetic internal Fe³⁺ doping and superficial Pt loading for ethylene degradation under visible-light irradiation. *Catalysis Science & Technology*, 9(3), 652–658. <https://doi.org/10.1039/C8CY02375A>
- Maeda, K., & Domen, K. (2010). Photocatalytic water splitting: Recent progress and future challenges. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(18), 2655–2661. <https://doi.org/10.1021/jz1007966>
- Malathi, A., Madhavan, J., Ashokkumar, M., & Arunachalam, P. (2018). A review on BiVO₄ photocatalyst: Activity enhancement methods for solar photocatalytic applications. *Applied Catalysis A: General*, 555, 47–74. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2018.02.010>
- Mandade, P. (2021). Introduction, basic principles, mechanism, and challenges of photocatalysis. In *Handbook of Nanomaterials for Wastewater Treatment* (pp. 137–154). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821496-1.00016-7>
- Muliastri, D. (2018). Aplikasi komposit RGO–CuO sebagai fotokatalis untuk konversi CO₂ menjadi metanol di bawah iradiasi sinar tampak [Institute Of Technology Sepuluh Nopember]. https://repository.its.ac.id/56633/1/02511650012004_Master_Tesis.pdf

- Nguyen, T. D., Nguyen, V.-H., Nanda, S., Vo, D.-V. N., Nguyen, V. H., Van Tran, T., Nong, L. X., Nguyen, T. T., Bach, L.-G., Abdullah, B., Hong, S.-S., & Van Nguyen, T. (2020). BiVO₄ photocatalysis design and applications to oxygen production and degradation of organic compounds: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), 1779–1801. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01039-0>
- Nurullita, N., & Zainul, R. (2022). Pengaruh pengadukan pada degradasi methylene blue menggunakan fotokatalis ZnO terdoping Cu. *Periodic*, 11(3), 43–47.
- Patial, S., Hasija, V., Raizada, P., Singh, P., Khan Singh, A. A. P., & Asiri, A. M. (2020). Tunable photocatalytic activity of SrTiO₃ for water splitting : strategies and future scenario. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103791. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103791>
- Phoon, B. L., Lai, C. W., Juan, J. C., Show, P., & Chen, W. (2019). A review of synthesis and morphology of SrTiO₃ for energy and other applications. *International Journal of Energy Research*, 43(10), 5151–5174. <https://doi.org/10.1002/er.4505>
- Raguram, T., & Rajni, K. S. (2022). Synthesis and characterisation of Cu—doped TiO₂ nanoparticles for DSSC and photocatalytic applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(7), 4674–4689. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.113>
- Rahman, Z. U., Wei, N., Feng, M., & Wang, D. (2019). TiO₂ hollow spheres with separated Au and RuO₂ co-catalysts for efficient photocatalytic water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(26), 13221–13231. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.176>
- Ratnawati, R., & Slamet, S. (2012). Potensi titania nanotube array dan aplikasinya dalam produksi hidrogen dan pengolahan limbah. *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 34(2), 248–261. <https://doi.org/10.24817/jkk.v34i2.1861>
- Renganathan, S., Geetha, D., & Ramesh, P. (2015). Photocatalytic activity of plant mediated biosynthesized silver nano particles using methyl blue under Natural Sunlight. *Int. J. Adv. Sci. Eng.*, 2, 22–25.
- Riyani, K. (2012). Sintesis dan karakterisasi fotokatalis TiO₂–Cu aktif sinar tampak. *Prosiding Seminar Nasional*, 118–124.
- Suryani, O., Higashino, Y., Sato, H., & Kubo, Y. (2019). Visible-to-near-infrared light-driven photocatalytic hydrogen production using dibenzo-BODIPY and Phenothiazine Conjugate as organic photosensitizer. *ACS Applied Energy Materials*, 2(1), 448–458. <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b01474>
- Susilo, B. E. (2021). Produksi gas hidrogen melalui photocatalytic water splitting menggunakan fotokatalis Cu₂O/TiO₂. *FMIPA UNNES*. <https://mipa.unnes.ac.id/v3/2021/03/produksi-gas-hidrogen-melalui-photocatalytic-water-splitting-menggunakan-fotokatalis-cu2o-tio2/>
- Takata, T., & Domen, K. (2017). Development of non-oxide semiconductors as light harvesting materials in photocatalytic and photoelectrochemical water splitting. *Dalton Transactions*, 46(32), 10529–10544. <https://doi.org/10.1039/C7DT00867H>
- Tian, L., Guan, X., Dong, Y., Zong, S., Dai, A., Zhang, Z., & Guo, L. (2023). Improved overall water splitting for hydrogen production on aluminium-doped SrTiO₃ photocatalyst via tuned surface band bending. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1257–1264. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01580-8>
- Tian, L., Li, Z., Xu, X., & Zhang, C. (2021). Advances in noble metal (Ru, Rh, and Ir) doping for boosting water splitting electrocatalysis. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(23), 13459–13470. <https://doi.org/10.1039/D1TA01108A>
- Vaiano, V., Iervolino, G., Sannino, D., Murcia, J. J., Hidalgo, M. C., Ciambelli, P., & Navío, J. A. (2016). Photocatalytic

removal of patent blue V dye on Au-TiO₂ and Pt-TiO₂ catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 188, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.001>

Wang, Z., Li, C., & Domen, K. (2019). Recent developments in heterogeneous photocatalysts for solar-driven overall water splitting. *Chemical Society Reviews*, 48(7), 2109–2125. <https://doi.org/10.1039/C8CS00542G>

Zhu, S., & Wang, D. (2017). Photocatalysis: basic principles, diverse forms of implementations and emerging scientific opportunities. *Advanced Energy Materials*, 7(23), 1700841. <https://doi.org/10.1002/aenm.201700841>