



**Artifisial Fotosintesis untuk Pengembangan
Proses Ramah Lingkungan:
Produksi Hidrogen dari Air, Metanol dari
Karbon Dioksida, dan Amonia dari Nitrogen**

JARNUZI GUNLAZUARDI

Pidato pada Upacara Pengukuhan sebagai
**Guru Besar Tetap Bidang Ilmu Foto Elektro
Kimia**

Departemen Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indonesia

Depok, 14 Desember 2022



**Artifisial Fotosintesis untuk Pengembangan
Proses Ramah Lingkungan:
Produksi Hidrogen dari Air, Metanol dari
Karbon Dioksida, dan Amonia dari Nitrogen**

JARNUZI GUNLAZUARDI

Pidato pada Upacara Pengukuhan sebagai
**Guru Besar Tetap Bidang Ilmu Foto Elektro
Kimia**

Departemen Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indonesia

Depok, 14 Desember 2022

Pidato Pengukuhan Guru Besar Prof. Dr. Jarnuzi Gunlazuardi
***Artifisial Fotosintesis untuk Pengembangan Proses Ramah Lingkungan:
Produksi Metanol dari Karbon Dioksida, Amonia dari Nitrogen, dan
Hidrogen dari Air.***

Yang Kami hormati,

- Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia
- Direktur Pendidikan Tinggi, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia
- Ketua dan Sekretaris Majelis Wali Amanat Universitas Indonesia
- Rektor dan para Wakil Rektor Universitas Indonesia
- Ketua, Sekretaris, dan para Anggota Dewan Guru Besar Universitas Indonesia
- Ketua, Sekretaris, dan para Anggota Senat Akademik Universitas Indonesia
- Para Dekan, Direktur Sekolah serta Wakil Dekan dan Wakil Direktur Sekolah di Universitas Indonesia
- Dekan dan Wakil Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia,
- Ketua Dewan Guru Besar UI dan FMIPA UI beserta anggota,
- Para Pimpinan, Staf Pengajar, Mahasiswa, dan Karyawan di Fakultas MIPA Universitas Indonesia
- Para Guru Besar Tamu, Para Undangan, Keluarga, Kerabat, serta hadirin yang kami muliakan.

Assalamu'alaikum Warohmatullohi Wabarokatuh

Alhamdulillah Robbil 'alamin, berkat rahmat dan hidayah Allah swt., kita semua dapat hadir pada suasana yang berbahagia ini. Shalawat serta salam kepada Rosulullah Muhammad SAW, yang telah membawa kita pada perubahan kehidupan dari kehidupan kebodohan (jahiliyah) ke kehidupan yang terang benderang yaitu kehidupan dengan penuh rahmat dan hidayah dari Allah SWT.

Perkenankan saya menyampaikan dengan hormat rasa terima kasih setinggi-tingginya kepada Pemerintah Republik Indonesia yang dalam hal ini diwakili oleh Bapak Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia yang telah memberikan kepercayaan kepada saya untuk mngemban jabatan Guru Besar Ilmu Kimia, Bidang Foto Elektro Kimia pada Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

Perkenankan saya menyampaikan pidato ilmiah pengukuhan Guru Besar dalam bidang Fotoelektrokimia pada Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Indonesia tentang, **“Artifisial Fotosintesis untuk Pengembangan Proses Ramah Lingkungan: Produksi Metanol dari Karbon Dioksida, Amonia dari Nitrogen, dan Hidrogen dari Air”**.

Hadirin yang terhormat,

**Artifisial Fotosintesis untuk Pengembangan Proses Ramah Lingkungan:
Produksi Metanol dari Karbon Dioksida, Amonia dari Nitrogen, dan
Hidrogen dari Air**

1. Pendahuluan

Setelah menyelesaikan studi S3 di Jepang, saya mendapat kesempatan beberapa kali magang (*short visit*) paska doktoral di *University of Newcastle Upon Tyne, UK*. Dalam kesempatan magang perdana (1995), saya mendapat tantangan mempelajari dan mengembangkan rancangan perangkat baru fotoelektrokatalisis untuk mematikan mikro organisme pencemar air minum.

Pada 1993 (Phaedra, 2003) industri air minum di negara maju memiliki problem cemaran mikroba berspora (e.g. *Cryptosporidium Parvum*) yang tidak bisa dimatikan secara efisien dengan proses disinfeksi yang ada saat itu, yaitu klorinasi dan/atau disinfeksi dengan sinar UV-C. Situasi tersebut menjadi tantangan para peneliti untuk menemukan metoda alternatif. Ada dugaan atau hipotesa bahwa spesi oksigen reaktif yang bermuatan netral, yaitu radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), sangat mungkin mampu melakukan penetrasi melewati dinding mikroba seperti itu dan merusak sistem hidupnya.

Dengan latar belakang diatas, dimulailah rangkaian studi fundamental dan terapan terkait foto elektro katalisis (*photo electro catalysis*, PEC), sebagai sumber *insitu* $\bullet\text{OH}$ dalam aliran pengolahan air minum. Perangkat PEC tersebut terdiri dari elektroda lapisan tipis TiO_2 (fasa Anatase atau Rutile) yang dilekatkan pada bahan penyangga konduktif, dan dipasangkan dengan elektroda *inert* platinum. Dalam media elektrolit elektroda kerja lapis tipis TiO_2 saat dikenai sinar UV-A akan menjadi anodik, karena elektron menyerap energi sinar dan pindah menuju pasangan elektroda platinum. Pada permukaan elektroda TiO_2 akan tersedia lubang positif (*positive hole*, h^+) mampu mengubah molekul air dipermukaan anoda menjadi radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang memiliki potensial oksidasi sekitar 2,8 V (*Vs NHE*).

Sistem PEC yang dikembangkan pada prinsipnya mampu menghasilkan radikal hidroksil (Butterfield, 1987; Harper, 1999) dari air yang kontak dengan elektroda, dan mampu mengoksidasi zat kimia yang ada disekitar elektroda. Dinding mikroba merupakan biomaterial (lipid, protein, karbohidrat) yang

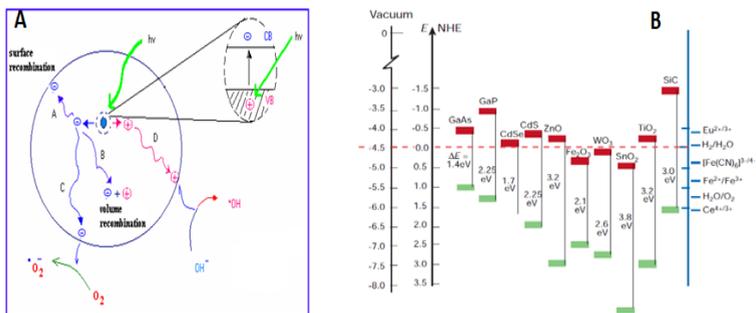
ikatan kimia penyusunnya akan putus atau teroksidasi oleh radikal hidroksil. Kehancuran dinding mikroba akan menyebabkan kematian mikroba tersebut (Bogdan, 2015). Konsep produksi radikal hidroksil *insitu* ini yang diusulkan untuk pengembangan perangkat baru disinfeksi air.

Akumulasi ilmu dan *skill* saat terlibat dalam riset *short visit* di UK (1995; 1997; 1999; 2003) menjadi modal krusial dalam mengembangkan karier riset di UI sebagai dosen. Mulai dari pengembangan perangkat fotokatalisis dan fotoelektrokatalisis untuk mendegradasi senyawa beracun dalam air (termasuk organoklor); sensor kebutuhan oksigen kimiawi secara foto elektrokatalisis (*Photo ElectroCatalytic Chemical Oxygen Demand*, PECOD); perangkat baru tandem *Dyes Sensitized Solar Cell* dengan *Photo Electro Catalytic* (DSSC-PEC) untuk konversi CO₂ menjadi metanol; konversi nitrogen mejadi amonia, dan produksi hidrogen dari air.

Pidato pengukuhan ini akan berisi uraian ringkas rangkaian kegiatan kami mengeksplorasi dasar dan terapan fenomena foto-elektro-kimia pada permukaan semikonduktor untuk menjawab satu sisi persoalan bidang energi, kesehatan dan lingkungan. Kegiatan riset adalah pada ranah sains dasar dan terapan, yaitu menggali atau mempelajari fenomena sains dan penerapannya untuk memecahkan berbagai masalah yang relevan.

2. Fotokatalisis dan Fotoelektrokatalisis

Fotokatalisis (heterogen) adalah akselerasi reaksi kimia pada permukaan padatan semikonduktor dan cahaya. Jika material semikonduktor (fotokatalis) dikenai cahaya (Gambar 1), energi cahaya akan diserap oleh elektron untuk pindah dari pita valensi ke pita konduksi (Linsebigler et al, 1995). Elektron yang tereksitasi ke pita konduksi akan bergerak bebas dan migrasi sampai permukaan bahan. Sementara itu pada pita valensi yang kehilangan elektron akan tersedia lubang positif (h^+) yang juga bisa bermigrasi ke permukaan bahan. Pada permukaan material, elektron (e^-) akan menginisiasi reaksi reduksi dan lubang positif (h^+) menginisiasi reaksi oksidasi (Honda-Fujishima *effect*). Keberadaan pasangan *electron* dan *hole* ini mempunyai masa hidup yang cukup untuk bertemu dengan zat kimia yang mendekati ke permukaan bahan.

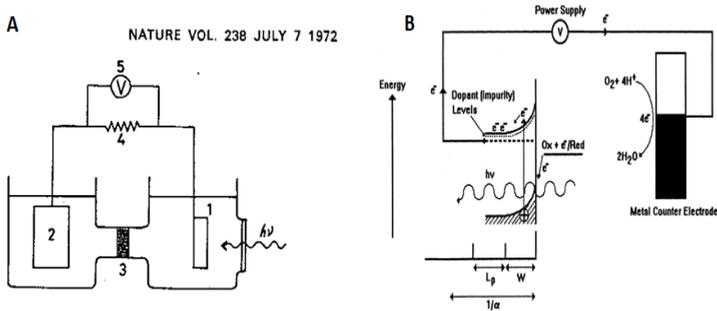


Gambar 1. [A]: Photo Excitation and Deexcitation saat bahan semikonduktor menyerap cahaya (Linsebigler et al. *Chem. Rev.* Vol. 95. NO 3, 1995) [B]. Berbagai semikonduktor dengan nilai energi celah, dan posisi potensial redoks nya. (Gratzel , *Nature*; Vol 414;15 Nov 2001)

Pasangan e^- dan h^+ akan terus diproduksi sepanjang material dikenai dengan cahaya yang sesuai. Sejalan itu reaksi oksidasi dan reduksi akan terjadi pada zat kimia yang mendekati ke permukaan material. Fenomena tersebut dapat dikelola menjadi perangkat reaktor fotokatalisis dan fotoelektrokatalisis, dimana padatan fotokatalis ditempatkan dalam media yang diolah dan menginisiasi reaksi oksidasi dan reduksi.

Pada proses fotokatalisis digunakan padatan semikonduktor yang ditempatkan dalam media yang diolah dan disinari dengan cahaya. Proses tersebut akan menghasilkan spesi yang akan menginisiasi reaksi oksidasi dan reduksi terhadap zat kimia yang ada disekitar fotokatalis. Terapan fenomena fotokatalisis seperti itu, telah banyak dikembangkan untuk berbagai keperluan, misalnya, sistem terintegrasi pengolah limbah air atau udara. Namun sistem fotokatalisis memiliki kendala krusial, yaitu besarnya rekombinasi elektron dan *hole*, yang menyebabkan ketidak efisienan pemanenan cahaya untuk menjalankan reaksi kimia. Salah satu diantara penyebabnya adalah karena berdekatnya atau tidak dipisahkannya lokus sisi oksidasi dan sisi reduksi.

Sementara itu dalam sistem fotoelektrokatalisis, padatan semikonduktor disusun sebagai elektroda kerja yang dipasangkan dengan “counter” elektrodanya. Saat disinari dengan cahaya permukaan fotokatalis (TiO_2 misalnya) akan menjadi anodik, bermuatan positif, karena tersedia banyak h^+ akibat elektron yang pindah ke pita konduksi dan lalu dialirkan ke katoda (Gambar 2)



Gambar 2. [A]:. Bagan sistem sel fotoelektrokatalisis yang dilaporkan Fujishima dan Honda untuk mendemonstrasikan *water splitting* secara fotoelektrokatalisis (Fujishima, A & Honda, *K. Nature*, Vol 238, 1972). Catatan, 1: anoda, TiO₂; 2:katoda Pt; 3: membrane; 4 & 5: sirkuit eksternal. Gambar 2 [B]:. Representasi skematik proses yang terjadi saat semikonduktor TiO₂ yang tercelup didalam larutan elektrolit dikenai sinar UV dan diberi bias potensial eksternal (Harper *et al.*, *J App.El.Chem.*1999)

Keberadaan potensial positif di elektroda TiO₂ yang direndam dalam cairan elektrolit (Gambar 2 B) akan menurunkan tingkat energi Fermi, dalam badan elektroda semikonduktor, dan medan listrik yang dekat dengan antarmuka menghasilkan lapisan deplesi, dengan ketebalan W. Setiap elektron yang diproduksi di lapisan deplesi akan dipercepat ke bagian dalam material, akhirnya mencapai kontak belakang dan bergerak pindah melalui sirkuit eksternal ke “counter” elektroda [Hamnett, A. 1987]. Sebaliknya, lubang positif yang dihasilkan di dalam lapisan deplesi akan dipercepat bergerak ke permukaan. Setiap lubang positif (h^+) yang dihasilkan dalam jarak (L_p+W) dari permukaan akan berdifusi ke tepi lapisan deplesi, dan kemudian dengan cepat bergerak ke permukaan. L_p adalah jarak rata-rata yang dilalui h^+ sebelum rekombinasi di daerah bebas medan semikonduktor. Jelas, oleh karena itu, medan listrik secara signifikan meningkatkan pemisahan muatan, dan dengan demikian meningkatkan efisiensi pembentukan radikal ($\cdot OH$), efek peningkatan oleh medan listrik (*electric field enhancement effect*, EFE) [Butterfield, 1997].

Fotoelektrokatalisis (*Photoelectrocatalysis*, PEC) merupakan proses yang menjanjikan untuk mengatasi keterbatasan fotokatalisis konvensional. PEC melibatkan imobilisasi fotokatalis pada substrat konduktif yang juga digunakan sebagai elektroda. Bias listrik memisahkan pasangan *electron-hole* dan mencegah rekombinasi mereka. Dalam sistem PEC, fotoanoda dan katoda ditempatkan pada jarak tertentu, bisa dalam satu kompartemen ataupun dalam

dua kompartemen terpisah. Reaksi oksidasi berlangsung disekitar elektroda kerja (fotoanoda TiO_2) dan reaksi reduksi berlangsung di katoda. Dengan konsep tersebut kami menyelesaikan “*proof of concept*” berbagai tipe perangkat untuk pengolah air; pembersih udara; “*probe*” sensor untuk penentuan Kebutuhan Oksigen Kimiawi (*Chemical Oxygen Demand*, COD) air, sensor gas; dan perangkat **PEC** untuk produksi metanol (CH_3OH) dari gas CO_2 , amonia (NH_3) dari gas N_2 dan gas H_2 dari air.

Perangkat PEC yang dikembangkan mengintegrasikan sinar (tampak) dan fotokatalis untuk mengubah atau menyimpan energi sinar (tampak) kedalam ikatan kimia bahan bakar (*Solar to Fuel*). Proses tersebut terinspirasi oleh proses fotosintesis alami yakni mengubah karbon dioksida dan air, dengan adanya sinar matahari, menjadi karbohidrat dan oksigen. Proses atau perangkat PEC tersebut dengan berbagai variasi pengembangannya dikenal sebagai **Artifisial Fotosintesis**, yang saat ini banyak dieksplorasi untuk pengembangan sumber energi baru terbarukan bagi masa depan.

3. Perangkat disinfeksi air secara foto elektro katalitik

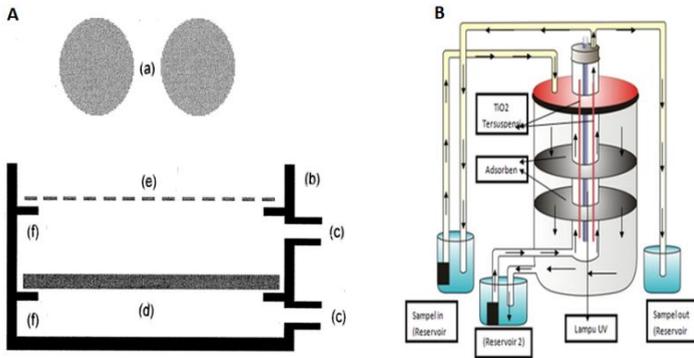
Industri pengolahan air minum di Milwaukee, Amerika Serikat, tahun 1993 pernah mengalami kesulitan menangani *outbreak* kontaminasi mikro organisme protozoan *Cryptosporidium Parvum* [Phaedra, 2003]. Mikroba tersebut tidak rusak atau mati walau telah melewati proses disinfeksi air dalam industri air minum pada era tersebut. Intensifikasi proses klorinasi khusus atau penggunaan radiasi UV-C, atau ultra filtrasi khusus dilakukan untuk penanggulangan, namun biaya prosesnya tinggi. Klorinasi dengan menggunakan klor berkadar tinggi menimbulkan masalah baru, karena menghasilkan produk samping senyawa trihalometane (CHCl_3) yang beracun. Oleh karena itu perlu dicari alternatif yang lebih aman.

Inaktivasi organisme patogen sangat penting dalam pengolahan pasokan air rumah tangga dan biasanya dilakukan dengan menggunakan bahan kimia tambahan seperti klorin [Matsunaga and M. Okochi, 1995]. Namun, seperti telah disebutkan sebelumnya, dapat menyebabkan pembentukan spesies organik terklorinasi dengan berat molekul rendah dalam larutan, beberapa di antaranya berbahaya bagi manusia [L.A. Lawton and P.K.J. Robertson, 1999]. Selain itu, patogen tertentu termasuk protozoa *Cryptosporidium Parvum* tahan terhadap efek zat oksidan yang umumnya dipakai dalam pengolahan air, termasuk khlorin [Chauret, 2001].

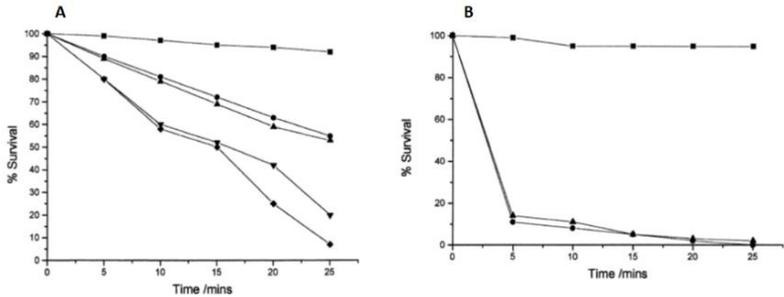
Proses oksidasi maju (*advance oxidation processes*, AOPs) bisa menjadi metoda alternatif dalam pengolahan air, yaitu melalui pembentukan radikal hidroksil, $\bullet\text{OH}$, dan dilaporkan dapat membunuh *Cryptosporidium* [N.A. Simmons, 1998]. Dua tipe AOP yang paling umum digunakan adalah melibatkan radiasi sinar UV-C, ozon, dan hidrogen peroksida [J.C. Ireland, 1993]. Namun biaya operasi yang tinggi, terkait dengan penggunaan bahan kimia “*nonregenerative*” tersebut, mendorong ahli kimia dan insinyur untuk mengembangkan metode pengolahan air secara fotokatalitik, sebagai alternatif. Radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dapat dihasilkan pada permukaan TiO_2 saat diiradiasi dengan cahaya yang sesuai, mempunyai potensi keefektifannya dalam pengolahan aliran air limbah [Butterfield *et al*, 1997].

Merujuk kepada fenomena “*Honda – Fujishima Effect*”, dimana jika film kristal TiO_2 dijadikan fotoanoda yang dipasangkan dengan katoda inert Pt, maka sangat mungkin mengusulkan *novel device* (saat itu), dalam aliran pengolahan air. Dengan cara tersebut, saat fotoanoda disinari dengan sinar yang sesuai akan secara intrinsik menghasilkan radikal hidroksil dan laju pembentukan radikalnya meningkat saat diberi tambahan bias potensial dari luar, *Electric Field Enhancement Effect*, EFE (Butterfield, 1987).. Radikal hidroksil yang terbentuk memiliki potensial oksidasi 2,8 V (vs NHE), yang cukup besar/kuat untuk mengoksidasi kebanyakan zat kimia, termasuk dinding penyusun mikroba berspora.

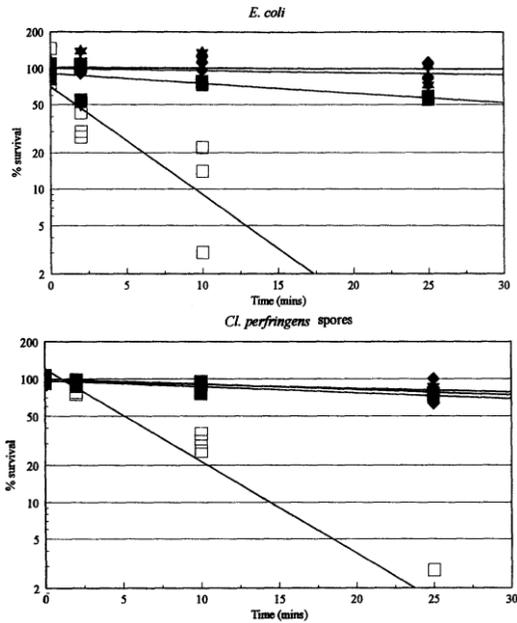
Dalam perangkat reaktor yang diusulkan (Gambar 3), integrasi cahaya, medan listrik dan fotokatalis disinergikan untuk mensterilkan air yang tercemar mikroba berspora (seperti *Clostridium perfringens*) dan mikroba kontaminan air pada umumnya (seperti *Escherichia coli*). Reaktor PEC dapat secara signifikan mengurangi jumlah bakteri indikator pencemar air (Gambar 4 dan 5). Reaktor fotoelektrokimia berbasis film titanium dioksida yang dimodifikasi dapat memberikan sumber radikal hidroksil yang efektif dan hemat energi. Radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dapat merusak dinding mikro organisme dan menyebabkan kematiannya, dengan mekanisme yang ilustrasikan pada Gambar 6 dan 7.



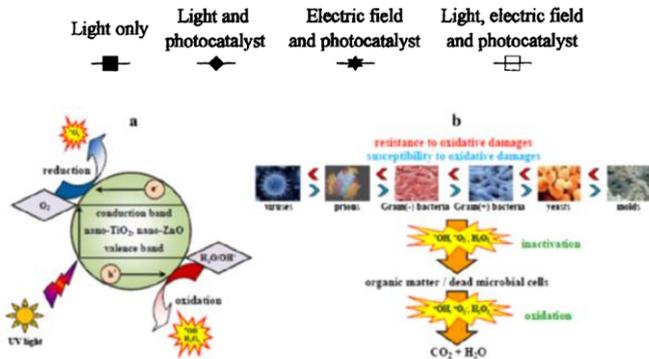
Gambar 3. [A]: Representasi skematis dari reaktor fotoelektrokimia. lampu UVA 2 x 8 W; (b) sel kaca Pyrex; (c) lubang masuk/keluar; (d) elektroda TiO₂ 5 cm x 5 cm x 0,2 cm; (e) Elektroda penghitung jaring Ni; (f) penyangga kaca. Elektroda referensi Ag/AgCl dihilangkan untuk kejelasan. [B]: Bagan unit reaktor dengan fleksibilitas operasi pada sistem fotokatalisis maupun fotoelektrokatalisis baik “batch” maupun sistem alir



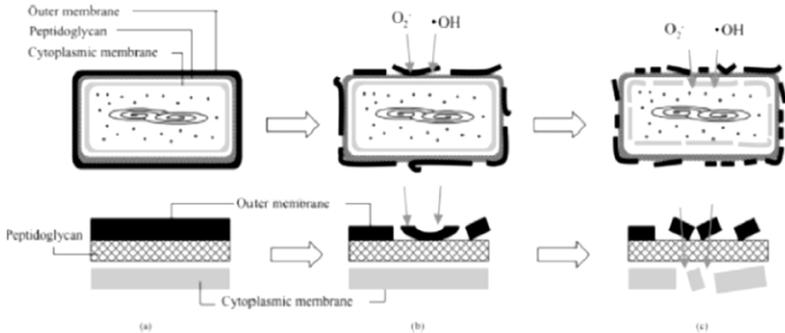
Gambar 4. [A]: Effect of applied potential on rate of disinfection of *E. coli* bacteria (1×10^4 cells ml^{-1}) at a TiO₂ thermal film. Potentials vs Ag/AgCl. Experimental conditions: (■) light off at open circuit, (○) light off at 1.0 V, (●) light on at 0.1 V, (-) light on at open circuit, (T) light on at 0.5 V and (◆) light on at 1.0 V. [B]: Effect of applied potential on rate of disinfection of *E. coli* bacteria in tap water (1×10^3 cells ml^{-1}) at a TiO₂ sol-gel electrode. Potentials vs Ag/AgCl. Experimental conditions: (■) light off at 1.0 V, (-) light on at 0.5 V and (●) light on at 1.0 V [Harper, *J.App.Elchem*, 1999]



Gambar 5. The effect of electric field enhancement of a fixed film defect TiO₂ photocatalyst and its component mechanisms on the survival of (A) *E. coli* and (B) *Cl. Perfringens*. Data points for 0% survival are not displayed on the graph [Harper *et al.*, 1999]



Gambar 6. [A]: Ilustrasi pembentukan spesies oksigen reaktif, termasuk radikal hidroksil (•OH), pada permukaan TiO₂ atau ZnO (a); dan dampak dari radikal hidroksil pada mikroba (b) [diadopsi dari Bogdan *et al.* *Nanoscale Research Letters* (2015) 10:309]



Gambar 7. Ilustrasi perusakan mikroba oleh radikal bebas [Diambil dari Rev.Adv. Mater.Sci. 51(2017)]

Quantum Yield

Quantum yield dalam proses fotoelektrokatalisis didefinisikan sebagai jumlah elektron yang dihasilkan dan diukur di sirkuit eksternal dari setiap jumlah foton (cahaya) yang mengenai fotokatalis.

Dalam perangkat yang dikembangkan, nilai *quanytum yield* yang diperoleh adalah 1,7% untuk film termal dan 0,6% untuk film sol-gel masing-masing pada pemberian bias potensial sebesar 1,0 V. Nilai tersebut sesuai dengan produksi radikal hidroksil dengan orde $2 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, dengan asumsi bahwa jumlah elektron yang melintasi antarmuka (yaitu, arus cahaya) sama dengan jumlah radikal hidroksil yang dihasilkan per detik. Namun, tingkat desinfeksi berada pada orde sekitar $30 \text{ sel s}^{-1} \text{ cm}^2$ yang menunjukkan bahwa banyak radikal $\bullet\text{OH}$ dikonsumsi oleh jalur reaksi lain, seperti dimerisasi untuk menghasilkan oksigen molekuler [Gonzalez, 1992]. Jalur reaksi tersebut dapat menyebabkan penurunan laju pembentukan radikal hidroksil.

Studi ini mengkonfirmasi bahwa penerapan bias potensial dapat secara signifikan meningkatkan laju desinfeksi suspensi *E. coli* pada elektroda TiO_2 yang diiradiasi sinar UV-A (berenergi rendah). Elektroda ini menyediakan sumber radikal $\bullet\text{OH}$ yang berpotensi kuat dan murah untuk pengolahan air tanpa memerlukan sinar berenergi tinggi (UV-C). Elektroda yang dibuat melalui oksidasi termal logam titanium pada $700 \text{ }^\circ\text{C}$ lebih efektif pada konsentrasi *E. coli* yang tinggi, sedangkan elektroda yang dihasilkan melalui proses sol-gel lebih efektif pada konsentrasi rendah.

Pembentukan radikal hidroksil (oksidator) akan berhenti saat permukaan anoda PEC tidak dikenai sinar, dengan demikian pengaturan dosis oksidator dapat diatur dengan mudah sesuai kebutuhan. Pada cara konvensional untuk keperluan mematikan mikroba atau menghancurkan zat kimia beracun diperlukan bahan kimia (oksidator kuat seperti gas klor), yang memerlukan transportasi dari pabrik ke situs pengolahan. Sementara itu, dengan cara yang diusulkan (reactor PEC) bahan oksidator dihasilkan secara *insitu* dan dapat dikontrol dosisnya, serta tidak ada *by product* beracun (seperti trihalo metan) yang terbentuk.

4. Eksplorasi lebih lanjut pada reactor fotoelektrokatalisis

Kekuatan atau daya oksidasi radikal hidroksil (2,8 V) cukup besar dibandingkan daya oksidasi zat lain yang biasa digunakan (Tabel 1). Dengan demikian sistem PEC mempunyai potensi digunakan untuk mengolah polutan organik beracun, seperti senyawa organoklor yang persisten dilingkungan. Pengolah limbah lain sering mengalami problem, atau tidak bisa menanggulangi, jika berhadapan dengan tipe senyawa tersebut.

Pentaklorophenol, PCP, banyak digunakan untuk pengawetan kayu dan biosida. Senyawa ini bersifat karsinogenik dan beracun bagi tanaman, hewan, dan manusia, bahkan pada konsentrasi rendah [Hayes and Lawa, 1991]. PCP juga dikenal sebagai prekursor untuk pembentukan polikloro dibenzo-p-dioksin (PCDDs) dan polikloro dibenzofuran (PCDFs), yang lebih berbahaya [Harnly *et al*, 2000].

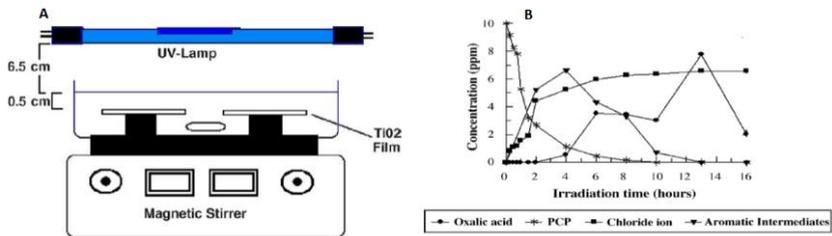
Hasil studi menunjukkan bahwa proses oksidasi maju seperti sonikasi, radiasi pengion, kombinasi UV dan ozon atau hidrogen peroksida mampu merusak polutan yang persisten, karena kemampuannya untuk menghasilkan spesies pengoksidasi kuat, •OH radikal. Sementara itu •OH radikal juga dapat dihasilkan pada permukaan TiO₂ saat sedang disinari dengan sinar UV [L.K. Weavers *et al* 2000].

Tabel 1. Nilai potensial oksidasi berbagai zat pengoksidasi

Tabel 1. Nilai potensial oksidasi berbagai zat pengoksidasi

Oksidan	Potensial oksidasi (V)	Kekuatan oksidasi relatif (terhadap klorine)
Oxigen	1,23	0,88
Dikromate	1,33	0,98
Khlorine	1,36	1,00
Ion permanganat	1,67	1,24
Hidrogen peroksida	1,77	1,30
Ozone	2,07	1,52
Radikal hidroksil •OH	2,80	2,06

Degradasi PCP di bawah sinar UV menggunakan fotokatalis suspensi TiO₂ untuk mineralisasi PCP menghasilkan asam format dan asam asetat sebagai senyawa antara [Theurich, 1996]. Penggunaan fotokatalis dalam sistem suspense menyisakan masalah teknis yang besar dalam mengambil katalis dari air yang diolah. Untuk mengatasi masalah tersebut banyak peneliti menggunakan *immobilized photocatalyst*, yaitu lapisan TiO₂ yang dilekatkan pada berbagai penyangga yang sesuai [Gambar 8].



Gambar 8. [A]: Skema reaktor fotokatalitik, terdiri dari lampu UV cahaya hitam 2 x 10 W (Toki, Jepang), bejana kaca Pyrex yang dilengkapi batang magnet dan dua lembar katalis, dan pengaduk magnet. [B]: Lama waktu degradasi pentaklorofenaol (PCP) dan pembentukan senyawa antara selama proses fotokatalisis pada film TiO₂. [Gunlazuardi & Andayani, 2005]

Investigasi kemampuan sistem fotokatalis terimobilisasi dalam sistem fotokatalisis atau fotoelektrokatalisis dalam mengoksidasi zat kimia persisten dilingkungan, mengarahkan kami menyusun unit pengoksidasi berbasis film TiO₂. Beberapa tipe unit pengoksidasi yang dikembangkan adalah menggunakan kaskade cakram atau lembaran film TiO₂ yang dilapiskan pada penyangga logam Ti (Gunlazuardi, 2005); *glass bed* (Suhardono, 2004), silika bermagnet (Gunlazuardi, 2022).

5. Pengembangan sensor pengukur Kebutuhan Oksigen Kimiawi air

Dalam uraian sebelumnya telah disampaikan bahwa pada prinsipnya sistem fotokatalisis mampu menghasilkan radikal hidroksil secara *insitu*, yang mampu merusak/memutus ikatan kimia dalam zat yang persisten dilingkungan. Pada prinsipnya dengan potensial oksidasi yang kuat tersebut, hampir semua ikatan kimia yang biasa ada di berbagai air (termasuk air limbah) dapat dioksidasi. Hal tersebut memberi peluang untuk mengusulkan sistem tersebut digunakan sebagai agen pengoksidasi dalam penentuan kebutuhan oksidasi kimiawi dalam air.

Metoda standar penentuan kebutuhan oksigen kimiawi atau **Chemical Oxygen Demand (COD)** yang digunakan saat ini adalah metoda yang melibatkan penggunaan oksidator kuat kalium bikromat, asam sulfat pekat, dan perak sulfat sebagai katalis [APHA 1, 1992]. Kepedulian akan aspek kesehatan lingkungan mendorong perlunya peninjauan kritis metoda standar penentuan COD tersebut, karena adanya keterlibatan bahan-bahan berbahaya dan beracun dalam proses analisisnya. Berbagai usaha telah dilakukan untuk mencari metoda alternatif yang lebih baik dan ramah lingkungan.

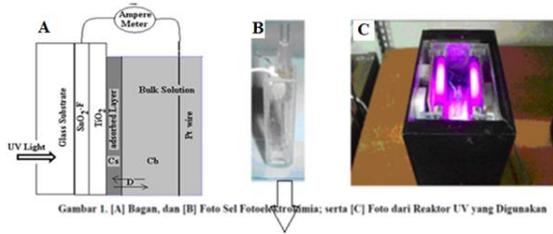
Zhao *et al.* melaporkan metode baru sebagai metoda alternatif pengukuran COD [H. Zhao, 2004]. Metoda yang diusulkan ini berbasis gabungan fotokatalisis dan elektrokimia, dengan pendekatan baru. Namun daerah kerja metoda tersebut masih sempit yakni pada rentang nilai COD sampai 60 mg/L O₂. Disamping itu desain elektroda mengandung kerawanan akan gangguan serapan yang tinggi oleh matrik contoh air partikel tersuspensi, dan padatan yang melayang. Karena arah datangnya sinar untuk mengaktifkan fotoelektrokatalis dari arah yang harus melewati badan contoh air.

Salah satu hal penting yang harus diperbaiki dari sistem fotoelektrokimia untuk penentuan COD (***Photo Electrochemical Oxygen Demand, PECOD***) yang dikembangkan oleh Zhao *et al*, saat itu, adalah (i) aspek kinerja fotokatalis TiO₂ dalam kemampuannya mendegradasi berbagai jenis zat organik dan (ii) kapasitas permukaan TiO₂ mengadsorpsi zat organik. Fotokatalis dengan kinerja yang efektif akan menyebabkan sistem oksidasi ini mampu memineralisasi dengan sempurna semua jenis polutan organik yang mendekati permukaannya. Sementara itu kapasitas adsorpsi yang tinggi dari fotokatalis akan menghasilkan daerah linieritas pengukuran COD yang lebih luas.

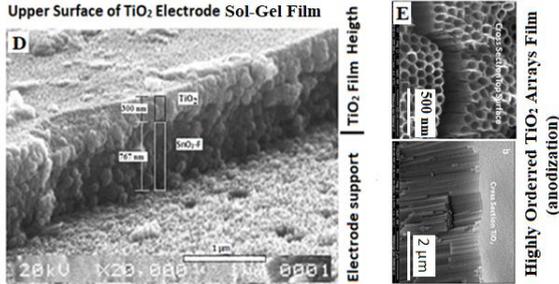
Kedua faktor tersebut di atas sangat erat kaitannya dengan sifat dan perilaku permukaan fotokatalis TiO₂ yang digunakan. Banyak laporan penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan partikel berukuran nano akan menghasilkan fotokatalis yang lebih aktif dan mempunyai luas permukaan yang tinggi [U. Diebold 2003]. Film TiO₂ yang memiliki ukuran partikel pada orde dibawah 10 nm dilaporkan dapat difabrikasi dengan cara sol-gel, dengan menggunakan prekursor titanium alkoksida [S. Fazio, 2008].

Kelompok penelitian kami telah lama mengadopsi beberapa cara sol-gel untuk menghasilkan film TiO₂ berukuran nano. Sayangnya film sol gel diatas penyangga elektroda kurang kuat ikatannya, sehingga mudah lepas. Sementara itu, penumbuhan film TiO₂ diatas substrat konduktif (logam Ti) secara elektro oksidasi mampu menghasilkan lapisan film TiO₂ yang kuat. Sebagai tambahan film yang dihasilkan memiliki morfologi unik, yaitu *highly ordered TiO₂ nanotube arrays*, dan memiliki aktifitas yang sangat baik [Budiman, 2022].

Salah satu titik krusial dalam pengembangan sistem sel fotoelektrokimia tersebut di atas adalah preparasi film TiO₂ yang berukuran nano, agar diperoleh permukaan foto anoda yang mempunyai luas permukaan besar. Metoda sol-gel dan elektro oksidasi logam titanium dapat digunakan untuk mendapatkan film TiO₂ dengan morfologi sesuai yang diinginkan.



Gambar 1. [A] Bagan, dan [B] Foto Sel Fotoelektrokatalisis; serta [C] Foto dari Reaktor UV yang Digunakan

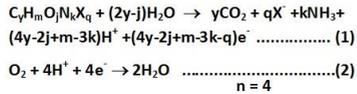
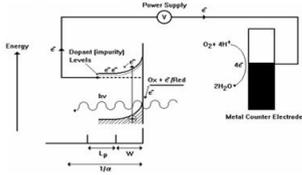


Gambar 9. [A]: Ilustrasi begini “probe” sel fotoelektrokatalisis; [B]: foto fisik probe sensor; [C]: Kotak wadah iluminasi “probe”; [D]: Foto SEM elektroda $\text{TiO}_2\text{-SnO-F}$ diatas “conductive and transparent substrate”; [E]: Foto SEM permukaan elektroda lapisan TiO_2 yang dibuat dengan anodisasi

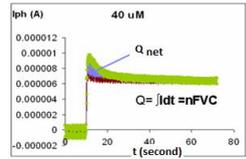
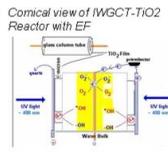
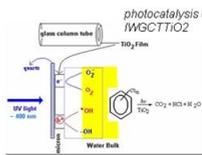
Elektroda kerja film TiO_2 nanopartikel, yang dilekatkan di atas gelas ITO, telah berhasil dipreparasi dan dikarakterisasi. Film yang disiapkan dengan cara sol-gel didominasi oleh TiO_2 anatase ruah porous dan berstruktur nano. Sedangkan film yang disiapkan dengan cara elektrooksidasi berupa kumpulan tabung dari TiO_2 berukuran nano yang teratur, *Highly Ordered TiO_2 Nano Tube Arrays* (Gambar 9). Fotoanoda tersebut dapat difungsikan sebagai sensor untuk mengukur COD sampel air. Elektroda kerja film TiO_2 tersebut menghasilkan profil arus cahaya terhadap waktu yang hasil integrasi I vs t nya memberikan nilai Q , setara dengan zat organik dalam sampel larutan (Gambar 10 dan 11).

Photo electro catalytic oxidation:

J.C. Harper, P.A. Christensen, T.A. Egerton, T.F. Curtis and J. Gunlazuardi: "Effect of catalyst type on the kinetics of the photoelectrochemical disinfection of water inoculated with *E.coli*" *Journal of Applied Electrochemistry* 31:623-628. 2001



$$COD \text{ (mg/L } O_2) = Q/4FV \times 32000$$

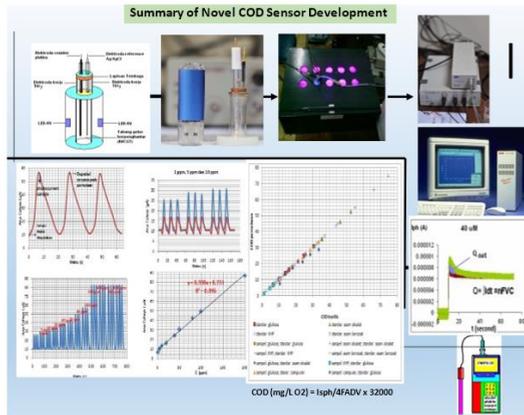


Plot of Photocurrent against times, which represents the oxidation of chemicals at anode and reduction of O_2 at cathode

J.Gunlazuardi, M.Nurdin, H.Surahman, Y.K.Krisnandi. *Electric Field Effect on TiO2 Film Coated on to an IWGCT Reactor*. IUPAC- 21 Symposium 2006.Kyoto, Japan

Gambar 10. Ilustrasi pengembangan sensor kebutuhan kimia oksigen berbasis foto elektrokatalisis

Nilai Q tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai kebutuhan kimiawi atau *Chemical Oxygen Demand (COD)* sampel air. Metode baru analisis COD ini dapat menjadi alternatif potensial sebagai pengganti metoda konvensional, karena, cepat, langsung, ramah lingkungan.



Gambar 11. Prototype of Photo Electro Chemical Oxygen Demand (PECOD) dan sinyal atau data yang dihasilkan

Cara penentuan COD secara konvensional yang menggunakan oksidator kimiawi, kalium bikhromat, yang beracun mempunyai potensi membebani aspek kesehatan lingkungan. Sementara itu dengan PECOD, dalam setiap proses analisisnya menggunakan oksidator radikal hidroksil yang diproduksi secara insitu pada permukaan fotoanoda. Dengan demikian mengeliminasi kebutuhan dan transportasi bahan kimia beracun, serta tidak menyisakan kelebihan oksidan pada setiap prosesnya.

6. **Artifisial Fotosintesis untuk konversi CO₂ menjadi metanol**

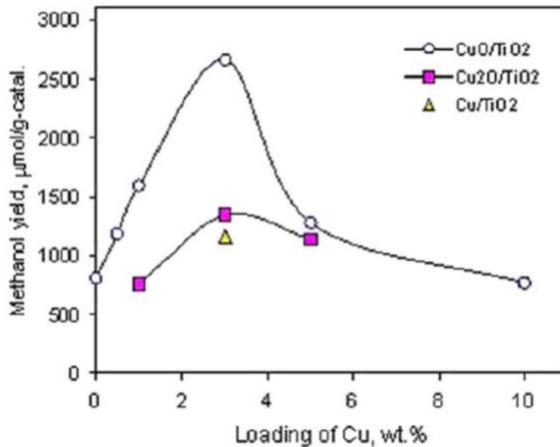
Sistem Fotoelektrokatalisis (PEC) menjadi dasar pengembangan perangkat artifisial fotosintesis, yang dapat diarahkan untuk menyimpan energi matahari menjadi bahan bakar (*fuel*) atau bahan kimia berguna lainnya. Salah satu tantangan besar saat ini adalah bagaimana mengurangi emisi atau sumber emisi CO₂, menangkap dan mengolah CO₂ yang ada di atmosfer.

Emisi karbon dioksida atmosfer dalam skala besar kini telah menjadi isu lingkungan global akibat efek rumah kaca. Banyak peneliti telah menunjukkan bahwa CO₂, dengan adanya air, dapat diubah secara fotokatalitik menjadi metana dan/atau metanol melalui TiO₂ dan TiO₂ yang didoping tembaga [Tseng, 2002, Yamashita, 1994, Adachi, 1994] dan katalis oksida logam lainnya [Subrahmanyam, 1994]. Sangat mungkin bahwa efisiensi dan selektivitas produk bergantung pada jenis katalis. Energi celah pita TiO₂ sebesar 3.0 dan ~3.2 eV (untuk rutil dan anatase), mengindikasikan bahwa perlu sinar ultraviolet dekat (UV A) untuk mengaktifkannya. Walau tidak banyak, sinar UV-A tersedia dalam fraksi sinar matahari yang sampai ke bumi.

Oleh karena itu sangat mungkin dapat mengelola proses fotokatalitik untuk konversi CO₂ menjadi senyawa organik yang berguna (methanol) menggunakan fotokatalis TiO₂ atau TiO₂ yang dimodifikasi dan sinar matahari. Metanol dapat dipakai sebagai bahan bakar alternatif dan/atau penggunaan lainnya. Pada prinsipnya, ide seperti itu layak tetapi untuk kepentingan praktis beberapa masalah perlu diselesaikan terlebih dahulu. Masalah yang paling penting adalah hasil kuantum yang rendah dalam proses fotokatalisis, karena besarnya rekombinasi elektron dan lubang positif, sehingga hanya menghasilkan spesies pereduksi terbatas pada permukaan katalis.

Untuk mengatasi masalah tersebut, banyak peneliti telah memodifikasi TiO₂ dengan mendopingnya dengan spesi logam. Beberapa ion logam transisi telah ditunjukkan mampu meningkatkan laju oksidasi atau reduksi fotokatalitik dengan mengubah dinamika rekombinasi lubang elektron dan transfer muatan

antarmuka [Chiang, 2002, Zuas 2014]. Yamashita et al. [1994] melaporkan bahwa penambahan spesi tembaga oksida ke dalam matriks TiO_2 dapat meningkatkan efisiensi dan selektivitas produksi metanol. Kami menemukan bahwa spesi CuO menunjukkan keselektifannya kearah produk metanol (Gambar12) [Slamet et al 2005].



Gambar 12. Pengaruh loading dan spesi Cu dalam matrik TiO_2 (Slamet, 2005)

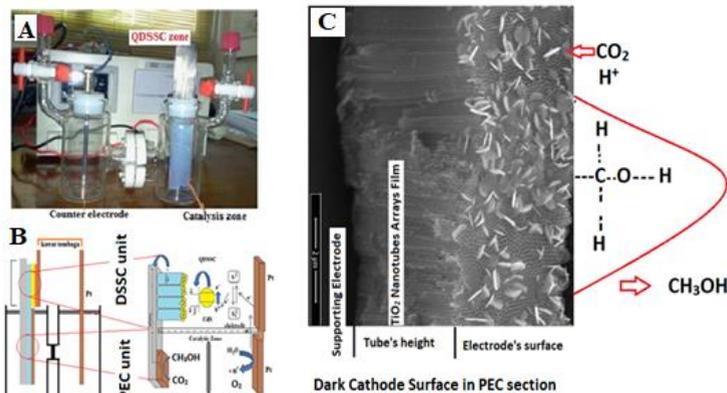
Merujuk kepada hasil yang dijelaskan sebelumnya, bahwa untuk melakukan reduksi secara fotokatalitik pada permukaan TiO_2 adalah penting untuk memodifikasi permukaan TiO_2 dengan spesi logam lain (tembaga misalnya). Salah satu fungsi modifier yang penting adalah kemampuannya berinteraksi dan mengakomodir gas CO_2 agar terserap dengan baik pada *locus* reaksi reduksi. Sementara itu dopan harus tidak mengganggu keberadaan sisi *locus* oksidasi, yang akan mengoksidasi air menjadi oksigen dan proton (H^+), yang akan menjadi sumber proton yang dibutuhkan untuk konversi CO_2 menjadi methanol. Namun seperti sistem fotokatalisis pada umumnya, isu rekombinasi menjadi sumber rendahnya quantum yield (*light to methanol*).

Situasi tersebut sangat mungkin bisa diminimalisir dengan merangkai fotokatalis dalam sistem fotoelektrokatalisis. Qin, et al (2013) menunjukkan bahwa, jika pada *Dyes Sensitized Solar Cell* (DSSC), lapisan TiO_2 pada bagian DSSC diperpanjang dan ditempatkan pada media elektrolit serta dipasangkan

dengan elektroda pelawan yang anodik, kita mendapatkan zona katalis (*dark cathode*), yang mampu mereduksi aqueous CO₂ menjadi metanol dengan baik.

Berdasarkan hal diatas kami mengusulkan perangkat tandem DSSC-PEC yang mengintegrasikan sinar, fotokatalis, air, medan listrik dalam sistem, sehingga CO₂ dan air dalam sistem tersebut akan diubah menjadi metanol dan oksigen (Gambar 13). Dalam sistem tersebut sel DSSC berfungsi sebagai penyedia bias potensial (*electric filed enhancement effect*) bagi sel PEC dan sebagai unit pemanen cahaya yang akan diubah menjadi "hot electron" dan akan diinjeksikan ke *dark* katoda, TiO₂ di bagian PEC. Reduksi CO₂ akan berlangsung pada *dark* katoda PEC, sedangkan anoda PEC (mendapat tarikan energi dari DSSC) akan mengoksidasi air menjadi proton (H⁺), oksigen, dan electron yang dialirkan ke DSSC.

Dengan cara diatas, pada prinsipnya unit DSSC memanen cahaya (tampak) mengubah energinya atau menyimpannya menjadi metanol pada *dark* katoda di unit PEC, sebagai hasil proses reaksi CO₂ dan air dengan adanya sinar dan katalis. Analogi sederhananya, layaknya unit DSSC berfungsi sebagai daun pemanen sinar matahari, sementara unit PEC berfungsi sebagai akar tempat terakumulasinya karbohidrat. Unit perangkat tersebut dengan banyak variannya menunjukkan potensi keberhasilannya dan sedang terus dikembangkan oleh para peneliti (Qin *et al*, 2013 Syauqi *et al*, 2019; Nguyen *et al*, 2022).



Gambar 13. Foto perangkat artifisial fotosintesis dua kompartemen (A); Bagan skematik perangkat artifisial fotosintesisFoto SEM dark katoda pada unuit PEC dan ilustrasi berlangsungnya konversi CO₂ menjadi methanol (C)

7. Konversi nitrogen menjadi amonia secara artifisial fotosintesis

Perangkat tandem DSSC-PEC mempunyai potensi untuk menjalankan proses fiksasi gas nitrogen menjadi ammonia. Penyesuaian perlu dilakukan, khususnya material dark katoda harus mampu menyerap gas nitrogen. Modifikasi TiO₂ dengan memperkaya populasi oksigen vakansi atau meningkatkan populasi Ti³⁺ dilaporkan menghasilkan daya serap nitrogen yang lebih baik dibandingkan bare TiO₂, dan akan menyebabkan konversi nitrogen menjadi ammonia berlangsung menjadi lebih baik (Hirakawa, 2017). Modifikasi TiO₂ dengan bismut oksihalida dilaporkan juga memiliki efek serupa (Annur, 2020)

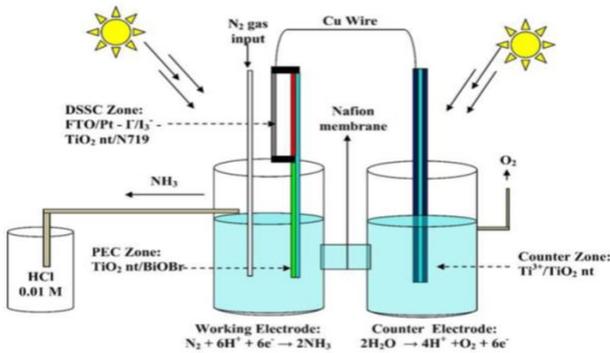
Amonia (NH₃) merupakan senyawa kimia yang memiliki banyak kegunaan, salah satunya adalah sebagai pupuk yang berfungsi sebagai pasokan nutrisi bagi tanaman. Kebanyakan industri mensintesis amonia melalui proses Haber-Bosch (Jening, 2013), yang berlangsung pada tekanan dan temperatur yang sangat tinggi yaitu sekitar 200 atm dan 450°C (Bicer Y & Dincer I, 2017). Saat ini, untuk mencapai suhu tersebut, digunakan bahan bakar fosil dan juga sebagai prekursor hidrogen. Proses konvensional di industri untuk produksi ammonia menghasilkan emisi gas CO₂ lebih dari 400 milyar ton yang terhitung 1.6% dari total emisi CO₂ global.

Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan proses alternatif yang lebih ramah lingkungan dan hemat energi. Proses fotokatalisis, menggunakan material semikonduktor, menjadi alternative solusi dalam sintesis amonia yang ramah lingkungan (temperatur ruang, tekanan atmosfer, tanpa emisi gas CO₂, dan menggunakan sumber energi dari sinar matahari). Dengan menggunakan proses fotokatalisis system suspense, Hirakawa (2017) mendemonstrasikan keberhasilan fiksasi gas nitrogen menjadi ammonia menggunakan TiO₂ yang diperkaya dengan populasi spesi Ti³⁺ atau vakansi oksigen dengan efisiensi *solar to ammonia* sebesar 0,02%. Lebih lanjut, pengaruh *oxygen vacancy*, dalam TiO₂ rutile dan anatase komersil, terhadap produkdi yang memiliki jumlah *oxygen vacancy* lebih besar, dapat menghasilkan amonia sebesar 35 μmol dalam 48 jam. Dari beberapa penelitian tersebut jumlah amonia yang dihasilkan TiO₂ masih sangat sedikit, karenanya diperlukan pengembangan lebih lanjut.

Semikonduktor bismut oksida halida (BiOX) menunjukkan potensi dalam produksi amonia didaerah sinar tampak dengan jumlah amonia yang dihasilkan lebih dari 10 μmol g⁻¹h⁻¹. Ruan et al (2015) mengembangkan nanosheet BiOBr dengan *oxygen vacancy* (OVs) pada permukaan bidang kristal [001] menghasilkan laju pembentukan NH₃ sebesar 223 μmol g⁻¹h⁻¹. Diantara

beberapa jenis bismut oksida halida, BiOBr mempunyai hasil yang paling besar dalam memproduksi amonia sehingga berpotensi untuk dikompositkan dengan TiO₂.

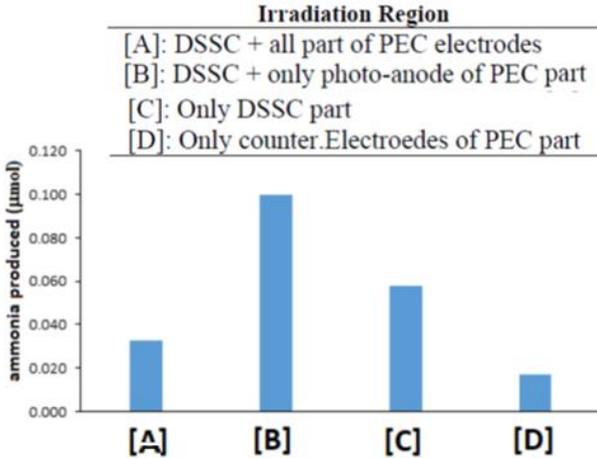
Berdasarkan pada perkembangan penelitian yang telah dijabarkan diatas, kami melakukan investigasi sintesis amonia dari N₂ menggunakan komposit TiO₂ nanotube-BiOBr dan pengembangan sistem konfigurasi sel fotoelektrokimia. Untuk keperluan tersebut dilakukan sintesis nanotube TiO₂ (Surahman (2017) kemudian dimodifikasi menjadi komposit TiO₂ nanotube-BiOBr dengan gabungan metode sol gel dan elektrokimia (diadopsi dari Xing dkk 2010). Dengan cara tersebut BiOBr dapat tersusun rapih pada plat TiO₂ nanotube. Konfigurasi sistem sel merujuk pada penelitian Qin dkk (2013) dan Surahman (2017) berupa tandem sel DSSC dengan sel fotoelektrokimia (*Photo Electrochemical Cell, PEC*) sebagai zona katalisis, yang memisahkan katoda dan anoda menjadi kompartemen yang berbeda (Gambar 14).



Gambar 14. Ilustrasi bagan perangkat artificial fotosintesis untuk fiksasi nitrogen, menggunakan *dark* katoda pada unit PEC

Sistem tandem DSSC-PEC (Gambar 14), yang dikembangkan, menggunakan fotoanoda TiO₂ nanotube tersensitisasi pewarna N719 (TiO₂NT/N719) dalam unit DSSC nya. Sedangkan zona PEC menggunakan *dark* katoda komposit TiO₂ nanotube-Bismut Oksida Bromida (TiO₂NT/BiOBr), dan pasangan fotoanoda berupa Ti³⁺/TiO₂ atau TiO₂/BiVO₄ dimana tempat oksidasi fotokatalitik air untuk menyediakan sumber proton.

Eksperimen konversi nitrogen, yang disebutkan di bagian sebelumnya, disajikan dalam bentuk jumlah amonia yang dihasilkan selama 24 jam. pada berbagai kondisi, dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Amount of ammonia produced in different irradiation region for 24 hours

Terbukti dengan jelas bahwa di bawah iluminasi cahaya tampak, ketika bagian DSSC dan fotoanoda bagian PEC disinari, sel tandem DSSC-PEC menghasilkan amonia sebanyak 0,1 µmol selama 24 jam. Ini jauh lebih baik ketika (i) hanya bagian DSSC dari tandem DSSC-PEC yang diterangi (0,58 µmol), (ii) bagian DSSC dan semua elektroda dari bagian PEC yang diterangi (0,03 µmol), (iii) hanya bagian anoda foto dari PEC dalam sel tandem DSSC-PEC yang menyala (0,017 µmol). Sedangkan, hampir tidak ada amoniak yang dapat dideteksi ketika tidak ada cahaya yang disinari pada sel tandem DSSC-PEC (semua kondisi gelap).

Dalam tandem DSSC-PEC tersebut, unit DSSC memiliki efisiensi sel surya sebesar 7,22%. Sedangkan secara keseluruhan, *solar to ammonia* sstem DSSC-PEC adalah sekitar 0,005%. Dengan tipikal luasan elektroda kurang lebih sebesar 1,5 x 4 cm, sumber energi cahaya tampak, dan air sebagai sumber proton, laju produksi ammonia saat ini adalah sebesar 4×10^{-2} µmol/jam. Hasil ini memberikan bukti bahwa tandem DSSC-PEC yang dikembangkan, di bawah iluminasi cahaya tampak semata, dan menggunakan air sebagai sumber proton jelas mampu mengubah nitrogen menjadi ammonia.

Dari sisi *quantum yield*, hasil tersebut masih kecil dan perlu ditingkatkan dengan memperbaiki beberapa variable penting terkait. Namun ini merupakan langkah penting untuk mengembangkan proses konversi nitrogen menjadi ammonia yang ramah lingkungan.

8. Produksi hidrogen dari air secara artifisial fotosintesis

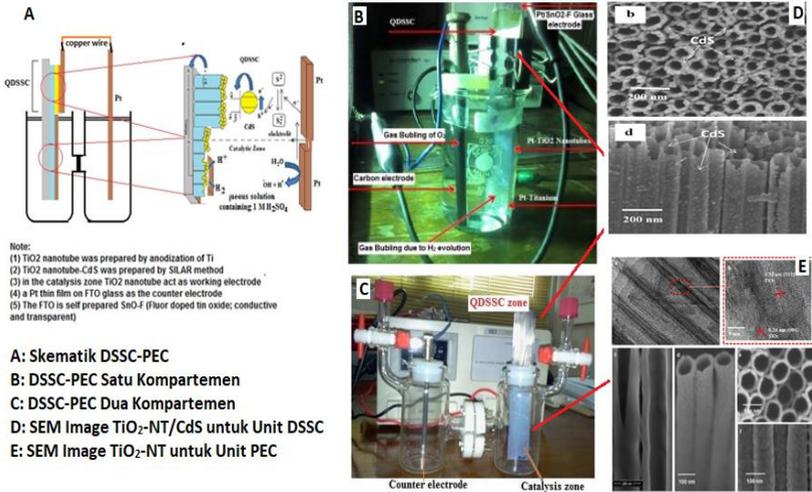
Saat ini metoda konvensional untuk menghasilkan hidrogen dari air adalah dengan cara elektrolisis, yaitu menggunakan pasangan elektroda inert dan input energi listrik dari luar. Teknologi elektrolisis yang tersedia saat ini relatif masih mahal, karena perlu input atau konsumsi energi besar untuk menghasilkan reaksi pemecahan air. Sistem tandem DSSC-PEC memiliki potensi digunakan untuk menghasilkan hidrogen dari air (*water splitting*).

Sherman *et al.* (2017) mengembangkan sistem DSSC-PEC untuk memecah air dibawah penyinaran cahaya tampak, menghasilkan hidrogen dan oksigen. Mereka menggunakan fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{Dyes Synthetic}$ (senyawa kompleks rutenium) yang responsif terhadap cahaya tampak, baik untuk sel DSSC maupun PEC. Konfigurasi ini mempunyai kelemahan yaitu rentan terhadap kerusakan fotoanoda dibagian unit PEC, yaitu sangat rentan pada oksidasi *Dyes* organiknya.

Saat ini harga *sensitizer* zat warna sintetis (senyawa kompleks ligan organik -ruthenium) masih sangat mahal dan belum ada industri dalam negeri yang memproduksinya. *Sensitizer* anorganik, seperti CdS bisa menjadi alternatif untuk keperluan tersebut. Kami mengembangkan preparasi *quantum dot* CdS dan TiO_2 *nanotubes array* (TNA) untuk digunakan dalam sistem tandem yang diusulkan.

Sistem tandem yang digunakan terdiri dari unit sel surya menggunakan fotoanoda TiO_2 tersensitasi *quantum dot* CdS (QDSSC) dan zona sel fotoelektrokimia (PEC), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16. *Quantum dot* CdS tertata pada TiO_2 *nanotubes array* (TNA) yang digunakan sebagai fotoanoda dalam sel surya (QDSSC). Dibandingkan zat warna sintetis kompleks rutenium, CdS lebih murah dan memiliki koefisien penyerapan yang tinggi, celah pita yang dapat dikontrol dengan ukuran, dan stabilitas foto-kimiawi lebih baik [Moha Putra, 2008].

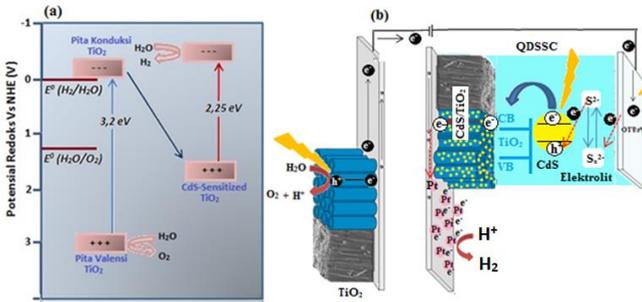
Our Typical Modified DSSC for Hydrogen Production



Gambar 16. Ilustrasi bagan perangkat artificial fotosintesis (AF) untuk produksi hydrogen dari air (A); Foto perangkat AF satu kompartemen (B) dan dua kompartemen (C); SEM *image* permukaan *dark* katoda diatas substrat

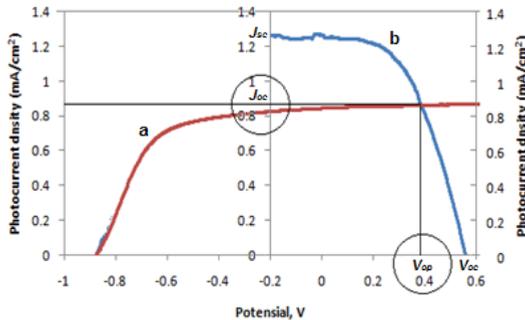
Perangkat QDSSC-PEC menggunakan dua buah fotosel yaitu unit *solar cell* (DSSC) berbasis TiO₂ tersensitasi CdS *quantum dots* dan unit sel fotoelektrokatalisis (PEC) berupa pasangan elektroda film TiO₂-Nanotube. Saat unit solar sel menerima cahaya akan menghasilkan *hot* elektron, yang akan bermigrasi ke *dark* katoda zona PEC, dan menginisiasi reduksi proton menjadi hidrogen. Sumber proton berasal dari oksidasi air pada fotoanoda unit PEC.

Sistem dua foto sel mempunyai keuntungan dibandingkan sistem satu foto sel yaitu proses pemisahan muatan tidak membutuhkan bias potensial eksternal dan meminimalkan pemakaian *hole scavenger* pasangan redoks. Diagram aliran elektron sistem QDSSC-PEC (Gambar 17) memiliki kemiripan dengan proses diagram *Z-scheme* dalam fotosintesis. Sistem QDSSC-PEC merupakan ***quasi-artificial photosynthesis***.



Gambar 17. Diagram aliran elektron sel QDSSC-TNTAs untuk produksi hidrogen melalui proses pemecahan air. (a) konsep diagram pita energi dan (b) konfigurasi sel [Surahman, 2017]

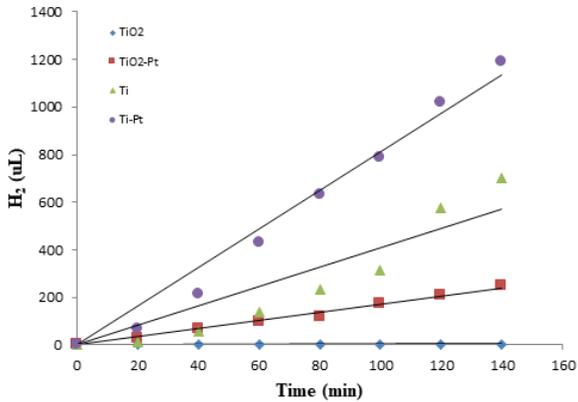
Kondisi operasi sel QDSSC-TNTAs dapat estimasikan dari dinamika kurva *photocurrent density* unit PEC dan kurva *photocurrent density*-potensial unit DSSC (Gambar 19). Seperti ditunjukkan dalam Gambar 17 tersebut, V_{op} adalah potensial operasional sel QDSSC-TNTAs yang dihasilkan dari perpotongan kurva *solar cel* dan kurva *photocurrent* TiO_2 -NTAs dalam larutan asam sulfat 0,5M (a) dan kurva *I-V* solar cell QDSSC (b), V_{oc} potensial open. Potensial operasional ini berperan sebagai potensial eksternal sistem fotoelektrokimia. J_{oc} adalah arus listrik yang dihasilkan sel QDSSC-TNTAs dan digunakan untuk konversi ion H^+ menjadi H_2 . Menggunakan data pada Gambar 18 dapat diprediksi bahwa laju pembentukan hidrogen optimum sistem sel QDSSC-TNTAs, dapat diperoleh dengan meningkatkan arus operasional, J_{op} TNTAs sampai mendekati arus *short circuit*, J_{sc} pada potensial operasional di atas 0V.



Gambar 18. *Photocurrent density* anoda TiO_2 -NTAs dalam larutan asam sulfat 0,5M (a) dan kurva *I-V* solar cell QDSSC (b), V_{oc} potensial open circuit, V_{op} potensial operasional, J_{sc} arus short circuit dan J_{oc} arus operasional [Surahman, 2017]

Untuk kepentingan investigasi, *dark* katoda zona katalisis unit PEC, yaitu bahan penyangga konduktif logam Ti yang dilapisi dengan TiO₂-Nanotube, dimodifikasi dengan komponen lain, untuk meningkatkan sifat katalitik zona katalisis dalam mereduksi ion H⁺ menjadi gas hidrogen. Diantaranya adalah variasi zona katalisis dengan mendeposisikan logam Pt pada permukaan plat Ti (Pt/Ti) dan TiO₂/Ti nanotubes (Pt/TiO₂/Ti).

Logam Pt mempunyai kestabilan tinggi dan sifat katalitik terbaik dalam proses reduksi H⁺ menjadi gas H₂. Hasil pengukuran gas hidrogen yang dihasilkan dengan menggunakan sisi reduksi *dark* katoda zona katalisis (PEC) TiO₂/Ti, Pt/TiO₂/Ti, Ti dan Pt/Ti dapat dilihat pada Gambar 19 di bawah ini.



Gambar 19. Jumlah hidrogen yang terbentuk terhadap waktu pada intensitas cahaya 140 mw/cm² sistem sel QDSSC-PEC dengan variasi zona katalisis (TiO₂/Ti, Pt/TiO₂/Ti, Logam Ti dan Pt/Ti) dalam H₂SO₄ 0,5M. [Surahman, 2017]

Gambar 19 memperlihatkan pengaruh yang sangat signifikan dari keberadaan logam Pt pada permukaan zona katalisis TiO₂/Ti terhadap jumlah hidrogen yang dihasilkan. Pada sistem katalis TiO₂/Ti elektron yang berasal dari zona *solar cell* QDSSC akan lebih suka berada pada substrat yang bersifat lebih konduktif dalam hal ini logam Ti dibandingkan pada permukaan TiO₂ yang kurang konduktif. Sehingga ketika permukaan TiO₂ sistem TiO₂/Ti kontak dengan larutan yang mengandung ion H⁺ proses reduksi proton menjadi gas hidrogen berjalan sangat lambat.

Keberadaan logam Pt pada permukaan TiO₂/Ti akan membentuk *heterojunction* Pt-TiO₂-Ti. Karena fungsi kerja Pt lebih tinggi dibandingkan Ti dan TiO₂ sehingga elektron akan mengalir ke antarmuka Pt/TiO₂ maupun ke permukaan logam Pt. Pada saat sistem Pt/TiO₂/Ti digunakan sebagai zona katalisis maka ion H⁺ yang kontak dengan permukaan logam Pt maupun teradsorpsi pada antarmuka Pt/TiO₂ akan direduksi menjadi gas hidrogen. Oleh karena itu laju pembentukan gas hidrogen untuk zona katalisis Pt/TiO₂/Ti jauh lebih tinggi dibandingkan dengan zona katalisis TiO₂/Ti (Gambar 20).

Variasi zona katalisis berikutnya yang digunakan adalah plat Ti dan plat Pt/Ti. Zona katalisis Pt/Ti menghasilkan jumlah hidrogen lebih banyak dibandingkan zona katalisis logam Ti. Keberadaan logam Pt pada permukaan plat Ti akan memperbanyak pusat aktif katalitik untuk mengubah ion H⁺ menjadi hidrogen. Elektron yang mengalir pada substrat titanium akan di transfer ke permukaan logam platinum karena dalam sistem *junction* Ti-Pt, fungsi kerja logam Pt lebih tinggi dibandingkan dengan logam Ti. Ion H⁺ yang teradsorpsi di permukaan logam Pt, antarmuka Pt/Ti dan permukaan logam Ti akan di reduksi menjadi gas hidrogen. Akibatnya laju pembentukan gas hidrogen dengan menggunakan zona katalisis Pt/Ti lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan zona katalisis logam Ti yaitu 8,11 berbanding 4,08 μL/menit.

Efisiensi Energi sel QDSSC-TNTAs

Efisiensi energi sel QDSSC-TNTAs untuk menghasilkan hidrogen dihitung menurut persamaan:

$$\eta = \frac{\phi_{H_2} G_f^0 H_2}{P_{light}}$$

Dimana ϕ_{H_2} adalah laju pembentukan hidrogen per luas area yang dikenai sinar (mol/s/m²), $G_f^0 H_2$ adalah energi bebas Gibbs pembentukan hidrogen (237 KJ/mol) dari proses pemecahan air, dan P_{light} adalah daya lampu yang digunakan (W/m²). Laju pembentukan hidrogen dan efisiensi energi sel QDSSC-TNTAs dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Laju pembentukan H₂ dan efisiensi energi sel QDSSC-TNTAs dengan variasi elektroda zona katalisis, intensitas cahaya 1400 W/m² dalam 0,5 M H₂SO₄.

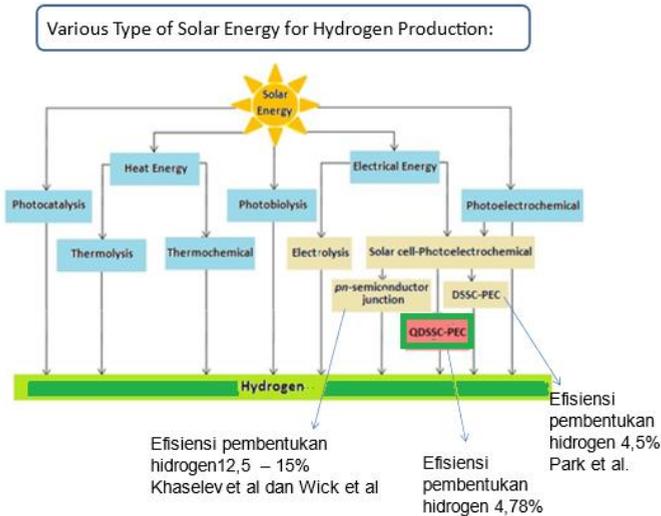
Variasi <i>dark</i> katoda zona katalisis	Laju pembentukan H ₂ (φ) Mol/s.m ²	Efisiensi energi %
TiO ₂	0,09 . 10 ⁻⁵	0,02
Pt/TiO ₂	5,89 . 10 ⁻⁵	0,99
Ti	1,40 . 10 ⁻⁴	2,38
Pt/Ti	2,88 . 10 ⁻⁴	4,87

Potensi sel QDSSC-TNTAs untuk produksi hidrogen

Produksi hidrogen secara fotoelektrokimia dengan menggunakan energi matahari melalui reaksi pemecahan air merupakan metode yang menjanjikan untuk memperoleh energi bersih yang ramah lingkungan. Saat ini produksi hidrogen berbasis energi matahari ada lima kelompok besar [Dincer, 2015], yaitu, (i) *photovoltaic*-elektrolisis; (ii) energi panas matahari; (iii) fotokatalisis; (iv) Fotoelektrokimia; dan (v) bio-fotolisis.

Sejauh ini material berbasis TiO₂ banyak digunakan dalam penelitian pengembangan sel fotoelektrokimia [Abe, 2010]. Lapisan TiO₂ dengan struktur satu dimensi atau mesoporous mempunyai beberapa keuntungan sebagai elektroda, diantaranya adalah luas permukaan besar dan meningkatkan transfer muatan. CdS nanopartikel umumnya digunakan sebagai sensitizer untuk memperoleh nanokompisit CdS/TiO₂ yang aktif pada daerah sinar tampak, sehingga sistem dapat dijalankan dengan menggunakan cahaya dari sinar matahari (Zhong, 2912). Lapisan CdS/TiO₂ nanotube umumnya digunakan sebagai fotoanoda dalam sel fotoelektrokimia dan sel *quantum-dot sensitized solar cells* (QDSSC) [Wang 2013]. Sejauh ini pemanfaatan *solar cell* dalam produksi hidrogen melalui reaksi *water splitting* dibagi menjadi dua cara yaitu: (i) *photovoltaic-electrolyzer*, *solar cell* digunakan sebagai sumber energi listrik untuk proses elektrolisis air (Zang, 2015) dan (ii) tandem *photovoltaic-photoanode*, *solar cell* digunakan sebagai tandem sistem fotoelektrokimia. Sel *photovoltaic* yang digunakan untuk sistem tandem umumnya *pn-junction photovoltaic* berbasis material silikon [Wick, 2015] dan *dyes sensitized solar cell* (DSSC) (Prevot 2013).

Posisi metode QDSSC-PEC dibandingkan dengan metode produksi hidrogen berbasis sinar matahari dan air yang sudah ada dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Metode Produksi hidrogen berbasis air dan sinar matahari

Metode gabungan sel surya-fotoelektrokimia merupakan salah satu metode alternatif yang terus dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan dari metode-metode yang ada. Wick dan Tilley (2015) melaporkan efisiensi sebesar 15% menggunakan fotokatalis Cu_2O . Pengembangan metode *pn-junction* semikonduktor-fotoelektrokimia masih dibatasi oleh biaya sintesis material yang mahal dan kesetabilan material dalam larutan air. Gratzel, (2001), Park and Bard (2006), dan Prevot and Sivula (2013) melaporkan sistem tandem DSSC-fotoelektrokimia untuk produksi hidrogen dengan efisiensi 4,5% dan 2,8%.

Beberapa keunggulan QDSSC adalah energi band gap dapat diatur, kemampuan menghasilkan *multiple exciton generation*, mempunyai kesetabilan fotokimia, murah dan koefisien absorpsi yang tinggi, yang dapat mengurangi arus pada kondisi gelap dan meningkatkan efisiensi sel surya secara keseluruhan (Jun, 2013).

Efisiensi sel QDSSC-TNTAs yang diperoleh pada 1400 W/m^2 sebesar 4,87%. Nilai efisiensi ditentukan oleh laju reaksi pembentukan hidrogen. Laju pembentukan hidrogen sel QDSSC-TNTAs dibatasi oleh reaksi reduksi pada

permukaan katoda dan besarnya aliran elektron dari anoda. Pada katoda terjadi kompetisi reaksi reduksi yaitu reaksi reduksi H^+ menjadi H_2 dan reaksi reduksi SO_4^{2-} menjadi S. Reaksi pembentukan sulfur di permukaan katoda akan mengurangi laju pembentukan hidrogen sehingga menurunkan nilai efisiensi sel.

Aliran elektron dari foto anoda dalam PEC ke sistem solar cell dipengaruhi nilai *photocurrent density* yang dihasilkan. Nilai *photocurrent density* ditentukan oleh kemampuan foto anoda menyerap energi cahaya sinar tampak untuk proses fotooksidasi air di zona PEC. Namun *photocurrent density* TNTAs sebagai fotoanoda PEC lebih kecil dibandingkan dengan *photocurrent* maksimal yang dihasilkan QDSSC, sehingga aliran elektron ke zona katalisis tidak optimal yang berdampak pada laju pembentukan hidrogen. Problem ini diatasi dengan *adjustment* rasio foto anoda PEC dan unit DSSC, yang saat ini sedang terus dieksplorasi. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa sel QDSSC-PEC mempunyai potensi yang menjanjikan sebagai strategi baru menghasilkan hidrogen melalui reaksi pemecahan air secara fotoelektrokimia.

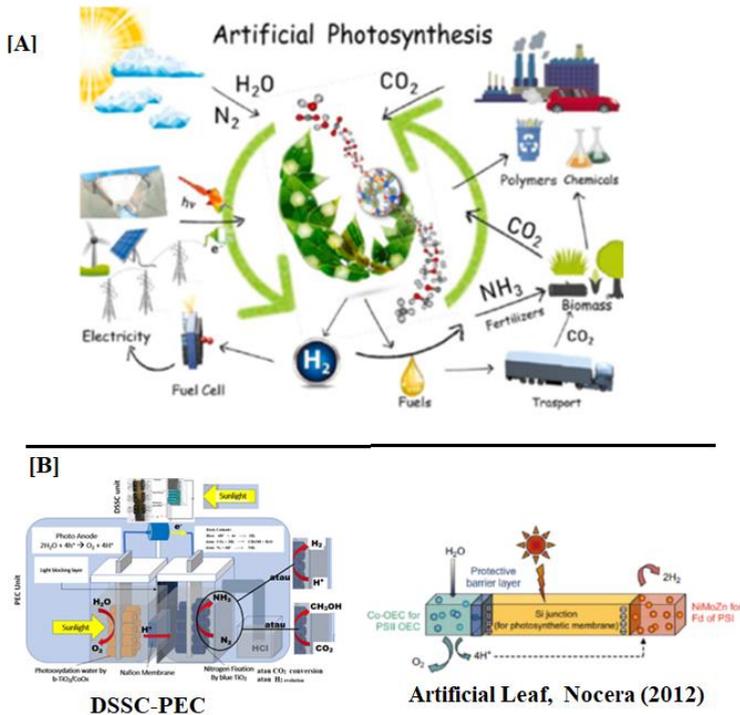
9. Penutup

Dunia saat ini sedang serius mengurangi konsumsi energi yang berasal dari *fossil fuel*, yang tidak ramah lingkungan, karena emisi gas karbon dioksida yang dapat mengancam kemanan global. Keperluan memahami sains dan memiliki teknologi baru yang mampu menyediakan alternatif energi dan sumber energi baru terbarukan sangat krusial. Indonesia sebagai negara tropis yang kaya akan curahan sinar matahari dan kaya akan deposit mineral memiliki posisi atau momentum bagus untuk berkontribusi memecahkan masalah energi tersebut.

Kekayaan sumber daya alam tersebut perlu dibarengi keberadaan jumlah "*critical mass*" sumberdaya manusia yang menguasai ilmu dan teknologi pemanfaat cahaya dan material untuk menjawab tantangan kebutuhan energi masa depan. Ilmu pengetahuan dan teknologi foto (elektro) katalisis, termasuk artifisial fotosintesis, memiliki potensi besar menjawab tantangan kebutuhan energi baru terbarukan yang ramah lingkungan.

Fenomena fotokatalisis dan foto elektrokatalisis mempunyai potensi besar untuk dikelola menjadi proses atau perangkat yang ramah lingkungan untuk penyediaan energi dan sumber energi masa depan. Gambar 21 memberi ilustrasi potensi artifisial fotosintesis untuk penyediaan bahan bakar baru terbarukan bagi berbagai keperluan. Khusus untuk produksi hidrogen secara

artifisial fotosintesis untuk menurunkan emisi CO₂ antropogenik dan secara bersamaan meningkatkan keamanan bahan bakar (Poudyal et al., 2015).



Gambar 21. [A]: Perspektif tinjauan kedepan sumber dan pemakaian energi dari artifisial fotosintesis buatan menuju ekonomi sirkular dan [B]) Konstruksi perangkat artifisial fotosintesis (mimetic sistem tumbuhan) Diadaptasi dari Xie et al, *Bioresource Technology* Volume, 363, November 2022 dan Nocera, D.G., 2012. The artificial leaf. *Acc. Chem. Res.* 45 (5), 767–776

Pada saat ini banyak dikembangkan beberapa perangkat artifisial fotosintesis yang potensial diusulkan sebagai “*emerging technology*” bagi mengatasi masalah energi, kesehatan, dan lingkungan. Diantaranya adalah model sel tandem DSSC-PEC yang kami kembangkan dan model daun artifisial oleh Nocera (2012), yaitu, menggunakan gugus kobalt-fosfat dan paduan terner (Co-OEC dan NiMoZn) menjadi semikonduktor berbasis silikon untuk pemecahan air secara fotokatalitik.

Ucapan Terima Kasih

Hadirin yang Saya Hormati,

Puji syukur kehadirat Allah atas nikmat dan karunia-Nya. Saya mengucapkan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah memberi dukungan dalam melaksanakan Tridharma Perguruan Tinggi selama menjadi staf pengajar FMIPA Universitas Indonesia, sehingga dapat dikukuhkan menjadi Guru Besar Universitas Indonesia di bidang Foto Elektrokimia.

Saya mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua saya, atas semua limpahan kasih sayang yang tak berhingga, Almarhum Bapak Dimiyati Atmoredjo; Almarhumah Ibu Kasirah dan Kedua Mertua saya: Almarhum. Bpk H. M Saleh Mansoer dan Almarhumah Ibu Muhartini. Teriring doa semoga Allah SWT mengampuni semua salah maupun kekhilafannya dan memberikan Tempat yang Mulia di sisi-Nya. Aamiin yaa Rabbal alaamiin.

Dari lubuk hati yang paling dalam saya sampaikan terima kasih kepada istri tersayang Dyah Ratna Permatasari yang selalu setia mendampingi saya, dalam suka maupun duka, yang selalu membantu dalam setiap kesulitan, menerima apa adanya suaminya ini, memiliki kesabaran seakan tidak ada habisnya menghadapi suaminya ini, dan selalu memberi dorongan yang amat sangat dalam menjalani hidup ini, berkarya di Universitas Indoinesia, bekerja dengan riang dalam masa sulit dan masa senang, termasuk akhirnya bisa sampai podium ini. Anak – semata wayang saya Annisa Dyah Lazuardini, yang mengerti dan memaklumi ayahnya, rela menerima segala kekurangan ayahnya.

Terima kasih juga saya ucapkan terhadap kakak-kakak kandung (Almh mbak Jumanah; Mas Mauladi Japroghim, mbak Karomah), Kakak-kakak ipar (almh Ceceu Arfianti; alm mas Faizal Mansoer; alm mas Alex Fachrudin, alm mas Dedi Iskandar, alm mas Noury Hakim; saat ini hadir mbak Djauke Faizal Masoer, terimakasih banyak mbak), Ucaan tertimakasih kepada kakanda alm mas Moechdi, dan almh mbak Suryadiyah, Keluarga besar Moechdi yang diwakili putra putrinya, adik-adik, .eh keponakan (mbak Nunik, dkk)

Saya sampaikan ucapan terima kasih kepada Pemerintah RI khususnya Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia,

Bapak Nadiem Anwar Makarim, BA., MBA. yang telah menetapkan dan mengangkat saya sebagai Guru Besar di FMIPA Universitas Indonesia.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kami haturkan juga kepada Rektor Universitas Indonesia Prof. Ari Kuncoro, S.E., MA, Ph.D. dan Wakil Rektor Universitas Indonesia yang telah banyak memberikan bantuan, melancarkan dan menyetujui pengusulan saya sebagai Guru Besar di lingkungan Universitas Indonesia.

Kepada Dewan Guru Besar (DGB) Universitas Indonesia yang dipimpin oleh Prof. Harkristuti Harkrisnowo, S.H., M.A., Ph.D., beserta seluruh anggota Dewan Guru Besar, Ketua PAK UI (Prof Heru Suhartanto) dan para anggotanya, yang telah menyetujui pengusulan Guru Besar saya, saya sampaikan terimakasih.

Terima kasih Kepada Ketua Senat Akademik UI, Prof. Nachrowi Djalal Nachrowi, MSc., MPhil., Ph.D. dan seluruh anggota Senat Akademik Universitas Indonesia atas bantuan serta dukungannya yang selama ini diberikan kepada saya sehingga saya dikukuhkan menjadi Guru Besar.

Kepada Ketua Dewan Guru Besar FMIPA Universitas Indonesia yang dipimpin oleh Prof. Dr. Sumi Hudiyo, dan sekretaris Prof. Dr. Wibowo, serta seluruh anggota DGB FMIPA saya mengucapkan terima kasih setinggi-tingginya karena telah mendukung pengusulan saya menjadi Guru Besar FMIPA Universitas Indonesia. Saya mohon bimbingan sebagai anggota baru dalam Dewan yang terhormat ini.

Ucapan terima kasih saya sampaikan terimakasih kepada Ketua Senat Akademik FMIPA Universitas Indonesia, Dr. Eko Kusratmoko, beserta seluruh anggota Senat Akademik FMIPA Universitas Indonesia atas dukungan dan bantuannya.

Terima kasih saya sampaikan kepada Bapak Dekan Dede Djuana, PhD yang telah membantu proses pengajuan Guru Besar kami. Terima kasih juga saya sampaikan kepada seluruh Dosen, Karyawan, Mahasiswa dan Alumni FMIPA Universitas Indonesia atas segala dukungannya selama ini pada proses pengangkatan saya sebagai Guru Besar.

Saya mengucapkan terima kasih kepada semua pihak Khususnya Direktorat SDM Universitas Indonesia, Tim SDM FMIPA Universitas Indonesia (mas Rizki,

mas Caya Mikail) dan jajarannya atas bantuannya dan dukungannya dalam menyiapkan berkas pengurusan kenaikan pangkat.

Untuk para dosen, mahasiswa/mantan mahasiswa bimbingan, yang baergabung di Grup Riset Titania Photo Electrocatalysis (TiPEC), terima kasih yang tak terhingga untuk semua kebersamaan dan atmosfer akademik yang kondusif sehingga grup riset menjadi hidup. Semoga semuanya diberikan kesehatan dan kesuksesan, diberikan kemudahan dalam meniti karir ke depan.

Ungkapan rasa terimakasih kami haturkan kepada para dosen, tendik Keluarga Besar Departemen Kimia FMIPA UI. Ketua Departemen saat ini Dr. Asep Saefumillah, dan ketua Departemen sebelumnya Dr. rer.nat. Budiawan yang telah meneruskan usulan gurubesar saya. Para Guru besar Departemen Kimia FMIPA-UI (Prof. Usman Sumo Friend; Prof. Ridla Bakri; Prof. Yoki Yulizar, Prof Ivandini Tribidasari Anggraningrum). Seluruh warga gedung G Kimia UI yang Bersama dalam keseharian bekerja untuk kesuksesan, kemajuan Departemen Kimia FMIPA UI yang sama-sama kita cintai bersama.

Billahi taufiq wal hidayah,

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Referensi

- Abe, R., *J.Photochem.Photobiol C: Photochem.Review*, (2010), 11, 179-209
- Adachi K., Ohta K., Mizuno T., *Solar Energy* 53 (2) (1994) 187.
- An'nur ,F.K. "Analisis Aktivitas Sel DSSC/TiO₂ Nanotube- BiOBr Untuk Reduksi Nitrogen Menjadi Ammonia" . Tesis Magister Ilmu Kimia FMIPA-UI, 2019
- APHA, *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*, 18th Ed., Washington, 1992, 4.18-4.31.

- Bicer, Y., & Dincer, I. (2017). *Journal of The Electrochemical Society*, 164(8), H5036–H5042.
<https://doi.org/10.1149/2.0091708jes>
- Budiman H., Wibowo R., Zuas O., **Gunlazuardi J**, *Processing and Application of Ceramics* 15 [4] (2021) 417–427.
- Butterfield I.M. , Christensen, P.A. . Curtis T.P and Gunlazuardi J, *J. Water Research*, vol.31, No.3, p.675, 1997
- Butterfield I.M. , Walker S.A. , Hoffmann M.R., *J.App. El.Chem*, 27 1997
- Chauret C P, Radziminski C Z, Lepuil M, Creason R, Andrews R C *Appl Environ Microbiol*. 2001 Jul;67(7):2993-3001
- *Chiang K., Amal R., Tran T., Adv. Environ. Res. 6 (2002) 471.*
- *Corso, P.S.; Kramer, M. H.; Blair, Kathleen A.; Addiss, D.G.; Davis, J. P.; Haddix, A.C. (2003). "Costs of Illness in the 1993. Waterborne Cryptosporidium Outbreak, Milwaukee, Wisconsin". Emerging Infectious Diseases.9 (4): 426–431*
- *Diebold U., Surface Science Report 48 (2003) 53-*
- Dincer, I., and Acar, C, *Int. J. Hydrogen Energy*, (2015), 40, 1109-1111
- *Fazio S., Guzm'an J., Colomer M.T., Salomoni A., Moreno R., Journal of the European Ceramic Society 28 (2008) 2171–2176.*
- Gonzalez, M.L. G. and Salvador, P. J. *Electroanal. Chem.* 325 (1992) 369.
- Gratzel, M.,, *Nature*, (2001), 414, 338-344.
- **Gunlazuardi J.** and Lindu W.A., "*Journal of Photochemistry and PhotoBiology A: Chemistry*, 173(1): 51–55. [2005]

- **Gunlazuardi J.**, Fisli A., Ridwan R., Krisnandi Y.K, and Robert D., *Makara Journal of Science*, 25/4 (2021), 236–246
- *Hamnet, A.; Crompehensif Kinetic, 1987*
- Harnly M.E. , Petreas, J. Flattery M.E., Goldman L.R., *Environ. Sci. Technol.* 34 (2000) 1143–1149.
- Harper J.C., Christensen P.A., Egerton T.A., Curtis T.P. and **Gunlazuardi J** *Journal of Applied Electrochemistry* 31:623-628, 2001
- Hayes, W.J., Laws E.R. *Handbook of Pesticide Toxicology, Classes of Pesticides*, vol. 3, Academic Press, 1991, pp. 1206–1216.
- *Hirakawa H., Hashimoto M., M.Shiraishi, and Hirai T., J. Am. Chem. Soc.* **139**, 10929–10936 (2017).
- Ireland J.C., *Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air*, Elsevier1993
- Jennings, J. R. *Catalytic Ammonia Synthesis: Fundamentals and Practice* (Springer Science & Business Media, New York, 2013).
- Jun, H.K., Careem, M.A., Arof, A.K.,, *Renewable and Sustainable Energy Review*,22, (2013),146-167.
- Lawton L.A. and Robertson P.K.J., *Chem.Soc. Rev.* , 28, 1999
- Matsunaga T. and Okochi M., *Environ. Science. & Tech*, 29, 1995
- Mohapatra, S.K., Raja, K.S., Mahajan, V.K., and Misra, M., *J. Phys. Chem.C.*, (2008), 112, 11007-11012.
- Nguyen V-H., Singh P.,Sudhaik A., Raizada P., Le Q.V, HelmyE.T., *Materials Letters* 313 (2022) 131781
- Nurdin M., Wibowo W., Supriyono S., Febrian M.B., dan

Gunlazuardi J. ^{*)}: *J. Makara Seri Sains* Vol 13, No. 1 [April 2009].

- Park, J.H., and Bard, A.J., , *Electrochem.solid.state.lett.*, (2006), 9, 5-8
- Prevot, M., and Sivula, K.,, *J.Phys.Chem:C.*, (2013), 117, 17879-17893.
- Qin, Guohui, Zhang, Yue, Ke, Xuebin, Tong, Xinli, Sun, Zhe, Liang, Mao, & Xue, Song (2013). *Applied Catalysis B: Environmental*, 129, pp. 599-605
- Ratnawati R., **Gunlazuardi J.**, Dewi E.L., and Slamet S. : "Effect of NaBF₄ addition on the anodic synthesis of TiO₂ nanotube arrays photocatalyst for production of hydrogen from glycerol-water solution", *International Journal of Hydrogen Energy*, , 39, 16927-16935, 2014.
- Ratnawati R., **Gunlazuardi J.**, Slamet S., : *Materials Chemistry and Physics* 160 (2015) 111-118
- Ruan I., Liu j, Zhou Qi, Hu Jiajia, Xu Guangqing, Shu Xia and Wu. Yucheng (2014). *New J. Chem*, 38, 3022—3028.
- Simmons N.A., *Biologist*, 38, 1998
- Slamet S., Ratnawati R., **Gunlazuardi J.**, Dewi E.L *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 42, Issue 38, 21 September 2017, Pages 24014-24025
- Slamet, Hosna W. Nasution, Ezza Purnama, Soleh Kosela , **Jarnuzi Gunlazuardi***: "Photocatalytic reduction of CO₂ on copper-doped Titania catalysts prepared by improved-impregnation method" *Catalysis Communications* 6 (2005) 313–319
- Slamet, Nasution H.W., Purnama E., Kosela S. , **Gunlazuardi J***: *Catalysis Communications* 6 (2005) 313–319

- Subrahmanyam M., Kaneco S., Alonso-Vante N., *Appl. Catal. B: Environ.* 23 (2–3) (1999) 169.
- Suhardono E., **Gunlazuardi J.**, Nasikin M: "Metode penghilangan polutan organik didalam air limbah buangan dengan matahar sebagai sumber radiasinya". Dirjen HAKI Dep. Kehakiman dan HAM RI tanggal 3 Nopember 2004, **Nomor Paten ID 0 014 584**
- Suhardono E., **Gunlazuardi J.**, Nasikin M: "Reaktor kolom berbahan dasar gelas kuarsa untuk mendestruksi senyawa organik dan mematikan mikroorganisme dalam air". Dirjen HAKI Dep. Kehakiman dan HAM RI, 24 Desember 2004 **Nomor Paten: ID 0 014 914**
- Surahman H.: " Pengembangan Sel Fotoelektrokimia Menggunakan Elektroda TiO₂ *Nanotube Arrays* Tersensitasi CdS Nanopartikel Untuk Produksi Hidrogen", Desertasi Doktor Ilmu Kimia 2017
- Syauqi M.I., Kadja G.T.E., **Gunlazuardi J.**, *Malaysian Journal of Science (MJS)*, in production (in press), 2022
- Syauqi, M.I. : "Pengembangan sistem Artificial Photosynthesis untuk Konversi Fotokatalitik secara Simultan Gas Nitrogen dan Karbondioksida menjadi Fine Chemical" Tesis Magister Ilmu Kimia FMIPA-UI, 2019
- *Theurich J., Lindner M., Bahnemann D.W., Langmuir* 12 (1996) 6368–6376.
- *Tseng I.-H., Chang W.-C., Wu J.C.-S, Appl. Catal. B: Environ.* 37 (2002) 37.
- Wang, B., Ding, H., Hu, Y., Zhou, H., Wang, S., Wang, T., Liu, R., Zhang, J., Wang, X., and Wang, H.,, *Int.J.Hydrogen.Energy*, (2013), 38, 16733-16739
- *Weavers L.K., Malmstadt N., Hoffmann M.R., , Environ. Sci.*

Technol. 34 (2000) 1280–1285

- Wick, R., and Tilley, S.D., *J. Phys.Chem:C*, (2015), 119, 26243-26257.
- Yamashita H., Nishiguchi H., Kamada N., Anpo M., *Res. Chem. Intermed. 20 (8) (1994) 815.*
- Yang, Z., Zhang, G., and Lin, B., *Int.J.Hydrogen.Energy*, (2015), 40, 3170-3179
- Zhao H., Jiang D., Zhang S., Catterall K., John R., *Anal. Chem. 76 (2004) 155-160.*
- Zhong, M., Shi, J., Xiong, F., Zhang, W., and Li, C., *Solar Energy*, (2012), 86, 756-763
- Zuas O., Kim J.S., and Gunlazuardi J., *Indo. J. Chem.*, 2014, 14 (2), 122 - 13

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



A. IDENTITAS DIRI

Nama Lengkap; gelar	Prof. Dr. Jarnuzi Gunlazuardi
Jenis Kelamin	Laki-laki
Pekerjaan	Pegawai Negeri Sipil (PNS) – Dosen
NIP /NIDN	195804051986031001 / 0005045802
Fakultas/Departemen	MIPA / Kimia
Gol/Pangkat/Golongan	IV A / Lektor Kepala / Guru Besar
e-mail	jarnuzi@ui.ac.id
Nomor telepon / HP	+62-8159988280
Tempat, tanggal lahir	Yogyakarta / 5 April 1958
Agama	Islam
Alamat rumah	Lebak Bulus Indah, Blok G, No.1, Jl Pertanian Raya, Lebak Bulus, Cilandak, Jakarta Selatan
Nama Orang Tua	Kasirah (Almh) & Dimiyati Atmorejo (Alm)
Nama Istri	Dyah Ratna Permasari
Nama Anak	Annisa Dyah Lazuardini

B. RIWAYAT PENDIDIKAN TINGGI FORMAL

Tahun (lulus)	Keterangan
1993	Ph.D Environmental Chemistry; Ehime University, Matsuyama, Japan
1990	M.Env.Chem.; Ehime University, Matsuyama, Japan

1984	Drs. Kimia, Universitas Indonesia
1979	BSc. Kimia, Universitas Indonesia
1975	SAA, Indonesia, Yogyakarta
1972	SMP Muhammadiyah, Godean, Yogyakarta
1970	SD, Muhammadiyah, Godean, Yogyakarta

C. RIWAYAT PENDIDIKAN INFORMAL

Tahun	Keterangan
2003	Visiting Researcher University of New Castel, upon Tyne, UK , [Dr. P.A. Christensen (Development of Novel Photo electro catalyst and Photo electro catalytic Reactor), (Oct -Dec 2003)
1999	Visiting Researcher University of New Castel, upon Tyne, UK , [open HDR. P.A. Development of Novel Photo catalyst and Photo electro catalytic Reactor), June-August 1999)
1997	Visiting Researcher University of New Castel, upon Tyne, UK , [Dr. P.A. Christensen (Photo electro catalytic Detoxification of Water;), (July -Sept. 1997; June-August 1999;)
1996	Visiting Researcher University of New Castel, upon Tyne, UK , [Dr. P.A. Christensen (Photo electro catalytic Detoxification of Water), (Nov. '95 ~Feb.'96)
1994	Radiation Technology and Environment; Takasaki, Jepang, IAEA-JAERI

D. RIWAYAT PEKERJAAN

Tahun	Keterangan
1986- Sekarang	Pengajar Universitas Indonesia
1995	Asisten Ahli
2001	Lektor, Sekretaris Program Studi Pascasarjana FMIPA-UI
2003	Lektor Kepala
2004	Ketua Departemen Kimia FMIPA-UI
2009	Ketua Program Studi Pascasarjana FMIPA-UI
2020	Anggota Senat Akademik Fakultas MIPA-UI Anggota Senat Akademik Universitas Indonesia
2022	Guru Besar

E. RIWAYAT ORGANISASI

No	Tahun / Periode	Perusahaan / Institusi	Jabatan
1	2018 – 2022	Himpunan Kimia Indonesia	Advisory Board
2	2010	Himpunan Kimia Indonesia	Ketua II
3	1994	American Chemical Society	

F. RIWAYAT MENGAJAR

No	Nama Mata Kuliah
1	Kimia Analisa Spektrometri (S1)
2	Kimia Analisa Thermal (S1)
3	Kimia Analisa Sinar X (S1)
4	Pengantar Penelitian (S1)
5	Cara-cara Pemisahan (S1)
6	Kimia Dasar (S1)
7	Kimia Instrumentasi Lanjut (S2)
8	Foto elektro katalisis (S2)
9	Metoda Eksperimen Fotokatalisis (S3)
10	Kapita Selekt: Fotokatalisis (S3)

G. RIWAYAT PENGHARGAAN/PATEN/HKI

No	Judul Penghargaan / Paten / HKI	Tahun	Jenis Penghargaan / KI	Nomor	Status KI
1	"METODE MODIFIKASI ELEKTRODA INTAN TERMODIFIKASI BORON MENGGUNAKAN BIMETAL NIKEL-	2020	Paten Sederhana	Nomor Paten: IDS000003285	Granted

	KOBALT DENGAN KESTABILAN TINGGI”				
2	Dosen Berprestasi Bidang Akademik Tingkat Fakultas MIPA UI tahun 2008	2008			
3	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	2007		011/TK/TAHUN 2007	
4	"Metode penghilangan polutan organik didalam air limbah buangan dengan matahari sebagai sumber radiasinya".	2004	Paten	Nomor Paten: ID 0 014 914	Granted
5	"Reaktor kolom berbahan dasar gelas kuarsa untuk mendestruksi senyawa organik dan mematikan mikroorganisme dalam air".	2004	Paten	Nomor Paten: ID 0 014 914	Granted
6	Peneliti Terbaik Bidang MIPA dan Kesehatan	2000		(SK Direktur P4M DIKTI- DEPDIKNAS No: 438/D3/T/2000)	

H. RIWAYAT HIBAH PENELITIAN

No	Judul Penelitian	Tahun
1	Sintesis dan Karakterisasi BiOBr/TiO ₂ Nanotubes dengan Metode SILAR dan Penerapannya pada Sistem Tandem Dye Sensitized Solar Cell -Photoelectrochemistry (DSSC-PEC) untuk Konversi Nitrogen Menjadi Amonia	2022
2	Pengembangan Sel Fotoelektrokimia untuk Reaksi Simultan Evolusi Hidrogen dan Degradasi Zat Organik dalam <i>Salty Water</i>	2022
3	"Studi Dasar dan Terapan Artifisial Fotosintesis Menggunakan Sistem Tandem Sel Surya dengan Sel Foto Elektro Kimia untuk Fiksasi Nitrogen dan Karbon Dioksida."	2021

4	"Artifisial Fotosintesis Berbasis Foto Elektro Kimia untuk Penyediaan (i) Sumber Energi Terbarukan dan (ii) Fine Chemicals: Pengembangan Divais Baru Berbasis Solar Driven Fuels and Fine Chemicals	2018-2020
5	Modified QD Sensitized Solar Cell Having Catalyst Zone Extension As a New Approach To Produce Hydrogen From Water By Visible Light. Bilateral Collaboration JSPS-DGHE Universitas Indonesia Mitra: Kyoto University	2015-2017
6	Solar Photocatalytic Treatment Of Water Contaminated By Pesticides From Oil Palm Plantation Kolaborasi Luar Negri DIKTI Universitas Indonesia Mitra: LMSPC-Universitas Strabourg, France	2012 - 2014

I. RIWAYAT BIMBINGAN MAHASISWA DOKTOR

No	Posisi	Mahasiswa	Program Studi	Th	No. SK	Topik
1	Co-Promotor	Yulia Mariana Tesa Ayudia Putri	Doktor Ilmu Kimia FMIPA-UI	2022		Sintesis NiCo MOF-74 Pada Nikel Oksida Berpori Untuk Aplikasi <i>Fuel Cell</i> Berbahan Bakar Urea
2	Promotor	Harry Budiman	Doktor Ilmu Kimia FMIPA-UI	2022		Studi Preparasi Dan Karakterisasi Cacat Terkendali Pada Anatase TiO ₂ Nanotube (Ti ³⁺ -TiO ₂) Serta Aplikasinya Untuk Sensor Gas Karbon Monoksida
3	Promotor	Hedi Surahman	Doktor Ilmu Kimia FMIPA-UI	2017		Pengembangan Sel Fotoelektrokimia Menggunakan Elektroda TiO ₂ nanotube Arrays Tersensitasi CdS Nanopartikel Untuk Produksi Hidrogen

4	Promotor	Anthoni Batahan Aritonang 1406665174	Doktor Ilmu Kimia FMIPA-UI	2017	2757/SK/R/UI/2017	Pengembangan Fotokatalis Ag/N ko-doped TiO ₂ sebagai Elektroda Fotoelektrokatalitik untuk Degradasi Polutan Organik (Metilen biru) dengan Bantuan Sinar Tampak
5	Co-Promotor	Khoiriah 1530412006	Doktor Ilmu Kimia FMIPA Universitas Andalas	2017	474/XIII/DFMIP A/2017	DEGRADASI PESTISIDA DIAZINON SECARA AOPs DENGAN PENAMBAHAN KATALIS C,N-CODOPED TiO ₂ DAN ANALISIS SECARA SPEKTROFOTOMETRI DAN KROMATOGRAFI
6	Promotor	Supriyono 1106142993	Doktor Ilmu Kimia FMIPA-UI	2016	0522/SK/R/UI/2016	Pengembangan Quantum Dot Sensitized Solar Cell dengan Memanfaatkan Surface Plasmon Resonance Nanopartikel Au
7	Promotor	LANY NURHAYATI 1106044705	Doktor Ilmu Kimia FMIPA-UI	2016	0846/SK/R/UI/2016	BIOAUGMENTASI TANAH SAWAH TERCEMAR HEPTAKLOR OLEH BAKTERI TEMPATAN DAN BIOCHAR TEMPURUNG KELAPA
8	Promotor	Oman Zuas 0806400680	Doktor Ilmu Kimia FMIPA-UI	2014	0837/SK/R/UI/2014	Komposit Nano Oksida Tembaga-Seng-Titanium untuk Reduksi CO ₂ dalam system bertekanan.

9	Promotor	ADEL FISLI 1006751363	Doktor Ilmu Kimia FMIPA-UI	2014	0369/SK/R/UI/2014	PENGEMBANGAN FOTOKATALIS BERMAGNET (Fe ₃ O ₄ /SiO ₂ /TiO ₂) UNTUK ELIMINASI ZAT ORGANIK (Metilen Biru dan Paraquat) DALAM AIR
10	Co-Promotor	Misriyani P0700312403	Doktor Ilmu Kimia FMIPA Universitas Hasanudin	2013	SK Revisi UN HAS 122 609 /UN 4/P 25 /20 13	

J. RIWAYAT BIMBINGAN MAHASISWA MAGISTER

No	NPM	Mahasiswa	Program Studi	Tesis	Tahun
1	1906320903	RIZKY AZMIARTI ISTIQOMAH	Magister Ilmu Kimia	SISTEM TANDEM SEL SURYA TERSENSITASI ZAT WARNA FOTOELEKTROKIMIA (DSSC-PEC) TiO ₂ NANOTUBE/BiOBr UNTUK PRODUKSI HIDROGEN	
2	1906320765	APRIZAL	Magister Ilmu Kimia	Sistem Tandem Sel Surya Tersensitasi Zat Warna-Fotoelektrokimia (DSSC-PEC) menggunakan TiO ₂ NT/BiOI Untuk Konversi Nitrogen Menjadi Amonia	

3	170698 9216	WARINGIN MARGI YUSMAMAN	Magister Ilmu Kimia	Sintesis Nanokomposit TiO ₂ Termodifikasi Asam Oleat yang Terdispersi pada Polyvinyl Butyral dengan Sifat Antibakteri	
4	170612 2933	Liya Nikmatul Maula Zulfa Saputri	Magister Ilmu Kimia	Studi Penggunaan Fotoanoda TiO ₂ Nanotubes Arrays (TNTAs) Tersensitasi S,N-Graphene Quantum Dots (S,N-GQDs) Pada Sistem DSPEC-DSSC untuk Produksi Hidrogen	
5	170608 1593	Fitrana Kurniawan An'nur	Magister Ilmu Kimia	Analisis Aktivitas Sel DSSC/TiO ₂ Nanotube- BiOBr Untuk Reduksi Nitrogen Menjadi Amonia	
6	150669 4326	Mohammad Jihad Madiabu	Magister Ilmu Kimia	Degradasi Rhodamin B Menggunakan Sel Fotoelektrokimia dengan TiO ₂ /BiVO ₄ sebagai Fotoanoda.	
7	140665 6251	Annisa Dewi Pangestuti	Magister Ilmu Kimia	Studi Degradasi Rhodamin B pada Zona Katalisis dalam Sistem Quantum Dot CdS Sensitized Solar Cells (QD-CdS- SSC) Termodifikasi	
8	140658 2133	NURLELA	Magister Ilmu Kimia	STUDI INTERAKSI EKSTRAK DYES KLOROFIL ALAMI DARI DAUN SINGKONG UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI DSSC	
9	140658 2083	FAHMI SYAFAAT	Magister Ilmu Kimia	Studi Awal Pembentukan Gas Hidrogen dari Aqueous Solutions dengan sel Fotoelektrokimia menggunakan DSSC yang ter sensitivitas Dyes Zn-Phorphirin	

10	140665 632	Irfan Ashari Hiyahara	Magister Ilmu Kimia	Pengaruh Nanopartikel Emas Terhadap Efisiensi Dssc Nanotube TiO ₂ Dengan Dye Kurkumin	
11	130636 2232	WIRYA SARWANA	Magister Ilmu Kimia	DEGRADASI RHODAMINE B MENGGUNAKAN SISTEM HIBRID DYE SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) - FOTOKATALISIS	
12	130636 2106	FIFI NURFIANA	Magister Ilmu Kimia	STUDI SPEKTROELEKTROKIMIA RHODAMINE B-TiO ₂ DALAM SISTEM DYE SENSITIZED SOLAR CELLS	
13	120617 9832	MERI ELIYA	Magister Ilmu Kimia	Sintesis Dan Aplikasi TiO ₂ Nanotube Sebagai Kapasitor Dan Pendukung Kapasitor Elektrokimia RuO ₂ /TiO ₂	
14	120617 9725	LINDA JATI KUSUMAWA RDANI	Magister Ilmu Kimia	Sel Surya Tersensitasi Zat Warna Alizarin Red S Berbasis TiO ₂ Nanotube Berbentuk Serbuk yang diperoleh dengan Teknik Rapid Breakdown Anodization	
15	110602 7876	HENRY HANDOYO	Magister Ilmu Kimia	Sel Surya Tersensitasi Zat Warna Berbasis TiO ₂ Yang Dimodifikasi Dalam Bentuk Tabung	
16	100673 4501	SUCI MULYA PRIMA	Magister Ilmu Kimia	Pengembangan Sistem Sensor COD (Chemical Oxygen Demand) Berbasis Fotoelektrokatalisis : Probe untuk Sistem Alir dan Investigasi Pemakaian Standar Adisi	
17	090657 7236	Destya Enggrit Kusumo	Magister Ilmu Kimia	Preparasi Nanopartikel Titania Menggunakan Aseton Beramonia Sebagai Media	

				Reaksi Serta Beberapa Hasil Karakterisasinya	
18	080642 1810	IRWAN SANTOSO	Magister Ilmu Kimia	Pengembangan Sistem Sensor Chemical Oxygen Demand Berbasis Fotoelektrokatalisis : Karakterisasi Elektroda TiO ₂ /FTO dan Respon Arus Cahaya Terhadap Beberapa Senyawa Organik	
19	080642 1786	HENDRA ADHI PRATAMA	Magister Ilmu Kimia	Sintesis dan Karakterisasi Suspensi TiO ₂ Nanopartikel berbasis Medium Air	
20	060600 1916	Siti Nurjanna	Magister Ilmu Kimia	Degradasi Congo Red Secara Fotokatalitik Menggunakan Lapisan Tipis TiO ₂ yang Diimobilisasi Dengan Metoda Sol-Gel Pada Dinding Bagian Dalam Kolom Tabung Gelas	

K. RIWAYAT PUBLIKASI

Tahun	Keterangan
2022	Yunita, Yunita; Syauqi, Muhammad Iqbal; and Gunlazuardi, Jarnuzi: "Comparative Study of Bismuth Ferrite Deposition Method on TiO ₂ Nanotube and Performance of Hydrogen Evolution in a Photoelectrochemical Dye-Sensitized Solar Cell Tandem System," Makara Journal of Science: Vol. 26: Iss. 3, 190-199 Article 5. DOI: 10.7454/mss.v26i3.1387
2022	Muhammad Iqbal Syauqi, Grandprix TM Kadja, Jarnuzi Gunlazuardi*: "BLUE TiO ₂ NANOTUBE (b-TiO ₂) AS SUPPORT MATERIAL ELECTRODE IN PHOTOELECTROCHEMICAL (PEC) CELL FOR NITROGEN FIXATION", Malaysian Journal of Science (MJS), in production (in press), 2022
2022	Aliyah, N., Nasution, M.A.F., Ayudia Putri, Y.M.T., Gunlazuardi, J., Ivandini, T.A.: "Modification of carbon foam with 4-mercaptobenzoic acid functionalised gold nanoparticles for an application in a yeast-based microbial fuel cell" <i>RSC Advances</i> 12(44), pp. 28647-28657

2022	Gunlazuardi, J., Kurniawan, A.D., Jiwanti, P.K., Einaga, Y., Ivandini, T.A.: "Core-shell copper-gold nanoparticles modified at the boron-doped diamond electrode for oxygen sensors" <i>Analytical Methods</i> , 2022, 14(7), pp. 726–733
2022	Putri, Y.M.T.A., Gunlazuardi, J., Ivandini, T.A.: "Electrochemical Preparation of Highly Oriented Microporous Structure Nickel Oxide Films as Promising Electrodes in Urea Oxidation", <i>Chemistry Letters</i> , 2022, 51(2), pp. 135–138
2021	Harry Budiman ^{1,2} Rahmat Wibowo ¹ , Oman Zuas ² , Jarnuzi Gunlazuardi ^{1,*} : "Effect of annealing temperature on the characteristic of reduced highly ordered TiO ₂ nanotube arrays and their CO gas-sensing performance", <i>Processing and Application of Ceramics</i> 15 [4] (2021) 417–427.
2021	Yulia M T A Putri, Prastika K Jiwanti, Irkham, Jarnuzi Gunlazuardi, Yasuaki Einaga, and Tribidasari A Ivandini: "Nickel-Cobalt Modified Boron-Doped Diamond as an Electrode for a Urea/H ₂ O ₂ Fuel Cell", <i>Bull. Chem. Soc. Jpn.</i> 2021, 94, 2922–2928 doi:10.1246/bcsj.20210301
2021	Jarnuzi Gunlazuardi, Adel Fisli, Ridwan, Yuni Krisyuningsih Krisnandi, and Didier Robert: "Magnetically Separable Fe ₃ O ₄ /SiO ₂ /TiO ₂ Photocatalyst Composites Prepared through Hetero Agglomeration for the Photocatalytic Degradation of Paraquat" <i>Makara Journal of Science</i> , 25/4 (2021), 236–246
2021	Zulys, A., Adawiah, A., Gunlazuardi, J., Yudhi, M.D.L.: "Light-Harvesting Metal-Organic Frameworks (MOFs) La-PTC for Photocatalytic Dyes Degradation", <i>Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis</i> , Volume 16, Issue 1, Pages 170 - 178 31 March 2021
2021	Saepudin E., Yuliani T., Musyarofah N.R.R., Nasution M.A.F., Gunlazuardi J., Einaga Y., Ivandini T.A.: "Nickel hydroxide nanoparticles for application in immunochromatographic strip tests of melamine", <i>Sensors and Materials</i> , Volume 33, Issue 3-2, Pages 1027 - 1036 12 March 2021

2021	Prayikaputri P.U., Jiwanti P.K., Nasution M.A.F, Gunlazuardi J., Saepudin E., Einaga Y., Ivandini T.A.: "Micro-band Boron-doped Diamond Electrode in Capillary Electrophoresis for Simultaneous Detection of AMP, ADP, and ATP", <i>International Journal of Technology</i> , 2021, 12(2), pp. 252–262
2020	Yulizar, Y., Gunlazuardi, J., Apriandanu, D.O.B., Syahfitri, T.W.W.: "CuO-modified CoTiO ₃ via <i>Catharanthus roseus</i> extract: A novel nanocomposite with high photocatalytic activity", <i>Materials Letters</i> , 2020, 277, 128349
2020	L N M Z Saputri and J Gunlazuardi: "TiO ₂ Nanotube Array Prepared by Anodization in Aqueous Electrolyte Containing Sodium Carboxyl Methyl Cellulose", <i>J. Phys.: Conf. Ser.</i> 1593 012043
2020	Munawar Khalila Talitha H.Rangkutia Fadlinatin NaumiaJarnuzi GunlazuardiaTribidasari A. IvandiniaGrandprix T.M. KadjabcdJacob Y.Mulyanae: "A synergy of CdSe sensitization and exposure of TiO ₂ (0 0 1) facet in CdSe-TiO ₂ nanostructures for photoreduction of bicarbonate" <i>Inorganic Chemistry Communications Volume 118</i> , August 2020, 107992.
2020	Khoiriah, K., Safni, S., Syukri, S., Gunlazuardi, J. The operational parameters effect on photocatalytic degradation of diazinon using carbon and nitrogen modified TiO ₂ (2020) <i>Rasayan Journal of Chemistry</i> , 13 (3), pp. 1919-1925. Cited 5 times.
2019	Khalil, M., Gunlazuardi, J., Ivandini, T.A., Umar, A : "Photocatalytic conversion of CO ₂ using earth-abundant catalysts: A review on mechanism and catalytic performance"., <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 2019, 113, 109246
2019	Khalil, M., Rahmaningsih, G., Gunlazuardi, J., Umar, A.: "The influence of plasmonic Au nanoparticle integration on the optical bandgap of anatase TiO ₂ nanoparticles.", <i>International Journal of Technology</i> , 2019, 10(4), pp. 808–817

2017	Slamet, Ratnawati, Jarnuzi Gunlazuardi, Eniya Listiani Dewi: "Enhanced photocatalytic activity of Pt deposited on titania nanotube arrays for the hydrogen production with glycerol as a sacrificial agent" International Journal of Hydrogen Energy Volume 42, Issue 38, 21 September 2017, Pages 24014-24025
2017	Fisli, A., Ridwan, Krisnandi, Y.K., Gunlazuardi, J. Preparation and characterization of Fe ₃ O ₄ SiO ₂ TiO ₂ composite for methylene blue removal in water (2017) International Journal of Technology, 8 (1), pp. 76-84.
2015	Ratnawati, Jarnuzi Gunlazuardi, Slamet: "Development of titania nanotube arrays: The roles of water content and annealing atmosphere" Materials Chemistry and Physics 160 (2015) 111-118
2014	Ratnawati Ratnawati; Jarnuzi Gunlazuardi, Eniya Listiani Dewi, and Slamet : "Effect of NaBF ₄ addition on the anodic synthesis of TiO ₂ nanotube arrays photocatalyst for production of hydrogen from glycerol-water solution", International Journal of Hydrogen Energy, , 39, 16927-16935, 2014
2009	M.Nurdin, W. Wibowo, Supriyono, M.B. Febrian, dan J. Gunlazuardi*): "Pengembangan Metoda Baru untuk Penentuan COD (Chemical Oxygen Demand) Berbasis Fotoelektrokatalisis: Karakterisasi Elektroda Kerja Lapis Tipis TiO ₂ -/ITO"; J. Makara Seri Sains Vol 13, No. 1 [April 2009].
2005	Slamet, Hosna W. Nasution, Ezza Purnama, Soleh Kosela , Jarnuzi Gunlazuardi*: "Photocatalytic reduction of CO ₂ on copper-doped Titania catalysts prepared by improved-impregnation method" Catalysis Communications 6 (2005) 313–319
2005	J.Gunlazuardi and Winarti A Lindu: "Photocatalytic degradation of pentachlorophenol in aqueous solution employing immobilised TiO ₂ supported on titanium metal "Journal of Photochemistry and PhotoBiology A: Chemistry, 173(1): 51–55. [2005]
1999	J.C. Harper, P.A. Christensen, T.A. Egerton, T.P. Curtis and J. Gunlazuardi: "Effect of catalyst type on the kinetics of the

	photoelectrochemical disinfection of water inoculated with E.coli” Journal of Applied Electrochemistry 31:623-628, 2001
1997	I.M. Butterfield , P.A. Christensen, T.P. Curtis and J. Gunlazuardi: “Water Disinfection Using An Immobilised Titanium Dioxide Film In A Photochemical Reactor With Electric Field Enhancement”, J.Water Research, vol.31, No.3, p.675, 1997

L. RIWAYAT MITRA BESTARI / REVIEWER JURNAL BEREPUTASI

No	Nama Jurnal
1	Journal of Physical Chemistry, ACS
2	Chemical Engineering Journal, Elsevier
3	Current Research in Green and Sustainable Chemistry, Elsevier
4	Inorganic Chemistry Communication, Elsevier
5	Journal of Environmental Chemical Engineering, Elsevier
6	Fuel, Elsevier
7	<i>Catalysis Science & Technology</i> , RSC